



กลุ่มที่ 3

บทความระดับชาติ

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(National Papers in
Science and Technology)



กลุ่มย่อยที่ 1
วิศวกรรมศาสตร์ (1)

การออกแบบถังพักไฮดรอลิกส์ ภายใต้ภาระโหลดความร้อน
ด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล
HYDRAULIC RESERVOIR TANK DESIGN UNDER THERMAL LOAD
USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHODS

เกียรติศักดิ์ สกุลพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: Kiattisak.sa@spu.ac.th

ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: Thanapat.pr@spu.ac.th

บทคัดย่อ

คุณภาพน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่ไม่สมบูรณ์และน้ำที่ผสมกับน้ำมันไฮดรอลิกส์ รวมไปถึงการเกิดฟองอากาศและอุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกส์ในระบบร้อนเกินไป เป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบไฮดรอลิกส์ต้องหยุดทำงานทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่ถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ คุณสมบัติความหนืดจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์ขนาดมิติและปริมาตรน้ำมันในถังพักจึงเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการวิเคราะห์หาภาระโหลดความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิกส์เกรด ISO VG68 โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหลถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบผลเฉลยของกรณีศึกษาที่ได้สร้างขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาตรน้ำมันไฮดรอลิกส์ควรมีสัดส่วน 65% ของปริมาตรทั้งหมดของถังพัก และการเพิ่มแผ่นกั้นภายในถังพักที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 5 และ 15 องศาเซลเซียส จะมีฟลักซ์ความร้อนเกิดขึ้น 2.157 kW/m^2 และ 2.869 kW/m^2 ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศภายนอกได้เร็วขึ้นกว่าถังพักมาตรฐาน 80 วินาที ในขณะที่ขนาดมิติของถังพักไฮดรอลิกส์ มีผลกระทบเล็กน้อยกับการระบายความร้อน

คำสำคัญ: ถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์, อัตราการถ่ายเทความร้อน, การจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ABSTRACT

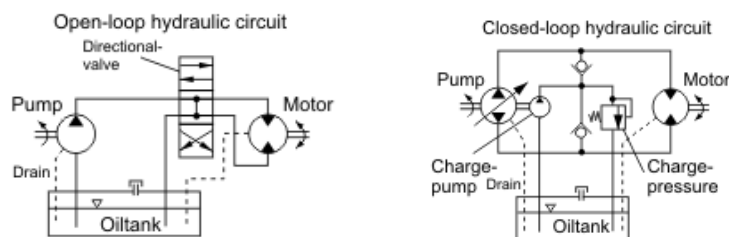
The quality of hydraulic oil, condensation, air bubbles, and increase in the temperature of hydraulic oil are the reasons of the hydraulic system downtime that occurs at the hydraulic reservoir tank. The properties of lubricants depend on the hydraulic oil temperature. Dimension and volume variables of hydraulic reservoir tank were used to calculate the heat load of hydraulic oil grade ISO VG68. Computational Fluid Dynamics approach was used to verify the results of assumptions that has been created for comparison with theoretical calculations. The results shown that the volume of hydraulic oil in the tank should not exceed 65 percent of total hydraulic reservoir volume. Adding a baffle inside the hydraulic reservoir tank with a hydraulic oil temperature difference

of 5 and 15 degrees Celsius, the heat flux was approximately 2.157 kW/m² and 2.869 kW/m². As a result, the heat transfer to the surrounding area is 80 seconds faster than the standard hydraulic reservoir tank. While the dimensions of the hydraulic reservoir it has little impact on heat dissipation.

Keywords: Hydraulic reservoir tank, Heat transfer rate, Numerical simulation

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system) เป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมเกือบจะทุกประเภท ระบบไฮดรอลิกเบื้องต้นมีส่วนสำคัญหลักๆ 3 ส่วน ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายพลังงาน, ระบบควบคุมการทำงาน, และอุปกรณ์ทำงาน การทำงานของระบบไฮดรอลิกจะเหมือนกับระบบนิวเมติกส์ (Pneumatic system) คือจะมีการควบคุมทิศทางการทำงาน ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวเชิงเส้น (Actuator) และการหมุนรอบแนวแกน (Motor) ในขณะที่อุปกรณ์และวงจรส่วนอื่นๆ จะเหมือนกัน แตกต่างกันที่ระบบนิวเมติกส์จะใช้ลมเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน และลมจะถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ซึ่งระบบไฮดรอลิกจะใช้น้ำมันไฮดรอลิก เป็นสารตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน หรือเปลี่ยนแปลงพลังงานของของไหลให้เป็นพลังงานกล โดยที่ระบบการทำงานจะเป็นวงจรแบบหมุนเวียน มีถังพักน้ำมันไฮดรอลิกทำหน้าที่ขจัดสิ่งสกปรก, ขจัดฟองอากาศ, และเป็นที่ระบายความร้อนของน้ำมันในระบบ เมื่อน้ำมันไฮดรอลิกที่ได้ผ่านการทำงานไหลกลับสู่ถังพักปั๊มไฮดรอลิกจะดูดน้ำมันกลับไปใช้ใหม่อีกครั้ง รูปแบบการทำงานนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบปิด (Close loop) และระบบเปิด (Open loop) ดังแสดงในแผนภาพที่ 1 ทั้งสองระบบจะถูกใช้ในลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน โดยความซับซ้อนของระบบปิดจะมีมากกว่าระบบเปิด เพราะการควบคุมมอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางได้ทั้งหมุนซ้ายและขวาโดยไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์วาล์วควบคุม อีกทั้งสามารถสร้างแรงดันน้ำมันได้สูงและควบคุมความดันขณะใช้งานได้คงที่กว่าระบบเปิด จึงทำให้ระบบปิดมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงกว่าระบบเปิดมาก



แผนภาพที่ 1 แสดงวงจรการทำงานของระบบปิดและระบบเปิดของไฮดรอลิก

[Exposito Anthony, (1997)]

อย่างไรก็ตาม น้ำมันไฮดรอลิกจะมีการหมุนเวียนอยู่ในระบบการทำงานตลอดเวลา ทำให้น้ำมันที่ผ่านกลับลงสู่ถังพักต้องมีการระบายความร้อนให้อยู่ในช่วงของค่าการใช้งาน เนื่องจากคุณสมบัติค่าความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ หากน้ำมันไฮดรอลิกมีความร้อนมากเกินไป จะส่งผลให้คุณสมบัติค่าความหนืดของน้ำมันไฮดรอลิกหมดสภาพ (ความหนืดต่ำกว่าค่ากำหนดใช้งาน) เป็นสาเหตุทำให้เกิดจากการสึกหรอของปั๊มไฮดรอลิก และต่อเนื่องถึงอายุการใช้งานที่สั้นลงของระบบ ส่งผลถึงค่าใช้จ่ายใน

การบำรุงรักษาระบบที่สูงขึ้นทำให้เกิดผลกระทบต่อเนื่องไปยังการทำงานของเครื่องจักรอื่นๆ ปัจจุบันวิศวกรได้ทำการออกแบบถังพักไฮดรอลิกส์ให้มีขนาดใหญ่กว่าปกติเพื่อชดเชยปัญหาดังกล่าว ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายต้นทุนของระบบที่สูงขึ้น ดังนั้น แนวทางการปรับปรุงการออกแบบถังพักไฮดรอลิกส์ ในด้านการระบายความร้อนจึงเป็นที่มาของการศึกษาในโครงการนี้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์แบบระบบปิด ด้วยการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล (CFD) สำหรับวิเคราะห์ภาวะไหลของความร้อน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูลการศึกษาวิจัยที่ได้สืบค้นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ว่า ถังพักไฮดรอลิกส์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญกับระบบไฮดรอลิกส์ เพราะจะเป็นส่วนในการกักเก็บน้ำมัน, การระบายความร้อน, การดักตะกอน, และอื่นๆ ที่เป็นสาเหตุทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฮดรอลิกส์อื่นๆ เสื่อมคุณภาพลง ดังนั้นเพื่อให้ระบบมีความเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูงสุด การเกิดฟองอากาศ, ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์กรองน้ำมัน, ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ท่อทางเข้าและออก, ปริมาณน้ำมันไฮดรอลิกส์, การระบายความร้อน. เหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึง ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล CFD ถูกใช้ในการประเมินสมรรถนะและพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในถัง ที่มีความแม่นยำและมีผลเฉลยที่มีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากผลการศึกษาวิจัยหลายชิ้นได้ใช้ในการประเมินและเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากชุดทดสอบจริง

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบหัวข้อการศึกษาวิจัยและผลลัพธ์ที่ได้จากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อ / ปีที่ตีพิมพ์เอกสาร	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์	วิธีการหาผลเฉลยของปัญหา	ผลเฉลยที่ได้
Tic, V., & Lovrec D., (2012)	รูปทรงและขนาดของถังพัก	CFD	ลดการปั่นป่วนของน้ำมันภายในถังพัก
Marco L., et al. (2016)	ตำแหน่งทางเข้าและทางออก	ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ	ลดการเกิดฟองอากาศในถังพัก
Alexander W., et al. (2016)	ปริมาณน้ำมันในถังพัก	ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ & CFD	ลดการเกิดฟองอากาศในถังพัก
Thees V., & Ludger F., (2016)	รูปทรงและขนาดของถังพัก	CFD	ลดการเกิดฟองอากาศในถังพัก
Martin M., et al. (2017)	ปริมาณน้ำมันในถังพัก	CFD & FEM	ตรวจสอบความเค้นที่เกิดขึ้นภายในถังพัก
Belov N., & Sosnovsky N., (2020)	รูปทรงและขนาดของถังพัก	CFD	ลดการเกิดฟองอากาศ, และการเกิดความร้อนสะสมในถังพัก
Lukas M., & Bernhard M., (2020)	รูปทรงและขนาดของถังพัก	CFD	เพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ, ลดการเกิดฟองอากาศ และการเกิดความร้อนสะสมในถังพัก

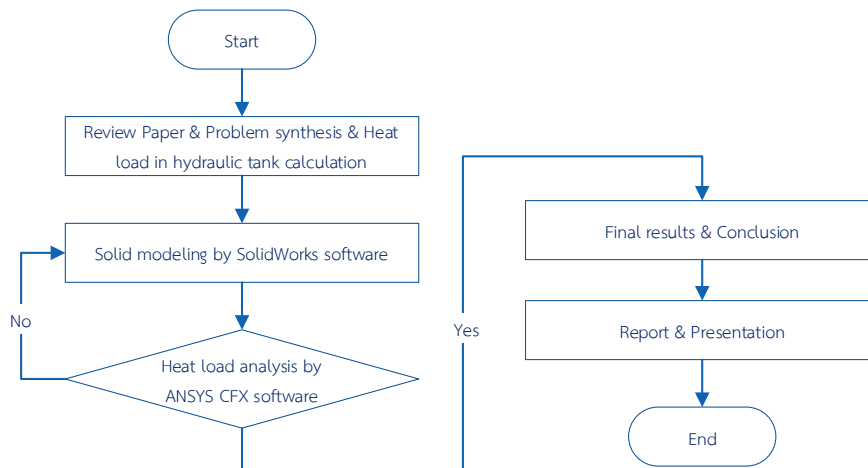
3.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

อุณหพลศาสตร์ว่าด้วยพลังงานในรูปแบบต่างๆ พลังงานความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถถ่ายโอนจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่งอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิ โดยการถ่ายโอนพลังงานจะเกิดจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ และการถ่ายเทพลังงานจะหยุดลงเมื่อตัวกลางทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของพลังงานภายในระบบที่สามารถอธิบายได้จากสมการด้านล่าง

$$Q = mC_{ave}\Delta T \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ พลังงานภายในระบบ (kJ), C_{ave} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ [kJ/kg °C], m คือ มวลของระบบ [kg], และ ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ [°C]. ค่าความจุความร้อน (Thermal Capacity) จะเท่ากับผลคูณของมวลสารกับความจุความร้อนจำเพาะ ดังนั้น ปริมาณของพลังงานภายในระบบ (Q) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ระบุ ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา (Δt) เพื่อปรับสมดุลของอุณหภูมิ ลักษณะนี้จะเรียกว่า อัตราการถ่ายเทความร้อน หรือ ฟลักซ์ความร้อน (q), W/m^2 ที่สามารถอธิบายได้จากสมการด้านล่าง

$$q = \frac{Q}{A(\Delta t)} \quad (2)$$

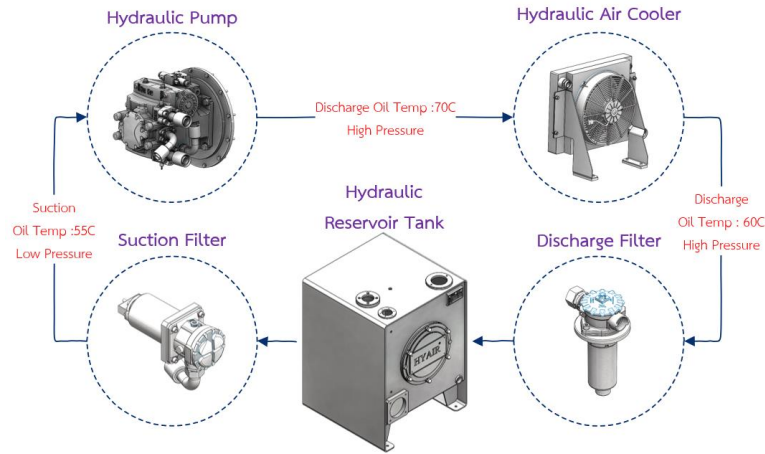


แผนภาพที่ 2 แผนผังแสดงกระบวนการทำงานวิจัย

4. วิธีดำเนินการวิจัย

เริ่มจากการศึกษาค้นคว้า ข้อมูลทางทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อสังเคราะห์สาเหตุสำคัญและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อภาระระบายความร้อนของถังพักไฮดรอลิกส์ รวมไปถึงการศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นกับถังพักไฮดรอลิกส์ และข้อจำกัดในการใช้งาน นอกจากนี้ ศึกษาการนำโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamic, CFD) มาใช้ในการหาผลเฉลยของปัญหา และตรวจสอบพฤติกรรมการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ภายในถังพักไฮดรอลิกส์ จากนั้นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นขนาดมิติของถังพัก, ปริมาณน้ำมันในถังพัก, อุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกส์ทางเข้าและทางออก, เกรดน้ำมันไฮดรอลิกส์, และรูปแบบการใช้งาน ข้อมูลเหล่านี้ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาภาระไหลของความร้อนที่จะเกิดขึ้นในระบบการทำงานของถังพักไฮดรอลิกส์ โดยใช้ทฤษฎีทางด้านการถ่ายเท

ความร้อน ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงถังพักไฮดรอลิกส์ ให้ระบายความร้อนได้ดีขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย จึงขอเสนอกระบวนการดำเนินงาน ดังแสดงในแผนภาพที่ 2



แผนภาพที่ 3 แสดงวงจรการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฮดรอลิกส์แบบโมบาย

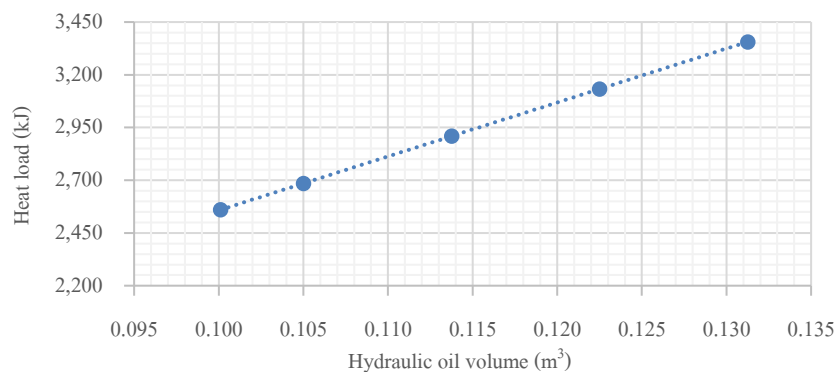
4.1 ข้อมูลพื้นฐานของถังพักไฮดรอลิกส์

ข้อมูลความต้องการของลูกค้าจะถูกนำมาใช้ออกแบบระบบไฮดรอลิกส์ โดยจะเริ่มจากการพิจารณาขนาดของปั๊มไฮดรอลิกส์, อัตราการไหลที่จะใช้, แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่จะใช้งาน, และขนาดถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ อย่างไรก็ตาม ในโครงการวิจัยนี้จะกล่าวถึงเพียงขั้นตอนการออกแบบถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ โดยข้อมูลอัตราการไหลของน้ำมันและอุณหภูมิใช้งาน จะถูกนำมาคำนวณหาภาระโหลดทางด้านความร้อนเพื่อพิจารณาเลือกชุดพัดลมระบายความร้อน (Air Cooler) น้ำมันอุณหภูมิสูงที่ผ่านการใช้งานมาจะไหลเข้าสู่ชุดพัดลมระบายความร้อน เพื่อลดอุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์ขาเข้าถังพักลง จากนั้นน้ำมันไฮดรอลิกส์จะไหลเข้าสู่ชุดกรอง และไหลลงสู่ถังพัก เพื่อให้สิ่งปนเปื้อนที่มากับน้ำมันได้ตกตะกอน พร้อมทั้งกำจัดฟองอากาศ รวมไปถึงระบายความร้อนสะสมของน้ำมันก่อนน้ำมันไฮดรอลิกส์จะถูกดูดออกจากถังพักไปใช้งานอีกครั้ง ขั้นตอนการทำงานในส่วนนี้จะแสดงในแผนภาพที่ 3 ปริมาณน้ำมันออกแบบจะพิจารณาจาก ปริมาณน้ำมันที่อยู่ในสายน้ำมันไฮดรอลิกส์, ปริมาณน้ำมันที่อยู่ในปั๊มไฮดรอลิกส์, ปริมาณน้ำมันที่อยู่ในกระบอกสูบหรือมอเตอร์ไฮดรอลิกส์, ปริมาณน้ำมันที่อยู่ในกรอง, และอื่นๆ ปริมาณน้ำมันเหล่านี้จะถูกบวกเพิ่มขึ้นไปอีกอย่างน้อย 3-5 เท่าของปริมาณน้ำมันที่ใช้ไหลเวียนทั้งหมดเพื่อออกแบบปริมาณน้ำมันที่จะต้องกักเก็บในถังพักไฮดรอลิกส์ ดังนั้นในเงื่อนไขนี้ ขนาดมิติภายในถังพักไฮดรอลิกส์ ที่ถูกออกแบบจะมีขนาดความกว้าง 500 มิลลิเมตร, ความยาว 700 มิลลิเมตร, ความสูง 500 มิลลิเมตร, และมีความหนาของผนังถังที่ทำด้วยแผ่นเหล็กเท่ากับ 4 มิลลิเมตร เพื่อบรรจุ น้ำมันไฮดรอลิกส์เกรด ISO VG68 ปริมาตร 100 ลิตร ที่มีระดับความสูงของน้ำมันภายในถังเท่ากับ 286 มิลลิเมตร คิดเป็น 57.2% ของปริมาตรทั้งหมดของถังพัก อุณหภูมิใช้งานของระบบไฮดรอลิกส์ที่ออกจากมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ ก่อนเข้าถังพักถูกกำหนดให้ไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ 3 ลิตรต่อวินาที โดยที่อุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์ภายในถังพักก่อนจะถูกดูดไปใช้งานจะเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณภาระโหลดทางความร้อน

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลพื้นฐานและผลการคำนวณภาระโหลดความร้อนของถังพักไฮดรอลิกส์ปริมาตร 100 ลิตร

Item No.	Hydraulic Tank dimension	Amount	Item No.	Heat Transfer Rate Calculation	Amount
1	Width x Length x Height, [m]	$0.5 \times 0.7 \times 0.5$	8	Specific heat, C [J/kg K]	1,980
2	Total tank surface area, [m ²]	1.900	9	Ambient temp (air) [°C]	30.0
3	Oil Level, [%]	57.2%	10	Inlet oil temp, T _{in} [°C]	70.0
4	Oil level, [m]	0.286	11	Outlet oil temp, T _{out} [°C]	55.0
5	Oil volume, [m ³]	0.100	12	Temp difference, ΔT [°C]	15.0
6	Hydraulic density, ρ [kg/m ³]	861.0	13	Heat load, Q _{oil} [kJ]	2,559.7
7	Hydraulic mass, m [kg]	86.19	14	Heat up time, T [s]	300.0
			15	Heat transfer rate, Q [kW]	8.532
			16	Required cooling capacity, P _c [kW/°C]	0.213
			17	Heat flux, q [kW/m ²]	4.491
			18	Heat transfer coefficient, h [W/m ² K]	299.38

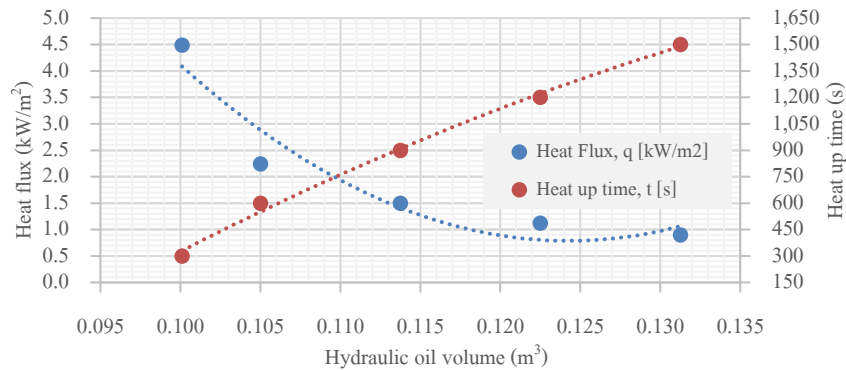
เป็นที่ทราบกันดีว่า ปัญหาการถ่ายเทความร้อน มีสาเหตุมาจากขีดจำกัดในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยหลักการการเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนก็คือ การเพิ่มพื้นที่ที่ใช้ระบายความร้อน ซึ่งเมื่อทำการคำนวณตัวแปรดังกล่าว พบว่าแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลง ในขณะที่พื้นที่การระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าและออก รวมไปถึงฟลักซ์ความร้อนมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดของอุปกรณ์และค่าใช้จ่าย ถึงแม้ว่า การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced Convection) เป็นทางเลือกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสำหรับการออกแบบถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ เพื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่แปรผันตามฟลักซ์ความร้อนหรือภาระโหลดความร้อนที่เข้าระบบ สามารถถ่ายเทให้กับอากาศภายนอกโดยรอบได้มากที่สุด



แผนภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำมันและภาระโหลดความร้อน

การเพิ่มพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของถังพักส่งผลถึงปริมาตรน้ำมันภายในถังพักด้วยเช่นกัน ซึ่งจากข้อมูลอ้างอิงของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ปริมาตรน้ำมันภายในถังควรจะมีอย่างน้อย 65% ของปริมาตรถังพัก จึงได้ทำการพิจารณาเพิ่มปริมาตรน้ำมันในถังพัก คิดเป็นสัดส่วนปริมาตรน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่เพิ่มขึ้น 60-75% ของปริมาตรทั้งหมดของถังพัก โดยกำหนดให้พื้นที่ผิวระบายความร้อนคงที่ เพื่อทำการตรวจสอบภาระโหลดทาง

ความร้อนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในแผนภาพที่ 4 พบว่า ภาวะไหลทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในรูปแบบเชิงเส้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันไฮดรอลิกส์ภายในถังพัก ซึ่งมีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจนตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น 25% อย่างไรก็ตาม ก็อาจจะส่งผลกระทบต่อภาระบายอากาศภายในถังพักด้วยเช่นกัน เมื่ออุณหภูมิภายในถังเพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อความดันบรรยากาศภายในถังพัก



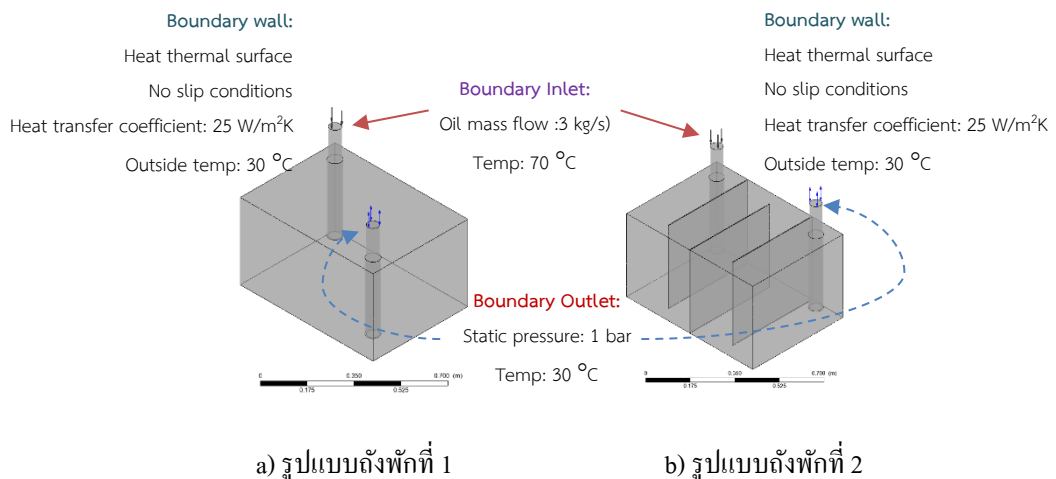
แผนภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันและฟลักซ์ความร้อนกับระยะเวลา

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันในถังที่เพิ่มขึ้นกับฟลักซ์ความร้อนและระยะเวลาการแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในแผนภาพที่ 5 อัตราการลดลงของฟลักซ์ความร้อนจะไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อปริมาณน้ำมันไฮดรอลิกส์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันในถังที่เพิ่มขึ้นสืบเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนที่ลดลง การเพิ่มปริมาณน้ำมันในถังมากขึ้นจากปกติอีก 25% จะต้องเพิ่มระยะเวลาในการดึงความร้อนออกจากระบบถึง 1,200 วินาที ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนมากขึ้น จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยลงก็จริง แต่ก็ต้องใช้ระยะเวลาในการนำความร้อนนั้นออกจากระบบที่นานขึ้นด้วยเช่นกัน การพาความร้อนแบบบังคับในขณะที่ พื้นที่ระบายความร้อนคงที่จะเป็นทางออกสำหรับการออกแบบถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ ถึงแม้ว่าปริมาณน้ำมันในถังพักที่เพิ่มขึ้นจาก 57.2% เป็น 75% จะทำให้ฟลักซ์ความร้อนน้อยลง แต่ส่งผลให้ต้องติดตั้งพัดลมระบายอากาศใหญ่ขึ้นเพื่อดึงปริมาณความร้อนออกในระยะเวลาที่เท่ากับการดึงความร้อนที่ปริมาณน้ำมันเริ่มต้น

5. การจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล CFD หรือที่เรียกว่าการจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตก (Navier-Stokes Equation) แบบของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของไหลของของไหลและหาค่าต่างๆ ในรูปแบบที่ขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยโมเดล 3 มิติของถังพักที่ถูกจำลองขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 รูปทรง ที่มีขนาดมิติภายนอกเท่ากัน แต่จะแตกต่างกันภายในถัง โดยถังพักน้ำมันรูปแบบที่ 1 จะไม่มีแผ่นกั้นภายในเหมือนรูปแบบถังพักที่ 2 ดังแสดงในแผนภาพที่ 6 อย่างไรก็ตาม โมเดลจะถูกตัดปริมาณที่เป็นของแข็งออก จะใช้เพียงปริมาตรรูปทรงของของไหลที่อยู่ในถังพักในการวิเคราะห์เท่านั้น โดเมนที่จะใช้ในการคำนวณจะถูกกำหนดเป็นแบบ Transient สมการกำลังสองของออยเลอร์ ถูกนำมาใช้สำหรับเงื่อนไขของเทอมการหน่วงเวลา เกณฑ์การลู่เข้าของผลลัพธ์จากการจำลอง (Convergence) จะถูกกำหนดให้หยุดประมวลผลเมื่อมีค่าความแตกต่างของตัวแปรน้อยกว่า 10^{-6} โดยรูปแบบ

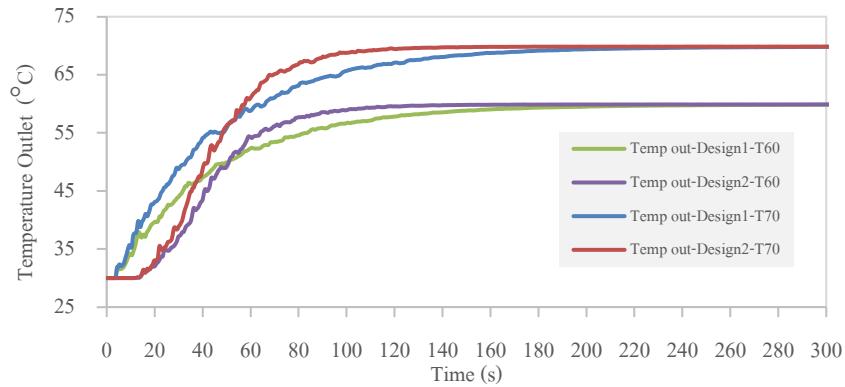
การไหลแบบปั่นป่วนของของเหลวชนิด $k-\epsilon$ ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์กับเงื่อนไขการปรับปรุงพฤติกรรม การไหลบริเวณผนังแบบอัดโนมิต ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตของการจำลอง, อัตราการไหลของมวลและอุณหภูมิจะถูก กำหนดไว้ที่ขอบเขตทางเข้า ในขณะที่เงื่อนไขขอบเขตทางออก (Outlet) ที่มีค่าเฉลี่ยของความดันบรรยากาศที่ และอุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกส์ถูกกำหนดไว้บริเวณพื้นผิวของท่อทางออก นอกจากนี้ เงื่อนไขของอุณหภูมิ เบื้องต้นของพื้นผิวดังกล่าวจะกำหนดให้เป็นแบบการถ่ายเทความร้อน (Heat thermal) โดยมีสัมประสิทธิ์การพา ความร้อนบริเวณพื้นผิวภายนอกตั้งเท่ากับ $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ภายใต้เงื่อนไขของ Timesteps: 0.01 วินาที ในช่วงเวลา ทั้งหมด (Total time step) 600 วินาที เพื่อทำการตรวจสอบหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวดัง น้ำมันไฮดรอลิกส์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางออกที่ขึ้นอยู่กับเวลา



แผนภาพที่ 6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการจำลองรูปทรง 3 มิติ ของถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์

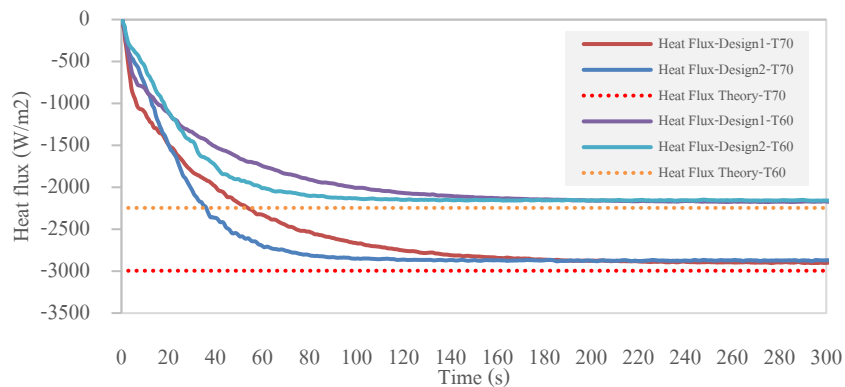
5.1 การวิเคราะห์ผลเฉลยของโปรแกรม ANSYS CFX

สมมุติฐานที่ตั้งไว้จะมีอยู่ 2 เงื่อนไข คือ การเปลี่ยนแปลงระยะทางของการเคลื่อนที่น้ำมันไฮดรอลิกส์ ขาเข้า จนกระทั่งเกิดการถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิโดยรอบถังพักภายนอก ก่อนถูกดูดไปใช้งาน สมมุติฐานที่ 1 จะเป็นรูปแบบถังพักที่ 1 ที่เป็นมาตรฐานของทางบริษัท และสมมุติฐานที่ 2 คือรูปแบบถังพักที่ 2 ที่มีการเพิ่มแผ่น กั้นภายในถังพัก เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ให้ระยะทางในการไหลไปมา ก่อนที่จะถูกดูด ออกไปใช้งาน ทั้งสองสมมุติฐานจะมีขนาดมิติถังพักภายนอกเท่ากัน และเงื่อนไขของพลังงานความร้อนทางเข้า และอุณหภูมิทางออกตรงท่อทางดูดจะเท่ากันทั้ง 2 สมมุติฐาน ซึ่งโปรแกรม ANSYS CFX จะประเมินผลเฉลยจาก เงื่อนไขต่างๆ ดังต่อไปนี้



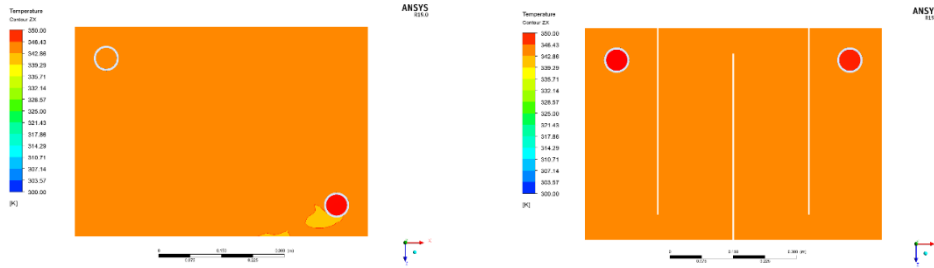
แผนภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกถึงพักกับระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลง

จากแผนภาพที่ 7 พบว่า เมื่ออุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่ผ่านการใช้งานมาที่อุณหภูมิทางเข้า 70 องศาเซลเซียส ผ่านเข้าสู่ถึงพักทั้งสองรูปแบบจะใช้ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนสั้นกว่าค่าที่ออกแบบทางทฤษฎี ประมาณ 80 วินาที และเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนแปลงไปอุณหภูมิสุดท้ายตรงทางออกถึงพักจะเท่ากับอุณหภูมิทางเข้า ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกส์หลังจากผ่านชุด Air Cooler แล้วทำให้อุณหภูมิลดลงเหลือ 60 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าสู่ถึงพัก ผลเฉลยก็ยังคงใช้ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เท่าเดิมคือ 220 วินาที การแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิคงที่ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างรูปแบบถึงที่ 1 และ 2 พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในรูปแบบถึงที่ 2 จะเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วกว่ารูปแบบที่ 1 ที่ระยะเวลาเพียง 140 วินาที ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในถึงรูปแบบที่ 1 จะมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งกว้างและใช้ระยะเวลากว่า 220 วินาทีในการเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State)



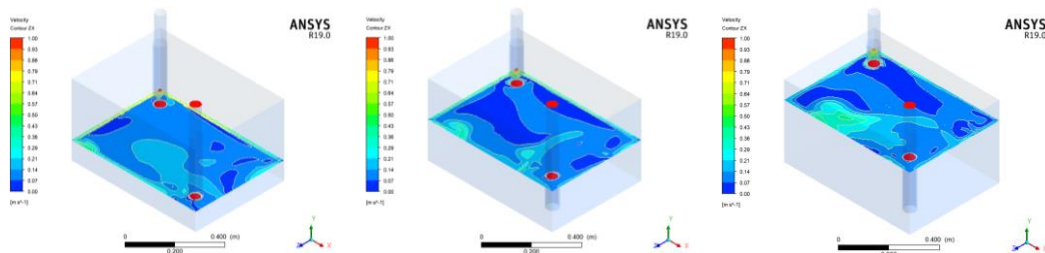
แผนภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์ความร้อนกับระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลง

นอกจากนั้น ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นของสมมุติฐานทั้ง 2 รูปแบบดังแสดงในแผนภาพที่ 8 พบว่าการเกิดฟลักซ์ความร้อนของถึงพักรูปแบบที่ 2 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อทำการผลเฉลยจาก CFD ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จะมีฟลักซ์ความร้อนเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวถึงพักทั้งหมดเท่ากับ 2.869 kW/m^2 จะต้องใช้ระยะเวลาในการดึงความร้อน 140 วินาที ของถึงรูปแบบที่ 2 และ ระยะเวลา 220 วินาทีในถึงรูปแบบที่ 1 ในทางกลับกัน ผลเฉลยจาก CFD ที่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จะมีฟลักซ์ความร้อนเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวถึงพักทั้งหมดเท่ากับ 2.157 kW/m^2 จะต้องใช้ระยะเวลาในการดึงความร้อนเท่ากัน ส่งผลต่อเนื่องถึงขนาดพื้นที่ของถึงพัก และขนาดที่เหมาะสมของ Air Cooler

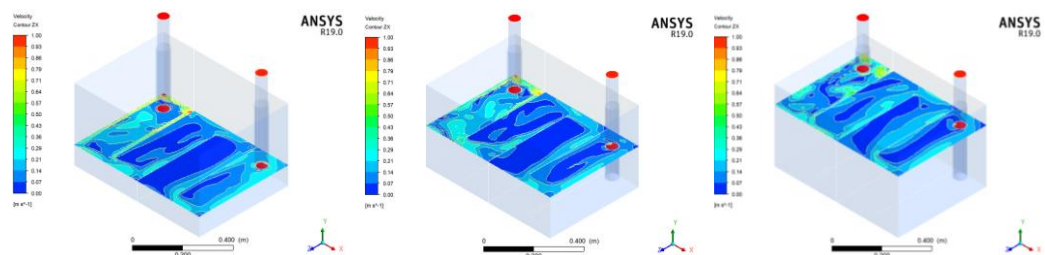


แผนภาพที่ 9 แสดงระดับเจดสีของอุณหภูมิบนระนาบ XZ ที่เวลา 300 วินาทีของรูปแบบถังที่ 2 แบบ

การกระจายเจดสีของอุณหภูมิ ณ เวลา 300 วินาที ของถังพักทั้งสองรูปแบบ ดังแสดงในแผนภาพที่ 9 บนระนาบ XZ (มุมมองด้านบนถังพัก) การกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอกันตลอดทั้งระนาบ ในขณะที่เมื่อตรวจสอบความเร็วในการไหลภายในถังพักทั้งสองรูปแบบที่ระดับความสูงของน้ำมันไฮดรอลิกส์ 0.1 เมตร, 0.2 เมตร, และ 0.3 เมตร พบว่า เส้นทางการไหลของความเร็วในถังพักที่ 1 ดังแสดงในแผนภาพที่ 10 มีความเร็วของน้ำมันกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัด ในขณะที่ ความเร็วของน้ำมันไฮดรอลิกส์ในถังรูปแบบที่ 2 มีความเร็วลดลงตรงบริเวณกึ่งกลางถังพัก ดังแสดงในแผนภาพที่ 11 ซึ่ง ก็เป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการออกแบบถังรูปแบบที่ 2 จะเป็นการชะลอความเร็วให้ตะกอนที่มากับน้ำมันไฮดรอลิกส์ตกลงก้นถัง และลดการเกิดฟองอากาศภายในถังด้วยเช่นกัน ถึงแม้ว่า การถ่ายเทความร้อนจะไม่ชัดเจนถึงค่าความแตกต่างกันมากเท่าที่ควร



แผนภาพที่ 10 แสดง Velocity contour บนระนาบ XZ ที่เวลา 300 วินาทีของรูปแบบถังที่ 1



แผนภาพที่ 11 แสดง Velocity contour บนระนาบ XZ ที่เวลา 300 วินาทีของรูปแบบถังที่ 2

6. อภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่า ภาวะไหลตกทางความร้อนของถังพักไฮดรอลิกส์ขนาด 100 ลิตร ที่บรรจุน้ำมันไฮดรอลิกส์เกรด ISO VG68 โดยมีอุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกส์ทางเข้า 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์ทางออก 55 องศาเซลเซียส กำหนดให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นภายในเวลา 300 วินาที ที่พื้นที่ผิวทั้งหมดของถังพักเท่ากับ 1.90 m^2 จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 4.49 kW/m^2 และขนาดของพัดลมระบายอากาศ

เท่ากับ $0.213 \text{ kW}/^{\circ}\text{C}$ เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลทางทฤษฎีกับผลเฉลยของโปรแกรม ANSYS CFX พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จะมีฟลักซ์ความร้อนเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวถึงพักทั้งหมดเท่ากับ $2.869 \text{ kW}/\text{m}^2$ จะต้องใช้ระยะเวลาในการดึงความร้อน 140 วินาที ของถึงรูปแบบที่ 2 และ ระยะเวลา 220 วินาทีในถึงรูปแบบที่ 1 ในทางกลับกัน ผลเฉลยที่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะมีฟลักซ์ความร้อนเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวถึงพักทั้งหมดเท่ากับ $2.157 \text{ kW}/\text{m}^2$ และจะต้องใช้ระยะเวลาในการดึงความร้อนเท่ากับกับเงื่อนไขแรก นอกจากนี้ พฤติกรรมของเส้นทางการไหลของความเร็วในถึงพักที่ 1 จะมีความเร็วสูงกว่า 0.3 เมตรต่อวินาที กระจายทั่วถึงพัก ในขณะที่ ความเร็วของน้ำมันไฮดรอลิกส์ในถึงรูปแบบที่ 2 มีความเร็วต่ำกว่า 0.3 เมตรต่อวินาที กระจายตรงบริเวณกึ่งกลางถึงพักกว่า 50% ของพื้นที่หน้าตัด ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการออกแบบถึงพักรูปแบบที่ 2 จะเป็นการชะลอความเร็วให้ตะกอนที่มากับน้ำมันไฮดรอลิกส์ตกลงก้นถึง และลดการเกิดฟองอากาศภายในถึงพัก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การศึกษาภาระโหลดความร้อนของถึงพักไฮดรอลิกส์ ด้วยการตรวจสอบผลลัพธ์ จากสมมุติฐานต่างๆ ด้วยโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล ขนาดมิติของถึงพักไฮดรอลิกส์ มีผลกระทบเล็กน้อยกับการระบายความร้อน ผลเฉลยของโปรแกรม ANSYS CFX ไปในทิศทางเดียวกันกับ ทฤษฎี ซึ่งสมมุติฐานของถึงพักรูปแบบที่ 2 จะชะลอความเร็วให้ตะกอนที่มากับน้ำมันไฮดรอลิกส์ตกลงก้นถึงได้ ดีกว่าถึงพักรูปแบบที่ 1 ในขณะที่การระบายความร้อนจะขึ้นอยู่กับ การเลือกขนาดของพัดลมระบายอากาศ Air Cooler โดยที่ตัวแปรที่มีความสำคัญในการเลือกคือ อุณหภูมิและระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อน

7. ข้อเสนอแนะ

(1) เนื่องจากปริมาณของน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่จะต้องบรรจุลงในถึงพัก ต้องมี 65% ของปริมาณทั้งหมด ของถึงพัก ตัวแปรของความสูงถึงพัก จะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศภายในถึงพักด้วยเช่นกัน ดังนั้น ควรจะมีการวิเคราะห์ตัวแปรนี้ เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมและรูปร่างของถึงพักน้ำมันไฮดรอลิกส์

(2) การจำลองโมเดลในการวิเคราะห์ในโปรแกรม ANSYS CFX ควรจะจำลองโมเดลของอากาศภายใน ถึงพักด้วย โดยกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็น Multiphase Flow เพื่อตรวจสอบพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลง บริเวณพื้นผิวที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างอากาศกับน้ำมันไฮดรอลิกส์

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท นำพลอินเตอร์เทค จำกัด ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย อีกทั้งความช่วยเหลือ ข้อมูลทางด้านเทคนิค จาก บริษัท แอโรฟลูอิด จำกัด ตลอดจนขอขอบพระคุณ คณาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่สนับสนุนให้ความช่วยเหลือทางด้านข้อมูล และเอกสารในการจัดทำงานวิจัยชิ้นนี้

9. เอกสารอ้างอิง

Alexander W., Alexander B., & Drik S., (2016). An approach to optimize the design of hydraulic reservoirs, *10th International Fluid Power Conference*, pp. 609-618.

Belov N., & Sosnovsky N., (2020). Design of an optimal hydraulic tank configuration, *Materials Science and Engineering*, Vol. 779 (012041), pp. 1-8.

Cengel, Y.A. (2002), Heat transfer: A Practical Approach, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.

- Exposito, Anthony, (1997), Fluid Power with Applications, 4th Edition, *Prentice Hall*, New Jersey.
- Lukas M., & Bernhard M., (2020). Optimizing hydraulic reservoirs using Euler-Euler LaGrange multiphase CFD simulation, *12th International Fluid Power Conference*, pp. 295-304.
- Marco L., Alessandro P., Hubertus M., (2016). Experimental investigation of the air release in hydraulic reservoirs, *10th International Fluid Power Conference*, pp. 597-608.
- Martin M., Milan Z., Peter P., & Peter W., (2017). CFD simulation of hydraulic tank, *Procedia Engineering*, 192, pp. 609-614.
- Thees V., & Ludger F., (2016). Development of hydraulic tanks by multi-phase CFD simulation, *10th International Fluid Power Conference*, pp. 619-630
- Tic V., & Lovrec D., (2012). Design of modern hydraulic tank using fluid flow simulation, *International Journal Simulation Model*, 11(2), pp.77-88.

ค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังของคานสะพานรูปตัวยู

ELONGATION OF PRESTRESSING STEEL IN POST-TENSIONED

U-GIRDER BRIDGE

ไพบูรณ์ ปัญญาะโป

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: phaiboon.pa@spu.ac.th

บทคัดย่อ

การเสื่อมลดแรงอัดเนื่องจากแรงเสียดทานในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลัง เป็นการเสื่อมลดแรงส่วนที่สำคัญในกระบวนการอัดแรง ในขณะเดียวกัน ค่าการยืดตัวของเหล็กเสริม จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงอัดประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง ในการก่อสร้างจริง ค่าความคลาดเคลื่อนของการยืดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณที่ออกแบบไว้และค่าการวัดจริงในสนามไม่ควรเกินค่าการยืดตัวที่ยอมให้ ตามมาตรฐานการออกแบบ บทความนี้ นำเสนอการศึกษาค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรง ของคานสะพานคอนกรีตอัดแรงดึงเหล็กที่หลังรูปตัวยู ตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยเก็บข้อมูลการวางแนวเหล็กเสริมในงานก่อสร้างจริงของคานรูปตัวยูจำนวน 5 ชุด เพื่อนำมาคำนวณค่าการเสื่อมลดแรงอัดของเหล็กเสริมในสนาม เปรียบเทียบกับค่าการเสื่อมลดแรงอัดที่คำนวณออกแบบไว้ และนำไปใช้คำนวณหาค่าการยืดตัวของเหล็กเสริม เพื่อเปรียบเทียบระหว่าง ค่าการยืดตัวที่ออกแบบเดิม ค่าการยืดตัวที่วิเคราะห์จากแนวการวางเหล็กเสริมจริง และค่าการยืดตัวที่วัดได้จากเครื่องมือตรวจวัดจริง ผลการศึกษาพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างการยืดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์แนวการวางเหล็กเสริมจริงกับการยืดตัวที่ตรวจวัดได้ในสนามด้วยเครื่องมือตรวจวัด เท่ากับ 3.21 % ค่าความคลาดเคลื่อนในสนามที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของการยืดตัวระหว่างการออกแบบและกระบวนการติดตั้ง เท่ากับ 2.31% ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 5.51% เกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้ (5.0%) ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนในสนามนี้คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 42% ของค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด ดังนั้นความคลาดเคลื่อนในสนาม จึงส่งผลกระทบเป็นอย่างมากต่อค่าการยืดตัวโดยรวมของเหล็กเสริม ดังนั้นจึงเสนอแนะให้ติดตั้งแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรงอย่างระมัดระวังในขั้นตอนการก่อสร้าง

ABSTRACT

Friction loss in the prestressing steel of the post-tensioned concrete is the major loss developed under prestressing process. Meanwhile, the elongation resulting from the friction loss is directly proportioned to the effective prestressing force. In the construction, the elongation deviation between the calculated elongation and the measured elongation should not be greater than the allowable limit. This paper presents an investigation of the elongation deviation of prestressing tendon in a post-tensioned U-girder bridge according to the Department of Highway of Thailand. The actual tendon profiles were collected from 5 sets of standard U-girder.

The friction loss of prestressing steel was analysed for the actual tendon profile and the design tendon profile. The resulting prestressing forces were employed to calculate the elongation of tendon. The comparisons among the design elongation, the calculated elongation of the actual profile and the measured value from gauge were conducted. It was found that the average deviation between the actual profile elongation and the measured elongation was 3.21%. The site deviation resulting from the elongation discrepancy between the design and the installation process was 2.31%. This results in the total mean deviation of 5.51%, which is larger than the allowable deviation of 5.0%. This additional site deviation approximately contributed to 42% of the total deviation. Therefore, the site deviation significantly affects the elongation deviation, and it is recommended that the tendon profile should be carefully installed and inspected in the construction process.

Keywords: Friction Loss, Elongation, Post-Tension Concrete, Prestressing Steel, U-Girder.

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบคิงเหล็กที่หลัง แรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงตลอดความยาวของคาน จะถูกพิจารณาจากการเชื่อมต่อนองของเส้นลวดเนื่องจากแรงเสียดทานจากการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นหลัก ซึ่งการเชื่อมต่อนองตลอดความยาวเส้นลวดสามารถคำนวณได้จากสูตรค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเส้นลวดที่แนะนำโดยมาตรฐานการออกแบบ แรงดึงที่ปลายเส้นลวดอัดแรงด้านที่ไม่ได้ทำการดึงด้วยแม่แรงจะลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานของเส้นลวดและการเคลื่อนที่ของสมอยึด หลังจากการอัดแรงในเส้นลวด การประเมินแรงดึงในเส้นลวดจะถูกกระทำโดยการวัดค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมที่ปลายคาน เพื่อนำไปคำนวณค่าแรงดึงประสิทธิผลที่เหลืออยู่ใช้งาน เนื่องจากค่าการยืดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดึงในเส้นลวดอัดแรง ทั้งนี้ วิศวกรผู้ออกแบบคาดว่า ค่าการยืดตัวของเส้นลวดที่วัดได้ในสนามควรจะมีใกล้เคียงกันกับค่าการยืดตัวที่คำนวณไว้ในช่วงการออกแบบ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินระดับที่ยอมรับได้ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นได้จากความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ นอกจากนี้ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการก่อสร้างในสนามส่งผลกระทบต่อค่าการยืดตัวที่วัดได้จริงในสนาม การวางแนวเส้นลวดที่ผิดพลาดไปจากแบบก่อสร้าง อาจส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อนองในเส้นลวดมากเกินไป และทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีของคานหลักของสะพาน ที่คาดหวังว่าจะต้องรองรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะขนาดใหญ่จำนวนมากตลอดอายุการใช้งานของสะพาน มาตรฐานการออกแบบสะพาน AASHTO (2011) สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงแบบคิงเหล็กที่หลังยอมให้ค่าการยืดตัวที่วัดได้จริงในสนามมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ออกแบบไว้ไม่เกิน 5.0% สำหรับคานช่วงยาวเกินกว่า 15.0 เมตร แต่สำหรับสะพานที่มีช่วงพาดยาวระหว่าง 20.0-30.0 เมตร การวางแนวเส้นลวดที่ยาวมากอาจมีความผิดพลาดไปจากแบบก่อสร้างได้ง่าย อาจทำให้เกิดแรงเชื่อมต่อนองในเส้นลวดได้มากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้น การศึกษาแรงเชื่อมต่อนองและการยืดตัวของเหล็กเสริม และความคลาดเคลื่อนในสนามของเหล็กเสริมอัดแรงแบบคิงเหล็กที่หลังของสะพานที่มีช่วงพาดยาว จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการดำเนินการศึกษา 2 ประการ ได้แก่

(1) เพื่อศึกษาแรงเสียดมลดและการยึดตัวของเส้นลวดอัดแรงสำหรับการวางแนวเหล็กเสริมในการก่อสร้างจริงของคานคอนกรีตอัดแรงแบบคิงเหล็กทีหลังของคานสะพานรูปตัวยู

(2) เพื่อศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนในสนามที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงที่ออกแบบและค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงจากการก่อสร้างจริง

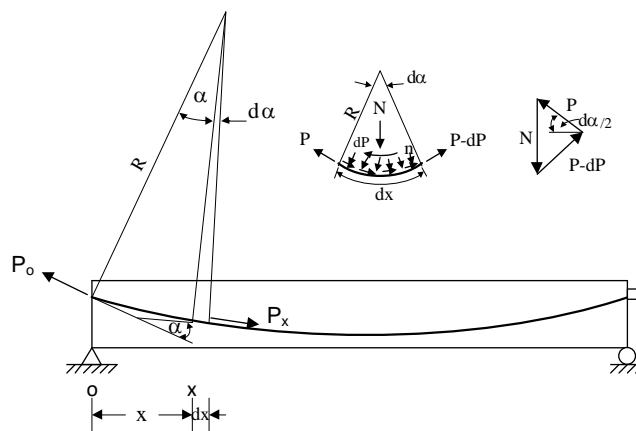
3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การเสื่อมลดแรงอัดและการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรง

พิจารณาจากรูปที่ 1 แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ตามความยาวของแนวการวางท่อร้อยเส้นลวดคำนวณได้ ดังนี้ (ACI, 2016).

$$P_x = P_o e^{-(kx + \mu\alpha)} \quad (1)$$

เมื่อ P_o คือ แรงดึงที่แม่แรงของเหล็กเสริมอัดแรง P_x คือ แรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง ณ ตำแหน่งที่พิจารณา x จากปลายคานด้านแม่แรง k คือ สัมประสิทธิ์ความคดที่เป็นความหย่อนของเส้นลวด μ คือ สัมประสิทธิ์ความโค้งในแนวคดที่กำหนดความยาวของเส้นลวด α คือ มุมที่รองรับส่วนโค้งของแนวการวางเส้นลวดในช่วงความยาว x .



รูปที่ 1 การเสื่อมลดแรงอัดเนื่องจากความโค้งของเส้นลวด

ค่าสัมประสิทธิ์ k และ α มีค่าแปรเปลี่ยนในช่วงกว้าง ตามค่าที่เสนอแนะในมาตรฐาน ACI (2016) สำหรับท่อร้อยที่มีการอัดฉีดน้ำปูน ค่า k อยู่ระหว่าง 0.0002 - 0.001 ส่วนค่า α อยู่ระหว่าง 0.15 - 0.25 ส่วนมาตรฐาน ACI 343R (1995) สำหรับลวดเกลียวชนิด 7 เส้น ค่า k อยู่ระหว่าง 0.001 - 0.0066 และค่า α อยู่ระหว่าง 0.05 - 0.15 จากผลงานวิจัยของ Choi และคณะ (2018) ซึ่งศึกษาการเสื่อมลดแรงอัดของเส้นลวดอัดแรงแบบคิงเหล็กทีหลัง ที่ได้ทำการทดสอบแผ่นผนังคอนกรีตแบบที่มีส่วนโค้งกว้างขนาดใหญ่จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่างพบว่า ค่าการเสื่อมลดแรงอัดที่วัดได้จริงมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากสูตรที่แนะนำตามมาตรฐานต่างๆ (ACI-318, 2014; ACI, 2016; AASHTO, 2011; Caltrans, 2004) ในช่วงระหว่าง 38-43% ดังนั้น การใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรง

เสียดทานที่แนะนำโดยมาตรฐานเหล่านี้ อาจได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงสำหรับ โครงสร้างแผ่นผนังคอนกรีตขนาดใหญ่

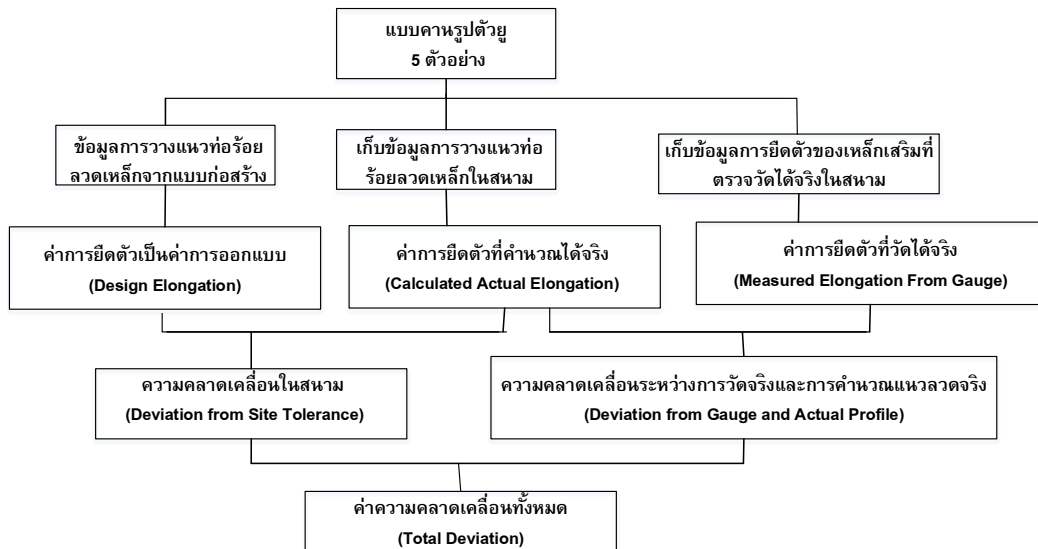
ค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรง คำนวณในช่วงความยาว L ได้จาก

$$\Delta = \int_0^L \frac{P_x}{A_{ps} E_{ps}} dx - \Delta_A \quad (2)$$

เมื่อ A_{ps} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง E_{ps} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง โดยทั่วไปใช้ค่าเท่ากับ 195,000 เมกะปาสกาล Δ_A คือ ค่าการเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอยึดที่ปลายคาน ซึ่งจะทำให้ค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมลดลง และเกิดการเสื่อมลดแรงอัดเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไป การเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอยึด มีค่าแปรเปลี่ยนในช่วง 3-13 มิลลิเมตร จากผลงานวิจัยของ Bondy, K.B. (2012) ค่าการเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอยึด จะส่งผลให้ค่าการเสื่อมลดแรงอัดเพิ่มมากขึ้นสำหรับความยาวท่อร้อยในช่วงสั้นไม่เกิน 10.0 เมตร มาตรฐานการออกแบบอาคารขอมให้มีความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงระหว่างค่าการออกแบบและค่าที่วัดได้จริงในสนาม ดังนี้ มาตรฐาน ACI (2016) ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 7.0% มาตรฐาน AASHTO (1989) ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 5.0% สำหรับแต่ละท่อร้อยที่มีผลการทดสอบการขมออกของวัสดุจริง มาตรฐาน AASHTO (2011) และ CEB-FIP (2010) ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 5.0% สำหรับท่อร้อยที่มีความยาวมากกว่า 15.0 เมตร และ 7.0% สำหรับท่อร้อยที่มีความยาว เท่ากับหรือน้อยกว่า 15.0 เมตร มาตรฐาน Eurocode (2009) ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 5.0% สำหรับท่อร้อยทั้งหมดในหน้าตัดคาน แต่ขอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ถึง 15.0% สำหรับท่อร้อยแต่ละเส้นในหน้าตัดคาน เนื่องจาก ในทางปฏิบัติค่าความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวที่ขอมให้ตามที่กำหนดในมาตรฐานเหล่านี้ทำได้ยาก เนื่องจากการทำงานในสนามจริงมีข้อผิดพลาดได้มาก ผลงานวิจัยของ Hayek and Kang (2017) ซึ่งเป็นการศึกษา ค่าความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงระหว่างค่าการออกแบบและค่าที่วัดได้จริงในสนาม สำหรับลวดแบบเดี่ยวและลวดแบบกลุ่มของ โครงสร้างอาคารคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลัง ได้มีการเสนอว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวที่ขอมให้ระหว่างค่าการออกแบบและค่าที่วัดได้จริงในสนาม ควรพิจารณาจากค่าที่มากกว่าระหว่าง 7.0% และ 9.5 มิลลิเมตร

3.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ในการศึกษานี้ ได้มีการคัดเลือกคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังรูปตัวยู ตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยได้มีการเก็บข้อมูลการวางแนวท่อร้อยลวดเหล็กและข้อมูลการตรวจวัดค่าการยึดตัวของลวดเหล็กเสริมในสนามจริง เพื่อมาเปรียบเทียบกับค่าการยึดตัวจากการคำนวณโดยใช้แนวการวางลวดจริง และค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดในสนามจริง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

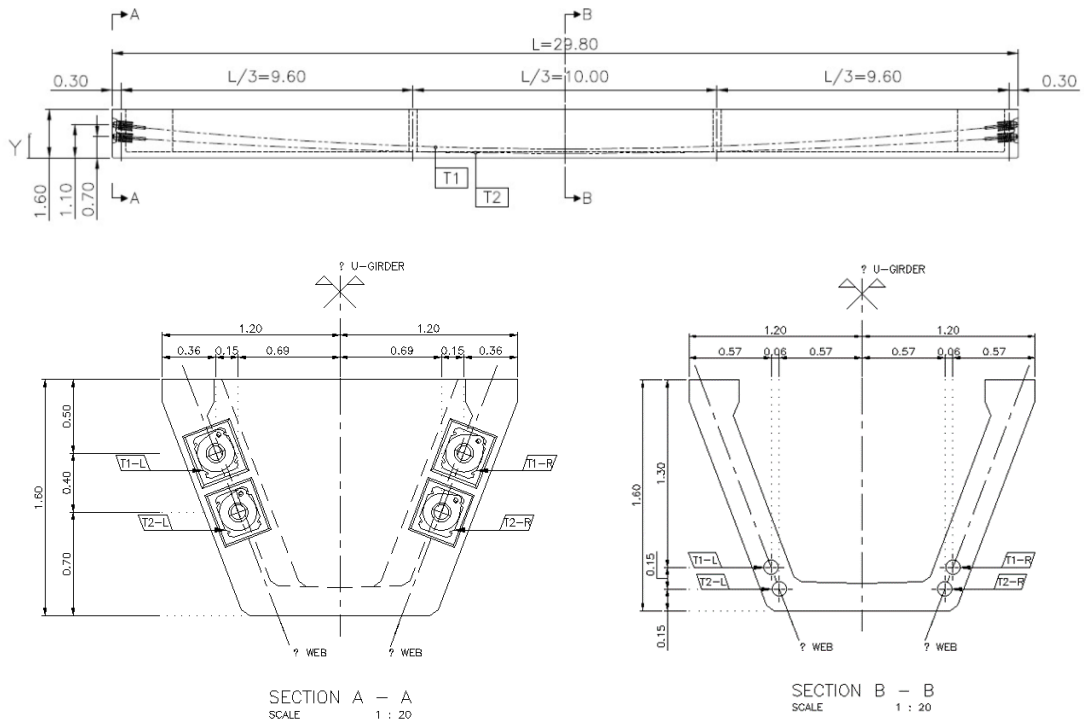
4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การคัดเลือกคานตัวอย่าง

คานคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งเหล็กที่หลังรูปตัวยู คัดมาจากแบบมาตรฐานกรมทางหลวงจำนวน 5 ตัวอย่าง มีแนวการวางท่อย้อยลวดเหล็กและรูปตัดแสดงในรูปที่ 3 โดยมีรายละเอียด ดังนี้ ความยาวช่วงพาดของคาน 29.80 เมตร ท่อย้อยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ T1L และ T1R เป็นกลุ่มส่วนบนด้านซ้ายและด้านขวา ตามลำดับ T2L และ T2R เป็นกลุ่มส่วนล่างด้านซ้ายและด้านขวา ตามลำดับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก 50 เมกะปาสกาล ลวดเหล็กอัดแรงใช้ชนิดลวดเกลียวคลายแรงดึงต่ำ 7 เส้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.2 มม. จำนวน 15 เส้นต่อกลุ่ม โดยมีหน่วยแรงดึงประลัยเท่ากับ 3,900 กิโลนิวตัน ต่อกลุ่มท่อย้อย โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 195,000 เมกะปาสกาล ท่อย้อยเป็นท่อโลหะเคลือบสังกะสี มีสัมประสิทธิ์ความโค้ง, μ เท่ากับ 0.15/เรเดียน สัมประสิทธิ์ความคด, k เท่ากับ 0.0033/เมตร และแรงดึงแม่แรงของแต่ละกลุ่มท่อย้อยเท่ากับ 3,120 กิโลนิวตัน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กเสริมในท่อย้อย

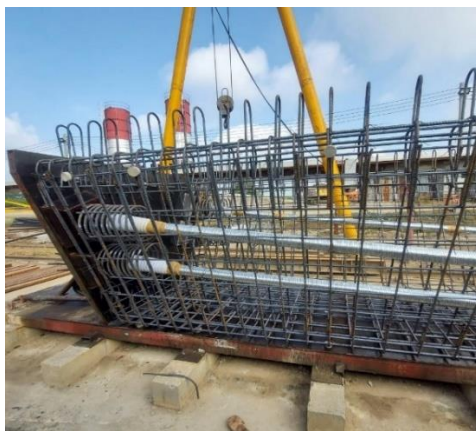
รายการ	คุณสมบัติ
รายการเหล็กเสริม	Low relaxation 7-wire strand
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและจำนวน	15 ϕ 15.2
- แรงดึงประลัย	3,900 kN/tondon
- โมดูลัสยืดหยุ่น	195,000 MPa
- สัมประสิทธิ์ความโค้ง, μ (/radian)	0.15
- สัมประสิทธิ์ความคด, k (/m)	0.0033
- แรงดึงแม่แรง	3,120 kN/tondon



รูปที่ 3 แนวการวางลวดและหน้าตัด U-Girder

4.2 การเก็บข้อมูล

ในการดำเนินงานวิจัย ได้ทำการเก็บข้อมูลของการวางแนวลวดเหล็กของคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังรูปตัวยูในสนามจริง ซึ่งเป็นการดึงลวดเหล็กเสริมในท่อร้อยด้วยแม่แรงที่ปลายด้านเดียว และใช้ระบบการอัดฉีดน้ำปูนเข้าภายในท่อร้อยภายหลังการดึงลวด การเก็บข้อมูลแนวการวางลวดเหล็กใช้เทปวัดแบบตลับวัดระยะตำแหน่งในแนวตั้งของท่อร้อยแต่ละกลุ่มทุกระยะ 2.0 เมตรตลอดความยาวช่วงคาน 29.8 เมตร แสดงในรูปที่ 4(a) รวมเป็นจำนวนทั้งหมด 20 กลุ่ม สำหรับการวัดค่าการยึดตัวของลวดเหล็กใช้การวัดด้วยเทปวัดที่เครื่องแม่แรงดึงลวด แสดงในรูปที่ 4(b) ข้อมูลค่าการยึดตัวของลวดเหล็กและค่าการขยับเลื่อนของสมอยึดที่ปลายคานแต่ละด้าน จะมีการบันทึกไว้ในรายงานการดึงลวดอัดแรง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ต่อไป



(a) แนวการวางท่อร้อยลวดเหล็กอัดแรงในสนาม



(b) การวัดระยะการเคลื่อนที่ของแม่แรง

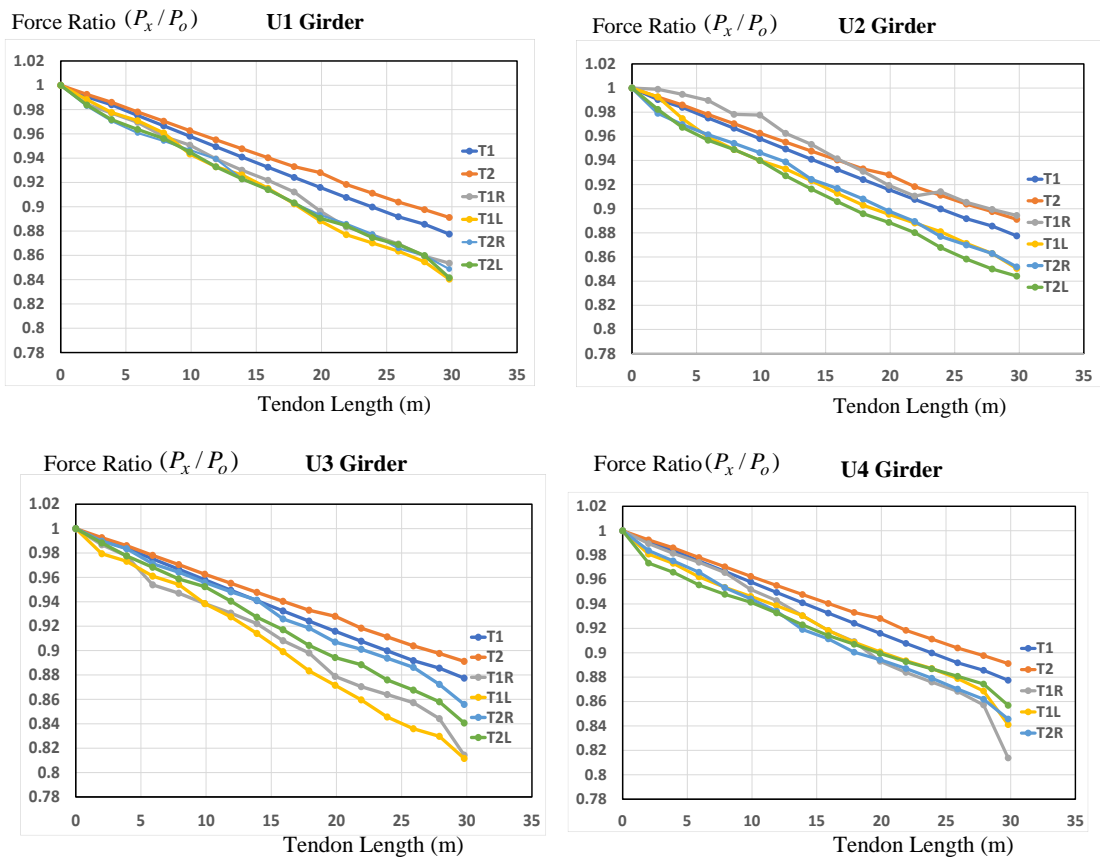
รูปที่ 4 แนวการวางท่อร้อยลวดเหล็กอัดแรงและการวัดระยะการเคลื่อนที่ของแม่แรงในสนาม

4.3 การวิเคราะห์ค่าการเสื่อมลดแรงอัดและค่าการยึดตัวของลวดเหล็ก

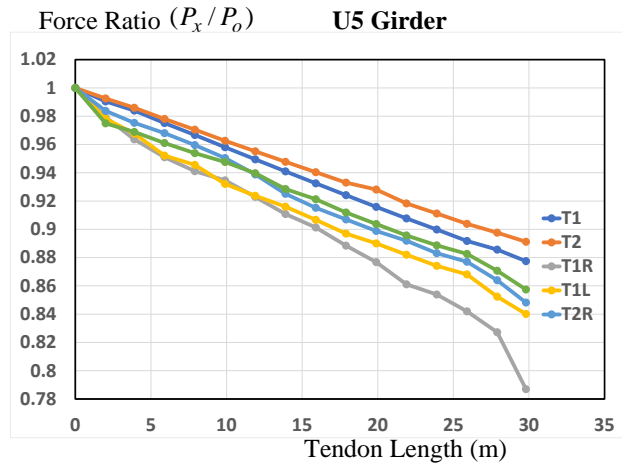
จากการเก็บข้อมูลตำแหน่งแนวการวางลวดในแนวตั้งทุกระยะ 2.0 เมตรตลอดความยาวช่วงคาน 29.8 เมตร จึงได้ข้อมูลตำแหน่งลวดจำนวน 15 ชุดต่อกลุ่มท่อร้อย จำนวน 4 กลุ่ม คือ T1L, T1R, T2L และ T2R สำหรับคาน 5 ตัวอย่างคือ U1, U2, U3, U4 และ U5 รวมเป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด 300 ชุด นำไปใช้คำนวณหาค่าการเสื่อมลดแรงอัดของลวดเหล็กโดยใช้สมการที่ (1) และการคำนวณแรงอัดในเส้นลวดแสดงผลในรูปแบบอัตราส่วนแรงอัด (Force Ratio, P_x/P_o) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงอัด P_x ณ ตำแหน่ง x จากปลายคานด้านแม่แรง และค่าแรงอัดเริ่มต้นที่ด้านแม่แรง P_o ผลจากการคำนวณค่าอัตราส่วนแรงอัดนี้ นำไปใช้คำนวณค่าการยึดตัวของลวดเหล็กตลอดความยาวทั้งหมดโดยการอินทิเกรตด้วยสมการที่ (2) ตลอดความยาวช่วงคาน แสดงผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ผลการวิเคราะห์จากการออกแบบ โดยใช้แนวการวางลวดที่แสดงในแบบก่อสร้างมาคำนวณ และ (2) ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลแนวการวางลวดในสนามที่เก็บได้จริง เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างทั้งสองส่วนนี้ เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนาม (Site Tolerance)

5. ผลการวิจัย

อัตราส่วนแรงอัด (P_x/P_o) ของคานรูปตัวยู (U1, U2, U3, U4, U5) แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ออกแบบ (T1, T2) และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริง (T1R, T1L, T2R, T2L) แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อัตราส่วนแรงอัดของการออกแบบและการวางแนวลวดจริง

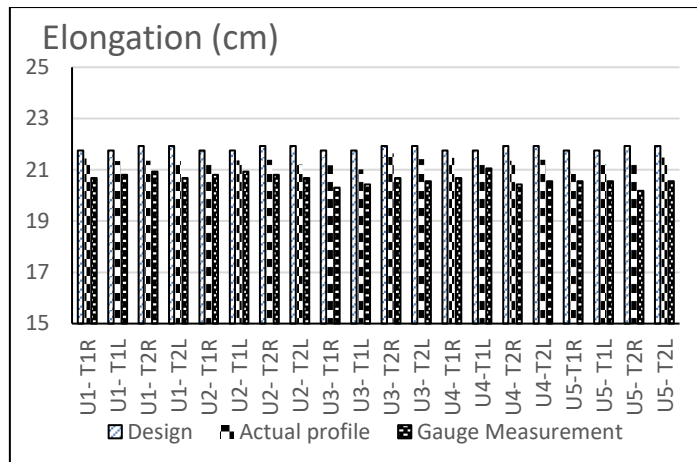


รูปที่ 5 (ต่อ) อัตราส่วนแรงอัดของการออกแบบและการวางแนวหลอดจริง

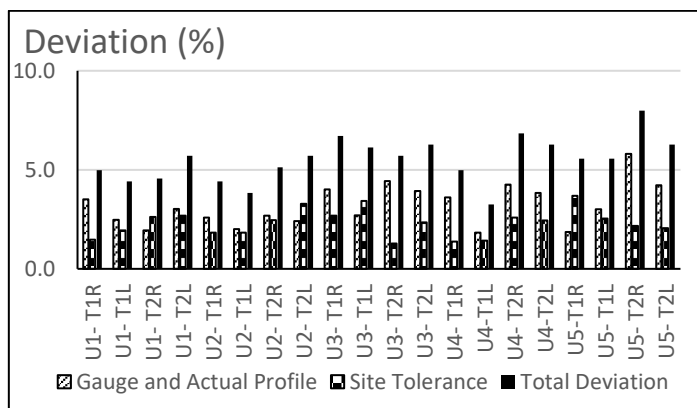
ผลการคำนวณค่าการยืดตัวของเหล็กเสริม แสดงในตารางที่ 2 สำหรับสดมภ์ที่ (1) เป็นชื่อกลุ่มท่อร้อย (Tendon No.) สดมภ์ที่ (2) แสดงค่าการยืดตัวที่ออกแบบ (Design Elongations) สดมภ์ที่ (3) แสดงค่าการยืดตัวจากผลการวิเคราะห์แนวการวางหลอดจริง (Actual Profile) สดมภ์ที่ (4) แสดงค่าการยืดตัวจากการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนาม (Gauge Measurement) สดมภ์ที่ (5) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการวิเคราะห์แนวการวางหลอดจริงและการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนาม (Actual Profile and Gauge Measurement) สดมภ์ที่ (6) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนาม (Site Tolerance) และสดมภ์ที่ (7) แสดงผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (Total Deviation) นอกจากนี้ ค่าการยืดตัวในสดมภ์ที่ (2), (3), (4) และ ค่าความคลาดเคลื่อนในสดมภ์ที่ (5), (6), (7) แสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าการยืดตัว เปรียบเทียบระหว่าง ค่าการออกแบบ ค่าวิเคราะห์จากสนามและค่าการตรวจวัดจริง

(1) กลุ่มท่อ ร้อย	(2) ค่าการยืดตัวที่ ออกแบบ (cm)	(3) ผลการ วิเคราะห์แนว การวางหลอดจริง (cm)	(4) ผลการวัด ด้วยเครื่องมือ ตรวจวัดใน สนาม (cm)	(5) ความคลาด เคลื่อน (Actual Profile and Gauge) (%)	(6) ความคลาด เคลื่อนในสนาม (Site Tolerance) (%)	(7) ความคลาด เคลื่อนทั้งหมด (%)
T1	21.759	-	-	-	-	-
T2	21.925	-	-	-	-	-
U1- T1R	21.759	21.440	20.675	3.516	1.466	4.982
U1- T1L	21.759	21.338	20.800	2.473	1.935	4.407
U1- T2R	21.925	21.351	20.925	1.943	2.618	4.561
U1- T2L	21.925	21.338	20.675	3.024	2.677	5.701
U2- T1R	21.759	21.362	20.800	2.583	1.825	4.407
U2- T1L	21.759	21.361	20.925	2.004	1.829	3.833
U2- T2R	21.925	21.387	20.800	2.677	2.454	5.131
U2- T2L	21.925	21.204	20.675	2.413	3.288	5.701
U3- T1R	21.759	21.174	20.300	4.017	2.689	6.705
U3- T1L	21.759	21.013	20.425	2.702	3.428	6.131
U3- T2R	21.925	21.645	20.675	4.424	1.277	5.701
U3- T2L	21.925	21.412	20.550	3.932	2.340	6.271
U4- T1R	21.759	21.461	20.675	3.612	1.370	4.982
U4-T1L	21.759	21.449	21.050	1.834	1.425	3.258
U4- T2R	21.925	21.357	20.425	4.251	2.591	6.842
U4-T2L	21.925	21.390	20.550	3.831	2.440	6.271
U5-T1R	21.759	20.955	20.550	1.861	3.695	5.556
U5- T1L	21.759	21.205	20.550	3.010	2.546	5.556
U5- T2R	21.925	21.449	20.175	5.811	2.171	7.982
U5- T2L	21.925	21.476	20.550	4.223	2.048	6.271
Average	21.842	21.338	20.638	3.207	2.306	5.513



รูปที่ 6 ค่าการยืดตัวที่ออกแบบ การวางลวดจริงและการตรวจวัด



รูปที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนของการยืดตัวที่ออกแบบ การวางลวดจริงและการตรวจวัด

6. อภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนแรงอัดแสดงว่า แรงอัดในเส้นลวดลดลงอย่างต่อเนื่องตามความยาวคาน จากด้านแม่แรงไปอีกปลายคานหนึ่งเนื่องจากแรงเสียดทานเนื่องจากความโค้งและความคดของเส้นลวดตลอดความยาวคาน โดยส่วนใหญ่ ค่าแรงอัดในเส้นลวดของแนวการวางลวดจริง (T1R, T1L, T2R และ T2L) มีค่าต่ำกว่าค่าการออกแบบ เนื่องจากการวางแนวลวดจริงมีความโค้งที่มากกว่าการออกแบบ ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ทำให้การยืดตัวของลวดมีค่าลดต่ำกว่าการออกแบบ ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 2 ยังพบว่า ค่าการยืดตัวจากการตรวจวัดจริงด้วยเครื่องมือในสนาม มีค่าต่ำกว่าการยืดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริง อีกด้วย ค่าความคลาดเคลื่อนที่แสดงในคอลัมน์ที่ (5) ระหว่างการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริงและการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนาม มีค่าแปรเปลี่ยนในช่วง 1.86 – 5.81% ด้วยค่าเฉลี่ย 3.21% ค่าความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนามที่แสดงในคอลัมน์ที่ (6) มีค่าแปรเปลี่ยนในช่วง 1.28 – 3.69% ด้วยค่าเฉลี่ย 2.31% ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดในคอลัมน์ที่ (7) มีค่าอยู่ในช่วง 3.26 – 7.98% ด้วยค่าเฉลี่ย 5.51%

ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด เกินกว่าค่าที่ยอมรับให้คือ 5.0% สำหรับความยาวช่วงคานมากกว่า 15.0 m ตามที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO (2014) ซึ่งประกอบด้วย U1- T2L, U2- T2R, U2- T2L, U3- T1R, U3-T1L, U3-T2R, U3-T2L, U4-T2R, U4-T2L, U5-T1R, U5-T1L, U5-T2R และ U5-T2L มีค่าความคลาดเคลื่อน

ทั้งหมด 5.70%, 5.13%, 5.70%, 6.70%, 6.13%, 5.70%, 6.27%, 6.84%, 6.27%, 5.55%, 5.55%, 7.98%, 6.27% ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนามที่มีส่วนแบ่งสำคัญถึง 42% ของค่าทั้งหมด ดังนั้นการวางแผนงวดในสนามมีบทบาทที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อค่าการยึดตัวของเหล็กเสริม

จากกราฟแท่งในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า การยึดตัวของเหล็กเสริมที่ออกแบบไว้มีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ การยึดตัวที่คำนวณจากแนวการวางลวดจริงในสนาม และการยึดตัวจากการวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนาม มีค่าต่ำที่สุด จากกราฟค่าความคลาดเคลื่อนในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ผลของความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนามเป็นปัจจัยที่สำคัญส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดเกินกว่าค่าที่ยอมรับให้ 5.0%

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาค่าการสูญเสียแรงอัดและการยึดตัวของเส้นลวดอัดแรงสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังรูปตัวยูจำนวน 5 ตัวอย่าง จึงสรุปผลได้ดังนี้

ก) แรงอัดในเส้นลวดลดลงอย่างต่อเนื่องตามความยาวคานเนื่องจากแรงเสียดทานเนื่องจากความโค้งและความคดของเส้นลวดตลอดความยาวคาน โดยส่วนใหญ่ ค่าแรงอัดในเส้นลวดของแนวการวางลวดจริงมีค่าต่ำกว่าค่าการออกแบบ เนื่องจากการวางแนวลวดจริงมีความโค้งที่มากกว่าการออกแบบ ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ทำให้การยึดตัวของลวดมีค่าต่ำกว่าการออกแบบ

ข) ค่าการวัดการยึดตัวของลวดเหล็กด้วยเครื่องมือตรวจวัดในสนามมีค่าที่ต่ำกว่าผลการวิเคราะห์จากแนวการวางลวดจริง ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.21% และค่าความแตกต่างระหว่างการยึดตัวที่ออกแบบและผลการวิเคราะห์แนวการวางลวดจริง มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.31% อันเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนาม

ค) ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด ซึ่งรวมค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองส่วนข้างต้น คิดเป็น 5.51% ทำให้เกินกว่า ข้อกำหนดในมาตรฐานการออกแบบสะพาน 5.0% เนื่องจาก ความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างในสนามมีส่วนสำคัญถึง 42% ของทั้งหมด ดังนั้นการวางแผนงวดในสนามมีบทบาทที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อค่าการยึดตัวของเหล็กเสริม

ง) ข้อเสนอแนะเพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนของการยึดตัวทั้งหมด จึงควรจัดการวางแผนตำแหน่งลวดเหล็กเสริมในสนามให้ถูกต้องตรงกับที่กำหนดในแบบก่อสร้างให้มากที่สุด จากการตรวจสอบแนวการวางลวดที่เก็บข้อมูลในสนาม พบว่า ส่วนใหญ่เกิดจากการวางตำแหน่งแนวลวดในแนวดิ่งต่ำกว่าค่าระดับที่กำหนดในแบบก่อสร้าง ทำให้แนวลวดมีรัศมีความโค้งมากกว่าที่กำหนด ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานในเส้นลวดมากและทำให้ค่าแรงดึงในเส้นลวดลดลง และค่าการยึดตัวของเหล็กเสริมลดลงด้วย ดังนั้น หากตรวจพบว่าตำแหน่งการวางลวดต่ำกว่าที่กำหนดในแบบ จะต้องปรับแก้ไขโดยการปรับยกระดับแนวเส้นลวดให้สูงขึ้น นอกจากนี้ ควรมีการควบคุมการเทคอนกรีตและการใช้เครื่องจักรเข้าคอนกรีตในขณะที่ก่อสร้างไม่ให้กระทบกับเส้นลวดที่จะส่งผลให้เกิดการขยับเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่วางไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับคานรับสะพานที่มีช่วงพาดยาว ซึ่งมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณข้อมูลอันมีค่าซึ่งได้รับความเอื้อเฟื้อจากวิศวกร โครงการปรับปรุงทางแยกต่างระดับบางขุนเทียน-เอกชัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

9. เอกสารอ้างอิง

- AASHTO (1989, 2011), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI-ASCE Committee 343 (1995), Analysis & Design of Reinforced Concrete Bridge Structures, American Concrete Institute.
- ACI Committee 318 (2014), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-14) and Commentary (ACI318R-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- ACI (2016), Guide to Estimating Prestress Losses, (ACI 423.10R-16) American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Bondy, K.B., (2012), Short tendon elongations, PTI Technical Note 16, Post-Tensioning Manual, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, MI.
- Caltrans (2004), Bridge Design Specifications, Sacramento, CA: California Department of Transportation.
- Choi, J., Woods, C.R., Hrynyk, T.D., Bayrak, O. (2018) Measuring friction losses of large-angle post-tensioned concrete walls, PCI Convention & National Bridge Conference - Precast/Prestressed Concrete Institute, Colorado Convention Center, Denver, Colorado, Feb 20 - 24.
- CEB-FIP (2010). FIP Model Code for Concrete Structures 2010, Comité Euro-International du Béton, 2013.
- Eurocode (2009) Execution of concrete structures, EN 13670:2009 CEN.
- Hayek, C. and Kang, T.H.K. (2017) Elongation tolerance for short tendons in post-tensioned building structures, *ACI Structural Journal*, 114(4), pp. 795-802.

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในปล่องลิฟต์โดยสาร
ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

THE STUDY OF AIRFLOW BEHAVIOR IN ELEVATOR SHAFT USING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHODS

ธนพงศ์ อุ่มปรีชา

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: king56sogood@gmail.com

เกียรติศักดิ์ สกุลพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: Kiattisak.sa@spu.ac.th

ธีรุตม์ สุปฎิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: teerut.supati@gmail.com

บทคัดย่อ

เมื่อปล่องลิฟต์มาตรฐานมีคานายื่นเข้ามาภายในทำให้ช่องว่างของอากาศมีขนาดเล็กลง เป็นสาเหตุให้ความเร็วบริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ห้องโดยสารของลิฟต์เกิดการสั่นสะเทือน โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล (ANSYS CFX) จึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โมเดล 3 มิติของปล่องลิฟต์มาตรฐาน เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นในตำแหน่งการเคลื่อนที่ของลิฟต์โดยสารผ่านคานที่ยื่น 3 ตำแหน่ง ที่ความเร็ว 2.5 เมตรต่อวินาที ผลเฉลยแสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณพื้นที่ช่องว่างแคบๆ ระหว่างห้องโดยสารลิฟต์กับคานที่ยื่นเข้ามาในปล่องลิฟต์มาตรฐาน มีความผันผวนของแรงที่กระทำอยู่ในช่วง 40-60 นิวตัน ในขณะที่รูปแบบโมเดลที่ปรับปรุงให้บริเวณคานที่ยื่นเข้ามามีแผ่นปิดทึบมุม (Slope) 8, 11.5, และ 15 องศา พบว่า พฤติกรรมการไหลของอากาศมีความต่อเนื่องและผันผวนน้อยลงอย่างชัดเจน อีกทั้งขนาดของแรงที่กระทำกับผนังห้องโดยสารลดลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยกับรูปแบบมาตรฐาน ขนาดของแรงเฉลี่ยสามารถลดลงได้มากถึง 63 54, 52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ปล่องลิฟต์โดยสาร, พฤติกรรมการไหลของอากาศ, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ABSTRACT

The concrete beam extends into the standard elevator shaft where the air gap is smaller. This causes the air velocity in that area to increase. As a result, the elevator room vibrates. Therefore, the Computational Fluid Dynamics method in the engineering software package (ANSYS CFX) was used to analyze a three-dimensional fluid models of standard elevator shafts. To examine the behavior of forces occurring in the moving position of

the elevator room through 3 positions at a speed of 2.5 m/s. The results showed that the force behavior in the narrow space between the elevator room and the beam extending into the standard elevator shaft fluctuates in the range of 40-60 N, while the standard elevator shaft model has been modified for slopes at the beam area of 8, 11.5, and 15 degrees. It was found that the airflow behavior was more continuous and less fluctuating. In addition, the magnitude of the force acting on the elevator room wall decreases in the same direction. When comparing solutions with the standard elevator shaft, the average force magnitude was reduced by as much as 63, 54, 52 percent, respectively.

Keywords: Elevator Shaft, Airflow Behavior, Computational Fluid Dynamics Method

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

อาคารที่อยู่อาศัยขนาดสูง (High-Rise Residential Building) จำเป็นจะต้องมีการใช้ลิฟต์โดยสารในการขนส่งผู้โดยสารขึ้น และลงไปยังตำแหน่งชั้นที่ต้องการ ซึ่งการเคลื่อนที่ของลิฟต์ด้วยความเร็วจะส่งผลถึงการไหลของอากาศที่ไหลผ่านตัวลิฟต์ขณะเคลื่อนที่ขึ้น หรือลง ก่อให้เกิดความแตกต่างของความดันที่เกิดจากการไหลของอากาศภายในปล่องลิฟต์ มาตรฐานการออกแบบปล่องลิฟต์ระบุว่า ภายในปล่องลิฟต์จะต้องเป็นผนังเรียบที่ไม่มีอะไรขวางกั้นหรือยื่นเข้ามาในปล่องลิฟต์ พร้อมทั้งกำหนดให้มีช่องระบายอากาศภายในปล่องลิฟต์ อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่พบว่า งานโครงสร้างอาคารจะมีคานที่ยื่นเข้ามาในปล่องลิฟต์ วิศวกรจะชดเชยพื้นที่ของคานที่ยื่นเข้ามาโดยการขยายความกว้างปล่องลิฟต์ แต่ก็ไม่มีข้อกำหนดชัดเจนถึงขนาดมิติต่างๆ อีกทั้งผลิตภัณฑ์ของลิฟต์โดยสารที่หลากหลายจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของปล่องลิฟต์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของงาน โครงสร้างเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงโครงสร้างคานของอาคารที่ยื่นเข้ามาภายในปล่องลิฟต์ ทำให้พื้นที่ในการไหลของอากาศมีน้อยลง อากาศที่ไหลผ่านเข้าปะทะกับคานทำให้แรงที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้ตัวลิฟต์โดยสารเกิดการสั่นสะเทือน จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้ผู้พักอาศัยที่ใช้งานเกิดความวิตกกังวลต่อความแข็งแรงของ โครงสร้างของลิฟต์ และตัวอาคาร ดังนั้นทีมผู้วิจัยจึงต้องการนำเสนอการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในปล่องลิฟต์มาตรฐานที่มีคานยื่นเข้ามา โดยการใช้โปรแกรมทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำกับผนังลิฟต์โดยสาร พร้อมทั้งแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาคานสั่นสะเทือนของลิฟต์โดยสาร ด้วยการใช้งาน โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของแรง

3. เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลิฟต์โดยสาร และรูปทรงพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกัน จะมีอิทธิพลโดยตรงต่อการไหลของอากาศ ส่งผลทำให้พฤติกรรมของแรงเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ CFD ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศและพฤติกรรมของแรงที่กระทำกับผนังลิฟต์ เมื่อลิฟต์โดยสารทำการเคลื่อนที่ ความแม่นยำของผลเฉลยมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบหัวข้อการศึกษาวิจัย และผลลัพธ์ที่ได้จากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย/ปีที่ตีพิมพ์เอกสาร	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์	วิธีการหาผลเฉลยของปัญหา	ผลผลที่ได้
HJ. Patthi Bin Hussain., et. al (2020)	แรง ความเร็ว	CFD	ความสัมพันธ์ของรูปทรงต่อแรงเสียดทาน
Yangki Oh ., et. al (2020)	เสียงและการสั่นสะเทือน	ตรวจสอบพื้นที่จริง	ความสัมพันธ์ของรูปทรงที่ไม่เหมาะสม
Antti Lehtinen., et. al (2019)	ความเร็วต่อพื้นที่หน้าตัด	CFD	ความสัมพันธ์ของเสียงสะท้อนกับความเร็วในการเคลื่อนที่
ธนพงศ์ อุ่มปรีชา และคณะ (2016)	ลักษณะการไหลของอากาศ	จำลองโมเดลอุโมงค์ลม	การไหลเป็นไปตามหลักอากาศพลศาสตร์
Cai weiyong (2015)	พฤติกรรมกรไหลของอากาศ	CFD	พื้นที่หน้าตัดที่เล็กทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน
Zhangwei Ling., et al (2015)	ความเร็วและรูปทรงของลิฟต์	CFD	รูปทรงกรวย มีการกระจายความดันได้ดีกว่ารูปทรงอื่นๆ
Jia Hui Ang., et al (2015)	ความเร็วลมภายในปล่องลิฟต์	CFD	V= 20 เมตรต่อวินาที สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 1,256 วัตต์
Fullerton Jeffrey L. (2006)	ความเร็วและช่องเปิดภายในปล่องลิฟต์	ตรวจสอบพื้นที่จริง	ช่องว่างมีผลต่อความไวของเสียง

3.1. ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic)

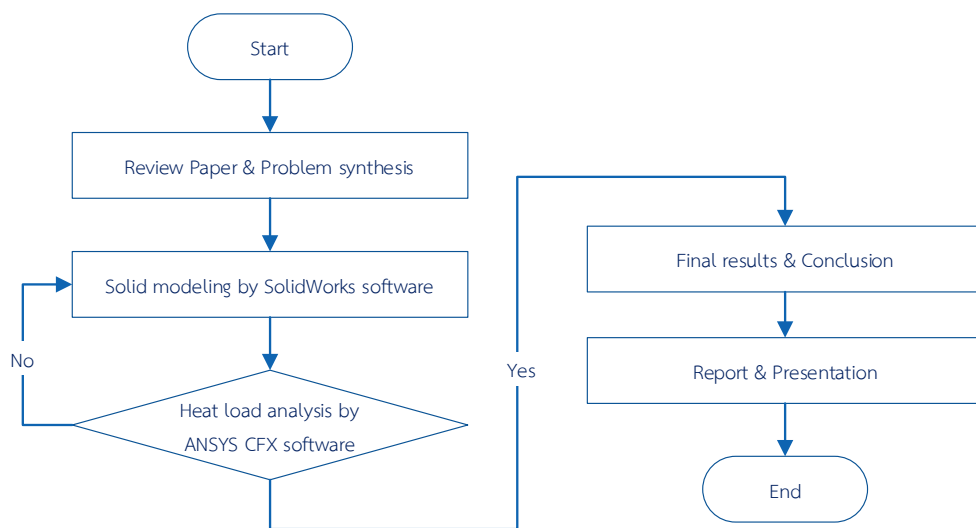
จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน การไหลของอากาศผ่านวัตถุของแข็งที่มีพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดแรงต้านของอากาศ (Drag Forces) และแรงเสียดทานบริเวณพื้นผิววัตถุ โดยแรงต้านอากาศจะเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับการไหล สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ได้จากสมการที่ 1

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D V^2 \quad (1)$$

โดยที่ F_D คือ แรงต้านหรือแรงกดอากาศ (N), ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (1.2 kg/m^3), V คือ ความเร็วของอากาศ (m/s), A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2), C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงกดของอากาศ พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ 1 พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศมีผลกระทบต่อแรงต้านอากาศมากกว่าตัวแปรอื่นๆ ในขณะที่ตัวแปรอื่นๆ ในสมการมีค่าคงที่ เมื่อความซับซ้อนของวัตถุที่มีการประกอบขึ้นส่วนกันหลายชิ้นและมีช่องว่างเล็กๆ การประเมินหรือคำนวณหาแรงต้านจะมีความยุ่งยากมากขึ้นด้วยเช่นกัน ช่องว่างที่เล็กเหล่านี้จะส่งผลให้ความเร็วลมสูงขึ้นและมีค่าแรงต้านอากาศที่สูง ลักษณะปัญหารูปแบบนี้ โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหลจึงถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบและหาผลเฉลยของความซับซ้อนดังกล่าว

4. วิธีดำเนินการวิจัย

เริ่มต้นทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลทางทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำข้อมูลจากงานวิจัยมาสังเคราะห์ประเด็นปัญหา และผลลัพธ์ในข้อกำหนดที่ต่างกัน รวมไปถึงการศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นกับลิฟต์โดยสาร จากนั้น ทำการออกแบบ โมเดล (Fluid volume) ด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน เช่น การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของลิฟต์โดยสารภายในปล่องลิฟต์และปรับเปลี่ยนรูปทรงของปล่องลิฟต์ โมเดลเหล่านี้ จะถูกนำเข้าสู่โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล, ANSYS CFX ขั้นตอนนี้จะเป็น การตรวจสอบพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขที่ต่างกัน เพื่อใช้หาผลเฉลยของประเด็นปัญหาที่บ่งชี้ถึง แนวทางแก้ไขปัญหาตามขอบเขตของโครงการ ผลเฉลยจากโปรแกรม ANSYS CFX จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อ วิเคราะห์สร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบกราฟ ซึ่งกระบวนการทำงานวิจัยแสดงรายละเอียดในแผนภาพที่ 1 ดังรูป



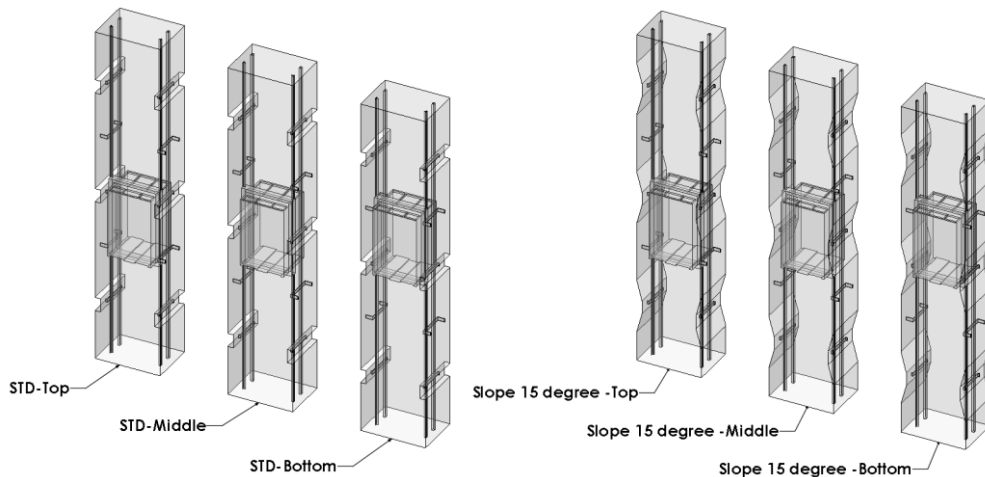
แผนภาพที่ 1 แผนผังแสดงกระบวนการทำงานวิจัย

5. ผลการวิจัย

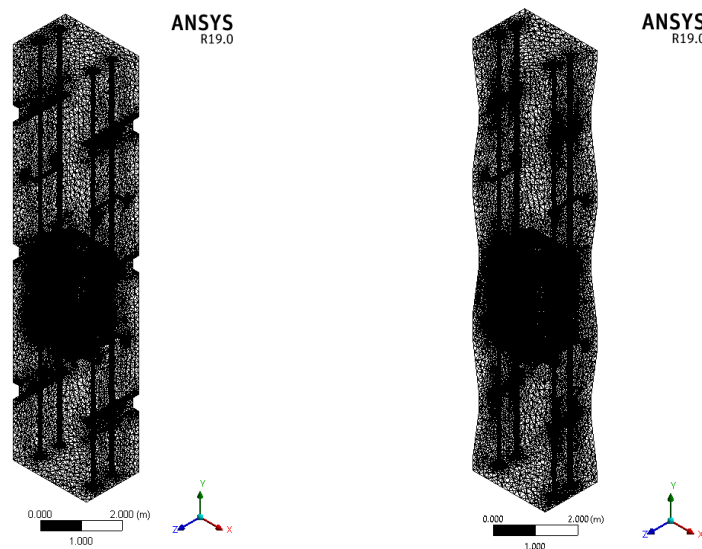
5.1 การจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหล CFD หรือที่เรียกว่าการจำลองระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตก (Navier-Stoke Equation) แบบของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการไหลของของไหล โมเดล 3 มิติ (Fluid volume) ของปล่องลิฟต์โดยสารถูกจำลองขึ้น แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ โดยปล่องลิฟต์โดยสารรูปแบบที่ 1 จะมีขนาดปล่องลิฟต์มาตรฐาน (Standard elevator shaft, STD) ตามแบบที่ผู้ผลิตได้กำหนดมาโดยจะมีคานขึ้นเข้ามาภายในปล่องลิฟต์ รูปแบบที่ 2 ปล่องลิฟต์โดยสารจะเพิ่มแผ่นปิดมุมบริเวณคานที่ขึ้นเข้ามาในปล่องลิฟต์ (Slope elevator shaft) ทำมุมองศา 8, 11.5 และ 15 องศา ดังแสดงในแผนภาพที่ 2 ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองปัญหา ความเร็วของอากาศจะถูกกำหนดไว้ที่ขอบเขตทางเข้า (Inlet) ในขณะที่เงื่อนไขขอบเขตทางออก (Outlet) จะกำหนดเป็นค่าเฉลี่ยของความดันบรรยากาศที่ ความแม่นยำของสมการความต่อเนื่องและโมเมนตัมถูกกำหนดให้มีความละเอียดขั้นสูง ด้วยเกณฑ์การลู่เข้าของผลลัพธ์จากการจำลอง (Convergence) ที่ความแตกต่างของตัวแปรน้อยกว่า 10^{-6} โดยรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลชนิด $k-\epsilon$ ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์กับเงื่อนไขการปรับปรุงพฤติกรรมกรไหล

บริเวณผนังแบบอัดโนมิติ เพื่อทำการตรวจสอบหาพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน X, Y, Z บริเวณที่พื้นผิวผนังของลิฟต์โดยสาร แผนภาพที่ 3 แสดงโครงตาข่าย (Mesh) พีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedral elements) เพื่อแบ่งรูปทรงของโมเดลปริมาตรของของไหลให้เป็นกริดย่อยๆ (Elements) ซึ่งแต่ละกริดจะเชื่อมต่อกันด้วยโหนด (Node) ที่ประกอบไปด้วยจำนวนโหนดประมาณ 1,800,000 และจำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 9,400,000



แผนภาพที่ 2 โมเดล Fluid volume ของปล่องลิฟต์ทั้ง 2 รูปแบบในตำแหน่งต่างๆ



a) ปล่องลิฟต์รูปแบบ STD

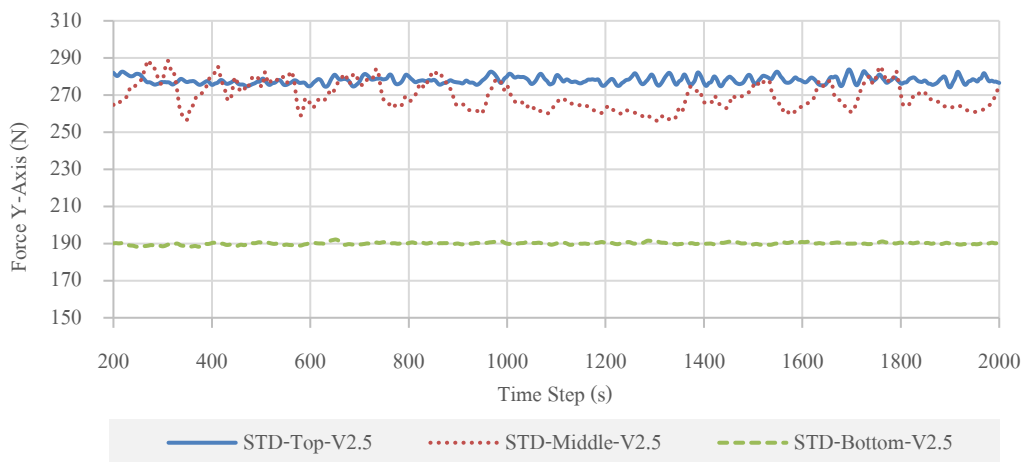
b) ปล่องลิฟต์รูปแบบ Slope

แผนภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างตาข่าย Mesh ของโมเดลปล่องลิฟต์ทั้ง 2 รูปแบบ

5.2 การวิเคราะห์ผลเฉลยของโปรแกรม ANSYS CFX

กรณีศึกษาที่ 1 จะเป็นรูปแบบปล่องลิฟต์ STD ตามข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตได้กำหนดมา โดยจะมีคานยื่นเข้ามาภายในปล่องลิฟต์ และมีความเร็วในการเคลื่อนที่ 2.5 เมตรต่อวินาที กำหนดตำแหน่งของห้องโดยสารลิฟต์เคลื่อนที่ผ่านคานในตำแหน่งด้านบน, กึ่งกลาง, และด้านล่างของห้องโดยสาร ซึ่งจะทำการตรวจสอบพฤติกรรม

ของแรงที่กระทำกับผนังลิฟต์โดยสารทั้ง 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในแผนภาพที่ 2 พบว่า ผลเฉลยของโปรแกรม ANSYS CFX พฤติกรรมของแรงในแต่ละ Iteration จะมีความปั่นป่วน ขนาดของแรงเฉลี่ยต่อพื้นที่หน้าตัดที่กระทำกับผนังลิฟต์สูงสุดจะเกิดขึ้นในแนวแกน Y (แนวตั้งตามการเคลื่อนที่ของห้องโดยสารลิฟต์) ในขณะที่แรงเฉลี่ยในแนวแกน X และ Z จะมีความแตกต่างกันตามตำแหน่งของห้องโดยสารที่เคลื่อนที่ผ่านคาน แต่มีขนาดของแรงที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับแรงเฉลี่ยในแนวแกน Y ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลเฉลยพฤติกรรมของแรงที่กระทำในแนวแกน Y ตำแหน่งทั้ง 3 ของห้องโดยสารเมื่อเคลื่อนที่ผ่านคาน ความผันผวนของขนาดแรงค่อนข้างรุนแรง ไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นที่ตำแหน่งช่วงบน (Top position) และกึ่งกลาง (Middle position) ขนาดของแรงแกว่งมากถึง 40 นิวตัน จะเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งกึ่งกลาง ในทางกลับกัน ตำแหน่งด้านล่าง (Bottom position) เมื่อห้องโดยสารเคลื่อนที่ผ่านคานจะมีความผันผวนของแรงเล็กน้อย ดังแสดงความสัมพันธ์ในแผนภาพที่ 4



แผนภาพที่ 4 แสดงพฤติกรรมของแรงในแนวแกน Y ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในปล่องลิฟต์รูปแบบ STD

ตารางที่ 2 ขนาดของแรงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในปล่องลิฟต์รูปแบบ STD

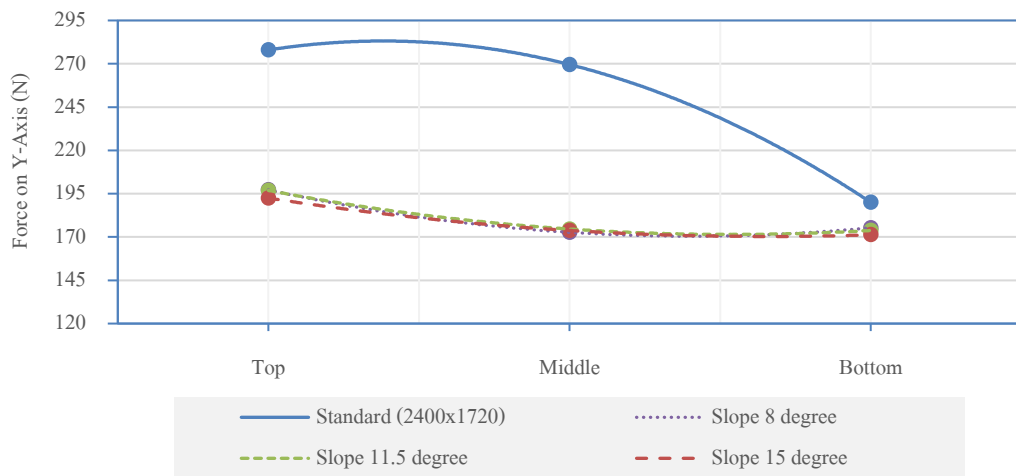
STANDARD ELEVATOR SHAFT (2400×1720)				
ELEVATOR POSITION	Velocity (m/s)	Force (N)		
		X-Axis	Y-Axis	Z-Axis
TOP	2.5	8.63	277.94	3.2
MIDDLE		5.69	269.55	1.64
BOTTOM		1.89	190.01	3.85

กรณีศึกษาที่ 2 โมเดลปล่องลิฟต์ถูกนำมาปรับปรุงพื้นผิวบริเวณคานที่ขึ้นเข้าไปในปล่องลิฟต์ โดยการเพิ่มแผ่นปิดมุม (Slope) ที่ทำมุมองศา 8, 11.5 และ 15 องศา ซึ่งยังคงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของห้องโดยสารทั้ง 3 ตำแหน่งเหมือนกับกรณีศึกษาที่ 1 ผลเฉลยพบว่า ขนาดของแรงเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแนวแกน X, Y, Z มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 3 ขนาดแรงสูงสุดยังคงเกิดขึ้นในแนวแกน Y ความผันผวนของขนาดแรงค่อนข้างสม่ำเสมอและราบเรียบกว่าโมเดลมาตรฐานในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยของ Slope ทั้ง 3 มุม พบว่า Slope 15 องศา ที่ตำแหน่งด้านบนห้องโดยสารที่เคลื่อนที่ผ่านคาน สามารถลดขนาดของแรงที่กระทำกับผนังลงได้ถึง 31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปล่องลิฟต์มาตรฐานที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบผล

เฉลี่ยทั้ง 3 แกนกับ โมเดลปล่องลิฟต์แบบมาตรฐาน (STD) ปรากฏว่า Slope 8 องศา สามารถลดแรงที่กระทำกับผนังลิฟต์ได้มากถึง 63 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามขนาดแรงเฉลี่ยที่เกิดขึ้นของ Slope ทั้ง 3 องศา มีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อยและคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในแผนภาพที่ 5

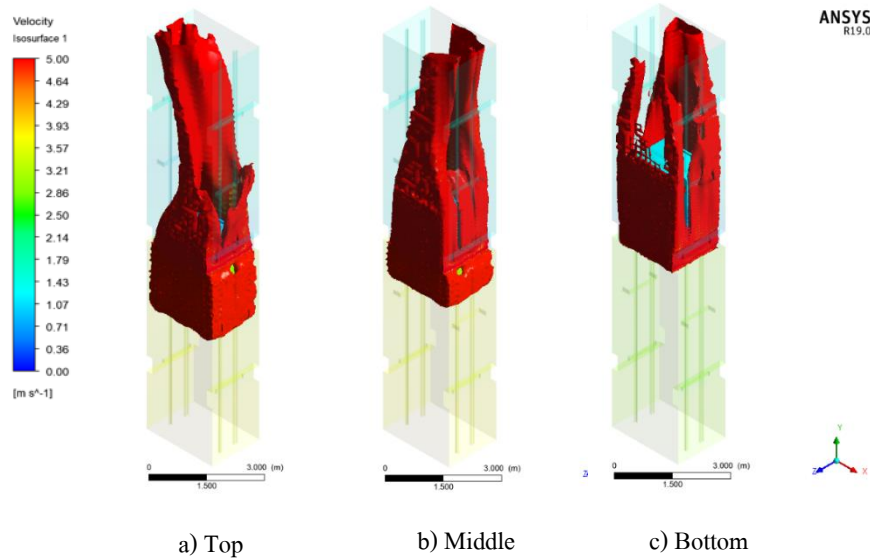
ตารางที่ 3 ขนาดของแรงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในปล่องลิฟต์รูปแบบ Slope ทั้ง 3 องศา

SLOPE ELEVATOR SHAFT (2400X1720)										
ELEVATOR POSITION	Velocity (m/s)	FX (N)			FY (N)			FZ (N)		
		8°	11.5°	15°	8°	11.5°	15°	8°	11.5°	15°
TOP	2.5	2.57	4.00	3.86	197.2	196.9	192.5	0.32	0.71	0.91
MIDDLE		3.57	2.60	1.56	172.7	174.6	173.7	3.24	9.74	10.14
BOTTOM		3.54	2.59	5.47	175.3	173.7	171.3	11.99	3.70	1.48

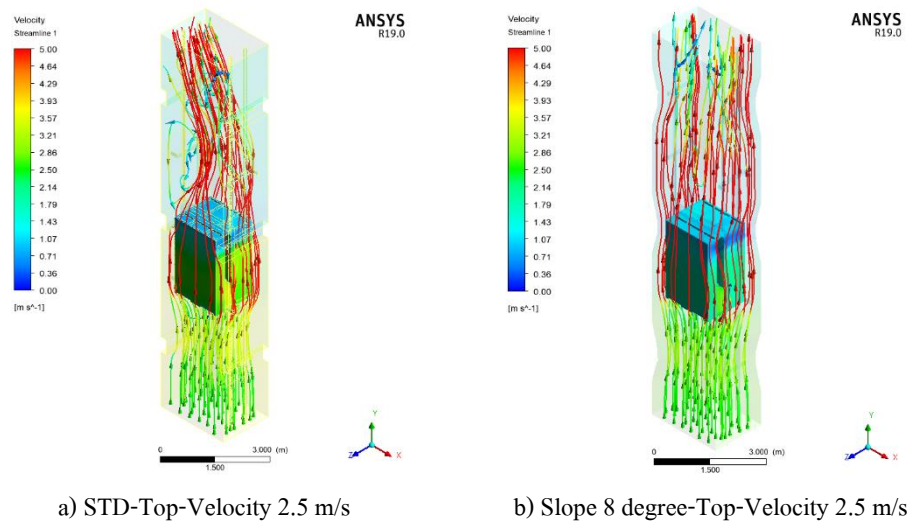


แผนภาพที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดของแรงที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของรูปแบบ STD และปล่องลิฟต์รูปแบบ Slope ที่มุมองศาต่างกัน

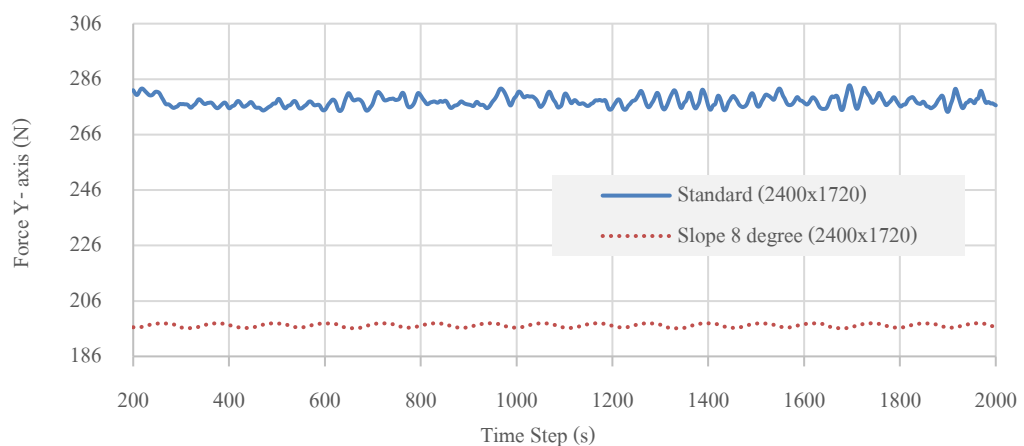
จากแผนภาพที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยในรูปแบบความเร็วพื้นผิวอิสระ (ISO surface contour) ของ โมเดลปล่องลิฟต์รูปแบบมาตรฐาน (STD) พบว่าความเร็วสูงจะเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างผนังห้องโดยสารกับปล่องลิฟต์ โดยจะห่อหุ้มห้องโดยสารทั้งหมด ความเร็วที่สูงจะเกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าและด้านหลังห้องโดยสารมากกว่าด้านข้างซ้ายและขวา ตำแหน่งด้านล่างห้องโดยสารเมื่อเคลื่อนที่ผ่านคานที่ยื่นเข้ามาในปล่องลิฟต์ พฤติกรรมของความเร็วจะกระจายไปยังมุมทั้ง 4 ด้านของห้องโดยสาร ซึ่งสามารถยืนยันผลเฉลยของกราฟที่แสดงในรูปภาพที่ 4 ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบเส้นของความเร็วที่ไหลผ่านห้องโดยสารระหว่างปล่องลิฟต์มาตรฐานที่มีคานยื่น (STD) กับปล่องลิฟต์มาตรฐานที่มีคานยื่นกับแผ่นปิดมุม (Slope 8 องศา) ดังแสดงในแผนภาพที่ 7 เห็นได้ชัดว่ารูปแบบของ Slope อากาศที่ไหลผ่านตัวลิฟต์โดยสารจะมีการกระจายตัวได้ดีกว่ารูปแบบ STD เนื่องจากความราบเรียบของพื้นผิวที่มีความต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากพื้นผิวภายในปล่องลิฟต์มาตรฐานที่มีคานยื่นซึ่งพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดหรือตั้งฉากกับผนังปล่องลิฟต์



แผนภาพที่ 6 แสดงพื้นผิวอิสระของความเร็ว (ISO surface contour) ในปล่องลิฟต์มาตรฐาน STD



แผนภาพที่ 7 แสดงเส้นความเร็ว (Streamline velocity) ทั้ง 2 รูปแบบ



แผนภาพที่ 8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมของแรงที่ตำแหน่ง Top ที่ความเร็ว 2.5 m/s ระหว่างปล่องลิฟต์รูปแบบ STD และรูปแบบ Slope

6. อภิปรายผล

การศึกษาพฤติกรรมของแรงที่กระทำกับผนังลิฟต์โดยสาร เมื่อปล่องลิฟต์มาตรฐานมีคานยื่นเข้ามาภายในทำให้ช่องว่างของอากาศบริเวณที่ลิฟต์โดยสารเคลื่อนที่ผ่านมีขนาดเล็กลง เป็นสาเหตุให้ความเร็วบริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงกระทำต่อผนังห้องโดยสารของลิฟต์มากขึ้นต่อเนื่องถึงปัญหาการสั่นสะเทือนตามมา โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหลจึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าว โดยการจำลองโมเดล 3 มิติของปล่องลิฟต์มาตรฐาน ที่ได้ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นในตำแหน่งการเคลื่อนที่ผ่านคานที่ยื่นเข้ามาของลิฟต์โดยสาร 3 ตำแหน่งคือ ด้านบนห้องโดยสาร, กึ่งกลางห้องโดยสาร, และด้านล่างห้องโดยสาร ในขณะที่ลิฟต์โดยสารเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.5 เมตรต่อวินาที สำหรับอาคารสูงจำนวน 40 ชั้น พร้อมทั้งทำการปรับปรุงโมเดลปล่องลิฟต์มาตรฐานให้บริเวณคานที่ยื่นเข้ามามีแผ่นปิดทึบมุม 8, 11.5, และ 15 องศา ภายใต้สมมุติฐานทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ ที่แรงต้านอากาศมีสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วยกกำลังสอง เมื่อตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ ผลเฉลยของโปรแกรม ANSYS CFX แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณพื้นที่ช่องว่างแคบๆ ระหว่างห้องโดยสารลิฟต์กับคานที่ยื่นเข้ามาในปล่องลิฟต์มาตรฐาน ทำให้ความเร็วบริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้แรงกระทำในแนวแกนคิงมีค่าสูงกว่าแนวแกนอื่นๆ โดยที่ความผันผวนของขนาดแรงที่กระทำจะแกว่งในช่วง 40-60 นิวตัน จะเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งด้านบนและกึ่งกลางของห้องโดยสาร ในขณะที่ด้านล่างห้องโดยสารขนาดของแรงมีความผันผวนน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการวิเคราะห์ผลเฉลยของรูปแบบโมเดลที่ปรับปรุงโดยการเพิ่มแผ่นปิดมุมทั้ง 3 องศา พบว่า พฤติกรรมการไหลของอากาศมีความต่อเนื่องและผันผวนน้อยลงอย่างชัดเจน อากาศสามารถกระจายตัวได้รอบทิศทาง อีกทั้งขนาดของแรงที่กระทำกับผนังห้องโดยสารลดลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยกับรูปแบบมาตรฐานพบว่า รูปแบบโมเดล Slope 8, 11.5 และ 15 องศาจะสามารถลดขนาดของแรงลงได้ถึง 63, 54, 52 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า โครงสร้างอาคารที่ออกแบบให้ภายในปล่องลิฟต์มีคานยื่นเข้ามา เป็นสาเหตุให้การเคลื่อนที่ของห้องโดยสารมีการสั่นสะเทือน จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในปล่องลิฟต์โดยสารด้วยโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลเฉลยแสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงแก้ไขบริเวณคานยื่นให้มีแผ่นปิดมุมจะทำให้การไหลของอากาศมีความต่อเนื่องและความผันผวนของแรงที่กระทำกับผนังลิฟต์น้อยลง มีการกระจายตัวของความเร็วอากาศได้ดี จึงนำเสนออีกหนึ่งแนวทางแก้ไขของปัญหานี้และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ของโครงการ อย่างไรก็ตาม ค่าใช้จ่ายของแผ่นปิดมุม 8 องศาจะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าแผ่นปิดมุม 15 องศา ในทางกลับกันการขยายปล่องลิฟต์มากกว่าขนาดมาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดก็ส่งผลถึงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างด้วยเช่นกัน

7. ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรออกแบบโดเมนเป็นแบบ Multibody และกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์ที่เป็นแบบการหน่วงเวลา (Transient) เพื่อเพิ่มความแม่นยำของสมการความต่อเนื่องและผลเฉลยของพฤติกรรมการไหลของอากาศ
- 2) ในขั้นตอนการออกแบบการสร้างปล่องลิฟต์ควรปฏิบัติตามมาตรฐาน EN81-20 และ EN81-50 กำหนดไว้ว่า ควรเพิ่มขนาดของปล่องลิฟต์จากแบบที่ผู้ผลิตได้กำหนดมาตามความเหมาะสมของพื้นที่ตัวอาคาร สอดคล้องกับต้นทุนการผลิต รวมทั้งไม่ควรมีคาน หรือส่วนใดส่วนหนึ่งของอาคารยื่นเข้าไปภายในปล่องลิฟต์

8. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท MITSUBISHI ELECTRIC THAI CO.,LTD ที่ได้สนับสนุนข้อมูลทางด้านเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่สนับสนุนให้ความช่วยเหลือทางด้านข้อมูล และเอกสารในการจัดทำงานวิจัยชิ้นนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- ชนพงศ์ อุ่มปรีชา (2016). *อุโมงค์ลมจำลอง*, โรงเรียนเจ้าอาวาส กรมยุทธศึกษาทหารอากาศ, กรุงเทพฯ
- Antti Lehtinen, Gabriela Roivainen, Jukka Tanttari, and Jaakko Ylatalo, (2017). Aero-Vibro Acoustic Noise Prediction for High Speed Elevators, *Acoustical Society of Finland*, 24, pp. 317-322.
- Cai Weiyong, Ling Zhangwei, Tang Ping, and Ding Zhen Yu, (2015). *Optimization design on dome shape of high-speed elevator*, 4th International Conference on Mechanical, Materials, Chemistry and Computer Engineer, pp. 2362-2365.
- Fullerton Jeffrey L., (2006). *Review of elevator noise and vibration criteria, sources and control for multifamily residential buildings*, 35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Volume 5, pp. 3431-3438.
- Jia Hui Ang., Yusri Yusup, Sheikh Ahmad Zaki, Ali Salehabadi, and Mardiana Idayu Ahmad, (2019). CFD Study on the Behaviour and Turbulence of the Airflow Induced by The Moving Elevator Car in Elevator Shaft Using K Epsilon Model, *CFD Letters an International Journal*, 11(11), pp. 1-12.
- Lemiao Qiu, Zili Wang, Shuyou Zhang, Lichun Zhang, and Jie Chen, (2020). Vibration-Related Design Parameter Optimization Method for High Speed Elevator Horizontal Vibration Reduction, *Shock and Vibration Journal*, 2020, Article ID 1269170, pp. 1-20.
- HJ. Patthi Bin Hussain, Zhu Yuesheng, Murthy Rallapalli, and Jamaluddin Mahmud, (2014). The Summary Research on the Noise of High-Speed Traction Elevators, *Applied Mechanical and Materials*, 541-542, pp. 716-721.
- Yangki Oh, Minwoo Kang, Kwangchae Lee, and Sunkuk Kim, (2020). Construction Management Solutions to Mitigate Elevator Noise and Vibration of High-Rise Residential Buildings, *Sustainability*, 12(8924), pp. 1-21.
- Zhangwei Ling, Ping Tang, Xuebin Wang, Zheng Lin, and Di Tang, (2015). *Research on the drags of high-speed elevator with different height diversion cover*, 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineer, pp. 2366-2370

การเสริมกำลังอาคารโรงพยาบาลโดยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
เพื่อต้านทานแผ่นดินไหว
STRENGTHENING OF HOSPITAL BUILDING WITH REINFORCED
CONCRETE JACKETING COLUMN FOR EARTHQUAKE RESISTANT

นุกูล บุญอินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: Nukool.bo@hotmail.com

ไพบุณย์ ปัญญาอะโป

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: phaiboon.pa@spu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการเสริมกำลังโครงสร้างอาคาร โรงพยาบาลเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการศึกษา อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้นซึ่งเป็นอาคารผู้ป่วยพิเศษสังกัดกระทรวงสาธารณสุข ถูกเลือกใช้เป็นอาคารต้นแบบ ในการประเมินกำลังของโครงสร้างอาคาร โดยทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงแบบไม่เชิงเส้นของโครงสร้างแบบหน้าตัดไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม PERFORM-3D และวิเคราะห์โดยวิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้น เพื่อประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้างจากแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในพื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย ผลจากการวิเคราะห์การผลัดอาคารเดิมก่อนเสริมกำลัง พบว่า โครงสร้างเสาในชั้นล่างที่อยู่โดยรอบอาคารและผนังก่ออิฐมีความเสียหายมากเกินกว่าระดับสมรรถนะการป้องกันพังทลาย และผลจากการวิเคราะห์การผลัดอาคารหลังการเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณเสารอบนอกและภายในอาคารตั้งแต่ระดับชั้นตอม่อจนถึงชั้นบนสุด พบว่าสามารถเพิ่มกำลังของโครงสร้างอาคาร โดยไม่พบความเสียหายของเสาและผนังรับแรงเฉือน ทำให้โครงสร้างเสาและผนังรับแรงเฉือนของอาคารมีความปลอดภัยอยู่ในระดับช่วงสมรรถนะระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที

คำสำคัญ: การเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหว การหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดไฟเบอร์
วิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้น

ABSTRACT

This paper presents the seismic strengthening of the hospital building structure by using the reinforced concrete jacketing columns. In this study, a 4-storey reinforced concrete building, in accordance with the Ministry of Public Health specifications, was selected as the structural model. To assess the seismic performance of the structure, the force-deformation relationship of the concrete and reinforcing steel were modeled in the form of the fiber cross-section of the structure. The nonlinear static analysis was conducted for the existing and the retrofit

structures to assess the seismic performance due to the potential earthquakes in the northern region of Thailand by using the PERFORM-3D computer program. For the existing structure, it was found that the columns and brick infill walls at the ground floor were severely damage beyond the Collapse Prevention (CP) performance. For the structure with the retrofitted columns, it was found that the strength of the structure was improved up to the level of Immediate Occupancy (IO) performance.

Keywords: Seismic Strengthening, Reinforced Concrete Jacketing, Fiber Cross -section, Nonlinear Static Analysis.

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปที่ไม่ได้มีการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว มีความเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ภายใต้เหตุการณ์แผ่นดินไหว เนื่องจากโครงสร้างอาคารอาจไม่ได้รับการออกแบบให้มีค่ากำลัง (strength) และสติฟเนส (stiffness) ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างเพียงพอ รวมทั้งองค์อาคารของเสาและคานไม่ได้รับการออกแบบรายละเอียดการเสริมเหล็กให้มีความเหนียว (ductility) ในการต้านทานแรงกระทำแบบไป-กลับได้ โดยโครงสร้างอาคารที่มีลักษณะดังกล่าวนี้มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทยในปัจจุบัน หากโครงสร้างอาคารเหล่านี้ได้มีการออกแบบเสริมกำลังป้องกันไว้ก่อน ก็จะลดความสูญเสียจากแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในด้านของชีวิตและทรัพย์สินเป็นอันมาก โดยเฉพาะ อาคารโรงพยาบาลเป็นอาคารที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งจำเป็นต้องรองรับการบริการผู้ป่วยอยู่ตลอดเวลา หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยซึ่งเป็นเขตที่มีความรุนแรงแผ่นดินไหวในเกณฑ์สูง โครงสร้างอาคารจะต้องมีความปลอดภัยในระดับที่ยังสามารถเข้าใช้งานได้

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาสมรรถนะของโครงสร้างอาคารโรงพยาบาลตัวอย่างที่เสริมกำลังโครงสร้างด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketing) เนื่องจากเป็นเทคนิควิธีการที่ง่ายในการก่อสร้างและประหยัด สามารถเพิ่มกำลังและสติฟเนสของเสาให้สูงขึ้นได้ จึงได้เลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้นซึ่งเป็นอาคารผู้ป่วยพิเศษ สังกัดกระทรวงสาธารณสุข ใช้เป็นอาคารต้นแบบสำหรับการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการประเมินกำลังโครงสร้างอาคาร ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงแบบไม่เชิงเส้นของโครงสร้างแบบหน้าตัดไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม PERFORM-3D และวิเคราะห์โดยวิธีการผลกแบบสถิตไม่เชิงเส้น เพื่อประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างจากแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในพื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

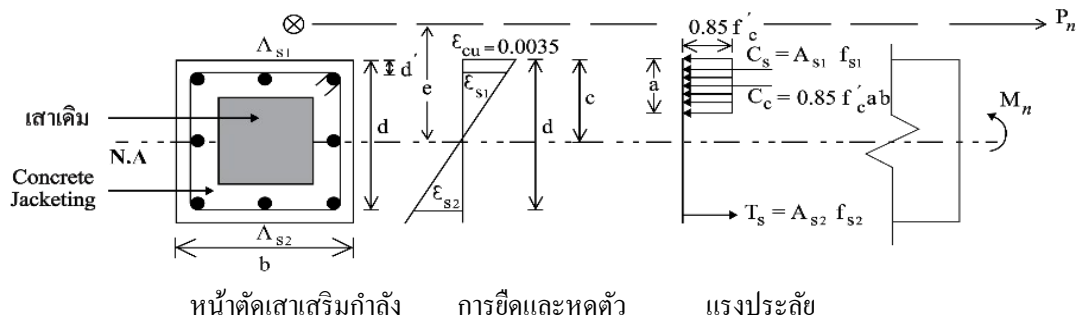
ก) เพื่อศึกษาพฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย และประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นและสมรรถนะของโครงสร้างอาคาร

ข) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ โครงสร้างอาคารหลังจกที่เสริมกำลังโครงสร้าง ด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก และประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคาร

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การออกแบบของค้ำอาคารเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการคำนวณแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้าง ใช้ตามข้อกำหนดในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 กำหนดความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุด อ.วังชิ้น จ.แพร่ ใช้คาบการสั่น ในช่วงสั้น (S_u) = 1.086g และคาบการสั่น 1 วินาที (S_1) = 0.275g และกำหนดสภาพชั้นดินที่ตั้งอาคารเป็นชั้นดินปกติ เมื่อกำหนดค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ จะได้ค่า S_{DS} = 1.159g, S_{D1} = 0.485g ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคารประเภท IV ($I=1.5$) ข้อมูลเหล่านี้ทำให้จำแนกประเภทการออกแบบด้านทานแผ่นดินไหวเป็นประเภท ง เมื่อพิจารณาแบบโครงสร้างอาคาร จึงใช้โครงสร้างค้ำคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง โดยมีค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง $R = 5$ และเพิ่มค่าแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ออกแบบของค้ำอาคารอีก 40% ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสำหรับอาคารที่สูงไม่เกิน 40 เมตร ทำการคำนวณหาค่าแรงเฉือนพื้นฐานของอาคารด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าวิเคราะห์โครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม ETABS และนำค่าแรงภายในขององค้ำอาคาร มาใช้ในการออกแบบเสริมกำลังเสาอาคาร โดยแสดงภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงแรงของหน้าตัดเสาเสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

หน้าตัดเสาที่เหล็ยมีแรงกระทำ P_n ที่ระยะการเอียงศูนย์กลาง e จากแนวแกนสะเทินของเสา ซึ่งการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเสริมกำลัง สามารถได้จาก

$$M_n = P_n e + 0.85 f'_c ab \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_{s1} f_{s1} (d - d') + M_{exc} \quad (1)$$

เมื่อ P_n คือ แรงแนวแกนสูงสุดระบุ (Nominal Axial Force) กระทำต่อเสาเสริมกำลัง, e คือ ระยะเอียงศูนย์กลางของแรงกระทำ, M_n คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเสริมกำลัง, M_{exc} คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเดิม, f'_c คือ กำลังอัดคอนกรีต, d คือ ความลึกของหน้าตัดประสิทธิภาพของเสาเสริมกำลัง, a คือ ความลึกของการกระจายความเค้น b คือ ความกว้างของผิวหน้ารับแรงอัด d' คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่รับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กรับแรงอัด d คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่รับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง, A_{s1} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด f_{s1} คือ หน่วยแรงเหล็กเสริมรับแรงอัด, A_{s2} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง, f_{s2} คือ หน่วยแรงเหล็กเสริมรับแรงดึง, c_c คือ แรงอัดในคอนกรีต, c_s คือ แรงอัดในเหล็กเสริม, T_s คือ แรงดึงในเหล็กเสริม

3.2 การทบทวนผลงานวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา Lee and Woo (2002) ได้ทำการทดสอบการใส่ผนังก่ออิฐแบบเต็มส่วน โดยใช้โตะเขย่าให้เกิดการสั่น ด้วยอัตราเร่งจากการจำลองคลื่นแผ่นดินไหว พบว่าการมีผนังก่ออิฐทำให้เพิ่มสติเฟนสของโครงสร้าง และกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ฐานเพิ่มขึ้น ต่อมา Magenes and Pampanin (2004) วิเคราะห์โครงสร้างจำลองสูง 6 ชั้นแบ่งเป็น 3 ช่วง ด้วยวิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้นและวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยพิจารณาผลของผนังก่ออิฐแบบบางส่วนและแบบเต็มส่วน ผลการวิเคราะห์แสดงว่า ผนังก่ออิฐมีผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น และมีผลกระทบต่อค่าแรงเฉือนที่จุดต่อคาน-เสา ไพนุลย์และ อนุชาติ (2013) ศึกษาการเสริมกำลังผนังก่ออิฐก่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์เสริมตะแกรงเหล็กฉีก สำหรับอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น พบว่าผนังที่มีช่องเปิด ให้ค่ากำลังที่ลดลง จากกรณีผนังทึบ เนื่องจากพื้นที่ตัดส่วนของผนังลดลงด้วยพื้นที่ช่องเปิด ผลของการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีกให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าผนังก่ออิฐเดิม คำรบและไพนุลย์ (2556) ศึกษาการประเมินค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยวิธีการผลัดแบบวัฏจักร สำหรับอาคารเรียนสูง 4 ชั้น พบว่า วิธีการผลัดแบบวัฏจักรให้ผลค่าการเคลื่อนที่สูงสุด ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ และค่าดัชนี ความเสียหาย ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ไพนุลย์ และภุริพงษ์ (2557) ศึกษาการเสริมกำลังอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น เพื่อต้านทานแผ่นดินไหวด้วยวิธีของอาคารยึดรั้งไว้การโค้งเคาะ ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างแบบหน้าตัดไฟเบอร์ด้วยโปรแกรม PERFORM-3D และวิเคราะห์ด้วยวิธีการผลัดแบบสถิตไม่เชิงเส้น 3 มิติและวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น พบว่า หลังการเสริมกำลัง โครงสร้างอาคารด้วยวิธียึดรั้งไว้การโค้งเคาะบริเวณขอบอาคาร ไม่พบความเสียหายของเสาอาคารและ ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นอาคารมีค่าไม่เกินข้อกำหนด พรเทพและคณะ (2017) ศึกษาผลการวิเคราะห์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหว โดยเสริมกำลังด้วยวิธีการพอกคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งเสาและคาน พบว่าค่า demand-capacity ratio จากการวิเคราะห์ ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าจะมีค่ามากกว่าค่าที่ควรจะเป็นด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นจากการใช้คลื่นแผ่นดินไหว

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ขั้นตอนการวิจัย

ก) ทำการคัดเลือกแบบอาคารโรงพยาบาลสูง 4 ชั้น (อาคารผู้ป่วยพิเศษ) ตามแบบมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุข ซึ่งตั้งอยู่บริเวณภาคเหนือของประเทศไทยที่อาจได้รับผลกระทบที่กำหนดให้เป็นเขตที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวระดับสูง ซึ่งโครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้มีการออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ข) ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของอาคารเดิมด้วยวิธี Pushover Analysis เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นและทำการออกแบบเสริมกำลังอาคารเดิมโดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของ อ.วังชิ้น จ.แพร่ เนื่องจากเป็นจังหวัดที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวสูงสุดตามมาตรฐานการออกแบบ โดยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก(Concrete Jacketing) ในส่วนของเสาที่เกิดความเสียหาย

ค) ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของคานและเสาบริเวณข้อหมุนพลาสติกแบบหน้าตัดไฟเบอร์และวิเคราะห์พฤติกรรมด้านทานแผ่นดินไหวภายหลังการเสริมกำลังโดยวิธีการผลึกอาคาร (Pushover Analysis)

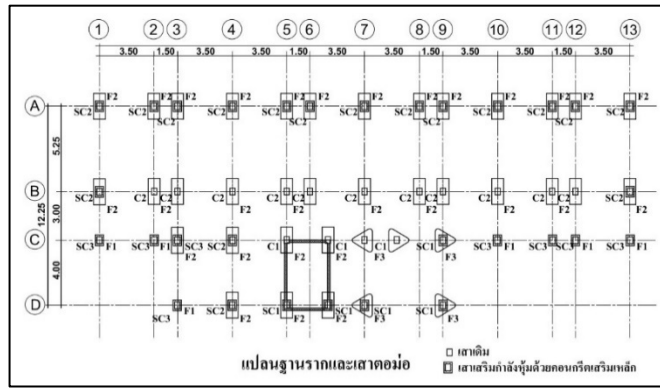
ง) ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงสร้างเปรียบเทียบระหว่างอาคารเดิมกับอาคารที่ได้รับการเสริมกำลัง

4.2 โครงสร้างอาคารตัวอย่างเดิมและการเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

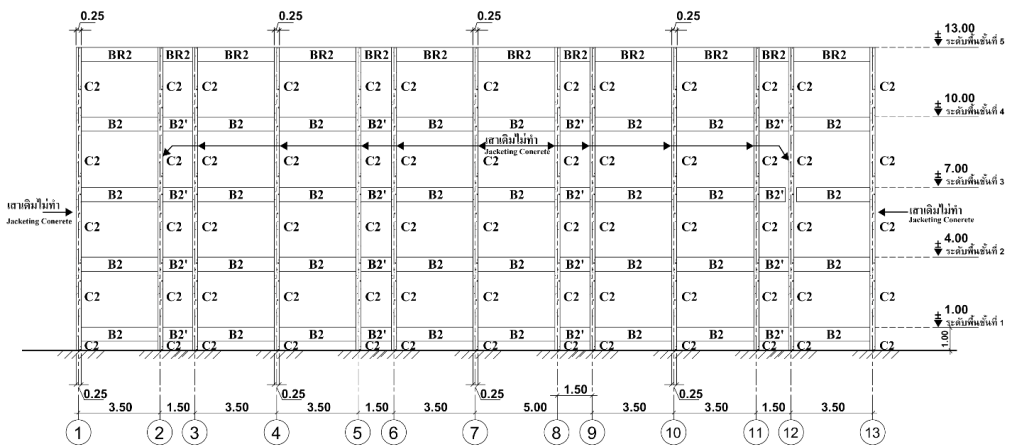
อาคารตัวอย่างหลังนี้ได้ถูกการออกแบบโดยใช้วิธี Working Stress Design ตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ผังอาคารมีลักษณะไม่สมมาตร โดยมีผังอาคารของโครงสร้างแสดงในภาพที่ 2 และมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

ผังอาคารมีขนาด 12.25 x 34.00 เมตร ความสูง 17.50 เมตร ภายในอาคารแต่ละชั้นมีการกั้นผนังอิฐมวลเบาเพื่อใช้เป็นห้องรักษาผู้ป่วยพิเศษ พื้นอาคารทั่วไป รวมทั้งพื้นระเบียงกันสาดและพื้นห้องน้ำเป็นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ รับน้ำหนักบรรทุกจร 300 กก./ตร.ม. โครงสร้างอาคารเป็นระบบคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กเสาอาคาร C1,C2 ขนาด 0.25 x 0.40 เมตร และเสา C3 ขนาด 0.25 X 0.25 เมตร โดยมีการเสริมเหล็กแตกต่างกันสำหรับคานทั่วไปมีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดคือ 0.15 x 0.50 เมตร, 0.20 x 0.50 เมตร, 0.20 x 0.60 เมตร คอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัย 173 กก./ซม². สำหรับแท่งคอนกรีตขนาด 15 x 15 x 15 ซม. เหล็กข้ออ้อยใช้เกรด SD30 เหล็กกลมใช้เกรด SR24

โครงสร้างอาคารผู้ป่วยพิเศษ 4 ชั้น มีลักษณะต่างๆ ที่มีความเสี่ยงสูงจากแผ่นดินไหว อาทิเช่น (1) เสาต่อม่อความสูง 1 เมตร จากระดับดินเดิม ทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดการพังทลายแบบแรงเฉือนที่ระดับเสาต่อม่อ (2) เสามีขนาดเล็ก (C3) บางต้น เมื่อเทียบกับขนาดของคาน มีแนวโน้มที่จะเกิดการพังทลายแบบเสาอ่อน-คานแข็ง (Weak Column Strong Beam) (3) เสาที่มีปริมาณเหล็กปลอกต่ำ มีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายจากแรงเฉือน ซึ่งมีลักษณะการพังทลายแบบเปราะ โดยมีรายละเอียดรูปตัดตามยาวแกน A เป็นตัวอย่างของโครงสร้างอาคารเดิมรวมทั้งแบบแปลนแสดงตำแหน่งของเสาเดิมและเสาเสริมกำลังหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กดังภาพที่ 2 และแบบแปลนแสดงเหล็กเสริมเสาอาคารก่อนและหลังเสริมกำลัง ดังภาพที่ 3



(ก) ผังอาคาร



(ข) รูปตัดตามยาวแกน A ของโครงสร้างอาคาร

ภาพที่ 2 (ก) ผังอาคาร, (ข) รูปตัดตามยาวแกน A ของโครงสร้างอาคาร

ชั้น \ เสา	C1	C2	C3
บนพื้นหลังคา รับหลังคาคลุมห้อง ลิฟท์	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ป1Ø6 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ป1Ø6 มม. @0.20 C/C	—
บนพื้นชั้น 4 รับหลังคา	↑	↑	↑
บนพื้นชั้น 3 รับพื้นชั้น 4	เหล็กชั้น 8-Ø25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ป1Ø6 มม. @0.20 C/C
บนพื้นชั้น 2 รับพื้นชั้น 3	เหล็กชั้น 8-Ø25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø19 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 4-Ø19 มม. ป1Ø6 มม. @0.20 C/C
บนพื้นชั้น 1 รับพื้นชั้น 2	เหล็กชั้น 10-Ø25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø25 มม. + 4-Ø19 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø19 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C
ค่อม	เหล็กชั้น 10-Ø25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø25 มม. + 4-Ø19 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C	เหล็กชั้น 6-Ø19 มม. ป1Ø9 มม. @0.20 C/C

(ก) เสาเดิม

ชั้น \ เสา	C1	C2	C3
บนพื้นหลังคา รับหลังคาคลุมห้อง ลิฟท์	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	—
บนพื้นชั้น 4 รับหลังคา	↑	↑	↑
บนพื้นชั้น 3 รับพื้นชั้น 4	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20
บนพื้นชั้น 2 รับพื้นชั้น 3	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20
บนพื้นชั้น 1 รับพื้นชั้น 2	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20
ค่อม	เหล็กชั้น 12-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 26-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20	เหล็กชั้น 26-DB25 มม. ป1Ø9 มม. @0.20

(ข) เสาเสริมกำลัง

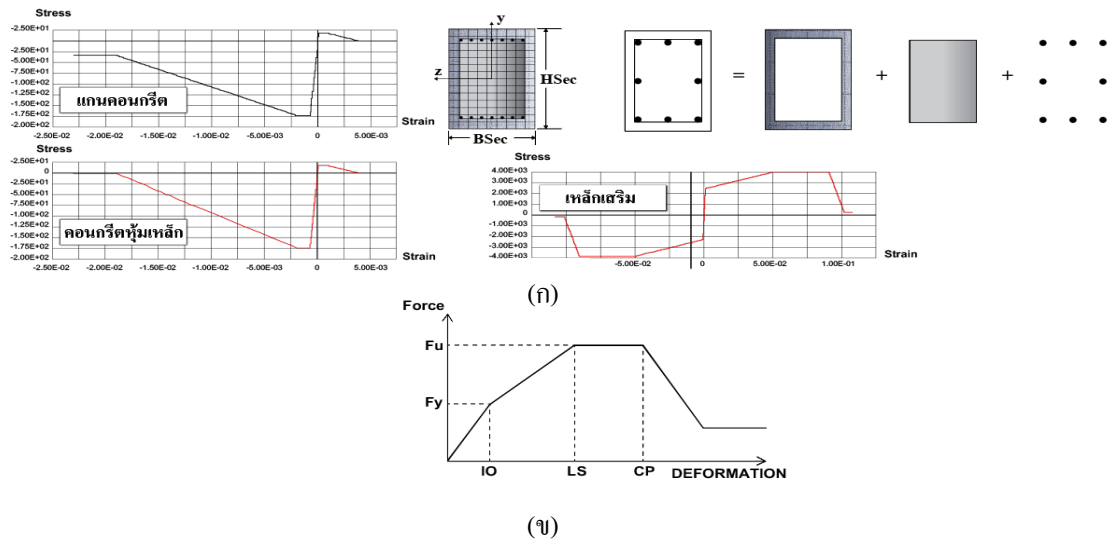
ภาพที่ 3 (ก) เสาเดิม, (ข) เสาเสริมกำลัง

4.3 แบบจำลองโครงสร้าง

ในการจัดทำแบบจำลองโครงสร้างใช้โปรแกรม PERFORM 3D โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก) รูปตัดไฟเบอร์ (Fiber Section)

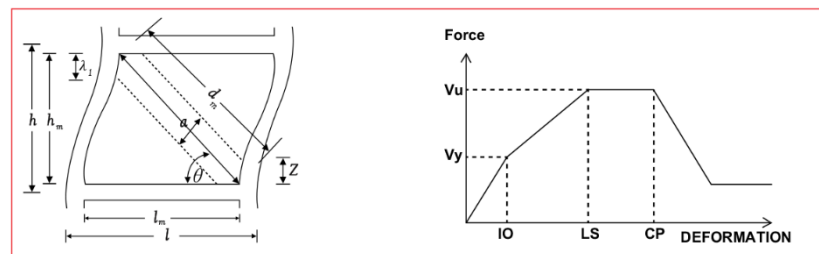
ส่วนประกอบนี้ใช้ในการจำลองพฤติกรรมอนิลาสติก ภายใต้การวิบัติเนื่องจากแรงคด และการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่บริเวณจุดต่อของเสาและคาน หลักการสำคัญของส่วนประกอบนี้คือการแบ่งหน้าตัดองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่บริเวณปลายขององค์อาคารออกเป็นส่วนๆ (ไฟเบอร์) โดยรูปตัดไฟเบอร์ จะจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ (1) คอนกรีตหุ้มเหล็ก (Covered concrete) (2) แกนคอนกรีต (Confined concrete) และ (3) เหล็กเสริม ไฟเบอร์แต่ละประเภทจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 4 จากความสัมพันธ์ Force - Deformation ของคอนกรีตและเหล็กเสริม นำมาใช้วัดสมรรถนะของโครงสร้าง 3 ระดับตามที่แสดงในภาพที่ 4 (ข) ได้แก่ ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO), ระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS) และระดับป้องกันการพังทลายโดยสิ้นเชิง (CP)



ภาพที่ 4 ภาพแบบจำลองรูปตัดไฟเบอร์(Fiber Section)

ข) แบบจำลองพฤติกรรมผนังอิฐก่อในโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก

การจำลองพฤติกรรมผนังอิฐก่อในโครงคอนกรีตเสริมเหล็กใช้วิธี Equivalent Strut Model ซึ่งเป็นแรงค้ำยันแนวทแยงที่ขยับเท่าตามข้อเสนอแนะ FEMA 306 แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 พฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างและสมรรถนะของผนังอิฐก่อ

แรงอัดค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่า (Equivalent Compression Strut) คำนวณจาก

$$V_c = af'_m \cos \theta \quad (2a)$$

$$a = 0.175 (\lambda_1 h_m)^{-0.4} d_m \quad (2b)$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_m t \sin 2\theta}{4E_c I_g h_m} \right]^{0.25} \quad (2c)$$

เมื่อ f'_m คือกำลังรับแรงอัดของผนังปรีซึม θ คือ มุมในแนวทแยงของการค้ำยัน t คือ ความหนาของผนังอิฐก่อ I_g คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของเสา h_m คือ ความสูงของผนังอิฐก่อ E_m คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของผนังอิฐก่อ E_c คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของโครงสร้าง d_m คือ ความยาวแนวทแยงของแผ่นผนังก่อ

4.4 การวิเคราะห์การผลักอาคารแบบสถิตไม่เชิงเส้นโดยวิธี Pushover Analysis

ขั้นตอนการวิเคราะห์การผลักอาคารแบบสถิตไม่เชิงเส้นโดยวิธี Pushover Analysis สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดย 1) คำนวณหาค่าระยะการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) โดยวิธี Displacement Coefficient Method (ASCE/SEI 41-06, FEMA 356-2000, มยพ. 1303-57) 2) ทำการผลักอาคารไปยังค่าระยะการเคลื่อนที่เป้าหมาย 3) ตรวจสอบค่า Demand - Capacity Ratio (DCR) ของโครงสร้างแต่ละชั้นโดยวัดสมรรถนะของโครงสร้าง 3 ระดับ ได้แก่ระดับเข้าใช้งานได้ทันที (IO), ระดับความปลอดภัยต่อชีวิต (LS), ป้องกันการพังทลายโดยสิ้นเชิง (CP)

ในการศึกษานี้ได้คำนวณค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายจากสมการที่ 3 ของอาคารเดิมและอาคารเสริมกำลังสำหรับแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงมากพื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย(อ.วังชิ้น จ.แพร่)

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (3)$$

โดยที่ $C_0=1.3, C_1=1.44, C_2=1.13$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ตามมาตรฐาน มยพ. 1303-57

$S_a=1.159, T_e=0.3900 \text{ sec}$ (ก่อนเสริมกำลัง), $T_e=0.1774 \text{ sec}$ (หลังเสริมกำลัง)

ผลการคำนวณ แสดงในรูปของค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Drift Ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนที่เป้าหมายและความสูงทั้งหมดของอาคาร สำหรับอาคารเดิมและอาคารเสริมกำลังในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Drift Ratio) ของอาคารเดิม

ทิศทางการผลักอาคาร	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (1×Target Drift Ratio)	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (2×Target Drift Ratio)	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (3×Target Drift Ratio)
H1 ตามยาว	0.0053	0.0106	0.0159

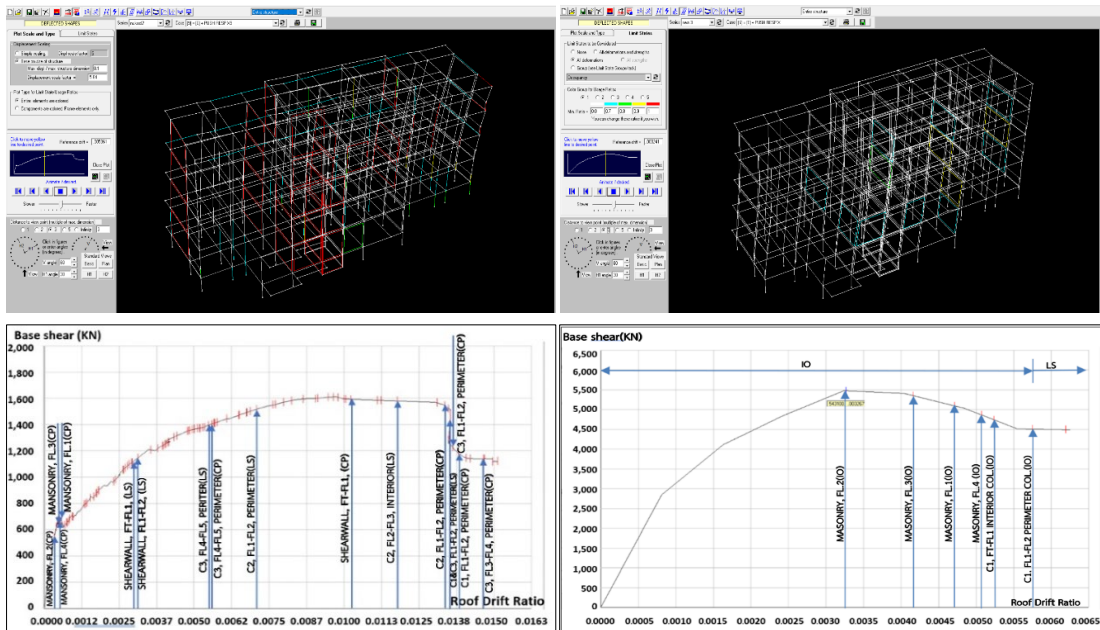
ตารางที่ 2 ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Drift Ratio) ของอาคารเสริมกำลัง

ทิศทางการผลักอาคาร	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (1×Target Drift Ratio)	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (1.5×Target Drift Ratio)	ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนที่เป้าหมาย (2×Target Drift Ratio)
H1 ตามยาว	0.0034	0.0051	0.0068

5. ผลการศึกษา (Results)

5.1 ผลการวิเคราะห์การผลักอาคาร

ผลการวิเคราะห์การผลักอาคารเดิมและอาคารเสริมกำลัง แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) และอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร (Roof Drift Ratio, RDR) เฉพาะสำหรับการผลักในทิศทางตามยาว (H1) ในภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเดิมสามารถต้านทานแรงเฉือนที่ฐาน ณ การเคลื่อนที่เป้าหมายได้เท่ากับ 1,340 กิโลนิวตันและต้านทานแรงเฉือนสูงสุดได้เท่ากับ 1,600 กิโลนิวตัน และภายหลังเสริมกำลังสามารถต้านทานแรงเฉือนที่ฐาน ณ การเคลื่อนที่เป้าหมายได้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 5,500 กิโลนิวตันและเป็นกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุด



(ก) อาคารเดิม

(ข) อาคารเสริมกำลัง

ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์การผลักอาคาร

5.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์การผลักอาคารเดิมก่อนเสริมกำลัง แสดงในภาพที่ 6(ก) เมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงหนึ่งเท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($1 \times \text{Target Drift Ratio}$) ผนังก่ออิฐอาคารทุกระดับชั้นของอาคารมีการพังทลาย (CP) ส่วนที่ยังมีความปลอดภัย ได้แก่ ผนัง Shear Wall FT-FL1 ผนัง Shear Wall FL1-FL2 และเสา C3 ชั้น FL4-FL5 รอบนอกอาคารเมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงสองเท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($2 \times \text{Target Drift Ratio}$) ส่วนที่มีการพังทลายได้แก่ เสา C3 ชั้น FL4-FL5 รอบนอกอาคาร และผนัง Shear Wall FT-FL1 ส่วนที่ยังปลอดภัย คือ เสา C2 ชั้น FL1-FL2 รอบนอกอาคารเมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงสามเท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($3 \times \text{Target Drift Ratio}$) องค์อาคารที่ยังมีความปลอดภัย (LS) คือ เสา C2 ชั้น FL2-FL3 ภายในอาคาร สำหรับองค์อาคารที่มีความเสียหายถึงระดับพังทลาย (CP) คือ โครงสร้างเสา C2 ชั้น FL1-FL2 รอบนอกอาคาร เสา C1 ชั้น FL1-FL2 รอบนอกอาคาร เสา C3 ชั้น FL1-FL2 รอบนอกอาคาร และ เสา C3 ชั้น FL3-FL4 รอบนอกอาคาร

จากผลการวิเคราะห์การผลักอาคารเสริมกำลัง ดังที่แสดงในภาพที่ 6(ข) เมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง 1 เท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($1 \times \text{Target Drift Ratio}$) ยังไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้น เมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่

ในช่วง 1.5 เท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($1.5 \times \text{Target Drift Ratio}$) ผนังก่ออิฐทุกระดับชั้นอาคารมีความเสียหายเล็กน้อย ยังอยู่ในระดับสมรรถนะการเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) และเมื่อค่าการเคลื่อนที่อยู่ในช่วงสองเท่าของการเคลื่อนที่เป้าหมาย ($2 \times \text{Target Drift Ratio}$) เสา C1 ชั้น FT-FL1 ภายในอาคาร เสา C1 ชั้น FL1-FL2 ภายนอกอาคาร ยังคงอยู่ในสมรรถนะระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO), โครงสร้างเสาและผนัง Shear wall ไม่มีความเสียหายรุนแรงใดๆ

6. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสมรรถนะของโครงสร้างอาคารโรงพยาบาลสูง 4 ชั้น ที่ถูกออกแบบโดยใช้วิธี Working Stress Design ตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) และก่อสร้างตามแบบมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุขในกรณีก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแผ่นดินไหวในเขตพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยวิธีวิเคราะห์การผลักอาคาร (Pushover Analysis) สามารถสรุปได้ดังนี้

กรณีอาคารเดิมก่อนเสริมกำลัง พบว่า เมื่อพิจารณา ณ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง เสารอบนอกอาคารมีความเสียหายเกินกว่าสมรรถนะความปลอดภัยต่อชีวิต (LS. level) โดยมีเสาที่อยู่ในระดับชั้นล่างและผนังก่ออิฐมีความเสียหายมากเกินกว่าสมรรถนะการป้องกันการพังทลาย (CP) โดยพิจารณาจากค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ขององค์อาคารดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 ดังนั้น โครงสร้างเสาและผนังอิฐก่อของอาคารเดิมอาจไม่มีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการใช้งานภายใต้แรงแผ่นดินไหว

สำหรับอาคารดังกล่าว ที่มีการเสริมกำลังด้วยการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Jacketing) พบว่า เมื่อพิจารณา ณ ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้าง พบว่า องค์อาคารต่างๆยังอยู่ในช่วงสมรรถนะระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) โดยมีค่า Demand-Capacity Ratio (DCR) ของเสาและผนังอิฐก่ออาคารทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้น โครงสร้างอาคารจึงมีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับสมรรถนะระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที

7. ข้อเสนอแนะ

วิธีการเสริมกำลังโดยวิธีการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นวิธีการง่าย เนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างเสริมกำลัง สามารถใช้แรงงานก่อสร้างทั่วไปที่ไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานที่มีทักษะความชำนาญพิเศษ รวมทั้งค่าก่อสร้างประหยัดกว่าการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวิธีอื่นๆ จากการตรวจสอบน้ำหนักโครงสร้างส่วนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากส่วนเนื้อคอนกรีตหุ้ม เสาเพื่อเสริมกำลัง จัดว่าอยู่ในระดับน้อยมาก ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารและการคำนวณผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปมีดังนี้

(ก) ควรมีการศึกษาโครงสร้างอาคารรูปแบบอื่น ในเขตพื้นที่ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย ในระดับความรุนแรงต่างๆ นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองตามประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้น สำหรับในเขตพื้นที่ความรุนแรงแผ่นดินไหวระดับต่างๆ อีกด้วย

(ข) เทคนิควิธีการติดตั้งเสาเสริมกำลังโดยวิธีการหุ้มเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ควรติดตั้งตามมาตรฐานการเสริมกำลังเสา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตใหม่กับคอนกรีตเก่าของเสาเดิม ด้วยการสกัดผิวหน้าคอนกรีตเสาเดิมให้มีความขรุขระพร้อมกับการเจาะคอนกรีตผิวหน้าเสาเพื่อเสียบฝังยึดใส่เหล็กเดือย (Dowel Bar) ทุกๆ ระยะ 20-30 เซนติเมตร ส่วนเหล็กยื่นของเสาที่ติดตั้งเสริมเพิ่มขึ้นใหม่จะต้องเจาะฝังเข้าไปในฐานรากหรือคานส่วนเดิมอีกด้วย

(ค) กรณีไม่มีแบบแปลนรายการเดิมหรือแบบแปลนเดิมอาจสูญหายเนื่องจากอาคารเก่า แนะนำให้ทำการเจาะคอนกรีต เสาคเดิม เพื่อเก็บตัวอย่างคอนกรีตทำการทดสอบหาค่ากำลังอัด พร้อมทั้งทำการสแกนเสาคเดิมด้วยเครื่องสแกนเหล็ก เพื่อหาจำนวนเหล็กแกนเสริมเสารวมทั้งเหล็กปลอกเสา เพื่อทำการประเมินกำลังของโครงสร้างอาคารเดิมต่อไปได้

8. เอกสารอ้างอิง

คำรบ บำรุงราษฎร์และไพบุลย์ ปัญญาคะโป. (2556). การประเมินค่าการเคลื่อนที่ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีการผลึกแบบวัฏจักร. *วารสารศรีปทุมปริทัศน์ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 5, มกราคม-ธันวาคม.

ไพบุลย์ ปัญญาคะโปและอุริพงษ์ พลพิมลพัฒน์. (2557). การเสริมกำลังอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยองค์อาคารซี่โครงใ้การโค้งเคาะ. *วารสารนเรศวร ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 22(2).

พรเทพ วัฒนากรแก้ว, ทวีช พูลเงิน และสุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์. (2017). *การประเมินและเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว*. การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 14.

ไพบุลย์ ปัญญาคะโป และอนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ. (2013). *การเสริมกำลังผนังก่ออิฐสำหรับอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว*. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 9. (น2 455-462). พิษณุโลก: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

โยธาธิการและผังเมือง, กรม. (2557). *มาตรฐานการประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1303)*. กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร.

โยธาธิการและผังเมือง, กรม. (2561). *มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301/1302-61)*. กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร.

FEMA 306. (1998). *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Building*. Applied Technology Council (ATC-43 Project).

American Society of Civil Engineering (ASCE). (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, prepared for the SAC Joint Venture, published by the Federal Emergency Management Agency, FEMA-356, Washington, D.C.

Lee, H. S., Woo, S. W., (2002), "Effect of Masonry Infills on Seismic Performance of a 3-Storey R/C Frame with Non-Seismic Detailing", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31: 353-378.

PERFORM-3D, "Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D structure: Analysis Reference", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.

Magenes, G. Pampanin, S., 2004. "Seismic Response of Gravity load Designed Frame Systems with Masonry Infills", 12th WCEE, Vancouver, August, Paper n. 4004.

American Society of Civil Engineering (ASCE). (2007). *Seismic rehabilitation of existing building*. ASCE Standard No. ASCE/SEI 41-06.

การเพิ่มประสิทธิผลโรงเรือนขนาดเล็กระบบปิด ด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นผ่านไอโอที

INCREASING PRODUCTIVITY OF SMALL GREENHOUSES IN A CLOSED SYSTEM WITH TEMPERATURE AND HUMIDITY CONTROL VIA IOT

ทีปกร คุณาพรวิวัฒน์¹, วรพจน์ พันธุ์คง¹, อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ¹, จิรายุ ยอดปัญญา²
และ สุขใจ พรหมประสานสุข^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
2410/2 ถ.พหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักรกรุงเทพฯ 10900 โทร. 0-2579-1111 ต่อ 2272

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี
140 หมู่ 4 ถนนติวานนท์ ตำบลบ้านกลาง อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี

E-mail: p.sookjai@ptu.ac.th

บทคัดย่อ

การทำเกษตรสมัยใหม่เกษตรกรสามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสม โดยอาศัยข้อมูลการปลูกพืชแบบเรียลไทม์ ทำให้ช่วยเพิ่มผลผลิตและผลตอบแทนจากการลงทุน โดยควบคุมการทำงานของอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมกับพืชใดๆ แบบอัตโนมัติ และส่งสัญญาณไปยังคลาวด์ เพื่อเก็บข้อมูลและแสดงผล ดังนั้นทางทีมวิจัยจึงมีความคิดในการพัฒนาระบบ ควบคุมโรงเรือนขนาดเล็ก เพื่อที่จะวัดอุณหภูมิและควบคุมความชื้น โครงสร้างทำมาจาก โดยใช้ผ้าคลุมพอลิโพรไพลีนในการคลุมพื้นที่ และใช้พลาสติกกรองดินทดสอบการเจริญเติบโตของเมล็ดถั่วเขียวและเมล็ดทานตะวัน พบว่า เมื่อทำการตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นในดินร้อยละ 55 และความชื้นในโรงเรือนขนาดเล็กอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 50 ถึง 80 จากนั้นทำการวัดขนาดของต้นถั่วเขียว ในช่วงระยะเวลาทดสอบ 5 วัน อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโรงเรือนอยู่ที่ 30.14 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.46 ค่าความชื้นในดินเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 55.85 มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.55 และค่าความชื้นในโรงเรือนขนาดเล็กอยู่ที่ร้อยละ 71.42 ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างที่กำหนดไว้ เมื่อทำการวัดขนาดของต้นถั่วเขียวด้วย โปรแกรม ImageJ พบว่า ต้นถั่วเขียวที่ปลูกภายในโรงเรือนขนาดเล็กมีขนาด 220.80 มิลลิเมตร ในขณะที่ปลูกแบบแบบธรรมชาติมีขนาด 70.67 มิลลิเมตร ค่าความแตกต่างร้อยละ 67.89 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพโรงเรือนขนาดเล็ก ด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นผ่านในระบบปิดผ่านไอโอที ได้ผลผลิตที่ดีเมื่อมีการนำองค์ความรู้ทางวิศวกรรมเข้ามาปรับใช้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: โรงเรือนขนาดเล็ก, การควบคุมแบบย้อนกลับ, ระบบแบบปิด, ไอโอที

ABSTRACT

Modern farming, farmers can make decisions quickly and appropriately. based on real-time cropping data This helps to increase productivity and return on investment. It automatically controls the temperature and humidity to suit any plant and sends a signal to the cloud. to store data and display on monitor. Therefore, my team has an idea to develop the system for small house control to measure temperature and control humidity structure made of using a polypropylene cover the area and use a plastic backing. The growth test by bean when the temperature was set at 30 °C, the soil moisture content of 55% and the humidity in the small house ranged from 50 to 80%. During the test period of 5 days, the average house temperature was 30.14 °C with a deviation of 0.46 percent, the mean soil moisture content was 55.85%, a deviation of 1.55%, and a small house humidity was at 0.46 percent. 71.42 percent, which are in the stipulated period, when measuring the size of bean using Image-J, grown in small greenhouses had a size of 220.80 mm., while natural planting was 70.67 mm. The temperature and humidity control system through a closed system through IOT. So, results are obtained when engineering knowledge is applied appropriately.

Keywords: Small Greenhouse, Feedback Control, Close Loop System, Internet of Thing

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ปัจจุบันงานทางด้านเกษตรกรรม คนทำงานเปลี่ยนมาใช้เป็นเครื่องจักรกล โดยเครื่องจักรจะมาแทนที่งานที่ต้องการใช้การตัดสินใจ ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีความล้ำสมัย มีการนำระบบอัตโนมัติมาใช้ได้อย่างชาญฉลาด โดยเกษตรกรรุ่นใหม่ ใช้ระบบการปลูกพืชแนวตั้งเพื่อเพิ่มผลผลิต ในฟาร์มเป็นระบบปิด ส่วนของสภาพแวดล้อมใช้เทคโนโลยีควบคุม เช่น ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ [1] ซึ่งมีการติดตามข้อมูลและกิจกรรมต่างๆ ผ่านเซ็นเซอร์ อีกทั้งยังนำอุปกรณ์เคลื่อนที่ เข้ามามีส่วนในการเกษตรด้วยวิธีการบันทึกและเข้าถึงข้อมูล ซึ่งการนำระบบประมวลผลบนคลาวด์ ที่จะทำให้ตัวแปรเสริม ตัวแปร ในการเพาะปลูกปัจจัยการผลิตสภาพผลผลิต เชื่อมโยงกัน จากไร่นาไปสู่โรงงานแปรรูป [2] ดังนั้นทางทีมวิจัยจึงมีความคิดในการพัฒนาสร้างระบบควบคุมโรงเรือนขนาดเล็ก เพื่อที่จะวัดอุณหภูมิและควบคุมความชื้นด้วยระบบไอโอที โดยสามารถเก็บบันทึกผลบนคลาวด์ โดยข้อมูลที่ได้อาจจะแสดงแบบเรียลไทม์ สะดวกและง่ายต่อการควบคุม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและเพิ่มประสิทธิภาพโรงเรือนขนาดเล็กระบบปิด ด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นผ่านไอโอที

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

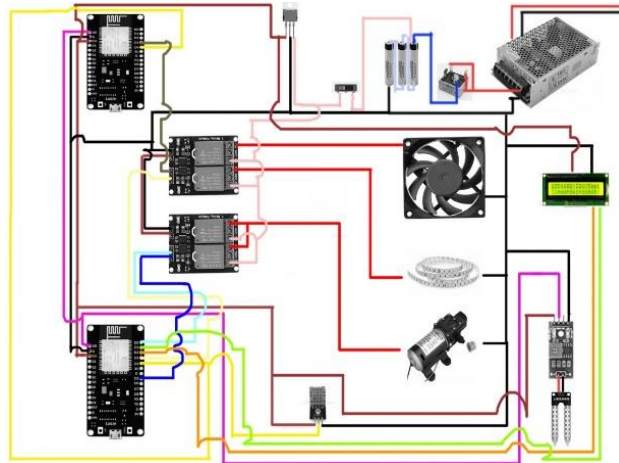
ระบบควบคุมของโรงเรือนขนาดเล็กขนาดเล็กประกอบไปด้วยระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติ ใช้การควบคุมจากโมดูลพีซี 8266 ผ่านระบบไอโอทีที่สามารถควบคุมความชื้นในดิน อุณหภูมิ และ แสงไฟ ผ่านแอปพลิเคชันและสามารถดูผลแบบเรียลไทม์ผ่านอินเทอร์เน็ต และเก็บสามารถข้อมูลบนโครงสร้างไว้เป็นข้อมูลในการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยขั้นตอนการพัฒนาจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ภาคส่วนสำหรับส่ง

สัญญาณ และภาคส่วนสำหรับรับสัญญาณขึ้นคลาวด์เพื่อเก็บข้อมูล โดยระบบทำการผ่านทางอินเทอร์เน็ต ดังนี้

3.1 ภาคส่วนสำหรับส่งสัญญาณ

ภาคส่วนสำหรับส่งสัญญาณ ประกอบไปด้วย บอร์ดคอมพิวเตอร์, โมดูล ไอเอสพี 8266, ดีเอสซี 11, พัดลมระบายอากาศ, บั๊มน้ำ, หลอดไฟเพื่อทำความร้อน, หลอดแอลอีดีแสงสีม่วง และโรงเรือนสำหรับทำการทดสอบขนาดพื้นที่ 1 ตารางเมตร

3.2 แผนผังการทำงานของภาคส่วนสำหรับส่งสัญญาณ

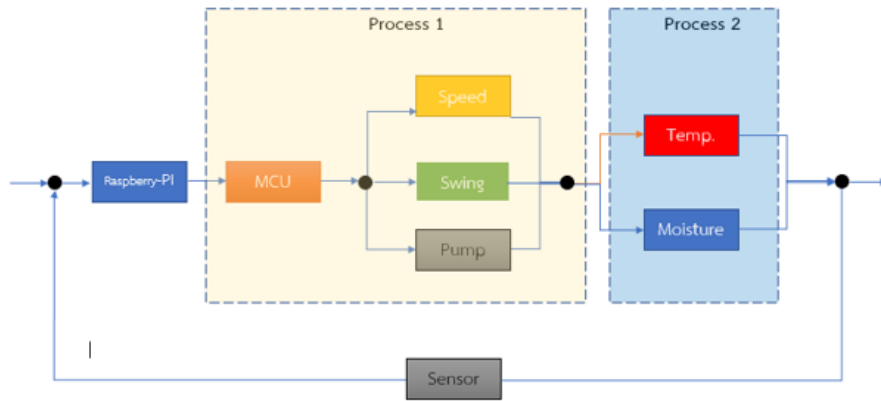


รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบภาคส่วนส่งสัญญาณ สำหรับโรงเรือนขนาดเล็ก

จากรูปที่ 1 แสดงการทำงานของวงจร เริ่มจากไฟ 220 โวลต์ เข้าสู่ หม้อแปลงเพื่อแปลงไฟจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง ที่แรงดัน 12 โวลต์ ต่อเข้ากับไดโอดเพื่อบังคับไฟให้ไหลทางเดียวไม่ไหลย้อนกลับ จากนั้นต่อไปที่ แบตเตอรี่ 12 โวลต์ เพื่อชาร์จพลังงานสำรองในระบบ และเอ็มซี 7805 จะปรับแรงดันไฟจาก 12 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ จากนั้นนำไฟ 5 โวลต์ ไปใช้ในวงจรและระบบโดยต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ

3.3 ระบบควบคุมแบบปิด

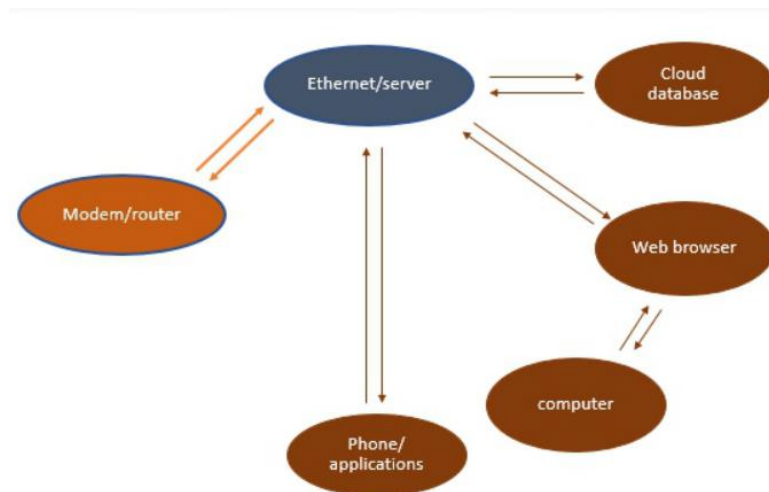
ในระบบควบคุมแบบปิดมีการตรวจค่าความผิดพลาดของระบบทำให้ได้ค่าฝั่งขาออกมีเสถียรภาพสูง ดังนั้น Controller (ตัวควบคุม) ทำหน้าที่รับสัญญาณจาก input และ output คำนวณหาค่าความผิดพลาด (Error) และทำการป้อนสัญญาณ control signal เพื่อทำให้ค่า output ใกล้เคียงกับค่าสัญญาณอ้างอิง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นตัวควบคุมให้ output เข้าใกล้ input มากที่สุด โดยป้อนสัญญาณผ่านตัวขับเคลื่อนระบบ (actuator) โดย Process (กระบวนการ) คือ ระบบหลักที่ต้องการควบคุมสถานะและองค์ประกอบให้เปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณอ้างอิงจากระบบควบคุม และ Sensor (เซ็นเซอร์) เป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณป้อนกลับจาก output ของกระบวนการเพื่อส่งไปเปรียบเทียบกับสัญญาณ input ของระบบ ระบบควบคุมจะทำงานผิดพลาดหากเซ็นเซอร์ขาดความแม่นยำ



รูปที่ 2 แผนผังการควบคุมแบบย้อนกลับของอุณหภูมิและความชื้น

จากรูปที่ 2 ระบบควบคุมแบบปิด คือระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับสัญญาณขาออก จากการตรวจวัดของเซ็นเซอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณทางขาเข้า (สัญญาณอ้างอิง) เพื่อการควบคุมสัญญาณขาออก เข้าใกล้ค่าสัญญาณอ้างอิง เป็นระบบควบคุมที่มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบควบคุมแบบเปิด

3.4 ภาคส่วนสำหรับรับสัญญาณขึ้นคลาวด์เพื่อเก็บข้อมูล



รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของภาคส่วนสำหรับรับสัญญาณ

จากรูปที่ 3 แสดงผังการทำงานของภาคส่วนสำหรับรับสัญญาณขึ้นคลาวด์เพื่อเก็บข้อมูล โดยหน่วยประมวลผลกลางจะส่งข้อมูลผ่านรีเลย์เพื่อควบคุมการเปิดและปิดไฟ จากนั้นส่งข้อมูลไปยังเซ็นเซอร์ควบคุมเพื่อรับค่าอุณหภูมิและความชื้น เพื่อคำนวณประมวลผลในระบบอัตโนมัติและส่งไปยังคลาวด์ เพื่อบันทึกผล

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิ

- 4.1.1 ติดตั้งหลอดไฟเซรามิกสัขนาด 60 วัตต์ในการทำความร้อนภายในห้องทดสอบ
- 4.1.2 กำหนดค่าอุณหภูมิทดสอบ 3 ค่า คือ 30 32 และ 35 องศาเซลเซียส
- 4.1.3 ทำการทดสอบโดยเปิดไฟเพื่อให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนทดสอบ ไปตามค่าที่กำหนดไว้
- 4.1.4 บันทึกผลผ่านซีเรียลมอนิเตอร์ และข้อมูลบนคลาวด์

4.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในบรรยากาศ

- 4.2.1 ติดตั้งอุปกรณ์ฟั่นละอองน้ำ เพื่อให้ความชื้นภายในห้องทดสอบ
- 4.2.2 กำหนดค่าความชื้น 3 ค่า คือ ร้อยละ 60, 65 และ 70 ตามลำดับ
- 4.2.3 ทำการเปิดระบบทำความชื้น
- 4.2.4 บันทึกผลผ่านซีเรียลมอนิเตอร์ และข้อมูลบนคลาวด์

4.3 การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในดิน

- 4.3.1 ติดตั้งอุปกรณ์น้ำหยด เพื่อให้ความชื้นในดิน
- 4.3.2 กำหนดค่าความชื้น 3 ค่า คือ ร้อยละ 50, 55 และ 60 ตามลำดับ
- 4.3.3 ทำการเปิดระบบทดสอบ
- 4.3.4 บันทึกผลผ่านซีเรียลมอนิเตอร์ และข้อมูลบนคลาวด์

4.4 การทดสอบปลูกถั่วเขียวตัวอย่าง ด้วยวิธีแบบไม่ควบคุม และแบบทำการควบคุมแบบปิด

- 4.4.1 ทำการปลูกถั่วเขียวจำนวน 100 เมล็ด
- 4.4.2 เปิดระบบทำการทดสอบเป็นเวลา 5 วัน
- 4.4.3 สุ่มตัวอย่างนับจำนวน
- 4.4.4 ทำการวัดขนาดด้วย โปรแกรม ImageJ เวอร์ชัน 1.53f

5. ผลการทดลองและวิจารณ์

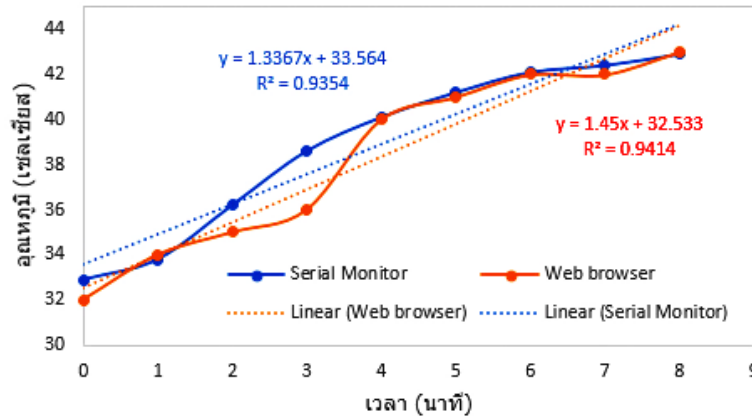
ผลการทดสอบที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทั้งจากการแสดงผลทางซีเรียลมอนิเตอร์และผลที่แสดงขึ้นเว็บไซต์แบบเสมือนจริง

5.1 ผลการสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิ

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้ตามช่วงเวลา 0 ถึง 8 นาที ผ่านระบบซีเรียลมอนิเตอร์และเว็บไซต์

เวลา (นาที)	ผลจากซีเรียลมอนิเตอร์	ผลจากเว็บไซต์
0	32.9	32
1	33.8	34
2	36.2	35
3	38.6	36
4	40.1	40
5	41.2	41
6	42.1	42
7	42.4	42
8	42.9	43

จากตารางที่ 1 แสดงผลการสอบเทียบอุณหภูมิผ่านทางซีเรียลมอนิเตอร์ และเว็บไซต์ พบว่า เมื่อทำการเปิดหลอดไฟแล้ว อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยอุณหภูมิเริ่มต้นจะอยู่ที่ 32 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปิดไฟจนถึง 8 นาทีแล้วอุณหภูมิจะขึ้นถึง 43 องศาเซลเซียส สำหรับข้อมูลบนเว็บไซต์ และอุณหภูมิเริ่มต้น 32.9 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปิดไฟจนถึง 8 นาทีแล้วอุณหภูมิจะขึ้นถึง 42.9 องศาเซลเซียส เมื่อทำการจดบันทึกผ่านทางซีเรียลมอนิเตอร์



รูปที่ 4 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากซีเรียลมอนิเตอร์และผลที่แสดงบนเว็บไซต์

จากรูปที่ 4 แสดงกราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างซีเรียลมอนิเตอร์และเว็บไซต์ พบว่า ทั้งสองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีความน่าเชื่อถือกว่าร้อยละ 90

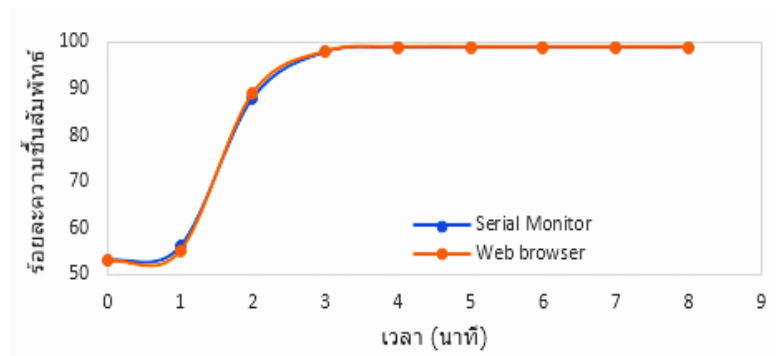
5.2 ผลการสอบเทียบการตรวจวัดความชื้นในบรรยากาศ

ผลการสอบเทียบการตรวจวัดค่าความชื้นในบรรยากาศ โดยใช้เซนเซอร์ที่ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นติดตั้งไว้ภายนอก เพื่อเก็บข้อมูลเทียบผลภายในห้องทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบการตรวจวัดความชื้นในบรรยากาศ

เวลา (นาที)	ผลจากซีเรียลมอนิเตอร์	ผลจากเว็บไซต์
0	53	53
1	56	55
2	88	89
3	98	98
4	99	99
5	99	99
6	99	99
7	99	99
8	99	99

จากตารางที่ 2 สำหรับการบันทึกผลผ่านเว็บไซต์ พบว่าเมื่อทำการพันหมอกแล้ว ค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความชื้นเริ่มต้นจะอยู่ที่ร้อยละ 53 เมื่อทำการพันหมอกจนถึง 8 นาทีแล้วค่าความชื้นจะขึ้นถึงร้อยละ 99 และสำหรับการบันทึกผลผ่านทางซีเรียลมอนิเตอร์ ค่าความชื้นเริ่มต้นจะอยู่ที่ร้อยละ 53 เมื่อทำการพันหมอกจนถึง 8 นาทีแล้วค่าความชื้นจะขึ้นถึงร้อยละ 99



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความชื้นบรรยากาศระหว่างซีเรียลมอนิเตอร์และเวปไซต์

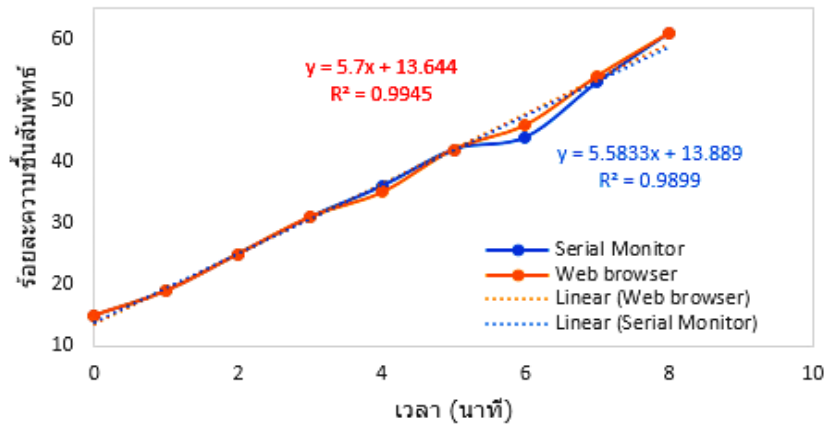
จากรูปที่ 5 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความชื้นบรรยากาศระหว่างซีเรียลมอนิเตอร์และเวปไซต์พบว่า ค่าที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

5.3 ผลการสอบเทียบการตรวจวัดความชื้นในดิน

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบการตรวจวัดความชื้นในดิน

เวลา (นาทื)	ผลจากซีเรียลมอนิเตอร์	ผลจากเวปไซต์
0	15	15
1	19	19
2	25	25
3	31	31
4	36	35
5	42	42
6	44	46
7	53	54
8	61	61

จากตารางที่ 3 สำหรับการแสดงผลผ่านเวปไซต์แสดงค่าความชื้นในดิน พบว่าเมื่อทำการให้น้ำแล้วค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความชื้นเริ่มต้นจะอยู่ที่ร้อยละ 15 เมื่อทำการให้น้ำจนถึง 8 นาทืแล้วค่าความชื้นจะขึ้นถึงร้อยละ 61 และสำหรับค่าทางซีเรียลมอนิเตอร์ ค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความชื้นเริ่มต้นจะอยู่ที่ร้อยละ 15 เมื่อทำการให้น้ำจนถึง 8 นาทืแล้วค่าความชื้นจะขึ้นถึงร้อยละ 61



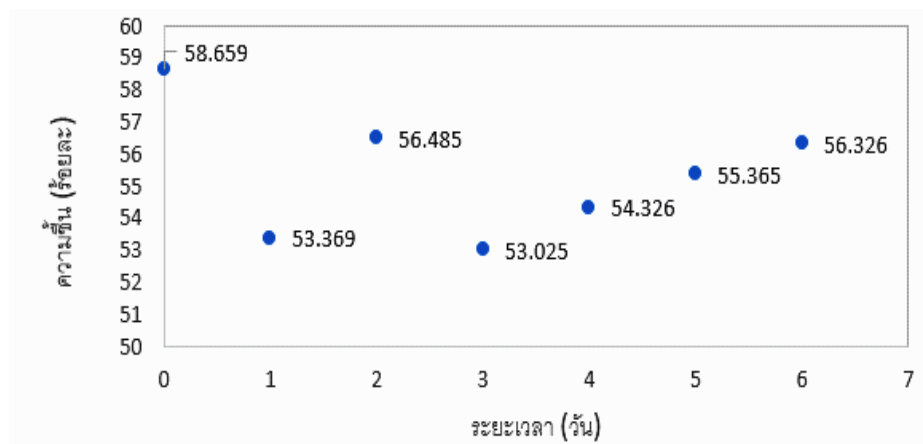
รูปที่ 6 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความขึ้นในดินระหว่างซีเรียลมอนิเตอร์และเวปไซต์

จากรูปที่ 6 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความขึ้นในดินระหว่างซีเรียลมอนิเตอร์และเวปไซต์พบว่า ค่าที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือกว่าร้อยละ 98

5.4 ผลการทดสอบวัดค่าความขึ้นในดินระยะเวลา 7 วันทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการตรวจวัดความขึ้นในดิน

ทดสอบระบบควบคุมความขึ้นในดิน (ตั้งค่าที่ร้อยละ55)							ค่าความผิดพลาด
วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	เฉลี่ย(ร้อยละ)
58.659	53.369	56.485	53.025	54.326	55.365	56.326	0.54%



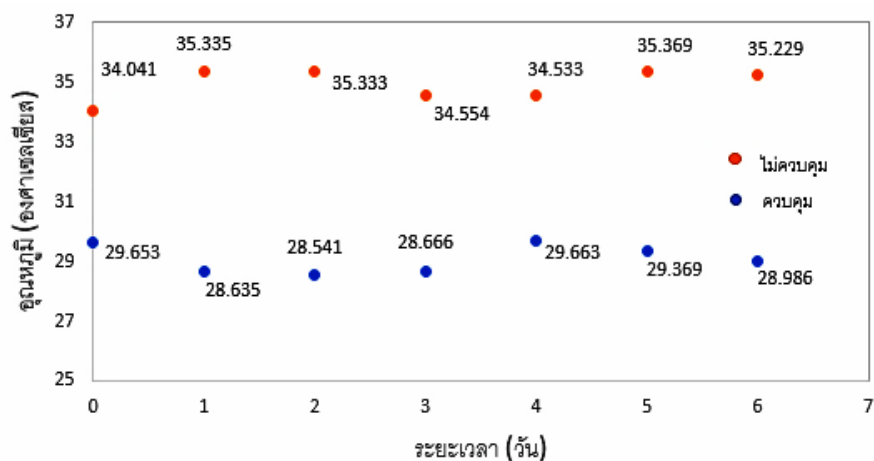
รูปที่ 7 ผลการทดสอบความขึ้นในดินตลอดช่วงระยะเวลา 7 วันทดสอบ

จากรูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบความขึ้นในดินตลอดช่วงระยะเวลาทดสอบ พบว่า ทำการตั้งค่าความขึ้นในดินร้อยละ 55 ตลอดระยะเวลา 7 วัน มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 0.54

5.5 ผลการทดสอบวัดค่าอุณหภูมิทั้งภายในห้องทดสอบและภายนอกระยะเวลา 7 วันทดสอบ

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบวัดค่าอุณหภูมิทั้งภายในห้องทดสอบและภายนอก

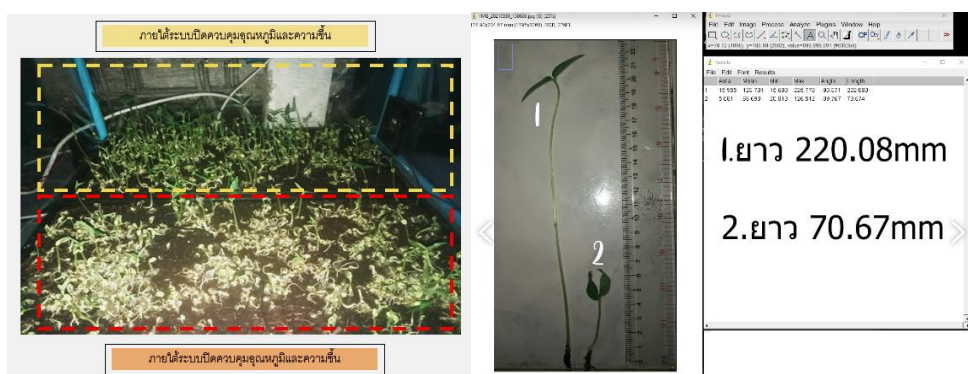
ทดสอบระบบควบคุมความอุณหภูมิ (ตั้งค่าที่ 30 องศาเซลเซียส)							ค่าความผิดพลาด
วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	เฉลี่ย (ร้อยละ)
29.653	28.635	28.541	28.666	29.663	29.369	28.986	3.08
34.041	35.335	35.333	34.554	34.533	35.369	35.229	16.4



รูปที่ 8 ผลการทดสอบความอุณหภูมิภายนอก(จุดสีส้ม) และอุณหภูมิภายใน(จุดสีฟ้า) ตลอดช่วงระยะเวลา 7 วัน

จากรูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความชื้นในดินตลอดช่วงระยะเวลาทดสอบ พบว่า เมื่อทำการตั้งค่าความอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลา 7 วัน อุณหภูมิภายในที่ทำการควบคุม มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 3.08 ในขณะที่อุณหภูมิภายนอกที่ไม่ได้ทำการควบคุม มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 16.4 เมื่อเทียบกับค่าที่ได้ทำการกำหนดไว้

5.6 ผลการทดสอบปลูกพืชตัวอย่าง ด้วยวิธีแบบไม่ควบคุม เปรียบเทียบแบบทำการควบคุมแบบปิด



รูปที่ 9 (ภาพซ้าย) แสดงผลการปลูกต้นถั่วเขียวในระบบปิดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (กรอบสีเหลือง-บน) และปลูกแบบไม่ควบคุมควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (กรอบสีแดง-ล่าง) และ (ภาพขวา) ผลการวัดต้นถั่วเขียวที่ปลูกในระบบปิดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (ซ้าย) และปลูกแบบไม่ควบคุมควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (ขวา) ด้วยโปรแกรม Image-J เวอร์ชัน 1.53f

จากรูปที่ 9 (ภาพซ้าย) แสดงผลการทดสอบการปลูกถั่วเขียว 100 เมล็ด พบว่า การปลูกภายนอกโรงเรือนที่ไม่มีการควบคุมโอกาสในการเติบโตเพียงร้อยละ 30 และการปลูกภายในโรงเรือนที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นมีโอกาสเติบโตกว่าร้อยละ 90 และ (ภาพขวา) แสดงผลการวัดต้นถั่วเขียวที่ปลูกในระบบปิดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (หมายเลข 1) และปลูกแบบไม่ควบคุมควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (หมายเลข 2) ด้วยโปรแกรม Image-J เวอร์ชัน 1.53f พบว่า จากภาพหมายเลข 1 ปลูกในระบบปิดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น มีขนาดความยาวต้น 220.08 มิลลิเมตร ในขณะที่ ปลูกแบบไม่ควบคุมควบคุมอุณหภูมิและความชื้น หมายเลข 2 พบว่า มีขนาดความยาวต้น 70.67 มิลลิเมตร

ดังผลที่ได้แสดงในข้างต้นเมื่อปลูกในระบบที่มีการควบคุมในระบบปิดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ส่งผลให้ผลผลิตมีโอกาสในการเติบโตกว่าร้อยละ 66.67 และมีขนาดลำต้นของถั่วเขียว มีอัตราการเจริญเติบโตกว่าร้อยละ 67.89

6. สรุปผลการทดลอง

จากการสอบเทียบผลของข้อมูลเชิงตัวเลข ด้วยวิธีการสอบเทียบและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเว็บไซต์และผ่านซีเรียลมอนิเตอร์พบว่ามีความน่าเชื่อถือร้อยละ 90 และการทดสอบการเจริญเติบโตของเมล็ดถั่วเขียวและเมล็ดทานตะวัน พบว่า เมื่อทำการตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นในดินร้อยละ 55 และความชื้นในโรงเรือนขนาดเล็กอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 50 ถึง 80 จากนั้นทำการวัดขนาดของต้นถั่วเขียว ในช่วงระยะเวลาทดสอบ 5 วัน อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโรงเรือนขนาดเล็กอยู่ที่ 30.14 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.46 ค่าความชื้นในดินเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 55.85 มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.55 และค่าความชื้นในโรงเรือนขนาดเล็กอยู่ที่ร้อยละ 71.42 ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างที่ทำการกำหนดไว้ เมื่อทำการวัดขนาดของต้นถั่วเขียวด้วยโปรแกรม ImageJ เวอร์ชัน 1.53 พบว่า ต้นถั่วเขียวที่ปลูกภายในโรงเรือนขนาดเล็กมีขนาด 220.08 มิลลิเมตร ในขณะที่ปลูกแบบแบบธรรมชาติมีขนาด 70.67 มิลลิเมตร ค่าความแตกต่างร้อยละ 67.89

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี ที่ได้ให้การสนับสนุนจนสำเร็จลุล่วง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] มนต์ชัย แซ่ว่อง. (2557). *Young Smart Farmer ต้นแบบความสำเร็จของเกษตรกรรุ่นใหม่*. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [2] ปาริฉัตร รุ่งเรืองฉัฐกุล, บัญชา สมบูรณ์สุข, อยุทธิ์ นิสสภ, และ ปองเพชร ธาราสุข. (2562). *ปัจจัยจูงใจที่มีผลต่อการเข้าสู่การเป็นเกษตรกรอัจฉริยะของเกษตรกรชาวสวน ยางพารา อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา*. ภาควิชาพัฒนาการเกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา, 6 มิถุนายน 2562
- [3] ลิตาวิรี ชีร์วิรุฬห์. (2559). *สมาร์ตฟาร์ม Smart Farm การทำเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม*. คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ สาขาวิชาระบบสารสนเทศ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา เงินกองทุนส่งเสริมงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

- [4] ณัฐกิตติ์ ปัทมะ. (2563). *การพัฒนาระบบเกษตรอัจฉริยะของประเทศไทย*. สำนักวิชาการ สำนักงาน
เลขธิการวุฒิสภา, ปีที่ 10 ฉบับที่ 9 พฤษภาคม 2563.
- [5] พิสิฐไชย สุวรรณเรือง. (2562). *SPsmartplant*. <https://www.spsmartplants.com/>. เข้าสืบค้นเมื่อวันที่
13 เมษายน 2564

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการยึดสายใยแก้วนำแสงด้วยกาวในการผลิต
คอมบายเนอร์ของเครื่องตัดโลหะด้วยเลเซอร์ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง
TO FIND OPTIMAL PARAMETERS OF GLUING OPTICAL FIBERS IN
LASER CUTTING MACHINE COMBINERS MANUFACTURING BY
EXPERIMENTAL DESIGN

เอกลักษณ์ กนกวิบูลย์ศรี

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: Eakaluk.kanokwiboonsri@mail.kmutt.ac.th

ช่อแก้ว จตุรานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: chorkaew.jat@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตคอมบายเนอร์ของเครื่องตัดโลหะด้วยเลเซอร์ประกอบไปด้วยกระบวนการย่อยหลายกระบวนการ กระบวนการย่อยหนึ่งคือการเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงของฝั่งขาเข้าและขาออกเข้าด้วยกัน และทำการหยอดกาว UV3411 เพื่อยึดชิ้นส่วนระหว่างสายใยแก้วนำแสงไว้ภายในแท่งหลอดแก้ว ปัจจุบันข้อบกพร่องหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้คือกาวหดตัวหลังจากอบด้วยแสง UV ซึ่งข้อบกพร่องนี้ไม่สามารถซ่อมแซมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตคอมบายเนอร์ที่มีการใช้กาวยึดสายใยแก้วนำแสงในกระบวนการ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบสองระดับ โดยมีปัจจัยในการทดลองคือ ตำแหน่งการอบกาว ปริมาณกาว และปริมาณความชื้น ผลการวิจัยพบว่าตำแหน่งการอบกาวที่ตำแหน่งขอบแท่งแก้ว ปริมาณกาวที่ 6 มิลลิเมตร และปริมาณความชื้นที่ 50%RH เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการตั้งค่าเหล่านี้ในกระบวนการ ทำให้ข้อบกพร่องประเภทกาวหดตัวลดลง จากเดิมร้อยละ 17.22 เหลือร้อยละ 3.89 หรือคิดเป็นต้นทุนที่ลดได้ 128,000 บาทต่อสัปดาห์

คำสำคัญ: กระบวนการยึดสายใยแก้วนำแสงด้วยกาว, การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม, คอมบายเนอร์ในเครื่องตัดโลหะด้วยเลเซอร์

ABSTRACT

A Manufacturing process of the combiners which is a part of laser cutting machine is composed of many sub-processes. One sub-process is bonding the input optical fibers to the output optical fibers and then applying the epoxy glue UV3411 to cling these optical fibers in a glass tube together. Currently, glue shrinkage after UV curing is a defective type with highest defect rate among the others which is not repairable. Therefore,

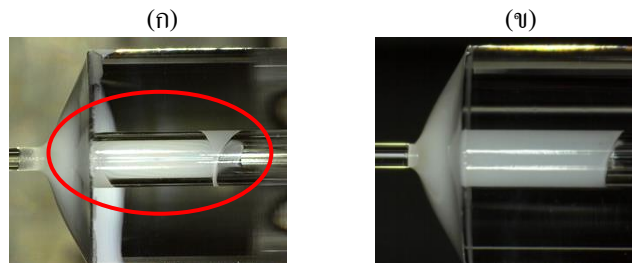
this research is aimed to determine the optimal parameters on the process of gluing the optical fibers in the combiner manufacturing by using 2^k factorial design of experiment. Factors in the experiment are curing position, glue quantity and humidity. The research result indicates that the curing position at the edge of glass tube, glue quantity at 6 mm. in glass tube, and humidity at 50%RH is the optimal parameters. When applying this condition in the process, glue shrinkage defect rate in process can be reduced from 17.22% to 3.89% or approximately 128,000 baht/week of cost reduction.

Keywords: Laser Cutting Machine Combiners, Optical Fibers Gluing Process, Optimal Parameters

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

อุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการใช้โลหะเพื่อขึ้นรูปเป็น โครงสร้างหรือตัดเจาะเพื่อตอบสนองการใช้งานของแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยเครื่องตัดโลหะด้วยเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการตัดวัสดุที่มีคุณภาพสูงและมีความเร็วในการตัดสูง ทำให้ใช้เวลาในการผลิตต่ำกว่าเครื่องตัดโลหะประเภทอื่น โดยเฉพาะวัสดุที่มีรูปร่างซับซ้อน แต่ละบริษัทจึงต้องพัฒนาทั้งในส่วนของเทคโนโลยีและราคา ซึ่งการลดของเสียจากการผลิตแต่ละชิ้นส่วนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้ต้นทุนและราคาลดลง

หนึ่งในกระบวนการผลิตคอมบายเนอร์ของเครื่องตัดโลหะด้วยเลเซอร์ของบริษัทแห่งหนึ่ง มีกระบวนการย่อยหนึ่งคือการใช้กาว UV 3411 เพื่อยึดสายใยแก้วนำแสงเข้ากับแท่งแก้ว ซึ่งพบปัญหาของเสียจากข้อบกพร่องกาวหดตัวที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้เปรียบเทียบกับกาวสมบูร์นดังตัวอย่างในรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ก) ตัวอย่างกาวหดตัว (ข) กาวที่สมบูร์นของการผลิตที่ใช้กาว UV 3411

จากการศึกษากระบวนการผลิตในปัจจุบันพบว่ายังมีหลายตัวแปรที่ยังไม่ได้รับการควบคุมหรือการควบคุมที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดของเสียกาวหดตัวในการผลิต เช่น ตำแหน่งเครื่องมืออบแสง UV ปริมาณกาวที่ใส่ในแท่งแก้ว ความชื้นในพื้นที่ปฏิบัติงาน เป็นต้น โดยปัจจุบันข้อบกพร่องอันดับหนึ่งจากกระบวนการผลิตคือกาวหดตัวถึงร้อยละ 17.22 ซึ่งไม่สามารถซ่อมแซมได้ ส่งผลให้มีของเสียกาวหดตัวเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเป็นอันดับหนึ่งเช่นกัน ดังนั้นการลดของเสียจากกาวหดตัวจึงเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้เป็นจำนวนมาก

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการยึดสายใยแก้วนำแสงด้วยกาวในการผลิตคอมบายเนอร์
- (2) เพื่อลดของเสียจากกาวหดตัวที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคอมบายเนอร์

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าระดับปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวแปรด้วยการออกแบบการทดลองมีการนำไปปรับใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น พิไลพร วงษ์กัณหา [1] ศึกษาการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการคิดแผนวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นในระบบเชื่อมแบบบาร์ร้อน โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมจากตัวแปร 4 ตัวคือ อุณหภูมิช่วงเตรียมความร้อน อุณหภูมิช่วงตะกั่ว หลอมเหลว เวลาช่วงเตรียมความร้อน และเวลาช่วงตะกั่วหลอมเหลว ชีระวิชญ์ แก้วสุข [2] ศึกษาการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมจากตัวแปร 3 ตัวคือ อุณหภูมิในการฉีด แรงดันในการฉีด และความเร็วในการฉีด สุรัฐ เหล่าวงศ์พานิช [3] ศึกษาการค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกระบวนการล้างถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบไม่ถอดชิ้นส่วนจากตัวแปร 4 ตัวคือ ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียม ไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาด และแรงดันน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาด วุฒิชัย จันโททัย [4] ศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการกัดขึ้นรูปแขนหัวอ่านโดยการออกแบบการทดลองเพื่อลดสัดส่วนชิ้นงานระยะด้านนอกขา Fantail ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด จากตัวแปร 3 ตัวคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และค่ากัดระยะเผื่อ, ทัศนีย์พร แซ่เอ็ง [5] ศึกษาการลดของเสียในกระบวนการการผลิตตัวรับส่งข้อมูลทางแสงด้วยวิธีการออกแบบการทดลองจากตัวแปร 4 ตัวคือ พารามิเตอร์แรงบิด ระยะ Alignment ระหว่างวัสดุ Power ของ Tx และระยะเวลาอบกาว โดยงานวิจัยทั้ง 5 งานวิจัยใช้การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นปกติ วิเคราะห์ผลจากตัวแปรทั้งผลจากค่าปัจจัยโดยตรง และผลจากค่าปัจจัยร่วม เพื่อหาค่าระดับปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะส่งผลต่อค่าตอบสนองตามต้องการรวมถึงทำการยืนยันผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างก่อนและหลังการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งงานวิจัยทั้งหมดสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ ลดต้นทุนและเพิ่มความสามารถในการผลิตหลังการปรับปรุงระดับปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลองได้

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การศึกษาชิ้นส่วนคอมบายเนอร์และข้อมูลในกระบวนการผลิตที่ใช้กาว UV3411

ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลชิ้นส่วนคอมบายเนอร์รวมทั้งขั้นตอนการผลิตในสถานงาน การควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการผลิต รวมถึงการควบคุมคุณภาพของกาว UV3411 ตั้งแต่กระบวนการรับกาวจนถึงการนำกาวเข้ามาใช้ในสถานงาน เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจข้อมูลและขั้นตอนในการผลิตชิ้นส่วนคอมบายเนอร์

4.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลในการผลิต

หลังจากศึกษาขั้นตอนการผลิตแล้ว จึงเก็บข้อมูลในการผลิตเป็นระยะเวลา 9 สัปดาห์เช่น ปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิต ข้อจำกัดในการผลิต ปัจจัยที่ส่งผลในการผลิต จำนวนและชนิดของเสียที่เกิดขึ้นรวมถึงผลกระทบหลังจากเกิดข้อบกพร่องว่าสามารถซ่อมแซมได้หรือไม่ จากนั้นลำดับความสำคัญและเลือกปัญหาที่นำมาวิเคราะห์และปรับปรุงการผลิตชิ้นส่วนคอมบายเนอร์

4.3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและเลือกตัวแปรที่ทำการทดลอง

ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยหลักการ 4M1E คือ Man, Machine, Material, Method และ Environment จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนเป็นแผนภูมิแสดงสาเหตุและผล จากนั้นสรุปลงตารางเพื่อวิเคราะห์ว่าตัวแปรควบคุมใดที่มีความเหมาะสมในการผลิตหรือยังไม่เหมาะสมในการผลิต โดยอ้างอิงถึงข้อมูลเฉพาะของกาว UV3411 รวมถึงข้อมูลจากแผนกวิจัยและพัฒนา จากนั้นทำการเลือกตัวแปรที่การควบคุมยังไม่เหมาะสม และ

กำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อใช้ในการทดลอง

4.4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการทดลองตามที่กำหนดไว้เป็นเวลา 8 สัปดาห์ และเก็บผลการทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จากนั้นวิเคราะห์การกระจายตัวแบบปกติ และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อของเสียที่เกิดขึ้น รวมถึงหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุด

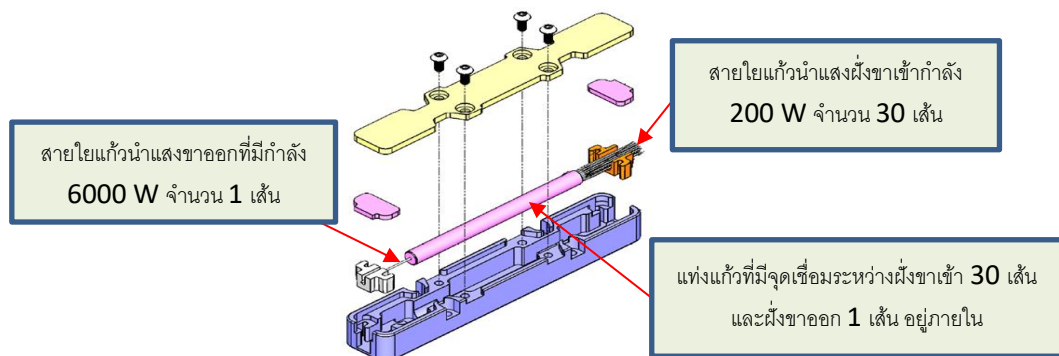
4.5 การยืนยันผลการทดลอง

นำพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทดลองมาควบคุมและทำการยืนยันการทดลองเป็นเวลา 9 สัปดาห์ว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทดลองส่งผลให้ข้อบกพร่องลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5. ผลการวิจัย

5.1 การศึกษาชิ้นส่วนคอมบายเนอร์และข้อมูลในกระบวนการผลิตที่ใช้กาว UV3411

ชิ้นส่วนที่ทำการวิจัย คือ คอมบายเนอร์ในเครื่องตัดโลหะด้วยเลเซอร์ที่ทำหน้าที่รวมแสงเลเซอร์ 200 W. จำนวน 30 ตัวผ่านสายใยนำแสงแก้วฝั่งขาเข้าจำนวน 30 เส้น เพื่อให้มีกำลัง 6000 W. ผ่านสายใยแก้วนำแสงฝั่งขาออกจำนวน 1 เส้น ซึ่งจะมีจุดเชื่อมต่อระหว่างสายใยแก้วนำแสงฝั่งขาเข้าและขาออกเป็นจุดที่เปราะบางและเสี่ยงต่อการแตกหัก ดังนั้นจึงต้องป้องกันด้วยการครอบด้วยแท่งแก้ว และหยอดกาว UV 3411 ที่ปลายแท่งแก้วทั้ง 2 ฝั่ง จากนั้นทำการอบกาวให้แห้ง เพื่อไม่ให้จุดเชื่อมต่อเคลื่อนไหวและขยับได้ กาวที่ยึดระหว่างแท่งแก้วและสายใยแก้วนำแสง จึงต้องมีความแข็งแรงและสมบูรณ์ ไม่หดหรือมีอากาศอยู่ในตัวกาว

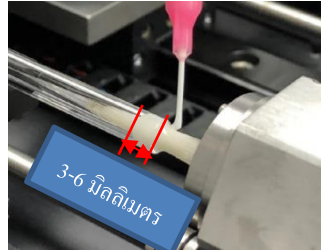


รูปที่ 2 อธิบายชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์

จากสายงานการผลิตปัจจุบัน สถานีนงานที่ทำการเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงขาเข้าจำนวน 30 เส้น เข้ากับสายใยแก้วนำแสงขาออกจำนวน 1 เส้น รวมถึงการครอบด้วยแท่งแก้วและหยอดกาว UV 3411 ที่ปลายแท่งแก้วทั้ง 2 ฝั่ง จากนั้นทำการอบกาวให้แห้งคือสถานีนงานเดียวกัน โดยขั้นตอนการทำงานเป็นดังนี้

1. ประกอบสายใยแก้วนำแสงขาเข้า 30 เส้นลงบนเครื่องจักร จากนั้นบิดเกลียวสาย เผลและตัดให้สายเป็นจุดเดียว
2. ประกอบสายใยแก้วนำแสงขาออก 1 เส้นลงบนเครื่องจักร และจัดสายทั้ง 2 ฝั่งให้ตรงกัน
3. เชื่อมสายใยแก้วนำแสงขาเข้า 30 เส้น และขาออก 1 เส้นเข้าด้วยกัน

- ประกอบแท่งแก้วที่มีระยะเวลาหลังล้างน้อยกว่า 48 ชั่วโมง เพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนภายใน
- หยอดกาว UV 3411 เพื่อยึดสายใยแก้วนำแสงเข้ากับแท่งแก้ว โดยต้องมีปริมาณกาวอยู่ภายในแท่งแก้วโดยรอบ ทั้ง 360 องศา เป็นระยะ 3-6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การหยอดกาวและปริมาณกาวยึดสายใยแก้วนำแสง เข้ากับแท่งแก้ว

- อบกาวด้วยพลังงานแสง UV ที่เล็งไปยังตำแหน่งของกาวดังรูปที่ 4 กำหนดค่าพลังงานเท่ากับ $1-1.05 \text{ W/cm}^2$ เป็นระยะเวลา 12 นาที



รูปที่ 4 ตำแหน่งของเครื่องอบกาวที่เล็งไปที่กาวจากมุมมองด้านบน

นอกจากขั้นตอนในส่วนของการผลิตแล้วยังมีการควบคุมและจัดเตรียมกาวที่อาจจะส่งผลต่อข้อบกพร่องเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องควบคุมและจัดเตรียมตามข้อมูลเฉพาะของกาวดังต่อไปนี้

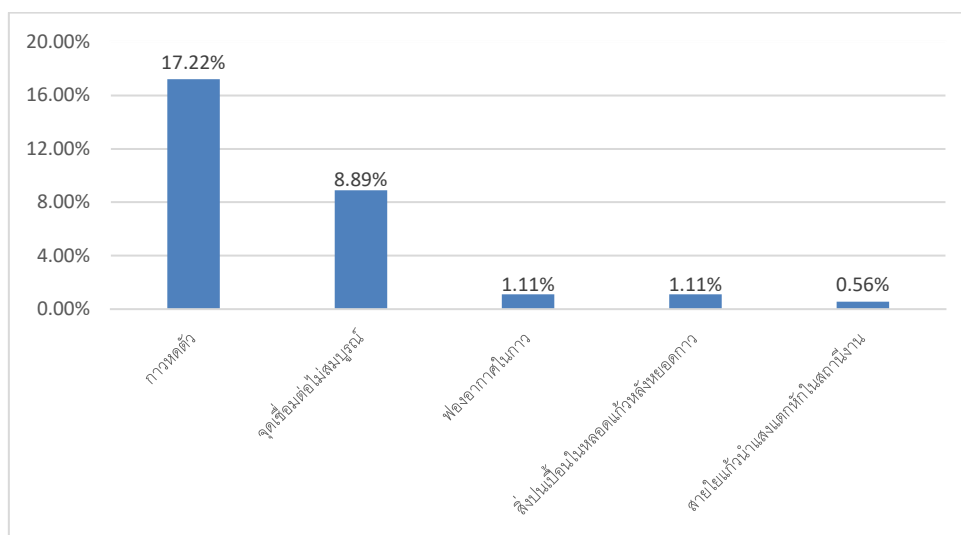
- กระบวนการรับสินค้า ต้องตรวจสอบบรรจุภัณฑ์ต้องมีน้ำแข็งแห้งเพื่อควบคุมอุณหภูมิของกาว
- กระบวนการตรวจสอบสินค้า ต้องตรวจสอบค่าความหนืดของกาวต้องอยู่ในข้อกำหนดของกาว
- กระบวนการจัดเก็บสินค้า ต้องจัดเก็บกาวในตู้เย็นที่ควบคุมอุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส และตรวจสอบไม่ให้มีกาวที่หมดอายุอยู่ในคลังสินค้า
- กระบวนการผลิต ต้องทำการเบิกกาวจากตู้เย็น จากนั้นวางกาวในแนวตั้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้กาวเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวและพร้อมใช้งาน
- กระบวนการผลิตต้องควบคุมเวลาการใช้งานกาวภายใน 12 ชั่วโมง

โดยในส่วนของการตรวจสอบคุณภาพนั้นมีการตรวจสอบทั้งในส่วนก่อนและหลังการผลิตดังนี้

- ก่อนเริ่มผลิตตรวจสอบวัสดุที่ใช้งานถูกต้องและไม่หมดอายุการใช้งานทั้งแท่งแก้วและกาว
- ก่อนเริ่มผลิตตรวจสอบพนักงานต้องได้รับใบรับรองความสามารถในการผลิต
- ก่อนเริ่มผลิตตรวจสอบอุปกรณ์อบกาวด้วยพลังงานแสง UV ตั้งค่าพลังงานถูกต้อง
- หลังการผลิตตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานต้องอยู่ในข้อกำหนดของชิ้นงาน

5.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลในการผลิต

เมื่อเก็บข้อมูลข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นที่สถานีงานมีทั้งหมด 5 อาการแสดงเป็นร้อยละตามรูปที่ 5 ซึ่งบางข้อบกพร่องสามารถซ่อมแซมได้ แต่บางข้อบกพร่องก็ไม่สามารถซ่อมแซมได้และกลายเป็นของเสีย โดยเรียงตามร้อยละของข้อบกพร่องย้อนหลังเป็นเวลา 9 สัปดาห์ จากมากไปน้อยดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 ร้อยละของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นที่สถานีงาน

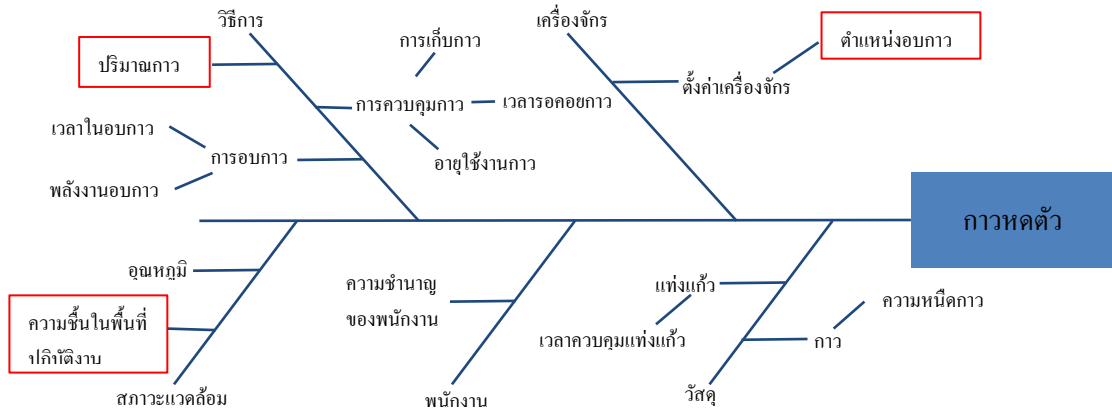
ตารางที่ 1 รายการข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในสถานีงาน

อันดับที่	ชนิดของข้อบกพร่อง	สามารถซ่อมแซมได้หรือไม่	จำนวนข้อบกพร่องที่พบ
1	กาวหดตัว	ไม่สามารถซ่อมแซมได้และเป็นของเสีย	31 จาก 180 ชิ้น (17.22%)
2	จุดเชื่อมต่อไม่สมบูรณ์	สามารถซ่อมแซมได้	16 จาก 180 ชิ้น (8.89%)
3	ฟองอากาศในกาว	ไม่สามารถซ่อมแซมได้และเป็นของเสีย	2 จาก 180 ชิ้น (1.11%)
4	สิ่งปนเปื้อนในหลอดแก้วหลังหยอดกาว	ไม่สามารถซ่อมแซมได้และเป็นของเสีย	2 จาก 180 ชิ้น (1.11%)
5	สายใยแก้วนำแสงแตกหักในสถานีงาน	ไม่สามารถซ่อมแซมได้และเป็นของเสีย	1 จาก 180 ชิ้น (0.56%)

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นตามตารางที่ 1 ทำให้ผู้วิจัยตัดสินใจเลือกข้อบกพร่องกาวหดตัวมาทำการวิจัย เนื่องจากเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นอันดับที่ 1 ที่ร้อยละ 17.22 ที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้ และกลายเป็นของเสีย กาวหดตัวที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

5.3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและเลือกตัวแปรที่ทำการทดลอง

เมื่อทำการศึกษาตัวแปรที่อาจส่งผลกระทบต่อข้อบกพร่องของกาวหัดตัวได้ตามแผนภูมิเหตุและผลดังรูปที่ 6 และวิเคราะห์ตัวแปรที่ควบคุมในปัจจุบันที่ส่งผลกระทบต่อของเสียกาวหัดตัวว่าเหมาะสมหรือไม่ตามตารางที่ 2



รูปที่ 6 แผนภูมิเหตุและผลของกาวหัดตัว

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อของเสียกาวหัดตัว

ตัวแปรที่ส่งผล	การควบคุมในปัจจุบัน	ความเหมาะสม	การควบคุมที่ทำการทดลอง
ตำแหน่งอบกาว	แสง UV ที่ปลายแห้งแก้ว	อาจไม่เหมาะสมเพราะแสง UV ไม่ถูกเลี้ยงที่ตำแหน่งส่วนใหญ่ของกาว	แสง UV ไปที่ตรงกลางของกาวเปรียบเทียบกับแสงไปที่ปลายแห้งแก้ว
การเก็บกาว	-15 องศาเซลเซียส	เหมาะสมตามข้อมูลเฉพาะของกาว	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน
เวลารอคอยกาว	30 นาที	เหมาะสมตามข้อมูลเฉพาะของกาว	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน
อายุใช้งานกาว	ภายใน 12 ชั่วโมง	เหมาะสมตามข้อมูลเฉพาะของกาว	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน
ปริมาณกาว	ความยาว 3-6 มิลลิเมตรของแห้งแก้ว	อาจไม่เหมาะสมเนื่องจากจากระยะที่กำหนดแตกต่างกันมาก	ทดลองปริมาณกาวที่ 3 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร
เวลาในอบกาว	12 นาที	เหมาะสมตามแผนกวิจัยและพัฒนาแนะนำ	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน
พลังงานอบกาว	1-1.05 W/cm ²	เหมาะสมตามแผนกวิจัยและพัฒนาแนะนำ	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน
ความชื้นในพื้นที่ปฏิบัติงาน	40-70 %RH	อาจไม่เหมาะสมเนื่องจากที่กำหนดค่อนข้างกว้าง เมื่อเทียบกับแผนกวิจัยและพัฒนา	ทดลองที่ < 50% และ > 65% เนื่องจากข้อจำกัดเครื่องจักร
อุณหภูมิ	20-25 องศาเซลเซียส	เหมาะสมเนื่องจากเป็นอุณหภูมิในการทำงานปกติ	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน
ความชำนาญของพนักงาน	ควบคุมโดยใช้พนักงานคนเดียว	เหมาะสมเพื่อป้องกันความแตกต่างจากวิธีการใส่ที่แตกต่างกัน	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน
เวลาควบคุมแห้งแก้ว	ภายใน 48 ชั่วโมง	เหมาะสมตามแผนกวิจัยและพัฒนาแนะนำ	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน
ความหนืดกาว	15,000-22,000 cps	เหมาะสมตาม โดยตรวจสอบก่อนใช้งาน	ทำตามการควบคุมในปัจจุบัน

จากการวิเคราะห์ตัวแปรตามตารางที่ 2 พบว่ามี 3 ตัวแปรที่ควบคุมไม่เหมาะสมคือ ตำแหน่งอบกาว ปริมาณกาวและความชื้นในพื้นที่ปฏิบัติงาน จากนั้นจึงออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ โดยกำหนดระดับปัจจัยตามตารางที่ 3 และค่าตอบสนองเป็นร้อยละของชิ้นงานดีต่อชิ้นงานทั้งหมด (Yield)

ตารางที่ 3 ตัวแปรและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

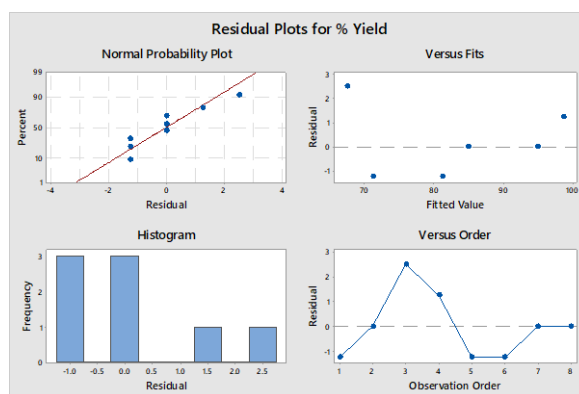
ตัวแปร	ระดับปัจจัยในการทดลอง	
	Low (-1)	High (+1)
ตำแหน่งอบกาว (A)	เล็งที่ขอบแท่งแก้ว	เล็งที่ตรงกลางของกาว
ปริมาณกาวที่ใส่ในแท่งแก้ว (B)	3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร
ความชื้นในพื้นที่ปฏิบัติงาน (C)	50%RH	65%RH

5.4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื่องจากระยะเวลาการผลิตคอมบายเนอร์ใช้เวลานานและความสามารถในการผลิต 20 ชิ้น/สัปดาห์ จึงทำการทดลองแบบทำซ้ำ 1 ครั้งจำนวน 20 ชิ้นในแต่ละการทดลอง เป็นระยะเวลาทั้งหมด 8 สัปดาห์ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4 และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติแสดง Residual plots ดังรูปที่ 7

ตารางที่ 4 ตารางบันทึกผลการทดลอง

สัปดาห์ที่	RunOrder	CenterPt	Blocks	ตำแหน่งอบกาว (A)	ปริมาณกาวที่ใส่ในแท่งแก้ว (B)	ความชื้นในพื้นที่ปฏิบัติงาน (C)	Yield (%)
1	2	1	1	-1	3	50	85
2	6	1	1	1	3	50	80
3	3	1	1	-1	6	50	100
4	7	1	1	1	6	50	95
5	8	1	1	-1	3	65	70
6	4	1	1	1	3	65	70
7	5	1	1	-1	6	65	85
8	1	1	1	1	6	65	80



รูปที่ 7 Residual plots ของผลการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

จากการวิเคราะห์ Residual plot ถึงความเป็นอิสระของข้อมูล การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน พบว่าข้อมูลจากการทดลองมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 ประการ ได้แก่ ความสุ่ม ความเป็นปกติ และความมีเสถียรภาพ จึงสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อได้

เมื่อพบว่าข้อมูลจากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์ผลจากโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติแบบแฟคทอเรียลสองระดับ โดยตัดตัวแปรที่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าตอบสนองได้ดังรูปที่ 8

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	784.38	261.458	83.67	0.000
Linear	3	784.38	261.458	83.67	0.000
A	1	28.13	28.125	9.00	0.040
B	1	378.13	378.125	121.00	0.000
C	1	378.13	378.125	121.00	0.000
Error	4	12.50	3.125		
Total	7	796.88			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.76777	98.43%	97.25%	93.73%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		83.125	0.625	133.00	0.000	
A	-3.750	-1.875	0.625	-3.00	0.040	1.00
B	13.750	6.875	0.625	11.00	0.000	1.00
C	-13.750	-6.875	0.625	-11.00	0.000	1.00

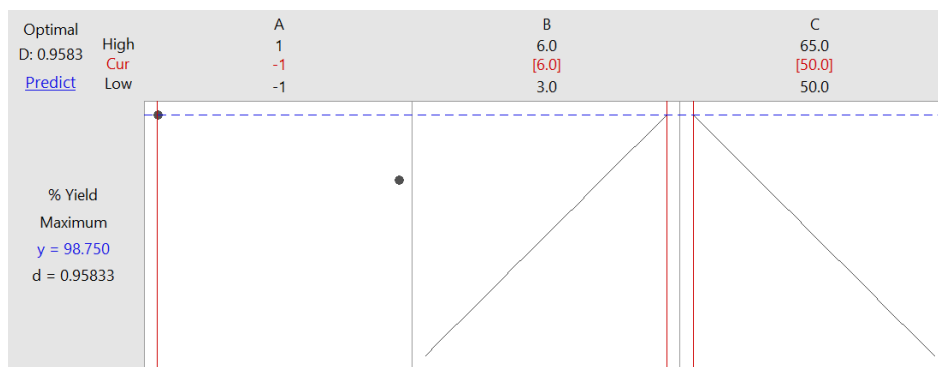
Regression Equation in Uncoded Units

$$\% \text{ Yield} = 115.21 - 1.875 A + 4.583 B - 0.9167 C$$

รูปที่ 8 ผลการทดลองหลังตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญออก

จากข้อมูลจะพบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองมี 3 ตัวแปรคือ A,B และ C โดยไม่มีผลจากค่าปัจจัยร่วมของตัวแปรทั้ง 3 และเมื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาสามารถอธิบายการวิเคราะห์ได้มากเพียงใด พบว่ามีค่า R-sq = 98.43% นอกจากนั้นค่า R-sq(adj) = 97.25% แสดงว่าค่าที่เก็บมามีความน่าเชื่อถือและสามารถนำผลการทดลองไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตอบสนองสูงสุดต่อไปได้ จากนั้นทำการคำนวณเพื่อหาระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าตอบสนองมีค่าสูงสุดพบว่าค่าตอบสนองสูงสุดที่ได้คือ 98.75% ที่มาจากระดับปัจจัยดังนี้

1. ตำแหน่งอบกาวที่ตำแหน่ง -1 (เล็งที่ขอบแท่งแก้ว)
2. ปริมาณกาวเป็น 6 มิลลิเมตร
3. ปริมาณความชื้นที่สถานีงานเป็น 50%RH



รูปที่ 9 ค่าปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าตอบสนองสูงสุด

5.5 ยืนยันผลการทดลอง

หลังจากได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการควบคุมพารามิเตอร์โดยปรับตำแหน่งอบกาวไปที่ขอบแท่งแก้วโดยช่างเทคนิค กำหนดปริมาณกาวให้พนักงานหยอดที่ 6 มิลลิเมตร และติดตั้งเครื่องวัดความชื้นที่สถานีงานเพื่อตรวจสอบว่าความชื้นอยู่ระดับที่ 50%RH ก่อนเริ่มงานในเอกสารปฏิบัติงาน จากนั้นทดลองต่อเนื่องเป็นเวลาทั้งหมด 9 สัปดาห์ พบว่าของเสียจากกาวหดตัวลดลงจาก 17.22% (31 จาก 180 ชิ้น) เหลือ 3.89% (7 จาก 180 ชิ้น) แต่เพื่อตรวจสอบถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของสัดส่วนของเสียกาวหดตัวก่อนและหลังการปรับปรุง ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติโดยตั้งสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

H_0 : สัดส่วนผลิตภัณฑ์กาวหดตัวก่อนและหลังการปรับปรุงพารามิเตอร์ไม่แตกต่างกัน

H_1 : สัดส่วนผลิตภัณฑ์กาวหดตัวก่อนการปรับปรุงพารามิเตอร์มากกว่าหลังการปรับปรุงพารามิเตอร์

โดยนำข้อมูลจำนวนการผลิตและจำนวนชิ้นงานกาวหดตัวในระยะเวลา 9 สัปดาห์มาเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการปรับปรุงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 จำนวนของเสียกาวหดตัวก่อนและหลังการปรับปรุง

ระดับปัจจัย	จำนวนที่ผลิต	จำนวนของเสียกาวหดตัว
ก่อนการปรับปรุงพารามิเตอร์	180	31
หลังการปรับปรุงพารามิเตอร์	180	7

เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ พบว่าค่า P-Value = 0.000 น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 และยอมรับ H_1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเสียกาวหดตัวก่อนการปรับปรุงพารามิเตอร์มากกว่าหลังการปรับปรุงพารามิเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

หลังจากทำการควบคุมพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและยืนยันผลการทดลองแล้ว พบว่าของเสียจากกาวหดตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญได้ 24 ชิ้น ภายใน 9 สัปดาห์ ของเสียลดลงร้อยละ 13.33 จากเดิมร้อยละ 17.22 เหลือร้อยละ 3.89 โดยราคาผลิตภัณฑ์ชิ้นละ 48,000 บาท (1,600 US \$) ดังนั้นเฉลี่ยต้นทุนลดลงใน 9 สัปดาห์เท่ากับ $(24 \text{ ชิ้น} \times 48,000 \text{ บาท}) / 9 \text{ สัปดาห์}$ เป็นเงิน 128,000 บาทต่อสัปดาห์ โดยการปรับปรุงไม่ได้ส่งผลต่ออัตราการผลิตหรือต้นทุนที่เพิ่มขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 เนื่องจากข้อจำกัดของการผลิตจึงเก็บข้อมูลได้อย่างจำกัด จึงควรเก็บข้อมูลค่ากลาง (Center point) เพิ่มเติม เพื่อตรวจสอบความโค้งงอของข้อมูล

7.2 การหยอดกาวเพื่อให้ได้ปริมาณกาว 6 มิลลิเมตรนั้นยังเป็นการหยอดด้วยมือ ควรพัฒนาการหยอดด้วยเครื่องจักรเพื่อให้ปริมาณกาวในแต่ละครั้งสม่ำเสมอมากขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- พิไลพร วงษ์กันหา. (2559). *การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการคิดค้นวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่นในระบบเชื่อมแบบบาร์ร็อน*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ธีระวิชญ์ แก้วสุข. (2562). *การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการฉีดพลาสติก*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุรัฐ เหล่าวงศ์พานิช. (2561). *การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำความสะอาดถังปฏิกรณ์ชีวภาพ*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบการผลิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วุฒิชัย จันโททัย และ ช่อแก้ว จตุรานนท์. (2564). *การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการกักขังรูปแบนหัวอ่าน โดยการออกแบบการทดลอง*. *หนังสือประมวลบทความการประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 12 ประจำปี 2564*, วันที่ 28 พฤษภาคม 2564 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 345-354.
- หัตถิพร แซ่เอ็ง และ เสมอจิตร หอมรสสุนธุ์. (2564). *การลดของเสียในกระบวนการการผลิตตัวรับส่งข้อมูลทางแสงด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง*. *หนังสือประมวลบทความการประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 12 ประจำปี 2564*, วันที่ 28 พฤษภาคม 2564 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 558-565.

การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีมวลรวมจากขยะพลาสติก HDPE

ด้วยเปลือกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบ

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

WITH HDPE PLASTIC WASTE USING CALCINATED CHICKEN

EGGSHELL AND RICE HUSK ASH

ชัชมา ชัญกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: chasthan@hotmail.com

จักรพันธ์ เทือกดี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: ctuakta@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีมวลรวมจากขยะพลาสติก HDPE ด้วยเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านกระบวนการเผาและเถ้าแกลบ โดยงานวิจัยนี้มี 2 ขั้นตอน คือ 1. การทดสอบความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบและเปลือกไข่ไก่เผา โดยมีตัวแปร คือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกไข่ไก่เผาหรือเถ้าแกลบแบบเดี่ยวที่ ร้อยละ 0, 5, 7.5, 10 และการผสมรวมกันตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 โดยมีมวล และ 2. การศึกษาการนำสัดส่วนของเถ้าแกลบและเปลือกไข่ไก่เผาที่ดีที่สุดมาใช้ผสมคอนกรีตที่มีเศษพลาสติก HDPE แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 โดยปริมาตร จากการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนผสมของเปลือกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบผสมรวมกันร้อยละ 5 และ 5 ตามลำดับ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดและสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 23.51, 39.3 และ 16.75 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.60 และ 0.80 ตามลำดับ การใช้เศษพลาสติก HDPE แทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีตส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตลดลงตามปริมาณของ HDPE ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดของเปลือกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบมาช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสม HDPE พบว่า กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตให้ค่าใกล้เคียงและสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

คำสำคัญ: เปลือกไข่ไก่เผา, เถ้าแกลบ, HDPE

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the improvement of mechanical properties of concrete having HDPE plastic waste aggregates by using calcinated chicken eggshell and rice husk ash. This Research consisted of two steps: 1. pozzolanic reaction test of rice husk ash and calcinated eggshell using mortar with

individual replacement of each material at 0, 5, 7.5, and 10%, and combined replacement of both materials from 10 to 20% by mass of cement; and 2. test of effectiveness of using optimum mix of calcinated eggshell and rice husk ash from the first step in concrete having HDPE plastic waste aggregates at 0, 10 and 20% by volume replacement for fine aggregates. It was found that the optimum proportion of calcinated eggshell and rice husk ash was combined mix of both materials at 5% each, which resulted in 23.51, 39.3, and 16.75% increase in compressive strength for controlled water-to-binder-ratios of 0.40, 0.60, and 0.80, respectively, compared to controlled mortar. The HDPE-containing concrete had lower mechanical properties in proportion to the increase in HDPE. When the optimum percentage of eggshell and rice husk ash was used as partial cement replacement in order to improve the mechanical properties of concrete with HDPE, it was found that compressive strength and flexural strength of the concrete was comparable and higher than the control samples, respectively.

Keywords: Calcinated Eggshell, Rice Husk Ash, HDPE

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ วิกฤตปัญหาขยะกำลังส่งผลกระทบต่อในหลายประเทศ โดยเฉพาะขยะจำพวกพลาสติก เนื่องจากขยะพลาสติกใช้เวลาในการย่อยสลายนับร้อยปี ทำให้ต้องสิ้นเปลืองงบประมาณและพื้นที่ฝังกลบ ก่อให้เกิดปัญหาการจัดการขยะพลาสติกที่ไม่ถูกวิธีที่จะส่งผลให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การเผาทิ้งแบบไม่ถูกต้องจะส่งผลให้เกิดสารพิษในชั้นบรรยากาศจากส่วนประกอบของพลาสติก อาจนำไปสู่การปนเปื้อนของแหล่งน้ำ แหล่งดินรวมไปถึงระบบห่วงโซ่อาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลเสียต่อระบบร่างกายของมนุษย์ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษฯ, 2561)

การจัดการขยะพลาสติกมีหลากหลายวิธี เช่น การฝังกลบ การนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิล (Recycle) การใช้ซ้ำ (Reuse) และในปัจจุบันมีแนวคิดที่จะนำขยะพลาสติกมาเป็นวัสดุส่วนประกอบในคอนกรีต ยกตัวอย่างเช่น ขยะพลาสติกชนิด High Density Polyethylene (HDPE) ซึ่งมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ดี (อมรรัตน์ สุริยวิจิตรเสรณี, 2548) มาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่มวลรวมในคอนกรีต เพื่อลดปัญหาปริมาณขยะพลาสติก รวมไปถึงเพิ่มมูลค่าให้กับขยะพลาสติก อย่างไรก็ดี การใช้มวลรวมที่ผลิตจากขยะพลาสติกอาจส่งผลให้กำลังรับแรงอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าลดลง (Pesić et al., 2016) เป็นผลให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับชิ้นส่วนทางโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับแรงอย่างมีประสิทธิภาพ

ด้วยปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงมีแนวคิดที่จะใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตร (Agricultural Waste) มาปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของพลาสติก เพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนการผลิต โดยวัสดุแรกคือ เปลือกไข่ไก่ (Eggshell) เนื่องจากประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2560 ถึง 2562 มีการผลิตไข่ไก่มากกว่า 14,000 ล้านฟองต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561) ทำให้เกิดขยะมูลฝอยจากเปลือกไข่ไก่เป็นปริมาณมาก ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการกำจัดขยะ โดยวิธีฝังกลบ (Domrongpokkaphan, 2012) อย่างไรก็ดี ก็ได้มีการนำเปลือกไข่ไก่มาเป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับฉาบ (เอกลักษณ์ ภูมิทิพย์, 2559) และการใช้เปลือกไข่ไก่เป็นส่วนผสมในการพัฒนาคอนกรีตมวลเบา (ศักดิ์ดา ไตรปิฎก, 2555) เนื่องจากเปลือกไข่ไก่ที่เผาแล้วมีองค์ประกอบของปูนขาว (CaO) ที่สูง ซึ่งเป็นองค์ประกอบเดียวกับเปลือกไข่ไก่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วัสดุอีกประเภท คือ เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร แกลบเป็นวัสดุชีวมวลที่สำคัญในการใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบพบว่าปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 70 ถึง 90% มีความพรุนมาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก (จิราภรณ์ อินทร์เกลี้ยงและคณะ, 2558) และยังเป็นวัสดุปอซโซลาน มีคุณสมบัติให้กำลังรับแรงอัดในระยะหลังเท่าเทียมหรืออาจมากกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (วินิต ช่อวิเชียร, 2557)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีมวลรวมจากขยะพลาสติกด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเปลือกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบ เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีเช่นเดียวกับซีเมนต์ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการขยะพลาสติกและขยะจากอุตสาหกรรม การเกษตร สร้างมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและเป็นทางเลือกในการก่อสร้าง

2. วิธีการดำเนินการ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150
- (2) ทราชม้วนน้ำมีค่า โมดูลัสความละเอียดและร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 3.68 และ 1.61 ตามลำดับ และขนาดหิน โทสุดเท่ากับ 20 มิลลิเมตร
- (3) เปลือกไข่ไก่สับน้ำตาลที่เหลือทิ้งจาก โกดังเปลือกไข่ไก่ อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ
- (4) เถ้าแกลบที่ผ่านการกระบวนเผาจากเชื้อเพลิงและเหลือทิ้งจากอำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี
- (5) พลาสติก HDPE จากกระบวนการรีไซเคิลภาชนะบรรจุภัณฑ์ ที่ผ่านการเดิมดินเหนียวเพื่อให้มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำเล็กน้อย ทำให้สามารถผสมกับส่วนประกอบอื่นๆ ของคอนกรีตได้ดีขึ้น โดยมีค่า โมดูลัสความละเอียดและร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 4.94 และ 4.94 ตามลำดับ ดังภาพที่ 1



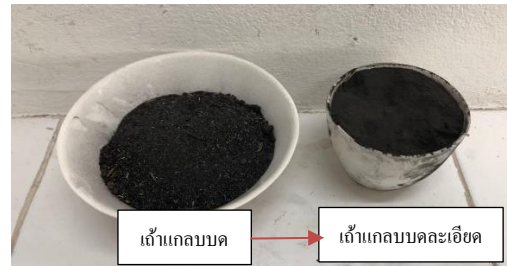
ภาพที่ 1 เม็ดพลาสติก HDPE

2.2 การเตรียมเปลือกไข่ไก่และเถ้าแกลบ

- (1) ทำการบดเปลือกไข่ไก่เบื้องต้นให้มีขนาดประมาณ 0.5-2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน เพื่อกำจัดความชื้นที่มีอยู่บนพื้นผิวเปลือกไข่ไก่ และทำการเผาเปลือกไข่ไก่ที่บดแล้วด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมเปลือกลูกข้าวเฝ้า



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมเถ้าแกลบ

(2) นำเปลือกลูกข้าวเฝ้าที่ผ่านกระบวนการการเผาแล้วและเถ้าแกลบมาบดละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียดชนิดบอลมิลล์ (Ball Mill) แบบ High Speed ให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรหรือสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

(3) นำตัวอย่างเปลือกลูกข้าวเฝ้าละเอียด เปลือกลูกข้าวเฝ้าละเอียดที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว เถ้าแกลบบดและปูนซีเมนต์มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

2.3 การศึกษาความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบและเปลือกลูกข้าวเฝ้า

ในขั้นตอนนี้ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร มีสัดส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด 1:2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.4, 0.6 และ 0.8 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกลูกข้าวเฝ้าหรือเถ้าแกลบเพียงชนิดเดียวร้อยละ 0, 5, 7.5, 10 และผสมวัสดุทั้งสองชนิดรวมกันตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 โดยมวล ดังภาพที่ 4 เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเปลือกลูกข้าวเฝ้าและเถ้าแกลบ ที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109



ภาพที่ 4 ตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

2.4 การศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าแกลบและเปลือกลูกข้าวเฝ้าในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมเศษพลาสติก HDPE

หลังจากได้สัดส่วนที่เหมาะสมของเปลือกลูกข้าวเฝ้าและเถ้าแกลบในการผสมคอนกรีต ทำการผสมส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 และคานขนาด $7.5 \times 7.5 \times 30$ เซนติเมตร สำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสของการแตกหักตามมาตรฐาน ASTM C78 โดยมีช่วงความยาวของ Span เท่ากับ 28 เซนติเมตร ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวกด ที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที ทั้งนี้แทนที่มวลรวมละเอียดด้วย HDPE ร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยปริมาตร และผสมสัดส่วนที่ดีที่สุดของเปลือกลูกข้าวเฝ้าและเถ้าแกลบ โดยมวลของปูนซีเมนต์จากขั้นตอนที่แล้ว ออกแบบกำลังรับแรงอัดประลัยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 24 MPa โดยการผสมปูนซีเมนต์ ทราซ เปลือกลูกข้าวเฝ้าและเถ้าแกลบ

ให้เข้ากันก่อน หลังจากนั้นใส่มวลรวมเพื่อคลุกเคล้ากับวัสดุประสานและตามด้วยน้ำในส่วนผสม โดยอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.58 ดังภาพที่ 5-7



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเปลือกไข่ไก่เผา ถั่วแกลบและ HDPE



ภาพที่ 6 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



ภาพที่ 7 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เปลือกไข่ไก่และถั่วแกลบ ด้วยการทดสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) ดังตารางที่ 1 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของเปลือกไข่ไก่บดละเอียดคือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ร้อยละ 93.05 แต่เมื่อนำเปลือกไข่ไก่มาเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงจะพบว่าองค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของศักดิ์ดา (2555) โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาแล้วคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 54.76 และของถั่วแกลบคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 93.78 ตามมาตรฐาน ASTM C168 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยออกไซด์ของแคลเซียมและซิลิกาที่ได้จากเปลือกไข่ไก่เผาและถั่วแกลบตามลำดับเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ (Hydration Reaction) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ปะลอกไข่ไก่และเถ้าแกลบ (ร้อยละโดยมวล)

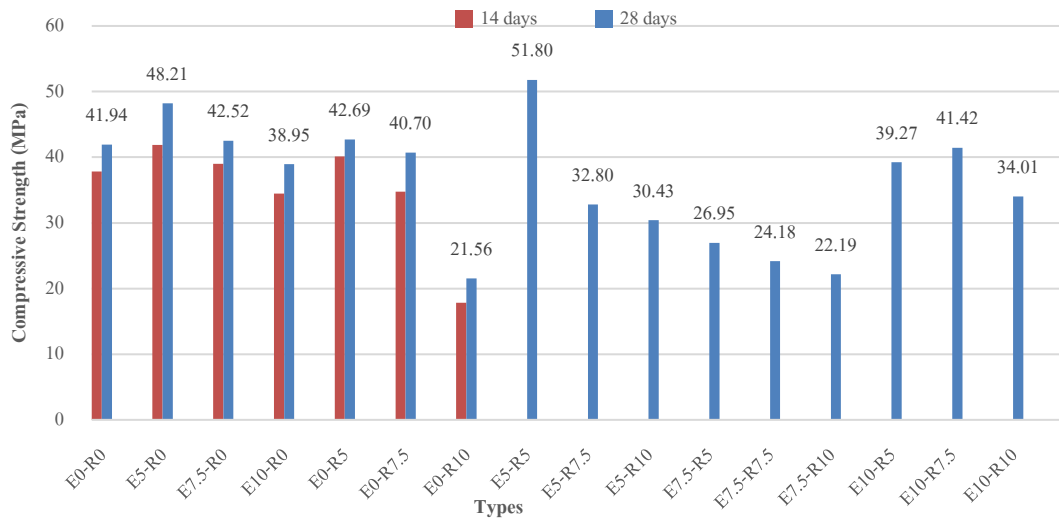
องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์	ปะลอกไข่ไก่ บดละเอียด	ปะลอกไข่ไก่เผา บดละเอียด	เถ้าแกลบ
SiO ₂	20.80	0.03	0.07	93.78
Al ₂ O ₃	5.09	0.04	0.04	0.02
Fe ₂ O ₃	2.96	0.04	0.05	1.95
CaO	64.23	-	54.76	1.66
CaCO ₃	-	93.05	-	-
MgO	1.51	0.68	0.72	0.29
K ₂ O	0.43	0.10	0.10	2.44
Na ₂ O	0.16	0.16	0.17	0.12
Other	3.16	1.89	0.94	2.71

3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

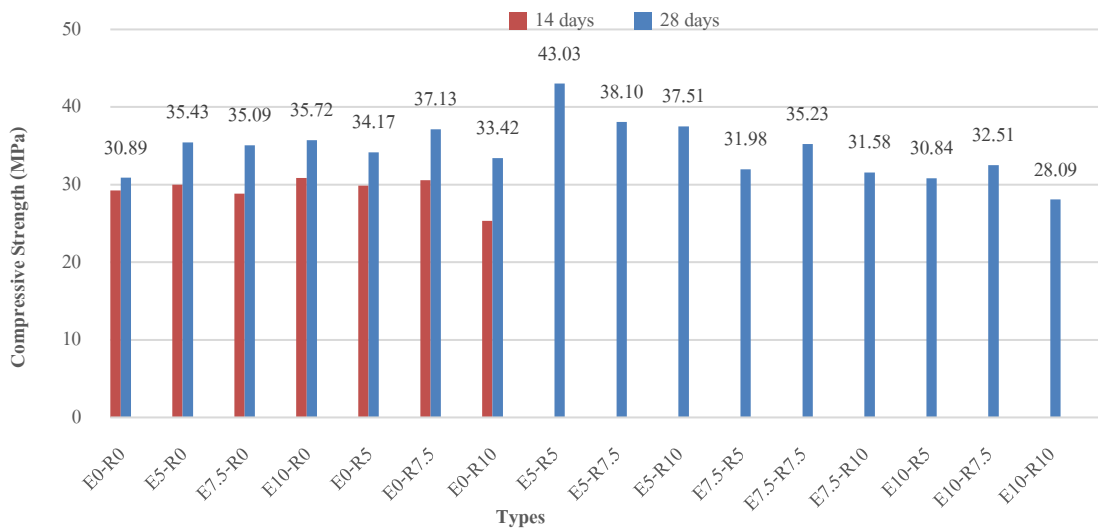
จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปะลอกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบดังภาพที่ 8-10 ที่ผ่านการบ่มมา 14 และ 28 วันพบว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มมา 14 วัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ E5-R0 ซึ่งถูกควบคุมด้วย w/b เท่ากับ 0.40 กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 48.21 MPa และตัวอย่างมอร์ตาร์ E0-R5 มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 40.11 MPa ซึ่งทั้งสองตัวอย่างให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (E0-R0) นอกจากนี้ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของตัวอย่างที่ถูกควบคุมด้วย w/b เท่ากับ 0.6 และ 0.8 ให้ผลที่สอดคล้องกันคือ ตัวอย่างมอร์ตาร์ E5-R0 ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 30.01 และ 17.89 MPa ซึ่งสูงกว่า E0-R0 ที่ร้อยละ 2.56 และ 13.01 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และ 0.80 ตามลำดับ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบแล้ว ตัวอย่าง E0-R7.5 ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 4.47 และ 8.65 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และ 0.80 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปะลอกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบมีผลต่อกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ในระยะแรก (0-14 วัน) เนื่องจากปะลอกไข่ไก่ที่เผาแล้วมีองค์ประกอบของ CaO เมื่อทำปฏิกิริยากับซิลิกาและน้ำทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) เพิ่มมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เฟสมีความเหนียว ก่อตัว แข็งตัว ยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสมมากขึ้น (จินตนา พวงสันเทียะ และคณะ, 2563) อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบจะให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปะลอกไข่ไก่เผา เนื่องจากเถ้าแกลบเป็นวัสดุจำพวกปอซโซลาน ซึ่งให้อัตราการพัฒนากำลังอัดช้าหรือให้กำลังรับแรงอัดระยะหลังเทียบเท่าหรือดีกว่ามอร์ตาร์หรือคอนกรีตทั่วไป ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบเป็นร้อยละ 10 แล้ว (E0-R10) จะทำให้กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญและมีค่าน้อยกว่า E0-R0 อาจเนื่องมาจากปริมาณเถ้าแกลบที่แทนที่ซีเมนต์ที่มากจนทำให้ปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกตลดลง ทำให้หลังช่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ ผลึกภัณฑ์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกาออกไซด์ของเถ้าแกลบ (ภาณุพงศ์ พงษ์พิทักษ์กุล, 2559)

ในส่วนมอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มมา 28 วัน พบว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ E5-R5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่าง E0-R0 ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน โดยกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมาร้อยละ 23.51, 39.3 และ 16.75 สำหรับ w/b เท่ากับ 0.40, 0.60 และ 0.80 ตามลำดับ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ C-S-H ที่เกิดจากปะลอกไข่ไก่เผาแล้วยังเกิด C-S-H เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่งผลให้เกิดความทนทานของมอร์ตาร์ นอกจากนี้วัสดุทั้งสอง

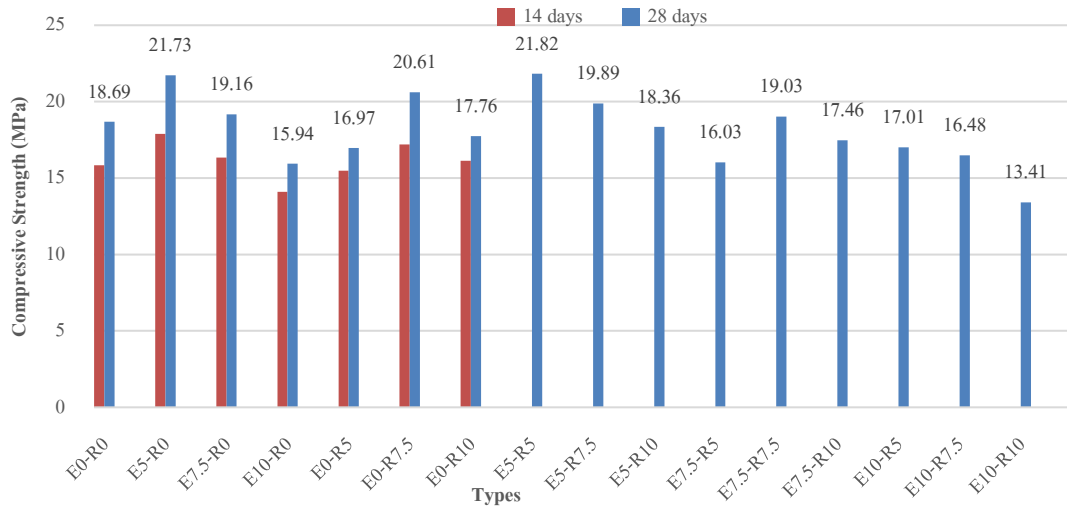
ยังทำให้บริเวณ Interfacial Transition Zone (ITZ) มีความทึบแน่นมากขึ้น เนื่องจาก C-S-H ที่เกิดขึ้นเข้าไปอุดแทรกช่องว่างระหว่างเนื้อซีเมนต์ (Filling Effect) ทำให้ช่องว่างและรูพรุนลดลง (Hawa, 2008) ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนวัสดุประสานทั้งสองนี้ในการผสมรวมกันมากกว่าร้อยละ 10 จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงเลือกสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกไข่ไก่ผาและเถ้าแกลบผสมรวมกันร้อยละ 5 และ 5 (E5-R5) โดยมวลในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมพลาสติก HDPE



ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน w/b = 0.4



ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน w/b = 0.6



ภาพที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน $w/b = 0.8$

3.3 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมเศษพลาสติก HDPE

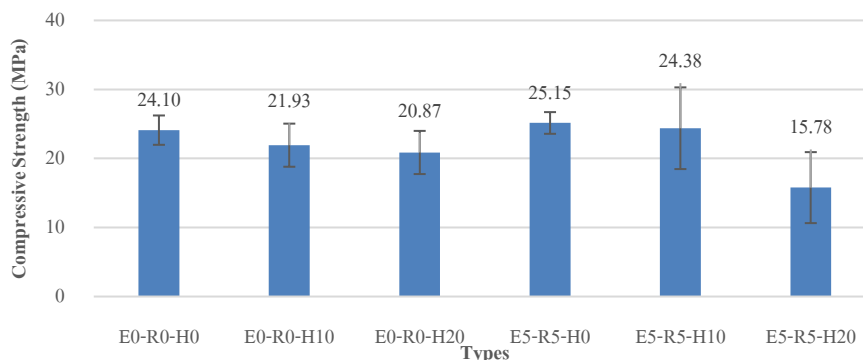
หลังจากได้สัดส่วนที่ดีที่สุดในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบผสมรวมกัน ร้อยละ 5 และ 5 (E5-R5) โดยมวลในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมพลาสติก HDPE จะพบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของ HDPE ส่งผลต่อการยุบตัวของคอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนของ HDPE มาก ค่าการยุบตัว จะน้อยลง ทำให้ความสามารถในการเทได้ (Workability) ลดลง เนื่องจาก HDPE มีรูปร่างที่ใหญ่ ค่าโมดูลัส ความเค้นมากกว่าทราย (วัสดุผสมยิ่งหยาบค่าโมดูลัสความเค้นยิ่งสูง) และความสามารถในการดูดซับน้ำสูง ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างมวลรวม เช่นเดียวกับเถ้าแกลบและเปลือกไข่ไก่เผาที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นเหลี่ยม (ศักดิ์ดา ไตรปิฎก, 2555) ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างมวลรวม นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสม HDPE จะมีความหนาแน่นที่ลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วน HDPE เนื่องจาก HDPE มีความหนาแน่นน้อยกว่าทราย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าการยุบตัวและความหนาแน่นแห้งของคอนกรีต

Types	E0-R0-H0	E0-R0-H10	E0-R0-H20	E5-R5-H0	E5-R5-H10	E5-R5-H20
Slump (cm)	6.5	3	2	4	2.8	1.8
Density (kg/M ³)	2426.92	2369.89	2317.43	2394.18	2385.32	2343.94

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 11 พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ HDPE ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตรของทราย (E0-R0-H10 และ E0-R0-H20) จะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงจาก 24.10 MPa (คอนกรีตควบคุม) เป็น 21.93 และ 20.87 MPa หรือลดลงร้อยละ 9 และ 13.4 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ใ้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 25.15 MPa ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และยังสามารถช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มี HDPE ร้อยละ 10 (E5-R5-H10) ให้มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม เช่นเดียวกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดังภาพที่ 12 ที่มีแนวโน้ม สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัด อย่างไรก็ตาม คอนกรีต E5-R5-H20 กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจาก HDPE ในงานวิจัยมีดินเหนียวเป็นส่วนผสม จึงส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำที่สูง ปริมาณน้ำที่แทรก

ระหว่างมวลรวมจึงน้อยลง ทำให้ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของปูนซีเมนต์ เปลือกไข่ไก่เผา และ
 ใ้แก่ลบล

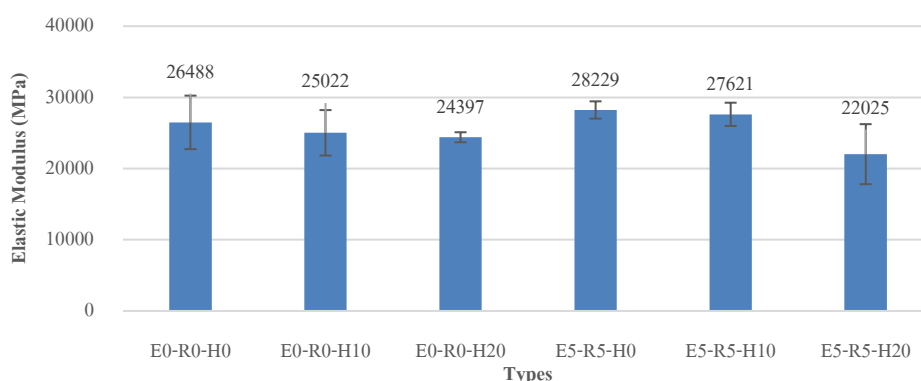


ภาพที่ 11 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มี HDPE เป็นส่วนผสม

หมายเหตุ E, R และ H = เปลือกไข่ไก่เผาละเอียด ใ้แก่ลบล และ HDPE ตามลำดับ

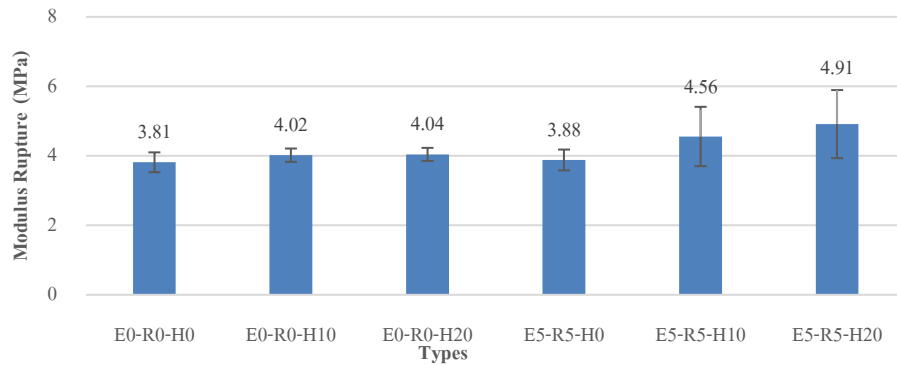
0, 5, 7.5, 10 = ปริมาณสัดส่วนผสมของวัสดุที่ใช้แทนที่ร้อยละ 0, 5, 7.5 และ 10 ตามลำดับ

เช่น E5-R5-H10 หมายถึงแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกไข่ไก่เผาและใ้แก่ลบล ร้อยละ 5 และ 5 โดยมวลตามลำดับ และแทนที่ทรายด้วย HDPE ร้อยละ 10 โดยปริมาตร



ภาพที่ 12 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มี HDPE เป็นส่วนผสม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหรือค่าโมดูลัสของการแตกหักแสดงดังภาพที่ 13 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกไข่ไก่และใ้แก่ลบล (E5-R5-H0) สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้สูงกว่า E0-R0-H0 ร้อยละ 1.84 ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วน HDPE ในคอนกรีตสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงได้ถึงร้อยละ 28.87 (E5-R5-20) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pešić et al. (2016) ที่ใช้เส้นใย HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 และ 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้



ภาพที่ 13 ค่าโมดูลัสของการแตกหักที่มี HDPE เป็นส่วนผสม

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีมวลรวมจากขยะพลาสติก HDPE ด้วยเปลือกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบ พบว่า

- (1) คอนกรีตที่มีมวลรวมจากขยะพลาสติก HDPE จะมีค่าการยุบตัว ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่น ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ HDPE ในคอนกรีต
- (2) ปริมาณเปลือกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยมวลคือ ปริมาณวัสดุทั้งสองผสมรวมกันด้วยสัดส่วนร้อยละ 5 และ 5 ตามลำดับ
- (3) การแทนที่ HDPE ร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทราย ร่วมกับปริมาณเปลือกไข่ไก่เผาและเถ้าแกลบที่เหมาะสมที่สุดสามารถช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัดคอนกรีตให้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังออกแบบได้
- (4) การใช้ เปลือกไข่ไก่เผา เถ้าแกลบ และ HDPE เป็นส่วนผสมในคอนกรีตสามารถช่วยพัฒนาค่าโมดูลัสแตกหักของคานได้สูงสุดถึงร้อยละ 28.87

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2561). *Roadmap การจัดการขยะพลาสติก พ.ศ. 2561-2573*.
- จิราภรณ์ อินทร์เกลี้ยง, & ธัญญา เสาวภาคย์. (2558). *การนำเถ้าแกลบเข้ามาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ*. Paper presented at the การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2557). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. กรุงเทพมหานคร.
- ศักดิ์ดา ไตรปิฎก. (2555). *การใช้เปลือกไข่ไก่เป็นส่วนผสมในการพัฒนาคอนกรีตมวลเบา*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยศิลปากร.

อมรรัตน์ สุริยวิจิตรเสรณี. (2548). *คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้น*. (ปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Hawa, A. (2008). *Properties of Pumice Lightweight Concrete Containing Rubber Wood Fly Ash and Rice Husk
Ash*. (Master of Engineering in Civil Engineering). Prince of Songkla University.

Pešić, N., Živanović, S., Garcia, R., & Papastergiou, P. (2016). Mechanical properties of concrete reinforced
with recycled HDPE plastic fibres. *Construction and Building Materials*, 115, 362-370.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050

**การจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วย MATLAB/SIMULINK
สำหรับการสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์
THREE PHASE INDUCTION MOTOR SIMULATION USING
MATLAB/SIMULINK FOR MACHINERY LABORATORY TEACHING
ONLINE COURSES**

รุจิพรรณ สัมปັນณา

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
9/1 ถ.พหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120**

E-mail: rujipan.s@bu.ac.th

วิชชากร เสงศรีธวัช

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
2410/2 ถ.พหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900**

E-mail: vichchakorn.he@spu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 ยังคงส่งผลกระทบต่อผู้คนในสังคมเป็นวงกว้าง โดยเฉพาะการให้หยุดดำเนินงานด้านการเรียนการสอนของสถานศึกษาทุกแห่งโดยกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม เป็นเหตุให้การสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้รับผลกระทบค่อนข้างมาก เนื่องจากผู้เรียนไม่สามารถทำการทดลองกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริงทำให้ขาดทักษะและความเข้าใจ บทความนี้จึงนำเสนอการใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ช่วยจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งเป็นเรื่องหนึ่งของการเรียนในวิชาดังกล่าวเพื่อนำไปสอนในรูปแบบออนไลน์ โดยเป็นการศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ ตามขอบเขตการเรียนรู้ อาทิ การกลับทางหมุน การหาค่ากระแสสตาร์ท การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การหาประสิทธิภาพ รวมถึงการหาความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบเป็นต้น ผลสำรวจความพึงพอใจของผู้เรียนพบว่าส่วนใหญ่เห็นว่าการใช้โปรแกรมจำลองช่วยกระตุ้นการเรียนแบบออนไลน์ ทำให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น รวมถึงสามารถใช้อธิบายผลการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางสำหรับการนำมาสอนทดแทนการเรียนในห้องจริงได้ในสถานการณ์ฉุกเฉิน

คำสำคัญ: แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การจำลองด้วยซิมูลิงค์

ABSTRACT

Currently, the situation of the epidemic of Covid-19 continues to affect people in society at large. Especially the cessation of teaching and learning operations of all educational institutions by the Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation. As a result, the teaching of electrical machinery operations has been quite affected. Because the learners are unable to experiment with real electrical machines, they lack skills and understanding. Therefore, this article presents the use of MATLAB / Simulink program to help simulate the operation of a three-phase induction motor, which is one of the subjects of the course to be taught in an online format. This is a study of motor performance characteristics under various conditions according to the learning scope, such as reversing motor direction, starting current, power factor improvement, efficiency estimation including finding the relationship of torque and speed, etc. The results of the student satisfaction survey found that the majority of the respondents said that using a simulation program stimulated online learning and cause more understanding. It can also be used to describe experimental results for analysis and conclusions clearly. This may be used as a guideline for teaching instead of classroom learning in emergency situations.

Keywords: Induction Motor Modeling, Simulink Simulation

1. บทนำ (Introduction)

วิชาทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้า นับเป็นวิชาที่มีความสำคัญวิชาหนึ่งตามแผนการเรียนของหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ระดับปริญญาตรี เนื่องจากมีเนื้อหาหลักการทำงานและการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สำคัญทางภาคอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิ หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส รวมถึงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นต้น ประกอบกับการเรียนเชิงปฏิบัติที่มีเนื้อหาสอดคล้องกัน เพื่อให้นักศึกษามีทักษะ มีความรู้ความเข้าใจจนสามารถนำไปประกอบอาชีพทางด้านวิศวกรรมได้ ทั้งนี้เนื้อหาส่วนหนึ่งของการเรียนวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้กล่าวถึงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งถือว่าเป็นเครื่องจักรกลที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตของสถานประกอบการต่างๆ ทางภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาถูก ประสิทธิภาพสูง แข็งแรงทนทาน และสามารถควบคุมได้ง่าย ดังนั้นการเรียนในภาคปฏิบัติจึงให้ความสำคัญกับการศึกษาคุณลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้ค่อนข้างมาก อาทิ การสตาร์ทมอเตอร์ การกลับทางหมุน การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การจ่ายกระแส และการหาประสิทธิภาพ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม จากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 ที่ยังเป็นห่วง ทำให้สถานศึกษาทุกแห่งจำเป็นต้องงดใช้อาคารสำหรับการเรียนการสอนตามนโยบายของรัฐเพื่อความปลอดภัย เป็นเหตุให้การเรียนการสอนส่วนใหญ่ถูกปรับรูปแบบเป็นการสอนออนไลน์ (Online Teaching) รวมถึงกลุ่มวิชาปฏิบัติการด้วย ซึ่งสร้างความลำบากต่อผู้สอนพอสมควร เนื่องจากวัตถุประสงค์ของวิชาปฏิบัติการมุ่งเน้นให้ผู้เรียนมีประสบการณ์ด้วยการทดลองกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริงเพื่อให้มีทักษะและความเข้าใจ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์ค่อนข้างได้รับผลกระทบมาก

ความจำเป็นในการปรับรูปแบบการสอนทำให้เริ่มมีการนำโปรแกรมช่วยจำลองการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ามาใช้เสริมทักษะในเรื่องต่างๆ ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

ช่วยจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการสร้างแบบจำลองให้มีความใกล้เคียงกับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ ที่มีการใช้ในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการตรวจสอบผลจำลองเพื่อความถูกต้องและสอดคล้องตามทฤษฎีเพื่อทำให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจมากขึ้น โดยผลสำรวจความพึงพอใจของผู้เรียนพบว่าส่วนใหญ่เห็นว่าการใช้โปรแกรมจำลองมีส่วนช่วยกระตุ้นการเรียนรู้แบบออนไลน์ ทำให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจากการจำลองผลด้วยตนเอง รวมถึงสามารถอธิบายผลการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางสำหรับการนำมาสอนทดแทนการเรียนในห้องจริงได้ในสถานการณ์ฉุกเฉิน

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์หลักที่ใช้สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสในห้องปฏิบัติการแสดงดังภาพที่ 1 โดยอุปกรณ์แต่ละชนิดมีหน้าที่ดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

ตารางที่ 1 หน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

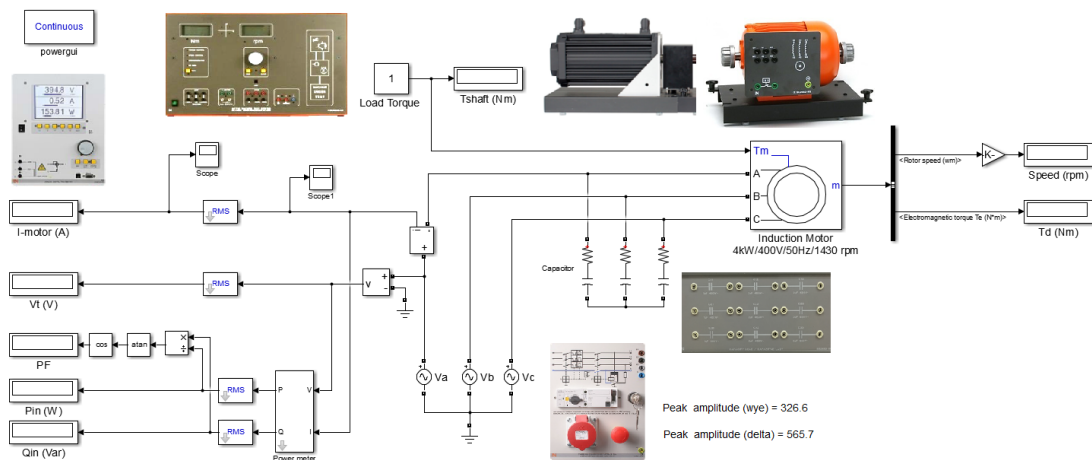
อุปกรณ์	หน้าที่
1. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	ศึกษาคุณลักษณะการทำงาน
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส	จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
3. มัลติมิเตอร์ 1 เฟส	วัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
4. ชุดคาปาซิเตอร์	ปรับค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
5. มอเตอร์เซอร์โว	ใช้เป็นภาระ (Load) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
6. ชุดควบคุมมอเตอร์เซอร์โว	ควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เซอร์โว

ในการทดลองจริงจะต่อแกนหมุนของมอเตอร์เซอร์โว (Servo Motor) ร่วมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อทำหน้าที่เป็นภาระ ซึ่งจะใช้ชุดควบคุมในการปรับขนาดแรงบิดโดยมีส่วนการแสดงผลค่าแรงบิดและความเร็วรอบ

บนหน้าจอ สำหรับค่ากำลังงานและกระแสที่มอเตอร์เหนี่ยวนำใช้ในการทำงานจะถูกวัดปริมาณด้วยมัลติมิเตอร์ (Multimeter) เพียงเฟสเดียว เพื่อนำผลการวัดทั้งหมดไปใช้ศึกษาคุณลักษณะการทำงาน

3. แบบจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกนำมาจากคลังข้อมูลซึ่งโปรแกรม MATLAB/Simulink จัดเตรียมไว้แล้ว โดยเลือกใช้เป็นประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก พิกัดขนาด 4 kW, 400 V, 50 Hz, 1430 rpm ซึ่งมีส่วนการแสดงผลค่าแรงบิดและความเร็วรอบในตัว สำหรับการวัดปริมาณทางไฟฟ้าขณะมอเตอร์ทำงาน ถูกออกแบบให้มีการวัดค่าแรงดัน กระแส กำลังงานและค่าตัวประกอบกำลัง โดยได้รับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 3 เฟส แบบสมดุล ดังภาพที่ 2



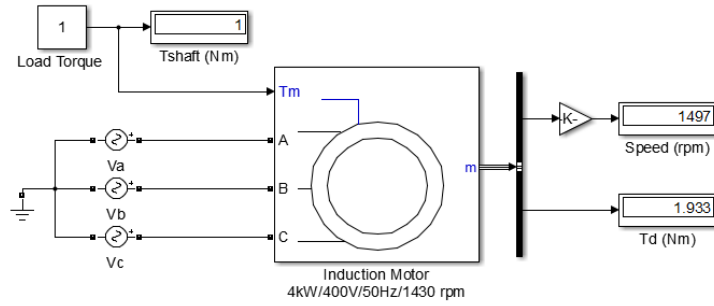
ภาพที่ 2 แบบจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

4. ผลจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

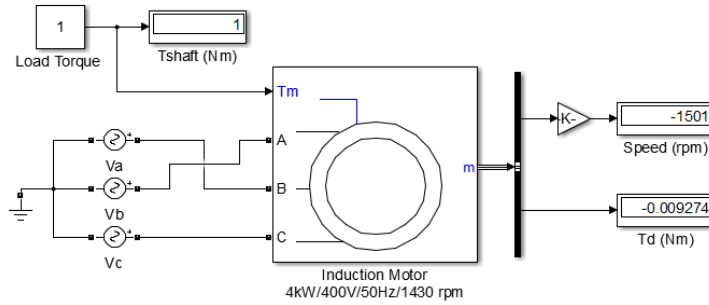
ประเด็นการศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่สำคัญตามเอกสารใบงาน ประกอบด้วย การกลับทางหมุน การหาค่ากระแสสตาร์ท การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง คุณลักษณะในการจ่ายภาระ การหาประสิทธิภาพ รวมถึงการหาความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบ

4.1 การกลับทางหมุน

ในทางปฏิบัติการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถทำได้ด้วยการสลับคู่เฟสของแหล่งจ่าย 3 เฟสเพียง 1 คู่ เพื่อเป็นการกลับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็ก โดยการจำลองผลในเรื่องนี้จะเริ่มให้มอเตอร์ได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายเรียงเป็นลำดับปกติ (V_a, V_b, V_c) ซึ่งมอเตอร์จะมีทิศการหมุนตามเข็มนาฬิกา ดังภาพที่ 3(a) สำหรับการกลับทางหมุนจะให้มอเตอร์ได้รับแรงดันสลับคู่เฟสกันของ V_a และ V_b ทำให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยจะแสดงค่าความเร็วรอบเป็นตัวเลขที่ติดเครื่องหมายลบ ดังภาพที่ 3(b)



(a) การหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำในทิศตามเข็มนาฬิกา

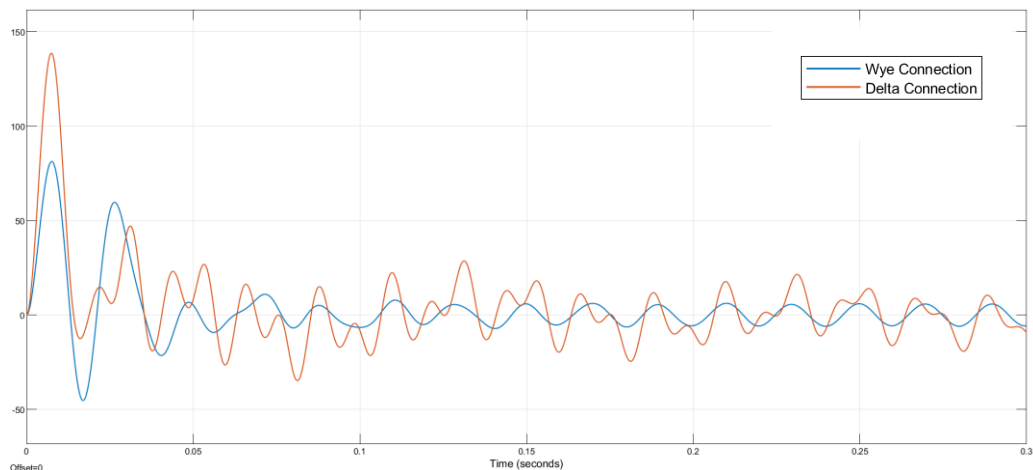


(b) การหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำในทิศทวนเข็มนาฬิกา

ภาพที่ 3 การจำลองกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

4.2 การสตาร์ทมอเตอร์

ผลจำลองค่ากระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์ (Starting) และขณะทำงาน (Running) เมื่อมอเตอร์จ่ายภาระขนาด 1 Nm โดยเปรียบเทียบจากลักษณะการต่อขดลวดที่ต่างกันระหว่างการต่อแบบวายน์ (Wye) และการต่อแบบเดลต้า (Delta) แสดงเป็นค่าขนาดอาร์เอ็มเอส (RMS) ดังตารางที่ 2 และรูปคลื่นกระแสดังภาพที่ 4 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าการต่อขดลวดแบบเดลต้าส่งผลให้ทั้งค่ากระแสสตาร์ทและกระแสทำงานสูงกว่าการต่อแบบวายน์



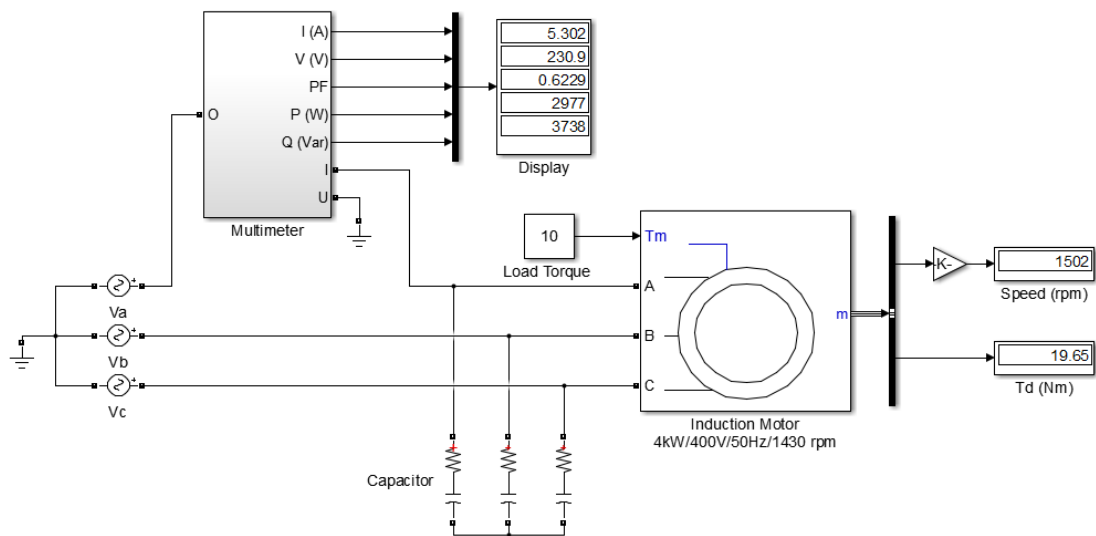
ภาพที่ 4 เปรียบเทียบกระแสของมอเตอร์ขณะสตาร์ทระหว่างการต่อแบบวายน์และเดลต้า

ตารางที่ 2 ค่ากระแสมอเตอร์ขณะสตาร์ทและขณะทำงาน

การต่อขดลวด	แรงดัน (V)	กระแสสตาร์ท (A)	กระแสทำงาน (A)
Wye	400	47.87	4.15
Delta	400	74.05	7.48

4.3 การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ โดยเฉพาะกรณีจ่ายภาระต่ำกว่าพิกัดมาก ๆ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการต่อขดลวดปาซิเตอร์ขนานเข้ากับมอเตอร์ตามภาพที่ 5 เพื่อให้มอเตอร์ใช้กำลังไฟรีแอกทีฟ (Reactive Power) จากขดลวดปาซิเตอร์ในการทำงาน ผลจำลองการใช้ขดลวดปาซิเตอร์ที่มีขนาดความจุ (Capacitance) ต่างกันแสดงไว้ในตารางที่ 3



ภาพที่ 5 การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยขดลวดปาซิเตอร์

ตารางที่ 3 ผลการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังตามขนาดความจุของขดลวดปาซิเตอร์ต่างๆ

Parameters	No Cap	C = 10 μ F	C = 20 μ F	C = 30 μ F
T (Nm)	10	10	10	10
n (rpm)	1476	1476	1476	1476
I (A)	5.023	4.210	3.653	3.166
P.F.	0.522	0.597	0.688	0.794
P (W)	578.2	580.3	580.3	580.3
Q (Var)	945.8	780.1	612.5	445.0

ผลการปรับปรุงตัวประกอบกำลังในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำหนดให้มอเตอร์จ่ายภาระคงที่ขนาด 10 Nm ค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ (P.F.) จะสูงขึ้นตามขนาดความจุของขดลวดปาซิเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับการใช้กำลังไฟรีแอกทีฟ (Q) จากระบบที่น้อยลง ส่งผลให้การใช้กระแสของมอเตอร์ (I) ลดลงด้วย ในขณะที่

การใช้กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P) และความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าคงที่ ทั้งนี้ผลการจำลองที่ได้ทั้งหมดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

4.4 การทำงานของมอเตอร์เมื่อจ่ายภาระ

คุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ซึ่งต่อขดลวดแบบวายน์ เมื่อมีการจ่ายภาระที่มีขนาดแรงบิด (T) ต่างกันตามตารางที่ 4 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์หลายตัวที่สำคัญ อาทิ เมื่อภาระมีขนาดมากขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง ในขณะที่มอเตอร์จะกินกระแส (I) และกำลังงานอินพุต (P_{in}) เพิ่มมากขึ้น รวมถึงค่าตัวประกอบกำลัง (P.F.) ในการทำงานก็จะสูงขึ้นตามด้วย

ตารางที่ 4 คุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เมื่อจ่ายภาระขนาดต่างๆ

T (Nm)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
n (rpm)	1494	1490	1485	1481	1476	1472	1467	1462	1457	1452
I (A)	4.29	4.36	4.51	4.59	4.84	5.46	5.90	6.12	6.38	6.93
P.F.	0.183	0.280	0.368	0.443	0.506	0.596	0.651	0.693	0.732	0.758
P_{in} (W)	529	826.4	1121	1404	1668	2047	2401	2779	3141	3476
P_{out} (W)	313	624.1	933.4	1241	1546	1849	2150	2449	2746	3032
η (%)	59.17	75.52	83.26	88.38	92.68	90.35	89.56	88.14	87.43	87.21

ค่ากำลังงานด้านเอาต์พุต (P_{out}) และค่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ (η) ในตารางที่ 4 ขณะจ่ายภาระขนาดต่างๆ คำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ โดยสามารถแสดงให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับปริมาณต่างๆ ดังภาพที่ 6 ประกอบด้วย แรงบิด-ความเร็วรอบ (ภาพที่ 6a) แรงบิด-กำลังงาน (ภาพที่ 6b) แรงบิด-กระแส (ภาพที่ 6c) แรงบิด-ตัวประกอบกำลัง (ภาพที่ 6d) และแรงบิด-ประสิทธิภาพ (ภาพที่ 6e) ตามลำดับ

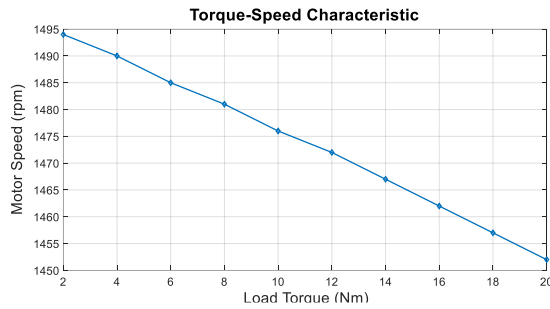
$$P_{out} = \frac{T \times n}{9.55} \quad (1)$$

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

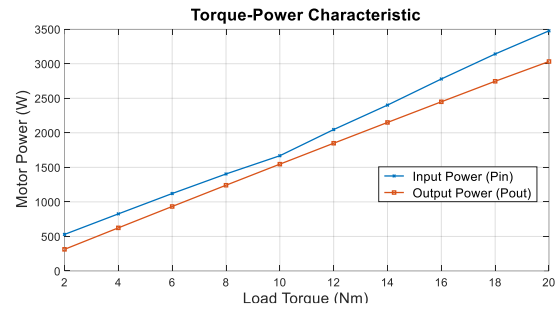
โดยที่ T คือขนาดแรงบิดของภาระ (Nm)

n คือความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

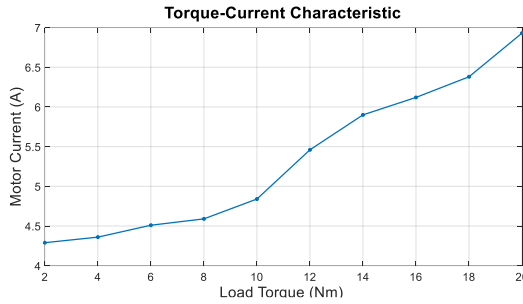
P_{in} คือกำลังงานอินพุตของมอเตอร์ (W)



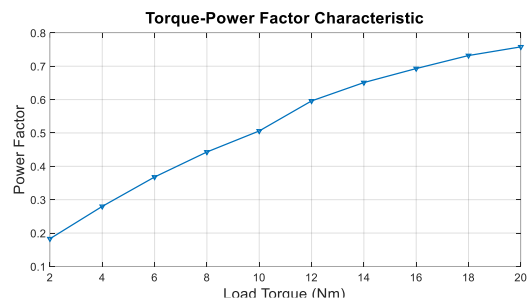
(a) คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ



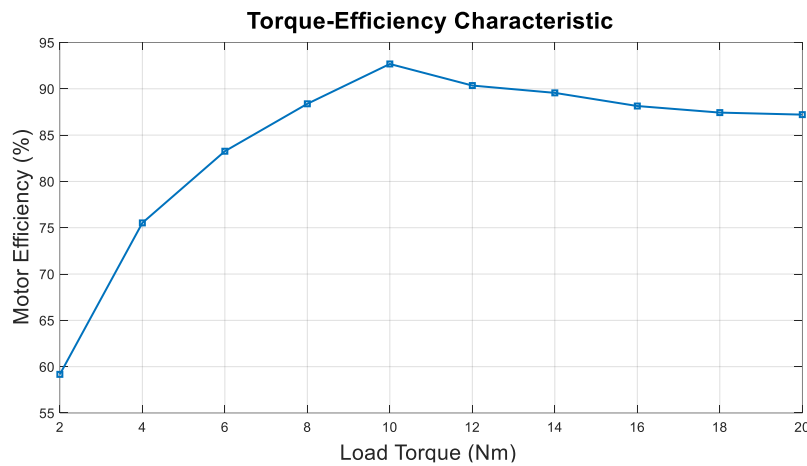
(b) คุณลักษณะแรงบิด-กำลังงาน



(c) คุณลักษณะแรงบิด-กระแส



(d) คุณลักษณะแรงบิด-ตัวประกอบกำลัง



(e) คุณลักษณะแรงบิด-ประสิทธิภาพ

ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิด โหลดกับปริมาณต่างๆ ของมอเตอร์ขณะทำงาน

ข้อสังเกตจากผลจำลองในภาพที่ 6b แสดงให้เห็นถึงการใช้จ่ายพลังงาน (P_{out}) ที่มากขึ้นตามการจ่ายภาระจนเกือบถึงค่าพิกัดของมอเตอร์ ในขณะที่ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดของภาระจนถึงค่าหนึ่ง (10 Nm) หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่สามารถพบได้โดยทั่วไปในการทำงานจริง

5. ผลสำรวจความพึงพอใจของผู้เรียน

ผลสำรวจความคิดเห็นของนักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ชั้นปีที่ 3 จำนวน 39 คน ที่มีต่อการเรียนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์ด้วยโปรแกรมจำลองที่ได้ออกแบบไว้ มีวัตถุประสงค์เพื่อรับทราบและศึกษาความคิดเห็นของนักศึกษา เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา

รูปแบบการเรียนการสอนแบบออนไลน์ของวิชาปฏิบัติการ ด้วยการวิเคราะห์ผลตอบของคะแนนจากคำถามที่ ออกแบบไว้ทางสถิติเชิงพรรณนา ประกอบด้วย ค่าความถี่ ร้อยละ และค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลสำรวจความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการใช้โปรแกรมจำลองในการเรียนแบบออนไลน์

คำถาม	จำนวน (ร้อยละ)					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
1. การใช้โปรแกรมจำลองช่วยกระตุ้นในการเรียนแบบออนไลน์	1 (2.6)	2 (5.1)	5 (12.8)	17 (43.6)	14 (35.9)	4.05
2. การใช้โปรแกรมจำลองสามารถอธิบายผลการทดลองได้อย่างชัดเจน	0 (0.0)	0 (0.0)	2 (5.1)	26 (66.7)	11 (28.2)	4.23
3. การใช้โปรแกรมจำลองช่วยทำให้เกิดความเข้าใจการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ามากขึ้น	1 (2.6)	0 (0.0)	6 (15.4)	19 (48.7)	13 (33.3)	4.10
4. สามารถนำผลจากโปรแกรมจำลองไปวิเคราะห์และสรุปผลได้ตามหลักทฤษฎี	0 (0.0)	1 (2.6)	2 (5.1)	26 (66.7)	10 (25.6)	4.15
5. สามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองในการทำงานจริงได้ในอนาคต	0 (0.0)	1 (2.6)	6 (15.4)	19 (48.7)	13 (33.3)	4.13
6. การใช้โปรแกรมจำลองสามารถทดแทนการเรียนในห้องปฏิบัติการได้ในสถานการณ์ฉุกเฉิน	1 (2.6)	2 (5.1)	4 (10.3)	15 (38.5)	17 (43.6)	4.15
7. การใช้โปรแกรมจำลองช่วยในการเรียนแบบออนไลน์ดีกว่าวิชาปฏิบัติการอื่นที่ไม่มีโปรแกรมจำลอง	0 (0.0)	0 (0.0)	2 (5.1)	22 (56.4)	15 (38.5)	4.33
8. การใช้โปรแกรมจำลองช่วยในการเรียนแบบออนไลน์สามารถสร้างบรรยากาศในการเรียนให้น่าสนใจได้	2 (5.1)	1 (2.6)	8 (20.5)	17 (43.6)	11 (28.2)	3.87
9. การใช้โปรแกรมจำลองทำให้สามารถศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองได้	0 (0.0)	4 (10.3)	5 (12.8)	17 (43.6)	13 (33.3)	4.00
10. การเรียนแบบออนไลน์ ทำให้มีความสุขและมีความพอใจ	0 (0.0)	2 (5.1)	6 (15.4)	18 (46.2)	13 (33.3)	4.08

6. สรุปและอภิปรายผล

จากผลจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วย MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโปรแกรม โดยสามารถออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ได้ครอบคลุมตามขอบเขตการเรียนรู้ของวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งยังคงได้ผลตอบที่มีความถูกต้องสอดคล้องตามหลักการการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นอกจากนี้ การใช้โปรแกรมจำลองสำหรับการสอนวิชาปฏิบัติการแบบออนไลน์ ยังสามารถช่วยให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจและมีความสนใจต่อการเรียนมากขึ้นเมื่อเทียบกับการฟังบรรยายอย่างเดียว โดยผลสำรวจความคิดเห็นของนักศึกษาแสดงถึงข้อมูลส่วนใหญ่เห็นด้วยว่าการใช้โปรแกรมจำลองมีส่วนช่วยกระตุ้นในการเรียนแบบออนไลน์ และช่วยทำให้เกิดความเข้าใจการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ามากขึ้น โดยกล่าวว่าการใช้โปรแกรมจำลองเข้ามาช่วยสอนสามารถอธิบายผลการทดลองได้อย่างชัดเจน รวมถึงสามารถนำไปวิเคราะห์และสรุปผลได้ตามหลักทฤษฎี และเมื่อเปรียบเทียบกับการสอนของวิชาปฏิบัติอื่น ส่วนใหญ่มีความเห็นว่าดีกว่าวิชาปฏิบัติการอื่นที่ไม่มีการใช้โปรแกรมจำลองช่วยสอน ที่สำคัญยัง

สามารถศึกษาได้ด้วยตนเองและคิดว่าสามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองสำหรับการทำงานจริงได้ในอนาคต รวมทั้งยังมีส่วนช่วยสร้างบรรยากาศในการเรียนแบบออนไลน์ที่น่าสนใจได้

ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าเราสามารถนำโปรแกรม MATLAB/Simulink เข้ามาช่วยจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อใช้สอนในวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าในสถานการณ์ที่ไม่สามารถสอนในห้องปฏิบัติการได้ โดยเฉพาะเมื่อจำเป็นต้องมีการปรับรูปแบบเป็นการสอนออนไลน์ ซึ่งถึงแม้ผู้เรียนจะไม่ได้ลงมือปฏิบัติจริงแต่ก็ยังคงมีทักษะในการใช้โปรแกรมช่วยจำลอง รวมถึงมีความเข้าใจคุณลักษณะสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- Manish Kumar Singh, Madhur Chauhan, Amit Kumar Singhal and Nitin Saxena. (2014). A Methodology to Develop A Simulink Model of Three Phase Induction Motor. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4, Special Issue 1, February 2014.
- Sri Manakula and Sri Manakula. (2014). Review of Modeling and Dynamic Analysis of Three Phase Induction Motor Using MATLAB Simulink. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 3, Issue 3, March 2014.
- SIMULINK. (2000). *Model-Based and System-Based Design, Using Simulink*, MathWorks Inc.,

แบบจำลองการคำนวณของวัสดุป้องกันสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

COMPUTATION MODELING OF SHIELDING MATERIAL FOR ELECTROMAGNETIC WAVES

พงษ์ศักดิ์ อ่ำภา¹, อำนวย เรืองวารี^{2*}

อาทิทยา บุญญาธิการ, ชีรพงศ์ นาคบุญชร และ อติเรก ทองทา

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: phongsuk.a@en.rmutt.ac.th¹, amnoiy.r@en.rmutt.ac.th^{2*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเน้นที่การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างวัสดุโดยใช้โดเมนเวลา วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงจำกัดโดเมนเวลา (FDTD) ซึ่งเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST STUDIO SUITE โดยนำวัสดุที่มีคุณสมบัติสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการกั้นและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยทฤษฎีของ Two-Port Network ทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ แผ่นอีพอกซี (FR-4) เป็นวัสดุที่ถูกเลือกใช้ในการทดสอบนี้ ซึ่ง แผ่นอีพอกซี (FR-4) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ย่านความถี่ที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองจะอยู่ในช่วงความถี่ 4.0-7.5 Ghz ซึ่งคือย่านความถี่ไมโครเวฟ จากนั้นจะนำผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน

คำสำคัญ: คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, การดูดกลืนคลื่น, การจำลองแบบคอมพิวเตอร์

ABSTRACT

The purpose of this research is to study electromagnetic absorption simulations with a particular focus on computing electromagnetic fields in material structures using the time-domain finite difference time domain (FDTD) approach. The FDTD was implemented using the MATLAB program. The results are compared with the simulation results from the CST STUDIO SUITE program, which assesses the ability of electromagnetic absorbent materials to block and absorb electromagnetic waves by utilizing the theory of Two-Port Networks to aid in the analysis of transmission and reflection coefficients. This time, the epoxy sheet (FR-4) was used as a test substrate. Epoxy sheet (FR-4) is an electromagnetic radiation-absorbing material. The frequency bands used in the model calculations are in the range of 4.0- 7.5 Ghz, which is the microwave frequency band. The computation results of the two programs are then compared.

Keywords: Electromagnetic Waves, Wave Absorption, Computer Simulation

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ในปัจจุบันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้มากมายในชีวิตประจำวันมีทั้งชนิดที่ไม่เป็นอันตราย ซึ่งถูกนำมาใช้ในการสื่อสารทั่วไป เช่น ความถี่ย่าน ไมโครเวฟ (Microwave frequency band) และมีใช้ในทางการทหารและการแพทย์ เช่น รังสีแกมมา (Gamma ray) รังสีเอ็กซ์ (X-ray) โดยปกติวัสดุที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถส่งผ่านได้จะเป็นชนิดที่ไม่นำไฟฟ้า ซึ่งเรียกวัดชนิดนี้ว่า “วัสดุไดอิเล็กตริก” (Dielectric material) ส่วนวัสดุที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถส่งผ่านได้จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้า เรียกวัดชนิดนี้ว่า “วัสดุตัวนำ” (Conductor) สำหรับวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า และป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกสร้างขึ้นด้วยลักษณะพิเศษคือสามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกวัดชนิดนี้ว่า “วัสดุดูดซับ” (Absorbers material) หรือป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า วัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (shielding material) (M. Y. Koledintseva et al., 2009)

การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังที่กล่าวมาข้างต้น (ตั้งแต่ 0 Hz ถึง 300 GHz) สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ได้ หากรับคลื่น (Exposure) แรงเกินควร หรือเป็นเวลานานเกินไป ซึ่งอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าประจำบ้านล้วนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่าง ๆ และยังมี ส่งผลให้เกิดการรบกวนต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไวต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด เพื่อจะแก้ปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงได้มีการทดสอบและออกแบบวัสดุที่สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวัสดุที่ได้จะนำไปป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (มนตรี มาลาทอง, 2558). โดยจะศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น อีพอกซี (FR-4) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) (K. Pomoni et al., 2013)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) ศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุ
- (2) ศึกษาการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการ FDTD
- (3) ศึกษาการทำงานของโปรแกรม MATLAB และ CST STUDIO SUITE
- (4) เพื่อเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB สำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- (5) เพื่อผลที่ได้จากการจำลองแบบไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบแผ่นวัสดุกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

โดยทั่วไปการอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Cheng, 1983) นั้นจะกระทำโดยผ่านสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) ซึ่งสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามเวลาเมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขตที่สมบูรณ์ (perfectly boundary condition) ลงไปก็จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟหรือ แอปพลิเคชันใด ๆ ได้อย่างสมบูรณ์

สมการแรกของสมการแมกซ์เวลล์ คือ กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่โยงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา กับสนามแม่เหล็ก H หรือกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าที่หมุนวนรอบๆ คอนดักเตอร์ เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนดักเตอร์ ซึ่งแสดงได้ด้วยรูปสมการอนุพันธ์ในลักษณะไมล์ฮาโมนิก ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

สมการที่สองของสมการแมกซ์เวลล์ คือ กฎของแอมแปร์ ที่โยงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) \vec{H} กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวม (Total Electric Current Density) \vec{J}_t (ซึ่งรวมผลของกระแสดีสเพลสเมนต์และกระแสเหนี่ยวนำ) หรือกล่าวได้ว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กที่หมุนวนรอบ ๆ คอนทัวร์ปิด (Closed Contour) เท่ากับกระแสสุทธิที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนทัวร์ ยกตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้าที่ล้อมรอบ (Surrounded) โดยสนามแม่เหล็ก เป็นต้น ซึ่งแสดงได้ด้วยรูปสมการอนุพันธ์ในลักษณะโทมฮาโมนิก (Time Harmonic) ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

เมื่อ \vec{E} และ \vec{H} คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ \vec{J} คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Electric Current Density) \vec{D} คือความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric Flux Density) และ \vec{B} คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง \vec{J}, \vec{D} และ \vec{B} กับ \vec{E} และ \vec{H} คือ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

โดยที่

σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity)

μ คือ ค่าซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability)

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) หรือคือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity)

3.1.2 ทฤษฎีวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD)

(C. Furse and G. Lazzi. 2016)

วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain : FDTD) เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้หาผลเฉลยทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถึงแม้ว่าวิธีนี้ได้เกิดขึ้นมาตั้งแต่ 30 กว่าปีมาแล้วก็ตาม แต่ก็ยังนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง วิธี FDTD (Yee, 1996) ถูกเสนอครั้งแรกโดย (Yee) ในปี ค.ศ. 1966 ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยืดหยุ่นและสะดวกในการแก้ปัญหาอนุพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์โดยทำให้อยู่ในรูปแบบดิคริต ซึ่งใช้กริดสนามไฟฟ้า (Electric Field : \vec{E}) และกริดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field : \vec{H}) เพื่อทำการปรับปรุงสมการสนามที่อยู่ในโดเมนการคำนวณให้อยู่ในเทอมของสนามในโดเมนเวลาที่ผ่านไป เขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{E_y|_{i,j}^{n+1/2} - E_y|_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_{i,j}} \cdot \left(\frac{H_z|_{i,j-1/2}^n - H_z|_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} - \sigma_{i,j} \cdot E_x|_{i,j}^n \right) \quad (6)$$

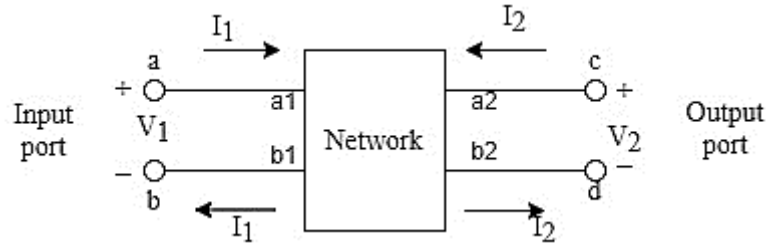
$$\frac{E_x|_{i,j}^{n+1/2} - E_x|_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_{i,j}} \cdot \left(\frac{H_z|_{i+1/2,j}^n - H_z|_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} - \sigma_{i,j} \cdot E_y|_{i,j}^n \right) \quad (7)$$

$$\frac{H_z|_{i,j}^{n+1} - H_z|_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \cdot \left(\frac{E_y|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - E_y|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{E_x|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - E_x|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} - \sigma_{i,j}^* \cdot H_z|_{i,j}^{n+1/2} \right) \quad (8)$$

3.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย

3.2.1 วงจรสองทางเข้าออก (Two Port Network)

จุดเชื่อมต่อใดๆ ไม่ว่าจะป็นฝั่งขาเข้าหรือขาออกของวงจร เราเรียกจุดนั้นว่าพอร์ต (Port) และจำนวนพอร์ตของวงจรจะถูกใช้แบ่งประเภทของวงจรมันๆ ดังนั้นวงจรที่มี 2 พอร์ต ดังที่แสดงภาพที่ 1 จึงถูกเรียกว่า “วงจรสองทางเข้าออก” หรือ Two Port Network ซึ่งเป็นประเภทของวงจรไฟฟ้าส่วนใหญ่ และพารามิเตอร์ของพอร์ตใดๆ จะถูกอธิบายโดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 1 วงจรสองทางเข้าออก (มนตรี มาลาทอง,2558)

การวิเคราะห์ห้วงจรสองทางเข้าออก ทำได้โดยการป้อนแรงดันและกระแสเข้าไปที่พอร์ตฝั่งขาเข้า จากนั้นคำนวณค่าพารามิเตอร์ a_1 , a_2 , b_1 และ b_2 ตามที่แสดงในภาพที่ 1 ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถคำนวณได้ข้างล่างนี้

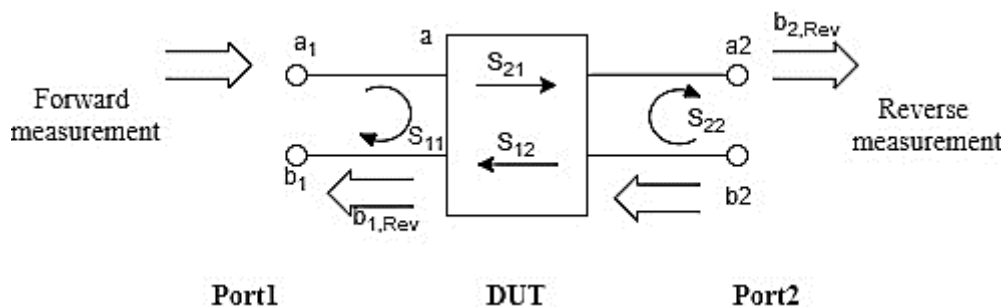
$$a_1 = \frac{V_1 + I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{V_2 + I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} \quad (10)$$

$$b_1 = \frac{V_1 - I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} \quad (11)$$

$$b_2 = \frac{V_2 - I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} \quad (12)$$

โดยที่ V_1 คือ แรงดันฝั่งขาเข้า I_1 คือ กระแสฝั่งขาเข้า V_2 คือแรงดันฝั่งขาออก I_2 คือ กระแสฝั่งขาออก และ Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของระบบ เมื่อนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปพิจารณาในรูปแบบของ S-Parameter หรือ Scattering Parameters จะมีความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 S-Parameter ของวงจรสองทางเข้าออก (มนตรี มาลาทอง, 2558)

โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (9) ถึง (12)

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (13)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad (14)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (15)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad (16)$$

โดยที่

S_{11} อ้างอิงถึงสัญญาณที่สะท้อนกลับ (Reflected Wave) เมื่อป้อนคลื่นเข้าที่ a_1 คลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับที่ b_1

S_{21} อ้างอิงถึงสัญญาณที่ส่งผ่าน (Transmitted Wave) เมื่อป้อนคลื่นเข้าที่ a_1 คลื่นจะเกิดการส่งผ่านไปยัง b_2

S_{12} อ้างอิงถึงสัญญาณที่ออกจาก b_1 เมื่อป้อนคลื่นเข้าที่ a_2 คลื่นจะเกิดการส่งผ่าน

S_{22} อ้างอิงถึงสัญญาณที่ออกจาก b_2 เมื่อป้อนคลื่นเข้าที่ a_2 คลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับ

ดังนั้นค่ากำลังคลื่นของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและค่ากำลังคลื่นของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสามารถคำนวณหาค่าได้ดังนี้

$$S_{11} (dB) = 20 \log(S_{11}) \quad (17)$$

$$S_{21} (dB) = 20 \log(S_{21}) \quad (18)$$

3.2.2 กำลังคลื่นที่ถูกดูดซับ (Absorbance)

หากต้องการทราบกำลังคลื่นที่ถูกดูดซับไว้ หรือ Absorbance หาได้จากกำลังคลื่นที่เข้าไป เท่ากับผลรวมของ กำลังคลื่นส่งผ่าน กำลังคลื่นสะท้อน และกำลังคลื่นที่ถูกดูดซับ (ประวิทย์ บัวพันธ์, 2556)

$$a_1^2 = b_2^2 + b_1^2 + c^2 \quad (19)$$

$$\frac{a_1^2}{a_1^2} = \frac{b_2^2}{a_1^2} + \frac{b_1^2}{a_1^2} + \frac{c^2}{a_1^2} \quad (20)$$

$$1 = |S_{21}|^2 + |S_{11}|^2 + \frac{c^2}{a_1^2} \quad (21)$$

$$\frac{c^2}{a_1^2} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (22)$$

โดยกำหนด A เป็นกำลังคลื่นที่ถูกดูดซับ ซึ่ง $A = \frac{c^2}{a_1^2}$ ดังนั้นจะได้กำลังคลื่นที่ถูกดูดซับดังนี้

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (24)$$

$$A(dB) = 20 \log(A) \quad (25)$$

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 แบบแผนการวิจัย

การจำลองแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นี้ถูกแบ่งเป็น 2 โปรแกรม คือ การเขียนโปรแกรม MATLAB และการใช้โปรแกรม CST STUDIO SUITE ในการจำลองแบบ จากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ของวิจัยนี้ ทำให้สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ในการศึกษาได้ใช้วิธีเชิงตัวเลขมาช่วยวิเคราะห์โดยได้เลือกใช้วิธี FDTD (J. B. Schneider, 2016) แบบแผนคลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE mode) ในสองมิติ ที่เป็นไปตามเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข และได้ใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนชั้นแมตซ์สมบูรณ์ (Perfectly Match Layer Boundary Condition: PML BC) (S. G. Johnson, 2010) มาวิเคราะห์ เนื่องจากวิธี FDTD เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าในโดเมนเวลา

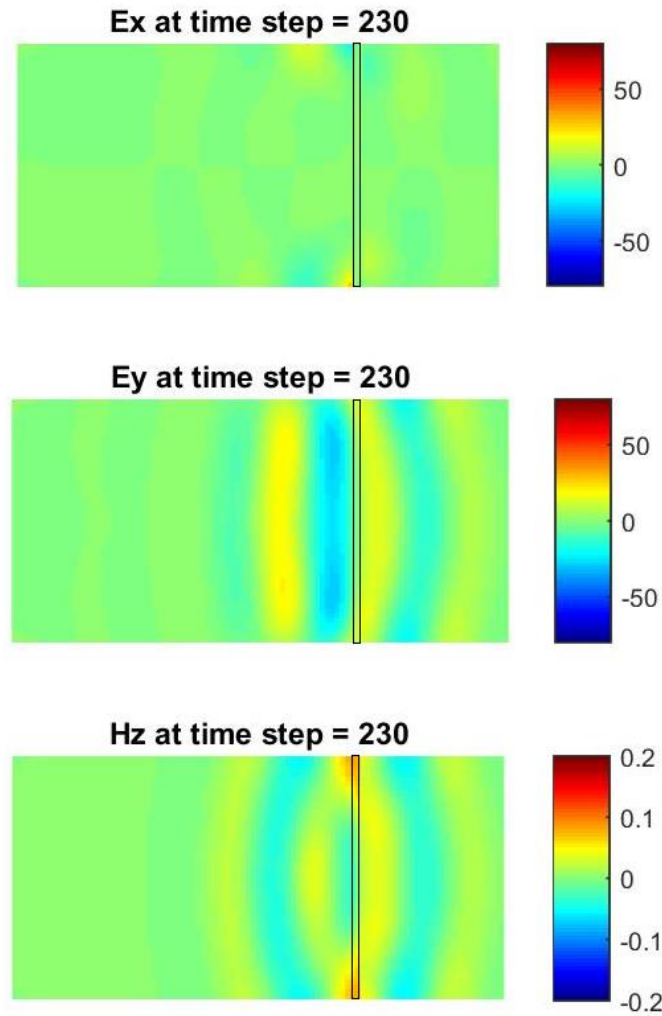
ขั้นตอนที่ 2 เริ่มการเขียน Code โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นเครื่องมือในสร้างการจำลองแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้ FDTD ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมถึงออกแบบ PML BC ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อทำการเขียนโปรแกรมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการทดสอบการจำลองแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมอย่างละเอียด และหาข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้น เมื่อพบข้อผิดพลาดก็จะทำการแก้ไข พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องและผลลัพธ์ต่างๆ ซึ่งผลจากการทดสอบนั้น โปรแกรมสามารถทำงานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

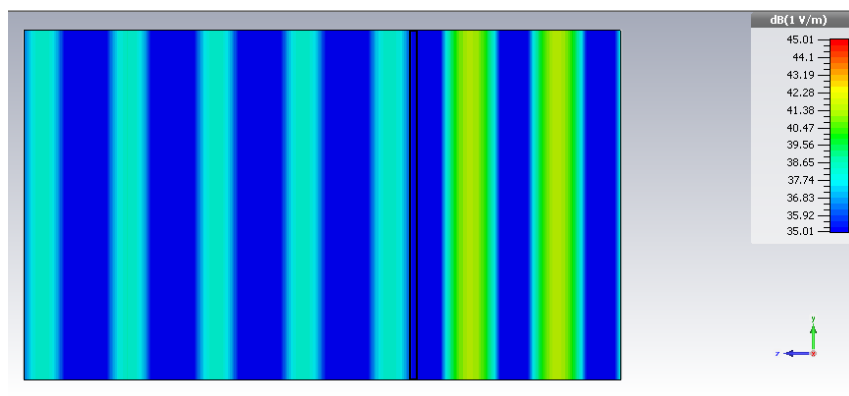
5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการจำลองแบบการดูดกลืนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

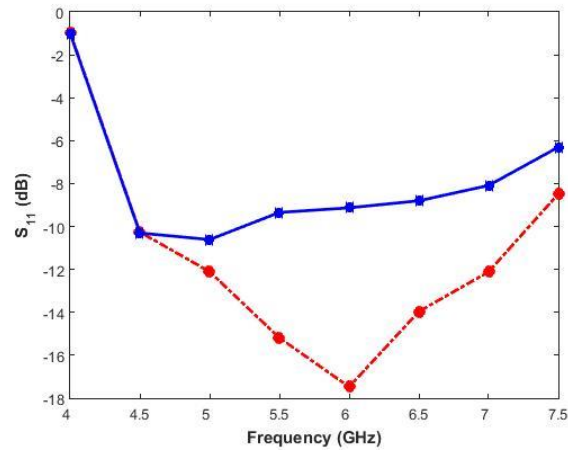
การจำลองแบบ คือการเลียนแบบการทำงาน และการวิเคราะห์ การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุ ดังนั้นผลการจำลองแบบการดูดกลืนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม CST STUDIO SUITE แสดงในภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



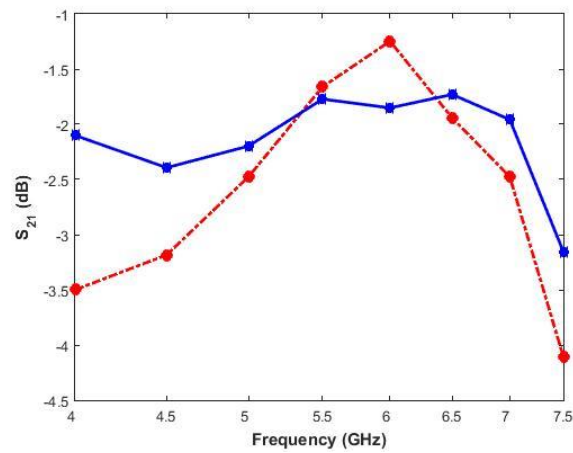
ภาพที่ 4 คลื่นเดินทางเข้าไปในเนื้อวัสดุและบางส่วนคลื่นสะท้อนกลับออกมา (MATLAB)



ภาพที่ 6 คลื่นเดินทางเข้าไปในเนื้อวัสดุและบางส่วนคลื่นสะท้อนกลับออกมา (CST STUDIO SUITE)



ภาพที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) เปรียบเทียบผลการจำลองแบบระหว่างโปรแกรม MATLAB (2D) กับ CST STUDIO SUITE (3D)



ภาพที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) เปรียบเทียบผลการจำลองแบบระหว่างโปรแกรม MATLAB (2D) กับ CST STUDIO SUITE (3D)

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเปรียบเทียบผลการจำลองแบบระหว่างโปรแกรม MATLAB กับ CST STUDIO SUITE ในช่วงความถี่ 4.0-7.5 GHz

Frequency (GHz)	S_{11} (dB)		S_{21} (dB)	
	MATLAB	CST STUDIO	MATLAB	CST STUDIO
4.0	-9.5826	-9.97426	-3.5	-2.10074
4.5	-10.2606	-10.3033	-3.1839	-2.39328
5.0	-12.1085	-10.6095	-2.4765	-2.19778
5.5	-15.1855	-9.34501	-1.6611	-1.77219
6.0	-17.4711	-9.13027	-1.2476	-1.8515
6.5	-13.9618	-8.80023	-1.9426	-1.73025
7.0	-12.11	-8.0883	-2.476	-1.95763
7.5	-8.4775	-6.30046	-4.1076	-3.15427

จากตารางที่ 5.1 คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} (dB) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} (dB) ที่ความถี่ 4.0 GHz ถึง 7.5 GHz ของการจำลองแบบสองมิติที่ได้จากโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับการจำลองแบบสามมิติโปรแกรม CST STUDIO SUITE

6. อภิปรายผล

ผลการการจำลองแบบสองมิติที่ได้จากโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับการจำลองแบบสามมิติโปรแกรม CST STUDIO SUITE จะแสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันเป็นอย่างมีนัยยะสำคัญอันเนื่องมาจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณในแบบจำลองสองมิติ ในขณะที่ผลการจำลองแบบจากโปรแกรม CST STUDIO SUITE เป็นแบบสามมิติ เนื่องจากการจำลองแบบสามมิติจะให้ค่าที่ถูกต้องมากกว่า งานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นจากการจำลองแบบในสองมิติก่อน และจะมีการพัฒนาเพื่อให้ได้แบบจำลองที่เป็นสามมิติ

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

- (1) สามารถพัฒนาการจำลองแบบเป็นสามมิติด้วยอาศัยต้นแบบสองมิติจากงานวิจัยนี้
- (2) สามารถพัฒนาการเขียนโดยใช้โปรแกรม MATLAB ไปเป็นการเขียนด้วยภาษาซี เพื่อลดค่าใช้จ่ายเรื่องค่าลิขสิทธิ์ของซอฟต์แวร์
- (3) งานวิจัยนี้สามารถไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างวัสดุที่ใช้สำหรับการป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

7.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

- (1) การศึกษาค้นหาว่าควรหาข้อมูลจากผู้ที่มีประสบการณ์ทางด้านการจำลองแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรง เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ถูกต้องในการออกแบบและการทำงานวิจัย
- (2) เพิ่มทักษะการทำงานและใช้เวลาในการเรียนรู้ด้านการเขียนโปรแกรม MATLAB และการใช้งานโปรแกรม CST STUDIO SUITE ให้มากยิ่งขึ้น
- (3) เลือกคุณสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมกับการจำลองแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

8. เอกสารอ้างอิง

- ประวิทย์ บัวพันธ์. (2556). *เรโซเนเตอร์แบบวงแหวนตัดสองรอบ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.M. Y. Koledintseva, J. Drewniak, R. Dubroff, K. Rozanov, and B. Archambeault. (2009) Modeling of Shielding
- มนตรี มาลาทอง. (2558). *การออกแบบและสร้างวัสดุเกราะป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศิริเมธี ศรีสวัสดิสกุล. (2553). *การจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในร่างกายมนุษย์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- C. Furse and G. Lazzi. (2016). *The Finite-Difference Time-Domain Method*. [ออนไลน์], ค้นเมื่อ 8 เมษายน 2559, จาก <http://www.ece.utah.edu/~ece6340/LECTURES/lecture%2014/FDTD.pdf>

- D. K. Cheng. (1983). *Field and wave electromagnetics*. 2nd Edition. Reading, USA, Addison-Wesley Publishing Company.
- J. B. Schneider. (2016). *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method*. [ออนไลน์]. ค้นเมื่อ 18 เมษายน 2559, จาก <https://eecs.wsu.edu/~schneidj/ufdtd/ufdtd.pdf>
- K. Pomoni, M.V. Sofianou, T. Georgakopoulos, N. Boukos, and C. Trapalis. (2013) Electrical conductivity studies of anatase TiO₂ with dominant highly reactive {001} facets. *Journal of Alloys and Compounds*, 548, pp. 194-200
- K. S. Yee. (1966) Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, Vol. AP-14, pp. 302-307.
- M. Y. Koledintseva, J. Drewniak, R. Dubroff, K. Rozanov, and B. Archambeault. (2009) Modeling of Shielding Composite Materials and Structures for Microwave Frequencies. *Progress In Electromagnetics Research*, 15, pp. 197-215.
- Optiwave (2559). *PBC Boundary Conditions (FDTD)* [ออนไลน์], ค้นเมื่อ 3 พฤษภาคม 2559, จาก: <http://optiwave.com/optifdtd-manuals/fdtd-pbc-boundary-conditions>
- S. G. Johnson. (2010). *Notes on Perfectly Matched Layers (PMLs)*. [ออนไลน์]. ค้นเมื่อ 28 เมษายน 2559, จาก <https://arxiv.org/abs/2108.05348>

การวิเคราะห์กระแสซีซีเอของแบตเตอรี่รถยนต์: กรณีศึกษาของโฟโมโคแบตเตอรี่
CCA ANALYSIS FOR AN AUTOMOTIVE BATTERY: A CASE STUDY OF
FOMOCO BATTERY

เผชิญ จันทร์สา

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: pachern.ja@spu.ac.th

อดุลย์ พัฒนภักดี

หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: adual.pa@spu.ac.th

ไวยยา ชะภูมล

หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: vitaya.ch@spulive.net

บทคัดย่อ

แบตเตอรี่รถยนต์ชนิดตะกั่วกรดเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ โดยค่ากระแสซีซีเอ (Cold Cranking Amp :CCA) คือคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของแบตเตอรี่รถยนต์ชนิดนี้ สำหรับแบตเตอรี่รถยนต์ขนาด 12 โวลต์ กระแสซีซีเอคือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถทำได้ในการจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าภายใน 30 วินาที โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ไม่ลดลงต่ำกว่า 7.2 โวลต์ ที่ศูนย์องศาฟาเรนไฮต์ ค่ากระแสซีซีเอเป็นตัวบ่งชี้ระดับความสามารถในการสตาร์ทรถยนต์ โดยทั่วไปค่ากระแสซีซีเอมีแนวโน้มลดลงตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่รถยนต์ บทความนี้ทำการศึกษาเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซีซีเอและอายุการใช้งานของโฟโมโคแบตเตอรี่ โดยทำการทดสอบและเก็บข้อมูลที่ศูนย์บริการรถยนต์แห่งหนึ่ง ในช่วงวันที่ 10 สิงหาคม 2563 ถึง 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 จำนวน 150 ข้อมูลโดยแบ่งเป็น แบตเตอรี่รหัส DIN60 65 ข้อมูล แบตเตอรี่รหัส DIN68 20 ข้อมูล และแบตเตอรี่รหัส DIN75 65 ข้อมูล จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าค่ากระแสซีซีเอ (CCA: แอมป์) มีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของแบตเตอรี่รถยนต์ (T: เดือน) ดังนี้

สำหรับแบตเตอรี่รหัส DIN60 มีค่าความสัมพันธ์เป็น $CCA = 810-12T$

สำหรับแบตเตอรี่รหัส DIN68 มีค่าความสัมพันธ์เป็น $CCA = 1001-18T$

สำหรับแบตเตอรี่รหัส DIN75 มีค่าความสัมพันธ์เป็น $CCA = 973-18T$

คำสำคัญ: แบตเตอรี่รถยนต์ แบบตะกั่วกรด โฟโมโคแบตเตอรี่ กระแสซีซีเอ อายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ABSTRACT

An automotive lead-acid battery is the primary source of electrical energy used in vehicles. The Cold Cranking Amp (CCA) is the most important property of an automotive battery. CCA is a rating used to define a battery's ability to start an engine. The rating refers to the number of amps a 12-volt battery can deliver at 0°F for 30 seconds while maintaining a voltage of at least 7.2 volts. Normally, CCA is decrease with the using life time of a battery. In this study, the relation between the CCA and the life time of the Fomoco Battery is investigated. The amount of DIN60 batts 65 data, DIN68 batts 20 data, DIN75 batts 65 data, had been collected from the car service center during August 10, 2020 –November 27, 2020. The result from the Least square regression analysis show that the relation between the Cold Cranking Amp (CCA: Amp.) and the life time of the Fomoco Battery (T: month) are list below:

For DIN60 Fomoco Batery, the relation is $CCA = 810-12T$.

For DIN68 Fomoco Batery, the relation is $CCA = 1001-18T$.

For DIN75 Fomoco Batery, the relation is $CCA = 973-18T$.

Keywords: Lead-Acid Battery, Fomoco Battery, Cold Cranking Amp (CCA), Life time of Battery

1. บทนำ

แบตเตอรี่รถยนต์ชนิดตะกั่ว-กรดเป็นอุปกรณ์จัดเก็บไฟฟ้าที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีที่ผันกลับได้ในการจัดเก็บพลังงาน เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟเข้าไปใหม่ได้ แบตเตอรี่รถยนต์มีหน้าที่หลักที่สำคัญที่สุดสำหรับการสตาร์ทรถยนต์ในตอนเริ่มต้น โดยค่ากระแสซีเอ (Cold Cranking Amp (CCA) คือ คุณสมบัติที่จำเป็นที่สุดสำหรับการสตาร์ทรถยนต์ กระแสซีเอเป็นความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดสำหรับสตาร์ทเครื่องยนต์ทั้งนี้บริษัทผู้ผลิตส่วนใหญ่ไม่ได้มีการระบุค่ากระแสซีเอที่แท้จริง กระแสซีเอมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสถานะการประจุของแบตเตอรี่และการเสื่อมของเซลล์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถยนต์ โดยทั่วไปกระแสซีเอมีค่าลดลงตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ค่าของกระแสซีเอถือเป็นดัชนีชี้วัดของแบตเตอรี่รถยนต์ ที่บริษัทผู้ผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่ ค่าของกระแสซีเอสำหรับแบตเตอรี่ใหม่จะขึ้นอยู่กับค่าความจุ (แอมป์-ชั่วโมง: Amp Hours) ของแบตเตอรี่รถยนต์ (วิทวัส ศรีสวัสดิ์กุลและคณะ, 2562) ทั้งนี้ค่าของกระแสซีเอจะมีค่าลดลงเมื่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่รถยนต์มากขึ้นตามสภาวะการเสื่อมสภาพของเซลล์แบตเตอรี่

2. วัตถุประสงค์

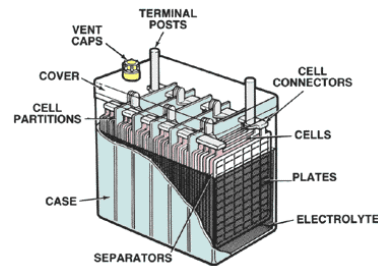
- (1) เพื่อตรวจวัดค่ากระแสซีเอของโฟโมโคแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์ ฟอर्ड เรนเจอร์ และ ฟอर्ड เอเวอเรสต์
- (2) เพื่อประมาณค่าความสัมพันธ์ของค่ากระแสซีเอกับอายุการใช้งานของแบตเตอรี่รถยนต์

3. ทฤษฎีและข้อมูลพื้นฐาน

3.1 โฟโมโคแบตเตอรี่ (Fomoco Battery)

โฟโมโคแบตเตอรี่เป็นแบตเตอรี่รถยนต์ชนิดตะกั่ว-กรด ที่ติดตั้งสำหรับรถยนต์ใหม่ของรถยนต์ฟอร์ด จากโรงงานผู้ผลิตโดยตรง (FoMoCo ย่อมาจาก Ford Motor Company) โดยส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่รถยนต์ชนิดตะกั่ว-กรด ประกอบไปด้วย ตัวเรือนแบตเตอรี่ (CASE) ที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนและแข็งแรง ภายในบรรจุด้วยเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 6 เซลล์ (CELLS) ต่ออนุกรมกัน โดยแต่ละเซลล์จะประกอบไปด้วย แผ่นธาตุบวกที่มีส่วนประกอบเป็นตะกั่วเปอร์ออกไซด์ และแผ่นธาตุลบที่มีส่วนประกอบเป็นตะกั่วบริสุทธิ์หรือตะกั่วพรุน เซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมดถูกบรรจุในตัวเรือนแบตเตอรี่ที่มีสารละลาย (ELECTROLITE) อยู่ภายใน และปิดด้วยฝาครอบ (COVER) สำหรับส่วนประกอบที่อยู่เหนือฝาครอบจะประกอบไปด้วย ขั้วบวกและขั้วลบ (TERMINAL POSTS) ที่ทำจากแท่งตะกั่วกลม โดยทั่วไปขั้วบวกจะมีขนาดที่โตกว่าขั้วลบ

สำหรับแบตเตอรี่รถยนต์ ชนิดตะกั่ว-กรด จะมีคุณสมบัติสำคัญที่สุดที่จำเป็นสำหรับการสตาร์ทรถยนต์ คือค่ากระแสซีซีเอ (Cold Cranking Amp: CCA) โดยที่กระแสซีซีเอ คือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ สามารถจ่ายออกได้ ภายในช่วงเวลา 30 วินาที โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะต้องไม่ลดลงต่ำกว่า 7.2 โวลต์ หรือ 1.2 โวลต์ต่อเซลล์ ณ อุณหภูมิศูนย์องศาฟาเรนไฮต์ (James D. Halderman, 2012) ทั้งนี้ ค่ากระแสซีซีเอของแบตเตอรี่รถยนต์ ชนิดตะกั่ว-กรด มีแนวโน้มลดลงตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของ โฟโมโคแบตเตอรี่และส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่รถยนต์

(ที่มา: <https://jrsupplyshop.wixsite.com/battery/fomoco> และ

<http://www.autoshop101.com/trainmodules/batteries/106.html>)

3.2 ข้อมูลพื้นฐานของเครื่องยนต์และรถยนต์ที่ใช้ทดสอบ

บริษัทฟอร์ดเป็นหนึ่งบริษัทรถยนต์ชั้นนำที่ได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งานรถยนต์ทั่วโลก สำหรับประเทศไทยบริษัทฟอร์ดมีโรงงานการผลิตจำนวน 2 โรงงานคือโรงงานฟอร์ด ไทยแลนด์ แมนูแฟคเจอร์ริง (เอฟทีเอ็ม) สำหรับผลิตรถยนต์นั่งขนาดเล็ก (ฟอร์ด โฟกัส เฟียสต้า เอกโคสเปอร์ต) และโรงงานออดี อัลลายแอนซ์ ประเทศไทย (เอเอที) เพื่อผลิตรถกระบะฟอร์ด เรนเจอร์ และรถเอสยูวี ฟอร์ด เอเวอเรสต์ ซึ่งเป็นรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเก็บข้อมูลในครั้งนี้ สำหรับรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ 2.2L XLT จะมีกำลังสูงสุด 160 แรงม้าที่อัตราเร็ว 3200 รอบต่อนาที สำหรับรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ 2.0LTurbo จะมีกำลังสูงสุด 180 แรงม้าที่อัตราเร็ว 3500 รอบต่อนาที และสำหรับรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ 2.0L Bi-Turbo จะมีกำลังสูงสุด 213 แรงม้าที่อัตราเร็ว 3750 รอบต่อนาที



รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของรถกระบะฟอร์ด เรนเจอร์ และรถเอสยูวี ฟอร์ด เอเวอเรสต์

3.3 การประมาณค่าความสัมพันธ์แบบ Least Square Regression

การประมาณค่าความสัมพันธ์แบบ Least Square Regression เป็นรูปแบบการหาความสัมพันธ์ที่นิยมใช้วิธีหนึ่งเป็นการประมาณค่าสมการที่ไม่จำเป็นต้องผ่านข้อมูลทุกจุด เพียงแต่กำลังสองของค่าความผิดพลาด (error) ระหว่างค่าจริงกับค่าที่ประมาณขึ้นต้องมีผลรวมน้อยที่สุด โดยการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม (Figliola & Beasley, 2015) ถ้ากำหนดให้ y แทนค่าของข้อมูลแท้จริง และ y_c แทนค่าของข้อมูลจากการประมาณค่าและ D แทนค่าของกำลังสองของค่าความผิดพลาด

$$y_c = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad \dots(1)$$

$$D = \sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m))^2 \quad \dots(2)$$

การประมาณค่าโดยวิธี Least Square Regression ต้องทำให้ D มีค่าน้อยที่สุดนั่นคือ

$$dD = \frac{\partial D}{\partial a_0} da_0 + \frac{\partial D}{\partial a_1} da_1 + \frac{\partial D}{\partial a_2} da_2 + \dots + \frac{\partial D}{\partial a_m} da_m = 0 \quad \dots(3)$$

สำหรับการประมาณค่าเป็นสมการเส้นตรง $y_c = a_0 + a_1x$ จากสมการที่ (3) เราได้

$$\frac{\partial D}{\partial a_0} = \frac{\partial}{\partial a_0} \left(\sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i))^2 \right) = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i)) = 0 \quad \dots(4)$$

$$\frac{\partial D}{\partial a_1} = \frac{\partial}{\partial a_1} \left(\sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i))^2 \right) = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i)) x_i = 0 \quad \dots(5)$$

จากสมการที่ (4) และ (5) สามารถหาระบบสมการ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ ได้จากความสัมพันธ์

$$a_0N + a_1 \sum x_i = \sum y_i \quad \dots(6)$$

$$a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \quad \dots(7)$$

3.4 เครื่องมือวิเคราะห์แบตเตอรี่

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดและวิเคราะห์โฟโมโคแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องวิเคราะห์แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ ยี่ห้อ Midtronics รุ่น MDX-300 ซึ่งมีเครื่องพิมพ์ในตัว โดยสามารถตรวจวัดและวิเคราะห์ค่ากระแสซีซีเอของแบตเตอรี่ได้ตั้งแต่ 100-1400 แอมป์ และรองรับมาตรฐานการทดสอบแบตเตอรี่ได้หลากหลายมาตรฐาน ได้แก่ CCA CA MCA SAE DIN EN IEC และ JIS

4. วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 วิธีการทดสอบเก็บข้อมูล

4.1.1 ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์วิเคราะห์แบตเตอรี่เข้ากับแบตเตอรี่ของรถยนต์ โดยต่อสายสีแดงเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ และต่อสายสีดำเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่



รูปที่ 3 แสดงการเชื่อมต่อขั้วแบตเตอรี่กับเครื่องมือวัด

4.1.2 ทำการเลือกแรงดันของแบตเตอรี่ที่จะทำการทดสอบ (โดยเลือกขนาดแรงดันของแบตเตอรี่เป็นขนาด 12V) และทำการเลือกการทดสอบแบตเตอรี่แบบไม่ติดเครื่องยนต์



รูปที่ 4 แสดงการระบุขนาดและเลือกรูปแบบการทดสอบแบตเตอรี่

4.1.3 ระบุประเภทของแบตเตอรี่ ซึ่งประเภทที่ทำการทดสอบเป็นแบบปกติ และระบุรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นค่ามาตรฐาน CCA



รูปที่ 5 แสดงการเลือกประเภทของแบตเตอรี่และรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูล

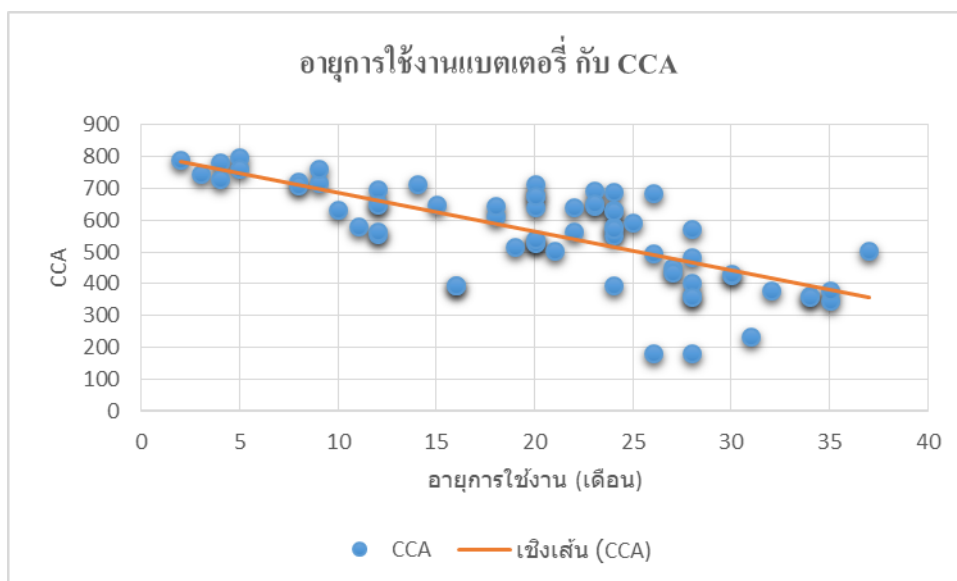
4.1.4 รอเครื่องมือทำการทดสอบและประมวลผลข้อมูล จนกว่าเครื่องจะแสดงผลการทดสอบจึงทำการบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 6 แสดงการทดสอบและประมวลผลข้อมูลของเครื่องมือวัด

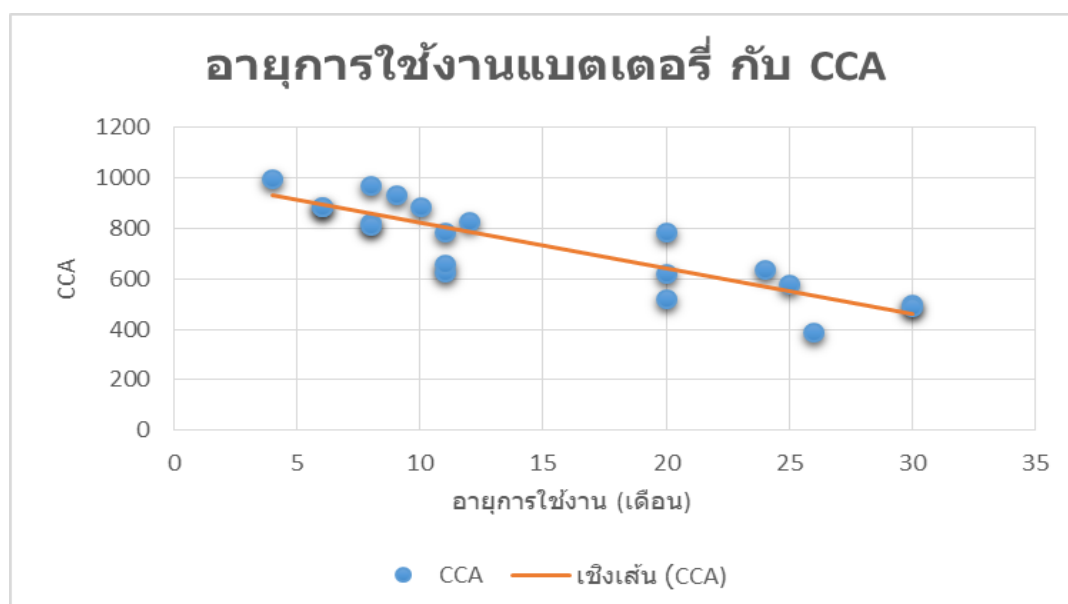
4.2 ผลการทดสอบเก็บข้อมูล

จากการเก็บข้อมูลที่ศูนย์บริการรถยนต์พลปิยะ อู่ชยุธา จำกัด ในช่วงวันที่ 10 สิงหาคม 2563 ถึง 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 โดยทำการเก็บข้อมูลค่ากระแสซีซีเอ ของโฟโมโคแบตเตอรี่ จำนวน 150 ข้อมูลจากรถกระบะฟอร์ด เรนเจอร์ จำนวน 113 คัน และรถเอสยูวี ฟอร์ด เอเวอเรสต์ จำนวน 37 คัน เมื่อจำแนกตามรุ่นของโฟโมโคแบตเตอรี่พบว่า เป็น โฟโมโคแบตเตอรี่รหัส DIN60 จำนวน 65 ข้อมูล โฟโมโคแบตเตอรี่รหัส DIN68 จำนวน 20 ข้อมูล และ โฟโมโคแบตเตอรี่รหัส DIN75 จำนวน 65 ข้อมูล โดยที่ค่ากระแสซีซีเอของ โฟโมโคแบตเตอรี่แต่ละรหัสแสดงดังกราฟในรูปที่ 7-9



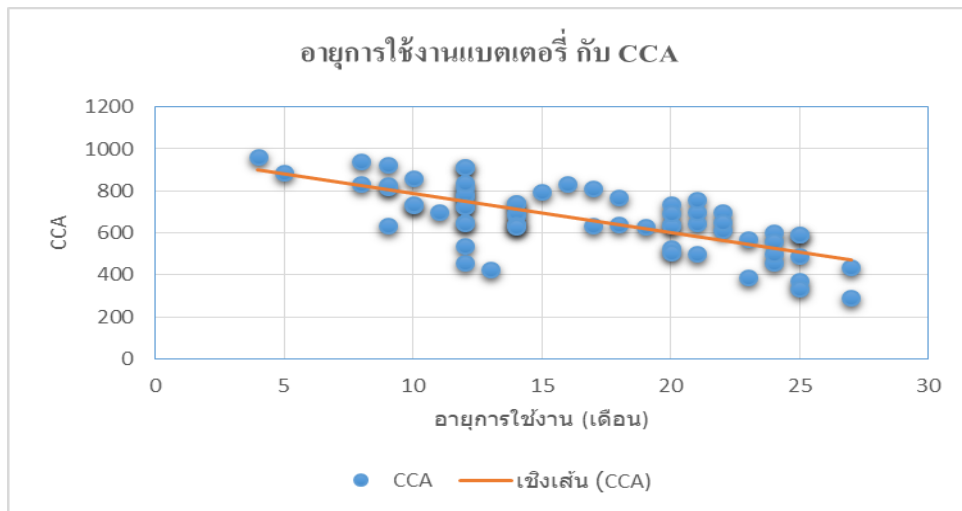
รูปที่ 7 กราฟแสดงค่ากระแสซีอีกับอายุการใช้งานของโฟโมโคแบตเตอรี่ รหัส DIN60

พิจารณาจากรูปที่ 7 เป็นข้อมูลของโฟโมโคแบตเตอรี่ รหัส DIN60 จำนวน 65 ข้อมูลมีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ระหว่าง 2-37 เดือน มีค่ากระแสซีอีสูงสุดอยู่ที่ 800 แอมป์ มีค่าเฉลี่ยของค่ากระแสซีอีอยู่ที่ 561.5 แอมป์ และเมื่อทำการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซีอี (CCA: แอมป์) กับอายุการใช้งาน (T: เดือน) ของโฟโมโคแบตเตอรี่รหัส DIN60 โดยใช้สมการที่ 6 และ 7 จะได้ความสัมพันธ์เป็น $CCA = 810 - 12T$ ซึ่งหมายถึงค่ากระแสซีอี (CCA: แอมป์) ก่อนใช้งานเท่ากับ 810 แอมป์ และจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการใช้งานในอัตรา 12 แอมป์ต่อเดือน



รูปที่ 8 กราฟแสดงค่ากระแสซีอีกับอายุการใช้งานของโฟโมโคแบตเตอรี่ รหัส DIN68

พิจารณาจากรูปที่ 8 เป็นข้อมูลของโฟมโโคแบตเตอรี่ รหัส DIN68 จำนวน 20 ข้อมูลมีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ระหว่าง 4-30 เดือน มีค่ากระแสซีไอสูงสุดอยู่ที่ 995 แอมป์ มีค่าเฉลี่ยของค่ากระแสซีไออยู่ที่ 730.7 แอมป์ และเมื่อทำการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซีไอ (CCA: แอมป์) กับอายุการใช้งาน (T: เดือน) ของโฟมโโคแบตเตอรี่รหัส DIN68 โดยใช้สมการที่ 6 และ 7 จะได้ความสัมพันธ์เป็น $CCA = 1001 - 18T$ ซึ่งหมายถึงค่ากระแสซีไอ (CCA: แอมป์) ก่อนใช้งานเท่ากับ 1001 แอมป์ และจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการใช้งานในอัตรา 18 แอมป์ต่อเดือน



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่ากระแสซีไอกับอายุการใช้งานของโฟมโโคแบตเตอรี่ รหัส DIN75

พิจารณาจากรูปที่ 9 เป็นข้อมูลของโฟมโโคแบตเตอรี่ รหัส DIN75 จำนวน 65 ข้อมูลมีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ระหว่าง 4-27 เดือน มีค่ากระแสซีไอสูงสุดอยู่ที่ 963 แอมป์ มีค่าเฉลี่ยของค่ากระแสซีไออยู่ที่ 668.9 แอมป์ และเมื่อทำการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซีไอ (CCA: แอมป์) กับอายุการใช้งาน (T: เดือน) ของโฟมโโคแบตเตอรี่รหัส DIN75 โดยใช้สมการที่ 6 และ 7 จะได้ความสัมพันธ์เป็น $CCA = 973 - 18T$ ซึ่งหมายถึงค่ากระแสซีไอ (CCA: แอมป์) ก่อนใช้งานเท่ากับ 973 แอมป์ และจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการใช้งานในอัตรา 18 แอมป์ต่อเดือน

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการเก็บข้อมูลของโฟมโโคแบตเตอรี่ จำนวน 150 ข้อมูล จากกรรกระเบาะฟอร์ด เรนเจอร์ จำนวน 113 คัน และรถเอสยูวี ฟอร์ด เอเวอเรสต์ จำนวน 37 คัน เมื่อจำแนกตามรุ่นของโฟมโโคแบตเตอรี่พบว่า เป็นโฟมโโคแบตเตอรี่รหัส DIN60 จำนวน 65 ข้อมูล โฟมโโคแบตเตอรี่รหัส DIN68 จำนวน 20 ข้อมูล และโฟมโโคแบตเตอรี่รหัส DIN75 จำนวน 65 ข้อมูล เมื่อทำการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซีไอ (CCA: แอมป์) กับอายุการใช้งาน (T: เดือน) ของโฟมโโคแบตเตอรี่ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

สำหรับแบตเตอรี่รหัส DIN60 มีค่าความสัมพันธ์เป็น $CCA = 810 - 12T$

สำหรับแบตเตอรี่รหัส DIN68 มีค่าความสัมพันธ์เป็น $CCA = 1001 - 18T$

สำหรับแบตเตอรี่รหัส DIN75 มีค่าความสัมพันธ์เป็น $CCA = 973 - 18T$

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซีซีเอ (CCA: แอมป์) กับอายุการใช้งาน (T: เดือน) ทำให้เราสามารถประมาณการหาอายุการใช้งานของโฟโมโคแบตเตอรี่ได้ โดยใช้ค่ากระแสซีซีเอ (CCA: แอมป์) เฉลี่ยต่ำสุดที่ศูนย์บริการซ่อมรถยนต์ใช้เป็นเกณฑ์ที่สิบสามเปอร์เซ็นต์ของความจุระบุบอกสูบ ($0.13 \times 2200 = 286$ แอมป์) ทั้งนี้เราจะได้อายุการใช้งานของโฟโมโคแบตเตอรี่รหัส DIN 60 อยู่ที่ 43.6 เดือน, อายุการใช้งานของโฟโมโคแบตเตอรี่รหัส DIN 68 อยู่ที่ 39.7 เดือน, และอายุการใช้งานของโฟโมโคแบตเตอรี่รหัส DIN 75 อยู่ที่ 38.2 เดือน

สำหรับการวิเคราะห์ค่ากระแสซีซีเอในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ค่ากระแสซีซีเอของโฟโมโคแบตเตอรี่ที่ติดตั้งมากับรถยนต์ใหม่โดยผู้ผลิต (OEM: Original Equipment Manufacturing) ซึ่งผู้ใช้งานจำเป็นต้องใช้ตามการตัดสินใจและการเลือกของผู้ผลิตรถยนต์ อย่างไรก็ตามผู้ใช้งานสามารถเลือกซื้อหรือเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับทดแทนแบตเตอรี่เดิม (REM: Replacement Equipment Manufacturing) เมื่อครบอายุการใช้งาน การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซีซีเอกับอายุการใช้งานแบตเตอรี่รถยนต์แบรนด์อื่นๆ ก็จะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการเลือกซื้อหรือเปลี่ยนแบตเตอรี่ของผู้ใช้รถยนต์

6. เอกสารอ้างอิง

วิทวัส ศรีสวัสดิ์กุลและคณะ. (2562). การศึกษาค่ากระแสแรงกึ่งเย็นของแบตเตอรี่รถยนต์ชนิดตะกั่วกรด,

หนังสือประมวลบทความการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 14 ประจำปี 2562, วันที่ 19 ธันวาคม 2562 ณ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2039-2041

Richard S. Figliola & Donald E. Beasley. (2015). *Theory and Design for Mechanical Measurement*, (6th ed.) John Wiley and Sons.

James D. Halderman. (2012). *Automotive Technology; Principles, Diagnosis, and Service*, (4th ed.) Prentice Hall.

กำลังแบกทานของฐานรากตื้นจากข้อมูลทดสอบ SPT ในจังหวัดสกลนคร
BEARING CAPACITY OF FOOTINGS BASED ON SPT TESTS FOR
SAKON NAKHON PROVINCE

ชัชวาลย์ พูนลาภพานิช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: chatshawal.po@spu.ac.th

ดร.คมวุธ วิสวไพศาล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: komwut.wi@spu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้ (q_{all}) ของฐานรากแผ่จัตุรัสขนาด 1.5 เมตร ระดับความลึก 1.5 m ได้ผิวดิน จากข้อมูลผลสำรวจชั้นดินด้วยเครื่องมือ SPT ในเขตจังหวัดสกลนครจำนวน 67 หลุมเจาะ และนำหลักวิชาสถิติวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล q_{all} รวมทั้งแนะนำค่าที่ปลอดภัยเพื่อใช้ออกแบบ งานวิจัยพิจารณาค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้ทั้งจากเกณฑ์ความสามารถของดินที่รองรับน้ำหนักฐานรากได้โดยไม่พังทลายเนื่องจากแรงเฉือน และจากเกณฑ์จำกัดค่าการทรุดตัวของฐานรากที่ 25 มิลลิเมตร ผลวิจัยได้ค่า q_{all} ที่มีช่วงค่าระหว่าง 3.71 ถึง 68.56 t/m² ข้อมูลกระจายเป็น โค้งแจกแจงความถี่แบบเบ้ขวา skewness = 1.21 มีค่าฐานนิยมค่ามัธยฐาน และค่าเฉลี่ย เท่ากับ 6.34 17.10 และ 21.36 ตามลำดับ งานวิจัยนี้แนะนำค่ากำลังแบกทานที่ปลอดภัยเพื่อใช้ออกแบบเท่ากับ 6.34 t/m²

คำสำคัญ: กำลังแบกทานของดิน การตอกทะลวงมาตรฐาน ฐานรากตื้น

ABSTRACT

In this research, allowable bearing capacities (q_{all}) of 1.5 m wide square footings resting at 1.5 m depth were determined using 67 borehole data from the Standard Penetration Test (SPT) conducted in Sakon Nakhon Province. The statistical analysis was carried out for frequency distribution of data. The conservative allowable bearing capacity value was then proposed. Each allowable bearing capacity value was considered based on both shear failure and 25-mm permissible settlement criteria. The positively skewed frequency distribution was found from q_{all} data with a skewness value of 1.21 where the mode, the median, and the mean were 6.34, 17.10, and 21.36 t/m², respectively. This research also recommended the safe allowable bearing capacity of 6.34 t/m² for design purposes.

Keywords: Soil Bearing Capacity, Standard Penetration Test, Shallow Foundation

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

จังหวัดสกลนครตั้งอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ห่างจากกรุงเทพมหานคร ประมาณ 647 กิโลเมตรทางรถยนต์ ภูมิประเทศเป็นที่ราบสูงเหนือระดับน้ำทะเล 172 เมตร ล้อมรอบด้วยภูเขาและป่าไม้ มีพื้นที่ประมาณ 9,605.76 ตารางกิโลเมตร แบ่งเขตการปกครองออกเป็น 18 อำเภอ ระบบเศรษฐกิจของจังหวัดทั้งภาคเกษตรและภาคนอกเกษตร มีมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวม (GDP) มูลค่า 49,605 ล้านบาท (ข้อมูลปี พ.ศ. 2557) ปริมาณงานก่อสร้างที่เพิ่มตามความเติบโตของเศรษฐกิจจังหวัด ทำให้มีงานเจาะสำรวจและทดสอบคุณสมบัติชั้นดินเพื่อนำข้อมูลใช้ในงานก่อสร้างจำนวนมาก

Standard Penetration Test (SPT) เป็นชุดเครื่องมือทดสอบและเจาะสำรวจชั้นดินในสนามที่วิศวกรรมไทยและทั่วโลกนิยมใช้ ข้อมูลการจัดเรียงชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้นำไปใช้ในงานวิเคราะห์ออกแบบฐานราก งานวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินและอื่นๆ ประมาณ 80-90% ของงานวิศวกรรมปฐพีทั้งหมด การทดสอบ SPT มีข้อได้เปรียบหลายด้าน [8] มีส่วนประกอบของอุปกรณ์และวิธีการทดสอบที่เรียบง่าย ทดสอบได้ในชั้นดินทุกประเภท รวมทั้งความรู้ประสบการณ์ในด้านการใช้งานและงานวิจัยในระยะเวลากว่า 80 ปี ทำให้มีข้อมูลมีสหสัมพันธ์ระหว่างค่าทดสอบ (N N_{60} หรือ $(N_1)_{60}$) กับพารามิเตอร์หรือคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจำนวนมาก เช่น Allowable bearing capacity, Shear strength, Relative Density, Settlement, และ Compressibility

งานวิจัยนี้ ใช้ฐานข้อมูลผลสำรวจและทดสอบคุณสมบัติชั้นดินด้วยเครื่องมือ SPT ที่ดำเนินการสำรวจในเขตจังหวัดสกลนคร มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาประเมินค่ากำลังแบกทานที่ยอมรับ (q_{all}) ของชั้นดิน โดยเลือกฐานรากแผ่จตุรัสขนาด 1.5 เมตร ระดับวางฐานรากที่ความลึก 1.5 m จากระดับผิวดินเป็นตัวอย่างวิจัย ผู้วิจัยพิจารณาค่ากำลังแบกทานที่ยอมรับ ทั้งจากเกณฑ์ความสามารถของดินที่รองรับน้ำหนักฐานรากได้โดยไม่พังทลายเนื่องจากแรงเฉือน และจากเกณฑ์จำกัดค่าการทรุดตัวของฐานรากที่ 25 มิลลิเมตร แล้วหาค่าสถิติที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นค่าแนะนำหรือเป็นค่าเบื้องต้นในการออกแบบ เหมาะสำหรับงานออกแบบก่อสร้างในโครงการขนาดเล็ก

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

(1) เพื่อคำนวณหาค่ากำลังแบกทานที่ยอมรับของฐานรากแผ่ จากฐานข้อมูลเจาะสำรวจดินด้วยเครื่องมือ SPT ในเขตจังหวัดสกลนคร

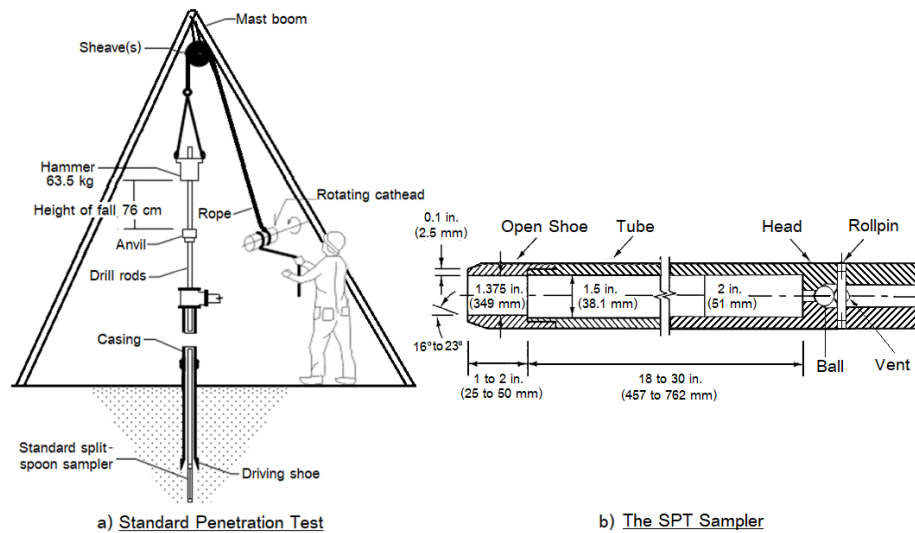
(2) แนะนำค่ากำลังแบกทานที่ยอมรับของฐานรากแผ่ที่เหมาะสมตามหลักวิชาสถิติ สำหรับใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในงานออกแบบก่อสร้างฐานรากของอาคารในโครงการขนาดเล็ก

3. ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและวิธีการทดสอบ

Standard Penetration Test (SPT) เป็นการทดสอบกำลังต้านทานชั้นดินด้วยการหยั่งตอกไปพร้อมกับการเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ ในรูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์สำคัญในชุดทดสอบประกอบด้วย 1. กระบอกผ่าซีกมาตรฐาน (Standard split spoon sampler) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอก 35 mm และ 50 mm 2. ท่อเหล็กกันดิน (Casing) เส้นผ่าศูนย์กลาง 4" 3. ชุดก้านเจาะ (Drill rod) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75" 4. ตีตอก (Hammer) น้ำหนัก 63.5 กิโลกรัม 5. แท่นรองตอก (Anvil) 6. โครงสามขา (Mast boom) 7. รอกเหล็ก (Sheave) ขนาดร่อง 1" เส้นผ่าศูนย์กลาง 6" 8. เชือกมะนิลา (Rope) เส้นผ่าศูนย์กลาง 1" ภายหลังการติดตั้งโครงสามขาและประกอบชุดทดสอบ ตอกท่อเหล็กกันดิน ณ ตำแหน่งหลุมเจาะ เจาะดินจนก้นหลุมถึงระดับทดสอบ วิธีตอก

ทดสอบใช้รอกยกตุ้มตอกจนระยะยกเหนือแท่นรองตอก 76 cm ปล่อยเชือกให้ตุ้มตอกตกกระแทกแท่นรองตอก เกิดแรงกระแทกกระบอกผ่าซีก นับจำนวนครั้งที่ตอกจมไป 15 cm จำนวน 3 ชุดติดต่อกัน โดยถือผลรวมจำนวน ครั้งใน 2 ครั้งสุดท้ายเป็นค่า N มีหน่วยเป็นครั้งต่อฟุต (blows/ft) บันทึกผลตอกทดสอบพร้อมเก็บตัวอย่างดินทุก ระยะห่างความลึก 1.5 m



รูปที่ 1 เครื่องมือ Standard Penetration Test (SPT)

3.2 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้วิจัย

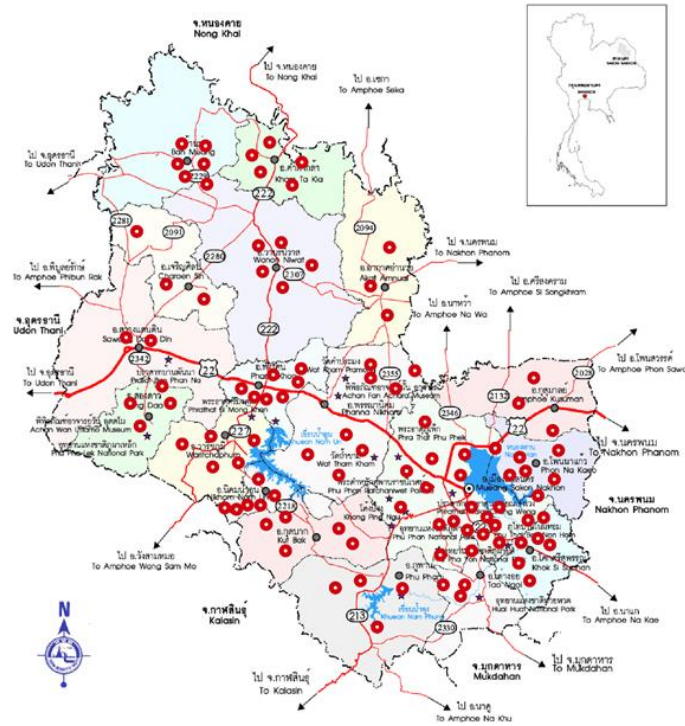
ข้อมูลวิจัยรวบรวมจากข้อมูลการสำรวจชั้นดินจำนวน 67 หลุมเจาะ ในอาณาเขตพื้นที่จังหวัดสกลนคร แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้งหลุมเจาะสำรวจโดยสังเขป กระจายไปในพื้นที่ 12 อำเภอ แสดงไว้ในรูปที่ 2 หลุมเจาะสำรวจอยู่ในเขตอำเภอเมืองมากที่สุดจำนวน 30 ข้อมูล พื้นที่ก่อสร้างแต่ละแห่งได้ดำเนินการเจาะสำรวจชั้นดิน โดยวิธีการทดสอบ SPT จนถึงระดับความลึกระหว่าง 6.5-11 m จากระดับผิวดิน บันทึกค่าผลทดสอบการตอก หยั่งกำลังชั้นดิน ระดับน้ำใต้ดิน พร้อมเก็บตัวอย่างดินแปรสภาพ (disturbed samples) ด้วยกระบอกเก็บตัวอย่างผ่าซีกทุกระยะความลึก 1.5 เมตรเพื่อใช้จำแนกประเภทดิน ข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินแต่ละหลุมเจาะแสดงตัวอย่างไว้ดังในตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์ตัวอย่างแปรสภาพจากกระบอกผ่าซีกในห้องปฏิบัติการพบว่าจำแนกกลุ่มดินได้เป็น 1. ดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีต่ำ (CL) และ 2.ทรายปนดินตะกอน (SM) 3.ทรายปนดินเหนียว (SC) โดยสำรวจพบจำนวนข้อมูลชั้นดิน CL จำนวนมากที่สุด และจำนวนข้อมูลชั้นดิน SM และ SC ลดลงตามลำดับ

3.3 การปรับแก้ข้อมูลผลทดสอบค่า N

ก่อนนำค่า N ของการทดสอบ SPT ไปใช้ประเมินคุณสมบัติวิศวกรรมของชั้นดินด้วยสมการสหสัมพันธ์ใดๆ พบว่าค่า N ที่ทดสอบได้ในภาคสนามโดยตรงยังมีความผิดพลาด ต้องปรับแก้ค่าจากอิทธิพลของ 4 ปัจจัยที่มาจาสภาพเครื่องมือทดสอบ ดังแสดงค่าไว้ในตารางที่ 3 การปรับแก้คำนวณได้ดังสมการ

$$N_{60} = C_E C_R C_S C_B N \quad (1)$$

โดย N คือ ค่าผลทดสอบ SPT ที่บันทึกได้ในภาคสนาม หน่วย blows/ft. C_E คือค่าปรับแก้ประสิทธิภาพพลังงานตก -



รูปที่ 1 แผนที่ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจชั้นดินในเขตพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

ตารางที่ 1 ตัวอย่างตารางข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินของหลุมเจาะ S-23

SUMMARY OF TEST RESULTS												
LOCATIONอำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย						COORDINATE:		N:1907000.00 E:409600.00				
Groundwater Depth: -6.000 m.												
Bore hole	Depth.(m.)		USCS	Wn	γ_t	Atterberg Limits		Gradation % Passing				N _{SP}
No.	From	to	Soil	%	t/m ³	LL	PI	# 3/8	# 4	# 40	# 200	Field
			group			(%)	(%)					(blows/ft.)
S-23	0.00	0.50	CL									
	1.50	1.95		25.48	2.05	26.59	11.78	99.95	95.32	95.32	92.15	31
	3.00	3.50		26.95	1.94	22.15	9.65	98.45	96.30	90.17	85.46	25
	4.50	4.95		22.48	2.11	24.65	13.26	99.97	96.32	96.32	92.07	48
	6.00	6.45		20.78	2.08	23.16	10.78	99.95	95.85	95.85	90.47	47
	7.50	7.95		19.65	2.26	24.56	13.59	99.98	99.56	96.32	92.15	53

กระทบ (Energy) มายังค่า 60% ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพที่นิยมใช้เข้าไปสร้างสมการสหสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ดินต่างๆ C_R คือค่าปรับแก้เนื่องจากความยาวก้านเจาะ (Rod Length) C_S ค่าปรับแก้เนื่องจากการปรับแต่งกระบอกตัวอย่างไปจากสภาพมาตรฐาน C_B ค่าปรับแก้เนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลุมเจาะ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าปรับแก้ C_E เท่ากับ 0.75 กรณีใช้ตุ้มตอก Donut hammer [14] ค่า C_S และ C_B เลือกใช้ค่าเท่ากับ 1 ส่วนค่า C_R ใช้ค่าตามตารางที่ 2 กรณีมีความจำเป็นต้องใช้ค่า $(N_1)_{60}$ ซึ่งเป็นค่า N_{60} ที่ปรับแก้อิทธิพลน้ำหนักกดทับประสิทธิผลชั้นดิน

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60} = \sqrt{\frac{10.94}{\sigma'_v}} N_{60} \quad (2)$$

C_N คือ ค่าปรับแก้อิทธิพลของน้ำหนักกดทับประสิทธิผลชั้นดิน (Overburden effective stress correction) งานวิจัยนี้ใช้ค่าปรับแก้ที่เสนอโดย [4] โดย σ'_v คือหน่วยแรงกดทับประสิทธิผลของชั้นดิน หน่วย t/m^2

ตารางที่ 2 ตัวคูณปรับแก้ค่า N ของการทดสอบ SPT (ปรับปรุงจาก [10])

C_S	For samplers with an indented space for interior liners, but with liners omitted during sampling. $C_S = 1 + \frac{(N_1)_{60}}{100}$ With limits as $1.10 \leq C_S \leq 1.30$	C_R	Rod Length Correction Factors (See Figure below).								
C_B	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Borehole diameter</th> <th>Correction (C_B)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>65 to 115 mm</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>150 mm</td> <td>1.05</td> </tr> <tr> <td>200 mm</td> <td>1.15</td> </tr> </tbody> </table>	Borehole diameter	Correction (C_B)	65 to 115 mm	1.00	150 mm	1.05	200 mm	1.15		
Borehole diameter	Correction (C_B)										
65 to 115 mm	1.00										
150 mm	1.05										
200 mm	1.15										
C_E	$C_E = \frac{ER}{60\%}$ where ER (efficiency ratio) is the fraction or percentage percentage of the theoretical SPT impact hammer energy actually transmitted to the sampler, expressed as % The best approach is to directly measure the impact energy transmitted with each blow. When available, direct energy measurements were employed.										

3.4 การแปลผลค่ากำลังเฉือนของชั้นดิน

ชั้นดิน SM วิธีแปลผลค่าทดสอบ SPT เป็นค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') คำนวณจากสมการสหสัมพันธ์แบบ Empirical กับค่า $(N_1)_{60}$ ของการทดสอบ SPT ที่มีผู้นำเสนอไว้แตกต่างกันหลายสมการ โดยงานวิจัยนี้เลือกสมการสหสัมพันธ์ที่เสนอโดย [5] ดังนี้

$$\phi' = \sqrt{15.4(N_1)_{60}} + 20 \quad \text{หน่วยองศา} \quad (3)$$

สำหรับการประเมินค่ามุม ϕ' ของกลุ่มดิน SC จะลดค่าจากผลคำนวณในสมการ (3) ลง 5 องศา กรณีชั้นดิน CL แปลผลค่าทดสอบ SPT เป็นค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) เนื่องจากค่า PI ชั้นดินเหนียวมีค่าระหว่าง 7%-17% มีความเหนียวอยู่ในช่วง Medium Plasticity ได้เลือกสมการสหสัมพันธ์ที่เสนอโดย [13] เพื่อใช้คำนวณดังนี้

$$S_u = 0.67N_{60} \quad \text{หน่วย } t/m^2 \quad (4)$$

ค่ากำลังเฉือนชั้นดินที่นำมาใช้ประเมินกำลังแบกทานปลอดภัยของฐานราก ได้จากการแปลผลข้อมูลค่า $(N_1)_{60}$ N_{60} ในโซนความลึกประสิทธิผล B ได้ฐานราก (ระดับลึก 1.5-3.0 m)

3.5 การแปลผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) ของชั้นดิน

ดินเป็นวัสดุที่คุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงตามระดับความเครียดที่เพิ่มขึ้น ค่า E_s ของชั้นดินที่นำมาใช้ประเมินค่าการทรุดตัวของฐานรากจึงเป็น Equivalent Elastic Modulus ที่คำนวณกลับจากข้อมูลวัดค่าทรุดตัวฐานรากในภาคสนาม ค่าเชิงประสบการณ์นี้มีหลายผู้วิจัยเสนอค่าต่าง ๆ กัน งานวิจัยนี้เลือกสหสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าผลทดสอบ SPT (N_{60} , $(N_1)_{60}$) ที่เสนอโดย [1] และ [11] ตามประเภทดินดังนี้

$$\text{ชั้นดิน SM และ SC} \quad E_s = 70 (N_1)_{60} \quad \text{หน่วย } t/m^2 \quad (5)$$

$$\text{ชั้นดิน CL} \quad E_s = 90 N_{60} \quad \text{หน่วย } t/m^2 \quad (6)$$

$$\text{ชั้น weaked rock } (N_{60} > 50 \text{ blows/ft.}) \quad E_s = 100 N_{60} \quad \text{หน่วย } t/m^2 \quad (7)$$

3.6 คำนวณค่ากำลังแบกทานปลอดภัย ($q_{s(net)}$)

ประเมินค่ากำลังแบกทานโดยใช้เกณฑ์พิบัติเนื่องจากแรงเฉือนของชั้นดินใต้ฐานราก (Safe Bearing - capacity) คำนวณด้วยการแทนค่าในสมการ Terzaghi's Bearing Capacity Equation กรณีฐานรากรูปจัตุรัส

$$q_u = 1.3c'N_c + qN_q + 0.4B\gamma N_\gamma \quad (8)$$

$$q = \gamma D_f \quad (9)$$

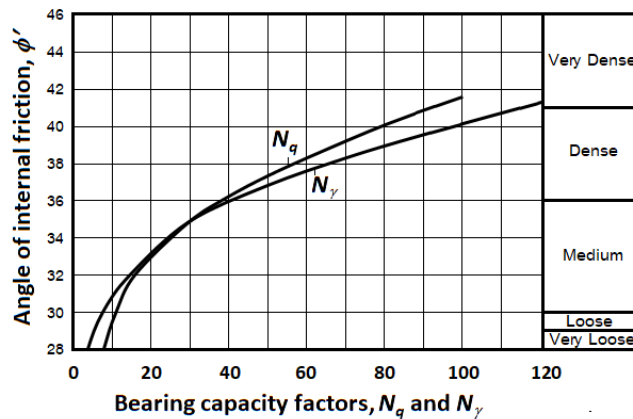
$$q_{s(net)} = \frac{q_u - q}{FS} \quad (10)$$

$q_{s(net)}$ q_u คือ ค่ากำลังแบกทานปลอดภัยสุทธิ และค่ากำลังแบกทานสูงสุด (t/m^2) ตามลำดับ พจน์ $N_c N_q N_\gamma$ คือ ค่า Terzaghi's Bearing capacity factors q คือ ค่าหน่วยแรงกดทับของชั้นดินเหนือฐานราก แทนค่าสมการ (9) ด้วยระยะฝังฐานราก (D_f) = 1.5 m ค่าหน่วยน้ำหนักดิน (γ) เฉลี่ย = $1.92 t/m^3$ และกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัย (FS) = 3 กรณีฐานรากแผ่วางบนชั้นดิน SM และ SC ดินมีค่า $c' = 0$ และใช้ $N_q N_\gamma$ ที่เสนอโดย [6] จากเส้นกราฟในรูปที่ 3 จะได้สมการคำนวณค่ากำลังแบกทานปลอดภัยคือ

$$q_{s(net)} = 0.96(N_q - 1) + 0.384N_\gamma \quad \text{หน่วย } t/m^2 \quad (11)$$

กรณีฐานรากแผ่วางบนชั้นดิน CL แทนค่า c' ในสมการ (7) ด้วยค่า S_u จากสมการ (4) เมื่อระบุค่ามุม $\phi' = 0^\circ$ ($N_c = 5.7 N_q = 1$ และ $N_\gamma = 0$) ได้สมการคำนวณค่ากำลังแบกทานปลอดภัย คือ

$$q_{s(net)} = 1.647 N_{60} \quad \text{หน่วย } t/m^2 \quad (12)$$



รูปที่ 3 ค่า Bearing capacity factors N_q และ N_γ ของดินไม่มีความแน่น [6]

3.7 คำนวณค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้จากการค่าการทรุดตัว ($q_{all (settlement)}$)

ประเมินจากค่าหน่วยแรงกดฐานรากที่ส่งผลให้ชั้นดินใต้ฐานรากทรุดตัวเป็นระยะตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้เท่ากับ 1 นิ้ว (25 mm) ค่าการทรุดตัวของฐานรากประเมินจากทฤษฎีอัสติคด้วยวิธี Janbu Method [3] ซึ่งแบบจำลองที่ใช้คำนวณแทนฐานรากด้วยหน่วยแรงกดสม่ำเสมอรูปจตุรัส ขนาด $B = 1.5$ m มีระยะฝัง $D_f = 1.5$ m วางบนชั้นดินความหนา H ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_s ดังในรูปที่ 4 งานวิจัยนี้คำนวณค่าการทรุดตัวจากความหนาชั้นดินสูงสุดไม่เกิน 5 เท่าของขนาดฐานราก (5B)

$$\delta = \frac{A_1 A_2 q_0 B}{E_s} \quad (13)$$

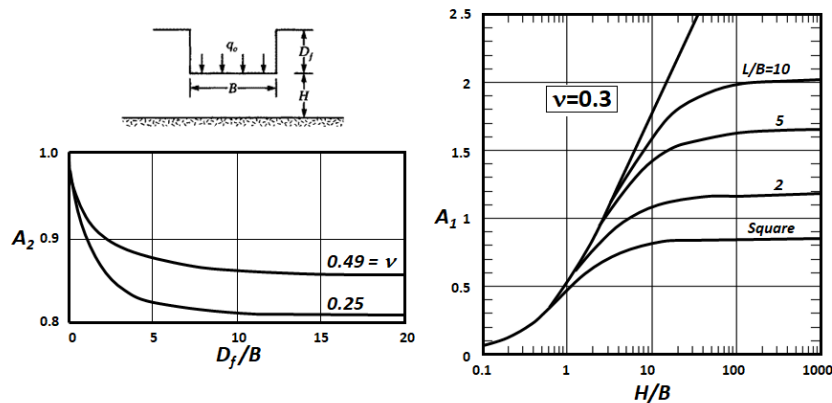
q_0 คือ หน่วยแรงกดฐานรากสุทธิ ที่ทำให้ฐานรากทรุดตัว 25 mm A_1 และ A_2 คือ ค่า Depth correction factors [2] และ Influence factors [12] ได้จากเส้นกราฟในรูปที่ 4 สมการนี้นำมาประยุกต์ใช้คำนวณค่าการทรุดตัวของฐานรากวางบนดินหลายชั้น (จำนวน n ชั้น) ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่างกัน ตามวิธีที่เสนอไว้โดย [7] ดังสมการ

$$\delta = A_1 q_0 B \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{(A_{2(i+1)} - A_{2(i)})}{E_{s(i)}} + \frac{(A_{2(n)})}{E_{s(n)}} \right\} \quad (14)$$

ปรับรูปสมการจะได้

$$Q_{all(settlement)} = \frac{(\delta=25\text{mm})}{A_1 B \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{(A_{2(i+1)} - A_{2(i)})}{E_{s(i)}} + \frac{(A_{2(n)})}{E_{s(n)}} \right\}} \quad (15)$$

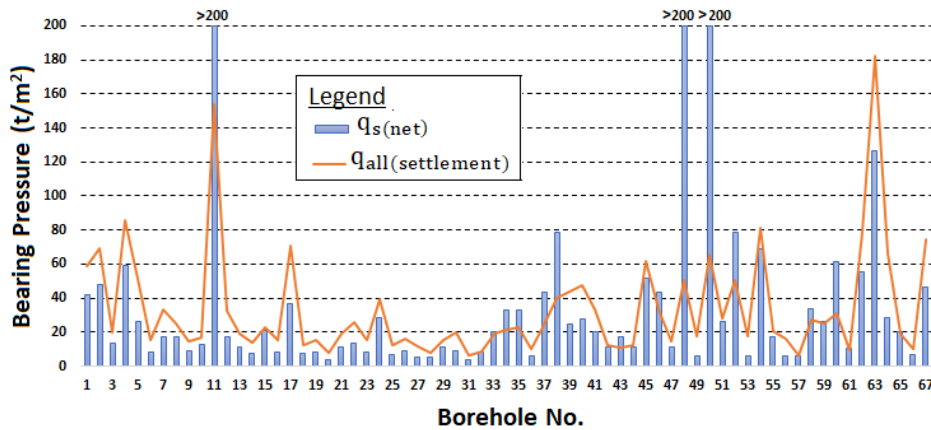
$E_{s(i)}$ คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินชั้นที่ i ได้ฐานราก และ $A_{2(i)}$ คือค่า Influence factors A_2 ที่มีค่า depth factor $H_{(i)}/B$ ของดินชั้นที่ i ได้ฐานราก



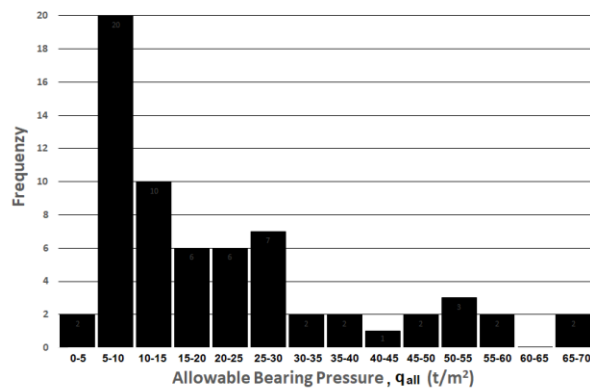
รูปที่ 4 ค่า Depth correction factors A_1 [2] และค่า Influence factors A_2 [12]

4. ผลการวิจัย

ผลคำนวณค่ากำลังแบกทานของทั้ง 67 หลุมเจาะแสดงในรูปที่ 5 จากแผนภูมิชี้ว่า แต่ละหลุมเจาะส่วนใหญ่ได้ผลคำนวณค่า $Q_{all(settlement)} > Q_{s(net)}$ คิดเป็น 87% ของจำนวนหลุมเจาะทั้งหมด และพบว่ามีค่ากำลังแบกทานของหลุมเจาะที่ 11 48 50 และ 63 บางตัวสูงแตกต่างกว่าค่าจากหลุมเจาะอื่นมาก มีสาเหตุจากผลวัดค่า N ในชั้นดินความลึก 1.5-4.5 m ที่ค่าสูงผิดปกติ ผลคำนวณบางค่าจากข้อมูลจากหลุมเจาะเหล่านี้จะถูกตัดออกไม่ใช่พิจารณา ค่า $Q_{s(net)}$ และ $Q_{all(settlement)}$ ที่น้อยกว่าในแต่ละหลุมเจาะ จะถูกคัดเลือกเป็น ค่ากำลังแบกทานที่ยอมรับให้ (q_{all}) รวบรวมค่าแล้วนำค่ามาพล็อตเป็นแผนภูมิแท่งแจกแจงความถี่แบ่งตามอันตรภาคชั้นของค่ากำลังแบกทานดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงผลค่าจำนวนค่ากำลังแบกทาน $Q_s(\text{net})$ และ $Q_{\text{all}}(\text{settlement})$ ทั้ง 67 หลุมเจาะ



รูปที่ 6 แผนภูมิแท่งแจกแจงความถี่ค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้ (Q_{all})

แผนภูมิแท่งแจกแจงความถี่ของค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้ (Q_{all}) รวบรวมได้จำนวน 65 ข้อมูล มีค่าช่วงค่าต่ำสุดถึงสูงสุดระหว่าง 3.71 ถึง 68.56 t/m^2 พิจารณารูปปร่างการกระจายข้อมูลได้ค่า (Mode = 6.34) < (Median = 17.10) < (Mean = 21.36) เป็นการเรียงตัวแบบ Positive Skew หรือโค้งแจกแจงความถี่แบบเบ้ขวา มีค่า skewness = 1.21 เมื่อตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติ (H_0) ว่าข้อมูลกระจายเป็น โค้งปกติหรือไม่ด้วยวิธี Shapiro-Wilk Test ผลวิเคราะห์ให้ค่า p-value = 0.000001480 ซึ่งต่ำกว่าระดับค่านัยสำคัญ (significant level) ที่ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานและแปลผลได้ว่าการแจกแจงของข้อมูลชุดนี้ไม่เป็นแบบโค้งปกติ โค้งแจกแจงความถี่แบบเบ้ขวา แสดงว่าข้อมูลส่วนมากมีค่าน้อย ดังนั้นเมื่อพิจารณาความปลอดภัยเป็นหลัก ควรใช้ค่าออกแบบที่ค่านิยม (mode) ที่ 6.34 t/m^2 ถือว่ามีความเหมาะสม

5. อภิปรายผล

(1) ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจเพื่อคำนวณค่ากำลังแบกทานของงานวิจัยยังมีจำนวนน้อย ถ้าจัดหาได้เพิ่มขึ้น และมีจำนวนค่า Q_{all} เพียงพอ จุดยอดของแผนภูมิจากการกระจายความถี่ของค่า Q_{all} จะปรับเลื่อนไปด้านขวา เข้าสู่การกระจายแบบ โค้งปกติ

(2) ฐานรากขนาด 1.5 m ยังมีขนาดเล็ก ค่ากำลังเฉือนของชั้นดินฐานรากจึงมีอิทธิพลต่อค่ากำลังแบกทานมากกว่าค่าการทรุดตัว ในทางตรงข้ามค่า Q_{all} จะอิงกับค่ากำลังแบกทานที่ประเมินจากค่าการทรุดตัวแทนเมื่อขนาดฐานรากใหญ่ขึ้น

(3) การนำผลวัดค่า N ในชั้นดินกำเนิดกบที่ (Residual Soil) ที่ยังมีหินที่ผุพังย่อยสลายไม่หมดไปใช้ประเมินคุณสมบัติวิศวกรรมของชั้นดิน ต้องระวังผลวัดที่สูงผิดปกติ เนื่องจากตอกกระบอกผ่าซีกมาตรฐานผ่านเศษหิน ควรตรวจและเลือกค่า N ที่บ่งชี้สภาพแข็งแรงแน่นของชั้นดินอย่างถูกต้อง

6. ข้อเสนอแนะ

(1) ค่าแนะนำของกำลังแบกทานที่ยอมให้ที่เสนอ โดยผลการวิจัย อาจปรับเพิ่มค่าได้จนถึง 10 t/m^2 อย่างปลอดภัย ถ้าวัดค่า FS หรือเพิ่มเกณฑ์การทรุดตัวที่ยอมให้เล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในช่วงค่าที่ระบุไว้ตามเอกสารมาตรฐานการออกแบบต่างๆ

(2) ควรทำวิจัยวัดพฤติกรรมทรุดตัวฐานรากเพิ่มเติมในพื้นที่เจาะสำรวจชั้นดิน เพื่อปรับเทียบผลคำนวณกำลังแบกทานจากเกณฑ์การทรุดตัวให้แม่นยำมากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายพีรพล ศีลาอาสน์ และนายประชา วงศ์ศาสตร์ ที่ช่วยสืบค้นและรวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดิน เพื่อใช้เป็นข้อมูลศึกษาวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO, 1996. *Standard Specifications for Highway Bridges*, 16th Edition, Washington, DC.
- [2] Christian, J.T. and Carrier III, D.W., 1978. Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's Chart Reinterpreted, *Canadian Geotechnical Journal*, 15, pp. 123-128.
- [3] Janbu, N., Bjerrum, L. and Kjaernsli, B., 1956. Veiledning ved losning av fundamenteringsopp-gaver. Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 16, 93 p. (in Norwegian).
- [4] Liao, S.C. and Whitman, R.V. 1986. Overburden correction factors for SPT in sand. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 112, pp. 373-377.
- [5] Mayne, P. W., 2001. *Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests*. Proceedings, International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories [In-Situ 2001], Bali, Indonesia, May 21-24, 2001, pp. 27-48.
- [6] Peck, R.B., Hanson, W. E. and Thornburn, T.H., 1974. *Foundation Engineering*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [7] Poulos, H.G. and Davis, E.H., 1974. *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [8] Robertson, P. K., 1986. In situ testing and its application to foundation engineering, *Canadian Geotechnical Journal*, 23, pp. 573-594.

- [9] Sabatini, P.J., Bachus, R.C., Mayne, P.W., Schneider, J.A., Zettler, T.E., 2002. *Geotechnical Engineering Circular No. 5*, Evaluation of Soil and Rock Properties, Report No FHWA-IF-02-034.
- [10] Seed, R. B., et al. 2003. *Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework*. Rep. EERC 2003-06, Earthquake Engineering Research Center.
- [11] Stroud, M.A. 1989. *The Standard Penetration Test – its application and interpretation*. Proceedings -ICE Conference on Penetration Testing in the UK, London: Thomas Telford.
- [12] Taylor, B.B. and Matyas, E.L., 1983. Influence Factors for Settlement Estimates of Footings on Finite Layers, *Canadian Geotechnical Journal*, 20, pp. 832-835.
- [13] Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [14] สยาม ยิ้มศิริ, 2557. การศึกษาพลังงานประสิทธิผลในการทดสอบ *Standard Penetration Test* ตามแนวทางการทดสอบที่ดำเนินการในประเทศไทย. รายงานวิจัย, ชลบุรี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

ชุดสาธิตระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบไร้สาย

WIRELESS FIRE ALARM SYSTEM DEMONSTRATION SET

พัศวีร์ ศรีโหมด, เต็มพงษ์ ศรีเทศ, เอกชัย ดีศิริ และ ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

61 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์ : 0-2579-1111

E-mail: pasawee.sr@spu.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ เป็นระบบวิศวกรรมประกอบอาคารที่จำเป็นตามข้อบังคับของกฎหมาย เพื่อช่วยลดความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินจากเหตุเพลิงไหม้ได้ ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบเดิมใช้การสื่อสารส่งสัญญาณและควบคุมผ่านสายตัวนำเป็นหลัก ดังนั้นคณะผู้วิจัยในโครงการนี้จึงทำการศึกษาและออกแบบระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ให้อุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย โดยอาศัยประโยชน์จากเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตที่มีอยู่ในอาคารทั่วไป เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเดินสายตัวนำ และเพื่อสะดวกในการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงระบบในอนาคต ชุดสาธิตระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบไร้สายนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน ได้แก่ 1. อุปกรณ์เริ่มสัญญาณประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจจับควันไฟ, อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน, และอุปกรณ์ส่งสัญญาณด้วยบุคคล 2. อุปกรณ์ส่งสัญญาณแจ้งเตือน คือ เครื่องส่งสัญญาณเสียงเพื่อเตือนภัยหรือไซเรน, หลอดไฟและจอแสดงผลแอลซีดี 3. ส่วนประมวลผล ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น อีเอสพี 32 ทำหน้าที่ในการควบคุมการรับสัญญาณและการส่งสัญญาณ นอกจากนี้ส่วนประมวลผลยังออกแบบให้มีคำสั่งในการตรวจสอบการใช้งานอุปกรณ์รับสัญญาณในระบบ โดยให้มีการส่งสัญญาณกลับไปยังอุปกรณ์เพื่อตรวจสอบสถานะความมีอยู่ของอุปกรณ์ได้ด้วย จากผลการทดลองชุดสาธิตระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้สามารถส่งสัญญาณสื่อสารแจ้งเหตุเพลิงไหม้ที่ระยะห่างภายในอาคารสูงสุด 60 เมตร

คำหลัก: ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้, ระบบไร้สาย, เครือข่ายอินเทอร์เน็ต

ABSTRACT

A fire alarm system is a legally mandated building engineering system. To help limit the chance of causing damage to life and property in the event of a fire. Traditional fire alarm systems use wiring conductors for communication and control. Therefore, the research team in this project has studied and designed a fire alarm system to use wireless communication devices. By utilizing Internet technology, which is readily available in most buildings, the cost of wiring conductors can be reduced, and the system can be more easily renovated in the future. The three primary components of this wireless fire alarm system demonstration are: 1. Initiating devices, which include smoke detectors, heat detectors, and manual pull station devices. 2. Signaling alarm devices is audible alarm or siren, lamp and LCD display. 3. The processor part uses a microcontroller model ESP 32 to control the input and output signals communication. In addition, the processor part also designed to have

commands to monitor the use of initiating devices in the system. By allowing the signal to be sent back to the device to recheck the status of the device's availability. According to the results of wireless fire alarm system demonstration , fire alarm communications can be carried out at a distance of up to 60 meters inside the building.

Keywords: Fire Alarm System, Wireless System, Internet Network

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยใช้ พรบ.ควบคุมอาคารและกฎหมายในส่วนของกระทรวงแรงงาน มีการกำหนดให้ต้องมีระบบสัญญาณเตือนเพลิงไหม้ (Fire Alarm System) ทั้งในอาคารสูง อาคารขนาดใหญ่พิเศษ อาคารชุมนุมคน และอาคารของโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นการศึกษาเพื่อออกแบบและติดตั้งเรื่อง ระบบสัญญาณเตือนเพลิงไหม้ หรือ ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ จึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและจำเป็นเรื่องหนึ่งในงานวิศวกรรมประกอบอาคาร

ระบบสัญญาณแจ้งเหตุเพลิงไหม้ คือ ระบบที่มีไว้สำหรับแจ้งเตือนเมื่อมีเหตุเพลิงไหม้ โดยจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับชนิดต่างๆ ที่ติดตั้งตามความเหมาะสมกับพื้นที่นั้นๆ ซึ่งเมื่ออุปกรณ์ตรวจจับพบสิ่งผิดปกติเช่นควันไฟ หรือความร้อนที่เพิ่มขึ้น อุปกรณ์ตัวนั้นๆ ก็จะทำการส่งสัญญาณไปยังผู้ควบคุม หลังจากนั้นระบบก็จะทำการแจ้งเหตุให้ผู้ใช้อาคารได้รับทราบผ่านในรูปของเสียงหรือแสง โดยการติดตั้งระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบเดิมมีการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับและผู้ควบคุมนั้นเชื่อมต่อกันผ่านทางสายสัญญาณตัวนำ ที่ต้องมีการเดินท่อร้อยสายสัญญาณภายในอาคารเป็นหลัก ทั้งในระบบแบบระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบโซน (Conventional Fire Alarm System) และระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบระบบตำแหน่ง (Addressable Fire Alarm System) โดยการเดินท่อร้อยสายสัญญาณนี้จะความยุ่งยากในการติดตั้ง เนื่องจากการเดินท่อร้อยสายส่วนมากจะฝังอยู่ในผนังตึกหรือใต้ฝ้าเพดาน ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการออกแบบและวางแผนงานติดตั้งในช่วงงานก่อสร้างอาคาร นอกจากนั้นหากจำเป็นต้องมีการซ่อมบำรุงหรือการปรับปรุงเพิ่มเติมระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้หลังจากการก่อสร้างอาคารเสร็จแล้ว อาจจะต้องมีความจำเป็นที่ต้องร้อยฝ้าหรือผนังอาคาร โดยอาจทำความเสียหายให้แก่ตัวอาคารได้ ซึ่งการซ่อมบำรุงและการปรับปรุงดังกล่าวในระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้จึงอาจเป็นเรื่องที่ยุ่งยากและมีต้นทุนที่สูง

ซึ่งในปัจจุบันนี้มีการพัฒนาการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครือข่ายเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตอย่างมากมาย การใช้เทคโนโลยี IoT หรือ Internet of Things เข้ามาช่วยเชื่อมโยงหรือส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปสู่อุปกรณ์ต่างๆ และยังสามารถสั่งการหรือควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ได้อีกด้วย โดยการใช้สัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตหรือระบบไร้สาย (Wireless System) เป็นสื่อกลาง ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้ออกแบบและพัฒนาชุดสาธิตระบบแจ้งเตือนเหตุเพลิงไหม้โดยใช้การติดต่อสื่อสารและควบคุมผ่านสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตหรือระบบไร้สาย เพื่อลดต้นทุนในการติดตั้งระบบและให้เกิดความสะดวกในการปรับปรุงระบบต่อไปในอนาคต

2. ทฤษฎี

ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ (Fire Alarm Systems) คือระบบที่มีไว้สำหรับการแจ้งเตือนเมื่อมีเหตุเพลิงไหม้ โดยจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับชนิดต่างๆ ตามความเหมาะสมของพื้นที่ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับควัน (Smoke Detector) , อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Heat Detector) , อุปกรณ์แจ้งเหตุด้วยมือ (Manual Pull Station/ Manual

Call Point) เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เราสามารถควบคุม และรับรู้ได้จากการแจ้งเตือนเมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้จากอุปกรณ์ เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายจากเหตุเพลิงไหม้ ประเภทของระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ แบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.1 ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ แบบระบบโซน (Conventional Fire Alarm System) หรือทั่วไปจะเรียกว่า แบบ Hard-wire เป็นระบบที่มีการแจ้งเตือนแบบระบบเป็น โซน ซึ่งการแบ่งโซนการแจ้งเตือนจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบและการเดินสายสัญญาณมายังผู้ควบคุม ยกตัวอย่าง เช่น อุปกรณ์ตรวจจับ (Detectors) ตัวใดตัวหนึ่ง ที่อยู่ในแนวของสายสัญญาณนั้นๆ มีการตรวจจับเหตุเกิดขึ้นจะส่งสัญญาณมายังผู้ควบคุมเพื่อแจ้งเตือน และแสดงผล ตามลำดับ โซนที่มีการเชื่อมต่อของสายสัญญาณ ข้อดีของระบบ Conventional เป็นระบบที่ติดตั้งง่ายเพียงอาศัย การเชื่อมต่อของสายสัญญาณที่ถูกต้องระบบก็สามารถทำงาน ได้อย่างปกติ ไม่จำเป็นต้องใช้การโปรแกรม ผู้ควบคุมให้ซับซ้อน และยังเป็นระบบที่ราคาของผู้ควบคุมและอุปกรณ์ตรวจจับ (Detectors) ราคาไม่สูงมาก ข้อจำกัดของระบบ Conventional เป็นระบบที่ไม่ค่อยมีความยืดหยุ่น จำนวน โซนที่รองรับสูงสุดจะตายตัวตาม ขนาดของผู้ควบคุม

2.1 ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ แบบระบบตำแหน่ง (Addressable Fire Alarm System) เป็นระบบที่มีการแจ้ง แบบระบบเป็นตำแหน่งหรือหมายเลขประจำอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ในระบบนี้จะมีหมายเลขประจำอุปกรณ์อยู่ทุกตัว และหมายเลขจะไม่สามารถซ้ำกันได้ จึงทำให้การแจ้งเตือนสามารถระบุอุปกรณ์ที่เกิดการตรวจจับ ได้ เพราะเหตุนี้ ระบบ Addressable จึงเป็นระบบที่สามารถเข้าถึงจุดเกิดเหตุได้อย่างรวดเร็ว ข้อดี ของระบบ Addressable เนื่องจากระบบมีการเดินสายสัญญาณแบบรูป เมื่อสัญญาณเกิดขาดที่ช่วงใดช่วงหนึ่ง อุปกรณ์ทุกตัวในระบบยังสามารถใช้ งานได้เหมือนเดิม และระบบ Addressable ยังเป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นค่อนข้างสูง เนื่องจากระบบนี้สามารถ ขยายโซนของอุปกรณ์ตรวจจับได้โดยการเชื่อมต่อผ่าน Module Zone และ ขยายโซนของอุปกรณ์แจ้งเตือนได้โดย การเชื่อมต่อผ่าน Module Alarm

3. วัตถุประสงค์งานวิจัย

3.1. เพื่อจัดทำชุดสาริตสำหรับการแจ้งเหตุเพลิงไหม้ โดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ผ่านเครือข่าย Wi-Fi ระบบจำลองแจ้งเหตุเพลิงไหม้ ประกอบด้วย

- อุปกรณ์เริ่มสัญญาณเตือนเหตุ หรือ อุปกรณ์Input ; Smoke Detector , Heat Detector, manual pull station
- อุปกรณ์แจ้งเตือน หรือ อุปกรณ์Output ; Strobe Light /Alarm Bell , หน้าจอ LCD
- อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ Wi-Fi
- อุปกรณ์ แทนผู้ควบคุม (Fire Control Panel , FCP)

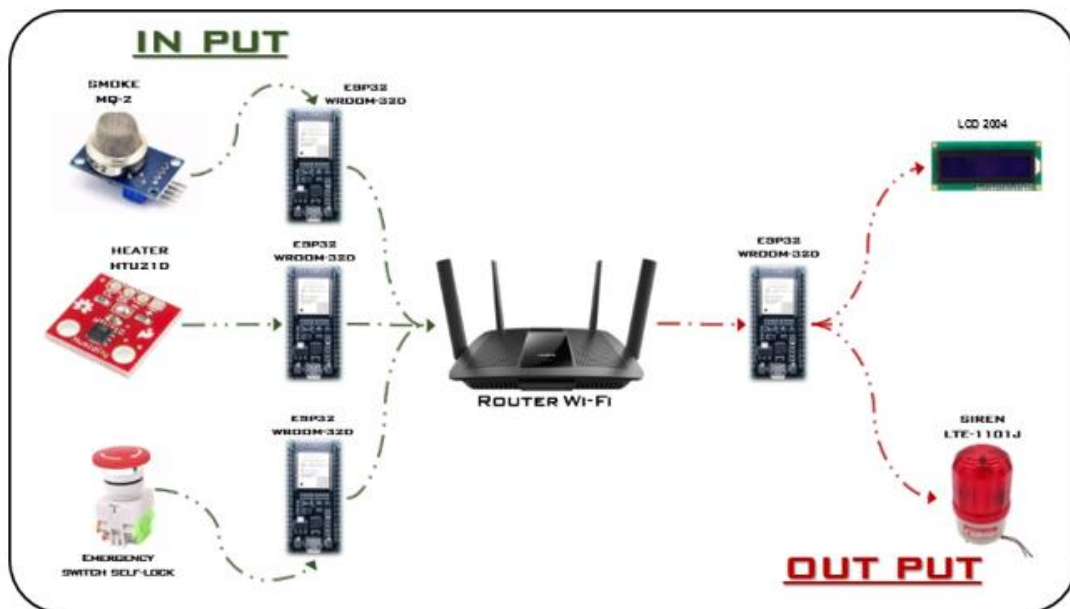
3.2. เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการแจ้งเพลิงไหม้แบบไร้สาย ซึ่งจะมียุทธศาสตร์ให้ลดต้นทุนในการเดิน ท่อร้อยสายสำหรับอุปกรณ์ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบเดิม และสะดวกในการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงระบบได้ โดยง่าย

4. วิธีการดำเนินวิจัย

4.1 โครงสร้างวงจรระบบแจ้งเตือนเหตุเพลิงไหม้แบบไร้สาย

การออกแบบวงจรระบบแจ้งเตือนเหตุเพลิงไหม้แบบไร้สาย ผ่านระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ต (IoT) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 7 อย่าง ดังภาพประกอบที่ 1. ซึ่งได้แก่

- อุปกรณ์ตรวจจับควัน (Smoke Detector)
- อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Heat Detector)
- สวิตช์ฉุกเฉิน (Emergency Switch)
- โมดูลควบคุมไมโครโทรลเลอร์ ESP-32
- จอแสดงผล LCD
- ไฟฉุกเฉินพร้อมเสียงไซเรน (Warning Light & Siren)
- สวิตช์ปุ่มกด (Reset / Recheck Switch)



ภาพประกอบที่ 1 การออกแบบวงจรระบบแจ้งเตือนเหตุเพลิงไหม้แบบไร้สาย

4.2 อุปกรณ์ที่เลือกใช้และหลักการทำงาน

4.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 WROOM-32 ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการ

1) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับ-ส่งข้อมูลสัญญาณจากเซ็นเซอร์และสวิตช์ โดยมีโปรแกรมให้ส่งข้อมูลตามลักษณะข้อมูลเฉพาะของเซ็นเซอร์ตัวนั้นๆ

2) ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผล แทนตัว FCP โดยตัวประมวลผลนี้จะรับค่าได้ผ่านระบบไร้สายจาก โมดูลต่างๆ ได้แก่ค่าที่เซ็นเซอร์จับได้ รวมถึงระบุตำแหน่งของเซ็นเซอร์นั้นๆได้ โดยเราสามารถตั้งค่าหรือเงื่อนไขการทำงานได้ผ่านโปรแกรมซอฟต์แวร์ต่างๆ เพื่อกำหนดเงื่อนไขให้แสดงผลออกทาง output ตัวอื่นต่อไป

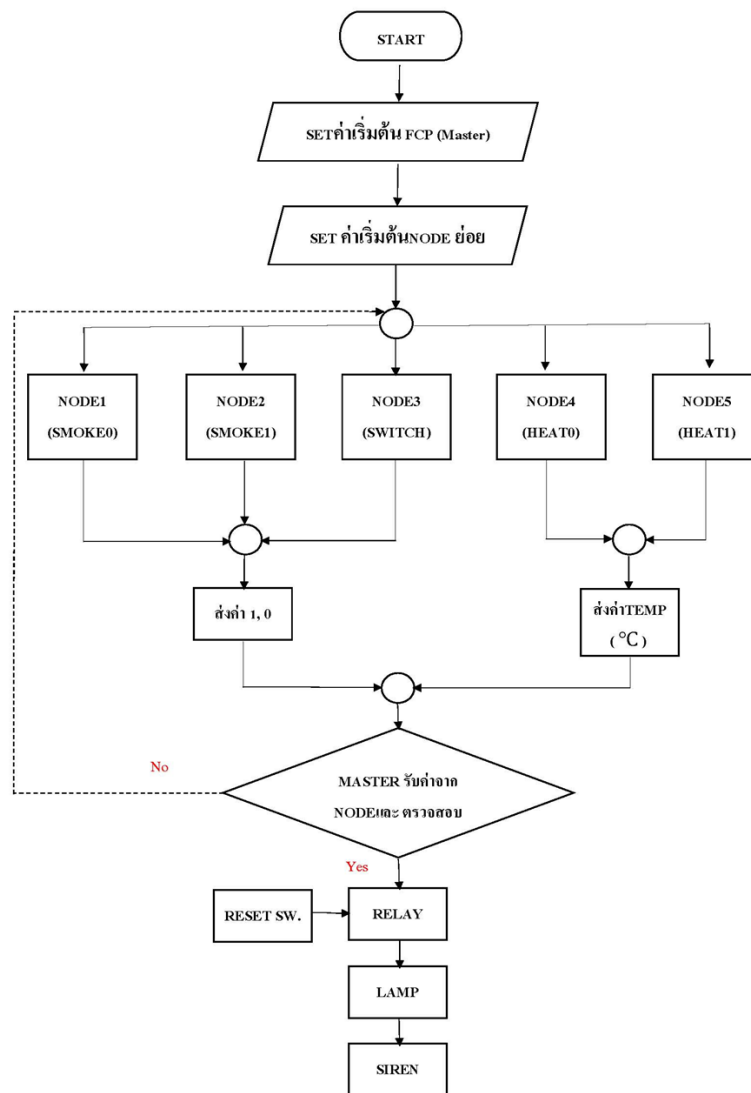
4.2.2 อุปกรณ์ตรวจจับควัน (Smoke Detector) รุ่น MQ-2 เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบปริมาณก๊าซ และควันไฟ สามารถตรวจจับได้ระดับความเข้มข้นของแก๊สหรือควันที่ช่วง 200-10,000

ppm หลักการทำงานของ MQ-2 จะทำงานก็ต่อเมื่อมีอนุภาควันลอยเข้าไปตัดผ่านเซนเซอร์ของอุปกรณ์ตรวจจับควัน แล้วจากนั้นตัวอุปกรณ์จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลนาล็อกต่อไปที่บอร์ด ESP32

4.2.3 อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Heat Detector) รุ่น HTU21D เป็นเซนเซอร์โมดูลที่ใช้วัดอุณหภูมิและความชื้นที่วัดค่าได้ในช่วง -40 ถึง +125°C และ 0 ถึง 100 %RH ตามลำดับ การสื่อสารเป็นแบบ I²C โดยหลักการทำงานของ HTU21D จะทำหน้าที่ตรวจจับความร้อนเมื่อมีค่าอุณหภูมิได้ตามค่ามาตรฐาน และอุปกรณ์จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลต่อไปที่บอร์ด ESP32

4.3 การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของ EPS32

โมดูลควบคุมไมโครโทรลเลอร์ ESP-32 จะทำหน้าที่เป็น Node ในการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อินพุต และทำการประมวลผล เพื่อส่งสัญญาณแจ้งเตือนเหตุ ผ่านทางรีเลย์ โดยมีโพลีชาร์ต แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมดังภาพประกอบที่ 2



ภาพประกอบที่ 2. ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

1. NODE ย่อย 4 เชื่อมต่อเข้ากับ Heat Sensor_0 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ (ค่าอุณหภูมิ องศาเซลเซียส) ที่ได้รับจาก sensor ส่งไปยัง NODE Master

2. NODE ย่อย 5 เชื่อมต่อเข้ากับ Heat Sensor_1 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ (ค่าอุณหภูมิ องศาเซลเซียส) ที่ได้รับจาก sensor ส่งไปยัง NODE Master

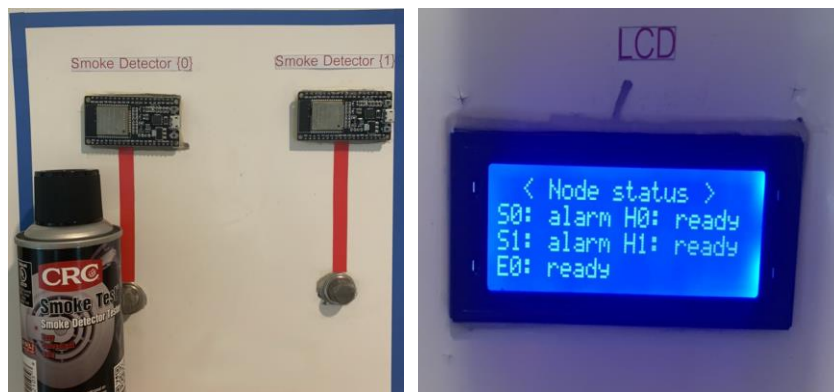
ชุดอุปกรณ์จะเริ่มดำเนินงานที่ NODE ย่อย โดย NODE ย่อยทุกตัวจะส่งค่าสถานะของ sensor ที่เชื่อมต่อกับตัวมัน พร้อม Address ผ่านระบบ Wi-Fi มายัง NODE Master โดยจะส่งค่าซ้ำๆ เป็นลูวนวนไปเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่กำหนด ในที่นี้กำหนดไว้ทุก 2000 ms หรือ 2 วินาที

NODE Master จะทำหน้าที่รับข้อมูลจาก NODE ย่อย และตรวจสอบเงื่อนไข ถ้าเงื่อนไขเป็นจริง จะมีการส่งสัญญาณต่อไปยังรีเลย์เพื่อให้สับสวิทช์สัญญาณไฟฉุกเฉินทำงาน นอกจากนั้นแล้ว NODE Master ยังสามารถส่งข้อมูลต่อไปยังหน้าจอ LCD เพื่อแสดงสถานะของ sensor แต่ละตัวได้

5. ผลการทดสอบชุดสาธิต

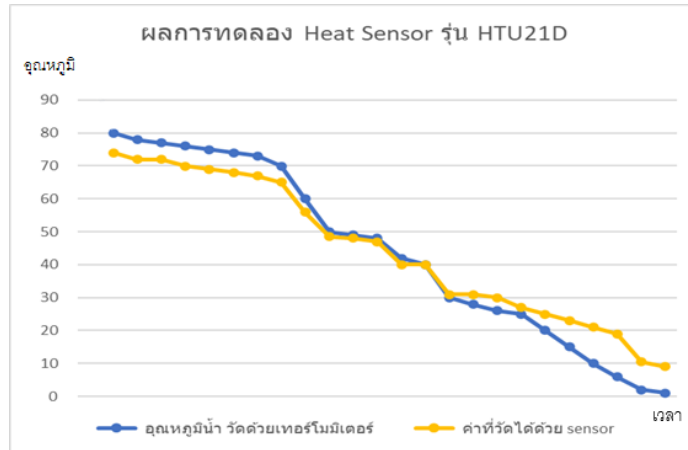
5.1 การทดสอบอุปกรณ์ด้านอินพุตได้แก่ อุปกรณ์ตรวจจับควัน (Smoke Detector) รุ่น MQ-2 และ อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Heat Detector) รุ่น HTU21D ซึ่งมีการทดสอบการตรวจจับและการส่งข้อมูลได้ดังนี้

5.1.1 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับควัน รุ่น MQ-2 เมื่ออุปกรณ์ได้รับอนุภาคควันไฟจะทำให้เซ็นเซอร์ทำงาน โดยจะส่งข้อมูลออกเป็นสัญญาณดิจิทัล และทำการสื่อสารโดยบอร์ด ESP-32 โดยให้แสดงผลการตรวจสอบทางจอ LCD การทำการทดสอบของอุปกรณ์ตรวจจับควัน MQ-2 ทำโดยใช้สเปรย์ทดสอบเครื่องตรวจจับควัน ยี่ห้อ CRC ผลิตภัณฑ์จากสหรัฐอเมริกามาตรฐาน UL Listed จากการทดสอบฉีดพ่นสเปรย์ที่ระยะห่างประมาณ 60 ซม. เป็นเวลา 2-3 วินาที พบว่า เซ็นเซอร์ MQ-2 สามารถตรวจจับควันจากสเปรย์ทดสอบดังกล่าวได้ แสดงดังภาพประกอบ 3



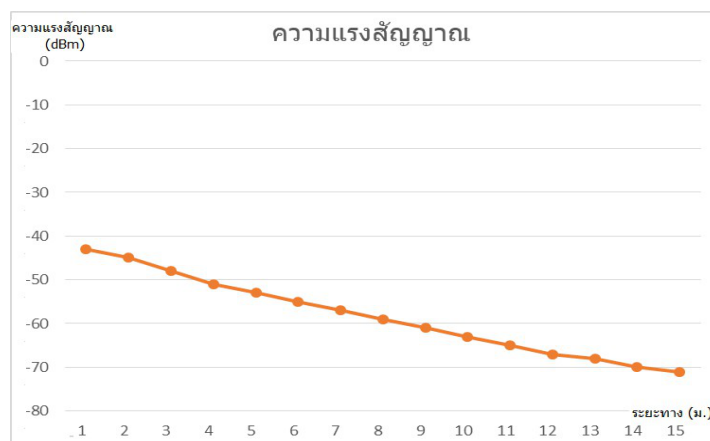
ภาพประกอบที่ 3. การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับควัน MQ-2

5.1.2 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน รุ่น HTU21D เมื่ออุปกรณ์ได้รับความร้อนข้อมูลที่ตรวจจับได้จะถูกส่งออกมาเป็นค่าอุณหภูมิ โดยทำงานได้ในช่วงระหว่าง -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยจะส่งข้อมูลไปยัง บอร์ด ESP-32 จากการทดลองเปรียบเทียบการตรวจจับความร้อนกับเทอร์โมมิเตอร์ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0-100 องศาเซลเซียสดังภาพประกอบที่ 4. พบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้ด้วยเทอร์โมมิเตอร์และ HTU21D อยู่ที่อัตราเฉลี่ยที่ 5 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 4. การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน รุ่น HTU21D

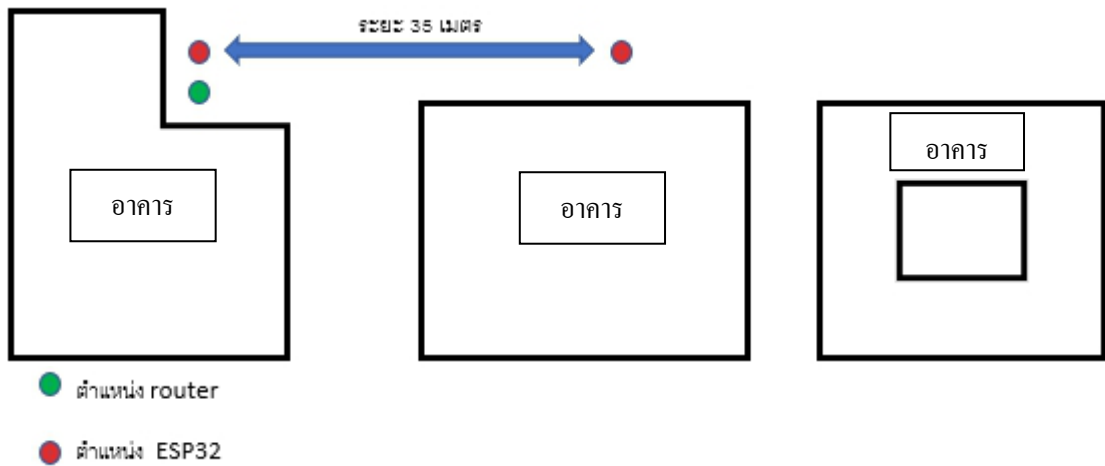
5.2 การทดสอบอุปกรณ์ตัวกลางในการสื่อสาร โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP-32(Master) ที่ทำหน้าที่แทนตัว FCP โดยจะทำหน้าที่หลักในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์ด้านอินพุตผ่านการเชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi การทดสอบการเชื่อมต่อของ ESP32 ด้วยการวัดความแรงของสัญญาณ ผ่านโปรแกรม Wi-Fi Monitor ในมือถือ โดยโปรแกรมจะตรวจสอบความแรงของสัญญาณของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวที่มีคุณสมบัติเป็น Access point จากผลการทดลองพบว่า ESP32 มีความแรงของสัญญาณที่ใช้งานได้ (ในโหมด AP หรือ Access point) อยู่ที่ระยะไม่เกิน 15 เมตร ในพื้นที่โล่ง ทั้งนี้ในส่วนของระยะทางที่เกินกว่านั้น อาจจะยังคงมีสัญญาณอยู่แต่อยู่ในระดับต่ำมาก แสดงรายละเอียดผลการทดสอบความแรงของสัญญาณ ดังภาพประกอบที่ 5



ภาพประกอบที่ 5. ผลการทดสอบความแรงของสัญญาณ Wi-Fi ในที่โล่ง

5.3 การทดลองในพื้นที่การใช้งาน เพื่อทดสอบหาระยะการเชื่อมต่อระบบ Wi-Fi ระหว่าง ESP-32 ด้านอุปกรณ์อินพุต กับ ESP-32(Master) ว่าสามารถเชื่อมต่อได้ระยะทางสูงสุดเท่าใด โดยจำลองการทดลองเป็น 3 กรณี Wi-Fi

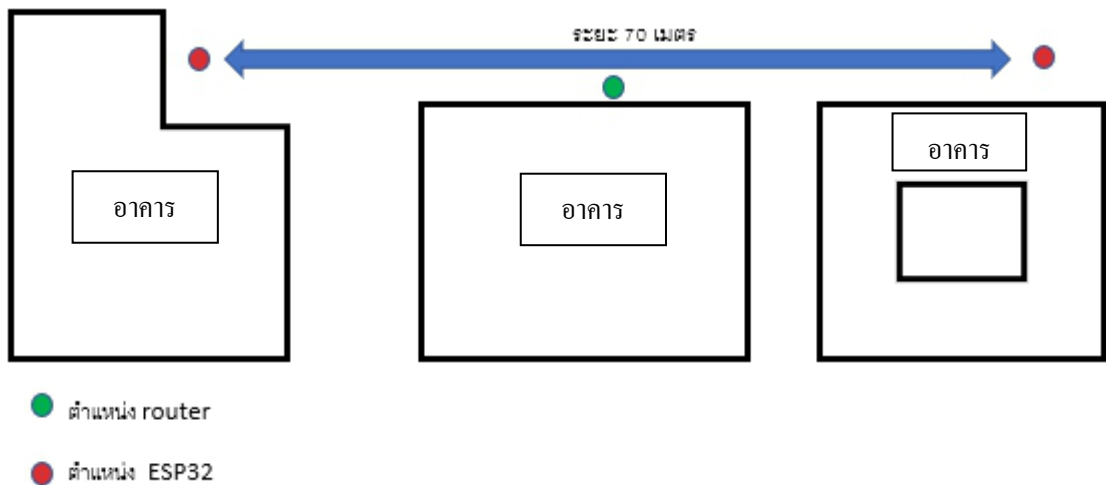
5.3.1 **กรณีที่ 1** ให้ Wi-Fi Router วางตำแหน่งอยู่ร่วมกับ ESP-32(master) แล้วทดสอบระยะห่างของ ESP-32 ด้านอุปกรณ์อินพุต ในบริเวณพื้นที่โล่ง ว่าอุปกรณ์ยังสามารถใช้งานได้ในระยะสูงสุดที่เท่าใด ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ระยะห่างระหว่างของ EPS-32(master) กับอุปกรณ์อินพุต กรณีที่ 1

ระยะทาง (เมตร)	5	10	15	20	25	30	35	40
	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้

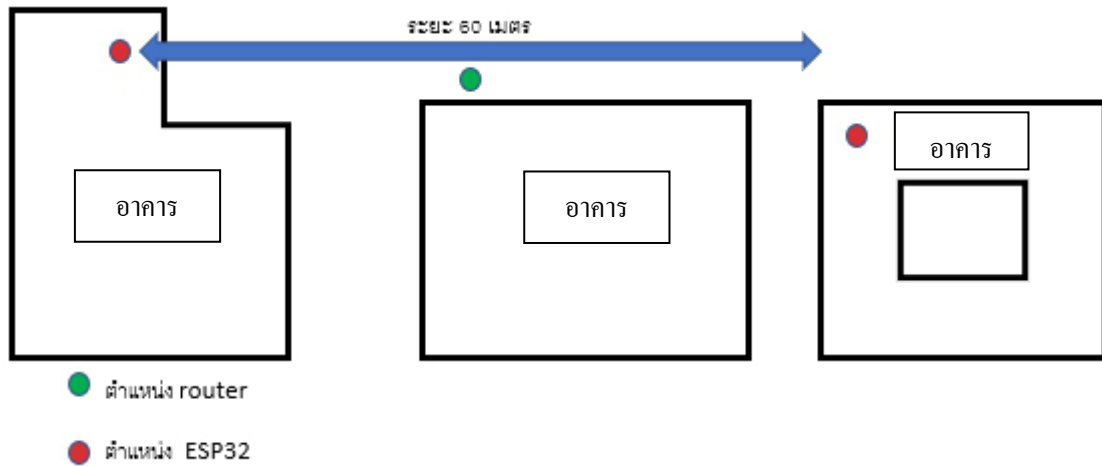
5.3.2 กรณีที่ 2 ให้ Wi-Fi Router วางในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่าง ESP-32(master) กับ ESP-32 ด้านอุปกรณ์อินพุตในบริเวณพื้นที่โล่ง ว่าอุปกรณ์ยังสามารถใช้งานได้ในระยะสูงสุดที่เท่าใด ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 ระยะห่างระหว่างของ EPS-32 (master) กับอุปกรณ์อินพุต กรณีที่ 2

ระยะทาง (เมตร)	10	20	30	40	50	60	70	80
	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้

5.3.2 กรณีที่ 3 ให้ Wi-Fi Router วางในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่าง ESP-32(master) กับ ESP-32 ด้านอุปกรณ์อินพุตในบริเวณที่มีผนังกั้น ว่าอุปกรณ์ยังสามารถใช้งานได้ในระยะสูงสุดที่เท่าใด ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.



ตารางที่ 3 ระยะห่างระหว่างของ EPS-32(master) กับอุปกรณ์อินพุต กรณีที่ 3

ระยะทาง (เมตร)	10	20	30	40	50	60	70	80
	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและออกแบบชุดสาธิตระบบแจ้งเตือนเพลิงไหม้แบบไร้สาย โดยใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่มีอยู่แล้วภายในอาคาร และเป็นแนวทางในการลดต้นทุนในงานติดตั้งเดินท่อร้อยสายและเพื่อให้เกิดความสะดวกในการซ่อมบำรุง สำหรับทดแทนระบบแจ้งเตือนเพลิงไหม้แบบเดิม

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้อุปกรณ์ Input หรืออุปกรณ์เริ่มสัญญาณเตือนเหตุในระบบแจ้งเตือนเพลิงไหม้แบบเดิมที่มีอยู่แล้ว มาทำการปรับปรุงโดยการเพิ่มอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายและการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller รุ่น ESP32) โดยไม่จำเป็นต้องมีการเดินสายสัญญาณ สามารถประยุกต์ให้ทำงานในแบบ Addressable และยังสามารถเพิ่มคำสั่งในการตรวจสอบ (Recheck) สถานะความมีอยู่ (existing) ของอุปกรณ์ในระบบได้ โดยใช้การตรวจสอบได้จากการรับ-ส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์สื่อสาร (Node VS Master) เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้เป็นแบบที่สามารถสื่อสารได้สองทาง และจากการทดลองในพื้นที่การใช้งาน เพื่อหาระยะเชื่อมต่อบนระบบ Wi-Fi จากกรณีที่ 1 และ 2 ทำให้ทราบว่า ความสามารถในการสื่อสารของ ESP-32 ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งของ Wi-Fi router โดยมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของระบบ ทำให้ระยะห่างที่สื่อสารได้สูงสุดแตกต่างกันถึงเท่าตัว อยู่ที่ระยะ 35 เมตร และ 70 เมตร และจากกรณีที่ 2 และ 3 ทำให้ทราบว่าลักษณะของพื้นที่ติดตั้ง ESP-32 มีผลต่อประสิทธิภาพในการสื่อสารเล็กน้อย กล่าวคือ หากเลือกติดตั้งในพื้นที่ค่อนข้างโล่ง จะทำให้ระยะทางการสื่อสารเพิ่มได้มากขึ้น (ได้สูงสุด 70 เมตร) เมื่อเทียบกับการติดตั้งในพื้นที่ที่มีผนังกั้น ที่ได้ระยะสูงสุดที่ 60 เมตร

7. เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการมาตรฐานระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ (2562). *มาตรฐานระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ แก้ไขปรับปรุง ครั้งที่ 2*. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- ราชกิจจานุเบกษา. (2556). *กฎกระทรวง กำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัยอาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับการป้องกันและระงับอัคคีภัย พ.ศ. 2555* [ออนไลน์]. ค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2563 จาก:
<http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2556/A/002/24.PDF>
- สมาคมผู้ตรวจสอบอาคาร. (2555). *กฎกระทรวงฉบับที่33 (พ.ศ. 2535)* [ออนไลน์]. ค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2563 จาก: www.bsa.or.th/กฎหมาย/กฎกระทรวง-ฉบับที่-33-พศ-2535.html
- Measurement Specialties (2012). *HTU21D Sensor-Miniature Relative Humidity and Temperature Sensor* [on line] ค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2563 จาก: <https://www.cdiweb.com/datasheets/te/htu21d.pdf>
- Pololu Corporation (2020). *MQ-2 Semiconductor Sensor for Combustible Gas* [on line]. ค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2563 จาก: <https://www.pololu.com/file/0J309/MQ2.pdf>

การศึกษาความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ กรณีศึกษา ศูนย์บริการนิสสัน

STUDY OF THE VISCOSITY OF ENGINE OILS: A CASE STUDY OF NISSAN SERVICE CENTER

อดุลย์ พัฒนภักดี

หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: adual.pa@spu.ac.th

สุดิชัย ดอนแหว่วน

หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: sudtichai.don@spumail.net

เพชญ์ จันทร์สา

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: pachern.ja@spu.ac.th

บทคัดย่อ

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เป็นสิ่งจำเป็นของเครื่องยนต์ซึ่งมีหน้าที่ช่วยลดการสึกหรอและเสียดสีของเครื่องยนต์ดังนั้นจึงต้องอาศัยน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เข้าไปหล่อลื่นระหว่างผิวโลหะไม่ให้กระทบกันโดยตรง นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นยังช่วยระบายความร้อนและทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆ และยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ บทความนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์กับระยะทางการใช้งานของรถยนต์ โดยทำการเก็บข้อมูลของรถยนต์ที่เข้าใช้บริการที่ศูนย์บริการรถยนต์นิสสันแห่งหนึ่ง จำนวน 100 คัน ในช่วงวันที่ 11 มกราคม 2564 ถึง 30 เมษายน พ.ศ.2564 โดยแบ่งเป็น รถยนต์ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 0W-20 จำนวน 61 คัน รถยนต์ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 5W-30 จำนวน 25 คัน รถยนต์ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลสังเคราะห์ SAE 5W-30 จำนวน 8 คัน และรถยนต์ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลกึ่งสังเคราะห์ SAE 10W-30 จำนวน 6 คัน จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (V: cSt) มีค่าเพิ่มมากขึ้นแปรเปลี่ยนไป ระยะทางการใช้งานของรถยนต์ (D: km) ดังรายละเอียด

สำหรับ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 0W-20 มีความสัมพันธ์เป็น $V=90.37+0.0098D$ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 5W-30 มีความสัมพันธ์เป็น $V=95.15+0.0098D$

คำสำคัญ: น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ความหนืด เครื่องยนต์เบนซิน เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องวัดความหนืด

ABSTRACT

Engine oil is an essential part of the engine, which is responsible for reducing wear and friction of the engine, therefore relying on engine oil to lubricate between the metal surfaces not to directly affect each other. In addition, the lubricant also helps to cool and clean various parts, and prolong the service life of the engine.

In this study, the relation between the viscosity and a car distance is investigated. The amount of 61 units of Nissan fully synthetic SAE 0w-20 gasoline engine oil, 25 units of Nissan fully synthetic SAE 5w-30 gasoline engine oil, 8 units of Nissan fully synthetic SAE 5w-30 diesel engine oil, and 6 units of Nissan semi synthetic SAE 5w-30 diesel engine oil, had been collected from the Nissan car service center during January 11, 2021 –April 30, 2021. The result from the Least square regression analysis show that the relation between the viscosity (V: cSt) and the car distance (D: km) are list below:

For Nissan fully synthetic SAE 0w-20 gasoline engine oil, the relation is $V=90.37+0.0098D$.

For Nissan fully synthetic SAE 5w-20 gasoline engine oil, the relation is $V=95.15+0.0098D$.

Keyword: Engine Oil, Viscosity, Gasoline Engine, Diesel Engine, Viscosity Meter

1. บทนำ

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เป็นสิ่งจำเป็นของเครื่องยนต์ซึ่งมีหน้าที่ช่วยลดการสึกหรอและเสียดสีของเครื่องยนต์ดังนั้นจึงต้องอาศัยน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เข้าไปหล่อลื่นระหว่างผิวโลหะไม่ให้กระทบกันโดยตรง นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นยังช่วยระบายความร้อนและทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆและยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ถ้ามีความหนืดต่ำ ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นจะบางและเสียรูปง่ายจึงทำให้ชิ้นส่วนเครื่องยนต์สึกหรอได้ง่าย แต่ถ้าน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีความหนืดมากเกินไปจะทำให้เกิดแรงต้านทานในการเคลื่อนที่ เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียกำลังงานของรถยนต์ (Jean-Louis Ligier and Bruno Noel, 2015) การเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่มีความหนืดเหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ผู้ใช้รถยนต์ต้องคำนึงถึง อีกทั้งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีค่าเปลี่ยนไปตามอายุและสภาพการใช้งาน อุณหภูมิของเครื่องยนต์และห้องเผาไหม้ รวมทั้งอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะใช้งาน

ผู้ใช้รถยนต์จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานของตนเอง โดยทั่วไปบริษัทผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์และศูนย์บริการยานยนต์จะใช้เวลาและระยะทางการใช้รถยนต์เป็นเกณฑ์ในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ โดยมีได้ตรวจวัดค่าของความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ บทความนี้จึงทำการศึกษาและตรวจวัดค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เพื่อทำการประมาณค่าของความหนืดของของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนไปตามระยะทางการใช้รถยนต์ เพื่อใช้ค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เป็นค่าอ้างอิงในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

2. วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อศึกษาและตรวจวัดค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์
- (2) เพื่อประมาณค่าความสัมพันธ์ของความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์กับระยะเวลาการใช้งานรถยนต์

3. ทฤษฎีและข้อมูลพื้นฐาน

3.1 ประเภทและมาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่า น้ำมันหล่อลื่น หรือ น้ำมันเครื่อง ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ น้ำมันพื้นฐาน และสารเพิ่มคุณภาพ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีหน้าที่ลดแรงเสียดทานชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ และช่วยระบายความร้อนให้ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ เคลือบช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส ทำความสะอาดเขม่าและเศษโลหะที่เสียดสีกันภายในเครื่องยนต์ป้องกันการกัดกร่อนจากสนิมและกรดต่างๆ (ประเสริฐ เทียนนิมิต และคณะ, 2559) โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์จะแบ่งเป็นน้ำมันเครื่องธรรมดา (Mineral Oil) ผลิตจากน้ำมันหล่อลื่นที่กลั่นจากน้ำมันปิโตรเลียม มีอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 5,000-7,000 กิโลเมตร น้ำมันเครื่องกึ่งสังเคราะห์ (Semi Synthetic) ผลิตจากน้ำมันหล่อลื่นธรรมดาผสมกับน้ำมันหล่อลื่นชนิดสังเคราะห์ในสัดส่วนต่างๆกัน มีอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 7,000-10,000 กิโลเมตร น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ (Fully Synthetic) เป็นน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์จากขบวนการทางเคมี มีอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 10,000-15,000 กิโลเมตร



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์นิสสัน

สำหรับมาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่บริษัทผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นและบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ส่วนใหญ่ใช้อ้างอิงจะเป็นมาตรฐานของสมาคมวิศวกรรถยนต์แห่งสหรัฐอเมริกา หรือมาตรฐาน SAE (Society of Automotive Engineers) และมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา หรือมาตรฐาน API (American Petroleum Institute)

มาตรฐาน SAE จะระบุค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ประกอบด้วยตัวเลข 2 ชุด คือ SAE XW-XX โดยตัวเลขชุดหน้าแสดงถึงการวัดค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มาตรฐานในเขตหนาว (สัญลักษณ์ W) หรือค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ต่ำลงมาจนถึงจุดเยือกแข็งตั้งแต่ 0 องศาเซลเซียสจนถึง -30 องศาเซลเซียส และตัวเลขชุดหลัง แสดงถึง

การวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แสดงค่าออกมาเป็นตัวเลขเรียกว่า เบอร์ของน้ำมันหล่อลื่น เครื่องยนต์ เช่น SAE 5W-30

SAE VISCOSITY GRADES FOR ENGINE OILS

SAE Viscosity Grade	Low Temperature Viscosities		High Temperature Viscosities	
	Cranking: cP @ °C, max. (ASTM D 5293)	Pumping: Max. cP with no yield stress @ °C (ASTM D 4648)	Kinematic: cSt @ 100°C (ASTM D 445)	High Shear: cP @ 150°C & 106s-1 min.
0W	6200 @ -35	60,000 @ -40	3.8 minimum	--
5W	6600 @ -30	60,000 @ -35	3.8 minimum	--
10W	7000 @ -25	60,000 @ -30	4.1 minimum	--
15W	7000 @ -20	60,000 @ -25	5.6 minimum	--
20W	9500 @ -15	60,000 @ -20	5.6 minimum	--
25W	13,000 @ -10	60,000 @ -15	9.3 minimum	--
20	--	--	5.6 < 9.3	2.6
30	--	--	9.3 < 12.5	2.9
40	--	--	12.5 < 16.3	2.9 (for 0W-40, 5W-40 & 10W-40 grades) 3.7 (for all other grades)
50	--	--	16.3 < 21.9	3.7
60	--	--	21.9 < 26.1	3.7

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างเบอร์น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามมาตรฐาน SAE (ที่มา <https://www.farmoyl.com/resources/sae-viscosity-grades>)

มาตรฐาน API จะระบุค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์แยกเป็นสองประเภท สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน (Spark Ignition Engine) จะใช้อักษรย่อ S ตามหลังตัวอักษร API แล้วตามด้วยตัวอักษรที่บอกราคคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ โดยเริ่มต้นจากชั้นคุณภาพแย่ที่สุดใช้ตัวอักษร A แล้วไล่เรียงชั้นคุณภาพที่ดีกว่าขึ้นไปเรื่อยๆ คือ B, C, D.....N ซึ่งในขณะนี้ชั้นคุณภาพที่ดีที่สุดสำหรับเครื่องยนต์เบนซินในปัจจุบัน คือ ชั้นคุณภาพ API SN (มาตรฐาน API, 2564)



รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างเบอร์น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินตามมาตรฐาน API (ที่มา <http://www.oilthai.com/knowledge>)

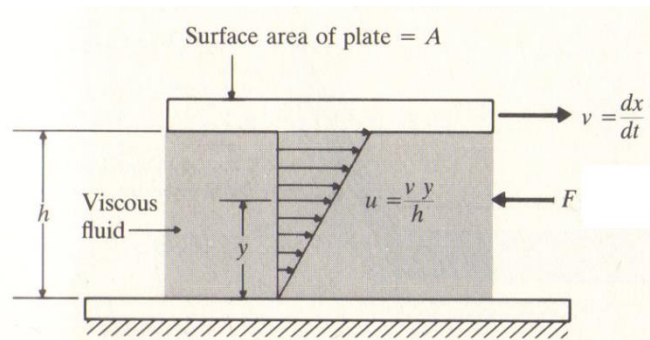
สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล (Compression Ignition Engine) จะใช้อักษรย่อ C ตามหลังตัวอักษรย่อ API เช่นกัน ต่อจากนั้นก็จะเป็นตามด้วยตัวอักษรที่บอกราคคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ โดยเริ่มจากเกรด

คุณภาพต่ำสุด คือ A แล้วไล่เรียงชั้นคุณภาพขึ้นไปเรื่อย ๆ เหมือนกับเกรดคุณภาพสำหรับเครื่องยนต์ เบนซินทุกประเภท เช่น API CE, API CF-4, API CG-4, API CH-4 ตัวเลข 4 ต่อท้ายหมายถึง ใช้กับเครื่องยนต์ 4 จังหวะเท่านั้น สำหรับเกรดคุณภาพสูงสุดในปัจจุบัน คือ CJ-4

3.2 ความหนืดและเครื่องมือวัดค่าความหนืด

ความหนืดไดนามิกส์ (Dynamics Viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหลเมื่อมีแรงกระทำของไหลที่มีค่าความหนืดสูงจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูงกว่าของไหลที่มีความหนืดต่ำ การวัดค่าความหนืดทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหลเมื่อมีแรงกระทำในแนวขนานกับพื้นผิว โดยเรียกแรงต้านทานที่เกิดขึ้นนี้ว่าแรงเฉือนในของไหล (Shear force) โดยค่าของแรงเฉือน (F) จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส (A) ค่าของความหนืดไดนามิกส์ (m) และค่าอัตราเฉือน $\frac{\partial u}{\partial y}$ ตามสมการที่ (1)

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad \dots (1)$$



รูปที่ 4 แสดงแรงเฉือนระหว่างชั้นของของไหล

หน่วยของความหนืดไดนามิกส์จะมีหน่วยเป็น พอยส์ (poise) โดยที่ 1 พอยส์คือแรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 เซนติเมตรต่อวินาที นอกจากหน่วยพอยส์แล้ว ยังมีหน่วยสำหรับความหนืดจลน์ (Kinematics Viscosity) เป็น สโตก (stoke: St) หรือเซนติสโตก (Centistokes : cSt) โดยที่ค่าของความหนืดจลน์คืออัตราส่วนของความหนืด ไดนามิกส์ต่อค่าความหนาแน่นของสารหล่อลื่น

สำหรับวิธีการวัดค่าความหนืดในการทดสอบครั้งนี้จะใช้ถ้วยวัดความหนืด Zahn Cup เบอร์ 3 ถ้วยวัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้นถ้วยอยู่ที่ขนาด 3.86 มิลลิเมตร มีปริมาตรอยู่ที่ 44 มิลลิลิตร ช่วงวัดค่าความหนืด อยู่ที่ 100-800 เซนติสโตก และได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ASTM D1084, D1082

3.3 การประมาณค่าสมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

สำหรับการประมาณค่าสมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของข้อมูลในครั้งนี้จะใช้วิธีการที่เรียกว่า Least Square Regression ซึ่งเป็นรูปแบบการหาความสัมพันธ์ที่กำลังสองของค่าความผิดพลาด (error) ระหว่างค่าจริงกับค่าที่ประมาณขึ้นมีค่าน้อยที่สุด (Figliola & Beasley, 2015) ถ้ากำหนดให้ y_c แทนค่าของข้อมูลจริง จำนวน N ข้อมูล และ y_e แทนค่าของข้อมูลจากการประมาณค่า และ E แทนค่าของกำลังสองของค่าความผิดพลาด

$$y_c = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad \dots (2)$$

$$E = \sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m))^2 \quad \dots (3)$$

การประมาณค่าโดยวิธี Least Square Regression ต้องทำให้ E มีค่าน้อยที่สุดนั่นคือ

$$dE = \frac{\partial E}{\partial a_0} da_0 + \frac{\partial E}{\partial a_1} da_1 + \frac{\partial E}{\partial a_2} da_2 + \dots + \frac{\partial E}{\partial a_m} da_m = 0 \quad \dots (4)$$

สำหรับการประมาณค่าเป็นสมการเส้นตรง $y_c = a_0 + a_1x$ จากสมการที่ (4) เราได้

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = \frac{\partial}{\partial a_0} \left(\sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i))^2 \right) = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i)) = 0 \quad \dots (5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = \frac{\partial}{\partial a_1} \left(\sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i))^2 \right) = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - (a_0 + a_1x_i))x_i = 0 \quad \dots (6)$$

จากสมการที่ (5) และ (6) สามารถหาระบบสมการ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ได้จากความสัมพันธ์

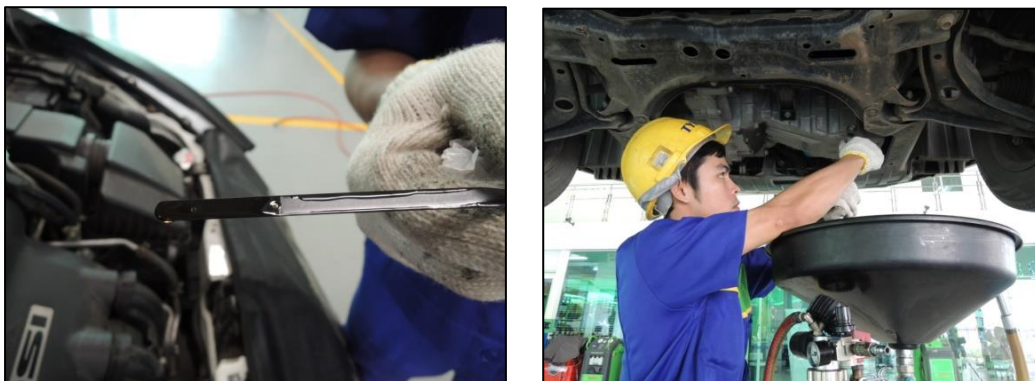
$$a_0N + a_1 \sum x_i = \sum y_i \quad \dots (7)$$

$$a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \quad \dots (8)$$

4. วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 วิธีการทดสอบเก็บข้อมูล

4.1.1 เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ จากรถยนต์ที่เข้ารับบริการตรวจสอบสภาพเครื่องยนต์ หรือเข้ารับบริการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ศูนย์บริการ คันละ 200 -250 มิลลิลิตร พร้อมบันทึก รายละเอียดตามใบงานของศูนย์บริการ



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการตรวจวัดระดับ การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ และการเก็บตัวอย่างข้อมูล

4.1.2 นำตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มาทดสอบหาความหนืด โดยใช้ถ้วยวัดความหนืด Zahn Cup จุ่มลงในภาชนะที่บรรจุน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์แล้วยกขึ้นในแนวตั้ง จับเวลาเมื่อปลายถ้วยวัดความหนืดพ้นจากผิวของน้ำมันหล่อลื่นและหยุดเวลาเมื่อน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลออกจากก้นถ้วยวัดความหนืดขาดออกจากกัน ทำการทดสอบจำนวนสองครั้งเพื่อหาค่าเวลาเฉลี่ย แล้วจึงนำค่าของเวลาเฉลี่ยที่ได้ไปแปลงเป็นหน่วยของความหนืดจลน์ตามตารางการแปลงหน่วยของถ้วยวัดความหนืด Zahn Cup



รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างข้อมูล ถ้วยวัดความหนืด Zahn Cup และวิธีการวัดค่าความหนืด

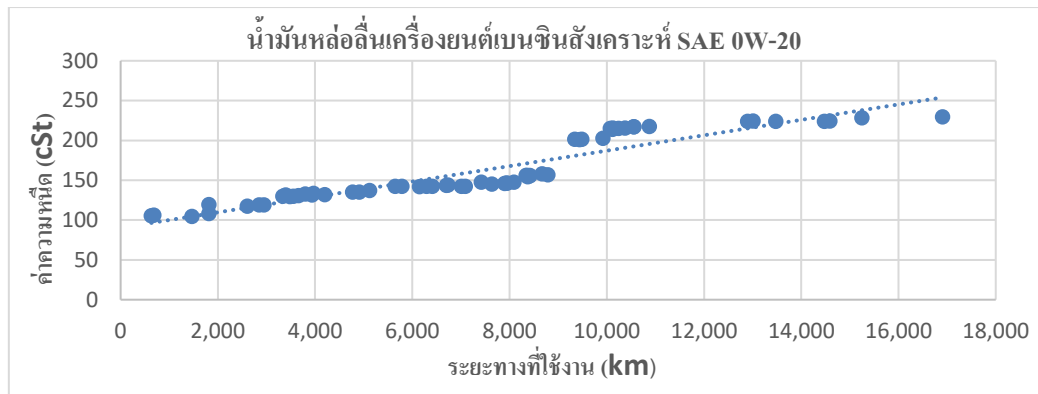
4.2 ผลการทดสอบ

จากการเก็บข้อมูลที่ศูนย์บริการรถยนต์นิสสันแห่งหนึ่ง ในช่วงวันที่ 11 มกราคม 2564 ถึง 30 เมษายน 2564 โดยทำการเก็บข้อมูลของรถยนต์ที่เข้ามาใช้บริการที่ศูนย์บริการ จำนวน 100 คัน ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลและจำนวนรถที่ทำการทดสอบเก็บข้อมูลจำนวนรวม 100 คัน

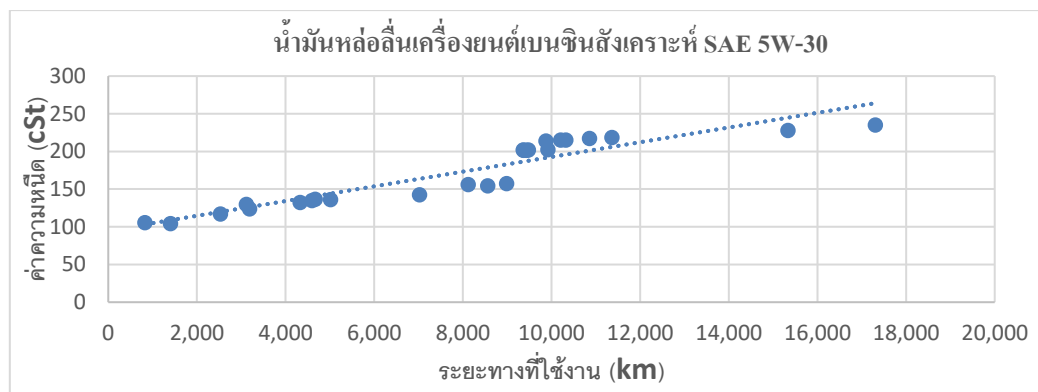
โมเดลรถ	เครื่องยนต์	ขนาดความจุกระบอกสูบ (cc)	จำนวน (คัน)
Nissan Almera	เบนซิน	1000-1200	38
Nissan Navara	ดีเซล	2500	14
Nissan March	เบนซิน	1200	13
Nissan X-Trail	เบนซิน	2000-2500	13
Nissan Teana	เบนซิน	2000-2500	8
Nissan Sylphy	เบนซิน	1600-1800	5
Nissan Note	เบนซิน	1200	5
Nissan Joox	เบนซิน	1600	2
Nissan Tida	เบนซิน	1600	1
Nissan Sunny Neo	เบนซิน	1600	1

จากจำนวนรถที่ทำการทดสอบเก็บข้อมูลจำนวนรวม 100 คัน เมื่อทำการจำแนกตามประเภทของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่พบว่ามียอดรถยนต์ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 0W-20 จำนวน 61 คัน รถยนต์ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 5W-30 จำนวน 25 คัน รถยนต์ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลสังเคราะห์ SAE 5W-30 จำนวน 8 คัน และรถยนต์ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลสังเคราะห์ SAE 10W-30 จำนวน 6 คัน ได้ผลการทดสอบค่าความหนืดที่อุณหภูมิห้อง (38°C) แสดงดังรูปที่ 7-10



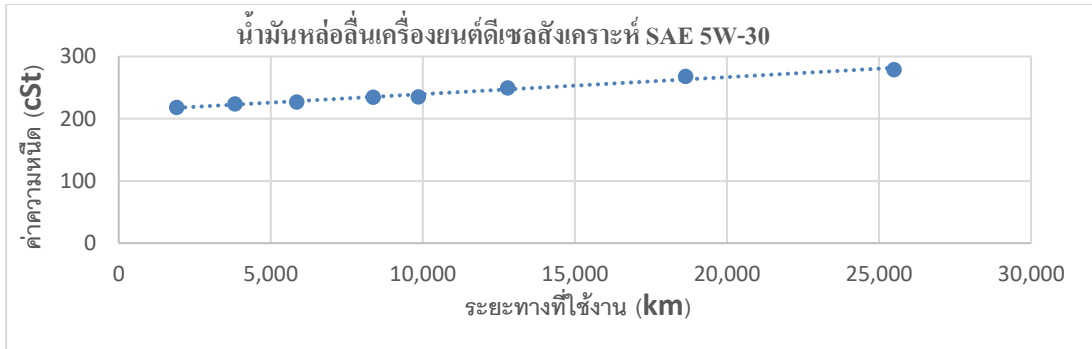
รูปที่ 7 แสดงค่าของความหนืดกับระยะทางการใช้งาน สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเบนซินสังเคราะห์ SAE 0W-20

พิจารณาจากรูปที่ 7 รถยนต์ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 0W-20 จำนวน 61 คัน มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 106 – 229.5 cSt โดยที่ระยะทางใช้งานสูงสุดที่ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีค่า 16,910 km และจากกราฟข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่าความหนืด (V: cSt) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะทางการใช้งานของรถยนต์ (D: km) จากการประมาณค่าสมการแนวโน้มโดยใช้สมการที่ 7-8 จะได้ความสัมพันธ์เป็น $V=90.37+0.0098D$



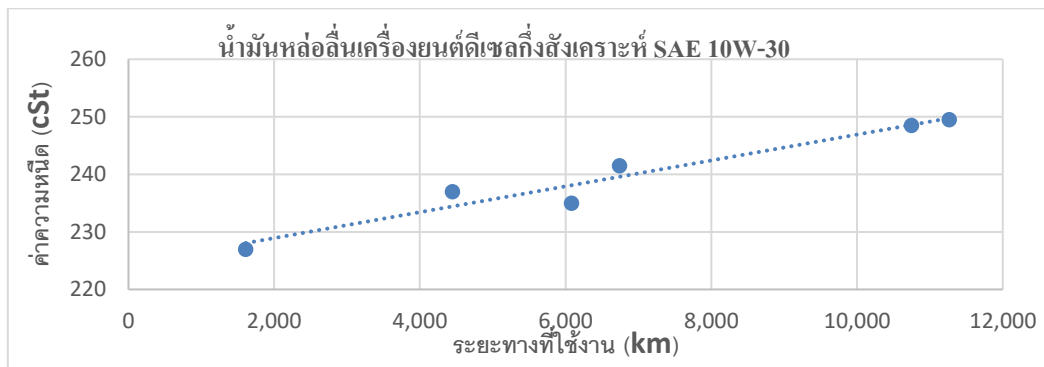
รูปที่ 8 แสดงค่าของความหนืดกับระยะทางการใช้งาน สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเบนซินสังเคราะห์ SAE 5W-30

พิจารณาจากรูปที่ 8 รถยนต์ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 5W-30 จำนวน 25 คัน มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 104.5 – 235 cSt โดยที่ระยะทางใช้งานสูงสุดที่ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีค่า 17,312 km และจากกราฟข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่าความหนืด (V: cSt) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะทางการใช้งานของรถยนต์ (D: km) จากการประมาณค่าสมการแนวโน้มโดยใช้สมการที่ 7-8 จะได้ ความสัมพันธ์เป็น $V=95.15+0.0098D$



รูปที่ 9 แสดงค่าของความหนืดกับระยะทางการใช้งาน สำหรับน้ำมันหล่อลื่นดีเซลสังเคราะห์ SAE 5W-30

พิจารณาจากรูปที่ 9 รถยนต์ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลสังเคราะห์ SAE 5W-30 จำนวน 8 คัน มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 218 – 279 cSt โดยที่ระยะทางใช้งานสูงสุด ที่ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีค่า 25,493 km และจากกราฟข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่าความหนืด (V: cSt) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะทางการใช้งานของรถยนต์ (D: km) จากการประมาณค่าสมการแนวโน้มโดยใช้สมการที่ 7-8 จะได้ ความสัมพันธ์เป็น $V=212.31+0.0027D$



รูปที่ 10 แสดงค่าของความหนืดกับระยะทางการใช้งาน สำหรับน้ำมันหล่อลื่นดีเซลกึ่งสังเคราะห์ SAE 10W-30

พิจารณาจากรูปที่ 10 รถยนต์ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลกึ่งสังเคราะห์ SAE 10W-30 จำนวน 6 คัน มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 227-249.5 cSt โดยที่ระยะทางใช้งานสูงสุด ที่ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีค่า 11,266 km และจากกราฟข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่าความหนืด (V: cSt) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะทางการใช้งานของรถยนต์ (D: km) จากการประมาณค่าสมการแนวโน้มโดยใช้สมการที่ 7-8 จะได้ความสัมพันธ์เป็น $V=224.86+0.0022D$

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการเก็บข้อมูลรถยนต์นิสสันจำนวนรวม 100 คัน โดยแบ่งเป็นรถยนต์ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 0W-20 จำนวน 61 คัน รถยนต์ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 5W-30 จำนวน 25 คัน รถยนต์ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลสังเคราะห์ SAE 5W-30 จำนวน 8 คัน และรถยนต์ที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลกึ่งสังเคราะห์ SAE 10W-30 จำนวน 6 คัน และจากกราฟข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่า

ความหนืด ($V: \text{cSt}$) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะทางการใช้งานของรถยนต์ ($D: \text{km}$) ทั้งนี้เมื่อทำการประมาณค่าสมการแนวโน้มโดยใช้สมการที่ 7-8 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 0W-20 มีความสัมพันธ์เป็น $V=90.37+0.0098D$

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 5W-30 มีความสัมพันธ์เป็น $V=95.15+0.0098D$

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลสังเคราะห์ SAE 5W-30 มีความสัมพันธ์เป็น $V=212.31+0.0027D$

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลกึ่งสังเคราะห์ SAE 10W-30 มีความสัมพันธ์เป็น $V=224.86+0.0022D$

เมื่อพิจารณาเกณฑ์ที่ศูนย์บริการรถยนต์ส่วนใหญ่ใช้สำหรับเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (ระยะทาง 10,000 km. สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์แบบสังเคราะห์ และ 7,500 km. สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์แบบกึ่งสังเคราะห์) และจากสมการประมาณค่าที่ได้สำหรับการใช้ค่าความหนืดเป็นเกณฑ์ในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์จะได้ค่าความหนืดดังนี้

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 0W-20 ควรเปลี่ยนเมื่อความหนืดสูงกว่า 188.37 cSt

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซินสังเคราะห์ SAE 5W-30 ควรเปลี่ยนเมื่อความหนืดสูงกว่า 193.15 cSt

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลสังเคราะห์ SAE 5W-30 ควรเปลี่ยนเมื่อความหนืดสูงกว่า 239.31 cSt

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลกึ่งสังเคราะห์ SAE 10W-30 ควรเปลี่ยนเมื่อความหนืดสูงกว่า 241.36 cSt

อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เป็นเกณฑ์ในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ควรมีการทดสอบเก็บตัวอย่างให้มากขึ้น (สำหรับบทความนี้ข้อมูลสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลมีจำนวนน้อย) และควรเก็บตัวอย่างของศูนย์บริการรถยนต์อื่นๆ เพื่อที่จะได้สมการประมาณค่าที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

ประเสริฐ เทียนนิมิตรและคณะ. (2559). *เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ด

มาตรฐานAPI. (2564). *API Standard* [ออนไลน์]. ค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2564, จาก: <https://www.api.org/products-and-services/standards>

Jean-Louis Ligier and Bruno Noel, *Friction Reduction and Reliability for Engines Bearings*, Lubricants 2015, 3(3), pp. 569-596.

Richard S. Figliola & Donald E. Beasley. (2015). *Theory and Design for Mechanical Measurement*, (6th ed.) John Wiley and Sons.



กลุ่มย่อยที่ 2
วิศวกรรมศาสตร์ (2)

**การลดปัญหาการส่งงานล่าช้าในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ของ
บริษัทผลิตเครื่องสำอาง: กรณีศึกษา**

**REDUCTION OF DELIVERY DELAYS IN PACKAGING RESEARCH AND
DEVELOPMENT DEPARTMENT IN COSMETIC COMPANY: CASE STUDY**

อภินทร์พร วรรณะกุลโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: apinporn.w@mail.kmutt.ac.th

อุษณีย์ คำพูล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: ussaneci.pur@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อลดปัญหาการส่งงานล่าช้าในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ของ บริษัทผลิตเครื่องสำอางกรณีศึกษา จากการศึกษาพบว่า ผลการประเมินดัชนีชี้วัดความสำเร็จรวมของแผนกในปี พ.ศ. 2563 ในหัวข้อการส่งเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้าล่วงหน้าก่อนการผลิต ได้ร้อยละ 90 ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ การประเมินที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 97 จึงได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยการวิเคราะห์เชิงปริมาณจาก การเก็บเวลาการทำงานจริงของพนักงาน และวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยใช้ Why-Why Analysis จากการวิเคราะห์ พบว่า วิธีการทำงานเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการส่งงานล่าช้า ในการปรับปรุงเพื่อกำหนดคู่มือการปฏิบัติงาน ได้ประยุกต์ใช้ใช้เครื่องมือ Process Activity Mapping และใช้หลักการ ECRS ซึ่งผลจากการปรับปรุง พบว่า สามารถลดเวลาขั้นตอนการทำงานจากเดิมใช้เวลาเฉลี่ยรวม 29,322 นาที ลดลงเหลือ 16,379 นาที คิดเป็นร้อยละ 44.14 ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสำเร็จ ได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 100 ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายกำหนด

คำสำคัญ: งานล่าช้า / เอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้า / ECRS / Process Activity Mapping / Why-Why Analysis

ABSTRACT

The objective of this study is to improve the packaging research and development department's workflow in a cosmetic company case study to reduce the problem of tardy deliveries. The study revealed that the results of the Key Performance Indicator assessment in 2020 in the issue of submission of pre-production finish goods specification document is equal to 90%, which is lower than the standard assessment criteria of 97 percent. Therefore, the cause of the problem was analyzed by quantitative analysis from collecting the actual working hours of the employees. and qualitative analysis using Why-Why Analysis. From the analysis, it was found that the work method was the main reason for the tardiness in submitting work. Improvement to define the operating manual has applied the Process Activity Mapping tool and applied the ECRS principle. It was

found that the time of the work process can be reduced from the original 29,322 minutes to an average of 16,379 minutes or 44.14%, resulting in an increase in the success index to 100%, which is higher than the target set.

Keywords: ECRS, Pre-Production Finish Goods Specification Document, Process Activity Mapping, Tardy Delivery, Why-Why Analysis

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอางเป็นอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มการเติบโตเพิ่มสูงขึ้น ทำให้บรรจุภัณฑ์สำหรับใส่เครื่องสำอางจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง โดยบริษัทกรณีศึกษาประกอบกิจการรับจ้างผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางครบวงจร และเป็นผู้นำด้านการผลิตเครื่องสำอางขนาดใหญ่ เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้สูงขึ้นขั้นตอนการพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่เครื่องสำอางจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ช่วยในเรื่องของการส่งเสริมการตลาด เป็นสิ่งแรกที่ผู้บริโภคสามารถมองเห็นได้ หากรูปลักษณะภายนอกของบรรจุภัณฑ์เครื่องสำอางมีความสวยงามก็จะช่วยทำให้สินค้าหรือผลิตภัณฑ์นั้นมีความโดดเด่นขึ้น ช่วยป้องกันผลิตภัณฑ์จากสภาวะสิ่งแวดล้อมภายนอก และรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ให้นานที่สุด

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการดำเนินงานของแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 - ธันวาคม 2563 พบว่าดัชนีชี้วัดความสำเร็จ (Key Performance Indicator) ด้านการทำงานของพนักงานไม่ผ่านเกณฑ์การประเมินในหัวข้อการจัดส่งเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้าไม่ทันตามเวลาที่กำหนด ซึ่งทำให้ส่งผลกระทบต่อแผนกผลิตทำให้เตรียมงานผลิตสินค้าไม่ทันตามเวลาที่กำหนด ส่งผลต่อการส่งมอบสินค้าให้ลูกค้าไม่ทันตามกำหนด และมีค่าปรับเกิดขึ้น จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงขั้นตอนการทำงานในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ โดยประยุกต์นำหลักการ ECRS มาใช้ในการปรับปรุงเพื่อให้พนักงานสามารถส่งเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้าได้ทันตามเวลาที่กำหนด และพนักงานผ่านเกณฑ์การประเมินด้านการทำงาน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อลดอัตราร้อยละของปัญหาที่ทำให้เกิดการส่งมอบงานล่าช้าในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์
- (2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Why-Why Analysis เป็นการวิเคราะห์หาเหตุรากเหง้าที่ทำให้เกิดปัญหาอย่างเป็นระบบ มีขั้นตอนไม่เกิดการตกหล่น โดยใช้ความคิดเชิงตรรกะ ไม่ใช่การคาดเดาหรือคิดไปเอง โดยระดมสมองผู้ที่เกี่ยวข้อง พนักงาน หัวหน้างาน เพราะเป็นผู้เข้าใจสถานการณ์ มาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุ จนพบสาเหตุรากเหง้าที่ทำให้เกิดปัญหานั้น [1]

3.2 Process Activity Mapping เป็นเครื่องมือในการศึกษากระบวนการไหลของกระบวนการ (Flow of Process) เพื่อทำการแยกแยะความสูญเสียที่มีในกระบวนการ โดยระบุลักษณะงานเป็น 4 แบบ ได้แก่ ปฏิบัติการ (Operation) การขนย้าย (Transportation) การตรวจสอบ (Inspection) การจัดเก็บ (Storage) และระบุลักษณะงาน

ทั้ง 4 แบบ ว่าเป็น กิจกรรมที่มีคุณค่าเพิ่ม (Value Added Activities) กิจกรรมที่ไม่มีคุณค่าเพิ่ม (Non- Value Added Activities) หรือกิจกรรมที่ไม่มีคุณค่าเพิ่มแต่จำเป็นต้องทำ (Non-Value Added but Necessary Activities) [2]

3.3 เทคนิค ECRS (Eliminate Combine Rearrange Simplify) หลักการปรับปรุงงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ประกอบด้วย E-Eliminate: กำจัดงานที่ไม่จำเป็นออก C-Combine: รวมการทำงานที่คล้ายคลึงเข้าด้วยกัน R-Rearrange: เปลี่ยนลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ S-Simplify: การทำให้การทำงานที่จำเป็นง่ายขึ้น [2]

3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิค Why-Why Analysis, Process Activity Mapping และ ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการทำงาน สามารถนำไปปรับใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ศศิศ หาญนามาภิไธย [3] ศึกษาการลดการสูญเสียเวลาในการวางแผนผลิตในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติกโดยใช้เทคนิค Process Activity Mapping และ ECRS สามารถลดเวลานำจาก 1,515 นาที เป็น 750 นาที คิดเป็นร้อยละ 50.5, พงศธร ตราโต [4] ปรับปรุงกำลังการผลิตของกระบวนการการผลิตลิฟต์โดยใช้หลักการ ECRS ปัจจุบันพบว่ากำลังการผลิตไม่เพียงพอต่อการสั่งซื้อ ผลการปรับปรุงสามารถลดรอบเวลาการทำงาน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตจากร้อยละ 83.5 เป็น 93.6, นพณิ วัฒนสังสุทธิ์ [5] ปรับปรุงกระบวนการบีบขึ้นรูปในอุตสาหกรรมขึ้นส่วนรถยนต์ พบว่าการติดตั้งแม่พิมพ์ใช้เวลา 8.18 นาที ซึ่งทำให้ปริมาณการผลิตได้ 422 ชิ้น/ชั่วโมง ไม่ถึง 450 ชิ้น/ชั่วโมง ตามแผนที่กำหนด ปรับปรุงวิธีการทำงานโดยใช้การศึกษาเทคนิคการตั้งคำถาม 5WHY และ ECRS สามารถลดเวลาการติดตั้งแม่พิมพ์จาก 8.18 นาที ลดลงเหลือ 5.51 นาที และปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 474 ชิ้น/ชั่วโมง, สติเทพ สังข์ทอง [6] ลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิตเค้กขึ้นสามเหลี่ยมด้วยเทคนิค ECRS ทำให้สามารถลดของเสียจากขั้นตอนการอบได้ร้อยละ 40 คิดเป็นมูลค่า 2,835 บาท/เดือน และลดความสูญเสียเปล่าจากผลิตภาพแรงงานร้อยละ 24.93 คิดเป็นมูลค่า 234,960 บาท/เดือน จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ใช้เทคนิค ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการ ซึ่งงานวิจัยทั้งหมดสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ ลดเวลาในกระบวนการทำงานและเพิ่มความสามารถกระบวนการผลิตหลังการปรับปรุงได้

4. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

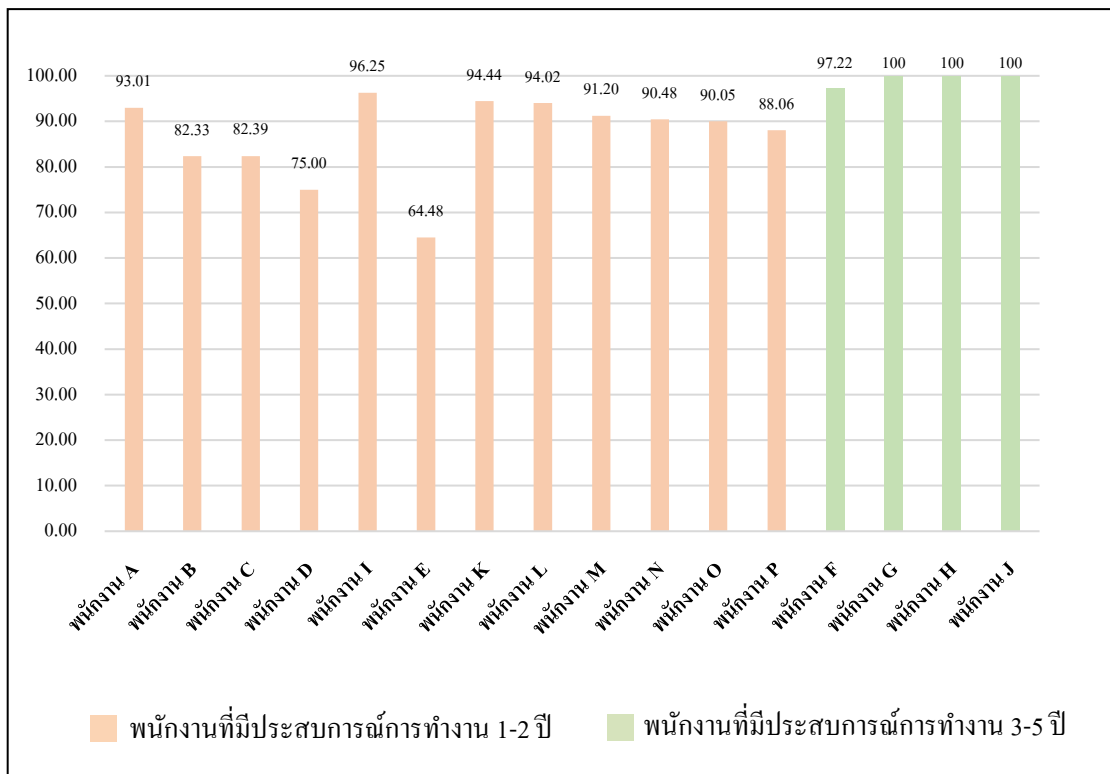
4.1 ศึกษาสภาพปัจจุบันของปัญหา

การทำงานในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์จะเป็นการทำงานแบบแบ่งตามโปรเจกต์สินค้าและลูกค้าที่ดูแล มีขั้นตอนการทำงานแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนหลัก ในแต่ละขั้นตอนหลักจะประกอบไปด้วยกิจกรรมย่อยในการทำงาน และเป็นการทำงานแบบเรียงลำดับ (sequence) คือจะทำงานในขั้นตอนต่อไปได้ก็ต่อเมื่องานขั้นตอนแรกเสร็จแล้วเท่านั้น จากการศึกษาการทำงานและเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 พบว่าผลกระทบการประเมินดัชนีชี้วัดความสำเร็จรวมของพนักงานทั้งหมดจำนวน 16 คนในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ในหัวข้อการส่งเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้าล่วงหน้าก่อนการผลิตไม่ผ่านเกณฑ์การประเมิน ซึ่งได้ร้อยละ 90 จากที่ตั้งเป้าหมายคือร้อยละ 97 ดังตารางที่ 1 จึงได้วิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 1 ดัชนีวัดความสำเร็จด้านการทำงานของพนักงาน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อตัวชี้วัด	เป้าหมาย พ.ศ. 2563	เดือน												ร้อยละ	สถานะ	
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.			
ข้อร้องเรียน จากลูกค้า	≤ 0.3	0	0	0	0	0	3.13	0	0	0	0	0	0	0	0.26	ผ่าน
ออกแบบตรงตามข้อกำหนด	≥ 97	89.22	100	98.75	100	98.26	96.88	99.11	99.31	100	93.75	98.44	93.75	97.29	ผ่าน	
ส่งเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้าล่วงหน้าก่อนการผลิต	≥ 97	91.96	92.50	88.46	89.47	90.46	89.06	95.94	93.23	93.53	88.65	90.92	78.14	90.19	ไม่ผ่าน	
ข้อร้องเรียนภายในจากหน่วยงานอื่น	≤ 1	0	0	0	7.50	0	0	0	3.13	0	0	0	0	0.89	ผ่าน	

จากการวิเคราะห์ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 พบว่ามีทั้งพนักงานที่ได้ดัชนีชี้วัดความสำเร็จน้อยกว่าและมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 97 ทั้งนี้ความแตกต่างของพนักงานทั้งสองกลุ่มมีประเด็นหลักเป็นเรื่องของประสิทธิภาพการทำงาน ดังรูปภาพที่ 1



รูปที่ 1 ดัชนีชี้วัดความสำเร็จเฉลี่ยรวมทั้ง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ของพนักงานที่มีประสบการณ์ 1-2 ปี จำนวน 12 คน และพนักงานที่มีประสบการณ์การทำงาน 3-5 ปี จำนวน 4 คน

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพนักงานที่มีประสิทธิภาพการทำงาน 1-2 ปี จำนวน 12 คน ไม่สามารถผ่านเกณฑ์การประเมิน และพนักงานที่มีประสิทธิภาพการทำงาน 3-5 ปี จำนวน 4 คน สามารถผ่านเกณฑ์การประเมินที่ร้อยละ 97 จากนั้นได้ดำเนินการเก็บข้อมูลเวลาการทำงานจริงในทุกขั้นตอนการทำงานของพนักงานทั้ง 2 กลุ่ม

4.2 วิเคราะห์สภาพของปัญหา

วิเคราะห์ถึงสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น โดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

1) **วิเคราะห์เชิงปริมาณ** โดยการเก็บเวลาการทำงานจริงของพนักงานทุกคน จำนวน 16 คน ทำการจับเวลาโดยอยู่ภายใต้การประยุกต์ใช้หลักการประมาณค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 2

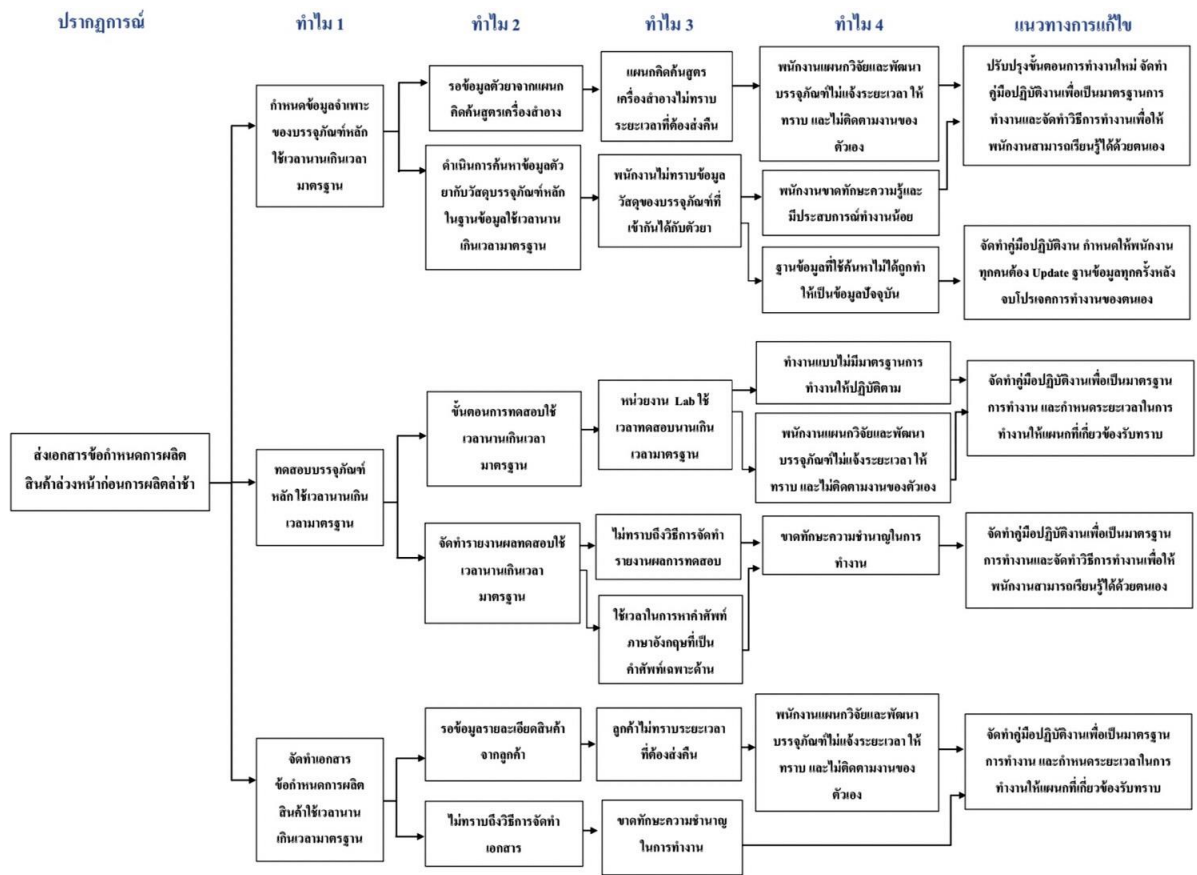
ตารางที่ 2 เวลาการทำงานจริงของพนักงานที่มีประสิทธิภาพทำงาน 1-2 ปี และประสิทธิภาพการทำงาน 3-5 ปี

ขั้นตอนการทำงานหลัก	เวลามาตรฐาน (นาทีก)	เวลาการทำงานจริง (นาทีก)			
		ประสิทธิภาพ 1-2 ปี		ประสิทธิภาพ 3-5 ปี	
		ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1. กำหนดข้อมูลเฉพาะของบรรจุภัณฑ์หลัก	1,440	2,554	168.18	818	98.12
2. ส่งทดสอบบรรจุภัณฑ์หลัก	4,800	7,771	291.83	4,021	227.54
3. กำหนดข้อผิดพลาดของบรรจุภัณฑ์รอง	240	177	26.88	163	1.5
4. ส่งทดสอบบรรจุภัณฑ์รอง	3,120	2,471	13.11	2,468	11.09
5. ทดสอบความเข้ากันได้ของบรรจุภัณฑ์หลัก และตัวยา	11,340	10,766	31.71	10,773	31.38
6. ออกรหัสสำเร็จ รหัสบรรจุภัณฑ์ และทำ การสร้าง BOM ของสินค้าสำเร็จรูป	1,920	1,031	6.40	1,024	4.08
7. จัดทำเอกสารเปิดสินค้าใหม่	960	788	70.67	745	17.32
8. จัดทำเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้า	2,400	3,764	190.63	1,363	153.53
รวม	26,220	29,322	799.41	21,375	544.56

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าในขั้นตอนการทำงานที่ 1, 2 และ 8 กลุ่มพนักงานที่มีประสิทธิภาพการทำงาน 1-2 ปี จำนวน 12 คนใช้เวลาการทำงานเกินกว่าเวลามาตรฐาน และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำงานของแต่ละคนมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับกลุ่มพนักงานที่มีประสิทธิภาพการทำงาน 3-5 ปี ที่ใช้เวลาการทำงานแตกต่างกันไม่มากนัก

2) วิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยใช้หลักการ Why-Why Analysis

เพื่อต้องการทราบสาเหตุของปัญหาการทำงานของพนักงานที่มีประสิทธิภาพการทำงาน 1-2 ปี ที่แท้จริงเป็นอย่างไร จึงได้มีการรวบรวมบุคลากรที่เกี่ยวข้องที่มีประสิทธิภาพการทำงาน โดยตรง ทั้งนี้มีทั้งพนักงาน พนักงานระดับ 1 พนักงานระดับ 2 หัวหน้าแผนก และผู้จัดการแผนก มาทำการวิเคราะห์สาเหตุ โดยใช้ความคิดเชิงตรรกะ ไม่ใช่การคาดเดาหรือคิดไปเอง เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้ถึงรากเหง้าของปัญหาอย่างมีหลักเกณฑ์ และเป็นระบบ มีขั้นตอนและมีเหตุผล ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ Why-Why Analysis

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุโดยใช้ Why-Why Analysis พบว่าในขั้นตอนการทำงานในปัจจุบันไม่มีคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Manual) เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงาน และไม่มีวิธีการทำงานในกิจกรรมการจัดทำเอกสารที่สำคัญต่าง ๆ ทำให้พนักงานที่มีประสบการณ์ 1-2 ปี ไม่มีต้นแบบที่ใช้ในการทำงาน ที่ให้สามารถศึกษาด้วยตัวเองได้ ดังนั้นสามารถสรุปแนวทางการแก้ไขปัญหาดังนี้

1. ประชุกต์ใช้หลักการ ECRS เข้ามาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการขั้นตอนการทำงาน
2. จัดทำคู่มือการปฏิบัติงานเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงาน และจัดทำวิธีการทำงานให้พนักงานสามารถศึกษาได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากการทำงานในปัจจุบันไม่มีคู่มือการปฏิบัติงาน และวิธีการทำงานที่กำหนดเป็นมาตรฐาน แต่เกิดจากการสอนงานจากพนักงานที่มีประสบการณ์มากกว่าสอนต่อกันมาเรื่อย ๆ

4.3 การดำเนินการปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน

นำเวลาการทำงานจริงของพนักงานที่มีประสบการณ์ทำงาน 1-2 ปี ที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์มาวิเคราะห์ผ่านแผนภาพการไหล (Process Activity Mapping) เท่านั้น เนื่องจากเป็นกลุ่มพนักงานที่ไม่สามารถผ่านเกณฑ์การประเมินที่ร้อยละ 97 และทำงานเกินเวลามาตรฐาน โดยวิเคราะห์ถึงคุณค่าของงานและความสูญเสียในกระบวนการทำงาน โดยจำแนกคุณค่าของงานออกเป็นกิจกรรมที่เพิ่มคุณค่า กิจกรรมที่ไม่เพิ่ม และกิจกรรมที่จำเป็นต้องทำแต่ไม่เพิ่ม มีหลักเกณฑ์การการระบุลักษณะงานคือ กิจกรรมที่มีคุณค่าเพิ่มมาจากการปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ใช่ทุกปฏิบัติการจะมีคุณค่าเพิ่ม กิจกรรมการขนย้าย การตรวจสอบ และการเก็บ อาจจะเป็นกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าเพิ่ม หรือกิจกรรมที่ไม่มีคุณค่าเพิ่มแต่จำเป็นต้องทำโดยจะใช้ขั้นตอนการทำงานหลักที่ 1 แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการทำ Process Activity Mapping ของขั้นตอนการทำงานหลักที่ 1

ลำดับ	กิจกรรมในขั้นตอนการทำงาน	เวลา (นาที)	Operation	Transport	Inspection	Storage
			○	➡	□	△
1.	จัดทำเอกสารขอข้อมูลรายละเอียดตัวยาเพื่อให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางกรอกข้อมูลรายละเอียดตัวยา	15	NNVA			
2.	ส่งเอกสารผ่านทาง อีเมลให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง	10		NNVA		
3.	รอคอยเอกสารตอบกลับจากทางแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง	1,580				NVA
4.	ตรวจสอบข้อมูลความเสี่ยงของตัวยา	28			NNVA	
5.	ดำเนินการค้นหาข้อมูลเรื่องการเข้ากันได้ของตัวยากับวัสดุบรรจุภัณฑ์หลักที่ฐานข้อมูล	853	VA			
6.	กำหนดวัสดุและขนาดของบรรจุภัณฑ์หลัก	55	VA			
7.	ส่งข้อมูลให้แผนกจัดหาทางอีเมลเพื่อขอชิ้นงานบรรจุภัณฑ์หลักจากร้านค้าเพื่อนำมาทดสอบ	13		NNVA		
	รวม	2,554	923	23	28	1,580
	VA	908	908	0	0	0
	NVA	1,580	0	0	0	1,580
	NNVA	66	15	23	28	0

หมายเหตุ :

Operation ○ Transportation ➡ Inspection □ Storage/Waiting △

หลังจากที่ทำการทำ Process Activity Mapping แล้ว ทำให้ทราบว่าเวลาการทำงานที่ใช้ไปในแต่ละกิจกรรม เพื่อดูว่าใช้เวลาไปกับกิจกรรมที่มีคุณค่าเพิ่ม ไม่มีคุณค่าเพิ่ม และกิจกรรมที่ไม่มีคุณค่าเพิ่มแต่จำเป็นต้องทำมาน้อยเพียงใด หลังจากนั้นประยุกต์ใช้หลักการ ECRS มาปรับปรุงขั้นตอนการทำงานในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ จมิแนวทางการปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน ดังแสดงตัวอย่างของขั้นตอนการทำงานหลักที่ 1 ดังนี้

(1) การกำจัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น (Eliminate)

กำจัดกิจกรรมการจัดทำเอกสารขอข้อมูลตัวยา กิจกรรมการส่งเอกสารทางอีเมลให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง เพื่อสามารถกำจัดกิจกรรมการรอคอยเอกสารตอบกลับจากทางแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางได้ เนื่องจากเอกสารขอข้อมูลตัวยาเป็นเอกสารที่ไม่จำเป็นต้องให้แผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์เป็นผู้เริ่มจัดทำ แต่แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง สามารถเป็นผู้เริ่มจัดทำได้เลย

(2) การรวมขั้นตอนการทำงาน (Combine)

ในขั้นตอนนี้ไม่มีกิจกรรมใดที่สามารถใช้หลักการรวมขั้นตอนการทำงานได้ จึงจำเป็นต้องนำหลักการ ECRS ในส่วนอื่นๆ มาใช้ในการปรับปรุงต่อไป

(3) การจัดขั้นตอนการทำงานใหม่ (Rearrange)

หลังจากที่ได้กำจัดกิจกรรมการจัดทำเอกสารขอข้อมูลตัวยา กิจกรรมการส่งเอกสารทางอีเมลให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง และกิจกรรมการรอคอยเอกสารตอบกลับจากทางแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางออกไปแล้ว ลำดับต่อมาจัดขั้นตอนการทำงานใหม่โดยจากเดิมหลังจากที่ทางแผนกติดต่อลูกค้าทราบข้อมูลจากลูกค้าว่า สินค้าจะได้ออกขาย ก็จะดำเนินการส่งข้อมูลรายละเอียดสินค้า และความต้องการของลูกค้ามาให้ทางแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ เพื่อดำเนินการต่อ และหลังจากนั้นทางแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์จะจัดทำเอกสารขอข้อมูลรายละเอียดตัวยาส่งให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง ใส่ข้อมูลรายละเอียดตัว ซึ่งโดยปกติแล้ว

ทางแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางจะให้ข้อมูลด้วยตัวยาหลังจากทราบว่าสินค้าจะได้ออกขายจากทางแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ ซึ่งขั้นตอนการทำงานแบบเดิมนี่เป็นขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อนในเรื่องเอกสารที่ต้องส่งไปมา และใช้ระยะเวลาที่นาน เนื่องจากการทำงานแบบเดิมไม่มีการแจ้งวัน เวลา ที่ต้องการข้อมูล และไม่มีการกำหนดมาตรฐานการทำงานที่ให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางรับทราบ จึงได้จัดขั้นตอนการทำงานใหม่ โดยให้ทางแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางส่งข้อมูลรายละเอียดสินค้า และความต้องการของลูกค้ามาทางอีเมลหลังจากทราบว่าสินค้าจะได้ออกขายให้ทางแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ และแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางพร้อมกัน หลังจากที่ทางแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางรับทราบว่าสินค้าจะได้ออกขาย ก็สามารถจัดทำเอกสารข้อมูลรายละเอียดด้วย และจัดส่งเอกสารมาทางอีเมลให้แผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ได้เลย โดยไม่ต้องรอให้แผนกวิจัยและบรรจุภัณฑ์ส่งเอกสารไปให้

(4) การปรับปรุงขั้นตอนการทำงานให้ง่ายขึ้น (Simplify)

ในขั้นตอนการกำหนดข้อมูลจำเพาะของบรรจุภัณฑ์หลัก มีกิจกรรมการค้นหาฐานข้อมูลเรื่องการเข้ากันได้ของตัวยากับวัสดุบรรจุภัณฑ์หลัก พบว่าพนักงานที่มีประสบการณ์การทำงาน 1-2 ปี จะใช้เวลาในการค้นหาฐานข้อมูล ประมาณ 853 นาที หรือประมาณ 2 วัน (1 วันเท่ากับ 8 ชั่วโมง หรือ 480 นาที) เนื่องจากฐานข้อมูลในปัจจุบัน ไม่ได้มีการทำให้เป็นปัจจุบัน ทำให้ต้องใช้วิธีการสอบถามพนักงานที่มีประสบการณ์การทำงานมากกว่าซึ่งทำให้เกิดการใช้เวลาที่มากขึ้น และมีรูปแบบการใช้งาน หรือการหาข้อมูลที่เข้าถึงยาก จึงได้นำหลักการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานให้ง่ายขึ้นมาใช้ในการปรับปรุง โดยทำการปรับปรุงรูปแบบของฐานข้อมูลใหม่ให้ใช้งานง่ายขึ้น เข้าถึงง่าย จัดทำข้อมูลให้เป็นปัจจุบัน และกำหนดเป็นมาตรฐานการทำงานเมื่อหลังจากจบงานของแต่ละสินค้าพนักงานทุกคนต้องมาใส่ข้อมูลในฐานข้อมูลนี้ โดยจะมีการตรวจสอบทุกสองสัปดาห์ เพื่อให้พนักงานทุกคนปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด จึงได้ทำการจัดทำคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Manual) สำหรับทุกขั้นตอนการทำงานไว้ทั้ง 8 ขั้นตอนการทำงานหลัก เพื่อกำหนดมาตรฐานการทำงานให้เป็นระบบ กำหนดระยะเวลามาตรฐานในการทำงานแต่ละขั้นตอน และระบุถึงผลกระทบถ้าไม่สามารถทำงานได้ตามเวลา มาตรฐานให้พนักงานทุกคนยึดถือ และปฏิบัติตาม ไม่ว่าจะเป็นพนักงานในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ และแผนกอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องรับทราบ เพื่อยึดถือและปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด

4.4 วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

จากการปรับปรุงกระบวนการขั้นตอนการทำงานทำให้ได้ขั้นตอนการทำงานใหม่ ซึ่งแสดงตัวอย่างขั้นตอนการทำงานหลักที่ 1 ก่อนการปรับปรุง และหลังการปรับปรุง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เวลาการทำงานในขั้นตอนการทำงานหลักที่ 1 ก่อนการปรับปรุง และหลังการปรับปรุง

ลำดับ	กิจกรรมในขั้นตอนการทำงาน	ก่อนการปรับปรุง		กิจกรรมในขั้นตอนการทำงาน	หลังการปรับปรุง	
		เวลาการทำงานจริง (นาที)			เวลาการทำงานจริง (นาที)	
		ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.	จัดทำเอกสารขอข้อมูลรายละเอียดตัวยา เพื่อให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง กรอกข้อมูลรายละเอียดตัวยา	15	0.74	จัดทำเอกสารขอข้อมูลรายละเอียดตัวยาเพื่อให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอางกรอกข้อมูลรายละเอียดตัวยา	15	0.74
2.	ส่งเอกสารผ่านทางอีเมลให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง	10	0	ส่งเอกสารผ่านทางอีเมลให้แผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง	10	0
3.	รอคอยเอกสารตอบกลับจากทางแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง	1,580	160.45	รอคอยเอกสารตอบกลับจากทางแผนกคิดค้นสูตรเครื่องสำอาง	1,580	160.45
4.	ตรวจสอบข้อมูลความเสี่ยงของตัวยา	28	4.52	ตรวจสอบข้อมูลความเสี่ยงของตัวยา	28	4.52
5.	ค้นหาฐานข้อมูลเรื่องการเข้ากันได้ของตัวยากับวัสดุบรรจุภัณฑ์หลัก	853	119.63	ค้นหาฐานข้อมูลเรื่องการเข้ากันได้ของตัวยากับวัสดุบรรจุภัณฑ์หลัก	155	30.90
6.	กำหนดวัสดุและขนาดของบรรจุภัณฑ์หลัก	55	7.22	กำหนดวัสดุและขนาดของบรรจุภัณฑ์หลัก	55	7.22
7.	ส่งข้อมูลให้แผนกจัดหาทางอีเมลเพื่อขอชิ้นงานบรรจุภัณฑ์หลักจากร้านค้าเพื่อนำมาทดสอบ	13	2.57	ส่งข้อมูลให้แผนกจัดหาทางอีเมลเพื่อขอชิ้นงานบรรจุภัณฑ์หลักจากร้านค้าเพื่อนำมาทดสอบ	13	2.57
เวลาทำงานรวม		2,554	168.18	เวลาทำงานรวม	251	34.23

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการขั้นตอนการทำงานที่ 1 ที่แสดงเพื่อเป็นตัวอย่าง สามารถลดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นออกไปได้ ส่งผลทำให้เวลาการทำงานรวมในขั้นตอนที่ 1 ลดลงจาก 2,554 นาที ลดลงเหลือ 251 นาที

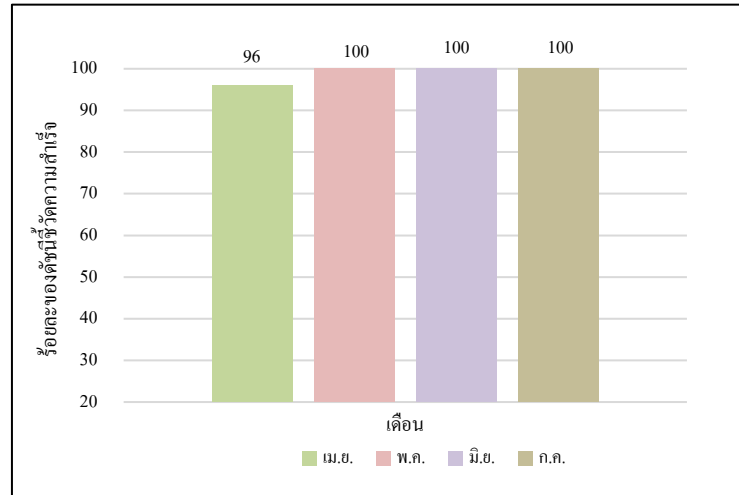
5. ผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS มาปรับปรุงการทำงานทั้ง 8 ขั้นตอน พบว่าหลังการปรับปรุงตั้งแต่เดือนเมษายนถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564 กลุ่มพนักงานที่มีประสบการณ์การทำงาน 1-2 ปี จำนวน 12 คน ใช้เวลาการทำงานที่ลดลง เปรียบเทียบเวลาการทำงานที่ลดลงก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบเวลาการทำงานก่อนการปรับปรุงและการปรับปรุง

ขั้นตอนการทำงานหลัก	เวลามาตรฐาน (นาที)	เวลาการทำงานจริง (นาที)			
		ก่อนการปรับปรุง		หลังการปรับปรุง	
		ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1. กำหนดข้อมูลจำเพาะของบรรจุภัณฑ์หลัก	1,440	2,554	168.18	251	34.23
2. ส่งทดสอบบรรจุภัณฑ์หลัก	4,800	7,771	291.83	3,892	216.82
3. กำหนดข้อมูลจำเพาะของบรรจุภัณฑ์รอง	240	177	26.88	210	12.65
4. ส่งทดสอบบรรจุภัณฑ์รอง	3,120	2,471	13.11	2,209	11.97
5. ทดสอบความเข้ากันได้ของบรรจุภัณฑ์หลักและตัวยา	11,340	10,766	31.71	7,423	14.85
6. ออกรหัสสำเร็จ รหัสบรรจุภัณฑ์ และทำการสร้าง BOM ของสินค้าสำเร็จรูป	1,920	1,031	6.40	1,031	6.40
7. จัดทำเอกสารเปิดสินค้าใหม่	960	788	70.67	788	70.67
8. จัดทำเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้า	2,400	3,764	190.63	575	119.42
รวม	26,220	29,322	799.41	16,379	487.01

จากเวลาการทำงานที่ลดลง จึงส่งผลกระทบต่อพนักงานสามารถส่งเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้าได้ตามเวลาที่กำหนด และส่งผลทำให้เกณฑ์การประเมินดัชนีชี้วัดความสำเร็จเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ดัชนีชี้วัดความสำเร็จเฉลี่ยรวมหลังการปรับปรุง ตั้งแต่เดือนเมษายนจนถึงกรกฎาคม พ.ศ. 2564 ของพนักงานที่มีประสิทธิภาพการทำงาน 1-2 ปี

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าในช่วงเดือนเมษายน พนักงานยังมีดัชนีชี้วัดความสำเร็จไม่ถึงร้อยละ 97 เนื่องจากเป็นช่วงการเปลี่ยนจากขั้นตอนการทำงานแบบเดิม มาสู่ขั้นตอนการทำงานใหม่ จึงทำให้ในช่วงเดือนนี้ พนักงานบางคนยังไม่ค่อยเข้าใจขั้นตอนการทำงานแบบใหม่ในบางขั้นตอน แต่หลังจากที่ได้มีการแนะนำและพูดคุย ทำให้ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564 มีดัชนีชี้วัดความสำเร็จเพิ่มขึ้นจนถึง ร้อยละ 100 ซึ่งมากกว่าที่ตั้งเป้าหมายไว้ที่ร้อยละ 97 ส่งผลทำให้ผ่านเกณฑ์การประเมินดัชนีชี้วัดความสำเร็จในหัวข้อการส่งเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้าล่วงหน้าก่อนการผลิตได้

6. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการหาแนวทางในการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานในแผนกวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ในบริษัทผลิตเครื่องสำอางเคมีศึกษา โดยการศึกษาการทำงาน นำ Why-Why Analysis มาใช้ในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและหาแนวทางในการแก้ไข ศึกษาขั้นตอนการทำงาน โดยใช้เครื่องมือ Process Activity Mapping และปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน โดยการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS จากการปรับปรุงตามแนวทางดังกล่าว พบว่าสามารถจัดทำขั้นตอนการทำงานใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยกำจัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นรวมขั้นตอนการทำงานเข้าด้วยกัน จัดขั้นตอนการทำงานใหม่ และจัดทำคู่มือปฏิบัติงานให้พนักงาน หลังจากการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานพบว่าสามารถลดเวลาขั้นตอนการทำงานจากเดิมใช้เวลาเฉลี่ยรวม 29,322 นาที ลดลงเหลือ 16,379 นาที คิดเป็นร้อยละ 44.14 และพนักงานที่มีประสิทธิภาพการทำงาน 1-2 ปี สามารถส่งเอกสารข้อกำหนดการผลิตสินค้าได้ตามเวลาที่กำหนด และเกณฑ์การประเมินดัชนีชี้วัดความสำเร็จได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 100 ส่งผลทำให้ผ่านเกณฑ์การประเมินที่ตั้งเป้าหมายร้อยละ 97 ได้

7. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษาที่ได้นำหลักการเทคนิคทางวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา เสนอแนวทางในการแก้ปัญหา และแก้ไขปัญหายังเป็นระบบ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานลักษณะอื่น เพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการอื่นๆ ที่สนใจได้

8. เอกสารอ้างอิง

ฐาตุร พิชิตสุรกิจ. (2554). การลดอาการเคลมชิ้นงานไม่ได้ขนาดจากกระบวนการออกแบบในหน่วยงานต้นแบบ.

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นพมณี วัฒนสังข์สุข. (2562). ปรับปรุงกระบวนการป้อนชิ้นรูปในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์. วิทยานิพนธ์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีพระนครเหนือ.

พงศธร ตราโต. (2557). ปรับปรุงกำลังการผลิตของกระบวนการการผลิตลิฟต์โดยใช้หลักการ ECRS. วิทยานิพนธ์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ศศิศ หาญนามาภิไธย. (2553). การลดการสูญเสียเวลาในการวางแผนผลิตในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติก.

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สถิตเทพ สังข์ทอง. (2564). การลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตเค้กชั้นสามเหลี่ยมด้วยเทคนิค ECRS.

หนังสือประมวลบทความวิชาการงานประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 39 ประจำปี

2564, วันที่ 5-7 พฤษภาคม 2564 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, 549-554.

สุวรรณางามศิลป์. (2563). การจัดสมดุลสายการผลิตของกระบวนการถอดแยกชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

**ระยะตรวจจับสูงสุดและความสว่างต่ำสุด ในการติดตั้งระบบสายพานลำเลียง
สำหรับคัดแยกโลหะ อโลหะและการคัดแยกสี**

**THE MAXIMUM SPACING DETECTOR AND THE LOWEST LUMINANCE
IN SETTING UP OF BELT CONVEYOR SYSTEM FOR SORTING METAL
NON-METAL AND COLOR RECOGNITION**

**เอกชัย ดีศิริ, ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี, พศวีร์ ศรีโหมด และ เดิมพงษ์ ศรีเทศ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
61 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์ 0-2579-1111
E-mail: akekachai.de@spu.ac.th**

บทคัดย่อ

ชุดสาธิตเครื่องคัดแยกวัสดุประเภทโลหะ อโลหะและสี มีการใช้งานร่วมกับสายพานลำเลียง โดยจะทำงานอยู่ภายใต้การควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ โดยใช้โปรแกรมคำสั่งที่ทำหน้าที่เหมือนวงจรรีเลย์ ถูกใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักร ทำให้เครื่องจักรทำงานได้โดยอัตโนมัติ โดยระบบจะตรวจจับวัตถุที่เป็นโลหะ อโลหะด้วยฟร็อกซิมีตี้เซนเซอร์ ระยะในการตรวจจับวัตถุที่เป็นโลหะไม่ควรเกิน 29 เซนติเมตร และอโลหะไม่ควรเกิน 18 เซนติเมตร จากนั้นจะคัดแยกสีเหลือง สีแดง และสีน้ำเงินด้วยการใช้ตัวตรวจรู้แบบไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์ ซึ่งการทดสอบการตรวจและคัดแยกสี กระทำภายใต้สภาวะที่ควบคุมแสงรบกวนจากภายนอกในที่มีความสว่าง 3,291 LUX แบบปิดทึบ ทำให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ จากผลการทดลองพบว่าที่ได้จากเซนเซอร์ R G B มีระยะความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ดังนี้ วัตถุที่เป็นโลหะ เซนเซอร์ R G B เมื่อทดสอบกับชิ้นงานสี Yellow Red Blue จะมีค่า 37.1 ± 0.32 , 59.9 ± 1.65 , 264.2 ± 4.24 (เซนเซอร์ R), 47 ± 0.47 , 182.4 ± 2.99 , 138.2 ± 1.03 (เซนเซอร์ G) และ 71.5 ± 1.96 , 125 ± 1.15 , 57.3 ± 1.95 (เซนเซอร์ B) และเมื่อเป็นวัตถุอโลหะ ผลการทดสอบเซนเซอร์ R G B กับชิ้นงานสี Yellow Red Blue จะมีค่า 37 ± 0.47 , 57.6 ± 2.76 , 277.6 ± 4.12 (สำหรับเซนเซอร์ R), 46.6 ± 2.01 , 180.6 ± 1.26 , 137.7 ± 2.98 (สำหรับเซนเซอร์ G) และ , 71.7 ± 2.79 , 121.6 ± 2.83 , 54.3 ± 2.63 (สำหรับเซนเซอร์ B)

คำสำคัญ : โปรแกรมเมเบิลคอนโทรลเลอร์, การคัดแยกโลหะ, การคัดแยกอโลหะ, การคัดแยกสี

ABSTRACT

The metal, non-metal and color sorting machine demonstration unit is used in conjunction with a conveyor belt. It will operate under the control of a programmable controller by using a program that acts like a relay circuit It is used in industrial applications to increase the efficiency of the machine. make the machine work automatically. The system will detect metal, non-metals object with proximity sensors. The detection distance of

metal objects should not exceed 29 centimeters and non-metals should not exceed 18 centimeters. The yellow, red, and blue specimens are then isolated using a microcontroller sensor and a programmable controller. which the testing and color sorting under controlled ambient light conditions at 3,291 LUX. The result are accurate value with low standard deviations. From the experimental results, it was found that the error obtained from the RGB sensor has a small tolerance as follows, Metal object RGB sensor when tested on Yellow Red Blue color specimens are 37.1 ± 0.32 , 59.9 ± 1.65 , 264.2 ± 4.24 (R sensor), 47 ± 0.47 , 182.4 ± 2.99 , 138.2 ± 1.03 (G sensor) and 71.5 ± 1.96 , 125 ± 1.15 , 57.3 ± 1.95 (B sensor) and when it is a non-metallic object. RGB sensor test results with yellow red blue specimens are 37 ± 0.47 , 57.6 ± 2.76 , 277.6 ± 4.12 (for R sensor), 46.6 ± 2.01 , 180.6 ± 1.26 , 137.7 ± 2.98 (for G sensor), and, 71.7 ± 2.79 , 121.6 ± 2.83 , 54.3 ± 2.63 (for sensor B).

Keywords : Programmable Controller, Metal Sorting, Non-Metal Sorting, Color Sorting

1. บทนำ

การพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศไทยระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากความรวดเร็วในการขยายตัวนี้เองบางทีก่อให้เกิดปัญหาขึ้นได้ ทั้งนี้ก็เพราะผู้ผลิตมักสนใจกับการขยายการผลิตเพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้มองถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต การใช้ระบบการขนถ่ายลำเลียงวัสดุก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของการผลิต การขนถ่ายลำเลียงเป็นการขนส่งของจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ในเวลาที่ที่นั่นต้องการอยู่ในลักษณะของคุณภาพที่ต้องการ ซึ่งอาจเป็นการลำเลียงวัตถุดิบต่างๆ เข้าสู่ขบวนการแปรรูปออกมาเป็นสินค้าและมีการขนถ่ายลำเลียงสินค้าที่ผลิตได้เข้าไปเก็บที่โกดังก่อน 70 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นเวลาที่วัสดุเคลื่อนที่ไปกับการขนถ่าย ส่วนอีกประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นเวลาของการผลิตสินค้าขบวนการอื่นๆ ฉะนั้นการขนถ่ายวัสดุจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการผลิตสินค้าแต่ละชนิด

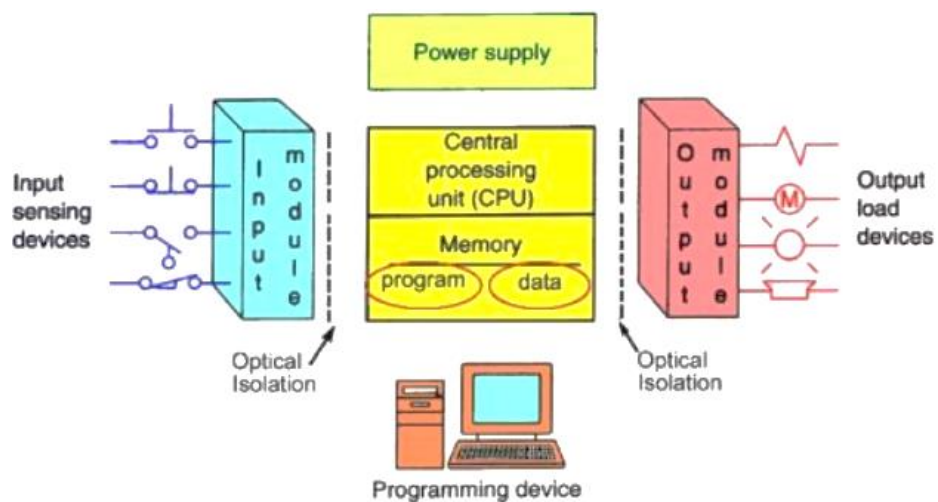
ในการผลิตสินค้าเรามักจะจัดให้วัสดุเป็นตัวถูกเคลื่อนย้าย เราสามารถที่จะใช้ระบบขนถ่ายที่เป็นสายพานลำเลียงได้ โดยอาศัยการทำงานของมอเตอร์เมื่อวัสดุมีการเคลื่อนที่มายังจุดตรวจจับวัตถุ ตัวเซ็นเซอร์จะส่งสัญญาณให้กับอุปกรณ์ควบคุมพีแอลซี (Programmable Logic Controller : PLC) เพื่อทำการประมวลผลต่อจากนั้นโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลจะเป็นตัวส่งสัญญาณเอาต์พุตสั่งให้มอเตอร์ทำการผลักวัตถุลงตามช่องที่ได้กำหนดไว้ซึ่งจะทำให้เกิดสะดุดและประหยัด เป็นผลให้การผลิตสินค้ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและมีผลกำไรเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นการใช้งานและการติดตั้งพร้อมซีเมนส์ เซนเซอร์ เพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุที่เป็นโลหะ อโลหะ และรวมถึงการคัดแยกสีจากวัตถุทั้งสองประเภทด้วยการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ RGB ร่วมการไมโครคอนโทรลเลอร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งในการควบคุมแสงจากภายนอก และระยะความห่างสูงสุด เพื่อให้ผลรับของการคัดแยกวัตถุไม่เกิดความผิดพลาด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โปรแกรมเมเบิล ลอจิก คอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller: PLC) [5]

PLC หรือ โปรแกรมเมเบิล ลอจิก คอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller: PLC) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักร ในกระบวนการทำงานต่างๆ โดยมี Microprocessor เป็นตัวสั่งการที่สำคัญ PLC จะมีส่วนประกอบที่สำคัญหลักๆ ได้แก่ อินพุต ส่วนประมวลผล และเอาต์พุต เราสามารถสร้างวงจรหรือแบบการควบคุมได้โดยการป้อนโปรแกรมคำสั่งต่างๆ ลงใน PLC นอกจากนี้ ยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้ อีกด้วย เช่น เครื่องอ่านบาร์โค้ด (Barcode), เครื่องพิมพ์ ซึ่งในปัจจุบันนอกจาก PLC จะใช้งานแบบเดี่ยว (Standalone) แล้วยังสามารถต่อ PLC หลายๆ ตัวเข้าด้วยกัน (Network) เพื่อควบคุมการทำงานของระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จึงเปลี่ยนมาใช้ PLC มากขึ้น



ภาพที่ 1 โครงสร้างภายใน PLC [5]

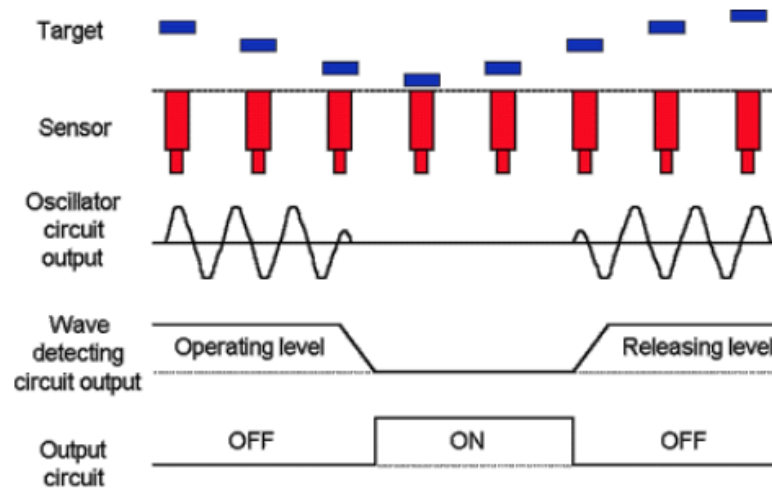
การใช้ PLC สำหรับควบคุมเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม จะมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้ระบบรีเลย์ (Relay) ซึ่งจำเป็นจะต้องเดินสายไฟฟ้า ฉะนั้น เมื่อมีความจำเป็นที่ต้องเปลี่ยนกระบวนการผลิตหรือลำดับการทำงานใหม่ก็ต้องเดินสายไฟฟ้าใหม่ ซึ่งเสียเวลาและค่าใช้จ่าย แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้ PLC แล้วการเปลี่ยนกระบวนการผลิตหรือลำดับการทำงานใหม่นั้นทำได้โดยการป้อน โปรแกรมใหม่เท่านั้น

2.2 เซนเซอร์ (Sensor) [4]

เป็นอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับปริมาณทางฟิสิกส์ โดยอาศัยหลักการการทำงานที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเซนเซอร์ สามารถกำเนิดสัญญาณที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของสิ่งที่ต้องการตรวจจับได้ โดยการแปลงสัญญาณทางด้านอินพุตซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ให้เป็นสัญญาณทางด้านเอาต์พุตซึ่งเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อป้อนให้กับระบบหรือกระบวนการ แล้วนำไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไป อาจกล่าวได้ว่าเซนเซอร์คือ ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ประเภทหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานรูปแบบหนึ่งให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในบางครั้งจึงมีการเรียกเซนเซอร์ว่าทรานสดิวเซอร์หรือเรียกทรานสดิวเซอร์ว่าเซนเซอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และลักษณะการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการวัด

ปัจจัยในการเลือกเซนเซอร์ใช้งานขึ้นอยู่กับปริมาณธรรมชาติของปริมาณทางฟิสิกส์ที่จะทำการวัดและควบคุมค่าเป็นสำคัญ รวมไปถึงราคา ความน่าเชื่อถือ ตลอดจนคุณภาพของข้อมูลที่ทำกรวัด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นที่ควรพิจารณาอีก เช่น ความเหมาะสมของเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมนั้นๆ

2.2.1 เซนเซอร์ชนิด Inductive Proximity Sensor บริเวณส่วนหัวของเซนเซอร์จะมีสนามแม่เหล็กซึ่งมีความถี่สูง โดยได้รับสัญญาณมาจากวงจรกำเนิดความถี่ ในกรณีที่มิวัตถุหรือชิ้นงานที่เป็นโลหะ เข้ามาอยู่ในบริเวณที่สนามแม่เหล็กสามารถส่งไปถึง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการหน่วงออสซิลเลท (Oscillate) ลดลงไป หรือบางทีอาจถึงจุดที่หยุดการออสซิลเลท และเมื่อนำเอาวัตถุนี้ออกจากบริเวณตรวจจับ วงจรกำเนิดคลื่นความถี่ก็เริ่มต้นการออสซิลเลทใหม่อีกครั้งหนึ่ง สภาวะดังกล่าวในช่วงต้นจะถูกแยกแยะได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ภายใน หลังจากนั้นก็จะส่งผลไปยังเอาต์พุตว่าให้ทำงานหรือไม่ทำงาน โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเอาต์พุตว่าเป็นแบบใด เพื่อเป็นการลดจินตนาการในการทำความเข้าใจการทำงานของเซนเซอร์ชนิดนี้จึงขอแสดงด้วยรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 2 การทำงานของเซนเซอร์แบบเหนี่ยวนำ (INDUCTIVE PROXIMITY SENSORS) [4]

(ที่มา : <http://www.compomax.co.th/product/working-principle-inductive-sensors/>)

2.2.2 เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (Capacitive Sensor) เซนเซอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างทั้งภายนอกและภายในคล้ายกับแบบเหนี่ยวนำ การเปลี่ยนแปลงของความจุ เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของวัตถุชนิดหนึ่งเข้ามาใกล้สนามไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์ เซนเซอร์ชนิดนี้สามารถตรวจจับอุปกรณ์ที่ไม่ใช่โลหะได้ นิยมใช้ตรวจจับชิ้นงานที่มีระยะห่างจากตัวเซนเซอร์ค่อนข้างมาก นอกจากนี้มีคุณลักษณะเด่นในเรื่องของระยะการตรวจจับที่ไกลแล้ว เซนเซอร์ชนิดนี้ยังมีข้อดีอยู่อีกหลายประการด้วยกัน คือ สามารถตรวจจับวัตถุได้เกือบทุกประเภท ความเร็วในการตรวจจับสูง และมีรุ่นที่สามารถแยกความแตกต่างสีได้ เนื่องจากในงานบางลักษณะ ไม่สามารถใช้เซนเซอร์ประเภทต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ เช่นการตรวจจับของเหลวในภาชนะบรรจุ ตรวจจับระดับความลึกของแหล่งน้ำ ตรวจจับพื้นผิวถนนสำหรับยานพาหนะบางชนิด เป็นต้น คลื่นเสียงที่นำมาทำเซนเซอร์ประเภทนี้จะอยู่ในช่วงความถี่ 20KHz-1GHz ซึ่งเรียกว่า Ultrasonic

2.2.3 เซนเซอร์ชนิด Photoelectric Sensor นั้นจะมีโหมดการทำงานอยู่ 3 ประเภท คือ แบบตัวรับตัวส่ง แยกกัน (Opposed Mode) แบบสะท้อนกับแผ่นสะท้อน (Retroreflective Mode) และแบบสะท้อนกับวัตถุ (Diffuse Mode) ซึ่งทั้ง 3 แบบนี้ ถือเป็นแบบพื้นฐานของ Photoelectric Sensor ทุกประเภท จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจ เพื่อให้การนำไปเลือกใช้ได้อย่างถูกต้อง

3. วิธีการดำเนินงาน

ในการออกแบบชุดสาธิตการคัดแยกวัตถุควบคุมด้วย PLC เพื่อการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยใช้ PLC ไปควบคุมการทำงาน โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ ชุดขับเคลื่อน โซลินอยด์ไฟฟ้า และเซนเซอร์ต่างๆ เพื่อที่จะให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานแบบอัตโนมัติภายใต้เงื่อนไขของระบบและ PLC

3.1 การออกแบบและหลักการทำงานของระบบ

ใช้ PLC 16 Inputs 16 Outputs ของบริษัท Mitsubishi [1] ควบคุมการทำงานของชุดสาธิตสายพานลำเลียงคัดแยกโลหะและอลูมิเนียม 1 ชุด แยกสี 1 ชุด แต่ละชุดมีหลักการทำงานดังนี้

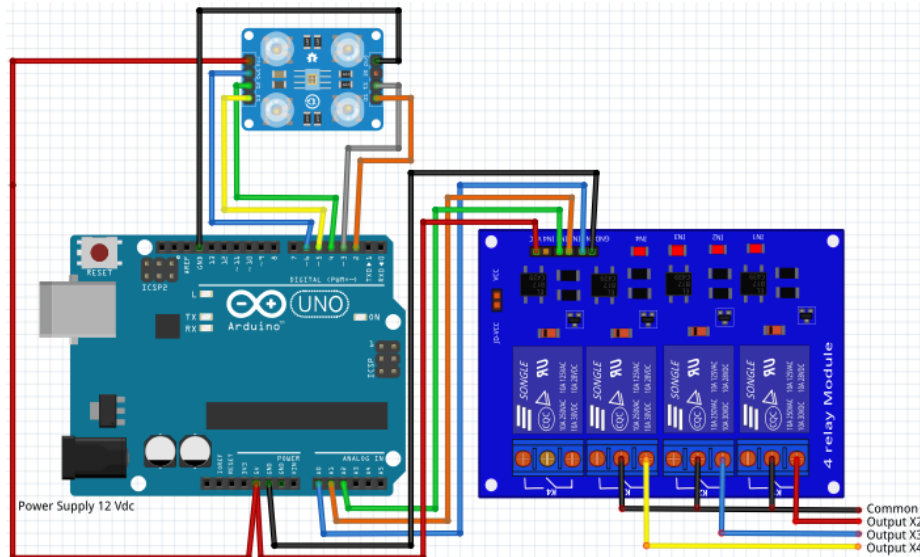
ชุดที่ 1 การควบคุมแยกวัสดุโลหะและอลูมิเนียม

กำหนดให้มีการคัดแยกชิ้นที่ทำการโลหะ อลูมิเนียม มี Infrared Photoelectric Switch Sensor 1 ตัว Inductive Proximity Sensor 1 ตัว โมดูล เซนเซอร์ อ่านค่าสี RGB TCS230 Arduino RGB Color Sensor 1 ตัว Switch Start 1 ตัว Switch Stop 1 ตัว และ Switch Emergency อีก 1 ตัว โดยเซนเซอร์ตัวแรกติดตั้งอยู่ที่หัวสายพานทางเข้า และอีก 2 ตัวติดตั้งอยู่ถัดมาด้วยระยะที่เหมาะสม จะมีโซลินอยด์ไฟฟ้าที่คอยกั้นวัสดุให้ปล่อยลงสายพานที่ละชั้น เมื่อวัสดุผ่าน Infrared photoelectric switch Sensor โซลินอยด์ไฟฟ้า จะปิดกั้นวัสดุชั้นต่อไปไว้ขณะเดียวกันวัสดุที่ผ่านเซนเซอร์ตัวแรก และ Inductive Proximity Sensor ตัวที่ 2 โปรแกรมจะเริ่มทำการหน่วยเวลาให้มอเตอร์หมุนสายพานไปหยุดที่ โมดูล เซนเซอร์ อ่านค่าสี RGB TCS230 Arduino RGB Color Sensor เพื่อให้เซนเซอร์อ่านค่าสีที่แม่นยำ เมื่อครบเวลาแล้วมอเตอร์จะหมุนสายพานไปเรื่อยๆ จะมีโซลินอยด์ไฟฟ้าอีกตัวคอยผลักวัสดุออกจากสายพานลำเลียง หลังจากผลักวัสดุออกจากสายพานเรียบร้อยแล้ว โซลินอยด์ไฟฟ้าตัวแรกจะเริ่มปล่อยวัสดุชั้นต่อไปสู่สายพาน กำหนดให้ Output 8 จุด โดยแสดงผลเป็นโซลินอยด์ไฟฟ้า กั้นวัสดุ 1 จุด มอเตอร์ขับสายพาน 1 จุด และโซลินอยด์ไฟฟ้า ผลักวัสดุ 6 จุด ชุดสาธิตสายพานลำเลียงคัดแยกโลหะและอลูมิเนียม จะทำงานแบบวนไปเรื่อยๆ จนกว่าจะกด Switch Stop หรือ Switch emergency มอเตอร์จะหยุดหมุนทันที

ชุดที่ 2 การควบคุม 12 VDC ให้แสดงผลการแยกสี

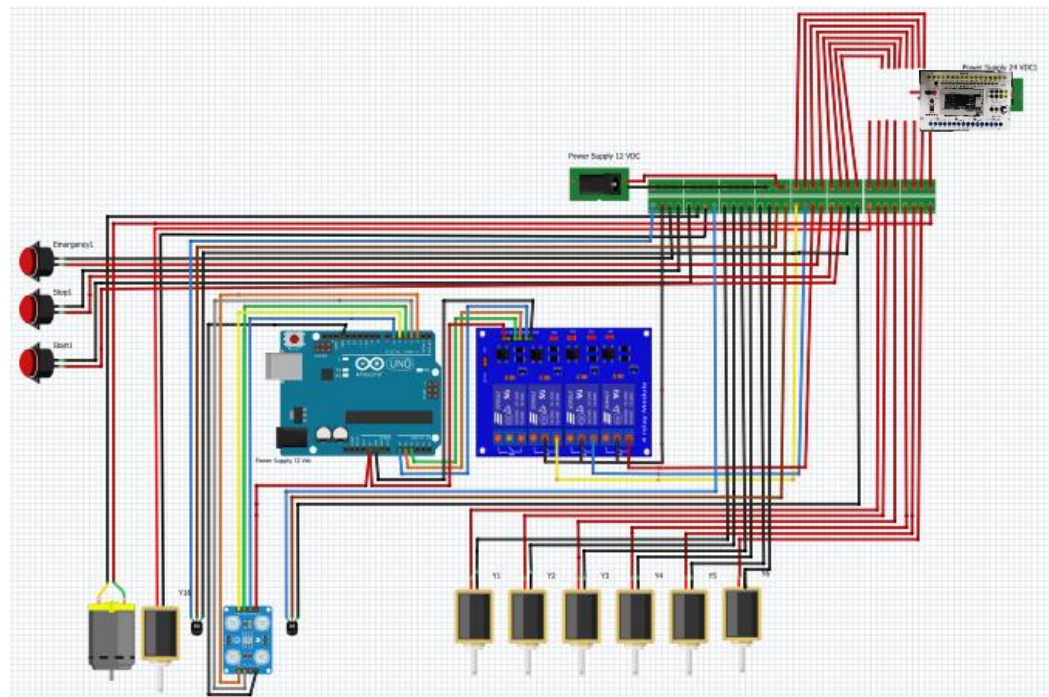
การออกแบบและสร้างชุดสาธิตสายพานลำเลียงคัดแยกโลหะและอลูมิเนียม ประกอบด้วยวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 1.78 A , โซลินอยด์ไฟฟ้า ขนาด 7.24 A, Inductive Proximity Sensor ขนาด 1.0 A, โมดูล เซนเซอร์ อ่านค่าสี RGB TCS230 Arduino RGB Color Sensor ขนาด 1.0 A และ Infrared Photoelectric Switch Sensor ขนาด 1.0 A อุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมาใช้แรงดันไฟฟ้ารวมทั้งหมด 12 VDC

การติดตั้งโมดูลตรวจจับสี ให้ค่าออกมาเป็น RGB ด้วยชิพ TCS230 มีกระบอกป้องกันการรบกวนจากสีอื่น เพิ่มความแม่นยำในการอ่านค่าสี โดยมีระยะตรวจจับที่แนะนำคือ 1 ซม.



ภาพที่ 3 การต่อวงจรเซนเซอร์ตรวจจับสี

การออกแบบโซลินอยด์ (Solenoid) เพื่อทำหน้าที่ผลักดันวัตถุที่เคลื่อนตัวตามสายพาน โซลินอยด์เป็นอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีหลักการทำงานคล้ายกับรีเลย์ (Relay) ภายในโครงสร้างของโซลินอยด์จะประกอบด้วย ขดลวดที่พันอยู่รอบแท่งเหล็กที่อยู่ในประกอบด้วยแม่เหล็กขูดบนกับขุดล่าง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่พันรอบแท่งเหล็ก ทำให้แท่งเหล็กขุดล่างมีอำนาจแม่เหล็กดึงแท่งเหล็กขูดบนลงมาสัมผัสกัน ทำให้ครบวงจรทำงานเมื่อวงจรถูกตัดกระแสไฟฟ้าทำให้แท่งเหล็กส่วนล่างหมดอำนาจแม่เหล็กสปริงก็จะดันแท่งเหล็กส่วนบน กลับสู่ตำแหน่งปกติ



ภาพที่ 4 การเชื่อมต่อระบบควบคุมต่างกับพีแอลซี



ภาพที่ 5 สายพานลำเลียงคัดแยกโลหะและอโลหะ

ระบบควบคุมโดยรวมของชุดสาธิตสายพานลำเลียงคัดแยกโลหะ อโลหะและสี ดังภาพที่ 4 เป็นการเชื่อมต่อในทุกละเอียดของการควบคุม เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ร่วมกับการเขียนโปรแกรมสำหรับพีแอลซี ด้วยภาษาแลดเดอร์ โดยระบบจะทำการตรวจจับสี และส่งผ่านไปยังการตรวจจับโลหะ และอโลหะ จากนั้นจะผ่านไปยังชุดผลัดชิ้นงานเพื่อดันชิ้นงานลงไปยังตำแหน่งที่จัดเตรียมไว้ สำหรับวัตถุแต่ละประเภท การทดสอบการทำงาน เป็นการป้อนโปรแกรมและการทดสอบโปรแกรม โปรแกรมจะสั่งควบคุมเอาต์พุตโดยการใช้สวิทช์โยก จากนั้นโปรแกรมจะควบคุมการทำงาน โดยการใช้เซนเซอร์ในการสั่งการทำงานตามลำดับในโปรแกรม

4. ผลการทดลอง

การทดลองจะกระทำภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมแสงจากภายนอกโดยใช้การปิดทึบบริเวณเซนเซอร์สี ส่วนการตรวจจับโลหะและอโลหะจะไม่มีกรปิด โดยจะทำการทดลองกับวัตถุที่มีสีเหลือง สีแดง และสีน้ำเงิน ทั้งที่เป็นโลหะ และอโลหะ เป็นจำนวน 10 ครั้ง และจะบันทึกค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ RGB ประกอบ เพื่อส่งไปยังการควบคุมด้วยพีแอลซีลำดับถัดไป

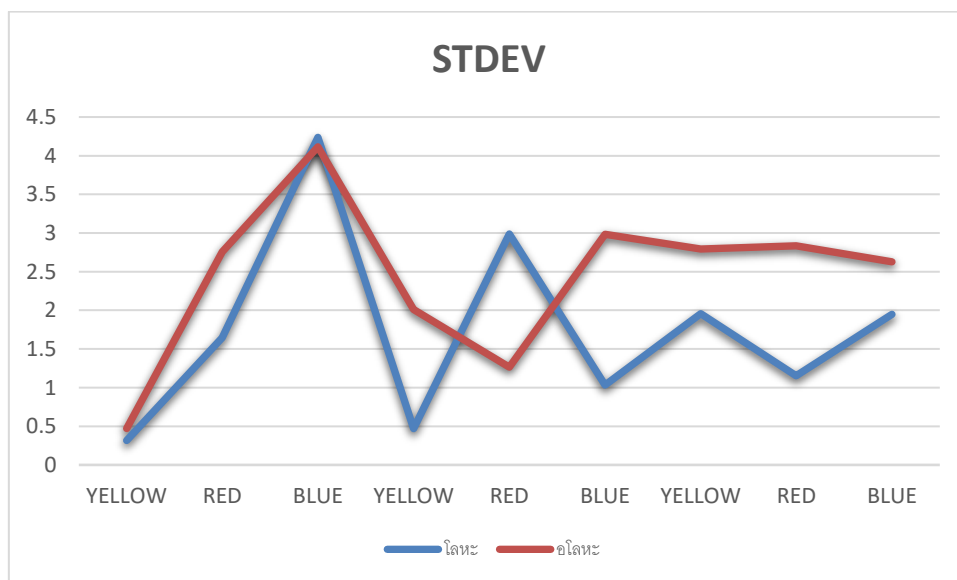
ตารางที่ 1 ผลการทดลองเซนเซอร์ RGB ชิ้นงาน โลหะสีเหลือง สีแดง และสีน้ำเงิน แบบปิดทึบ

ครั้งที่	(R)			(G)			(B)		
	YELLOW	RED	BLUE	YELLOW	RED	BLUE	YELLOW	RED	BLUE
1	37	55	267	47	177	138	72	125	58
2	37	60	266	47	184	138	72	125	58
3	37	60	266	47	184	138	72	125	58
4	38	61	272	48	186	141	73	128	59
5	37	60	260	47	183	138	72	125	52
6	37	60	259	47	183	137	66	125	58
7	37	60	260	47	183	138	72	124	58
8	37	60	260	47	184	138	72	125	58
9	37	60	266	47	177	138	72	124	57
10	37	60	266	46	183	138	72	124	57
STDEV	0.316227766	1.646545205	4.237399622	0.471404521	2.988868236	1.032795559	1.957890021	1.154700538	1.946506843

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเซนเซอร์ RGB ชั่งงานอโลหะสีเหลือง สีแดง และสีน้ำเงิน แบบปิดทึบ

ครั้งที่	(R)			(G)			(B)		
	YELLOW	RED	BLUE	YELLOW	RED	BLUE	YELLOW	RED	BLUE
1	37	58	279	48	181	139	73	123	55
2	36	59	273	47	180	133	73	123	56
3	37	59	273	47	181	139	73	123	56
4	37	60	286	47	184	142	67	125	57
5	38	53	278	48	180	139	74	116	55
6	37	59	279	47	180	139	66	123	50
7	37	59	278	47	180	138	72	122	55
8	37	52	279	47	180	138	73	117	49
9	37	59	279	47	180	138	73	122	55
10	37	58	272	41	180	132	73	122	55
STDEV	0.471404521	2.75680975	4.115013163	2.011080417	1.264911064	2.983286778	2.790858092	2.836272985	2.626785107

ภาพที่ 6 จะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ RGB เซนเซอร์ เมื่อตรวจจับวัตถุที่มีทั้งโลหะ และอโลหะ โดยเฉพาะเซนเซอร์ R (RED) มีค่าที่ไปในทิศทางเดียวกันและเกาะกลุ่มกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการประมวลผลและส่งค่าไปยังส่วนควบคุมพีแอลซีได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น ในส่วนของเซนเซอร์ B (BLUE) ก็มีค่าที่ไปในทิศทางเดียวกันทั้งวัตถุที่เป็นโลหะและอโลหะ แต่ในส่วนของเซนเซอร์ G (GREEN) โดยเฉพาะวัตถุที่เป็นสีแดงจะมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่มีความแตกต่างกัน ในวัตถุที่เป็นโลหะกับอโลหะ แต่อย่างไรก็ตาม สัญญาณที่ได้จะส่งไปยังพีแอลซี และผลการทดลองที่ได้สามารถคัดแยกสีได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 6 กราฟเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ RGB เซนเซอร์

ตารางที่ 3 ผลการทดลองระยะห่างระหว่าง Infrared Photoelectric Switch Sensor กับวัตถุโลหะ

ระยะ (เซนติเมตร)	ตรวจจับได้	ตรวจจับไม่ได้	ระยะ (เซนติเมตร)	ตรวจจับได้	ตรวจจับไม่ได้
1	✓	-	16	✓	-
2	✓	-	17	✓	-
3	✓	-	18	✓	-
4	✓	-	19	✓	-
5	✓	-	20	✓	-
6	✓	-	21	✓	-
7	✓	-	22	✓	-
8	✓	-	23	✓	-
9	✓	-	24	✓	-
10	✓	-	25	✓	-
11	✓	-	26	✓	-
12	✓	-	27	✓	-
13	✓	-	28	✓	-
14	✓	-	29	✓	-
15	✓	-	30	-	✓

การทดลองเพื่อคัดแยกโลหะและอโลหะ โดยจะทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง ในทุกระยะทดสอบ จะพบว่าที่ระยะ 30 เซนติเมตรจะไม่สามารถคัดแยกวัตถุที่เป็นโลหะได้

ตารางที่ 4 ผลการทดลองระยะห่างระหว่าง Infrared Photoelectric Switch Sensor กับวัตถุอโลหะ

ระยะ (เซนติเมตร)	ตรวจจับได้	ตรวจจับไม่ได้	ระยะ (เซนติเมตร)	ตรวจจับได้	ตรวจจับไม่ได้
1	✓	-	11	✓	-
2	✓	-	12	✓	-
3	✓	-	13	✓	-
4	✓	-	14	✓	-
5	✓	-	15	✓	-
6	✓	-	16	✓	-
7	✓	-	17	✓	-
8	✓	-	18	✓	-
9	✓	-	19	-	✓
10	✓	-	20	-	✓

จากการทดลองในตารางที่ 4 ระยะในการตรวจจับวัตถุไม่ควรเกิน 18 เซนติเมตร

5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองการทำงานของชุดสวิตซายพานลำเลียงคัดแยกโลหะและอโลหะ เพื่อใช้เป็นสื่อการสอน ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ พบว่าเมื่อปล่อยชิ้นงานจำนวน 10 ครั้ง ที่ความสว่าง 375 LUX จากการให้แสงจากแอลอีดีในชุดเซนเซอร์ RGB แบบเปิดโล่งวัตถุสีเหลือง สีแดง และสีน้ำเงิน ไม่พบเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด และเมื่อ

ปล่อยชิ้นงานจำนวน 10 ครั้ง ที่ความสว่าง 3,291 LUX จากการใช้แสงจากแอลอีดีในชุดเซนเซอร์ RGB แบบปิดทึบ วัตถุสี่เหลี่ยม สีแดง และสีน้ำเงิน ไม่มีเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด เช่นกัน จากผลการทดลองพบว่าที่ได้จากเซนเซอร์ RGB มีระยะความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ดังนั้น วัตถุที่เป็นโลหะ เซนเซอร์ RGB เมื่อทดสอบกับชิ้นงานสี Yellow Red Blue จะมีค่า 37.1 ± 0.32 , 59.9 ± 1.65 , 264.2 ± 4.24 (เซนเซอร์ R), 47 ± 0.47 , 182.4 ± 2.99 , 138.2 ± 1.03 (เซนเซอร์ G) และ 71.5 ± 1.96 , 125 ± 1.15 , 57.3 ± 1.95 (เซนเซอร์ B) และเมื่อเป็นวัตถุโลหะ ผลการทดสอบเซนเซอร์ RGB กับชิ้นงานสี Yellow Red Blue จะมีค่า 37 ± 0.47 , 57.6 ± 2.76 , 277.6 ± 4.12 (สำหรับเซนเซอร์ R), 46.6 ± 2.01 , 180.6 ± 1.26 , 137.7 ± 2.98 (สำหรับเซนเซอร์ G) และ 71.7 ± 2.79 , 121.6 ± 2.83 , 54.3 ± 2.63 (สำหรับเซนเซอร์ B) เมื่อนำค่าที่ได้มาแสดงผลเป็นกราฟ จะได้กราฟที่ใกล้เคียงเส้นตรงมากที่สุด ชุดสายพานลำเลียงคัดแยกโลหะและอโลหะนี้สามารถใช้งานในการอ่านค่าสีได้ทั้งแบบห้องเปิดโล่งและแบบปิดทึบที่ให้แสงสว่างแบบสม่ำเสมอ เป็นไปตามวัตถุประสงค์ทุกประการ สรุปได้ว่าชุดสายพานลำเลียงคัดแยกโลหะ อโลหะและสี สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ได้จากการคัดแยกสีเหลี่ยม แดง และน้ำเงิน อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งทำให้ไม่มีค่าความผิดพลาด แต่ในส่วนของการคัดแยกวัตถุโลหะ และอโลหะ จะมีความผิดพลาดเมื่อระยะจากวัตถุกับเซนเซอร์มีระยะที่มากขึ้น

6. ข้อเสนอแนะ

(1) ในการทดสอบอุปกรณ์ ผลการทดสอบอาจเกิดการผิดพลาดได้หากมีแสงรบกวนจากภายนอกเข้าไปยัง ส่วนของการคัดแยกสี รวมถึงการสะท้อนแสงและสี ของวัตถุที่นำมาทดสอบควรต้องนำมาพิจารณา

(2) ควรจำกัดขนาดของวัตถุทดสอบ เนื่องจากช่องทางลำเลียง และช่องการทดสอบมีขนาดที่จำกัด

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกภาคส่วนที่ให้การสนับสนุน คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงาน จนงานวิจัยแล้วเสร็จ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] พิศนุรัตน์ เจริญ. (2560). *FX5U และการใช้ GX Work 3* (พิมพ์ครั้งที่ 1). ม.ป.ท. : ม.ป.พ.
- [2] สุกกิจ สุกดีศุง. (2560). *การ โปรแกรมและควบคุมไฟฟ้า* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เอ็มพันธ์.
- [3] *ระบบสายพานลำเลียง* (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://027sittipong.blogspot.com/2016/11/7-agv-belt-conveyor-system-belt.html>
- [4] *เซนเซอร์* (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.compomax.co.th/product/working-principle-inductive-sensors/>
- [5] *โปรแกรมเมเบิล ลอจิก คอนโทรลเลอร์* (ออนไลน์). แหล่งที่มา : https://www.research-system.siam.edu/images/EE/projectEE/wyapote5/07_ch2.pdf

การศึกษาการทดสอบกำลังในหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

A STUDY OF POWER TESTING IN DIESEL ELECTRIC LOCOMOTIVES

เผชิญ จันทร์สา

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: pachernl.ja@spu.ac.th

วิทยา พันธุ์เจริญศิลป์

สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: vitthaya.ph@spu.ac.th

ธนกฤต สุระมานนท์

สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: tanakit.sur@spumail.net

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานวิจัยร่วมระหว่างคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุมกับทางโรงซ่อมหัวรถจักรดีเซลบางซื่อ ในรายวิชาสหกิจศึกษา ในการนำหัวรถจักรมาตรวจสอบการทำงานและทดสอบกำลังเพื่อหาจุดบกพร่องและจุดที่เกิดความเสียหายก่อนจะนำออกไปใช้งานรวมถึงหัวรถจักรที่เกิดปัญหาระหว่างการใช้งาน ซึ่งทางโรงซ่อมหัวรถจักรดีเซลมีเครื่องจำลองสภาวะการทำงานจริงหรือเครื่อง Load Test เพื่อจำลองภาระการทำงานในสภาวะต่างๆ ที่จะเกิดปัญหาข้อบกพร่องที่สาเหตุอะไรบ้าง โดยได้ทำการเก็บข้อมูลและนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างหัวรถจักร 3 รุ่น จำนวน 32 ขบวน ได้แก่ รุ่น ALS จำนวน 19 ขบวน รุ่น GEA จำนวน 8 ขบวน และรุ่น GEK จำนวน 5 ขบวน ซึ่งจากการทดสอบและเก็บข้อมูลพบว่า ปัญหาที่เกิดสูงสุด 3 ลำดับแรก คือ 1) อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นสูงเกินค่ามาตรฐาน 2 รุ่น ประกอบด้วย รุ่น ALSTHOM คิดเป็น 55 % จากทั้งหมด 19 ขบวน รุ่น GEA คิดเป็น 25 % จากทั้งหมด 8 ขบวน 2) ปัญหาจากหัวรถจักรไม่มีกำลังลากจูง พบจำนวน 3 รุ่น คือ รุ่น ALS คิดเป็น 9 % จากทั้งหมด 19 ขบวน รุ่น GEA คิดเป็น 25 % จากทั้งหมด 8 ขบวน รุ่น GEK คิดเป็น 67 % จากทั้งหมด 5 ขบวน 3) ปัญหาจากเครื่องยนต์หยุดทำงานระหว่างมีโหลด พบจำนวน 2 รุ่น คือ รุ่น ALS คิดเป็น 27 % จากทั้งหมด 19 ขบวน และรุ่น GEA คิดเป็น 25 % จากทั้งหมด 8 ขบวน จากข้อมูลผลการทดสอบที่ได้นี้ ทำให้โรงซ่อมหัวรถจักรดีเซลบางซื่อ สามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อใช้อ้างอิงในการปรับจูนเครื่องยนต์ของหัวรถจักรทั้ง 3 รุ่น ตามระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาการเกิดการขัดข้องระหว่างการใช้งานจริงหรือเครื่องยนต์ดับระหว่างทาง รวมถึงการบ่งบอกสมรรถนะปัจจุบันของแต่ละขบวนเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเพื่อการวางแผนซ่อมบำรุงใหญ่ในขบวนที่เสื่อมสภาพ

คำสำคัญ: การทดสอบกำลัง หัวรถจักรดีเซล การปรับจูน กำลังลากจูง

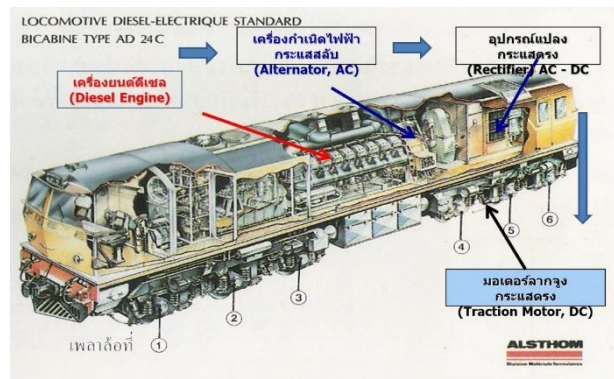
ABSTRACT

This paper describes the research work in an Automotive Engineering Cooperative Education subject of the School of Engineering, Sripatum University in collaboration with the Bang Sue Diesel Locomotive Repair Plant. The main point of this studies is to test the engine performance of the diesel locomotive in order to find any defect or damage point that must be fixed before they are used into service with no any improper condition during usage. The diesel locomotive repair plant has a real condition simulator or load test machine to simulate the usage in many different conditions so that the cause of errors in each conditions could be found and resolved. By collecting and comparing data of 3 models of locomotive from 32 trains consist of 19 of ALS model, 8 of GEA model, and 5 of GEK model. The results found that there are three of the most frequently problem occurs. The first is the coolant temperature was higher than that of the standard was found in the ALS model accounted for 55% of all 19 trains and the GEA model accounted for 25% of all 8 trains. The second is the locomotives that are lacking in towing power which were found in all 3 models consist of the ALS model accounted for 9% of all 19 trains, GEA model accounted for 25% of all 8 trains, and GEK model accounted for 67% of all 5 trains. And the third is an engine failure during loading that was found in 2 models: ALS accounted for 27% of all 19 trains, and GEA model accounted for 25% of all 8 trains. The results from this study have been used as the reference for tuning of the engine of those three diesel locomotive models to be more appropriate for usage. This would reduce the problems of lacking in traction power of locomotives and engine failure during journey. Moreover, the results of this test are used to indicate current efficiency of each train when compared to standard values, therefore the maintenance planning on deteriorated trains can be made.

Keywords: Power Testing, Diesel Locomotive, Tuning, Traction Power

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันในประเทศไทยยังใช้งานหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าในการเดินทางและขนสินค้าไปในที่ต่างๆ ซึ่งมีจำนวนไม่น้อยกว่า 180 ขบวน ในขณะที่ผู้ใช้บริการได้รับผลกระทบจากเครื่องยนต์หัวรถจักรดีเซลเกิดชำรุดระหว่างทางเป็นประจำ ด้วยหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลไฟฟ้า (Diesel Electric Locomotives) มีการใช้งานมาอย่างยาวนานมากกว่า 20 ปี จึงเกิดการสึกหรอของเครื่องยนต์และระบบที่เกี่ยวข้องซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง โดยมีระบบตามภาพที่ 1 โดยกลไกการทำงานประกอบด้วยเครื่องยนต์ดีเซลทำหน้าที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับหรืออัลเทอร์เนเตอร์และจ่ายไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์แปลงไฟจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่มอเตอร์ลากจูงซึ่งเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสตรงที่ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนหัวรถจักรของรถไฟเพื่อการลากจูงตู้ขบวนต่างๆ ให้เกิดการเคลื่อนที่ไปตามราง โดยส่วนหลักที่ตรวจพบปัญหาประกอบด้วยเครื่องยนต์และระบบที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบระบายความร้อนเครื่องยนต์ระหว่างทาง เครื่องยนต์ไม่สามารถสร้างกำลังในการลากจูง



ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

หมายเหตุ: จาก http://58.64.28.51/km/technic_als.html

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ ร่วมกับ โรงซ่อมบำรุงหัวรถจักรดีเซลบางซื่อ ศึกษาการวัดกำลังของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า โดยใช้เครื่องทดสอบบนชุดจำลองภาระทางไฟฟ้า (Eddy current load test) ทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ตั้งแต่ 700 ถึง 1,500 รอบต่อนาทีในการสร้างกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่ใช้ในสถานะการใช้งานจริง และเป็นไปตามมาตรฐานของการรถไฟและนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าทั้งหมด 4 รุ่น โดยแต่ละขบวนของแต่ละรุ่นก็จะมีการใช้งานในระยะทางแตกต่างกัน เปรียบเทียบผลทดสอบเพื่อหาค่ากำลังของหัวรถจักรในแต่ละรุ่นว่ามีค่าแตกต่างจากค่ามาตรฐานมากน้อยเพียงไร และระหว่างหัวรถจักรที่ต่างรุ่น ปัญหาที่ตรวจพบมีความแตกต่างกันอย่างไรและเพื่อเป็นข้อมูลในการหาค่าอ้างอิงในการปรับจูนเครื่องยนต์และการกำหนดมาตรการเชิงป้องกัน

2. ทฤษฎี

รถจักรดีเซลไฟฟ้า (Diesel-Electric Locomotive) หลักการทำงาน คือ เครื่องยนต์ดีเซลซึ่งเป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะมีระบบฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง เครื่องยนต์จะขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้จ่ายกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าไปที่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายให้มอเตอร์ (Traction Motor) ในการขับเคลื่อนเพลาลูกกำลังของหัวรถจักรให้เคลื่อนที่ กำลังเบรกของเครื่องยนต์ที่ได้จากการวัดงานจากเพลาลูกของเครื่องยนต์ ณ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ พิจารณาได้จากสมการ

$$P_b = \frac{2\pi n T}{60} \quad (1)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก(Brake Thermal Efficiency, η_b)

$$\eta_b = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_{Hv}} \quad (2)$$

Diesel Engine เครื่องยนต์ดีเซลซึ่งเป็นต้นกำลังหรือเครื่องกำเนิดพลังงานกล เพื่อนำไปขับเคลื่อนของ Electric Generator (เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

Electric Generator เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าที่รับพลังงานกลมาจากเครื่องยนต์ดีเซล โดยอาศัยหลักการเมื่อมีสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านขดลวด หรือขดลวดเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กก็จะมีผลผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา

Traction Motor เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่รับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาเปลี่ยนเป็นพลังงานกล หน้าที่หลักของมอเตอร์ขับเคลื่อนคือสร้างแรงบิดเพื่อใช้ในการลากจูง

หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าที่ทางการรถไฟใช้หลักๆ มีจำนวน 4 รุ่น คือ

1. GEK เครื่องยนต์ Cummins K38 38000 cc 1320 แรงม้า 2 เครื่องยนต์
2. GEA เครื่องยนต์ Cummins K50 50000 cc 1,450 แรงม้า 2 เครื่องยนต์
3. HID เครื่องยนต์ Cummins K50 50000 cc 1,450 แรงม้า 2 เครื่องยนต์
4. ALS เครื่องยนต์ Caterpillar, MTU 70000 cc 2,250 แรงม้า 1 เครื่องยนต์

Load Test คือ การนำส่วนพ่วงระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ มอเตอร์รถลาก (Traction Motor) ของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า แยกออกจากกันและนำสายขั้วบวกและขั้วลบของเครื่อง Load Test มาเชื่อมต่อแทนที่ (Traction Motor) เพื่อจำลองว่าหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้ากำลังวิ่งอยู่โดยมีน้ำหนักบรรทุกเสมือนจริงเพื่อวัดค่าโวลต์ (V) ที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหัวรถจักรว่ามีค่าตามมาตรฐานหรือไม่

สูตรการคำนวณหากำลังงานที่วัดได้จากหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

$$(Shunt Load \times 83.33) \times Volts \text{ ที่วัดได้จากเครื่อง Load Test} = Power (kW) \quad (3)$$

Shunt Load คือ ค่าตัวแปลงไฟ เช่น 800 Amp ที่ค่า Shunt Load เท่ากับ 9.60 เป็นการเทียบจากกระแสจริงที่สูงมาก ลดลงมาเพื่อเข้าเครื่องวัดได้ เป็นการวัดแรงดันตกคร่อมจาก Shunt Load โดยเป็นการเทียบอัตราส่วนจาก Amp เป็น Volts

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 3.1 เพื่อศึกษาการทำงานของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าและเครื่องทดสอบกำลังของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า
- 3.2 เพื่อทดสอบหาข้อบกพร่องของหัวรถจักรในแต่ละรุ่น
- 3.3 บันทึกผลการทดสอบกำลังของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าเพื่อนำมาวิเคราะห์และวางแผนการซ่อมบำรุง

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

การตรวจสอบและทดสอบกำลังของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการกับหัวรถจักร 3 รุ่นด้วยกันได้แก่ รุ่น ALS จำนวน 19 ขบวน รุ่น GEA จำนวน 8 ขบวน และรุ่น GEK จำนวน 5 ขบวน โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์และทดสอบดังนี้

4.1 หลักเกณฑ์การทดสอบกำลังของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ข้อ

- 4.1.1 ทดสอบตามตารางซ่อมบำรุง
- 4.1.2 ทดสอบนอกตารางซ่อมบำรุง (ตามการแจ้งซ่อมของพนักงานขับและช่างเครื่องประจำขบวน)

4.2 นำหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้ามาจดเทียบกับแท่นโหลด

นำสายของเครื่อง Load Test ไปเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหัวรถจักร

4.3 การทดสอบกำลังหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

4.3.1 เปิด Control จ่ายกระแสไฟเหมือนการขับหัวรถจักร

4.3.2 เร่งรอบเครื่องยนต์ ปรับระดับแผ่น บวก, ลบ ลงถึงน้ำให้ได้ค่ากระแสตามที่ต้องการ เพื่อเป็นการอุ่นเครื่องยนต์และตรวจการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อเช็คหาจุดรั่วไหลของ ของไหลต่างๆ ในเครื่องยนต์ หากพบมีการรั่วไหลหรือเครื่องยนต์มีการทำงานผิดปกติต้องหยุดและทำการแก้ไขก่อน

4.3.3 ปรับระดับของแผ่นประจุ + และ - ลงให้ให้ได้ค่ากระแส ตามตารางมาตรฐานของเครื่องยนต์

4.3.4 ตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ทุกระบบให้อยู่ในสภาพที่ทำงานปกติ

4.3.5 เร่งรอบเครื่องยนต์ตามที่ต้องการ

4.4 จำลองสภาวะภาระที่กระทำต่อหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

โดยปรับระดับของแผ่นเหล็กให้ลงจุ่มอ่างน้ำเกลือ แผ่นเหล็กที่ได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้าบวกและลบที่เกิดจากหัวรถจักรเคลื่อนลงไปในถังน้ำเกลือ ประจุไฟฟ้าบวกและลบจะพยายามวิ่งเข้าหากัน โดยมีน้ำเกลือเป็นตัวต้านทาน เพื่อเป็นการเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ ไปที่ละความเร็วรอบของเครื่องยนต์ตั้งแต่ความเร็วรอบต่ำสุดไปจนถึง ความเร็วรอบสูงสุดของแต่ละรุ่น โดยแผ่นบวกและแผ่นลบจะรับกระแสไฟฟ้าประจุบวกและลบผ่านสายไฟซึ่งต่อมาจากหัวรถจักรคังภาพที่ 3 และแช่ค้างที่แต่ละความเร็วรอบประมาณ 5 นาทีในแต่ละรอบ เพื่อสังเกตความผิดปกติของเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละช่วงความเร็วรอบและบันทึกค่าที่จอแสดงผล (ตามภาพที่ 2) ว่าได้ออกมาเท่าไร และนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน



ภาพที่ 2 จอแสดงค่าด้านบนคือค่าของ Shunt Loadหรือค่ากระแสไฟฟ้าและด้านล่างคือค่า (โวลต์V)



ภาพที่ 3 แผ่นจำลองสภาวะ (แผ่น โหลด)

4.5 บันทึกค่าที่ได้ในแต่ละความเร็รรอบของหัวรถจักร

จดบันทึกค่าที่ได้จากเครื่อง Load Test และบันทึกการชำรุดหรือข้อบกพร่องของเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อหาต้นเหตุของการชำรุด

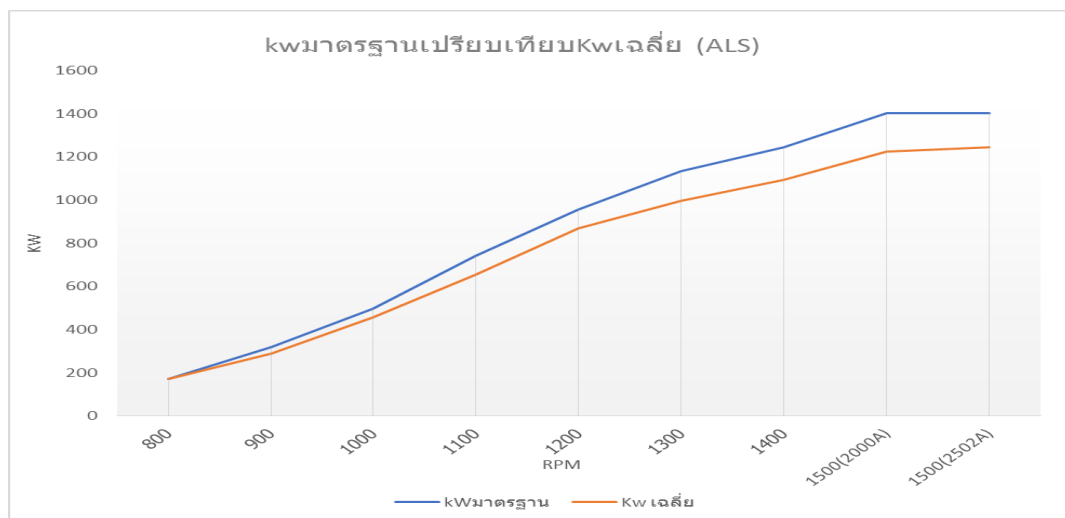
5. ผลการดำเนินงาน

5.1 ผลการทดสอบกำลังของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า อัลสตอม ALS

ผลการทดสอบกำลังจาก 19 ขบวน ของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า อัลสตอม ALS ตั้งแต่ความเร็วรอบ 700 RPM จนถึง 1500 RPM และจดบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้า ที่ออกมาเพื่อนำไปคำนวณหากำลังที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหัวรถจักร โดยเฉลี่ย 19 ขบวน ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังที่ย่านความเร็วรอบต่ำ +/-10.45kW ย่านความเร็วรอบปานกลาง +/-26.40 kW และที่ย่านความเร็วรอบสูง +/-35.57 kW

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบกำลังที่ได้จากการทดสอบขบวนหัวรถจักรรุ่น ALS 19 ขบวน

Speed	ค่ามาตรฐาน Power of Main Alternator				ผลการทดสอบ	
	RPM	Amp	Shunt Load	Voltsมาตรฐานเดิม	kW มาตรฐานเดิม	Volts เฉลี่ย
700	800	9.60	119	95.20	115	92
800	1083	13.79	150	172.05	142	163.17
900	1275	15.30	250	318.75	240	305.98
1000	1566	19.88	300	497.10	280	463.84
1100	1852	22.22	400	740.80	318	588.80
1200	1875	22.50	510	956.25	450	843.71
1300	2040	24.48	556	1134.24	470	958.76
1400	2490	29.88	500	1245.00	460	1145.35
1500	2000	24.00	700	1400.00	690	1379.94
1500	2502	30.03	561	1403.62	557	1393.83



ภาพที่ 4 Kwมาตรฐานเปรียบเทียบ kW เฉลี่ย (ALS)



ภาพที่ 5 ผลการทดสอบหัวรถจักร ALS นอกวาระการซ่อมบำรุง

ปัญหาที่ตรวจพบแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการทดสอบกำลังตามวาระมี 2 ขบวน และ การทดสอบนอกวาระมี 17 ขบวน ดังนี้

1. น้ำในระบบหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงเกินมาตรฐาน (น้ำร้อน) คือไม่เกิน 98 องศา
กรณีปรับเซตกำลังตามวาระการซ่อมบำรุง ไม่พบปัญหา กรณีทดสอบนอกวาระพบหัวรถจักรมี
ปัญหาเรื่องความร้อนจำนวน 6 ขบวน คิดเป็น 55 %
2. หัวรถจักร ไม่มีกำลังลากจูง กรณีทดสอบกำลังตามวาระไม่พบปัญหา
กรณีทดสอบนอกวาระพบหัวรถจักรที่มีปัญหาหารถไม่มีกำลังจำนวน 1 ขบวน พบหัวรถจักรปรับเซต
กำลังของหัวรถจักรหลังจากการซ่อมบำรุงจำนวน 2 ขบวน คิดเป็น 9 %
3. เครื่องยนต์หยุดทำงานขณะมีโหลด กรณีทดสอบตามวาระไม่พบปัญหากรณีทดสอบนอกวาระ
พบหัวรถจักรที่มีปัญหาเครื่องยนต์ดับบ่อยจำนวน 3 ขบวน คิดเป็น 27 %
4. ควันดำเกินมาตรฐานกรณีทดสอบตามวาระไม่พบปัญหากรณีทดสอบนอกวาระพบพบหัวรถ
จักรควันดำเกินค่ามาตรฐาน 1 ขบวน คิดเป็น 9 %
5. ผลการทำ Load Test พบว่าค่ากำลังหัวรถจักร ALS ปัจจุบันมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังที่
ย่านความเร็วรอบต่ำ ย่านความเร็วรอบปานกลางและย่านความเร็วรอบสูงที่แตกต่างกัน

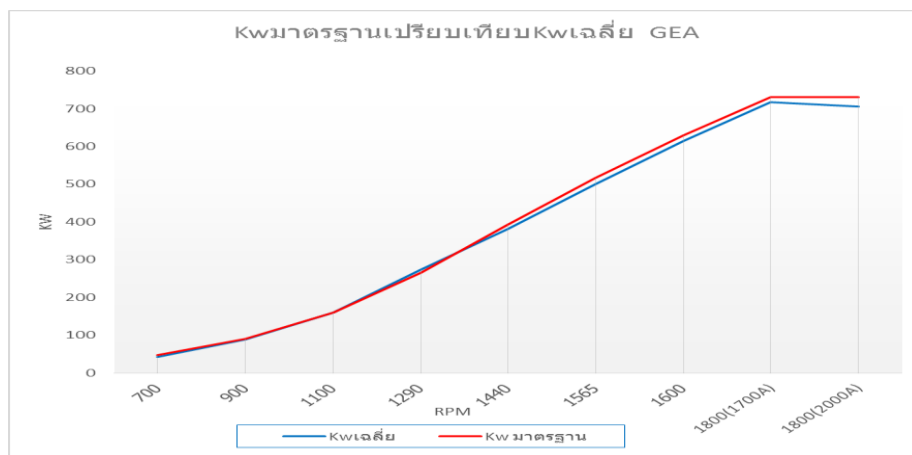
5.2 ผลการทดสอบกำลังของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEA

ผลการทดสอบกำลังจาก 8 ขบวน ของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEA ตั้งแต่ความเร็วรอบ 700 RPM จนถึง
1800 RPM และจับบันทึกค่าโวลต์ ที่ออกมา เพื่อนำไปคำนวณหา กำลังที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหัวรถจักร
โดยเฉลี่ย 8 ขบวน ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังที่ ย่านความเร็วรอบต่ำ +/-3.8kW ย่านความเร็วรอบปานกลาง
+/-4.01 kW และที่ ย่านความเร็วรอบสูง +/-10.64kW

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบกำลังที่ได้จากการทดสอบขบวนการหัวรถจักรรุ่นGEA 8 ขบวน

Speed	ค่ามาตรฐาน			ผลการทดสอบ			
	Power of Main Alternator						
RPM	Shunt Load	Volts มาตรฐาน	kW มาตรฐาน	Volts เฉลี่ย eng1	Volts เฉลี่ย eng2	kW เฉลี่ย eng1	kW เฉลี่ย eng2
700	5.09	111	47	86	86	36	36
900	7.03	156	91	145	146	84	85
1100	9.25	207	160	202	205	155	158
1290	11.89	268	266	266	260	263	257
1440	14.56	325	394	324	314	393	380
1565	16.75	371	518	368	361	513	503
1690	18.30	413	630	413	405	630	617
1800	20.40	430	731	430	425	731	722
1800	24.00	365	730	362	360	723	719

การทดสอบหัวรถจักรที่ซ่อมบำรุงตามตารางซ่อมบำรุงเนื่องจากในเวลา 4 เดือนที่ออกสหกิจศึกษาไม่มีหัวรถจักร GEA เข้าทดสอบกำลังตามวาระการซ่อมบำรุง



ภาพที่ 6 Kwมาตรฐานเปรียบเทียบ kW เฉลี่ย (GEA)



ภาพที่ 7 ผลการทดสอบหัวรถจักรGEA นอกวาระการซ่อมบำรุง

ปัญหาที่พบจากการทดสอบกำลังเพื่อหาจุดบกพร่องของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าทั้ง 8 ขบวน GEA ปัญหาที่ตรวจพบการทดสอบนอกวาระมี 8 ขบวน ดังนี้

1. น้ำในระบบหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงเกินมาตรฐาน (น้ำร้อน) คือไม่เกิน 98 องศา พบหัวรถจักรมีปัญหาเรื่องความร้อนจำนวน 2 ขบวน คือขบวน 4551, 4543 คิดเป็น 25 %

2. หัวรถจักรไม่มีกำลังลากจูง พบหัวรถจักรมีปัญหาการไม่มีกำลังจำนวน 2 ขบวน คือ ขบวน 4549, 4554 คิดเป็น 25 %

3. เครื่องยนต์หยุดทำงานขณะมีโหลด พบหัวรถจักรปัญหาเครื่องยนต์ดับบ่อยจำนวน 2 ขบวน คือ ขบวน 4548, 4547 คิดเป็น 25 %

4. กระแสไฟฟ้าไม่จ่ายไปมอเตอร์ลากจูงพบหัวรถจักรมีปัญหาจำนวน 2 ขบวน คือขบวน 4547, 4543 คิดเป็น 25 %

5. ผลการทำ Load Test พบว่าค่ากำลังของหัวรถจักร GEA ปัจจุบันมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังที่ย่านความเร็วรอบต่ำ ย่านความเร็วรอบปานกลางและย่านความเร็วรอบสูงที่แตกต่างกัน

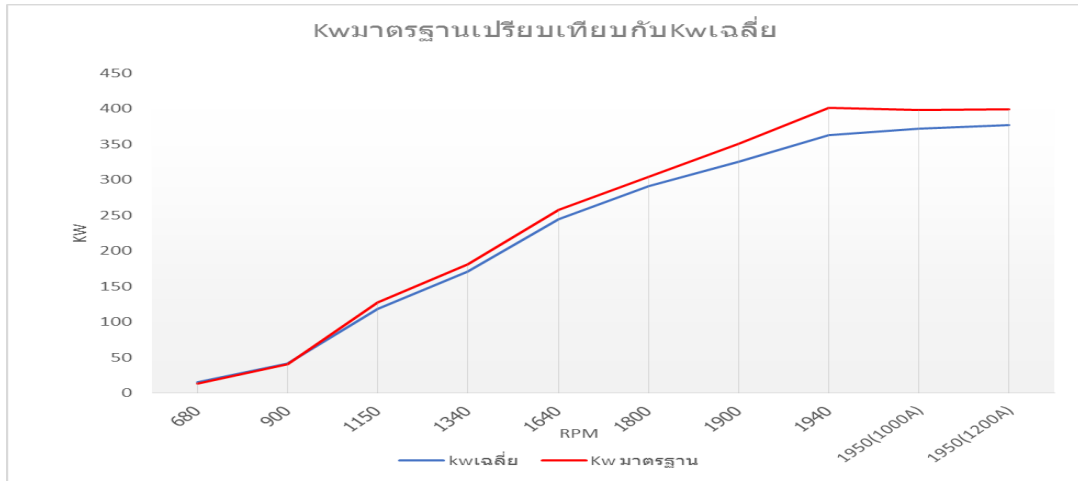
5.3 ผลการทดสอบกำลังของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEK

ผลการทดสอบกำลังจาก 5 ขบวน ของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEK ตั้งแต่ความเร็วรอบ 680 RPM จนถึง 1950 RPM และจุดบันทึกค่า โวลต์ ที่ออกมาเพื่อนำไปคำนวณหา กำลังที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของหัวรถจักร โดยเฉลี่ย 5 ขบวน ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังที่ย่านความเร็วรอบต่ำ +/-2.96kW ย่านความเร็วรอบปานกลาง +/-6.97 kW และที่ย่านความเร็วรอบสูง +/-15.62 kW

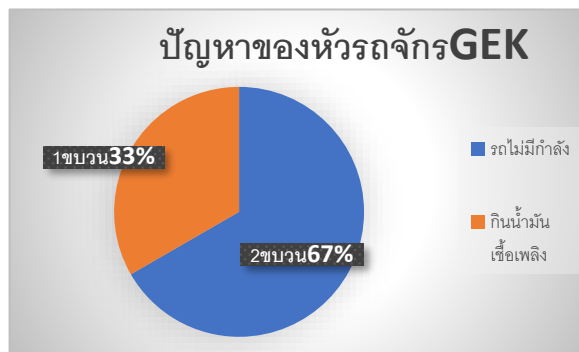
ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังที่ได้จากการทดสอบขบวนหัวรถจักรรุ่น GEK 5 ขบวน

Speed	ค่ามาตรฐาน			ผลการทดสอบ			
	Power of Main Alternator						
RPM	Shunt Load	Volts มาตรฐาน	kW มาตรฐาน	Voltsเฉลี่ย eng1	Voltsเฉลี่ย eng2	kWเฉลี่ย eng1	kWเฉลี่ย eng2
680	2.4	65	13	79	91	15	18
900	4.3	113	40.60	114	89	40	31
1150	7.7	197	127.60	168	140	107	89
1340	9.3	232	180.90	207	177	160	137
1640	11.3	273	257.70	253	220	238	207
1800	2	295	304.40	290	265	289	264
1900	13	314	350.40	317	275	343	297
1940	14	334	400.80	310	312	320	316
1950	10.2	480	397.80	440	460	373	390
1950	12	420	399.00	389	390	388	389

การทดสอบหัวรถจักรที่ซ่อมบำรุงตามตารางซ่อมบำรุงเนื่องจากในระยะเวลา 4 เดือนที่ทำการทดสอบ เก็บข้อมูลไม่มีหัวรถจักร GEK เข้าทดสอบกำลังตามวาระการซ่อมบำรุง



ภาพที่ 8 kW มาตรฐานเปรียบเทียบกับKwเฉลี่ย (GEK)



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบหัวรถจักรGEK นอกวาระการซ่อมบำรุง

ปัญหาที่พบเจอจากการทดสอบกำลังเพื่อหาจุดบกพร่องของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าทั้ง 5 ขบวน GEK ปัญหาที่ตรวจพบการทดสอบนอกวาระมี 5 ขบวน ดังนี้

1. หัวรถจักร ไม่มีกำลังลากจูงพบหัวรถจักรที่มีปัญหารถไม่มีกำลังจำนวน 2 ขบวนคือขบวนคิดเป็น 67%
2. กินน้ำมันเชื้อเพลิงพบหัวรถจักรกินน้ำมันเกินค่ามาตรฐานจำนวน 1 ขบวน คิดเป็น 33%
3. ผลการทำ Load Test พบว่าค่ากำลังเฉลี่ยหัวรถจักร GEK ปัจจุบันมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังที่ผ่านความเร็วรอบต่ำ ย่านความเร็วรอบปานกลางและย่านความเร็วรอบสูงที่แตกต่างกัน

6. อภิปรายผล

จากการทดสอบของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้าทั้ง 3 รุ่น คือ หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า ALS จำนวน 19 ขบวน, หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEA จำนวน 8 ขบวน และหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEK จำนวน 5 ขบวนรวมทั้งสิ้น 32 ขบวน เพื่อตรวจหาจุดบกพร่องและการปรับจูนกำลังที่เหมาะสมในช่วงเวลา 4 เดือน เมื่อจำแนกเป็นการทดสอบตามวาระการซ่อมบำรุงมีจำนวน 1 รุ่น 2 ขบวน คือหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า ALS และการทดสอบนอกวาระการซ่อมบำรุงจำนวน 30 ขบวนพบว่า การทดสอบตามวาระการซ่อมบำรุงไม่พบเจอปัญหาอื่น ในขณะที่การทดสอบนอกวาระการซ่อมบำรุงพบปัญหาหลักๆ ได้แก่

1. ปัญหาอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นสูงเกินมาตรฐาน (98 องศา) พบจำนวน 2 รุ่น คือ
 - 1.1 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า ALS คิดเป็น 55 % จากทั้งหมด 19 ขบวน
 - 1.2 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEA คิดเป็น 25 % จากทั้งหมด 8 ขบวน
2. ปัญหาหัวรถจักรไม่มีกำลังลากจูง พบจำนวน 3 รุ่น คือ
 - 2.1 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า ALS คิดเป็น 9 % จากทั้งหมด 19 ขบวน
 - 2.2 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEA คิดเป็น 25 % จากทั้งหมด 8 ขบวน
 - 2.3 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEK คิดเป็น 67 % จากทั้งหมด 5 ขบวน
3. ปัญหาเครื่องยนต์หยุดทำงานระหว่างมีโหลด พบจำนวน 2 รุ่น
 - 3.1 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า ALS คิดเป็น 27 % จากทั้งหมด 19 ขบวน
 - 3.2 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEA คิดเป็น 25 % จากทั้งหมด 8 ขบวน
4. ผลจากการทดสอบกำลังของหัวรถจักรทั้ง 3 รุ่น จากกราฟ kW ในแต่ละรุ่นจะเห็นได้ว่า
 - 4.1 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า ALS จากกราฟตั้งแต่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 RPM จนถึง 1500 (2000A) RPM พบว่าหัวรถจักรทั้ง 19 ขบวน มีกำลังต่ำกว่าค่ามาตรฐาน โดยค่ากำลังที่แตกต่างสูงสุดมีค่าเท่ากับ 210 kW ที่ความเร็วรอบ 1500 (2000A) RPM เกิดขึ้นในขบวน 4205
 - 4.2 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEA จากกราฟตั้งแต่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ 1440 RPM จนถึง 1800 (2000A) RPM พบว่ามีค่ากำลังที่แตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 84 kW ที่ความเร็วรอบ 1800 (2000A) RPM เกิดขึ้นในขบวน 4547
 - 4.3 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า GEK จากกราฟตั้งแต่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ 900 RPM จนถึง 1950 (1200A) RPM พบว่าหัวรถจักรทั้ง 5 ขบวนมีกำลังต่ำกว่าค่ามาตรฐาน โดยมีค่ากำลังที่แตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 84 kW ที่ความเร็วรอบ 1940 RPM เกิดขึ้นในขบวน 4008 และพบว่ามี 1 เครื่องยนต์ของหัวรถจักรขบวนที่ 4050 มีกำลังเกินค่ามาตรฐาน โดยมีค่าเท่ากับ 16 kW และ 13 kW ที่ความเร็วรอบ 1640 RPM และ 1800 RPM
 - 4.4 จากการเก็บข้อมูล Load test ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ความเร็วรอบและกำลังที่เหมาะสมเพื่อการอ้างอิงในการปรับจูนเครื่องยนต์ที่แต่ละความเร็วรอบ ทั้ง 3 รุ่นคือ ALS, GEA และ GEK เป็นไปตามตารางที่ 1, ตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วงความเร็วรอบต่ำ ความเร็วรอบปานกลาง และความเร็วรอบสูงตามผลการทดสอบ

7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งคือปัญหาอุณหภูมิ น้ำร้อนสูงกว่าปกติ, ปัญหาหัวรถจักรไม่มีกำลังและปัญหาเครื่องยนต์ดับบ่อยระหว่างการใช้งาน โดยได้มีการนำเสนอมาตรการเพิ่มเติมคือ

1. ติดตั้งเซนเซอร์อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นเพื่อแสดงมายังห้องควบคุมบนหัวรถจักร
2. เปลี่ยนพัดลมระบายอากาศจากพัดที่หมุนตามความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็นแบบพัดลมแบบมอเตอร์ไฟฟ้า (ในรุ่น ALS)
3. ตรวจสอบเครื่องปรับอากาศให้บ่อยมากขึ้น
4. การปรับจูนเครื่องยนต์ของเครื่องแต่ละรุ่นโดยอ้างอิงตามตารางผลการทดสอบจะช่วยให้การปรับจูนทำได้สะดวกรวดเร็วขึ้นและได้ค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน ที่จะช่วยลดปัญหาหัวรถจักรไม่มีกำลังและปัญหาเครื่องยนต์ดับ

5. เก็บข้อมูลผลการทดสอบกำลังในแต่ละขบวนทุกครั้งเพื่อนำไปหาค่ากำลังเฉลี่ยในแต่ละความเร็วรอบของแต่ละขบวน เพื่อหาค่ากำลังเฉลี่ยที่สามารถบ่งบอกสมรรถนะปัจจุบันของแต่ละขบวน เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเพื่อเป็นการวางแผนซ่อมบำรุงใหญ่ในขบวนที่เสื่อมสภาพ

8. เอกสารอ้างอิง

การรถไฟแห่งประเทศไทย. (2012). *เอกสารประกอบการฝึกอบรมพนักงาน ตามโครงการ THE IMPROVEMENT OF RAILWAY TRAINING CENTER โดยความร่วมมือระหว่าง JICA & SRT.* กรุงเทพฯ: การรถไฟแห่งประเทศไทย.

ถนอม ฮวยจันทร์ และ เชิดสกุล บัวขาว. (2554). *ระบบไฟฟ้ารถจักรอัลสตอม.* โรงรถจักรดีเซลบางซื่อ. กรุงเทพฯ: การรถไฟแห่งประเทศไทย.

ไพจิตร เต็งไตรรัตน์. (2548). *Alstom Locomotive Load Test.* โรงรถจักรดีเซลบางซื่อ. กรุงเทพฯ: การรถไฟแห่งประเทศไทย.

โรงรถจักรดีเซลบางซื่อ. (2562). *รายงานการตรวจซ่อมบำรุงโรงซ่อมบำรุงหัวรถจักร.* กรุงเทพฯ: การรถไฟแห่งประเทศไทย.

John E. Heywood .(2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd ed.). United States: McGraw-Hill.

แบบจำลองการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง CONTRACTOR'S BIDDING DECISIONS MODEL FOR CONSTRUCTION PROJECT

ชนทัช สอนศิริ¹, ไพจิตร ผาวัน²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: chanatuch.so@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง ด้วยวิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น เริ่มจากเก็บรวบรวมปัจจัยจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ฝ่าย ได้แก่ ฝ่ายประมาณราคา ฝ่ายโครงการ ฝ่ายวิเคราะห์ต้นทุน ฝ่ายเทคนิค และ ฝ่ายพัฒนาธุรกิจ จากนั้นให้คะแนนปัจจัยหลักเป็นรายคู่ ทั้งหมด 3 ด้าน ได้แก่ ข้อมูลเจ้าของงาน มีปัจจัยรอง 3 ปัจจัย ข้อมูลโครงการ มีปัจจัยรอง 3 ปัจจัย สัญญาและเงื่อนไข มีปัจจัยรอง 4 ปัจจัย รวมทั้งสิ้น 12 รายคู่ ลงในแบบจำลอง CBD-AHP พบว่า มีค่าน้ำหนักปัจจัยหลักร้อยละ 54, 30 และ 16 ตามลำดับ จากการทดสอบแบบจำลอง CBD-AHP พบว่า ไตรมาสแรก บริษัทได้ตัดสินใจเข้าร่วมประมูลโดยคาดหวัง (ช่วงคะแนน 4.01 ถึง 5.00) จำนวน 2 โครงการ ตัดสินใจเข้าร่วมประมูล (ช่วงคะแนน 3.01 ถึง 4.00) จำนวน 1 โครงการ และตัดสินใจไม่เข้าร่วมประมูล (ช่วงคะแนน 0.00 ถึง 3.00) 2 โครงการ จึงแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความยืดหยุ่นเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการตัดสินใจเข้าร่วมประมูล

คำสำคัญ : กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น, คุณสมบัติเบื้องต้น, การประมูลงานก่อสร้าง

ABSTRACT

The purpose of this research was to develop a Contractor's Bidding Decisions Model. Using AHP. Starting from the collection of factors from 5 experts as follows. Estimation, Project, Cost Analysis, Technical and Business Development. Then rate the main factors in pairs, all 3 aspects as follows i.e. Owner's information, there are 3 secondary factors Project information, there are 3 secondary factors, Contract and conditions, there are 4 secondary factors, totaling 12 pairs. In the model CBD-AHP, It was found that the main factor weight was 54, 30 and 16 percent, respectively. From testing the model, it was found that in the first quarter, the company decided to participate in the expected bid (range 4.01 to 5.00) 2 projects, Decided to participate in the bidding (range 3.01 to 4.00) 1 project and decided not to participate in the bidding (range 0.00 to 3.00) 2 projects. It shows that the model is flexible and suitable for use in decision making to participate in the bidding.

Key word: AHP, Pre-Qualification, Bidding

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ธุรกิจรับเหมาก่อสร้างเป็นธุรกิจที่มีความเสี่ยงด้านต้นทุนสูง การประเมินคัดเลือกโครงการที่จะเข้าร่วมประมูลก่อนตัดสินใจเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง (Stawomir Biruk, Piotr Jaskowski, Agata Czarnigowska, 2560) จึงมีความสำคัญมากเพราะเป็นการประเมินความเป็นไปได้ที่จะได้รับคัดเลือกเป็นผู้ชนะการประมูล ที่ต้องนำไปสู่ความสำเร็จของโครงการ

หากผู้รับเหมามาخذข้อมูลในการตัดสินใจ เช่น ข้อมูลเจ้าของงาน ข้อมูลโครงการ สัญญาและเงื่อนไข ทำให้เกิดผลกระทบที่ตามมา ได้แก่ เสียค่าใช้จ่ายในการซื้อแบบและเอกสาร บุคลากรไม่เพียงพอต่องานที่เข้ามา เสียโอกาสในการประมูลโครงการอื่นได้งานมาแต่ดำเนินการไม่ประสบความสำเร็จตามเป้าหมาย (สุธิธา จันทรา, 2557)

ดังนั้นแบบจำลอง AHP จะเข้ามาช่วยกำหนดเกณฑ์อ้างอิงในการตัดสินใจเลือกเข้าร่วมประมูลงานของบริษัทรับเหมาก่อสร้าง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การตัดสินใจในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง ประกอบด้วย ข้อมูลเจ้าของงาน ข้อมูลโครงการ สัญญาและเงื่อนไข งานวิจัยนี้จึงได้นำกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น เพื่อพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง

กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) ถูกพัฒนาโดย Thomas L. Saaty เป็นกระบวนการช่วยตัดสินใจ แบบมีเหตุผล หลักการทำงานของ AHP เริ่มต้นด้วยการกำหนดเป้าหมาย และสร้างโครงสร้างปัญหาที่ต้องการพิจารณา ออกมาเป็นแผนภูมิลำดับชั้น (Hierarchy) จากปัจจัยหลัก (Factor) สู่มิติย่อย (Sub Factor) ตามลำดับ จัดเรียงลงมาเป็นชั้นๆ จนถึงทางเลือก (Alternatives) ซึ่งทำให้ผู้วิเคราะห์มองเห็นองค์ประกอบของปัญหาและเปรียบเทียบปัญหาอย่างมีเหตุผลในทุกปัจจัยที่พิจารณา ทำให้ผลการประเมินมีความถูกต้อง และรัดกุมมากขึ้น (วิฑูรย์ ดันศิริมงคล, 2557) ซึ่งการวินิจฉัยเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ต่างๆ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบเป็นรายคู่ (Pair Wise Comparison) เพื่อกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญระหว่างเกณฑ์เป็นคู่ๆ

$$A = \begin{array}{c|cccc|c} & C_1 & C_2 & C_3 & \dots C_n & \text{เกณฑ์} \\ \hline & 1 & a_{12} & a_{13} & \dots a_{1n} & A_1 \\ 1/a_{12} & & 1 & a_{23} & \dots a_{2n} & A_2 \\ 1/a_{1n} & & a/a_{2n} & 1 & \dots a_{3n} & A_3 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \dots 1 & A_n \end{array}$$

โดยใช้ค่าตัวเลข ระหว่าง 1 ถึง 9 โดยที่ a_{ij} คือ สมาชิกในแถวที่ i หลักที่ j ของเมตริกซ์ (ไฟจิตร ผาวัน และวริศรา เลิศไพฑูรย์พันธ์, 2561) หมายถึง ผลการเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างปัจจัย A_i และ A_j กำหนดมาตราส่วนในการวินิจฉัยเปรียบเทียบตั้งแต่ 1 ถึง 9 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

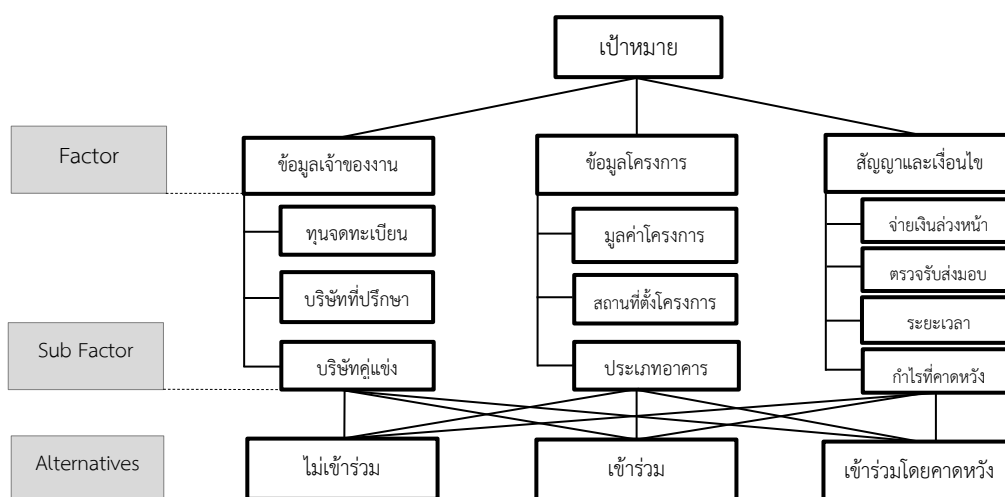
ตารางที่ 1 ความหมายของการเปรียบเทียบเป็นรายคู่

ระดับความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	มีความสำคัญเท่ากัน	มีความสำคัญ เท่าเทียมกัน
3	มีความสำคัญมากกว่า พอประมาณ	มีความสำคัญมากกว่าปัจจัยตัวหนึ่ง พอประมาณ
5	มีความสำคัญมากกว่า อย่างเด่นชัด	มีความสำคัญมากกว่าปัจจัยตัวหนึ่ง อย่างเด่นชัด
7	มีความสำคัญมากกว่า อย่างเด่นชัดมาก	มีความสำคัญมากกว่าปัจจัยตัวหนึ่ง อย่างเด่นชัดมาก
9	มีความสำคัญมากกว่า อย่างยิ่ง	มีความสำคัญมากกว่าปัจจัยตัวหนึ่ง อย่างยิ่ง
2,4,6,8	เป็นค่าความสำคัญระหว่างกลาง	เป็นค่าระหว่างกลาง ของค่าที่กล่าวไว้ข้างต้น

กรอบแนวความคิดของการวิจัย

จากหลักเกณฑ์ในการให้คะแนนประเมิน ของบริษัทรับเหมาก่อสร้างงานภาคเอกชน ได้แก่ อาคาร ห้างสรรพสินค้า อาคาร โรงงานอุตสาหกรรม อาคาร โรงแรม อาคาร โรงพยาบาล อาคารชุดพักอาศัย ที่ระบุไว้ตามมาตรฐานของบริษัท โดยใช้แบบจำลองในการคำนวณหาค่าคะแนนการประเมิน

ซึ่งทำให้ผู้วิเคราะห์มองเห็นองค์ประกอบของปัญหาและเปรียบเทียบปัญหาอย่างมีเหตุผลในทุกเกณฑ์ที่พิจารณา ทำให้ผลการประเมินมีความถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น โดยกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญระหว่างเกณฑ์เป็นคู่ๆ เพื่อนำไปสู่การคำนวณค่าคะแนนความสำคัญรวมของแต่ละทางเลือกตาม ภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างแผนภูมิของกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process)

วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง (CBD-AHP) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลปัจจัยหลักและปัจจัยรอง โดยเริ่มจากสรรหาผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ด้วยเทคนิคเดลฟาย (Delphi Technique) (นิภาพรรณ เจนสันติกุล, 2560) จำนวน 2 รอบ รอบแรกเป็นการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลงาน และรอบสอง กำหนดการให้คะแนนเปรียบเทียบความสำคัญเป็นคู่ เพื่อรวบรวมความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน จากผู้จัดการฝ่ายประมาณราคา ผู้อำนวยการโครงการ ผู้จัดการฝ่ายวิเคราะห์ต้นทุน ผู้จัดการฝ่ายเทคนิค และ ผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนารธุรกิจ ที่มีประสบการณ์ในการประมูลงานและบริหารโครงการก่อสร้าง มากกว่า 15 ปี ขึ้นไป โดยสามารถจำแนกออกเป็นเกณฑ์ปัจจัยหลักและเกณฑ์ปัจจัยรอง ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์ปัจจัยหลักและปัจจัยรองในการประเมินการตัดสินใจเข้าร่วมประมูลงาน (รอบแรก)

ปัจจัยหลัก		ปัจจัยรอง	
F1	ข้อมูลเจ้าของงาน	SF11	ทุนจดทะเบียนบริษัท
		SF12	บริษัทที่ปรึกษา
		SF13	บริษัทคู่แข่ง
F2	ข้อมูลโครงการ	SF21	มูลค่าโครงการ
		SF22	สถานที่ตั้งโครงการ
		SF23	ประเภทอาคาร
F3	สัญญาและเงื่อนไข	SF31	จ่ายเงินล่วงหน้า
		SF32	การตรวจรับส่งมอบงาน
		SF33	ระยะเวลาก่อสร้าง
		SF34	กำไรที่คาดว่าจะได้รับ

2. นำสรุปปัจจัยจากผู้เชี่ยวชาญที่มีผลต่อการตัดสินใจเข้าร่วมประมูลงาน ได้แก่ ปัจจัย ข้อมูลเจ้าของงาน ข้อมูลโครงการ สัญญาและเงื่อนไข มาสร้างเป็นรูปแบบโครงสร้างการตัดสินใจ (Hierarchy Structure) ตามกระบวนการวิธี AHP โดยมีความซับซ้อนแตกต่างกันไปตามความสัมพันธ์ของปัจจัยในการตัดสินใจ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกันเป็นองค์ประกอบและโครงสร้างลำดับชั้นได้ ดังภาพที่ 1

3. กำหนดความหมายและการเปรียบเทียบรายคู่ เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญเข้าใจระดับความสำคัญและความหมายในการตัดสินใจ จากคำอธิบายต่างๆ ดังตารางที่ 1

4. สัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญรอบที่ 2 ด้วยการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจรายคู่ ผู้เชี่ยวชาญได้ทำการศึกษาดู ตารางที่ 1 เป็นอย่างดีแล้ว จึงทำการให้คะแนนเปรียบเทียบรายคู่ ด้วยการพิจารณาจากปัจจัยแรกและปัจจัยหลัง เช่น F1 ข้อมูลเจ้าของงาน เป็นปัจจัยแรก กับ F3 สัญญาและเงื่อนไข โดยแต่ละปัจจัยจะมีระดับการให้ความสำคัญตั้งแต่ 1 ถึง 9 ที่แสดงถึงปัจจัยแรกสำคัญมากกว่าปัจจัยหลัง และปัจจัยหลังสำคัญมากกว่าปัจจัยแรก ดังตารางที่ 3 และข้อมูลการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยหลักจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความสำคัญรายคู่ ระหว่างปัจจัยข้อมูลเจ้าของงาน กับ สัญญาและเงื่อนไข

คู่ที่	ปัจจัยแรก	ปัจจัยแรก สำคัญมากกว่า ปัจจัยหลัง									ปัจจัยหลัง สำคัญมากกว่า ปัจจัยแรก									ปัจจัยหลัง
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
2	ข้อมูลเจ้าของงาน	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	สัญญาและเงื่อนไข

การคำนวณหาจำนวนครั้งในการวินิจฉัยเปรียบเทียบรายคู่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\text{จำนวนครั้งในการวินิจฉัยเปรียบเทียบรายคู่} = n^2 - n / 2 \quad (1)$$

ตารางที่ 4 ข้อมูลการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยหลักที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน

ปัจจัยหลัก	ข้อมูลเจ้าของงาน	ข้อมูลโครงการ	สัญญาและเงื่อนไข
ข้อมูลเจ้าของงาน	1.00	2.00	3.00
ข้อมูลโครงการ	0.50	1.00	2.00
สัญญาและเงื่อนไข	0.33	0.50	1.00
รวม	1.83	3.50	6.00

5. ตรวจสอบ ค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR) ดังสมการที่ 2

$$CR = CI/RI \quad (2)$$

โดยที่ ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) ดังสมการที่ 3

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

สำหรับค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index : RI) พิจารณาจากดัง ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (RI) และค่าอัตราความสอดคล้อง (CR)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

ในกรณีที่ค่า CR น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.10 ถือว่ายอมรับได้ แต่ถ้าค่า CR มากกว่า 0.10 ถือว่ายอมรับไม่ได้ ต้องทำการทบทวนค่าน้ำหนักเปรียบเทียบในเกณฑ์นั้นใหม่ จนได้ค่าน้ำหนัก ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าน้ำหนักของปัจจัยหลักที่ได้จากการเปรียบเทียบความสำคัญ

ปัจจัยแรก เทียบกับ ปัจจัยหลัง				น้ำหนักปัจจัยหลัก
F1	ข้อมูลเจ้าของงาน	F2	ข้อมูลโครงการ	F1=0.54
F2	ข้อมูลโครงการ	F3	สัญญาและเงื่อนไข	F2=0.30
F3	สัญญาและเงื่อนไข	F1	ข้อมูลเจ้าของงาน	F3=0.16

การกำหนดช่วงคะแนนในการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง 3 ทางเลือก ได้แก่ เข้าร่วมประมูลโดยคาดหวัง มีช่วงคะแนน 4.01 ถึง 5.00 เข้าร่วมประมูล มีช่วงคะแนน 3.01 ถึง 4.00 และไม่เข้าร่วมประมูล มีช่วงคะแนน 0.00 ถึง 3.00 ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เกณฑ์การให้คะแนนการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง

เกณฑ์ช่วงการให้คะแนน	คะแนนการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง		
	ทางเลือก	ช่วงคะแนน	
สูงสุด	เข้าร่วมประมูลโดยคาดหวัง	4.01	5.00
กลาง	เข้าร่วมประมูล	3.01	4.00
ต่ำ	ไม่เข้าร่วมประมูล	0.00	3.00

การเข้าร่วมประมูลโดยคาดหวัง หมายถึง บริษัท คาดหวังจะให้ได้รับงานโครงการนี้ เนื่องจากเป็นโครงการที่มีผลตอบแทนดี และมีทิศทางในการดำเนินธุรกิจที่ดีในอนาคต การเข้าร่วมประมูล หมายถึง ต้องการสร้างคอนเนกชัน แต่ยังไม่แน่ใจในการดำเนินธุรกิจของเจ้าของงาน การไม่เข้าร่วมประมูล หมายถึง โครงการมีความเสี่ยงและคาดว่าผลตอบแทนต่ำ

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จะนำแบบจำลอง CBD-AHP ประยุกต์ใช้กับโครงการก่อสร้าง จำนวน 5 โครงการ โดยทำการบันทึกข้อมูลของโครงการก่อสร้างที่จะทำการประเมินลงในแบบประเมินการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง ตามภาพที่ 2 และสามารถสรุปผลการประเมินได้ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การประยุกต์ใช้แบบจำลองการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง	น้ำหนัก	โครงการ						
			A	B	C	D	E		
F1	ข้อมูลเจ้าของงาน	SF11	ทุนจดทะเบียนบริษัท	0.29	0.29	0.58	1.45	0.29	1.45
	0.54	SF12	บริษัทที่ปรึกษา	0.16	0.16	0.64	0.64	0.48	0.80
		SF13	บริษัทคู่แข่ง	0.09	0.09	0.27	0.27	0.09	0.36
F2	ข้อมูลโครงการ	SF21	มูลค่าโครงการ	0.16	0.48	0.64	0.80	0.32	0.48
	0.30	SF22	สถานที่ตั้งโครงการ	0.09	0.27	0.36	0.36	0.18	0.36
		SF23	ประเภทอาคาร	0.05	0.10	0.15	0.25	0.05	0.15
F3	สัญญาและเงื่อนไข	SF31	จ่ายเงินล่วงหน้า	0.07	0.21	0.21	0.21	0.21	0.14
	0.16	SF32	การตรวจรับส่งมอบงาน	0.04	0.12	0.20	0.12	0.12	0.20
		SF33	ระยะเวลาก่อสร้าง	0.03	0.09	0.12	0.09	0.06	0.15
		SF34	กำไรที่คาดว่าจะได้รับ	0.02	0.06	0.06	0.06	0.02	0.06
รวม					1.87	3.23	4.25	1.82	4.15

ปัจจัยหลัก		ปัจจัยรอง		ค่าน้ำหนัก	รายละเอียดคะแนน	คุณสมบัติโครงการ A	คะแนน	น้ำหนักคะแนน
F1	ข้อมูลเจ้าของงาน	SF11	ทุนจดทะเบียน	0.29	มากกว่า 3 เท่าของมูลค่างาน = 5	0.20	1	0.29
	0.54				มากกว่า 2 เท่าของมูลค่างาน = 4			
					มากกว่า 1.5 เท่าของมูลค่างาน = 3			
					มากกว่า 0.5 เท่าของมูลค่างาน = 2			
					น้อยกว่า 0.5 เท่าของมูลค่างาน = 1			
		SF12	บริษัทที่ปรึกษา	0.16	กลุ่ม A ระดับคะแนน 5	E	1	0.16
					กลุ่ม B ระดับคะแนน 4			
					กลุ่ม C ระดับคะแนน 3			
					กลุ่ม D ระดับคะแนน 2			
					กลุ่ม E ระดับคะแนน 1			
		SF13	บริษัทคู่แข่ง	0.09	กลุ่ม A ระดับคะแนน 5	E	1	0.09
				กลุ่ม B ระดับคะแนน 4				
				กลุ่ม C ระดับคะแนน 3				
				กลุ่ม D ระดับคะแนน 2				
				กลุ่ม E ระดับคะแนน 1				
F2	ข้อมูลโครงการ	SF21	มูลค่าโครงการ	0.16	มากกว่า 500 ล้านบาท = 5	300	3	0.48
	0.30				มากกว่า 400 ล้านบาท = 4			
					มากกว่า 300 ล้านบาท = 3			
					มากกว่า 150 ล้านบาท = 2			
					น้อยกว่า 150 ล้านบาท = 1			
		SF22	สถานที่ตั้งโครงการ	0.09	ปฏิบัติงานได้สะดวกมาก = 5	3	3	0.27
					ปฏิบัติงานได้สะดวก = 4			
					ปฏิบัติงานได้ทั่วไป = 3			
					ปฏิบัติงานได้ค่อนข้างลำบาก = 2			
					ปฏิบัติงานได้ลำบากมาก = 1			
		SF23	ประเภทอาคาร	0.05	อาคารห้างสรรพสินค้า = 5	2	2	0.10
				อาคารโรงงานอุตสาหกรรม = 4				
				อาคารโรงพยาบาล = 3				
				อาคารโรงแรม = 2				
				อาคารคอนโดมิเนียม = 1				
F3	สัญญาและเงื่อนไข	SF31	จ่ายเงินล่วงหน้า	0.07	ADVANCE > 15% = 5	10%	3	0.21
	0.16				ADVANCE 15% = 4			
					ADVANCE 10% = 3			
					ADVANCE 5% = 2			
					ไม่มี ADVANCE = 1			
		SF32	การตรวจรับส่งมอบ	0.04	ตามมาตรฐาน ส่งงานได้ช้ามาก = 5	3	3	0.12
					ตามมาตรฐาน ส่งงานได้ช้า = 4			
					ตามมาตรฐาน มีข้อแก้ไขบ้าง = 3			
					ตามมาตรฐาน มีข้อแก้ไขค่อนข้างมาก = 2			
					ตามมาตรฐาน ส่งงานได้ช้ามาก = 1			
		SF33	ระยะเวลาก่อสร้าง	0.03	ส่งมอบงานก่อนกำหนด >30 วัน = 5	3	3	0.09
				ส่งมอบงานก่อนกำหนด >15 วัน = 4				
				ส่งมอบงานได้ตามกำหนด = 3				
				ส่งมอบงานล่าช้าตามกำหนด ค่อนข้างยาก = 2				
				ส่งมอบงานล่าช้าตามกำหนด ไม่ได้ = 1				
	SF34	กำไรที่คาดว่าจะได้รับ	0.02	มีกำไร > 20%	12%	3	0.06	
				มีกำไร > 15%				
				มีกำไร > 10%				
				มีกำไร > 5%				
				มีกำไร < 5%				
						รวมคะแนน	1.87	
						สรุป	ไม่เข้าร่วมประมูล	

ภาพที่ 2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน แบบจำลอง CBD-AHP

สำหรับผู้ใช้ให้ทำการบันทึกข้อมูลของโครงการก่อสร้างทั้ง 5 โครงการ ตามหัวข้อปัจจัยรองทั้งหมด 10 ปัจจัย ได้แก่ ทุนจดทะเบียน บริษัทที่ปรึกษา บริษัทคู่แข่ง มูลค่าโครงการ สถานที่ตั้งโครงการ ประเภทอาคาร เงินล่วงหน้า การตรวจรับส่งมอบงาน ระยะเวลาก่อสร้าง และ กำไรที่คาดว่าจะได้รับ จนครบถ้วนสมบูรณ์ทั้ง 5 โครงการ

จากตารางที่ 8 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง สามารถสรุปค่าน้ำหนักรวม และการตัดสินใจของผู้รับเหมา ในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง ของโครงการ A, B, C, D และ E ได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลคะแนนของทั้ง 5 โครงการ

สรุปผลรวมคะแนน		
โครงการ	คะแนน	ทางเลือก
โครงการ A	1.87	ไม่เข้าร่วมประมูล
โครงการ B	3.23	เข้าร่วมประมูล
โครงการ C	4.25	เข้าร่วมประมูลโดยคาดหวัง
โครงการ D	1.82	ไม่เข้าร่วมประมูล
โครงการ E	4.15	เข้าร่วมประมูลโดยคาดหวัง

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) จากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านการประมูลงานและบริหารงานก่อสร้างภาคเอกชนประเภทอาคารห้างสรรพสินค้า อาคารโรงงานอุตสาหกรรม อาคารโรงพยาบาล อาคารโรงแรม อาคารชุดพักอาศัย พบว่าค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก ข้อมูลเจ้าของงาน ข้อมูลโครงการ สัญญาและเงื่อนไข ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 ปัจจัย ร่วมกับการเชื่อมโยงในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง การตัดสินใจของผู้รับเหมา โดยมีปัจจัยทั้ง 10 ปัจจัย ได้แก่ ทุนจดทะเบียนบริษัท บริษัทที่ปรึกษา บริษัทคู่แข่ง มูลค่าโครงการ สถานที่ตั้งโครงการ ประเภทอาคาร เงินล่วงหน้า การตรวจรับส่งมอบงาน ระยะเวลาก่อสร้าง กำไรที่คาดว่าจะได้รับ โดยการหาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย กำหนดช่วงคะแนนการประเมินของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้างจะได้เป็นแบบจำลองสำหรับการประยุกต์การนำไปใช้งานจริง บทความนี้ได้ นำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในโครงการก่อสร้าง 5 โครงการ ได้แก่ โครงการ A, B, C, D และ E จะสามารถอภิปรายรายละเอียดเป็นรายปัจจัยได้ ดังนี้

โครงการ A คะแนนเท่ากับ 1.87 ไม่เข้าร่วมประมูล ซึ่งมีปัจจัยสำคัญ คือ ทุนจดทะเบียนบริษัท น้อยกว่ามูลค่างานโครงการ 0.50 เท่า ทั้งใช้บริการบริษัทที่ปรึกษาที่ไม่มีชื่อเสียง จึงส่งผลให้คะแนนได้น้อย ซึ่งหากเปลี่ยนปัจจัยเป็นแบบโครงการ B จะส่งผลทำให้มีคะแนนเท่ากับ 3.23 เข้าร่วมประมูล ซึ่งมีปัจจัยสำคัญ คือ เป็นโครงการก่อสร้างโรงพยาบาลที่มีชื่อเสียง เจ้าของงานเลือกใช้บริการบริษัทที่ปรึกษาที่มีชื่อเสียง หากเปลี่ยนปัจจัยเป็นแบบโครงการ C จะส่งผลทำให้มีคะแนนเท่ากับ 4.25 เข้าร่วมประมูลโดยคาดหวัง ซึ่งมีปัจจัยสำคัญ คือ เป็นโครงการห้างสรรพสินค้าที่มีชื่อเสียงมีทุนจดทะเบียนบริษัทในตลาดหลักทรัพย์ที่สูง ให้เบิกเงินล่วงหน้าได้มากกว่า 20% หากเปลี่ยนปัจจัยเป็นแบบโครงการ D จะส่งผลทำให้มีคะแนนเท่ากับ 1.82 ไม่เข้าร่วมประมูล พิจารณาจากทุนจดทะเบียนบริษัทเจ้าของงาน และการเลือกบริษัทเพื่อเข้ามาประมูลแข่งขันกันเป็นบริษัทที่อยู่ระดับที่ต่ำกว่า

บริษัทผู้ประเมินมาก ที่ตั้งโครงการอยู่ในเขตพื้นที่กรุงเทพชั้นในการบริหารจัดการใช้งบประมาณสูง หากเปลี่ยนปัจจัยเป็นแบบโครงการ E จะส่งผลทำให้มีคะแนนเท่ากับ 4.15 เข้าร่วมประมูลโดยคาดหวัง เป็นงานโครงการโรงพยาบาลที่ตั้งอยู่ต่างจังหวัด ง่ายต่อการบริหารจัดการ

ข้อเสนอแนะ

ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้รับเหมาในการเข้าร่วมประมูลโครงการก่อสร้าง โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อทำการศึกษาต่อในอนาคต ดังต่อไปนี้

1. การกำหนดปัจจัยและเกณฑ์อาจเพิ่มหัวข้อของปัจจัยหลัก ปัจจัยรอง เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ในอนาคตได้ เพื่อให้ตรงกับคุณสมบัติเฉพาะของบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างแต่ละบริษัทของ

2. ผลการศึกษาด้วยกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น AHP (Analytical Hierarchy Process) จะเห็นได้ว่าควรนำวิธีนิวโรฟัซซี (Neuro-Fuzzy Inference System) มาเปรียบเทียบ เพื่อจะเป็นทางเลือกในการตัดสินใจใช้วิธีต่างๆ ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรรณพร รัตนภูพา. (2562). *ประมาณราคางานก่อสร้างอาคาร*. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). หน้า 369 – 377.

เกตุณภัต จิรารุ่งชัยกุล, สุรสิทธิ์ อุดมธนวงศ์. (2563). *ปัจจัยความสำเร็จในการดำเนินงานของอุตสาหกรรมการก่อสร้างขนาดกลางและขนาดย่อมในเขตพื้นที่จังหวัดชลบุรี*. งานประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2563.

ชำนาญ พิเศษฐพันธ์, สงคราม ทองนพคุณ, กัมพล กิตติพงษ์พัฒนา. (2559). *การบริหารสัญญาจ้างก่อสร้าง*. ชมรมนักกฎหมายก่อสร้าง, หน้า 1-28.

นิภาพรรณ เจนสันติกุล. (2560). การนำเทคนิคเดลฟายไปใช้สำหรับการวิจัย. *วารสารรัฐศาสตร์ปริทรรศน์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 4(2) (กรกฎาคม-ธันวาคม 2560).

บุญชม ศรีสะอาด. (2560). *การวิจัยเบื้องต้น*. บริษัท สุวีริยาสาส์น จำกัด, หน้า 56-70.

พงษ์พันธ์ พักเอม, ดร.กำพล ทรัพย์สมบูรณ์. (2560). *ปัจจัยการวิเคราะห์ราคาก่อสร้างสำหรับงานโครงสร้างตึกแถว 4 ชั้น*. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ระดับชาติและนานาชาติ 2560.

ไพจิตร ผาวาน และวิศรา เลิศไพฑูรย์พันธ์. (2561). *การประเมินการไม่สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลขณะทำงานของแรงงานก่อสร้าง*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23, 18-20 กรกฎาคม 2561

ยศกร ชลรัตน์. (2562). *การจัดการงานก่อสร้างโครงการอาคารสูงประเภทที่อยู่อาศัยด้วยเทคนิคปัจจัยสำคัญแห่งความสำเร็จ*. การประชุมวิชาการระดับชาติด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรม ครั้งที่ 10 ประจำปี 2562.

วิฑูรย์ ต้นศิริมงคล. (2557). *AHP การตัดสินใจขั้นสูงเพื่อความก้าวหน้าขององค์กรและความอยู่ดีมีสุขของมหาชน*. อัมรินทร์พรินติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, หน้า 6-30.

วิสูตร จิระคำเกิง. (2558). *การประมาณราคาก่อสร้าง*. สำนักพิมพ์วรรณคดี, หน้า 1-7.

สมเกียรติ คุณล้าน. (2562). การประยุกต์ใช้วิธี AHP ในการคัดเลือกบริษัทผู้ผลิตส่วนประกอบภายอุปกรณ์เทียม และภายอุปกรณ์เสริม กรณีศึกษาบริษัทผลิตอุปกรณ์ช่วยเหลือผู้พิการ. คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. *วารสารสหวิทยาการวิจัย ฉบับบัณฑิตศึกษา*, 8(2) (กรกฎาคม-ธันวาคม 2562).

สุชิน สุขพันธ์. (2560). *การควบคุมราคาก่อสร้าง*. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 5-26.

สุธีรา จันทรา. (2557). *ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนในงานก่อสร้าง พ.ศ. 2550-พ.ศ. 2556*. มหาวิทยาลัยศรีปทุม. <http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/4498>

Abbas M. Burhan Alshemosi, Humam S. Hussein Alsaad. (2018). *Factors Affecting in Cost Estimation Process for Construction Residential Projects*. <https://jaaru.org/index.php/auisseng/article/view/135>

Adnan Enshassi, Sherif Mohamed, Ala'a El Karriri. (2010). *Factors affecting the bid/no bid decision in the Palestinian construction industry*. <https://doi.org/10.1108/13664381011063421>

Mohammad Alsaedi, Sadi Assaf, Mohammad A. Hassanain, Abdullatif Abdallah. (2019). *Factors Affecting Contractors' Bidding Decisions for Construction Projects in Saudi Arabia*. <https://www.mdpi.com/2075-5309/9/2/33>

Stawomir Biruk, Piotr Jaskowski, Agata Czarnigowska. (2017). *Modeling Contractor's Bidding Decisions*. 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management.

Tony Cunningham. (2013). *Factors Affecting The Cost of Building Work - An Overview*. <https://arrow.tudublin.ie/beschreoth/27>

**การศึกษาการลัดวงจรและระบุตำแหน่งความผิดปกติของระบบจำหน่าย 22 kV
ในรูปแบบพิกัดทางภูมิศาสตร์**

**STUDY OF FAULTS AND FAULT LOCATIONS IN 22 kV DISTRIBUTION
SYSTEM IN FORM OF GEOGRAPHIC COORDINATE SYSTEM**

**ณัฐพร ทองแพ, ยศสรุต นาคะเสถียร, ณัฐพนธ์ ทรวงนอก, ศุภลักษณ์ ราชโส
และ พัชรวิพรรณ โปรงจิต***

**สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี
ต.บ้านกลาง อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000**

***Corresponding author, E-mail: p.prongjit@ptu.ac.th**

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษการลัดวงจรและระบุตำแหน่งความผิดปกติของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในรูปแบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยใช้กรณีศึกษาระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ (kV) ณ สถานีไฟฟ้าธัญบุรี โดยเริ่มตั้งแต่สถานีไฟฟ้าธัญบุรีจนถึงหน้าหมู่บ้านผู้สูงอายุ รวมระยะทาง 8.2 กิโลเมตร โดยทำการคำนวณหาค่ากระแสผิดปกติเพื่อระบุพิกัดทางภูมิศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Geographic Information System (GIS) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เก็บข้อมูลเชิงสถิติแสดงค่ากระแสผิดปกติและตำแหน่งความผิดปกติในรูปแบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ เพื่อให้สามารถค้นหาค่าตำแหน่งความผิดปกติได้ เมื่อทราบค่ากระแสผิดปกติที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าธัญบุรี จากนั้นทำการค้นหาค่าตำแหน่งความผิดปกติและระยะทาง เพื่อหาสถานที่หลักที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติได้รวดเร็วขึ้น จากผลการวิจัยพบว่า ค่าตำแหน่งผิดปกติที่จำลองขึ้น เมื่อเทียบกับค่าตำแหน่งผิดปกติจากข้อมูลการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เหตุการณ์ที่ดีที่สุดมีค่าคลาดเคลื่อน 1 ช่วงเสาไฟ คิดเป็นระยะทาง 52.6 เมตร และค่ากระแสผิดปกติมีความคลาดเคลื่อน 6.98 % จึงแสดงให้เห็นว่าสามารถระบุตำแหน่งผิดปกติได้ละเอียดขึ้นและเป็นแนวทางใหม่ในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานการระบุตำแหน่งความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้

คำสำคัญ: การลัดวงจร ตำแหน่งความผิดปกติ พิกัดทางภูมิศาสตร์ ระบบจำหน่าย 22 kV

ABSTRACT

This paper proposes a study of faults and fault locations determination in distribution system in order to precisely find the forms of geographic coordinate system. The 22 kV distribution system of Thanyaburi substation has been demonstrated as a case study. The total of distance of 8.2 km has been started from Thanyaburi substation to Thanyaburi woman's protection center for the destitute. The fault currents have been calculated for determining fault locations. In addition, the Geographic Information System (GIS) program from Provincial Electricity Authority (PEA) can be used for analysis of geographic coordinate system. Then, the information of

fault currents and fault locations has been collected as a statistical data. In case of fault currents detected from instruments at the substation, PEA staffs can easily find the fault locations by using the statistical data. As results of this research, the best simulation model has shown the minimum error only one electric pole or 52.6 meters. Besides, the fault current error was 6.98 % compared to the fault current from instrument. Thus, this research is useful for determining the precision of fault locations, and can also be applied to determine the fault locations in distribution system of PEA.

Keywords: Faults, Fault locations, Geographic coordinate system, 22 kV distribution system

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นหน่วยงานที่จำหน่ายกระแสไฟฟ้า ให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทต่างๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัย เป็นต้น การใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง โดยเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม (กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า กฟภ., 2560) หากเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องขึ้นในระบบจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการจำหน่าย ก่อให้เกิดความเสียหายในภาคธุรกิจ การรักษาเสถียรภาพในการจ่ายไฟ และการแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องให้รวดเร็วจึงมีความสำคัญเป็นอันมากต่อค่าความน่าเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นงานแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องจึงเป็นอีกงานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้ความสำคัญ (กองแผนงานระบบไฟฟ้า กฟภ., 2555) และ (เอกภพ ดวงจันทร์, 2559) ในปัจจุบันนี้การแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องในระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิกษานั้น เมื่อเกิดเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าขัดข้องขึ้น ศูนย์สั่งการระบบจ่ายไฟหรือสถานีไฟฟ้าจะโทรแจ้งข้อมูลให้ศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลกระแสไฟฟ้าขัดข้องทราบ เพื่อให้พนักงานแก้ไขไฟฟ้าทราบและหาตำแหน่งกระแสผิดพลาด (กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า กฟภ., 2560) แต่เนื่องจากระยะทางและขอบเขตการหาตำแหน่งกระแสผิดพลาดค่อนข้างกว้าง ทำให้การค้นหาใช้เวลานาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาการลดวงจรและระบุตำแหน่งความผิดพลาดของระบบจำหน่ายในรูปแบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยใช้กรณีศึกษาในระบบจำหน่าย 22 kV ณ สถานีไฟฟ้าชัยบุรี ระยะทางตั้งแต่สถานีไฟฟ้าชัยบุรี จนถึงหน้าบ้านผู้สูงอายุปทุมธานี รวมระยะทาง 8.2 กิโลเมตร โดยการคำนวณหาค่ากระแสผิดพลาด รวมทั้งการจำลองหาค่ากระแสผิดพลาดเพื่อทำการระบุพิกัดทางภูมิศาสตร์ โดยทำเป็นข้อมูลเชิงสถิติแสดงค่ากระแสผิดพลาดและตำแหน่งผิดพลาดในรูปแบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ เพื่อให้พนักงานแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องทำการค้นหาตำแหน่งที่ผิดพลาด โดยการหาค่ากระแสผิดพลาดที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าชัยบุรีแจ้งมา จากนั้นพนักงานแก้กระแสไฟฟ้าขัดข้องทำการค้นหาตำแหน่งกระแสผิดพลาดและระยะทาง เพื่อค้นหาสถานที่หลักซึ่งอยู่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาด ทำให้พนักงานแก้กระแสไฟฟ้าขัดข้องที่เข้าใหม่หรือพนักงานที่ยังไม่ชำนาญเส้นทาง สามารถหาตำแหน่งกระแสผิดพลาดได้รวดเร็วขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อศึกษาการเกิดความผิดพลาดในระบบจำหน่าย
- (2) เพื่อศึกษาการคำนวณหาค่ากระแสผิดพลาดในระบบจำหน่าย
- (3) เพื่อนำค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณระบุตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์โดยใช้โปรแกรม GIS ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

(4) เพื่อเป็นแนวทางใหม่ในการนำไปประยุกต์ใช้งานการระบุตำแหน่งความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้

3. ขอบเขตของงานวิจัย

(1) ศึกษาและเก็บข้อมูลการเกิดความผิดปกติจริงในระบบจำหน่าย 22 kV โดยใช้กรณีศึกษาสถานีไฟฟ้ารัษฎบุรี

(2) ศึกษาการคำนวณเพื่อการจำลองการเกิดความผิดปกติในระบบจำหน่าย โดยใช้กรณีศึกษาสถานีไฟฟ้ารัษฎบุรี

(3) เปรียบเทียบค่ากระแสผิดปกติที่ได้จากการคำนวณและค่ากระแสผิดปกติที่ได้จากข้อมูลการไฟฟ้า

(4) นำข้อมูลกระแสที่ได้จากการคำนวณมาระบุตำแหน่งผิดปกติทางภูมิศาสตร์ สำหรับค้นหาตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติ

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1. ศึกษาสภาพการจ่ายไฟของระบบจำหน่าย 22 kV สถานีไฟฟ้ารัษฎบุรี

ระบบการจ่ายไฟของสถานีไฟฟ้ารัษฎบุรี จนถึงบริเวณหน้าบ้านผู้สูงอายุปทุมธานี เป็นระยะทาง 8.2 กิโลเมตร โดยได้รวบรวมประวัติการเกิดกระแสไฟฟ้าผิดปกติของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาครัษฎบุรี ซึ่งเกิดเหตุกระแสผิดปกติบริเวณเสาไฟฟ้าในวงจรที่ 3 และ 10 โดยมีเหตุการณ์สำคัญที่เลือกมาทั้งหมด 4 เหตุการณ์ซึ่งมีค่ากระแสผิดปกติ (I_F) ในหน่วยกิโลแอมป์ (kA) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- เหตุการณ์ที่ 1: TYA 3VB-01 TR1 G/T $I_F = 4.1$ kA ระยะทาง 4 กิโลเมตร โหลด 2.7 MW
- เหตุการณ์ที่ 2: TYA 3VB-01 TR1 G/T $I_F = 1.987$ kA ระยะทาง 6 กิโลเมตร โหลด 3.6 MW
- เหตุการณ์ที่ 3: TYA 10VB-01 TR2 AB/T $I_F = 1.703$ kA ระยะทาง 7 กิโลเมตร โหลด 5.0 MW
- เหตุการณ์ที่ 4: TYA 10VB-01 TR2 CG/T $I_F = 1.65583$ kA ระยะทาง 7.2 กิโลเมตร โหลด 6.9 MW

4.2 การคำนวณกระแสผิดปกติ

งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณหาค่ากระแสผิดปกติโดยการคำนวณมือ (กองแผนงานระบบไฟฟ้า กฟภ., 2557) จากนั้นนำค่ากระแสผิดปกติที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่ากระแสผิดปกติตามข้อมูลที่บันทึกได้จากงานแก่กระแสไฟฟ้าขัดข้องการไฟฟ้าส่วนภูมิภาครัษฎบุรี ซึ่งเกิดเหตุกระแสผิดปกติบริเวณเสาไฟฟ้าในวงจรที่ 3 และ 10 สำหรับการคำนวณวงจรการจ่ายไฟ ค่าพารามิเตอร์สายส่งและแหล่งจ่ายอ้างอิงตามข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาครัษฎบุรี โดยส่วนใหญ่เหตุการณ์ในงานวิจัยนี้ การคำนวณหาค่ากระแสผิดปกติใช้สมการคำนวณดังสมการที่ 1

$$I_F = \frac{V_F}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (1)$$

โดยที่ I_F หมายถึง ค่ากระแสผิดปกติ, V หมายถึง แรงดันที่จุดเกิดการผิดปกติ, ค่า Z_1 Z_2 Z_0 และ Z_f หมายถึง ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ลำดับลบ ลำดับศูนย์ และขณะเกิดการผิดปกติ ตามลำดับ

เมื่อคำนวณหาค่ากระแสผิดปกติจากการคำนวณมือแล้ว งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Excel ในการตรวจสอบค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณมือ (John J. Grainger et al, 1994) และ (Hadi Saadat, 2004) เพื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้โดยการคำนวณมือกับการใช้โปรแกรม Excel รวมทั้งเช็คความถูกต้องและหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

เพื่อตรวจสอบว่าการจำลองโดยใช้โปรแกรม Excel มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้จำลองหาค่ากระแส ผิดพร้อมที่เกิดขึ้นจริงได้ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วต่อการหาค่ากระแสผิดพร้อม

4.3 สร้างพิกัดทางภูมิศาสตร์

งานวิจัยนี้ใช้การสร้างพิกัดทางภูมิศาสตร์เพื่อหาค่าพิกัด UTM ค่าพิกัด Latitude (Lat) และ Longitude (Long) ในโปรแกรม GIS ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยทำการหาค่าพิกัดของเสาไฟฟ้าตามความยาวของสายไฟฟ้า ในวงจรการจ่ายไฟของสถานีไฟฟ้าธัญบุรี ระยะทาง 8.2 กิโลเมตร (ณัฐพร ทองแพ และคณะ, 2561)

4.4 สร้างตารางข้อมูลพิกัดกระแสผิดพร้อม

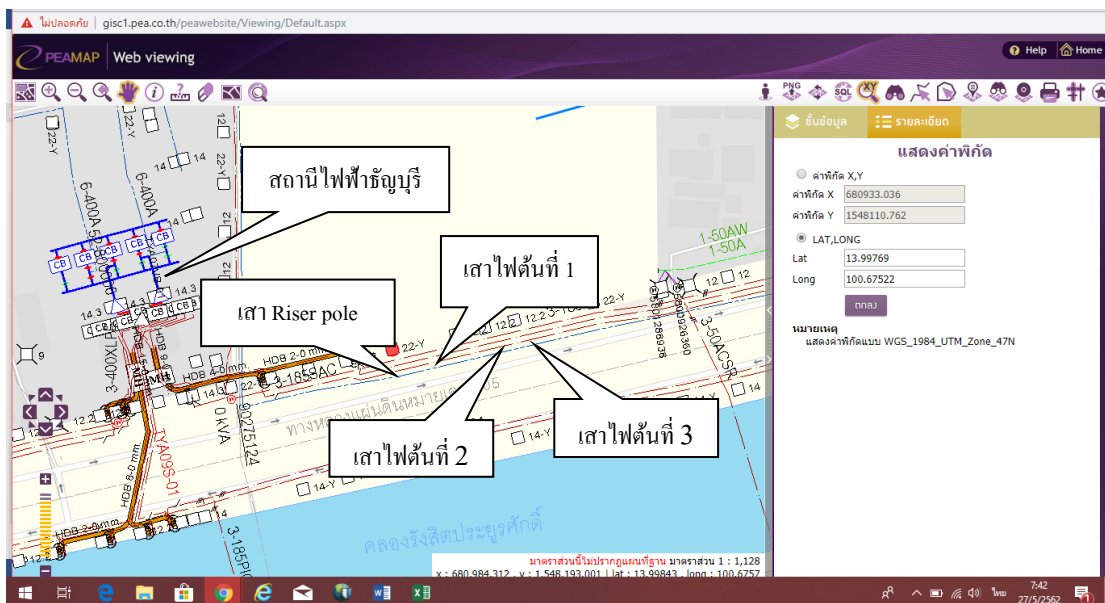
เมื่อได้ข้อมูลค่ากระแสผิดพร้อม ค่าพิกัดในตำแหน่งต่าง ๆ แล้ว ได้ทำการสร้างตาราง เพื่อใช้เป็นข้อมูล ให้กับพนักงานช่างแก้กระแสไฟฟ้าขัดข้อง ใช้ในการระบุตำแหน่งจุดเกิดเหตุได้รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยนำค่าพิกัดจาก ค่ากระแสผิดพร้อม มาระบุในโปรแกรม GIS ของกฟภ. หรือ พิกัดทางภูมิศาสตร์โดยโปรแกรม Google map เพื่อหาค่าตำแหน่งกระแสผิดพร้อม รวมทั้งสร้างเป็นตารางค่ากระแสผิดพร้อมและพิกัดทางภูมิศาสตร์

5. ผลการวิจัย

5.1 การหาข้อมูลสำหรับจำลองค่ากระแสผิดพร้อมตามตำแหน่งของเสาไฟฟ้า

การจำลองค่ากระแสผิดพร้อมตามตำแหน่งของเสาไฟต้องใช้อ้างอิงข้อมูลดังรายละเอียดต่อไปนี้

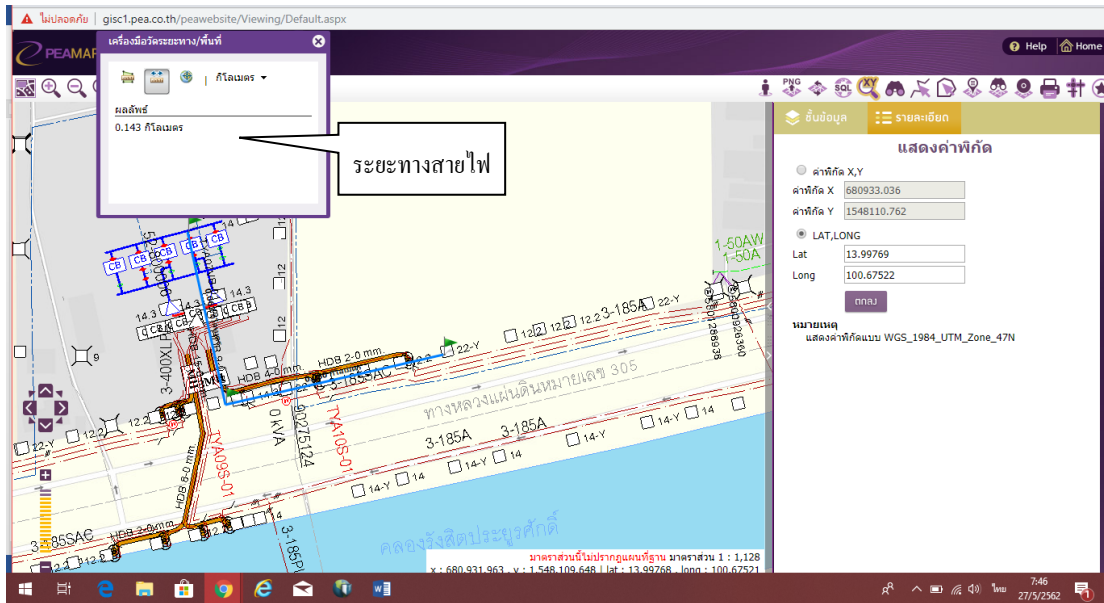
5.1.1 ข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ตามตำแหน่งของเสาไฟฟ้า ข้อมูลสถานที่หลัก หาค่าพิกัดตำแหน่ง เสาไฟเมื่อใช้โปรแกรม GIS แสดงพิกัดการหาเสาไฟต้นที่ 1 หน้าสถานีแล้ว พบว่า มีค่าพิกัด Lat เท่ากับ 13.99769 และพิกัด Long เท่ากับ 100.67522 ดังแผนภาพที่ 1



แผนภาพที่ 1 ค่าพิกัดของเสาไฟจากโปรแกรม GIS

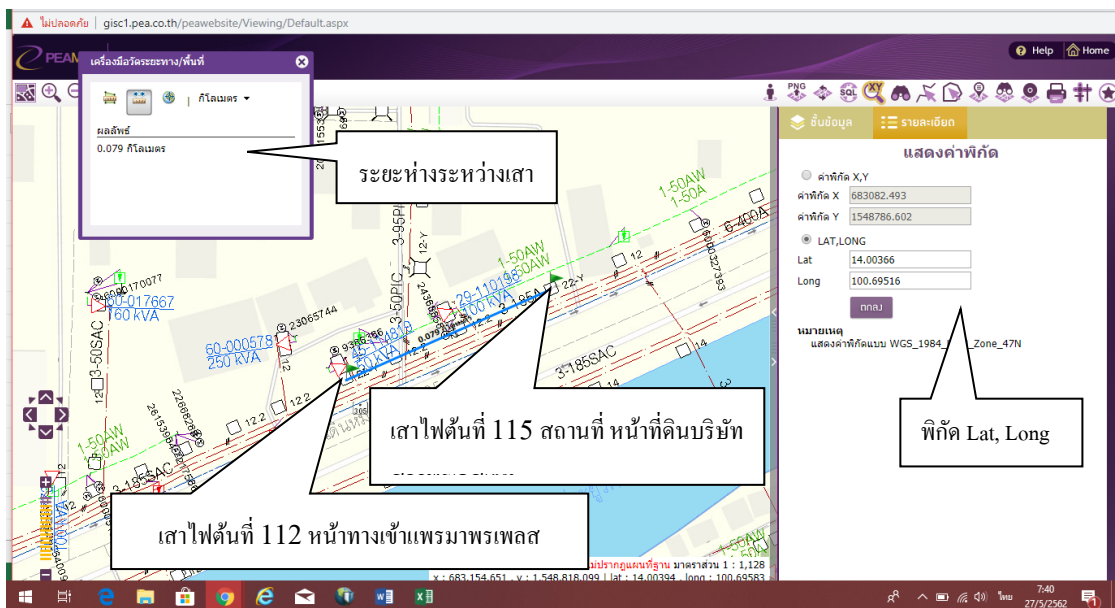
5.1.2 ข้อมูลระยะทางของสายไฟ หาค่าระยะทางของสายไฟโดยใช้โปรแกรม GIS วัดระยะทางของ สายไฟจากสถานีไฟฟ้าจนถึงตำแหน่งของเสาไฟ โดยทำการวัดจากเสาต้นที่ 1 หน้าสถานีไฟฟ้าธัญบุรี จนถึงเสา

ไฟต้นสุดท้าย สำหรับตัวอย่างวิธีการหาระยะทางของสายไฟจากสถานีไฟฟ้าชุมชนวิจิตรถึงเสาไฟต้นที่ 1 หน้าสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม GIS วัดได้ระยะทาง 0.143645 กิโลเมตร ดังแสดงในแผนภาพที่ 2



แผนภาพที่ 2 ระยะทางของสายไฟจากสถานีไฟฟ้าถึงเสาไฟต้นที่ 1 หน้าสถานี

5.1.3 ข้อมูลสถานที่หลักตามตำแหน่งของเสาไฟ โดยทำแผนที่ข้อมูลของสถานที่หลักตามตำแหน่งของเสาไฟ จากแผนภาพที่ 3 สถานที่หลักของข้อมูลเสาไฟต้นที่ 115 คือ เสาไฟต้นหน้าที่ดินบริษัทสหภาพ โดยการนับเสาไฟจะนับจากเสาต้นที่ 1 (เสาที่ถัดจากเสา Riser pole) เป็นเสาไฟต้นอ้างอิงและเสาไฟต้นถัดไปเป็นเสาไฟต้นที่ 2 และเสาไฟต้นที่ 3 ตามลำดับ จนถึงเสาไฟต้นที่ 335 เป็นเสาต้นสุดท้าย



แผนภาพที่ 3 การหาข้อมูลสถานที่หลักตามตำแหน่งของเสาไฟ

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Excel จำลองหาค่ากระแสผิวดำของสถานีไฟฟ้าชัยบุรี โดยใช้ระยะทางของสายไฟจากสถานีไฟฟ้า เริ่มจากเสาไฟต้นที่ 1 (ต้นถัดจาก Riser pole) หน้าสถานีตามแผนภาพที่ 2 มีค่าระยะห่างจากสถานี 0.143645 กิโลเมตร หลังจากนั้นทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม Excel เพื่อหาค่ากระแสผิวดำที่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นตารางข้อมูลแสดงค่ากระแสผิวดำและสถานีหลัก

ตารางที่ 1 ผลการจำลองโปรแกรมแสดงค่าความสัมพันธ์ที่กักกระแสผิวดำและสถานีหลัก

ลำดับ	เสาต้นที่	พิกัด		การจำลองหาค่ากระแสผิวดำ		ระยะห่างระหว่างเสา (km)	ระยะห่างสถานีไฟฟ้า (km)	ค่ากระแสผิวดำ ความต้านทานดิน 0 โอห์ม	สถานีหลัก
		Lat.	Long.	จากเสาต้นที่	ถึงเสาต้นที่				
1	0	13.99766	100.67506	0	1	0.018478	0.118914	6.573	เสาต้นไม่มีถัดจากหน้าสถานี
2	1	13.99769	100.67522	1	2	0.024731	0.143645	6.539	ถัดจากต้นไม่มีมา 1 ต้น
3	2	13.99773	100.67544	2	3	0.011	0.154645	6.515	ตรงป้ายบอกทางวัดเขียนเขต
4	3	13.99777	100.67553	3	6	0.065	0.219645	6.431	หน้าร้านขายดินกับอุปกรณ์ทำสวน
5	6	13.99789	100.67611	6	33	0.50146	0.721105	5.696	หน้าทางเข้าวัดเขียนเขต
6	33	13.99889	100.68065	33	40	0.12471	0.845815	5.513	หน้าโลตัสคลอง 3 ประดูทางเข้า
7	40	13.99914	100.68177	40	43	0.077078	0.922893	5.4	หน้าโลตัสคลอง 3 ประดูทางออก
8	43	13.9993	100.68246	43	44	0.020659	0.943552	5.374	หน้าร้านศรีชมช่อเคอร์
9	44	13.99934	100.68266	44	45	0.01648	0.960032	5.339	หน้าร้านดินา แอร์
10	45	13.99938	100.68281	45	61	0.366265	1.326297	4.836	หน้าร้านชัยโชคอิฐ
11	61	14.00013	100.68613	61	79	0.330895	1.657192	4.387	หน้าร้านดาวอังคารสมุทรทะเล
12	79	14.00105	100.68901	79	82	0.056627	1.713819	4.317	หน้าร้านปุ๋ยมอบ้าน
13	82	14.00124	100.6895	82	91	0.19591	1.909729	4.071	หน้าร้านพรเทพแอสเฟสโพลี
14	91	14.00198	100.69114	91	112	0.472551	2.38228	3.518	ปากทางเข้าหมู่บ้านสุขญา
15	112	14.00366	100.69516	112	115	0.079945	2.462225	3.42	หน้าทางเข้าแฟรมพรเทพ
16	115	14.00394	100.69584	115	117	0.056389	2.518614	3.364	หน้าที่ดินบริษัทสภาพรอผลดก
17	117	14.00415	100.69632	117	125	0.179524	2.698138	3.18	หน้าโคโยต้าหัว
18	125	14.0048	100.69784	125	135	0.201508	2.899646	2.887	หน้าเนกซ์เซนเตอร์สาขาวิสิต
19	135	14.005578	100.699014	135	139	0.100515	3.000161	2.876	ป้ายบอกทางไปพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ
20	139	14.00594	100.70038	139	151	0.218742	3.218903	2.69	ป้ายวัดเขลาคองสี
21	151	14.00681	100.7022	151	156	0.083693	3.302596	2.612	แยกไปกาญจนภิเษก ตรงป้ายจำกัดน้ำหนัก
22	156	14.00728	100.70279	156	159	0.047837	3.350433	2.586	แยกไปกาญจนภิเษก ตรงผู้สัญจร S114
23	159	14.00769	100.70268	159	174	0.0223667	3.3727997	2.564	แยกไปกาญจนภิเษก ตรงเสาไฟทางต้นแรก
24	174	14.00959	100.70321	174	175	0.12578	3.4985797	2.471	แยกไปกาญจนภิเษก ตรงเสาไฟทางต้นแรก
25	175	14.0097	100.70322	175	185	0.208471	3.7070507	2.337	แยกไปกาญจนภิเษก ไปบางปะอิน
26	185	14.01153	100.70263	185	195	0.278226	3.9852767	2.183	แยกไปกาญจนภิเษก สวิซไฟทาง
27	195	14.01384	100.70163	195	215	0.560033	4.5453097	2.155	ถนนกาญจนภิเษก ไปบางปะอิน
28	215	14.01852	100.6997	215	235	0.487578	5.0328877	2.142	ถนนกาญจนภิเษก ไปบางปะอิน
29	235	14.01939	100.70045	235	255	0.604554	5.6374417	2.139	ถนนกาญจนภิเษก ไปบางนา
30	255	14.01447	100.7028	255	275	0.513151	6.1505927	2.135	ถนนกาญจนภิเษก ไปบางนา
31	275	14.01034	100.70487	275	295	0.289513	6.4401057	2.131	ถนนกาญจนภิเษก ไปบางนา ออกรังสิตนครนายก
32	295	14.00908	100.70693	295	315	0.511921	6.9520267	2.128	ถนนกาญจนภิเษก ไปบางนา ออกรังสิตนครนายก
33	315	14.01063	100.71125	315	335	0.631103	7.5831297	2.115	หน้าทางแยกไปพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ คลอง 5
34	335	14.01281	100.71653	335	355	0.706722	8.2898517	2.086	หน้าบ้านผู้สูงอายุ ปทุมธานี

5.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับเหตุการณ์จริงที่เกิดความผิดพลาดในสถานีไฟฟ้าชัยบุรี

จากผลการจำลองเปรียบเทียบค่ากระแสผิวดำและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกระแสที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Excel และกระแสที่ได้จากข้อมูล กฟภ. (กรณีไม่คิดค่าความต้านทานดิน) ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเหตุการณ์ที่ 2 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เท่ากับ 6.98 % ส่วนเหตุการณ์ที่ 1 3 และ 4 มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงอาจเป็นผลมาจากค่าความต้านทานดิน (เอกภพ ดวงจันทร์, 2559) ที่มีผลต่อกระแสผิวดำ ดังนั้นการลดค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ควรวัดค่าความต้านทานดินจากหน้างานจริง แล้วนำค่าความต้านทานดินที่วัดได้มาเป็นค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ เพื่อการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่แม่นยำขึ้น โดยบทความวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอผลการจำลองกรณีคิดค่าความต้านทานดินไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่ากระแสผิดพลาดและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกระแสผิดพลาดที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Excel และกระแสผิดพลาดที่ได้จากข้อมูล กฟภ. ในหน่วยกิโลแอมป์ (kA) ในกรณีไม่คิดค่าความต้านทานดิน (R_p)

ลำดับเหตุการณ์	ค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลอง (kA)	ค่ากระแสผิดพลาดจากข้อมูลกฟภ. (kA)	% ความคลาดเคลื่อน
เหตุการณ์ที่ 1	2.17259	4.1	47.01
เหตุการณ์ที่ 2	2.13612	1.987	6.980881224
เหตุการณ์ที่ 3	2.11832	1.703	19.60610295
เหตุการณ์ที่ 4	2.11479	1.65583	21.70239125

จากผลการจำลอง เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสผิดพลาดที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Excel และกระแสผิดพลาดที่ได้จากข้อมูล กฟภ. (กรณีคิดค่าความต้านทานดิน) ดังแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นว่ามี 3 เหตุการณ์ที่ได้จากการจำลองมีค่า I_F ใกล้เคียงกับข้อมูลของ กฟภ. ดังต่อไปนี้

- เหตุการณ์ที่ 2 ที่ค่าความต้านทานดิน 2.5Ω โดยค่า $I_F = 1.93705$ kA
- เหตุการณ์ที่ 3 ที่ค่าความต้านทานดิน 5Ω โดยค่า $I_F = 1.58895$ kA
- เหตุการณ์ที่ 4 ที่ค่าความต้านทานดิน 5Ω โดยค่า $I_F = 1.58705$ kA

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่ากระแสผิดพลาดและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกระแสผิดพลาดที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Excel และกระแสผิดพลาด (I_F) ที่ได้จากข้อมูล กฟภ. ในหน่วยกิโลแอมป์ (kA) ในกรณีคิดค่าความต้านทานดิน (R_p) เท่ากับ 0, 2.5, 5 และ 10 โอห์ม (Ω) ตามลำดับ

ลำดับเหตุการณ์	ค่า I_F จากข้อมูลกฟภ. (kA)	เมื่อ $R_f = 0$	เมื่อ $R_f = 2.5$	เมื่อ $R_f = 5$	เมื่อ $R_f = 10$
เหตุการณ์ที่ 1	4.1	2.17259	1.96795	1.61784	1.07692
เหตุการณ์ที่ 2	1.987	2.13612	1.93705	1.59847	1.06991
เหตุการณ์ที่ 3	1.703	2.11832	1.92195	1.58895	1.06643
เหตุการณ์ที่ 4	1.65583	2.11479	1.91896	1.58705	1.06573

จากผลการจำลองเปรียบเทียบค่ากระแสผิดพลาดและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกระแสผิดพลาดที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Excel และกระแสผิดพลาดที่ได้จากข้อมูล กฟภ. (กรณีเลือกเหตุการณ์ที่ดีที่สุด 3 เหตุการณ์) ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าเหตุการณ์ที่ 2 ที่ค่าความต้านทานดิน 2.5Ω มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด มีระยะทางคลาดเคลื่อน 52.6 เมตร (1 ช่วงเสา)

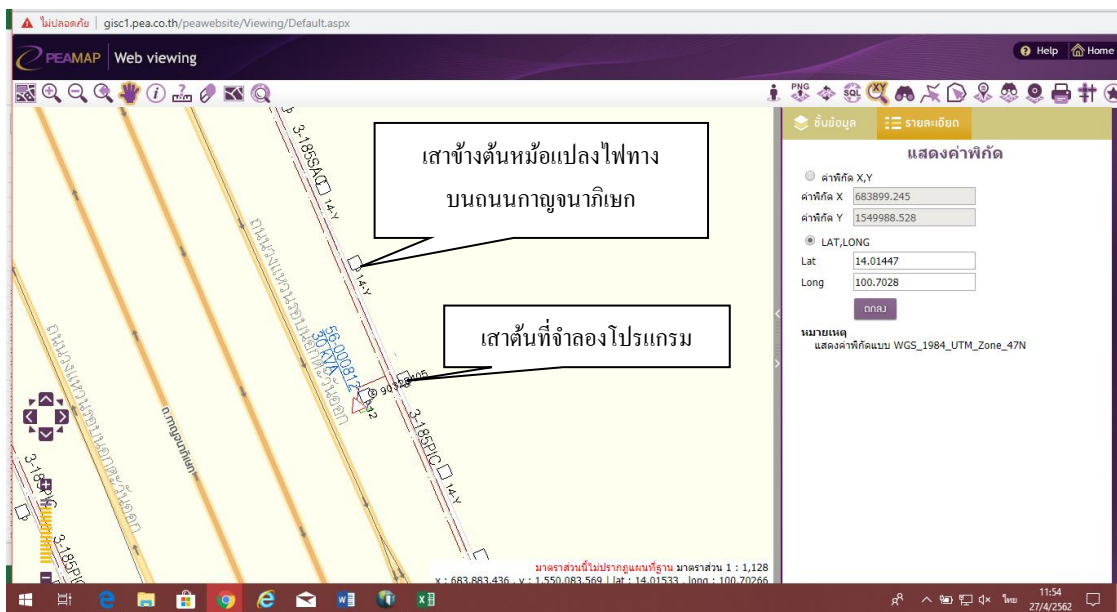
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่ากระแสผิดพลาดและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกระแสผิดพลาดที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Excel และกระแสผิดพลาด (I_f) ที่ได้จากข้อมูล กฟภ. ในหน่วยกิโลแอมป์ (kA) กรณีเลือกเหตุการณ์ที่ดีที่สุด 3 เหตุการณ์

ลำดับเหตุการณ์	ค่า IF จากข้อมูลกฟภ. (kA)	ค่า IF ที่ที่สุด	เมื่อ Rf	ระยะทางจริง (km)	ระยะทางจำลอง (km)	ระยะคลาดเคลื่อน (m)	คลาดเคลื่อน
เหตุการณ์ที่ 2	1.987	1.93705	2.5	6	6.0526	52.6	1 ช่วงเสา
เหตุการณ์ที่ 3	1.703	1.58895	5	7	7.4123	412.3	20 ช่วงเสา
เหตุการณ์ที่ 4	1.65583	1.58705	5	7.2	7.4038	203.8	9 ช่วงเสา

เมื่อพิจารณาค่ากระแสผิดพลาดจากตารางที่ 4 เลือกเหตุการณ์ที่ดีที่สุด ดังต่อไปนี้

- เหตุการณ์ที่ 2 ของสถานีไฟฟ้าชัยบุรี วงจรที่ 10 เกิดการลัดวงจร (มีระยะห่างจากสถานีประมาณ 6 กิโลเมตร) มีค่ากระแสผิดพลาด $I_f = 1.987$ kA โดยโหลดก่อนการลัดวงจรเท่ากับ 3.6 MW จากการจำลองพบว่าค่ากระแสผิดพลาดมีค่า 1.93705 kA ระยะทางที่ 6.0526 กิโลเมตร บริเวณเสาข้างต้นหม้อแปลงไฟบนถนนวงแหวนรอบนอกตะวันออกไปบางนา

ใช้โปรแกรม GIS ตรวจสอบตำแหน่งที่ผิดพลาดเปรียบเทียบกับเหตุการณ์ที่ 2 พบว่า ตำแหน่งเสาไฟที่ได้จากข้อมูล กฟภ. ถึงเสาไฟต้นที่จำลองโปรแกรมวัดระยะทางได้ 52.6 เมตร ระยะทางคลาดเคลื่อนเท่ากับ 52.6 เมตร (1 ช่วงเสา) ดังแสดงในแผนภาพที่ 5



แผนภาพที่ 5 ระยะทางคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยเทียบกับเหตุการณ์จริงที่ 2

6. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและระบุตำแหน่งความผิดพลาดในระบบจำหน่าย ในรูปแบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยใช้กรณีศึกษาในระบบจำหน่าย 22 kV ณ สถานีไฟฟ้าชัยบุรี โดยการคำนวณค่ากระแสผิดพลาด รวมทั้งการจำลองหาค่ากระแสผิดพลาดเพื่อทำการระบุพิกัดทางภูมิศาสตร์ เพื่อค้นหาสถานที่หลักซึ่งอยู่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาด ทำให้พนักงานแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องที่เข้าใหม่หรือพนักงานที่ยังไม่ชำนาญเส้นทาง หาดำแหน่งกระแสผิดพลาดได้รวดเร็วขึ้น

ค่าความต้านทานดิน (เอกภพ ดวงจันทร์, 2559) มีผลต่อกระแสผิดพลาด ถ้าค่าความต้านทานดินมีค่ามากขึ้น ค่ากระแสผิดพลาดจะลดลง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการคำนวณ ควรวัดค่าความต้านทานดินจากงานจริง แล้วนำค่าความต้านทานดินที่วัดได้มาเป็นค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ สำหรับการระบุตำแหน่งผิดพลาด

ผลการดำเนินงานวิจัยนี้ สามารถจำกัดพื้นที่ในการตรวจสอบเพื่อระบุตำแหน่งผิดพลาดได้ละเอียดและรวดเร็วขึ้น ค่าตำแหน่งผิดพลาดที่จำลองเมื่อเทียบกับค่าตำแหน่งผิดพลาดจากข้อมูล กฟภ. พบว่า เหตุการณ์ที่ดีที่สุดมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ 1 ช่วงเสาไฟ คิดเป็นระยะทาง 52.6 เมตร และค่ากระแสผิดพลาดมีความคลาดเคลื่อน 6.98 % จึงทำให้สามารถระบุตำแหน่งผิดพลาดได้ละเอียดขึ้น และเป็นแนวทางใหม่ในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานการระบุตำแหน่งความผิดพลาดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของกฟภ. ได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอชัยบุรี การไฟฟ้าจังหวัดปราจีนบุรี การไฟฟ้าเขตภาคกลาง ก.1 ที่ให้การสนับสนุนในการให้ข้อมูลเพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยปทุมธานีที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2560). *ค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ปี 2560*. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

กองแผนงานระบบไฟฟ้า. ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า. (2557). *คู่มือพารามิเตอร์สายระบบจำหน่ายแรงสูง 22/33 kV*. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำนักงานใหญ่ กรุงเทพมหานคร.

กองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า. (2555). *คู่มือกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ปี 2555*. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

ณัฐพร ทองแพย ศศสุต นาคะเสถียร และ ณัฐพนธ์ ทรวงนอก. (2561). *การศึกษาการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า*.

ปริญญาณิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี. เอกภพ ดวงจันทร์. (2559). *การระบุตำแหน่งความผิดพลาดในระบบ 22 kV ในรูปแบบพิกัดทางภูมิศาสตร์*.

วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

Hadi Saadat. 2004. *Power System Analysis*. McGraw – Hill International Editions.

John J. Grainger and William D. Stevenson, Jr. (1994). *Power System Analysis*. McGraw – Hill International Editions.

การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายความร้อนของ
เครื่องปรับอากาศ

DESIGN AND DEVELOPMENT OF ELECTRIC GENERATOR PRODUCT
FORM HOT WIND OF AIR-CONDITIONER

ธนกร กาญจนถาวร

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 เขตบางซื่อ

กรุงเทพมหานคร 10800

E-mail: tanakorn2569@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำพลังงานที่เสียไปโดยเปล่าประโยชน์นำกลับมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อทำประโยชน์สูงสุดในการนำไปใช้งาน โดยนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เสียหายนำกลับมารีไซเคิลและการออกแบบและพัฒนาเป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายความร้อนของคอมเพรสเซอร์เครื่องปรับอากาศโดยใช้หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองมีปัจจัยหลักได้แก่ ความเร็วลม พื้นที่หน้าตัดของใบพัด และ ระยะห่างของการติดตั้ง โดยเริ่มทำการทดลองตามเวลา 8.00-17.00 น. ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและต่อยอดผลิตภัณฑ์ดังกล่าวในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: กระแสไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, รีไซเคิล

ABSTRACT

This research was to reuse waste of energy to be electrical energy by recycling of broken electronic parts and design and develop to be electric generator by hot wind of air condition by the principle of a generator that changes mechanical energy change to electrical energy the factors affecting to experiment are speed cross section of area and span of installing the experiment started form 8.00 a.m. – 5.00 p.m. The researcher has collected data. and analyze the results of the experiment for development this product in the future

Keywords: Electricity, Generator, Recycle

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

เนื่องด้วยในปัจจุบันมีการใช้ไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน เพราะไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญต่อความเป็นอยู่แต่เนื่องจากสภาวะโลกร้อนทำให้อุณหภูมิของประเทศไทยสูงขึ้น ทำให้ประชากรต้องเปิดเครื่องทำความเย็น

มากขึ้น บ้านที่พักอาศัยหรือโรงงาน สถานประกอบการต่างๆ ภาระค่าใช้จ่ายไฟฟ้ามากขึ้นทำให้ผู้ทดลองเห็นถึงการใช้ประโยชน์จากพลังงานที่สูญเสียไปจากเครื่องระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศ มาทำการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อนำพลังงานที่สูญเสียไปนำกลับมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ โดยใช้มอเตอร์อินเวอร์เตอร์แอร์ที่มีขนาดเล็กและเหมาะสมสำหรับความเร็วลมที่ต่ำและภายในมีส่วนประกอบของแม่เหล็กและขดลวดทองแดงโดยใช้หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยประกอบด้วยปัจจัยหลักได้แก่ ความเร็วลม พื้นที่หน้าตัดของใบพัด และ น้ำหนักของใบพัด จากปัจจัยและปัญหาที่กล่าวถึงสามารถพัฒนาและแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ ให้ดีขึ้นและใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพมากขึ้น ได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อนำพลังงานที่เสียไปโดยเปล่าประโยชน์นำกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์
2. เพื่อลดขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยการนำชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ในการใช้งาน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ทฤษฎีเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามหลักการของ ไมเคิล ฟาราเดย์ ดังนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า จากกฎของ ฟาราเดย์ ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น ดังสมการ

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

โดยที่ e = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (v)

N = จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

Φ = เส้นแรงแม่เหล็ก (Wb)

t = เวลา (s)

3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

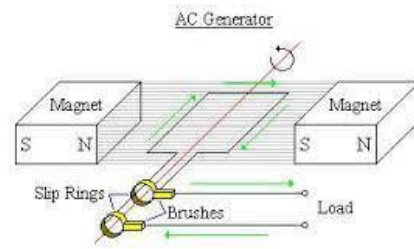
โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกได้ 2 ส่วน คือ ตัวโรเตอร์ (Rotor) และ ตัวสเตเตอร์ (Stator) การออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าสลับทำได้สองลักษณะ ดังนี้

แบบที่ 1 อามเจอร์หมุน (Revolving Armature) ขั้วแม่เหล็กสนาม (Field pole) จะเป็นตัวที่อยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ และ อามเจอร์จะเป็นตัวหมุนตัดสนามแม่เหล็ก

แบบที่ 2 สนามแม่เหล็กเป็นตัวหมุน (Revolving Field) อามเจอร์จะเป็นตัวอยู่กับที่และสเตเตอร์ ขั้วแม่เหล็กเป็นตัวหมุนเพื่อให้สนามแม่เหล็กตัดกับตัวนำที่พันอยู่บนอามเจอร์

หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

พิจารณาขดลวดตัวนำหนึ่งรอบอยู่ในสนามแม่เหล็กของขั้วเหนือและขั้วใต้ หมุนตัดสนามแม่เหล็กในแนวเส้นรอบวงและต่อออกสู่วงจรภายนอกโดยผ่านวงแหวนทองแดงสองอัน



ภาพที่ 1 แสดงถึงหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการตัดสนามแม่เหล็กในแนวเส้นรอบวงของขดลวดตัวนำ 1 เส้น จะมีค่าสมการดังต่อไปนี้

$$e = Blv \quad (2)$$

โดยที่ e = เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำ 1 เส้น มีหน่วยเป็น โวลต์
 B = เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวบบอร์ต่อตารางเมตร
 l = เป็นความยาวของขดลวดตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเมตร
 v = เป็นความเร็วของการเคลื่อนที่ตัดในแนวตั้งฉากมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส จะมีขดลวดตัวนำสามชุดวางห่างกันเป็นมุม 120 องศาทางไฟฟ้า ต้นและปลายของขดลวดพันห่างกันเป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า เนื่องจากช่วงระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กเท่ากับ 180 องศา ดังนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาทางกลกับองศาทางไฟฟ้าเป็นดังนี้

$$\theta_c = P \times \theta_m \quad (3)$$

2

เมื่อ θ_c = องศาทางไฟฟ้า
 θ_m = องศาทางกล
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

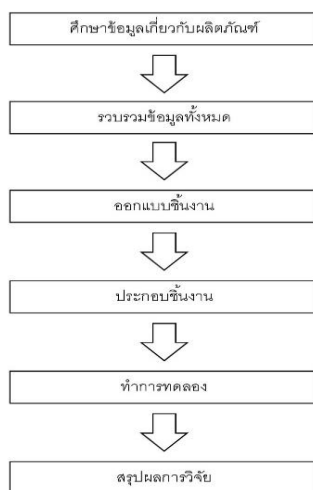
โดยลักษณะทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ จะถูกออกแบบให้ขั้วแม่เหล็ก เป็น โรเตอร์ (Rotor) โดยโรเตอร์นี้จะถูกขับเคลื่อน (ส่วนที่เคลื่อนที่) ด้วยต้นกำลัง อย่าง เครื่องยนต์ดีเซล กังหันน้ำ กังหันลม หรือกังหันแก๊ส สำหรับส่วนที่อยู่กับ ที่ คือ ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สร้างแรงดันไฟฟ้า (กำเนิดไฟฟ้า) จะติดอยู่บนโครงซึ่ง เป็นส่วนที่อยู่กับที่ (ไม่เคลื่อนที่) หรือที่เรียกว่าสเตเตอร์ (Stator) และส่วนที่ต้องเคลื่อนที่ เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 แบบแผนการวิจัย

กระบวนการวิจัยนี้ได้กำหนดวิธีการดำเนินการและขั้นตอนการดำเนินการเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้โดยใช้หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยนำมอเตอร์อินเวอร์เตอร์ของ

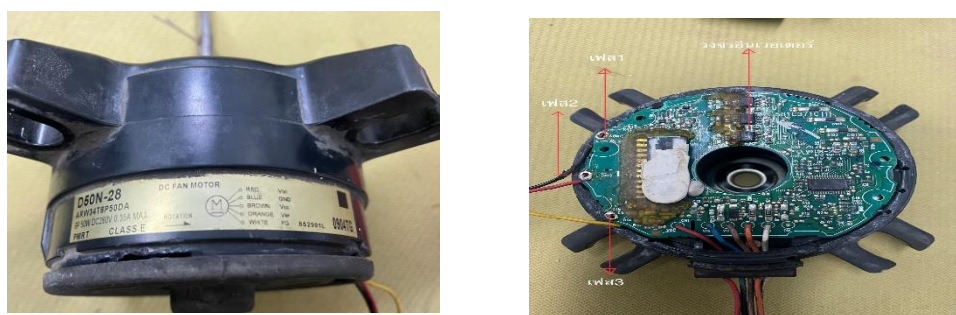
เครื่องปรับอากาศที่ได้มีการตัดแปลงโรเตอร์และสเตเตอร์ให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น และนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมาติดตั้งกับใบพัดพลาสติกชนิด 3 ใบพัด โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มตัวอย่างโดยใช้ใบพัดขนาด 16” และ 18” และแบ่งเป็นการเก็บข้อมูลและเก็บผลการทดลองด้วยวิธีการที่เหมือนกันด้วยการประกอบใบพัดเข้ากับผลิตภัณฑ์และเว้นระยะห่างระหว่างตัวผลิตภัณฑ์และคอมเพรสเซอร์เครื่องปรับอากาศ 10 ซม. และ 15 ซม. เพื่อเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลองตามลำดับต่อไป โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.2 ศึกษาทฤษฎีและพัฒนาผลิตภัณฑ์

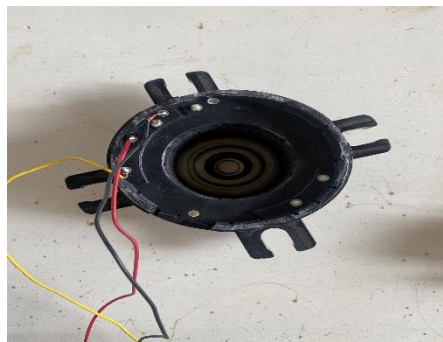
นำมอเตอร์อินเวอร์เตอร์ของเครื่องปรับอากาศที่วางจำหน่ายแล้วมาทำการบัดกรีแผงวงจรอินเวอร์เตอร์ออกจากจุดกำเนิดไฟฟ้าจากนั้นนำสายไฟฟ้าบัดกรีเข้ากับจุดกำเนิดไฟฟ้าโดยจะแบ่งเป็น 3 จุดดังภาพที่ 4 ทำให้เกิดเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ชนิด 3 เฟส ตามหลักการที่กล่าวข้างต้นเกี่ยวกับทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและมีส่วนประกอบของส่วนที่เคลื่อนที่หรือโรเตอร์ (Rotor) และ ส่วนที่อยู่กับที่หรือ สเตเตอร์ (Stator) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 3 แสดงถึงมอเตอร์อินเวอร์เตอร์ของเครื่องปรับอากาศและตำแหน่งการบัดกรีและจุดเชื่อมต่อสายไฟฟ้า

จากนั้นประกอบส่วนที่เป็น โรเตอร์เข้ากับส่วนที่เป็นสเตเตอร์และทำการปิดฝาพร้อมซีลระหว่างรอยต่อให้สนิทด้วย Silicone เพื่อป้องกันน้ำและสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นทำการทดสอบผลิตภัณฑ์

โดยการใช้ Clamp Meter ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า โดยตั้งค่า Clamp Meter ไปที่ การวัดค่ากระแสไฟฟ้าแบบ สลับและทำการทดลองหมุนส่วน โรเตอร์ด้วยมือเพื่อตรวจสอบค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าว่าผลิตภัณฑ์มีความสมบูรณ์และสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้หรือไม่



ภาพที่ 4 แสดงถึงส่วนที่เคลื่อนที่หรือ โรเตอร์ (Rotor) และ สเตเตอร์ (Stator)

4.3 เครื่องมือวิจัย

การเก็บข้อมูลของความเร็วลมระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศตามขอบเขตเวลาของงานวิจัย โดยใช้ Anemometer ในการเก็บข้อมูลของความเร็วลมโดยทำการเก็บข้อมูลที่ระยะห่าง 10 ซม. และ 15 ซม. ตามลำดับ และทำการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าด้วย Clamp Meter เพื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างก่อน และหลังการติดตั้งผลิตภัณฑ์เพื่อตรวจสอบว่าผลิตภัณฑ์ส่งผลให้การใช้งานปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือไม่



ภาพที่ 5 แสดงถึงการเก็บข้อมูลความเร็วลมและปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้า โดยใช้ Anemometer และ Clamp Meter

จากการใช้ Anemometer และ Clamp Meter ในการเก็บข้อมูลโดยทำการวัดในระยะห่างที่ 10 ซม. และ 15 ซม. โดยควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากันในทุกช่วงเวลาที่ทำกรวัดผลทดลอง (25°C)

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผลของความเร็วลมและปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อน โดยทำการวัดจากระยะห่างที่ 10 ซม. และ 15 ซม.

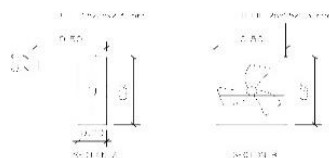
เวลา	ระยะห่าง 10 ซม.		ระยะห่าง 15 ซม.	
	ความเร็วลม (m/s)	การใช้กระแสไฟฟ้า (A)	ความเร็วลม(m/s)	การใช้กระแสไฟฟ้า (A)
8.00	4.9	6.28	3.4	6.32
9.00	5.0	6.78	3.6	6.74
10.00	5.2	6.92	3.8	6.98
11.00	5.1	7.04	3.8	7.01
12.00	5.4	7.06	3.9	6.98
13.00	5.4	6.98	4.0	6.94
14.00	5.2	6.98	3.8	6.96
15.00	5.0	6.99	3.6	6.98
16.00	5.1	7.02	3.8	7.00
17.00	5.0	6.98	3.4	6.97
เฉลี่ย	5.13	6.903	3.71	6.888

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าผลการเก็บข้อมูลก่อนทำการติดตั้งผลิตภัณฑ์ความเร็วของลมระบายความร้อนของระยะห่างที่ 10 ซม. มีค่าเฉลี่ย 5.13 m/s และปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าที่เฉลี่ยอยู่ที่ 6.903 A และระยะห่าง 15 ซม. มีค่าเฉลี่ย 3.71 m/s และปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าที่เฉลี่ยอยู่ที่ 6.888 A เมื่อเทียบกับตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าความเร็วลมเฉลี่ยมีค่าน้อยลงเนื่องจากระยะห่างของการเก็บข้อมูล และปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยใกล้เคียงกับตารางที่ 1

4.4 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูลวิจัย

นำข้อมูลความเร็วลมระบายความร้อนและปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าก่อนการติดตั้งผลิตภัณฑ์มาใส่ในตารางเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลหลังจากการติดตั้งผลิตภัณฑ์ที่มีผลลัพธ์ที่แตกต่างจากเดิมหรือไม่ โดยนำไปพัดขนาด 16" และ 18" มาติดตั้งกับผลิตภัณฑ์และเก็บผลการทดลองโดยติดตั้งตามระยะห่างที่กำหนด คือ 10 ซม. และ 15 ซม. หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งผลิตภัณฑ์ เพื่อทำการหาความเหมาะสมของระยะห่างและขนาดของใบพัดที่สามารถผลิตค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ในขั้นตอนแรก คือ การออกแบบ โครงสร้างเหล็กด้วยโปรแกรม Auto cad เพื่อใช้เป็นโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์และตัดชิ้นงานตามแบบและทำการเชื่อมประกอบจากนั้นดำเนินการติดตั้งผลิตภัณฑ์ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้หลักการที่กล่าวถึงข้างต้นเพื่อเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่ได้และนำไปสรุปผลการทดลอง



ภาพที่ 6 แสดงแบบ โครงสร้างและการตัดประกอบชิ้นงาน

นำอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าประกอบเข้ากับโครงสร้างที่ประกอบแล้วเสร็จ แล้วจึงนำ Clamp Meter มาต่อเข้ากับสายไฟฟ้าเพื่อเก็บค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองโดยใช้ใบพัดขนาด 16" และ 18" โดยทำการทดลองตามระยะที่กำหนดและเก็บผลการทดลองเพื่อนำวิเคราะห์ข้อมูล



ภาพที่ 7 แสดงการเก็บประกอบโครงเหล็กและอุปกรณ์เข้ากับเครื่องระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศ

ทำการบันทึกข้อมูลและนำผลการทดลองไปใส่ในตารางตามขอบเขตและระยะเวลาที่กำหนดเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลในการทดลอง โดยแบ่งข้อมูลออกเป็นสองตาราง คือระยะห่าง 10 ซม. และ 15 ซม. โดยปัจจัยหลักในการเก็บข้อมูลคือ แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากลมระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศ โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ชุด โดยทำการติดตั้งใบพัด ขนาด 16" และ 18" ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบข้อแตกต่างของพื้นที่หน้าตัดใบพัดว่าเป็นตัวแปรสำหรับการผลิตแรงดันไฟฟ้าหรือไม่ จากนั้นเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้และปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศเพื่อเปรียบเทียบการใช้กระแสไฟฟ้าเบื้องต้นของเครื่องปรับอากาศระหว่างการติดตั้งผลิตภัณฑ์และไม่ได้ทำการติดตั้งผลิตภัณฑ์มีผลต่างกันอย่างไร โดยนำค่าปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 1 ซึ่งเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าก่อนการติดตั้งผลิตภัณฑ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายความร้อน ของเครื่องปรับอากาศ เพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้ง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ทั้งสองตารางมาสรุปผลการวิจัยเพื่อหาข้อแตกต่างของการติดตั้งผลิตภัณฑ์ต่อไป

5. ผลการวิจัย

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากผลิตภัณฑ์และปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าของการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีใบพัดขนาด 16" และ 18" โดยติดตั้งผลิตภัณฑ์ห่างจากลมระบายความร้อน 10 ซม.

ระยะที่ทำการติดตั้งผลิตภัณฑ์ 10 ซม.				
เวลา	ใบพัดขนาด 16"		ใบพัดขนาด 18"	
	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากผลิตภัณฑ์ (V)	การใช้กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากผลิตภัณฑ์ (V)	การใช้กระแสไฟฟ้า (A)
8.00	51.8	6.28	58.4	6.32
9.00	51.4	6.78	57.8	6.74
10.00	51.9	6.92	59.4	6.98
11.00	50.9	7.04	60.5	7.01
12.00	52.1	7.02	61.2	6.98
13.00	50.7	6.92	59.8	6.94
14.00	50.8	6.98	57.9	6.96
15.00	51.2	6.96	58.5	6.98
16.00	51.3	7.01	59.3	7.00
17.00	50.9	6.94	58.2	6.97
เฉลี่ย	51.3	6.885	59.1	6.888

จากตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองของการติดตั้งผลิตภัณฑ์ผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 10 ซม. โดยใบพัดขนาด 16" สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เฉลี่ย 51.3 V และใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.885 A และใบพัดขนาด 18" สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 59.1 V ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.888 A

จากนั้นทำการทดลองอีกครั้ง โดยการติดตั้งผลิตภัณฑ์ที่ระยะห่างจากลมระบายความร้อน 15 ซม. และเก็บผลการทดลองโดยแบ่งเป็นใบพัดขนาด 16" และ 18" ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากผลิตภัณฑ์และปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าของการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีใบพัดขนาด 16" และ 18" โดยติดตั้งผลิตภัณฑ์ห่างจากลมระบายความร้อน 15 ซม.

ระยะที่ทำการติดตั้งผลิตภัณฑ์ 15 ซม.				
เวลา	ใบพัดขนาด 16"		ใบพัดขนาด 18"	
	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากผลิตภัณฑ์ (V)	การใช้กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากผลิตภัณฑ์ (V)	การใช้กระแสไฟฟ้า (A)
8.00	34.8	6.34	41.8	6.42
9.00	35.4	6.74	41.4	6.77
10.00	35.8	6.88	41.8	6.84
11.00	36.2	7.04	42.0	7.03
12.00	35.8	7.04	41.9	7.01
13.00	36.0	6.98	41.4	6.98
14.00	35.4	6.96	41.4	6.94
15.00	35.7	6.94	41.2	6.96
16.00	35.8	7.02	42.0	7.02
17.00	36.1	6.98	41.6	7.01
เฉลี่ย	35.7	6.892	41.65	6.898

จากตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองของการติดตั้งผลิตภัณฑ์ผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่าง 15 ซม. โดยใบพัดขนาด 16" สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เฉลี่ย 35.7 V และใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.892 A และใบพัดขนาด 18" สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 41.65 V ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.898 A

6. อภิปรายผล

จากตารางผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตภัณฑ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด โดยติดตั้งใบพัดขนาด 18" และมีระยะห่างอยู่ที่ 10 ซม. สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากผลิตภัณฑ์ได้เฉลี่ย 59.1 V และรองลงมาคือใบพัดขนาด 16" และติดตั้งที่ระยะห่าง 10 ซม. สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 51.3 V และเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างจาก 10 ซม. เป็น 15 ซม. โดยใช้ใบพัดขนาด 16" สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 35.7 V และใบพัดขนาด 18" สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยได้ 41.65 V โดยทำการเก็บผลทดลองในระยะเวลาที่เท่ากันและมีปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยโดยการทำการวัดระยะห่าง 10 ซม. ก่อนติดตั้งผลิตภัณฑ์อยู่ที่ 6.903 และหลังจากติดตั้งผลิตภัณฑ์และทำการวัดผลโดยติดตั้งใบพัดขนาด 16" และ 18" มีปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้า 6.885 A และ 6.888 A ตามลำดับ และทำการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้

กระแสไฟฟ้าก่อนติดตั้งผลิตภัณฑ์ที่ทำการวัดระยะห่างที่ 15 ซม. เท่ากับ 6.888 A และหลังจากการติดตั้งผลิตภัณฑ์ในระยะห่างที่ 15 ซม. โดยติดตั้งใบพัดขนาด 16" และ 18" ตามลำดับมีค่าเฉลี่ยการใช้กระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 6.892 A และ 6.898 A ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองแสดงผลได้ว่า ผลิตภัณฑ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศไม่ส่งผลให้เกิดการใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยจากการทดลองและทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ 3 ปัจจัยคือ ความเร็วลม ระยะห่างของการติดตั้งผลิตภัณฑ์ และพื้นที่หน้าตัดของใบพัด จากการเก็บข้อมูลและการทดลองสรุปผลได้ว่าระยะและขนาดของใบพัดที่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้คือ ใบพัดขนาด 18" โดยติดตั้งที่ระยะห่าง 10 ซม. จะสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าจากผลิตภัณฑ์ได้สูงสุดอยู่ 61.2 V ในเวลา 12.00 น.

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

- (1) งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาและต่อยอดได้โดยการนำอุปกรณ์ติดตั้งเข้ากับเครื่องปรับอากาศที่มีขนาดใหญ่และมีความเร็วลมระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศที่มากกว่าผลการวิจัยนี้
- (2) ทำการออกแบบวงจรเพื่อนำไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากผลิตภัณฑ์แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อความสะดวกในการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ดับบลิวเฮ้าส์ จำกัด บริษัท MTK จำกัด และ คุณรังสรรค์ กัดแก้ว ที่สนับสนุนและให้ความช่วยเหลือในด้านพื้นที่และอุปกรณ์ในการทดลองรวมทั้งให้คำปรึกษาแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ จึงทำให้ผลการทดสอบสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] บรรจง จันทมาศ. (2556). *ทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ*. สำนักพิมพ์ หส.ส.ท.
- [2] ชุมพล อังตรเสน. (2558). *ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] ธนพนธ์ พรมราช. (2557). *เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ*. ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [4] มูอามัดกาแม มะแซ. (2555). *การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กจิวอย่างง่าย*. วิทยานิพนธ์ปริญญาเทคโนโลยีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- [5] ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ. (2540). *ทฤษฎีไฟฟ้าเบื้องต้น*. สกายบุ๊กส์,

การหาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการตัดเฉือนของผลิตภัณฑ์แผ่นฐาน
ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไอร์แลนด์

THE OPTIMAL FACTORS OF CNC MACHINING PROCESS
FOR BASE PLATE IN HARD DISK DRIVE INDUSTRY

วัชรพล หลอดทอง

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: watcharaphon.lordthong@mail.kmutt.ac.th

ช่อแก้ว จตุรานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail: chorkaew.jat@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการตัดเฉือนที่ซีเอ็นซี โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล เพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องที่เกิดขึ้น ผลการวิเคราะห์การทดลองพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และอายุการใช้งานของมีดตัด จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการ คือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 500 มิลลิเมตรต่อนาที และอายุการใช้งานของมีดตัด 10,000 ชิ้น ซึ่งส่งผลให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์บกพร่องจากเดิมร้อยละ 2.79 ลดลงเหลือร้อยละ 0.97

คำสำคัญ: กระบวนการตัดเฉือน, การออกแบบการทดลอง, การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ABSTRACT

The objective of this research is to determine the optimum factor in CNC machining process by using 2^k factorial experimental design technique to reduce defective products. The results of the experimental analysis found that there were 3 influence factors, cutting speed, cutting feed and cutting tool life. From the statistical analysis of the data at a confidence level of 95 percent, it was found that the optimum factors for the process were 1,000 RPM of cutting speed, 500 mm/min of cutting feed and 10,000 pcs of cutting tool life, can reduce the percentage of defective products from 2.79% to 0.97%

Keywords: Machining Process, Design of Experiments, Optimal Parameter

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ในปัจจุบันธุรกิจอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการแข่งขันเป็นอย่างสูง ทำให้แต่ละองค์กรต้องมีการปรับตัวและเพิ่มขีดความสามารถในการพัฒนาอยู่เสมอทั้งด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ต้นทุนการผลิต และการส่งมอบ ดังนั้นในอุตสาหกรรมต้องใช้เทคนิคจำนวนมากเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เกิดผลิตภัณฑ์บกพร่องน้อยที่สุด เพื่อที่จะตอบสนองความต้องการของลูกค้าให้เกิดความพึงพอใจและมีศักยภาพในการแข่งขันกับคู่แข่งได้ โดยบริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทที่ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับกระบวนการตัดเฉือนโดยผลิตภัณฑ์บกพร่องส่วนใหญ่จะเกี่ยวกับขนาดมิติร้อยละ 65 ของผลิตภัณฑ์บกพร่องทั้งหมด ซึ่งมีสาเหตุมาจากหลากหลายปัจจัยทั้งในส่วนของค่าปัจจัยที่ไม่เหมาะสม พิกเจอร์ที่ใช้ในกระบวนการ เป็นต้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลให้ผลิตชิ้นงานแล้วเกิดผลิตภัณฑ์บกพร่องขึ้น

จากเหตุผลและปัญหาดังกล่าวจึงได้เลือกผลิตภัณฑ์รุ่น A เนื่องจากมีสัดส่วนปัญหาเรื่องขนาดมิติมากที่สุด ที่ร้อยละ 40.8 ซึ่งกระบวนการที่ส่งผลต่อปัญหาขนาดมิติ คือ กระบวนการตัดเฉือนที่ซีเอ็นซี จากการศึกษากระบวนการผลิตในปัจจุบันพบว่ายังมีหลายตัวแปรที่ยังไม่ได้ทำการควบคุมหรือการควบคุมที่ไม่เหมาะสม ดังนั้น จึงประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการปรับปรุงและกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางในการลดผลิตภัณฑ์บกพร่องที่เกิดขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อหาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการตัดเฉือนของผลิตภัณฑ์แผ่นฐาน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตพบว่ามีงานนำไปปรับใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ปฐมพงศ์ หอมศรี และคณะ (2557) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบ 2^k Factorial Design เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการลดปริมาณข้อบกพร่องที่เกิดจากการฉีดพลาสติก ไมตรี บัดตั้ง (2557) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมอัตโนมัติ โดยใช้เทคนิคการออกแบบ 3^3 Factorial Design ซึ่งสามารถทำให้ของเสียลดลงได้

อดิศร สุขเจริญสมบัติ (2561) ได้ทำการศึกษาเพื่อออกแบบการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตในขั้นตอนการติดเลนส์รวมแสงในการผลิตสายเคเบิลใยแก้วนำแสง โดยใช้เทคนิคการออกแบบ 2^k Factorial Design

ณัฐนรี ระวีวงศ์ (2562) ได้ทำการศึกษาเพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องจากกระบวนการผลิตถุงมือยาง โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม

ภาวิตา มโนรัตน์ (2562) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมผ่านการออกแบบการทดลอง 2^k แฟกทอเรียล เพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องในกระบวนการผลิตตัวกรองอากาศในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้การออกแบบการทดลอง 2^{k-1} แฟกทอเรียล ทำการพิจารณาเพื่อคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น

อินณัฐชา ชันชวีธิ์ และคณะ (2563) ได้ทำการศึกษาเพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทของบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการบรรจุอาหาร โดยใช้เครื่องแพ็คแบบแนวอนระบบอัตโนมัติ และใช้บรรจุภัณฑ์แบบม้วนฟิล์มในการขึ้นรูปของบรรจุภัณฑ์ ผ่านการออกแบบการทดลองแบบ 3^k แฟกทอเรียล

วุฒิชัย จันทโททัย และคณะ (2564) ได้ทำการศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการกัดขึ้นรูปแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ ซึ่งสามารถลดผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ระยะด้านนอกขา Fantail ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดและเพิ่มความสามารถของกระบวนการผลิตได้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวมา สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา คือ การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองมาหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติต่างๆ เพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทขนาดมิติที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ศึกษาสภาพปัญหาและสภาพการทำงานปัจจุบัน

ทำการศึกษาสภาพปัญหาและสภาพการทำงานปัจจุบัน รวมถึงทำการเก็บข้อมูลของผลิตภัณฑ์บกพร่องที่เกิดขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 - สิงหาคม 2563

4.2 การวิเคราะห์เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อปัญหา

ทำการวิเคราะห์สาเหตุโดยใช้ Why-Why Analysis และทำการกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสีย

4.3 ออกแบบการทดลองและทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ พร้อมทั้งทำการทดลองตามแผนการทดลองและเก็บผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์บกพร่องน้อยที่สุด

4.4 การยืนยันผลการทดลอง

นำปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองมาทำการควบคุมและยืนยันผลจากการนำไปใช้จริงในกระบวนการผลิตว่าผลิตภัณฑ์บกพร่องที่เกิดขึ้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5. ผลการวิจัย

5.1 ศึกษาสภาพปัญหาและสภาพการทำงานปัจจุบัน

จากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2563 พบว่า จำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องทางด้านขนาดมิติคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 65 ของผลิตภัณฑ์บกพร่องทั้งหมด และเมื่อพิจารณาในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นพบว่า ผลิตภัณฑ์รุ่น A มีสัดส่วนปัญหาเรื่องขนาดมิติมากที่สุดที่ร้อยละ 40.8 โดยที่ปัญหาเรื่องความสูงของไฟวอทมีสัดส่วนความไม่ตรงข้อกำหนดสูงถึง 68.40 ของสัดส่วนความไม่ตรงข้อกำหนดทั้งหมด

หลังจากนั้นทำการศึกษากระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์รุ่น A ตั้งแต่การรับวัตถุดิบจนถึงการขนส่งไปให้ยังลูกค้า พบว่า กระบวนการหรือกิจกรรมที่มีผลต่อความสูงไฟวอท ได้แก่ กระบวนการตัดโดยเครื่อง CNC และการตรวจสอบวัตถุดิบรับเข้า

5.2 การวิเคราะห์เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อปัญหา

สำหรับการคัดเลือกปัจจัยสำหรับการทดลองเพื่อลดของเสีย ผู้วิจัยระดมสมองร่วมกับทีมวิศวกรของบริษัท โดยใช้แนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดปัญหาซึ่งเกิดจาก 4M คือ คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ ผ่านการวิเคราะห์ Why-Why Analysis ตามตารางที่ 1 จากนั้นจึงนำปัจจัยที่น่าสงสัยไปทำการวิเคราะห์

ปัจจัยและพิกัดสาเหตุที่มีความเป็นไปได้ ตามตารางที่ 2 โดยเกณฑ์ในการพิจารณาอ้างอิงข้อมูลของฝ่าย RD&D และฝ่ายวิศวกรรม

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์สาเหตุรากเหง้าด้วย Why-Why Analysis

ปรากฏการณ์	ทำไม (1)	ทำไม (2)	ทำไม (3)
ความสูงของ ไพลอทไม่ตรง ตามข้อกำหนด	ค่าเฉลี่ยของ ความสูงไพลอท เยื้องจากค่ากลาง	ค่าพิกัด Datum D เยื้อง จากศูนย์กลาง	ขนาดมิติของแต่ละรุ่นย่อยไม่เท่ากัน ค่าขีดเซชของเครื่องจักรโดยการสุ่มตัวอย่าง 1 ข้อมูล
		ขนาดมิติของแต่ละรุ่น ย่อยไม่เท่ากัน	
		ค่าระยะห่างของ เครื่องจักรโดยการสุ่ม ตัวอย่าง 1 ข้อมูล	
	ความสูงของ ไพลอทมีความ แปรปรวนมาก	ความแปรปรวนของแต่ละ รุ่นย่อยไม่เท่ากัน	
		แผ่นฐานเกิดการเบือนเมื่อ ถูกตัด	มีดตัดมีอายุการใช้งานยาวนาน
			อัตราป้อนสูง
		ความเร็วตัดสูง	

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ปัจจัยและพิกัดสาเหตุของความสูงไพลอท (Pivot) ของผลิตภัณฑ์รุ่น A ที่ไม่ได้ตาม
ข้อกำหนด โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาจากข้อมูลของฝ่าย RD&D และฝ่ายวิศวกรรม

ปัจจัย	วิธีพิจารณา	ผลการพิจารณา
แผ่นฐานของแต่ละรุ่นย่อยมีผลต่อค่าเฉลี่ย ของพิกัด Datum D เยื้องจากค่ากลาง	เปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละรุ่นย่อย เป็น เวลา 1 เดือนย้อนหลังโดยใช้ข้อมูลการ ตรวจสอบของ IQA	ไม่น่าสงสัย
แผ่นฐานของแต่ละรุ่นย่อยมีผลต่อค่าเฉลี่ย ของไพลอทเยื้องจากค่ากลาง	เปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละรุ่นย่อย เป็น เวลา 1 เดือนย้อนหลังโดยใช้ข้อมูลการ ตรวจสอบของ IQA	ไม่น่าสงสัย
แผ่นฐานของแต่ละรุ่นย่อยมีผลต่อ ค่าความแปรปรวนของไพลอท	เปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละรุ่นย่อย เป็น เวลา 1 เดือนย้อนหลังโดยใช้ข้อมูลการ ตรวจสอบของ IQA	ไม่น่าสงสัย
แผ่นฐานของแต่ละรุ่นย่อยมีผลต่อ ค่าความแปรปรวนของไพลอท	เปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละรุ่นย่อย เป็น เวลา 1 เดือนย้อนหลังโดยใช้ข้อมูลการ ตรวจสอบของ IQA	ไม่น่าสงสัย
ช่างเทคนิคทำการชดเชยเครื่องจักรโดยใช้ ข้อมูลการตรวจสอบของ IPQA 1 ครั้ง/กะ ทำให้ไม่สามารถทำนายค่าเฉลี่ยของ Datum D ได้	ใช้ข้อมูลทางด้านสถิติของแผนก SPC ในการอ้างอิง	ไม่น่าสงสัย

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ปัจจัย	วิธีพิจารณา	ผลการพิจารณา
ช่างเทคนิคทำการชดเชยเครื่องจักร โดยใช้ข้อมูลการตรวจสอบของ IPQA 1 ครั้ง/กะ ทำให้ไม่สามารถทำนายค่าเฉลี่ยของ ไพออทได้	ใช้ข้อมูลทางด้านสถิติของแผนก SPC ในการอ้างอิง	ไม่น่าสงสัย
อายุการใช้งานของมีดตัด	จากการตรวจสอบบันทึกของฝ่ายวิศวกรรมพบว่า อายุการใช้งานของมีดตัดมีความหลากหลาย	มีความเป็นไปได้
อัตราการป้อน	จากการตรวจสอบบันทึกของฝ่ายวิศวกรรมพบว่า อัตราการป้อนมีความหลากหลาย	มีความเป็นไปได้
ความเร็วรอบ	จากการตรวจสอบบันทึกของฝ่ายวิศวกรรมพบว่า ความเร็วรอบมีความหลากหลาย	มีความเป็นไปได้

จากการวิเคราะห์ปัจจัยและพิกัดสาเหตุของความสูง ไพออทที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด พบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องมากที่สุด คือ กระบวนการตัดเฉือนที่เครื่อง CNC โดยมี 3 ปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ คือ อายุการใช้งานของมีดตัด อัตราการป้อน และความเร็วรอบ จากนั้นจึงออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ โดยกำหนดระดับปัจจัยตามตารางที่ 3 ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจากฝ่าย RD&D และฝ่ายวิศวกรรมของบริษัท และคำตอบสนองเป็นร้อยละของผลิตภัณฑ์บกพร่องต่อชิ้นงานทั้งหมด

ตารางที่ 3 ปัจจัยสำหรับการทดลอง

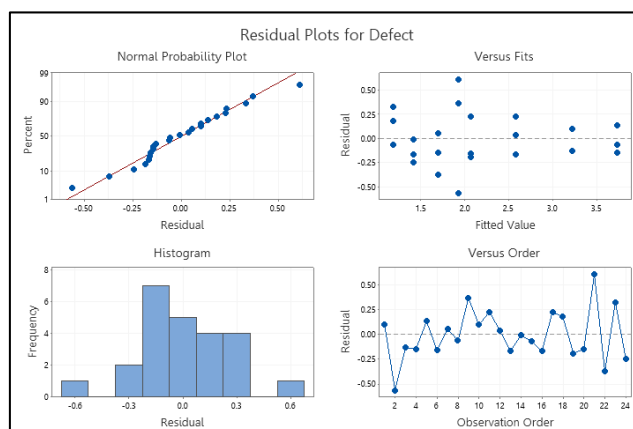
ลำดับ	ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับสูง	หน่วย
1	ความเร็วรอบ	1,000	3,000	RPM
2	อัตราการป้อน	20	500	mm/min.
3	อายุการใช้งาน	10,000	40,000	ชิ้น

5.3 ออกแบบการทดลองและทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

การออกแบบการทดลอง คำนึงถึงระดับความเหมาะสมของปัจจัยการทดลอง โดยใช้การทดลองแบบ 2^k Factorial Design มีปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ มีการทำซ้ำการทดลอง 3 ครั้ง ดังนั้น ทำการทดลองทั้งสิ้น 24 การทดลอง การทดลองละ 2,560 ชิ้น โดยตัวแปรตอบสนองพิจารณาจากการใช้ Data Gauge ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4 และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ความถูกต้องรูปแบบการทดลอง ดังรูปที่ 1 เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ได้ออกมาจากการออกแบบการทดลองมีความถูกต้องก่อนนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 4 ผลการทดลองจากค่าตัวแปรทั้ง 3 ปัจจัย

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Cutting Speed	Cutting Feed	Tool Life	Defective Ratio
15	1	1	1	1000	500	40000	3.32
2	2	1	1	3000	20	10000	1.37
7	3	1	1	1000	500	40000	3.09
12	4	1	1	3000	500	10000	1.56
24	5	1	1	3000	500	40000	3.87
5	6	1	1	1000	20	40000	1.91
4	7	1	1	3000	500	10000	1.76
19	8	1	1	1000	500	10000	1.13
10	9	1	1	3000	20	10000	2.3
23	10	1	1	1000	500	40000	3.32
21	11	1	1	1000	20	40000	2.3
14	12	1	1	3000	20	40000	2.62
22	13	1	1	3000	20	40000	2.42
1	14	1	1	1000	20	10000	1.41
16	15	1	1	3000	500	40000	3.67
17	16	1	1	1000	20	10000	1.25
6	17	1	1	3000	20	40000	2.81
3	18	1	1	1000	500	10000	1.37
13	19	1	1	1000	20	40000	1.88
8	20	1	1	3000	500	40000	3.59
18	21	1	1	3000	20	10000	2.54
20	22	1	1	3000	500	10000	1.33
11	23	1	1	1000	500	10000	1.52
9	24	1	1	1000	20	10000	1.17



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องรูปแบบการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความถูกต้องรูปแบบการทดลอง พบว่าข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระของข้อมูล และมีเสถียรภาพของความแปรปรวน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีคุณภาพ และสามารถนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองและหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อได้

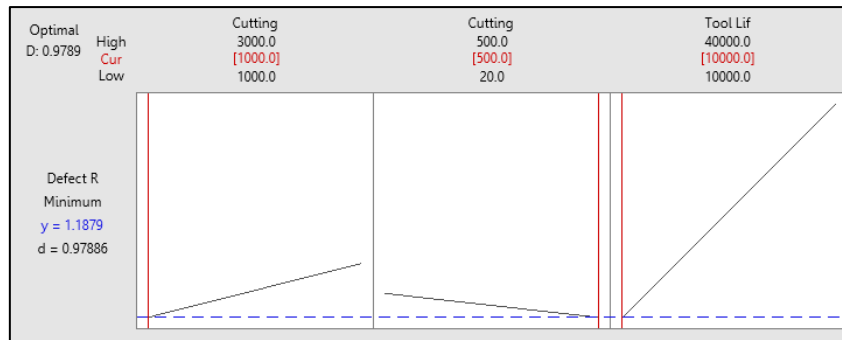
จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งทำการตัดปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง ดังรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักคือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน อายุการใช้งาน และอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย คือ อัตราการป้อนและอายุการใช้งาน พบว่า $P\text{-Value} \leq 0.05$ จึงสรุปได้ว่า ทั้ง 3 ปัจจัยหลัก และอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย อัตราการป้อนและอายุการใช้งาน ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภท ความสูงของไพวอทไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

Factorial Regression: Defective Ratio versus Cutting Speed, Cutting Feed, Tool Life						
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		2.2296	0.0572	38.96	0.000	
Cutting Speed		0.5142	0.2571	0.0572	4.49	0.000 1.00
Cutting Feed		0.4625	0.2312	0.0572	4.04	0.001 1.00
Tool Life		1.3408	0.6704	0.0572	11.72	0.000 1.00
Cutting Feed*Tool Life		0.6908	0.3454	0.0572	6.04	0.000 1.00
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0.280352	91.71%	89.96%	86.77%			
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	4	16.5201	4.1300	52.55	0.000	
Linear	3	13.6566	4.5522	57.92	0.000	
Cutting Speed	1	1.5862	1.5862	20.18	0.000	
Cutting Feed	1	1.2834	1.2834	16.33	0.001	
Tool Life	1	10.7870	10.7870	137.24	0.000	
2-Way Interactions	1	2.8635	2.8635	36.43	0.000	
Cutting Feed*Tool Life	1	2.8635	2.8635	36.43	0.000	
Error	19	1.4933	0.0786			
Lack-of-Fit	3	0.2669	0.0890	1.16	0.355	
Pure Error	16	1.2264	0.0766			
Total	23	18.0135				
Regression Equation in Uncoded Units						
Defective Ratio = 0.971 + 0.000257 Cutting Speed - 0.001435 Cutting Feed + 0.000020 Tool Life + 0.000000 Cutting Feed*Tool Life						

รูปที่ 2 การวิเคราะห์ผลปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนอง

จากนั้นทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจให้ค่า R^2 Adjust เท่ากับ ร้อยละ 89.96 หมายความว่าข้อมูลที่เก็บจากการทดลองทั้งหมด 100 หน่วย มีความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยในการทดลองที่สามารถอธิบายได้ 89.96 หน่วย จึงสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ทำการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Lack-of-fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.355 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่าข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้เหมาะสมกับความสัมพันธ์แบบเส้นตรงที่กำหนดไว้

จากการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าของปัจจัยโดยใช้ Response Optimizer พบว่า ค่าปัจจัยที่ส่งผลให้ทำให้เกิดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ไม่ตรงตามข้อกำหนดน้อยที่สุด คือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 500 มิลลิเมตรต่อนาที และอายุการใช้งานของมีดตัด 10,000 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

5.4 การยืนยันผลการทดลอง

เพื่อเป็นการยืนยันค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมดังกล่าว จึงได้ทำการทดลองนำมาใช้จริงในกระบวนการผลิตเป็นเวลา 1 เดือน พบว่า จำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องลดลงจากร้อยละ 2.79 เหลือร้อยละ 0.97 ตามตารางที่ 5 จากนั้นนำจำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่องมาเปรียบเทียบกับก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงโดยมีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

H_0 : สัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทความสูงไฟพอทที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงไม่แตกต่างกัน

H_1 : สัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทความสูงไฟพอทที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงแตกต่างกัน

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบจำนวนผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามข้อกำหนดก่อนและหลังการปรับปรุง

	จำนวนชิ้นงานตรวจสอบ (ชิ้น)	จำนวนผลิตภัณฑ์บกพร่อง (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ บกพร่อง
ก่อนการปรับปรุง	48,640	1,359	2.79
หลังการปรับปรุง	20,480	198	0.97

เมื่อนำข้อมูล ไปวิเคราะห์ผ่าน โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ พบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.005 ดังนั้น ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 แสดงว่า สัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่องก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

6. สรุปผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ต้องการลดผลิตภัณฑ์บกพร่องและหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการตัดเฉือน โดยได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial ทำการทดลอง 24 การทดลอง เพื่อหา ระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าระดับปัจจัยที่ส่งผล ทำให้ความสูงของไฟพอทไม่เป็นไปตามข้อกำหนดน้อยที่สุด ได้แก่ ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 500 มิลลิเมตรต่อนาที และอายุการใช้งานของมีดตัด 10,000 ชิ้น ซึ่งสามารถลดปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ไม่เป็นตามข้อกำหนดจากร้อยละ 2.79 เหลือร้อยละ 0.97 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปการเปรียบเทียบผลก่อน-หลังปรับปรุง

หัวข้อ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	1,500	1,000
อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/นาที)	300	500
อายุการใช้งานของมีดตัด (ชิ้น)	35,000	10,000
เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์บกพร่อง	2.79	0.97

7. ข้อเสนอแนะ

(1) จากผลงานวิจัยถึงแม้จะมีการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่อง CNC เพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดผลิตภัณฑ์บกพร่องที่เกิดขึ้น พบว่ายังมีผลิตภัณฑ์บกพร่องเกิดขึ้นอยู่ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่องในด้านอื่นๆ

(2) ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม อาจจะประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองโดยวิธีผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยได้

(3) การปรับตั้งค่าปัจจัยของเครื่อง CNC ควรมีการอบรมให้กับผู้เกี่ยวข้องเพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจเพิ่มมากขึ้น และมีการตั้งค่ามาตรฐานในการปรับค่าปัจจัย

(4) ควรนำวิธีการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยเริ่มตั้งแต่ช่วงการทดลองการผลิตเนื่องจากเป็นช่วงที่มีความสำคัญมาก เพราะหากได้สภาวะปัจจัยที่เหมาะสมตั้งแต่เริ่มก็จะสามารถลดผลิตภัณฑ์บกพร่อง ลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายต่างๆ รวมถึงโอกาสเสี่ยงในเรื่องข้อร้องเรียนจากลูกค้า

8. เอกสารอ้างอิง

- ณัฐนรี ระวิวงศ์. (2562). การลดของเสียในกระบวนการผลิตถุงมืออย่างด้วยการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปฐมพงษ์ หอมศรี และจักรพรรธณ คงธนะ. (2557). การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคล รัษฎบุรี, 12(2), 11-28.
- ภาวิดา มโนรัตน์. (2562). การลดของเสียในกระบวนการผลิตตัวกรองอากาศในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยการออกแบบการทดลอง, งานนิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ไมตรี บัดตั้ง. (2557). การลดของเสียในกระบวนการเชื่อมอัด โนมัตโดยวิธีการออกแบบการทดลอง, สารนิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วุฒิชัย จันโททัย และช่อแก้ว จตุรานนท์. (2564). การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการกัดขึ้นรูปแกนหัวอ่าน โดยการออกแบบการทดลอง. หนังสือประมวลบทความการประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 12 ประจำปี 2564, วันที่ 28 พฤษภาคม 2564 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 345-354.

อดิศร สุขเจริญสมบัติ. (2561). การออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการติดยึดเสริมแรงใน การผลิตสายเคเบิลใยแก้วนำแสง, การค้นคว้าอิสระปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ ทางวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

อินฉัญชา ชันชวีธี และจิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์. (2563). การปรับปรุงกระบวนการบรรจุเพื่อลดการสูญเสียของ บรรจุภัณฑ์. หนังสือประมวลบทความการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 38 ประจำปี 2563, วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2563 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 419-424.

แบบจำลองระบบแจ้งเหตุผิดปกติในสถานีไฟฟ้าย่อย

MODEL OF ANNUNCIATOR SYSTEM IN ELECTRICAL SUBSTATION

กริชติลักษณ์ จรจรัส, สุปราโมทย์ โชติวรณ, ปกภูมิ โททวี,

ทศพร สุขยศ*, ดร.พุทธิพงษ์ จรูญศิริพันธ์

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

*Corresponding E-mail: todsaporn.s@ptu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองระบบแจ้งเหตุผิดปกติของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคเหนือ จังหวัดลพบุรี บนเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งหรือ IoT โดยแบบจำลองที่นำเสนอประกอบด้วย 4 ส่วนงาน คือ อุปกรณ์แจ้งเหตุทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณสถานะความผิดปกติและแสดงผล ระบบฐานข้อมูลสำหรับเก็บและจัดการข้อมูล ระบบแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ และเว็บเพจสำหรับดูสถานะผิดปกติของคั้งที่อุปกรณ์แจ้งเหตุ

ผลการจำลองสถานการณ์การเกิดความผิดปกติในสถานีไฟฟ้าย่อย อุปกรณ์แจ้งเหตุสามารถตรวจจับตำแหน่งที่เกิดปัญหา จากนั้นสั่งให้หลอด LED ติดสว่าง และส่งข้อมูลสถานะความผิดปกติดังกล่าวผ่านเครือข่ายไวไฟไปยังฐานข้อมูลเพื่อบันทึกข้อมูล จากนั้นระบบจะแจ้งข้อความเตือนไปยังไลน์ของทีมซ่อมบำรุงที่ดูแลรับผิดชอบได้รับทราบพร้อมกัน นอกจากนี้เจ้าหน้าที่ยังสามารถตรวจสอบสถานะผิดปกติของคั้งของอุปกรณ์แจ้งเหตุได้ผ่านทางเว็บเพจ

คำสำคัญ: อุปกรณ์แจ้งเหตุ, สถานีไฟฟ้าย่อย, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, เว็บเพจ, ไวไฟ, ไลน์

ABSTRACT

This paper presents the model of annunciator system in electrical substation of Provincial Electricity Authority (PEA) zone 3 in the northern region, Lopburi province, implement on Internet of Things (IoT) technology. The proposed model consists of 4 parts : fault alarm annunciator, database system, line notification and web server applications.

The fault simulation results show that the annunciator detects the fault location, then turns LED lamp ON and sends through WiFi network the fault data to database for recording. Also, the warning message is notified to line application of service team. Moreover, the system provides the web page for monitoring the existing fault status of the annunciator located at the substation.

Keywords: Annunciator, Electrical Substation, Internet of Things, Web Page, WiFi, Line

1. ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้าจากต้นทางมายังผู้ใช้ไฟฟ้าที่ปลายทาง ระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อทำหน้าที่ในการปรับระดับแรงดันสูงขึ้นหรือต่ำลงให้เหมาะสมกับระบบส่ง (Transmission) และระบบจำหน่าย (Distribution) ดังนั้นหากเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าหรือมีอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยทำงานผิดปกติแล้ว ก็จะทำให้สายส่งบางวงจรหรืออุปกรณ์บางตัวไม่ทำงาน ยิ่งหากเป็นกรณีที่ความผิดปกติมีความรุนแรงด้วยแล้ว ก็อาจเกิดปัญหาไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างและเป็นเวลานาน

โดยปกติแล้วเมื่อเกิดเหตุผิดปกติขึ้น อุปกรณ์แจ้งเหตุที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าจะตรวจพบและแสดงตำแหน่งที่เกิดปัญหาให้กับเจ้าหน้าที่ซ่อมบำรุงได้รับทราบ แต่อย่างไรก็ตาม ตามสถานีไฟฟ้าย่อยต่าง ๆ มักจะไม่มีเจ้าหน้าที่ประจำการอยู่ ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุขึ้น เจ้าหน้าที่ซ่อมบำรุงอาจไม่สามารถทราบได้ในทันที จะทราบได้ก็ต่อเมื่อถึงรอบการเข้าตรวจสอบสถานีไฟฟ้า ซึ่งอาจใช้เวลาเป็นวันหรือหลายวัน หรือนอกจากได้รับการแจ้งเตือนจากศูนย์สั่งการ (SCADA) ซึ่งก็มักจะมีค่าล่าช้าอีกเช่นกัน

ในบทความนี้จึงได้นำเสนอระบบแจ้งเหตุผิดปกติในสถานีไฟฟ้าย่อย ที่ไม่ใช้แค่เพียงอุปกรณ์แจ้งเหตุที่ติดตั้งภายในสถานีไฟฟ้าย่อย แต่ยังมีฐานข้อมูลเพื่อเก็บบันทึกเหตุการณ์ ส่วนการส่งข้อความผ่านไลน์ไปยังเจ้าหน้าที่ทีมซ่อมบำรุงโดยตรง และเว็บเพจสำหรับการตรวจสอบสถานะผิดปกติดังกล่าว

2. วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์แจ้งเหตุที่สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายไวไฟได้
- (2) เพื่อเขียนโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลและเว็บเซิร์ฟเวอร์
- (3) เพื่อให้ทีมซ่อมบำรุงสามารถรับรู้สถานะผิดปกติผ่านไลน์
- (4) เพื่อให้ทีมซ่อมบำรุงตรวจสอบสถานะผิดปกติดังกล่าวได้ผ่านทางเว็บเพจ

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 สถานีไฟฟ้าย่อย

สถานีไฟฟ้าย่อยหรือลานไกไฟฟ้า (Switch Yard) คือส่วนสำคัญในการส่งกำลังของระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าต้นทางไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าที่ปลายทาง (Rajat, 2020) ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลง เป็นจุดเชื่อมระหว่างระบบสายส่งขนาดแรงดัน 115 kV กับระบบจำหน่าย ขนาดแรงดัน 22 kV และ 33 kV เข้าด้วยกัน เป็นจุดติดตั้งเครื่องวัดไฟฟ้า อุปกรณ์ตัดตอน อุปกรณ์ควบคุม อุปกรณ์ป้องกัน และอุปกรณ์สื่อสาร ตัวอย่างของสถานีไฟฟ้าย่อยแสดงดังแผนภาพที่ 1 และ 2



แผนภาพที่ 1 สถานีไฟฟ้าย่อยระบบ 115 kV



แผนภาพที่ 2 สถานีไฟฟ้าย่อยระบบ 22 kV

ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีอุปกรณ์หลักคือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) สำหรับตัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจร และรีเลย์ป้องกัน (Protective Relay) สำหรับป้องกันความผิดปกติต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าและสิ่งปลดอุปกรณ์ที่เกิดปัญหาออกจากระบบ เพื่อป้องกันระบบหรืออุปกรณ์เสียหาย (รักษ์, 2558) อุปกรณ์ตัดต่อวงจรจะถูกติดตั้งไว้ภายในตู้สวิตช์เกียร์ (Switch Gear) ดังแผนภาพที่ 3 โดยที่หน้าตู้สวิตช์เกียร์จะติดตั้ง ปุ่ม สวิตช์ มิเตอร์ รีเลย์ป้องกัน อุปกรณ์แจ้งเหตุ และอุปกรณ์สื่อสาร ดังแผนภาพที่ 4



แผนภาพที่ 3 ตู้สวิตช์เกียร์



แผนภาพที่ 4 อุปกรณ์บนหน้าตู้สวิตช์เกียร์

3.2 อุปกรณ์แจ้งเหตุผิดปกติ

คือ อุปกรณ์ตรวจจับ แสดงผล และส่งสัญญาณเตือน เมื่อเกิดเหตุผิดปกติกับ อุปกรณ์ เครื่องจักร หรือระบบให้กับเจ้าหน้าที่ที่ได้รับทราบ (Wisico, 2014) ตัวอย่างเช่น ใช้ในการตรวจสอบ อุณหภูมิ ความดัน หรือความเร็วรอบมอเตอร์ เป็นต้น

อุปกรณ์แจ้งเตือนสถานะผิดปกติในสถานีไฟฟ้าย่อยมีหน้าที่ตรวจสอบความผิดปกติของระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า (Gary, 2011) เมื่อเจ้าหน้าที่รับทราบถึงสถานการณ์ที่เกิดขึ้น จะกดปุ่ม “ACK” (Acknowledge) เพื่อรับทราบปัญหา จากนั้นเจ้าหน้าที่จะเข้าไปแก้ไขปัญหาจนเสร็จสิ้น แล้วจึงกดปุ่ม “RESET” เพื่อคืนสถานะปกติให้กับอุปกรณ์ ตัวอย่างของอุปกรณ์แจ้งเหตุในสถานีไฟฟ้าย่อยแสดงดังแผนภาพที่ 5



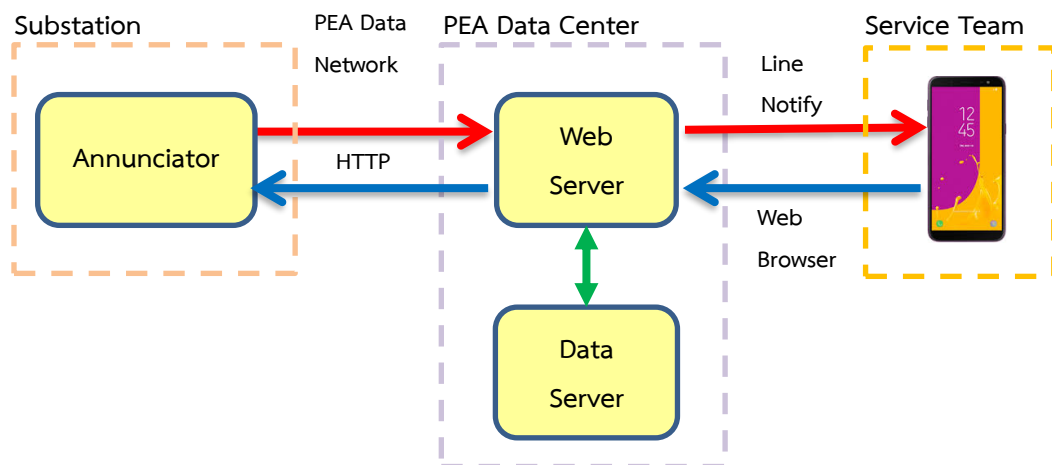
แผนภาพที่ 5 อุปกรณ์แจ้งเหตุที่ติดตั้งบนหน้าตู้สวิตช์เกียร์

3.3 ระบบแจ้งเหตุผิดปกติในสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบกริดอัจฉริยะ (Smart Grid) สำหรับระบบไฟฟ้ายุคใหม่จะต้องมีคุณลักษณะสำคัญ 3 ประการ คือ มีระบบสารสนเทศ ทำงานแบบอัตโนมัติ และเข้าถึงข้อมูลได้ (Hongwei Li, 2011) ดังนั้นสถานีไฟฟ้าย่อยอัจฉริยะ (Smart Substation) จึงต้องมีอุปกรณ์ที่ชาญฉลาดติดตั้งอยู่ภายใน เพื่อทำหน้าที่ ตรวจสอบ ตรวจสอบ ป้องกัน ควบคุม เก็บข้อมูล แสดงผล สื่อสารข้อมูล และวิเคราะห์ผล เป็นต้น

ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการเพิ่มความสามารถของอุปกรณ์แจ้งเหตุธรรมดาให้เป็นระบบแจ้งเหตุแบบชาญฉลาด โดยระบบประกอบด้วย 4 ส่วนคือ อุปกรณ์แจ้งเหตุ ระบบจัดการฐานข้อมูล ส่วนแจ้งข้อความเตือนผ่านไลน์ และเว็บเพจ โดยในส่วนอุปกรณ์แจ้งเหตุจะติดตั้งอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ส่วนฐานข้อมูลระบบแจ้งเตือนผ่านไลน์ และเว็บเพจ จะทำงานจากภายในศูนย์ข้อมูล (Data Center)

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์แจ้งเหตุจะตรวจพบ จากนั้นแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ทำงานผิดปกติด้วยหลอดไฟที่หน้าตัวอุปกรณ์ ขณะเดียวกันก็จะส่งข้อมูลสถานะผิดปกติไปยังศูนย์ข้อมูลเพื่อบันทึกสถานะผิดปกติลงฐานข้อมูล และส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังไลน์ของทีมซ่อมบำรุง ซึ่งหลักการทำงานได้แสดงตามไดอะแกรมในแผนภาพที่ 6



แผนภาพที่ 6 ระบบแจ้งเหตุผิดปกติในสถานีไฟฟ้าย่อย

3.4 เซิร์ฟเวอร์ข้อมูล (Data Server)

คือเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำงานเป็นระบบฐานข้อมูล ทำงานแบบไคลเอนต์-เซิร์ฟเวอร์ (Client-Server) โดยเซิร์ฟเวอร์จะมีฐานข้อมูลสำหรับเก็บข้อมูล และมีระบบจัดการฐานข้อมูลทำหน้าที่ให้บริการข้อมูลกับผู้ใช้งานในฝั่งไคลเอนต์ (ชาญชัย, 2552)

ฐานข้อมูลคือกลุ่มของข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวมไว้โดยมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน อาจเก็บไว้ภายในแฟ้มเดียวกันหรือแยกเก็บหลายแฟ้ม ระบบฐานข้อมูล (Database System) คือโครงสร้างของสารสนเทศที่รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันเข้าไว้ด้วยกัน ฐานข้อมูลอาจแบ่งได้เป็น ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ ฐานข้อมูลแบบเครือข่าย และฐานข้อมูลแบบลำดับชั้น เป็นต้น (เทคโนโลยีสารสนเทศ, 2551)

ระบบจัดการฐานข้อมูล (DBMS : Database Management System) คือซอฟต์แวร์จัดการฐานข้อมูล ทำหน้าที่จัดเตรียมพื้นที่จัดเก็บข้อมูล การเข้าถึงข้อมูล ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบสำรองข้อมูล และ

สิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกและมีประสิทธิภาพ เช่น การสร้างฐานข้อมูล การสร้างตารางข้อมูล การเพิ่ม ลบ หรือแก้ไขข้อมูลในฐานข้อมูล เป็นต้น

DBMS ที่นิยมใช้การอย่างแพร่หลาย ได้แก่ MySQL PostgreSQL Microsoft Access หรือ SQL Server เป็นต้น โดยปกติแล้วซอฟต์แวร์ฐานข้อมูลมักจะมี ODBC (Open Database Connectivity) มาให้ เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับฐานข้อมูลแบบอื่นได้

3.5 เว็บเซิร์ฟเวอร์

คือ เครื่องคอมพิวเตอร์หรือโปรแกรมให้บริการเว็บไซต์ ทำงานแบบไคลเอนต์-เซิร์ฟเวอร์ (ชาญชัย, 2552) เมื่อผู้ใช้งานทางฝั่งไคลเอนต์พิมพ์ URL (Universal Resource Locator) บนเว็บเบราว์เซอร์ เครื่องไคลเอนต์จะแปลงชื่อโฮสต์ภายใน URL เป็นไอพีแอดเดรส ด้วยโปรโตคอล TCP พอร์ต 80 ในการเชื่อมต่อ และใช้โปรโตคอล HTTP (Hypertext Transfer Protocol) ในการเรียกข้อมูล เว็บเซิร์ฟเวอร์จะตอบสนอง (Response) เป็นเว็บเพจกลับไปยังหน้าเว็บเบราว์เซอร์ของไคลเอนต์ ซอฟต์แวร์เว็บเซิร์ฟเวอร์ที่ใช้ในบทความนี้ คือ Apache

3.6 XAMPP

เนื่องจากการพัฒนาระบบแจ้งเหตุตามแผนภาพที่ 6 ดิถีปัญหาด้านการใช้งานศูนย์ข้อมูล ทางคณะผู้วิจัยจึงใช้ซอฟต์แวร์ XAMPP จำลองให้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำงานเป็นฐานข้อมูลและเว็บเซิร์ฟเวอร์แทนศูนย์ข้อมูล สามารถทำงานเป็นได้ทั้งฝั่งเซิร์ฟเวอร์และฝั่งไคลเอนต์ในตัว โดยไม่ต้องเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต ใช้การทดสอบการบนเครือข่ายไวไฟแทน ช่วยให้สะดวก ประหยัดเวลา และประหยัดต้นทุน

คำว่า XAMPP สามารถจำแนกได้ดังนี้ อักษร X หมายถึง Cross Platform รองรับได้ 4 ระบบปฏิบัติการ คือ Windows Mac OS Linux และ Solaris อักษร A หมายถึงเว็บเซิร์ฟเวอร์ Apache อักษร M หมายถึง ฐานข้อมูล MySQL อักษร P หมายถึงภาษา PHP และอักษร P ตัวสุดท้ายหมายถึงภาษา Perl

Apache คือ โปรแกรมจำลองเว็บเซิร์ฟเวอร์เพื่อทดสอบสคริปต์หรือเว็บไซต์ พัฒนาด้วยภาษา PHP

MySQL คือ ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (RDBMS: Relational Database Management System) (สงกรานต์, 2545) เป็นฟรีแวร์ เป็นซอฟต์แวร์แบบเปิด (Open Source) มีประสิทธิภาพสูง รวดเร็ว รองรับจำนวนผู้ใช้และข้อมูลจำนวนมาก รองรับระบบปฏิบัติการ Unix OS/2 Mac OS หรือ Windows

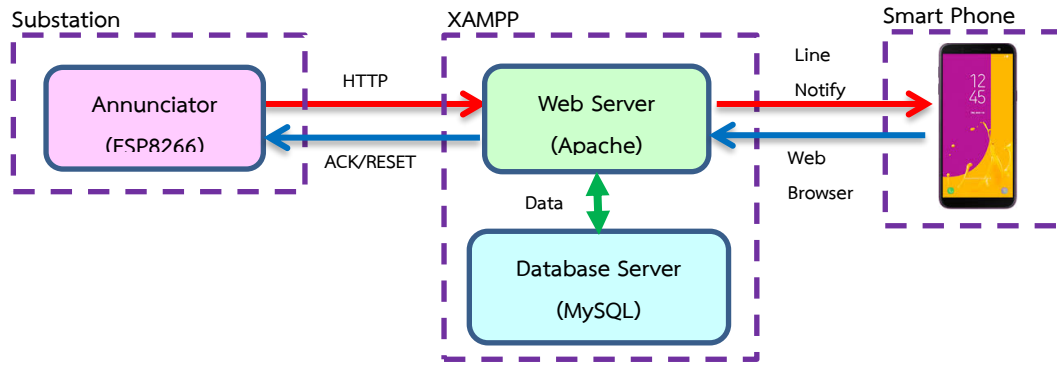
PHP (Hypertext Preprocessor) คือ ภาษาคอมพิวเตอร์แบบสคริปต์ที่ใช้ในการทำเว็บไซต์ที่มีการตอบโต้กับผู้ใช้แสดงผลในรูปแบบ HTML โดยมีโครงสร้างมาจากภาษาซี ภาษาจาวา และภาษาเพิร์ล ง่ายต่อการเรียนรู้

phpMyAdmin คือ โปรแกรมบริหารจัดการฐานข้อมูลที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษา PHP ใช้จัดการฐานข้อมูล MySQL ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ทำงานบนเว็บเซิร์ฟเวอร์ (ชาญชัย, 2552) สามารถสร้างฐานข้อมูลหรือตาราง เพิ่มแก้ไข และลบข้อมูล สามารถ Query ด้วยภาษา SQL และสามารถโหลดไฟล์ข้อความไปเก็บเป็นข้อมูลในตารางได้

4. วิธีดำเนินการวิจัย

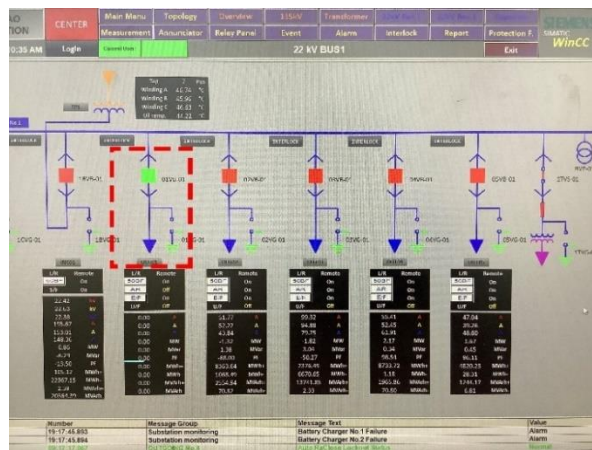
4.1 แผนการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์แจ้งเหตุ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU รุ่น ESP8266 ทำงานเป็นอุปกรณ์แจ้งเหตุ และพัฒนาโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ XAMPP จำลองศูนย์ข้อมูลเพื่อทำหน้าที่จัดการฐานข้อมูล MySQL และเป็นเว็บเซิร์ฟเวอร์ โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะทำงานอยู่บนเครือข่ายไวไฟเดียวกันเพื่อจำลองเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยมีโคอะแกรมระบบดังแผนภาพที่ 7

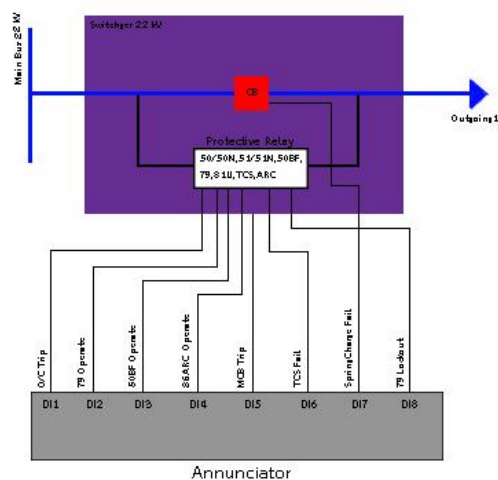


แผนภาพที่ 7 โค้ดแกรมของแบบจำลองระบบแจ้งเหตุที่น่าเสนอ

ระบบแจ้งเหตุที่น่าเสนอจะทดสอบกับวงจรสายป้อนที่ 1 ของสถานีไฟฟ้าย่อย ตามโค้ดแกรมเส้นเดียวในแผนภาพที่ 8 โดยกำหนดให้มีสัญญาณผิดปกติจำนวน 8 สัญญาณต่อเข้ามายังอุปกรณ์แจ้งเตือนตามแผนภาพที่ 9 และมีรายละเอียดของแต่ละสัญญาณดังแสดงในตารางที่ 1



แผนภาพที่ 8 โค้ดแกรมเส้นเดียวของสายป้อนในสถานีไฟฟ้าย่อย



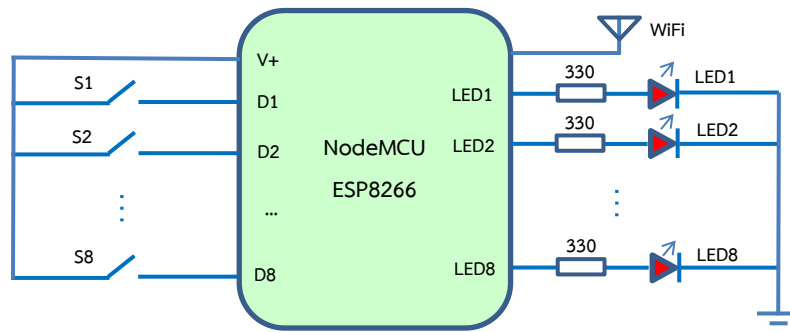
แผนภาพที่ 9 สัญญาณแจ้งเหตุสำหรับวงจรสายป้อนที่ 1

ตารางที่ 1 รายการสถานะผิดปกติของสายป้อนที่ 1

อินพุต	สถานะผิดปกติ	รายละเอียด
D1	O/C Trip	Over Current Relay Trip ทำงาน
D2	79 Operate	Auto Reclosing ทำงาน
D3	50 BF Operate	Instantaneous Overcurrent ทำงาน
D4	86 Arc Operate	Arc Detector ทำงาน
D5	MCB Trip	MCB สำหรับ DC or AC Power ทำงาน
D6	TCS Fail	Coil Trip Circuit Breaker ชำรุด
D7	Spring Charge Fail	Spring Charge for Circuit Breaker ไม่ทำงาน
D8	79 Lockout	Auto Reclosing ทำงานจน Lockout

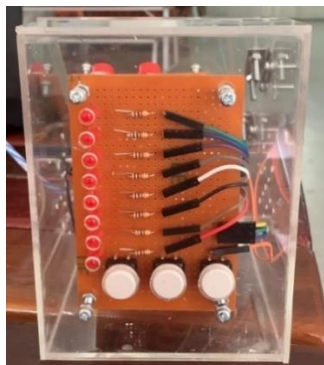
4.2 อุปกรณ์แจ้งเหตุผิดปกติ

อุปกรณ์แจ้งเหตุใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU เบอร์ ESP8266 ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายไวไฟได้ รองรับการทำงานบนเทคโนโลยี IoT โดยอุปกรณ์มีช่องรับสัญญาณอินพุตจำนวน 8 ช่องคือ D1 ถึง D8 เมื่อมีสัญญาณผิดปกติเข้ามาที่ช่องอินพุตใด หลอดไฟ LED1 ถึง LED8 ที่สัมพันธ์กับแต่ละอินพุตก็จะติดสว่าง

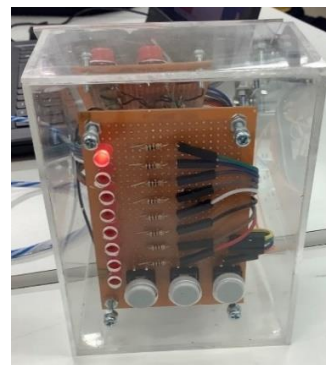


แผนภาพที่ 10 วงจรภายในของอุปกรณ์แจ้งเหตุด้วยบอร์ด NodeMCU ESP8266

ทดสอบการทำงานโดยสมมติให้สายป้อนที่ 1 เกิด O/C Trip (Overcurrent Trip) ขึ้นที่ช่องอินพุต D1 ของอุปกรณ์แจ้งเหตุ จะทำให้หลอด LED1 ติด ซึ่งเห็นได้จากแผนภาพที่ 11 แสดงหลอด LED1 ดับอยู่ก่อนเกิดเหตุ และแผนภาพที่ 12 แสดงหลอดไฟ LED1 ติดสว่างหลังเกิดเหตุ



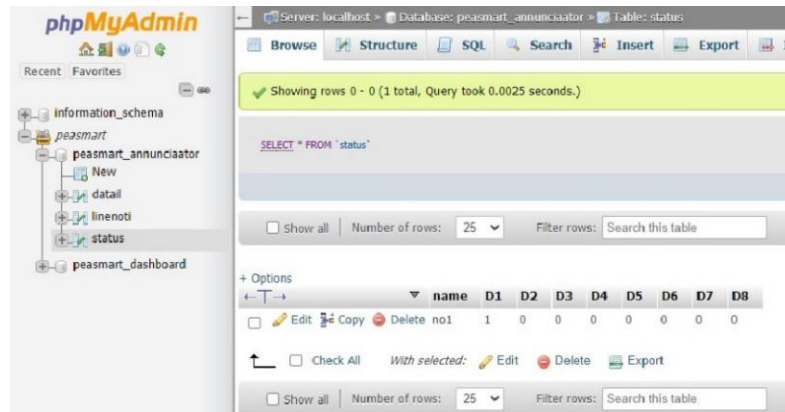
แผนภาพที่ 11 อุปกรณ์แจ้งเหตุก่อนเกิดเหตุ



แผนภาพที่ 12 อุปกรณ์แจ้งเหตุหลังเกิดเหตุ

4.3 ฐานข้อมูล

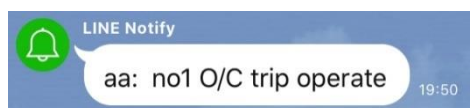
เมื่ออุปกรณ์แจ้งเหตุตรวจพบสัญญาณสถานะผิดปกติที่ขาอินพุต D1 แล้ว โปรแกรมใน ESP8266 ก็จะส่ง HTTP Request ไปยังเซิร์ฟเวอร์ โปรแกรมสคริปต์ที่เขียนด้วยภาษา PHP บนฝั่งเซิร์ฟเวอร์ (Rui, 2019) ก็จะตอบสนองโดยการบันทึกสถานะของ D1 ให้เท่ากับ 1 ซึ่งหมายถึงเกิดความผิดปกติ ลงในตารางชื่อ “status” ของฐานข้อมูล “peasmart_annunciator” ดังแสดงในแผนภาพที่ 13 โดยรายละเอียดของความผิดปกติของแต่ละอินพุตที่กำหนดโดยตารางที่ 1 จะถูกเก็บไว้ในตารางชื่อ “detail” ของฐานข้อมูล



แผนภาพที่ 13 ตาราง “status” แสดงสถานะอินพุต D1 ของอุปกรณ์แจ้งเหตุหลังเกิดเหตุ

4.4 ระบบแจ้งเตือนข้อความผ่านไลน์

หลังจากระบบแจ้งเหตุบันทึกสถานะผิดปกติลงฐานข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ระบบก็จะส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังไลน์ของทีมซ่อมบำรุงให้รับทราบสถานะผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรมสคริปต์ที่เขียนด้วยภาษา PHP ในการส่งข้อความผ่าน Line Notify (ศิริชัย, 2563) โดยกำหนด Line Token ปลายทางไว้ในตาราง “linenoti” ของฐานข้อมูล ข้อความแจ้งเตือนบนไลน์ของทีมซ่อมบำรุงแสดงในแผนภาพที่ 14



แผนภาพที่ 14 ข้อความบนไลน์หลังเกิดเหตุผิดปกติ

4.5 เว็บเพจ

ในกรณีที่เจ้าหน้าที่ในทีมซ่อมบำรุงต้องการตรวจสอบสถานะผิดปกติของอุปกรณ์แจ้งเตือนเจ้าหน้าที่สามารถเข้าไปดูได้จากหน้าเว็บเพจที่ออกแบบให้เลียนแบบคล้ายกับหน้าจอของอุปกรณ์แจ้งเตือนที่ตั้งอยู่ที่สถานีไฟฟ้า โดยเว็บเพจถูกเขียนขึ้นจากภาษา PHP ในการเรียกข้อมูลจากฐานข้อมูลมาแสดง (Rui, 2011) นอกจากนั้นบนหน้าเพจยังมีปุ่มกด “Ack” และ “Reset” สำหรับส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์แจ้งเหตุระยะไกลได้ โดยหน้าเว็บเพจของระบบแจ้งเหตุได้แสดงตามแผนภาพที่ 15 และ 16



Anunncaitor : no1

<input checked="" type="checkbox"/>	O/C trip
<input checked="" type="checkbox"/>	Auto reclose lockout
<input checked="" type="checkbox"/>	50 BF operate
<input checked="" type="checkbox"/>	86 Arc operate
<input checked="" type="checkbox"/>	MCB trip
<input checked="" type="checkbox"/>	6TCS fail
<input checked="" type="checkbox"/>	7Spining Charg fail
<input checked="" type="checkbox"/>	8Auto reclose operate

Ack Reset

แผนภาพที่ 15 หน้าเว็บเพจก่อนเกิดเหตุ



Anunncaitor : no1

<input type="checkbox"/>	O/C trip
<input checked="" type="checkbox"/>	Auto reclose lockout
<input checked="" type="checkbox"/>	50 BF operate
<input checked="" type="checkbox"/>	86 Arc operate
<input checked="" type="checkbox"/>	MCB trip
<input checked="" type="checkbox"/>	6TCS fail
<input checked="" type="checkbox"/>	7Spining Charg fail
<input checked="" type="checkbox"/>	8Auto reclose operate

Ack Reset

แผนภาพที่ 16 หน้าเว็บเพจหลังเกิดเหตุ

5. สรุป

ระบบแจ้งเหตุผิดปกติที่นำเสนอ ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ อุปกรณ์แจ้งเหตุ ระบบจัดการฐานข้อมูล ระบบแจ้งข้อความเตือนผ่านไลน์ และเว็บเพจ จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุปกรณ์แจ้งเหตุตรวจพบสถานะผิดปกติหลอด LED ของอุปกรณ์จะติดสว่างแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ที่เกิดเหตุ ระบบ IoT ของอุปกรณ์แจ้งเหตุจะส่งสถานะผิดปกติไปบันทึกยังฐานข้อมูล จากนั้นระบบจะแจ้งข้อความเตือนไปยังไลน์ของทีมซ่อมบำรุงให้รับทราบถึงปัญหา และเจ้าหน้าที่สามารถตรวจสอบสถานะผิดปกติค้างของอุปกรณ์แจ้งเหตุได้

บทความนี้เป็นการนำเสนอการประยุกต์องค์ความรู้ทางด้านคอมพิวเตอร์มาใช้งานทางด้านไฟฟ้ากำลัง ถือเป็นนวัตกรรมในงานซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติด้านการจัดการข้อมูล ทำงานแบบอัตโนมัติ และเข้าถึงได้ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของสถานีไฟฟ้าย่อยอัจฉริยะ ระบบที่นำเสนอจึงมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ SCADA เนื่องจากระบบ SCADA ต้องใช้คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ RTU อุปกรณ์เครือข่าย สายสัญญาณไฟเบอร์ออปติก ฯลฯ จึงเป็นระบบที่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่สูงกว่ามาก

6. ข้อเสนอแนะ

ความตั้งใจแรกของบทความนี้ก็คือการพัฒนาาระบบแจ้งเหตุบนเครื่องเซิร์ฟเวอร์ของศูนย์ข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แต่เกิดปัญหาจากไวรัสคอมพิวเตอร์ Ransomware โดยแฮกเกอร์ ทำให้ไม่สามารถทำงานบนศูนย์ข้อมูลดังกล่าวได้ ทางคณะผู้วิจัยจึงปรับเปลี่ยนมาทำงานบนซอฟต์แวร์ XAMPP สำหรับการจำลองศูนย์ข้อมูลแทน ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถพัฒนาและทดสอบระบบได้สะดวก รวดเร็ว และมีต้นทุนต่ำ เมื่อพัฒนาเสร็จแล้วก็สามารถโอนย้ายไปบนเซิร์ฟเวอร์จริงในภายหลังได้

ระบบที่นำเสนอมีอุปกรณ์แจ้งเหตุของสายป้อนเพียงวงจรเดียว แต่ในทางปฏิบัติ สถานีไฟฟ้าหนึ่งๆ จะมีสายป้อนหลายวงจรและมีอุปกรณ์แจ้งเหตุอยู่หลายตัว เราจึงต้องพัฒนาระบบจัดการฐานข้อมูลให้สามารถรองรับและสอดคล้องกับอุปกรณ์และข้อมูลจำนวนมากได้

ข้อมูลสถานะผิดปกติที่อยู่ในฐานข้อมูล สามารถถูกนำมาวิเคราะห์หาปัญหาของระบบไฟฟ้า และจัดทำแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบไฟฟ้า

เราอาจเลือกใช้วิธีเช่าคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ (Cloud Server) แทนการลงทุนระบบเซิร์ฟเวอร์เอง
พัฒนาปรับปรุงอุปกรณ์แจ้งเหตุให้มีหน่วยความจำเพื่อเก็บข้อมูลได้ และเพิ่มหน้าจอ LCD หรือหน้าจอ
สัมผัสเพื่อให้การแสดงผลและใช้งานอุปกรณ์มีประสิทธิภาพและสะดวกยิ่งขึ้น
พัฒนาส่วนของเว็บเพจให้สามารถดูข้อมูลได้มากขึ้นเช่น ประวัติของเหตุการณ์ผิดปกติ เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการวิจัย และมหาวิทยาลัยปทุมธานีในการสนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

ชาญชัย ศุภอรรรถกร. (2552). *คู่มือเขียนเว็บอีคอมเมิร์ซด้วย PHP +MySQL*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ชัคเชส มีเดีย. เทคโนโลยีสารสนเทศ. (2551). *ฐานข้อมูล [ออนไลน์]*. ค้นเมื่อ 10 มิถุนายน 2564, จาก :

<https://sites.google.com/site/thekhnoloyisarsnthesit/xngkh-prakxb-khxng-thekhnoloyi-sarsnthes/than-khxmud-database>

รักษ์. (2558). *ความรู้เกี่ยวกับสถานีไฟฟ้าแรงสูง [ออนไลน์]*. ค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม 2564, จาก:

<http://subbook1.blogspot.com/2015/07/high-voltage-substation.html>.

ศิริชัย ชีรภัทรสกุล. (2563). *ทำแจ้งเตือน LINE Notify ด้วย PHP [ออนไลน์]*. ค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2564, จาก:

<http://memo8.com/line-notify-php/>.

สงกรานต์ ทองสว่าง. (2545). *MySQL ระบบฐานข้อมูลสำหรับอินเทอร์เน็ต*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด (มหาชน).

Gary W. Scheer. (2011). *Roles of Annunciators in Modern Electrical Substations*. 13th Annual Western Power Delivery Automation Conference Spokane, Washington, March 29-31, 2011.

Hongwei Li, Lixin Wang. (2011). Research on Technologies in Smart Substation. *ICSGCE, Energy Procedia* 12 (2011), 27-30 September 2011, Chengdu, China, 113-119.

Rajat Sangokar, Prof. R.M.Bhombe, Prof. A.S.Welankiwar. (2020). Fault Identification and Remote Operation of Receiving Substation and Auxiliary Substation Using IoT. *IJRES*, 8 (8), 39-44.

Rui Santos. (2019). *ESP32/ESP8266 Insert Data into MySQL Database using PHP and Arduino IDE [ออนไลน์]*. ค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2564, จาก: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-esp8266-mysql-database-php/>

Wisco. (2014). *Alarm Annunciator AL3000 [ออนไลน์]*. ค้นเมื่อ 23 กรกฎาคม 2563, จาก: <http://www.wisco.co.th>

การศึกษาปัจจัยความเสียหายของคาปาซิเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมจากผลของ
กระแสฮาร์โมนิกของระบบขับเคลื่อนกระบวนการผลิต
THE STUDY OF POWER CAPACITOR DAMAGE IN INDUSTRY
ELECTRICAL SYSTEM DUE TO THE HARMONIC CURRENT OF
PRODUCTION PROCESS

สำเริง อินท่าไม้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: samroeng.hi@spu.ac.th

นิमित บุญภิรมย์

อาจารย์พิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: nboonpirom@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาปัจจัยความเสียหายของคาปาซิเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมจากผลของกระแสฮาร์โมนิกของระบบขับเคลื่อนกระบวนการผลิต กรณีศึกษาโรงงานปูนซีเมนต์ โดยวัตถุประสงค์เป็นการศึกษาสาเหตุของความเสียหายของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ จากผลของการใช้ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ขั้นตอนการศึกษาติดตั้งเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า โดยวัดค่าอัตราความถี่รวมของแรงดันและกระแส จากนั้นสร้างวงจรสมมูลของการไหลกระแสฮาร์โมนิกในวงจรผู้สวิตช์บอร์ดของระบบไฟฟ้าเพื่อจำลองสถานะรีโซแนนซ์แบบขนาน โดยการปรับค่าระดับของการเปลี่ยนค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์เพื่อหาตำแหน่งการเกิดรีโซแนนซ์ บันทึกค่าอัตราความถี่รวมบันทึกกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลและที่คาปาซิเตอร์เพื่อศึกษาการไหลของฮาร์โมนิกส์ เพื่อหาอันดับวิกฤติในการปรับค่าระดับของคาปาซิเตอร์

คำสำคัญ: รีโซแนนซ์แบบขนาน, กระแสฮาร์โมนิก, อัตราความถี่รวม

ABSTRACT

This paper presents a study on the damage factor of industrial capacitors as a result of the harmonic current of the production process drive system: case study of a cement plant. The objective is to study the causes of capacitor damage used to improve the power factor of the electrical system in a Cement industrial plant due to the power electronic motor driver. The process of purpose: the power quality measurement is apply to weekly

record all the total voltage harmonic distortion and total current harmonic distortion, respectively. Beside, the equivalent circuit of parallel resonant is created in order to simulate the resonant point due to tap-changing capacitors step. In the addition, the measurement results, the harmonic spectrum and total harmonic distortion current at the load are illustrated respectively to confirm the high frequency harmonic current flow into capacitor circuit.

Keywords: Parallel Resonance, Harmonic Current, Total Harmonic Distortion.

1. บทนำ

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงานส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก (Tejinder Singh Saggu และคณะ, 2017) หรือ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นต้น ปัญหาของกระแสฮาร์มอนิกจะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อนของตัวนำไฟฟ้า เกิดความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า (Spyridon V. และคณะ, 2014) และยังเกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลลงสู่สายนิวทรัลสร้างไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า เป็นต้น ปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า คือ การเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ (N. Eghtedarpour และคณะ, 2014) ทำให้เกิดแรงดันเกินพิกัดและเกิดการเบรคดาวน์ มีงานวิจัยหลายเรื่องได้ศึกษาการป้องกันปัญหานี้ อาจจะเป็นการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบต่างๆ ให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล (Xiaoya Tan และคณะ, 2016, Thomas S.Key และคณะ, 2010) โดยคำนึงถึงความเสี่ยงของความเสียหายที่จะเกิดขึ้น การวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้นถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการได้ทราบถึงพฤติกรรมของการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่จะทำให้เกิดความเสียหาย ในบทความในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายของคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์แห่งหนึ่งในประเทศไทย เพื่อศึกษาแนวโน้มในการเข้าหาจุดวิกฤติของการรีโซแนนซ์ที่จะทำให้คาปาซิเตอร์และอุปกรณ์อื่นๆ เสียหาย โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกเมื่อค่าคาปาซิเตอร์เปลี่ยนแปลงเพื่อรักษาตัวประกอบกำลัง วัตต์ค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกจากระบบจริง

2. วัตถุประสงค์

- (1) ศึกษาการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานของระบบไฟฟ้าในตู้เมนส์สวิตช์บอร์ด โดยการสร้างวงจรมูลของการไหลของกระแสฮาร์มอนิก
- (2) ติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ในตู้เมนส์สวิตช์บอร์ดของโรงงานปูนซีเมนต์แห่งหนึ่งในประเทศไทยเพื่อตรวจวัดการไหลของกระแสฮาร์มอนิก
- (3) วิเคราะห์การเกิดสภาวะรีโซแนนซ์แบบขนานของวงจรมูลจากค่าที่วัดได้จริงในช่วงคาปาซิเตอร์เปลี่ยนคาปาซิเตอร์ในลำดับต่างๆ

3. ขอบเขตของงานวิจัย

- (1) สร้างวงจรมูลของการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในแผนภูมิเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าของโรงงาน
- (2) ติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ในตู้เมนส์สวิตช์บอร์ดของโรงงานปูนซีเมนต์แห่งหนึ่งในประเทศไทย

(3) วิเคราะห์การเกิดสภาวะรีโซแนนซ์แบบขนานของวงจรสมมูลจากค่าที่วัดได้จริงในช่วงคาปาซิเตอร์เปลี่ยนแปลงในค่าต่างๆ

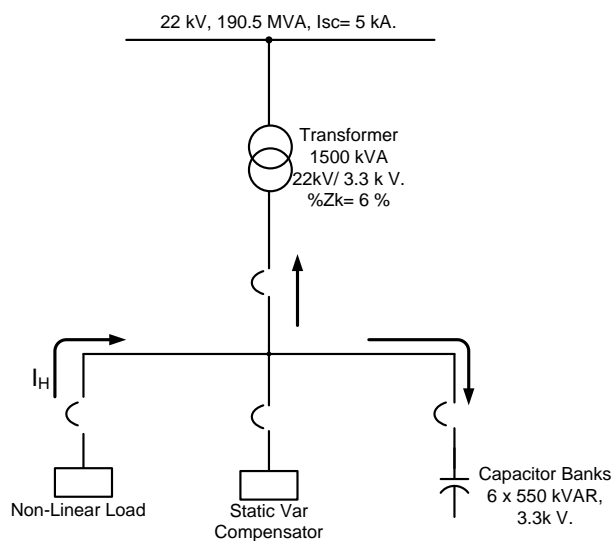
(4) วัดค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่ตำแหน่งโหนดการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าและตำแหน่งคาปาซิเตอร์

(5) วิเคราะห์ค่าสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ ที่ตำแหน่งสายป้อนของโหนดการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับตำแหน่งสายป้อนที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ ที่อันดับการเปลี่ยนระดับของค่าคาปาซิเตอร์

4. หลักการเบื้องต้นของการไหลของกระแสฮาร์มอนิก และการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนาน

4.1 หลักการเบื้องต้นของการไหลของกระแสฮาร์มอนิก

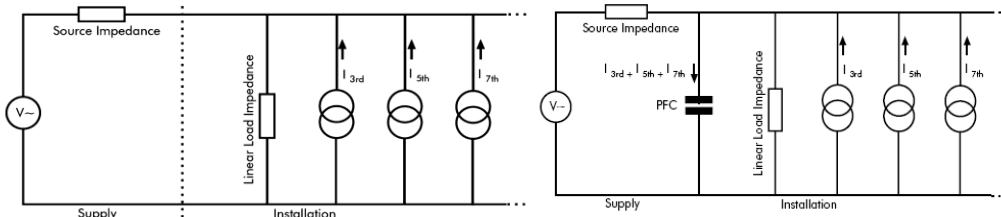
ในระบบจำหน่ายของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ในกรณีศึกษา จะรับกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในระดับแรงดัน 22 kV ส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าระดับกลางคือ 3.3 kV. ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แสดงให้เห็นสายป้อนกลุ่มโหนดสำคัญๆ 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นสายป้อนของโหนดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นโหนดมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันปานกลางที่ใช้ในกระบวนการผลิต ส่วนที่ 2 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน (Static Var Compensator : SVC) และส่วนที่ 3 เป็นกลุ่มคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Capacitor Banks)



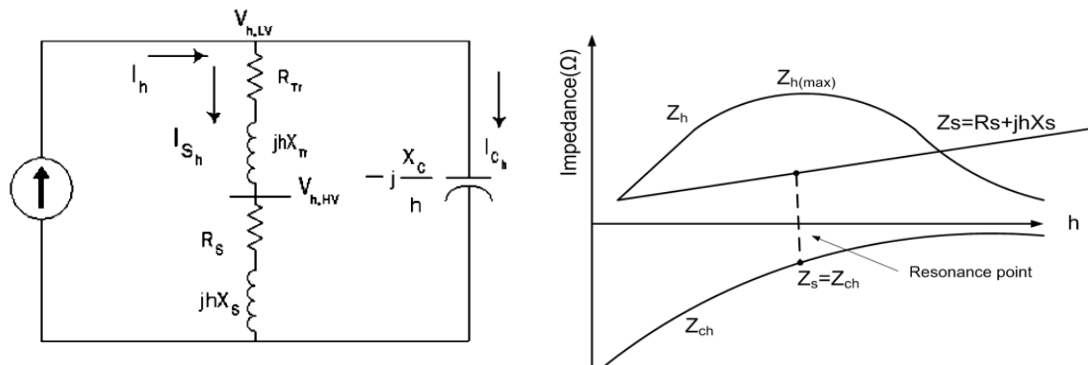
รูปที่ 1 แผนภูมิระบบไฟฟ้าเส้นเดียว (Single Line Diagram) ของระบบไฟฟ้าโรงงานปูนซีเมนต์

ในรูปที่ 1 ได้แสดงให้เห็นว่าสายป้อนโหนดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย Variable Speed Drive. (VSD) ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกความถี่ต่างๆ ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังแยกเป็น 2 ทิศทาง คือ ไหลกลับไปที่หม้อแปลงไฟฟ้าเมนของระบบไฟฟ้าและไหลเข้าสู่กลุ่มคาปาซิเตอร์ เนื่องจากคาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ตอบสนองกับกระแสที่มีความถี่สูง ถ้าความถี่เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์แบบขนาน แรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์จะสูงขึ้นจนเกิดพิกัดที่คาปาซิเตอร์จะรับได้จะเกิดระเบิดและเสียหายนอกจากนี้อาจจะเกิดเป็นรีโซแนนซ์แบบอนุกรมระหว่างตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลงกับค่าประจุของคาปาซิเตอร์ได้เช่นเดียวกัน แต่ในที่นี้ขอพิจารณาเพียงการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานเท่านั้น จากรูปที่ 2 แสดง

วงจรมานของ โหลดที่ไม่เห็นเชิงเส้นสร้างกระแสฮาร์โมนิกในระดับความถี่ต่างๆ โหลดแหล่งจ่ายและโหลดคู่คาปาซิเตอร์



รูปที่ 2 วงจรมานพื้นฐานของการไหลของกระแสฮาร์โมนิกจากโหลดเข้าสู่คาปาซิเตอร์



รูปที่ 3 วงจรมานพื้นฐานของการไหลของกระแสฮาร์โมนิกจากโหลดเข้าสู่คาปาซิเตอร์

การจำลองให้เป็นวงจรมูลอย่างง่ายโดยใช้หลักการของเทวินินจากรูปที่ 1 จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3 โดยลดรูปของอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าและระบบไฟฟ้ามาขนาดเท่ากับกึ่งของคาปาซิเตอร์ ทำให้เกิดวงจรมานอย่างง่ายสัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายกระแส เป็นการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากโหลดดังได้กล่าวไปแล้ว ค่าอิมพีแดนซ์ทุกส่วนที่แสดงในรูปที่ 2 จะถูกคูณด้วยอันดับของความถี่ฮาร์โมนิก h เมื่ออันดับ h เข้าสู่สภาวะรีโซแนนซ์แบบขนาน ดังแสดงให้เห็น สมการที่ (1)

$$Z_s = \frac{(R_s + jhX_s) \left(-j \frac{X_c}{h}\right)}{\left[R_s + j \left(hX_s - \frac{X_c}{h} \right) \right]} \quad (1)$$

โดยที่

$$h = \sqrt{\frac{X_c}{X_s}} \quad : \text{อันดับของฮาร์โมนิกเมื่อเกิดรีโซแนนซ์}$$

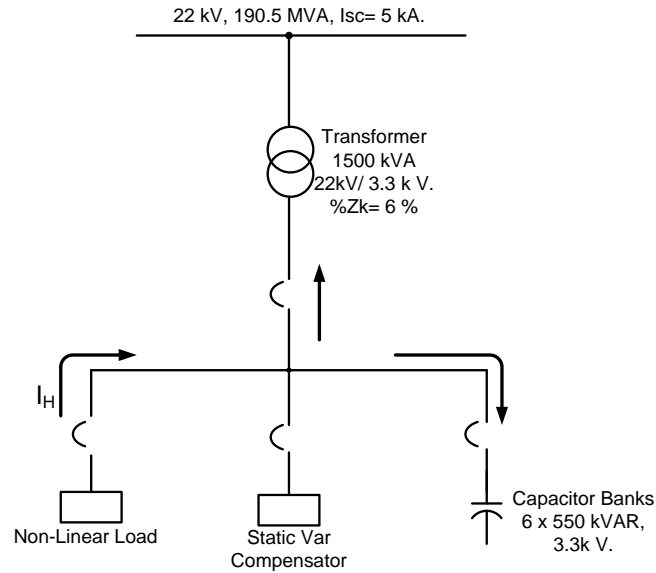
$$X_s = \frac{V_s^2}{S_{sc}} \quad : \text{ความต้านทานเชิงซ้อนของระบบไฟฟ้า } S_{sc} \text{ เป็นกำลังไฟฟ้า}$$

$$\beta_{sys} = \frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_{ch}} \quad : \text{เกณฑ์การขยายกระแสฮาร์โมนิกของระบบไฟฟ้า}$$

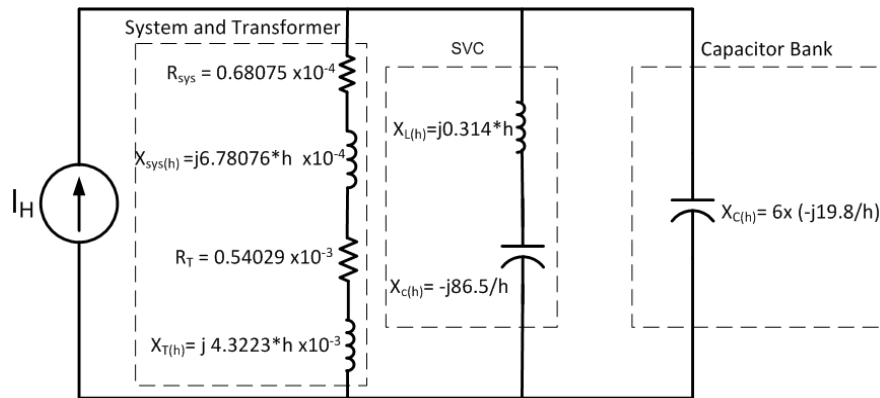
$$\beta_{cap} = \frac{Z_{ch}}{Z_{sh} + Z_{ch}} \quad : \text{เกณฑ์การขยายกระแสฮาร์โมนิกของระบบไฟฟ้า}$$

4.2 การสร้างแบบจำลองการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานของระบบไฟฟ้า

หลังจากที่ได้วงจรมูลเพื่อทำการทดลอง จากรูปที่ 4 ได้นำโครงสร้างของ Single Line Diagram มาหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสมการที่ (1) ได้ผลลัพธ์ของการคำนวณดังในตารางที่ 1 และสร้างเป็นวงจรมูลขนานดังรูปที่ 4 ข. เพื่อนำไปทดสอบต่อไป หลักการทดสอบจะกำหนดค่าพารามิเตอร์และทำการปรับค่าอันดับของกระแสฮาร์โมนิกจนทำให้เกิดการรีโซแนนซ์แบบขนาน



ก. แผนภูมิเส้นเดียวของระบบไฟฟ้า(Electrical System Single Line Diagram)



ข. แบบจำลองการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานจากกระแสฮาร์โมนิก

รูปที่ 4 แบบจำลองการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานจากกระแสฮาร์โมนิกของระบบไฟฟ้า
ในกรณีศึกษาโรงงานผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์

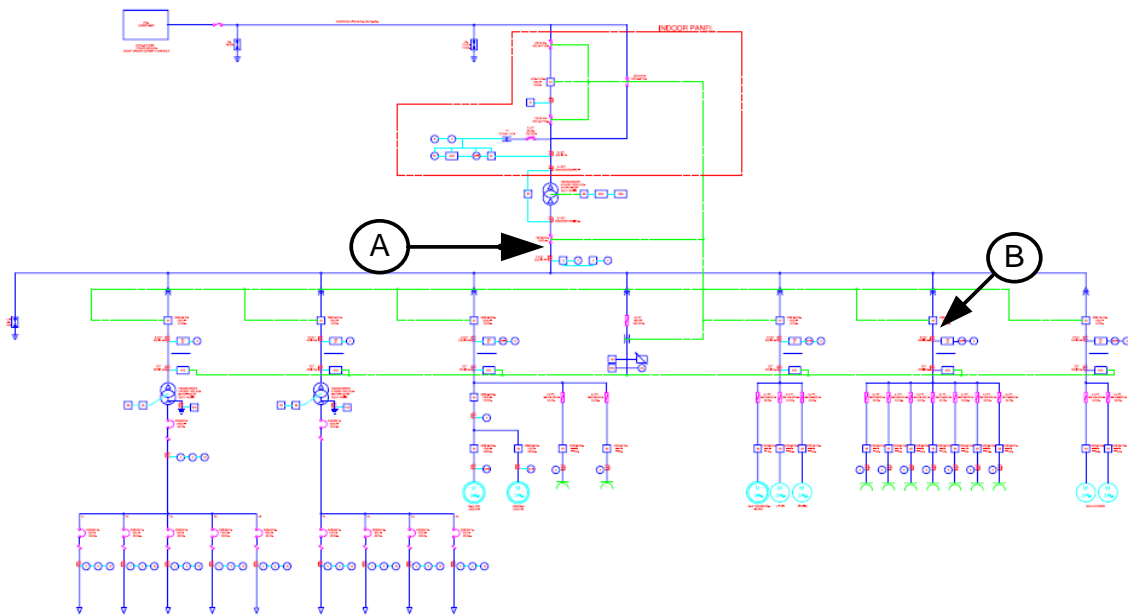
พารามิเตอร์	ผลการคำนวณ (โอห์ม)
อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (System Impedance)	$(0.68075 + j6.8076) \times 10^{-4}$
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Impedance)	$(0.68075 + j6.8076) \times 10^{-4}$
ความเหนี่ยวนำเชิงซ้อนของ SVC	$j0.0314$
ค่าประจุเชิงซ้อนของ SVC	$-j86.5$
และ ค่าประจุเชิงซ้อนของคาปาซิเตอร์	$6 \times (-j19.8)$

5. การทดลองและผลการทดลอง

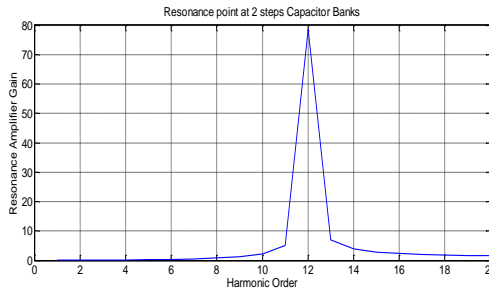
ในการทดลองนี้ดำเนินการ 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำวงจรสมมูลมาหาจูลรีโซแนนซ์โดยการปรับเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ในลำดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าจูลรีโซแนนซ์จะขยับเข้าอันดับต่ำๆ เมื่อค่าคาปาซิเตอร์เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการปรับค่าคาปาซิเตอร์อันดับมากขึ้น จะเป็นการเลี้ยงที่จะทำให้เกิดรีโซแนนซ์และกระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่ำๆ (3,5,7) จะมีค่าสูงด้วย ส่วนที่ 2 ติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าบันทึกการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในช่วงเวลาและทำมาเขียนสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับการวัดค่าสเปกตรัมจริงที่วัดในเวลาชั่วขณะ แสดงให้เห็นถึงการเกิดกระแสฮาร์มอนิกที่จุด A และจุด B ให้ฟิวส์หรืออุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด. อีกทั้งการเกิดการรีโซแนนซ์แบบขนานยังมีผลทำให้แรงดันที่ตกคร่อม คาปาซิเตอร์สูงขึ้นเกินกว่าพิกัด ทำให้เกิดการเสียหายของคาปาซิเตอร์เช่นกัน

- อุปกรณ์ที่ใช้วัดคุณภาพไฟฟ้า

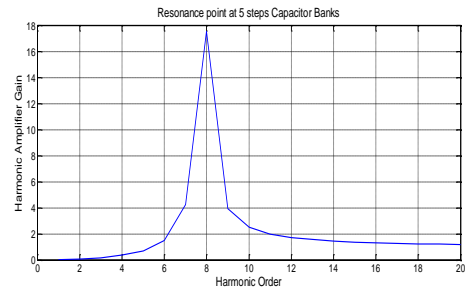
1. เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ายี่ห้อ. Power Quality Analyzer CA8334: EN 50160, IEC 61000-4-15, IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7. Sampling Time 1 นาที ตามมาตรฐาน EN50160
2. บันทึกค่า อัตราความเพี้ยนของแรงดัน (THDv) และ อัตราความเพี้ยนของกระแส (THDi) เป็นเวลา 1 สัปดาห์ 2 ตำแหน่ง บันทึกผลและนำไปคำนวณสเปกตรัมของฮาร์มอนิกในรูปที่ 7



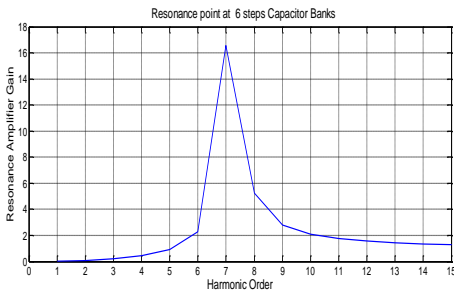
รูปที่ 5 ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า



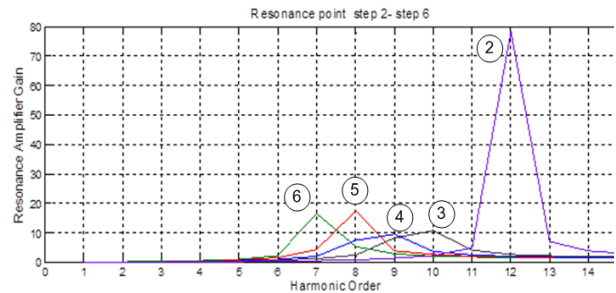
ก. ระดับ 2



ข. ระดับ 5

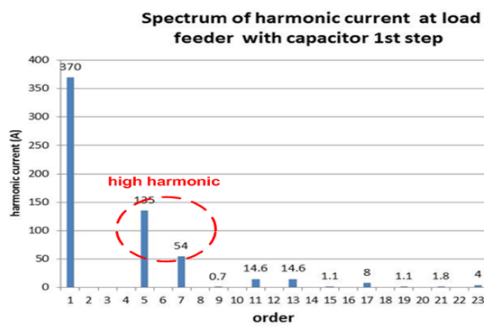


ค. ระดับ 6

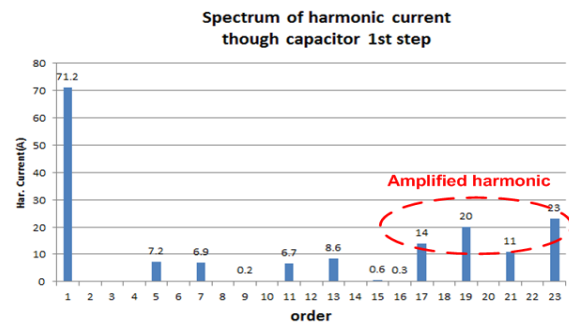


ง. การเพิ่มระดับ จาก 2 ระดับ ถึง 6. ระดับ

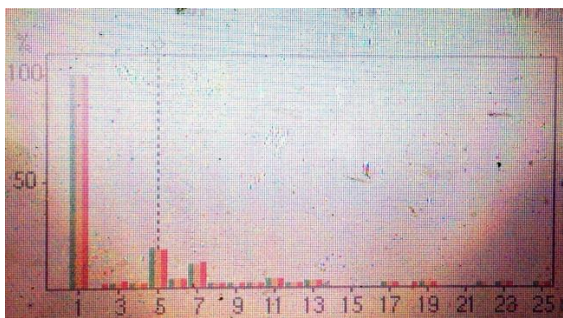
รูปที่ 6 ผลของการปรับเปลี่ยนระดับของคาปาซิเตอร์ที่ส่งผลต่อลำดับความถี่ของการเกิดรีโซแนนซ์



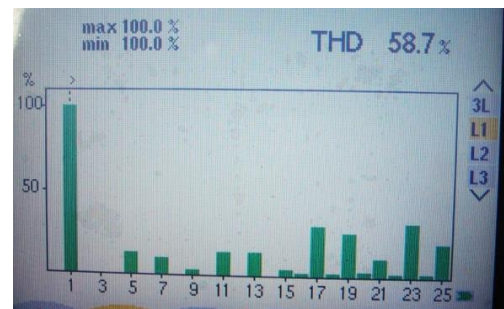
ก. สเปกตรัมกระแสที่ตำแหน่ง A



ข. สเปกตรัมกระแสที่ตำแหน่ง B

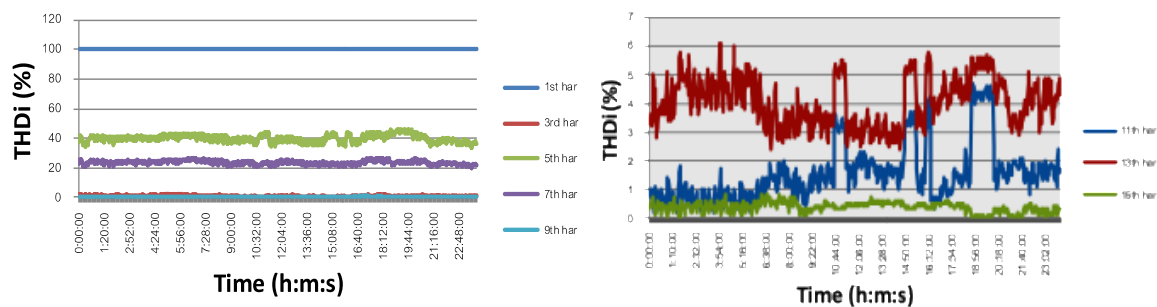


ค. สเปกตรัมกระแสที่ตำแหน่ง A จากกราวด์



ง. สเปกตรัมกระแสที่ตำแหน่ง B จากกราวด์

รูปที่ 7 ค่าสเปกตรัมที่ได้จากวัดที่ตำแหน่ง A และ B



รูปที่ 8 ค่า THDi ที่ได้จากการบันทึกใน 1 วันในลำดับ 1,3,5,7,9,11,13,15

6. สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยได้สร้างวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้า โดยประกอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ จากผลการจำลองพบว่า ตำแหน่งการเกิดรีโซแนนซ์จะเลื่อนเข้าสู่อันดับของฮาร์โมนิกลำดับต่ำๆ เมื่อค่าคาปาซิเตอร์เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าปัจจัยสำคัญของการแท็ปหรือเปลี่ยนระดับของคาปาซิเตอร์เพื่อรักษาตัวประกอบกำลังจะเป็นปัจจัยสำคัญของความเสี่ยงในการเสียหาย ซึ่งจะสัมพันธ์กับกระบวนการผลิตที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 6 ในรูปที่ 7 แสดงผลการวัดจำนวนกระแสฮาร์โมนิกสความถี่สูงจำนวนมากจะไหลเข้าคาปาซิเตอร์โดยเปรียบเทียบจากข้อมูลที่ทำการบันทึกและนำมาเขียนกราฟกับค่าสเปคตรัมที่วัดช่วงขณะ ในการแก้ไขนิยมนัดตั้งรีแอกเตอร์ที่สายป้อน เพื่อจะเบี่ยงเบนตำแหน่งของการเกิดรีโซแนนซ์ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะติดตั้งรีแอกเตอร์แต่ก็ยังมีกระแสฮาร์โมนิกไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์ ทำให้เกิดความร้อนได้เช่นกัน

7. เอกสารอ้างอิง

- Tejinder Singh Saggi, Lakhwinder Singh, Balbir Gill. 2017 “Harmonics Mitigation in a Steel Industry Using 11-Level Cascaded Multilevel. Inverter-Based DSTATCOM” *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*: 110-115.
- Spyridon V. Giannoutsos ,Stefanos N. Manias. 2014 “ A Systematic Power Quality Assessment and Harmonic Filter Design Methodology for Variable Frequency Drive Application in Marine Vessels” *IEEE Transactions on Industry Application*.
- N. Eghtedarpour , M.A. Karimi, M. Tavakoli. 2014. “Harmonic Resonance in Power Systems - A Documented Case” *Proceeding of IEEE*: 857-861.
- Xiaoya Tan, Andrzej Pietkiewicz, Martin Wuethrich, Norbert Haeberle. 2016 “Harmonic Filtering in Variable Speed Drives” *IEEE conference of Power Electronic*.
- Thomas S.Key. & Jih-Sheng Lai. 2010. “IEEE and International Harmonic Standards Impact on Power Electronic Equipment Design.” *Proceeding of IEEE*, 430- 436.
- IEEE 519. 1993. *IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power system. USA: American National Standard Insitue*, 11-25.

การออกแบบเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน

THE DESIGN OF THE TODDY PALM PEELING MACHINE

นักวิจัย นิลมัลย์

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

E-mail: nattawatnilmal@gmail.com

ปรุพห์ มะยะเฉี่ยว

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

E-mail: paroon27@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน ซึ่งมีส่วนในการช่วยการเฉาะเอาเนื้อลูกตาลออกได้ง่ายขึ้นและคงความสดของเนื้อลูกตาลไว้ได้นาน รสชาติไม่เปลี่ยนแปลง ตัวเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อนติดตั้งบนโต๊ะ ขนาดความกว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 77 เซนติเมตร สูง 46 เซนติเมตร เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการทำงาน ส่วนประกอบของเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ชุดมีดปอกส่วนท้ายของผลลูกตาลโตนด ทำจากเหล็กกล้า ส่วนที่สองคือ ชุดปอกเปลือกด้านข้างผลลูกตาลโตนด ชุดใบมีดทั้ง 2 เคลื่อนที่โดยการใช้โยกคันโยก ซึ่งผลของลูกตาลโตนดที่ปอกจะหมุนอยู่กับที่ด้วยมอเตอร์ AC ขนาด 1 แรงม้า ที่ทำงานควบคุมด้วยปุ่มเปิดปิดการทำงาน จากผลการทดลองเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน พบว่า สามารถปอกเปลือกลูกตาลโตนดได้ใกล้เคียงกับการปอกด้วยมือ คิดเป็นความเสียหายของผลลูกตาลโตนดต่ำสุด 10% ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที โดยมีคุณภาพและประสิทธิภาพของเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน จากการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมอยู่ในระดับ 4.78 แสดงว่าเครื่องที่สร้างอยู่ในเกณฑ์ที่มีคุณภาพ

คำสำคัญ: ลูกตาลโตนด, ปอกลูกตาลโตนด

ABSTRACT

This research aims to design and build a peeling machine for toddy palm. Which contributes to helping to remove the flesh of the toddy palm more easily and maintain the freshness of the palm fruit for a long time The taste does not change The machine for peeling toddy palm is installed on the table. Width 40 cm. Length 77 cm. Height 46 cm. to make it easy and convenient to work. The components of the toddy palm peeling machine are divided into 2 parts. The first part is the peeling knife at the end of the toddy palm. made of steel the second part is Side peeling set of toddy palm. Both blade sets are moved by using a lever. The peeled toddy palm will rotate

in place with a 1-horsepower AC motor that is controlled by a power button. From the experimental results of the peeling machine for toddy palm, it was found that the peeling of toddy palm was similar to that of hand peeling. Accounted for damage of toddy palm at least 10% at 300 rpm speed, with quality and efficiency of toddy palm peeling machine. Assessment by engineering experts is at a level of 4.78, indicating that the built machine meets the quality criteria.

Keywords: Toddy Plam, Peeled Toddy Palm

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ตาลโตนด หรือ ตาล เป็นปาล์มชนิดหนึ่ง เป็นต้นไม้เก่าแก่ของประเทศไทย ต้นตาลเป็นพืชที่ปลูกในประเทศไทยมานานกว่า 1,000 ปี สภาพภูมินิเวศที่ตาลเติบโตได้ดี คือ มีแสงแดดจัดและความชื้น จึงพบมากที่สุดใภาคตะวันตก ได้แก่ เพชรบุรี สุพรรณบุรี ราชบุรี ภาคกลางพบมากที่สุดที่ สิงห์บุรี อ่างทอง ปทุมธานี ภาคใต้พบที่สงขลา พัทลุง และนครศรีธรรมราช ตาลจึงจัดเป็นพืชเศรษฐกิจของหลายจังหวัดในประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดเพชรบุรี จังหวัดสงขลา เนื่องจากตาล เป็นพืชสารพัดประโยชน์ และสามารถให้ผลผลิตในลักษณะต่าง ๆ ตลอดปี ก่อนข้างสม่ำเสมอและแน่นอน จึงก่อให้เกิดวิถีชีวิตเกี่ยวข้องกับต้นตาลและใช้ภูมิปัญญาการนำตาลมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่สมัย บรรพบุรุษ จนเกิดเป็นเอกลักษณ์ของจังหวัด ก่อให้เกิดอาชีพหลักและอาชีพเสริม ได้แก่ อาชีพทำ น้ำตาลโตนด อาชีพการทำขนมหวานต่าง ๆ การเพาะเมล็ดเพื่อให้ได้จาวตาลสำหรับทำเป็นขนม โดยเฉพาะผลผลิตสดและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากลูกตาล เช่น ลูกตาลในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง สามารถพัฒนาจนเป็นผลิตภัณฑ์ส่งออกต่างประเทศได้อีกด้วย (เกสร สว่างพนาพันธุ์, 2555)

ผลตาลอ่อน นำมาทำขนมหวาน เช่น ลูกตาลลอยแก้ว ลูกตาลเชื่อม สามารถจำหน่ายสร้างรายได้ให้กับชาวบ้านในท้องถิ่น วิธีการปอกเปลือกผลตาลอ่อนต้องใช้ มีด หรือ พร้า สับลงบนผลตาลต้องใช้ความชำนาญและความระมัดระวัง เนื่องจากเปลือกผลตาลค่อนข้างแข็งและปอกยาก เมื่อปอกติดต่อกันเป็นเวลานาน ส่งผลให้ผู้ปอกเกิดความเมื่อยล้า เกิดอันตรายจากมีดหรือพร้าที่ใช้ปอกได้

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน เพื่อให้ทำงานได้สะดวก มีความปลอดภัย ช่วยเพิ่มปริมาณ โดยผลตาลอ่อนที่ปอกเปลือกด้วยเครื่องปอกนี้ นอกจากจะง่ายต่อการเฉาะเนื้อตาลแล้วยังช่วยเก็บไว้ได้นานขึ้น โดยที่รสชาติไม่เปลี่ยนแปลง

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน
- (2) เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน

3. แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการปอกผลตาลอ่อนด้วยมีดและพร้า ศึกษาลักษณะของผลตาลที่ความสูง 9 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 และความหนาของเปลือก 5 ลักษณะ เนื้อตาลที่อยู่ในผลตาลอ่อน เพื่อเป็นข้อมูลในการวางตำแหน่งของใบมีดปอก ในส่วนของการออกแบบสร้างเครื่อง ได้ศึกษาเครื่องปอกที่ใช้งานในเชิงทฤษฎีการออกแบบเครื่องจักรเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการสร้างเครื่อง

สุดท้ายการหาประสิทธิภาพของเครื่อง ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีของแบบประเมินเพื่อนำมาใช้ในการประเมินคุณภาพ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องปอก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รัชนิวรรณ สุขชี. (2536). โครงการวิศวกรรมเกษตร (วศ.บ. (วิศวกรรมเกษตร)) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2536. 42 หน้า.

งานการศึกษานี้ มุ่งที่จะพัฒนาเครื่องปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อน ตัวเครื่อง ประกอบด้วย ชุดใบมีดปอกข้าง และชุดใบมีดปอกบน ทั้ง 2 ชุดนี้มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ชุดจัดยึดลูกมะพร้าวให้แน่นและนิ่ง และชุดใบมีด ซึ่งหมุนรอบตัวเองและ หมุนรอบไปพร้อมกับกรวยได้ทดสอบปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อน ที่ความเร็วต่างๆ กัน 3 ค่า คือ 25, 40 และ 55 RPM ปรากฏว่า เครื่องสามารถปอกเปลือกออกได้ 78.60, 79.69 และ 78.57% ตามลำดับ กินกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.535, 0.595 และ 0.725 KW ตามลำดับ เครื่องนี้ทำงานโดยใช้แรงงานคนเพียงคนเดียว เวลาที่ใช้ในการปอกต่อ หนึ่งผลประมาณ 190 วินาที ในหนึ่งชั่วโมงจะปอกได้ประมาณ 20 ผล เครื่องสามารถปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนได้ มีปัญหาที่ต้องปรับปรุงแก้ไขต่อไป คือ ผิวที่ปอกลักษณะเป็นลูกคลื่น มีขนาดเฉลี่ยกว้าง 28.70 มิลลิเมตร ยาว 68.20 มิลลิเมตร ลึก 2.43 มิลลิเมตร และเป็นขุย มีขนาดความยาวเฉลี่ย 19.51 มม.

ไชยรงค์ หาราช. (2538). เครื่องปอกเปลือกมะพร้าวอ่อนทรง 5 เหลี่ยม. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ ฉบับที่ 29, หน้า 393-403.

งานวิจัยนี้เพื่อที่จะพัฒนาเครื่องปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนให้ได้ผลทรง 5 เหลี่ยม ตัวเครื่องประกอบด้วยเครื่องปอกเปลือกย่อย 2 เครื่อง เครื่องที่ 1 ปอกลำตัวผลมะพร้าวอ่อน เครื่องปอกย่อยที่ 2 ปอกไหล่ผลมะพร้าวอ่อน เครื่องปอกย่อยทั้ง 2 เครื่องติดตั้งอยู่บน โครงเดียวกันที่ประกอบขึ้นจากเหล็กฉากขนาด 25 มม.หนา 2.3 มม. โครงนี้มีขนาดกว้าง 69 ซม. ยาว 158 ซม. สูง 120 ซม. น้ำหนัก 120 กก. ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส 3 แรงม้า 380 V. 50 Hz ชนิดปรับความเร็วรอบได้ เครื่องปอกย่อยแต่ละเครื่องประกอบด้วย ใบมีดปอกเปลือกมะพร้าว ซึ่งทำด้วยมีดเหล็กกล้าแข็งสแตนเลส ขนาดกว้าง 31 มม. ยาว 198 มม. หนา 1.5 มม. และชุดกลไกขับใบมีดซึ่งทำจากโซ่และเฟืองโซ่ ทำงานได้โดยการถ่ายทอดแรงจากมอเตอร์ต้นกำลังผ่านระบบ สีสายพานลิ่มและสายพานลิ่ม จากการทดสอบปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนพันธุ์น้ำหอมอายุเก็บเกี่ยวขึ้นสองจำนวน 80 ลูก พบว่าความเร็วมีดปอก ความหนาซี่เปลือกผลมะพร้าวอ่อนและอายุการเก็บรักษา มีอิทธิพลต่อคุณภาพการปอกของผลมะพร้าวอ่อน ความเร็วมีดปอก ความหนาซี่เปลือก และอายุการเก็บรักษาที่เหมาะสม (ให้ผิวปอกเรียบขาวดี) ควรเป็น 45 รอบ/นาที ไม่เกิน 2.0 มม. และไม่เกิน 1 สัปดาห์ ตามลำดับ

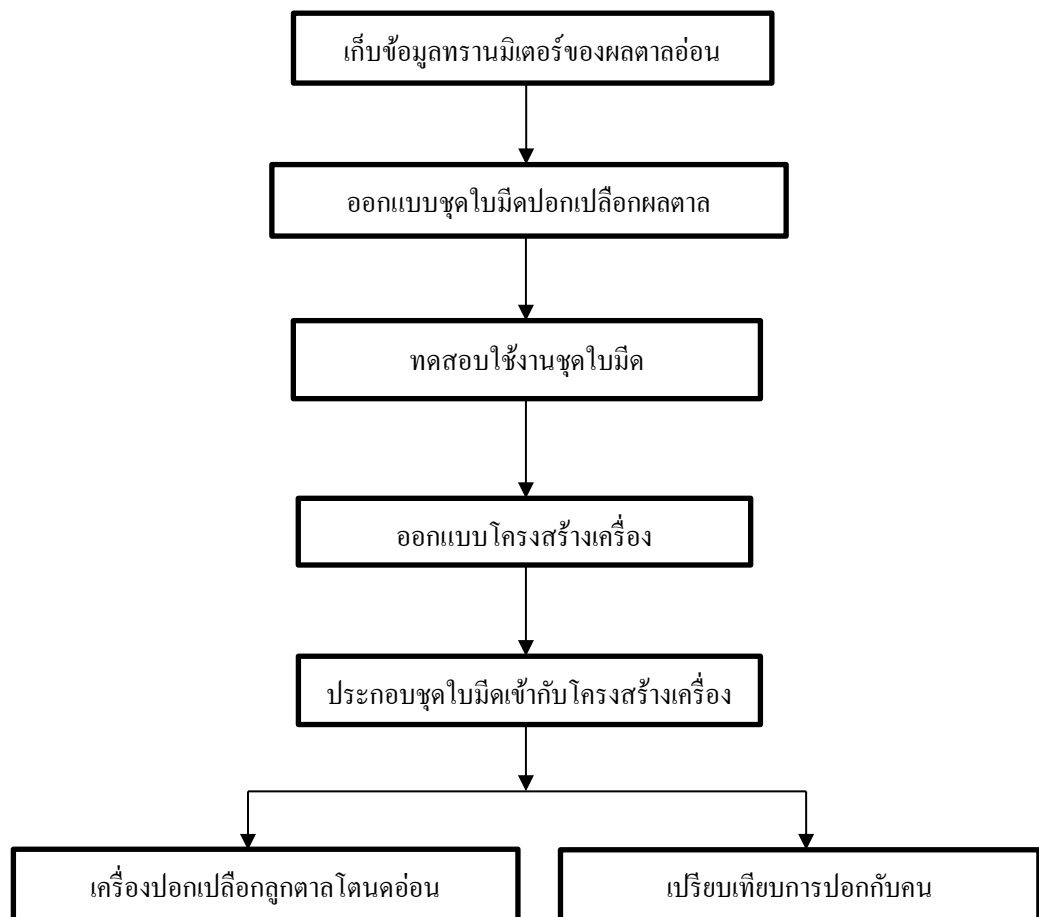
ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ ฉัตรชัย ทิพยรัตน์. (2556). การออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนแบบใบมีดชัก. ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 14 และ ระดับนานาชาติ ครั้งที่ 6.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเครื่องปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนเป็นรูปทรง 5 เหลี่ยม โดยใช้กลไกใบมีดชัก ไป-กลับ เพื่อให้เกิดแรงเฉือน ในการตัดเส้นใยที่เปลือกผลมะพร้าวอ่อน โดยการทำงานของเครื่องจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ คือ ทำการปอกเปลือกส่วนข้างของผลมะพร้าวอ่อนและปอกเปลือกส่วนหัวเป็นขั้นสุดท้าย ทำการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนแบบใบมีดชัก โดยการปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนและจับเวลาแต่ละขั้นตอนในการทำงานของเครื่องพบว่า ขั้นตอนในการปอกเปลือกส่วนข้างใช้เวลาเฉลี่ย 1.24 นาทีต่อผล และปอกเปลือกส่วนหัวใช้เวลาเฉลี่ย 1.70 นาทีต่อผล เมื่อเทียบการทำงานใน 1 ชั่วโมงสามารถปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนได้เฉลี่ย 20.45 ผลต่อชั่วโมง

นศพร ธรรมโชติ ชโลธร ศักดิ์มาศ. (2562). การออกแบบและสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลอ่อน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่สร้างเครื่องปอกเปลือกผลตาลอ่อน และ เปรียบเทียบความสามารถของเครื่องปอกเปลือกผลตาลอ่อนกับการปอกด้วยแรงงานคน เครื่องที่ออกแบบติดตั้งบนโต๊ะที่มีขนาดความกว้าง 50 เซนติเมตร ความยาว 80 เซนติเมตร และความสูง 70 เซนติเมตร ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกชุดมีดตัดหัวท้ายผลตาล ทำจากแสดนเลสเกรดอาหาร ส่วนที่ 2 ชุดปอกเปลือก ออกแบบโดยใช้ผลการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของผลตาล เครื่องปอกเปลือกที่มีมีดปอก 6 ใบ ชุดใบมีดปอกสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยคันโยก ที่เชื่อมกับเฟืองสะพานส่งกำลังเชิงมุมเป็นเชิงเส้นตรง ผลการทดสอบพบว่าเปอร์เซ็นต์การปอกเปลือกผลตาลเฉลี่ย 83.33 เปอร์เซ็นต์ การปอกเปลือกผลตาลไม่สมบูรณ์เฉลี่ย 16.67 เปอร์เซ็นต์ และความสามารถในการปอกด้วยเครื่องปอก 72.60 ผลต่อชั่วโมง ส่วนการปอกด้วยแรงงานคนพบว่าสามารถปอกได้เฉลี่ย 90.38 ผลต่อชั่วโมง และ ปอกได้สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าเครื่องปอกจะมีความสามารถในการปอกในการทำงานได้น้อยกว่าแรงงานคนทั้งด้านเวลา และความสมบูรณ์ของการปอก แต่การใช้งานเครื่องปอกแรงงานไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญในการปอก และการใช้เครื่องปอกสามารถช่วยลดอันตรายที่อาจเกิดขึ้นขณะปอกเปลือกได้

3.1 กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

4. วิธีดำเนินการวิจัย

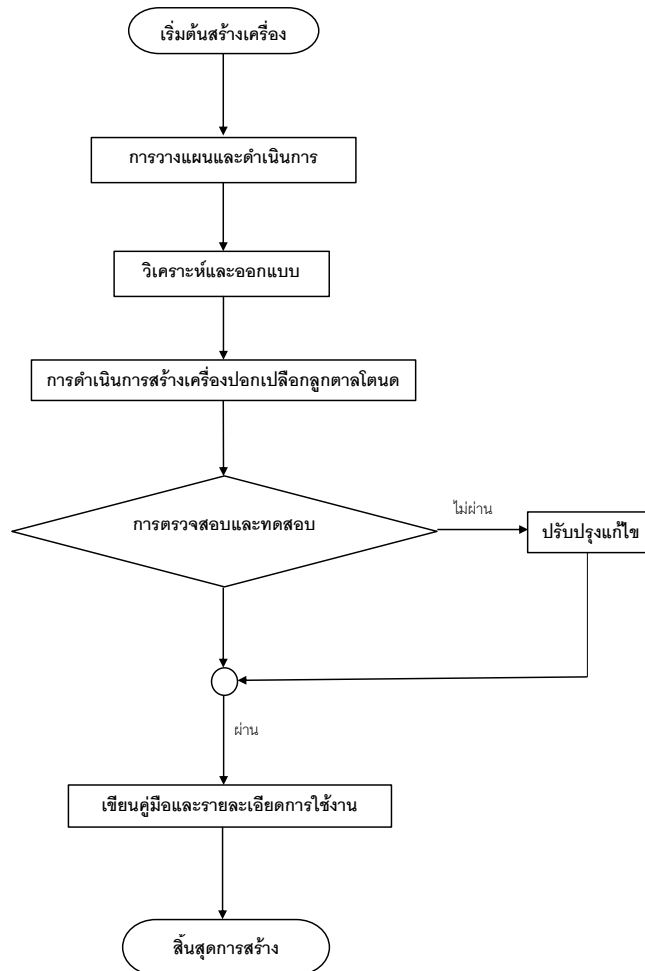
การสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลอ่อน เครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน ช่วยให้แกะเนื้อตาลได้ง่าย หลังจากนั้นจึงประเมินคุณภาพของเครื่อง โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

4.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นลักษณะทั่วไปของลูกตาลโตนดอ่อน เพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน จากนั้นศึกษาความเป็นไปได้การสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อนใช้ให้ถูกต้องตามหลักการทำงานของเครื่องจักรที่จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับเนื้อตาล สุดท้ายจึงทำการประเมินคุณภาพของเครื่องจากผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรม จำนวน 5 คน

4.2 แผนผังการสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน

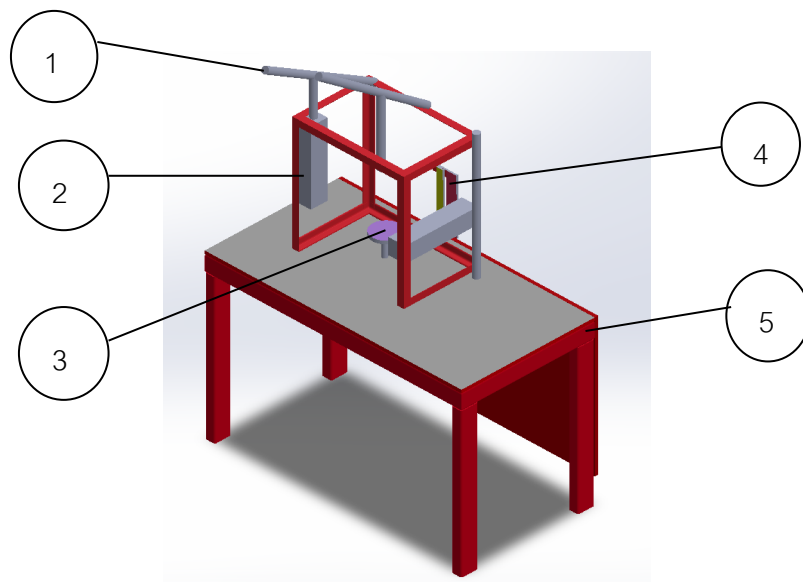
แผนการสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน มีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 2 แผนผังแสดงการสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน

ลักษณะของเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อนที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนต้นกำลัง ขับ ใช้หมุนผลตาลสำหรับที่จะปอกเปลือกขับด้วยมอเตอร์ AC ขนาด 1 แรงม้า 220 โวลต์ ส่งกำลังด้วยสายพาน

ส่วนใบมีดปอก 2 ชุด ชุดที่ 1 ใบมีดสำหรับปอกเปลือกส่วนท้ายของผลตาลติดตั้งอยู่ด้านบนสุดของตัวเครื่อง ชุด ใบมีดที่ 2 ใบมีดสำหรับปอกเปลือกด้านข้างของผลตาลติดตั้งอยู่ด้านข้างตัวเครื่อง โดยชุดใบมีดทั้ง 2 เคลื่อนที่โดยใช้คันโยก ติดตั้งอยู่บนโต๊ะขนาดความกว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 77 เซนติเมตร สูง 46 เซนติเมตร



ภาพที่ 3 แสดงส่วนประกอบเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน

ชื่อส่วนประกอบเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน

หมายเลข 1 คันโยก

หมายเลข 2 ชุดเลื่อนใบมีด

หมายเลข 3 เป็นวางผลตาล

หมายเลข 4 ชุดใบมีด

หมายเลข 5 โต๊ะ

4.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูล การประเมินคุณภาพเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน โดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านวิศวกรรม จำนวน 5 คน เก็บรวบรวมข้อมูลวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

4.4 การประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ

การประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรม นำข้อมูลที่ได้จากแบบประเมินคุณภาพแปรผลโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D)

ค่า \bar{X} ที่ได้มีความหมายดังนี้

ค่าเฉลี่ย 4.50-5.00 หมายถึง คุณภาพดีมาก

ค่าเฉลี่ย 3.50-4.49 หมายถึง คุณภาพดี

ค่าเฉลี่ย 2.50-3.59 หมายถึง คุณภาพพอใช้

ค่าเฉลี่ย 1.50-2.49 หมายถึง คุณภาพควรปรับปรุง

ค่าเฉลี่ย 1.00-1.41 หมายถึง คุณภาพควรปรับปรุง

เกณฑ์ที่ยอมรับต้องผ่านการประเมินคุณภาพ ไม่ต่ำกว่า 3.50

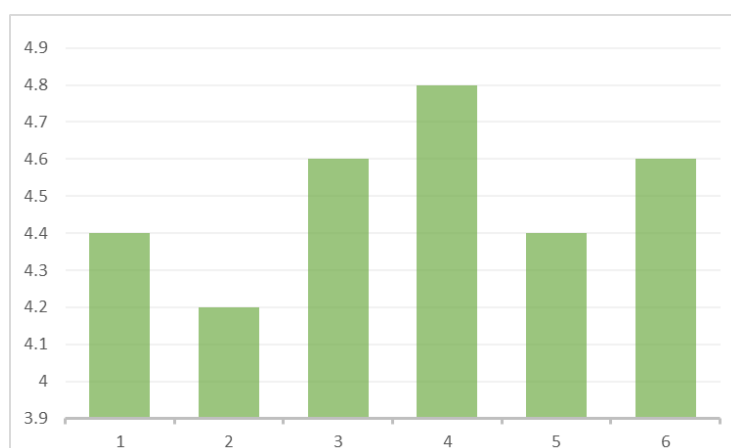
จากนั้นนำเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อนมาทดสอบปอกเปลือกเปรียบเทียบกับปอกด้วยมือเปรียบเทียบกับร้อยละผลเสีย โดยใช้สถิติการทดสอบ สมมติฐาน

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลจากการประเมินคุณภาพเครื่องจักร โดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านวิศวกรรมประเมินคุณภาพการทำงาน

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ย (\bar{x}) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของผู้เชี่ยวชาญ

ข้อ	รายละเอียด	1	2	3	4	5	\bar{x}	SD
1	ประโยชน์ใช้สอย	5	3	5	4	5	4.4	0.89
2	ความสะดวกสบายในการทำงาน	3	4	5	4	5	4.2	0.84
3	ความปลอดภัย	4	5	4	5	5	4.6	0.55
4	ความแข็งแรง	5	5	5	4	5	4.8	0.45
5	การซ่อมแซม	4	5	4	4	5	4.4	0.55
6	วัสดุและวิธีการผลิต	4	5	4	5	5	4.6	0.55
	รวม						4.5	0.63



ภาพที่ 4 แสดงผลการประเมินคุณภาพเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน

ตารางที่ 2 แสดงผลการปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน

Speed(rpm)	surface	damaged	%
240	good	18	30
300	very good	6	10
360	good	15	25

จากตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ย (\bar{X}) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) จากผู้เชี่ยวชาญที่ตีต่อคุณภาพของเครื่อง โดยรวมในระดับดี ($\bar{X} = 4.5$, S.D. = 0.63) โดย พิจารณาจากรอบพบว่า ประโยชน์ใช้งานอยู่ในระดับดี ($\bar{X} = 4.4$, S.D. = 0.89) ความสะดวกสบายในการใช้งานอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.2$, S.D. = 0.84) ความปลอดภัยในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.6$, S.D. = 0.54) ความแข็งแรงอยู่ในระดับ ดี ($\bar{X} = 4.8$, S.D. = 0.44) การซ่อมแซมอยู่ในระดับ ดี ($\bar{X} = 4.4$, S.D. = 0.54) วัสดุและวิธีการผลิตอยู่ในระดับ ดี ($\bar{X} = 4.6$, S.D. = 0.54) จากตารางที่ 2 ผลการใช้เครื่อง ปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน เครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อนที่ออกแบบสร้าง ประกอบด้วยชุดใบมีดปอก 2 ชุด สำหรับปอกผิวบริเวณด้านท้าย และ สำหรับบริเวณด้านข้าง และ ชุดจับผลลูกตาลโดยลูกตาล จะหมุนอยู่กับ ที่หลังจากนั้น ได้ชุด ใบมีดเคลื่อนที่เข้า สัมผัสกับผิวเปลือกผลตาลโตนด เพื่อปอกเปลือกด้านข้าง เมื่อปอกเปลือก ด้านข้างเสร็จ เน้นการปอกส่วนด้านบนโดยตัวเครื่องจะทำงานเหมือนกับการปอกด้านข้าง เมื่อปอกเสร็จนำ ผลตาลที่ได้ออกจากเครื่อง จากผลการทดลองที่ความเร็วรอบ 360 รอบต่อนาที ผิวของเปลือกผลตาลไม่เรียบส่งผล ทำให้เนื้อตาลแตก ส่วนที่ความเร็วรอบ 240 รอบต่อนาที ผิวของเปลือกตาลไม่เรียบเกิดเส้นใย ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ผิวของเปลือกลูกตาล โตนดเรียบไม่เกิดเส้นใยที่เปลือกลูกตาล โตนด ลักษณะใกล้เคียงกับการปอก ด้วยมือ

6. อภิปรายผล

จากผลการทดลองใช้งานเครื่องปอกเปลือกลูกตาล โตนดอ่อน เปรียบเทียบกับคนใช้มีดปอก ผลที่ได้ ลักษณะผิวปอกใกล้เคียงกับการใช้มือปอก มีผลตาลอ่อน เสียหาย จากการใช้เครื่องปอกคิดเป็น 10 % ของผลตาลที่ ใช้ทดสอบทั้งหมด 60 ผล การประเมินคุณภาพ โดยผู้เชี่ยวชาญทางวิศวกรรมในด้านต่างๆ เมื่อเทียบกับเกณฑ์ อยู่ ในระดับ ดี ($\bar{X} = 4.5$, S.D. = 0.63) ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการปอกคือ 300 รอบต่อนาที ความเร็วรอบมีผลต่อ คุณภาพของผิวปอกที่ความเร็วรอบ 360 รอบต่อนาที ผิวของเปลือกผลตาลไม่เรียบส่งผลทำให้เนื้อตาลแตก ส่วนที่ ความเร็วรอบ 240 รอบต่อนาที ผิวของเปลือกตาลไม่เรียบเกิดเส้นใย ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ผิวของ เปลือกลูกตาลโตนดเรียบไม่เกิดเส้นใยที่เปลือกลูกตาล โตนด ซึ่งผลการทดลองปอกเปลือกลูกตาลอ่อน ด้วยเครื่อง ปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน พบว่าความเร็วรอบในการทำงานของมอเตอร์ ที่ 300 รอบต่อนาที เป็นความเร็วรอบ ที่เหมาะสม ผลตาลที่ปอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 12 เซ็นติเมตร ความสูงเฉลี่ย 8 เซ็นติเมตร น้ำหนักหลัง ปอกเฉลี่ย 700 กรัม ผิวปอกเรียบสวยงามไม่มีเส้นใย เนื้อตาลไม่เสียหายสามารถนำไปเจาะเอาเนื้อตาลได้ง่ายขึ้น ช่วยลดอุบัติเหตุประหัดเวลา ได้ปริมาณเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ทดลองปอกทั้งหมด 60 ผล ผลตาลโตนดอ่อนเสียหาย 10% ขนาดของผลตาลโตนดอ่อนที่สามารถใช้กับเครื่องปอกเปลือกลูกตาลโตนดอ่อน เส้นผ่านศูนย์กลาง 8-12 เซ็นติเมตร

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

- (1) สามารถใช้กับการปอกเปลือกผลตาลโตนดอ่อน

7.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

- (1) ปรับปรุงระบบการป้อนมีดใช้งานแบบอัตโนมัติ

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาช่างยนต์วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และสถานที่ในการสร้างเครื่องปอกเปลือกลูกตาล โคนด และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครราชสีมาชนครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ

9. เอกสารอ้างอิง

- เกสร สว่างพนาพันธุ์. (2555). ศักยภาพทางการท่องเที่ยวที่ยั่งยืนของชุมชนตาล โคนด : กรณีศึกษาชุมชนตาล โคนด ตำบลถ่างรัง อำเภอบ้านลาด จังหวัดเพชรบุรี [ออนไลน์]. มหาวิทยาลัยศิลปากร. แหล่งที่มา: <http://www.sure.su.ac.th/xmlui/> [14 กรกฎาคม 2564].
- ไชยรงค์ ทาราช. (2538). เครื่องปอกเปลือกมะพร้าวอ่อนทรง 5 เหลี่ยม.
- ณัฐพงศ์ รัตนเดช. (2553). การออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อนแบบอัตโนมัติ.
- บรรเลง ศรีนิล. (2531). การออกแบบเครื่องจักรกล. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- รัชนิวรรณ สุขชี. (2558). เครื่องปอกเปลือกผลมะพร้าวอ่อน. โครงการวิศวกรรมเกษตร (วศ.บ. (วิศวกรรมเกษตร)) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.phtnet.org/research/view-abstract.asp?research_id=wf171 [15 กรกฎาคม 2564].
- วิรัช อึ้งภากรณ์. (2534). ชาญ อดิงาน, การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ เอช.เอน การพิมพ์.
- ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์. (2556). การออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกมะพร้าวอ่อนแบบใบมีดชัก. ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 6.
- ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี. (2547). การออกแบบเครื่องกล และชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1. ซีอีต ยูเอชเอ็น. กรมวิชาการเกษตร, เข้าถึงได้จาก <http://www.doa.go.th/> (10 มกราคม 2563)
- สรรพคุณ และประโยชน์ของต้นตาล [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก skm.ssru.ac.th/news/view/a155, (วันที่สืบค้นข้อมูล 15 กรกฎาคม 2564).

**การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าโรงไฟฟ้าชีวมวล
REACTIVE POWER CONTROL OF SYNCHRONOUS GENERATOR
FOR ELECTRICAL DISTRIBUTION BIOMASS POWER PLANT**

สำเร้ง อินทาม้า

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: samroeng.hi@spu.ac.th

นิमित บุญภิรมย์

อาจารย์พิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: nboonpirom@gmail.com

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล ด้วยการพิจารณาคูณลักษณะขีดจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงด้วยค่าสูงสุดเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ภายใต้สภาวะขีดจำกัดของกระแสเตเตอร์ที่ค่าพิกัด กระแสสนามกระตุ้นสูงสุดที่ยอมรับได้ และขีดจำกัดสูงสุดของแรงดันของการไฟฟ้า จากทดลองพบว่าการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะต้องทำการปรับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่สภาวะ Over Exited และ Under Exited ตามคุณลักษณะขีดจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแรงดันของการไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าอีกด้วย

คำสำคัญ: ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส, ขีดจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า

ABSTRACT

This paper presents a study on the reactive power control of synchronous generators for biomass power plants by considering the power capability curve of the generator to supply the maximum of active power under the following conditions: the stator current is limited to the rated value, the field current is maximumly admissible, the grid voltage is limited to a maximum reference is assured. From the experiment, it was found that the control of the electric power of the generator must be in Over Exited and Under Exited conditions according to the power capability limit feature. It also depends on the voltage of the electricity at the point of connection to the electrical system as well.

Keywords: Reactive Power Control, Synchronous Generators, Power Capability Curve

1. บทนำ

ในภาวะที่เกิดการแพร่ระบาดของโควิด-19 ทั่วโลก และยังไม่มีความไม่แน่นอนว่าจะจบสิ้นลงเมื่อใด ทว่า กลับเป็นที่แน่ชัดว่าหลายธุรกิจต้องเร่งปรับตัวให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ของโลกภายใต้วิถีชีวิตใหม่ (new normal) ที่ให้ความสำคัญกับการทำธุรกิจแบบยั่งยืน (sustainable business) ในบริบทของธุรกิจผลิตพลังงานไฟฟ้า “โรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล” เป็นธุรกิจที่มีโอกาสเติบโตรับกระแสธุรกิจยั่งยืน เนื่องจากการสร้างมูลค่าเพิ่มจากวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตร สร้างรายได้ให้ชุมชนและลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันในหลาย ๆ ประเทศทั่วโลกได้ให้การสนับสนุนพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่น เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม เพื่อทดแทนพลังงานฟอสซิล เนื่องจากตอบโจทย์เรื่อง green economy ของโลกที่มีเป้าหมายลด carbon footprint (Buta Singh และคณะ, 2020)

จากการเพิ่มขึ้นของแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Han Phoumin และคณะ, 2019) ก็ได้มีการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในระบบการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการจ่ายกำลังไฟฟ้า มีความสะดวกในการควบคุมกำลังไฟฟ้าและระดับแรงดันไฟฟ้า แต่ปัญหาที่พบมักจะเป็นการควบคุมระดับแรงดัน และเสถียรภาพในการส่งกำลังไฟฟ้า (Ramadoni Syahputra และคณะ, 2018)

ดังนั้นในบทความนี้ ได้ทำการศึกษาและควบคุมกำลังไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power Control, Q) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กของโรงไฟฟ้าชีวมวล (Small Power Producer: SPP) (D.K. Yadav และคณะ, 2014, Constantin, GHITA และคณะ, 2010) เพื่อทำการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA Grid) และจะต้องให้สอดคล้องกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พ.ศ.2559

2. วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อศึกษาข้อมูลเฉพาะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสและข้อมูลจากการทดสอบ
- (2) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาของการไหลเข้าของกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power, Q) ในสถานะตัวประกอบกำลังล่าช้า (Power Factor Lagging) และตัวประกอบกำลังนำหน้า (Power Factor Leading)
- (3) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ขอบเขตการจ่ายกำลังไฟฟ้าในสถานะ Over Excited, Under Excited และ Unity Power Factor เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการรับกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power, Q)

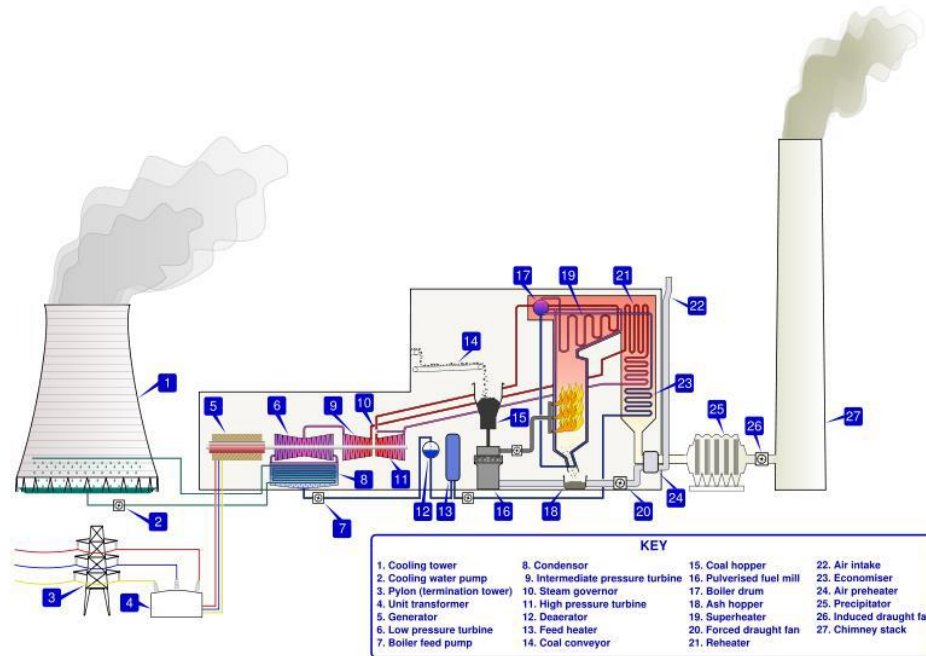
3. ทบทวนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเทศไทยเรามีเป้าหมายเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน จากนโยบายภาครัฐจะมีการปรับเพิ่มกำลังการผลิตโรงไฟฟ้าชีวมวลให้มากขึ้น เนื่องจากพื้นฐานเกษตรกรรมของประเทศ ที่มีผลผลิตทางการเกษตร เป็นจำนวนมาก เช่น ข้าว น้ำตาล ยางพารา น้ำมันปาล์ม และมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งยังมีเศษวัสดุเหลือใช้ที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบ (Han Phoumin และคณะ, 2019) เพื่อผลิตพลังงานชีวมวลได้ปริมาณมหาศาล ซึ่งสอดคล้องกับประเทศทั่วโลกที่ได้ให้การสนับสนุนพลังงานหมุนเวียนเช่นกัน

การผลิตไฟฟ้าชีวมวลจะเริ่มด้วยการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งผ่านการกรองแล้วเข้าสู่เครื่องผลิตไอน้ำ ขณะที่ชีวมวลต่างๆถูกถ้ำเลี้ยงเข้าสู่เครื่องบดเพื่อบดให้ละเอียด ก่อนส่งไปเข้าเตาเผาเพื่อให้เกิดความร้อนในระดับสูง ความร้อนที่ได้ จะช่วยให้น้ำในเครื่องผลิตไอน้ำกลายเป็นไอน้ำที่แรงดันสูง ซึ่งจะไป

ทำหน้าที่หมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ไอน้ำที่ใช้ในการหมุนกังหันเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ จะผ่านกระบวนการควบแน่นให้กลับมาเป็นน้ำและนำมาใช้หมุนเวียนอีก จนสุดท้ายจึงถูกปรับคุณภาพให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมแล้วปล่อยลงสู่บ่อพักน้ำขนาดใหญ่ เพื่อให้ระเหยหายไประยะตามธรรมชาติ(Aye Phyu, Zaw Lin Htun, 2014, Ramadoni Syahputra และคณะ, 2018) ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำมีการทำงานร่วมกันระหว่าง องค์ประกอบหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ (Ramadoni Syahputra และคณะ, 2018)

3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสจะประกอบด้วย ตัวอยู่กับที่ (Stator) และตัวหมุน (Rotor) ตัวอยู่กับที่จะเป็นส่วนของขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งจะมีการพันขดลวดเป็นแบบระบบ 3 เฟส มีขดลวด 3 ชุด ชุดละ 1 เฟส คือ เฟส A เฟส B และเฟส C เป็นทางออกของกำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายออกภายนอก ส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใน หาได้จาก

$$E = 4.44\phi_m f N k_d k_p \quad (1)$$

โดย

- N = จำนวนตัวนำ
- f = ความถี่
- ϕ_m = เส้นแรงแม่เหล็ก
- k_d, k_p = Pitch factor และ distribution factor ของการวางขดลวด

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในของ Salient pole

$$E = V_t + j(X_d I_d + X_q I_q) \quad (2)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในของ Cylindrical pole

$$E = V_t + I_a (R_a + jX_s) \quad (3)$$

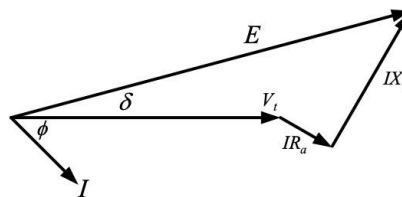
3.3 การจำแนกการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดซิงโครนัส

การผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแยกได้เป็น 3 สภาวะ

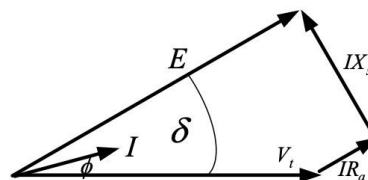
3.3.1 สภาวะตัวประกอบกำลังล่าช้า (Power Factor Lagging) ในสภาวะนี้ จะทำการผลิตแรงดันไฟฟ้า โดยจ่ายกระแสสนามแม่เหล็ก (Field Current: I_f) มากกว่าปกติหรือเรียกว่า Over Excited ในสภาวะนี้ จะทำให้ตัวประกอบกำลังล่าช้าดังแสดงในรูปที่ 2 ก) ในสภาวะนี้กำลังไฟฟ้า (Power Flow) คือกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) จะไหลเข้าระบบหลัก

3.3.2 สภาวะตัวประกอบกำลังนำหน้า (Power Factor Leading) ในสภาวะนี้ จะทำการผลิตแรงดันไฟฟ้า โดยจ่ายกระแสสนามแม่เหล็ก (Field Current: I_f) น้อยกว่าปกติหรือเรียกว่า under Excited ในสภาวะนี้ จะทำให้ตัวประกอบกำลังนำหน้าดังแสดงในรูปที่ 2 ข) กำลังไฟฟ้าจริง, P จะไหลเข้าสู่ระบบหลัก แต่กำลังไฟฟ้าเสมือน, Q จะไหลออกจากระบบหลัก ทำให้ตัวประกอบกำลังติดลบ

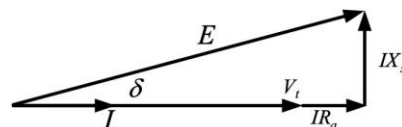
3.3.3 สภาวะตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง (Unity Power Factor) ในสภาวะนี้จะเป็นสภาวะที่จ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจริง, P อย่างเดียว แรงดันกับกระแสจะมีมุมเฟสตรงกัน(ค่ามุมเฟสต่างเท่ากับศูนย์) ไม่มีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน, Q บางที่เรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะ Active ดังแสดงในรูปที่ 2 ค) ค่าแรงดันที่สร้างขึ้น (E) จะมีขนาดเกือบเท่ากับแรงดันที่ขั้ว (V_t) ถ้าไม่คิดค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_a) โดยปกติมีค่าน้อยมาก ซึ่งสมการของแรงดันที่สร้างขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการ (3)



ก) ตัวประกอบกำลังล่าช้า (Power Factor Lagging)



ข) ตัวประกอบกำลังนำหน้า (Power Factor Leading)

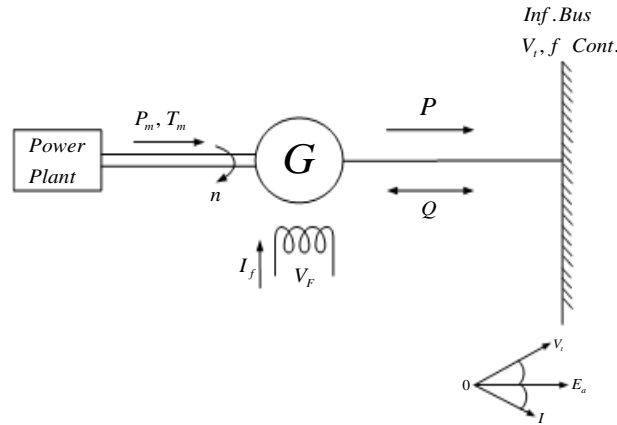


ค) ตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง (Unity Power Factor)

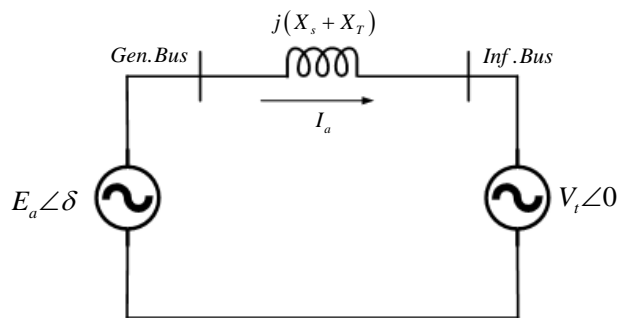
รูปที่ 2 การจำแนกไหลของการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดซิงโครนัส

3.4 การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสเข้ากับระบบหลัก

การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบหลักมีวัตถุประสงค์ในการใช้เครื่องจักรเชิงโรนัสเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้ระบบหลักหรือระบบกริด การจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเป็นการเพิ่มกำลังผลิตให้กับระบบจำหน่าย และการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าระบบหลักเป็นการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่าย



รูปที่ 3 การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสเข้ากับระบบหลัก



รูปที่ 4 วงจรการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบหลัก

จากรูปที่ 4 แสดงวงจรสมมูลของการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสเข้ากับระบบหลักดังในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีมุม δ ที่เป็นมุมระหว่าง ค่า E_a และ V_t หรือเรียกว่า Torque Angle มีค่ามากกว่ามุมของกริดที่เป็นมุมศูนย์ กำลังไฟฟ้าที่ Gen Bus จะไหลสู่ Infinite Bus ซึ่งเป็นทิศทางของการไฟฟ้าผ่านค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับระยะทาง ปริมาณเวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power: S) ดังสมการที่ (6) แสดงในรูปเชิงซ้อน เมื่อวิเคราะห์ค่าสมการของกำลังแต่ละตัวและแสดงในองค์ประกอบต่างๆ จะได้ดังสมการที่ (7) ส่วนค่า X คือผลรวมของ $X_s + X_T$ ดังได้กล่าวมาแล้วนั้น ดังนั้นจะได้ค่าเวกเตอร์ของกระแสในสมการที่ (8) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ทิศทางกระแสไหลเข้า ค่าเวกเตอร์ E_a จะต้องมีค่ามากกว่า V_t โดยแรงดันที่ผลิตได้ต้องมีค่าไม่เกินข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA Grid Code)

$$\begin{aligned} \vec{S} &= P + jQ = V_t I_a^* \\ &= |V_t| |I_a| (\cos \theta + j \sin \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

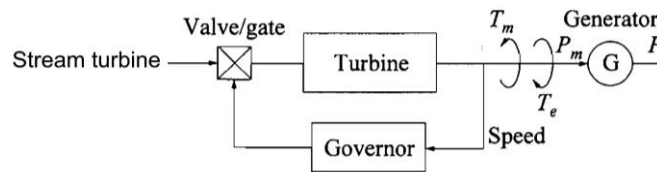
$$\bar{S} = \frac{E_a V_\infty}{X} \sin \delta - j \left[\frac{E_a V_\infty}{X} \cos \delta - \frac{|V_\infty|^2}{X} \right] \quad (7)$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_a - \bar{V}_\infty}{jX} \quad (8)$$

3.5 การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Control)

จากสมการที่ (6) แนวทางการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า สามารถดำเนินการได้ 2 กรณี คือ

(1) การปรับค่ากำลังไฟฟ้าจริง, P การปรับค่ากำลังไฟฟ้าจริง, P สามารถทำการปรับจากการควบคุมต้นกำลังของพลังงานกล หรือเป็นการควบคุมพลังงานความร้อนจากชีวมวล เพื่อนำไปขับ Turbine ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นการปรับ Torque จากต้นกำลัง มีผลทำให้แรงบิด (T_m) สูงขึ้น เมื่อแรงบิดทางกลสูงกว่าแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทำให้ความเร็วรอบสูงขึ้น เกิดอัตราเร่งมากขึ้น และ Torque Angle (δ) จะมีค่ามากขึ้น จำเป็นจะต้องมีการควบคุมความเร็วให้คงที่ด้วย เพื่อทำการควบคุมความถี่ให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ตัวควบคุม Exciter สร้าง Flux ให้คงที่



รูปที่ 5 การควบคุมกำลังไฟฟ้าให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

(2) การปรับแรงดันไฟฟ้าโดยการปรับค่าสนามแม่เหล็ก(Flux) ในการปรับค่าสนามแม่เหล็กเป็นการปรับค่าแรงดันที่จ่ายให้ Exciter มีผลทำให้กระแส I_f เปลี่ยนแปลง ค่าแรงดันที่ผลิตขึ้น (Induced EMF, E_a) จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อ E_a เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน, Q เพิ่มขึ้น power factor จะเปลี่ยนไปสู่สภาวะ Over Excited มากขึ้น จนถึงขีดจำกัดของ Excited limited ดังแสดงในรูปที่ 7

$$P = \frac{3E_a V_\infty}{X} \sin \delta = 3V I_a \cos \phi \quad (10)$$

$$Q = \frac{3E_a V_\infty}{X} \cos \delta - \frac{|V_\infty|^2}{X} \quad (11)$$

4. การควบคุมแรงดันและการจ่ายกำลังไฟฟ้า

4.1 มาตรฐานระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของ กฟผ. (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2559)

4.1.1 ในการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า บริษัทผลิตไฟฟ้าเอกชนจะต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ โดยให้อยู่ในมาตรฐานระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของ กฟผ. ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มาตรฐานระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของ กฟภ. อยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
115 kV	109.2	120.7	103.5	126.5
69 kV	65.5	72.4	62.1	75.9
33 kV	31.3	34.6	29.7	36.3
22 kV	20.9	23.1	19.8	24.2
380 V	342	418	342	418
220 V	200	240	200	240

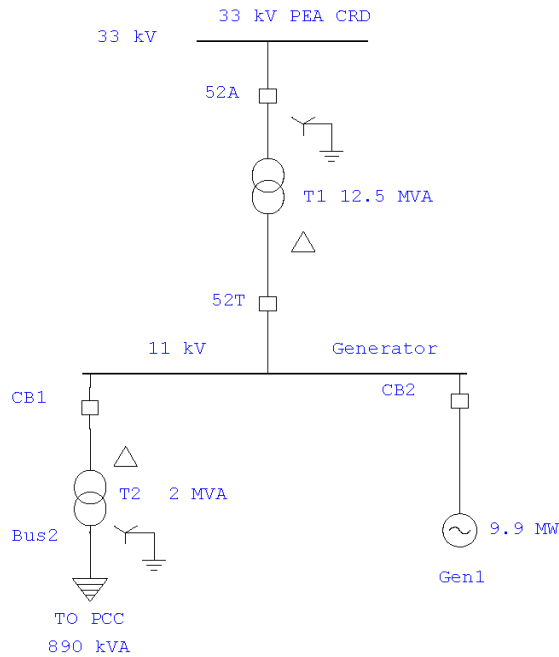
4.1.2 บริษัทฯ จะต้องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่บริษัทฯ จ่ายเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าให้คงที่ และควบคุม Power factor อยู่ในช่วง 0.9 Leading ถึง 0.9 Lagging

4.2 ข้อมูลของโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

ในโครงการนี้เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของโรงไฟฟ้าเอกชนขนาดเล็กชนิดชีวมวล ด้วยการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ขนาดแรงดัน 33 กิโลโวลต์ โดยมีแบบเส้นไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 6 มีข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Frame	TC150	Unit
Apparent Power	12,375	kVA
Voltage	11	kV
Pole	4	Pole
Rated Current	649.5	A.
Rated Speed	1500	rpm
Power Factor	0.8	
Frequency	50	Hz.



รูปที่ 6 แสดงเส้นโคจรของระบบไฟฟ้า

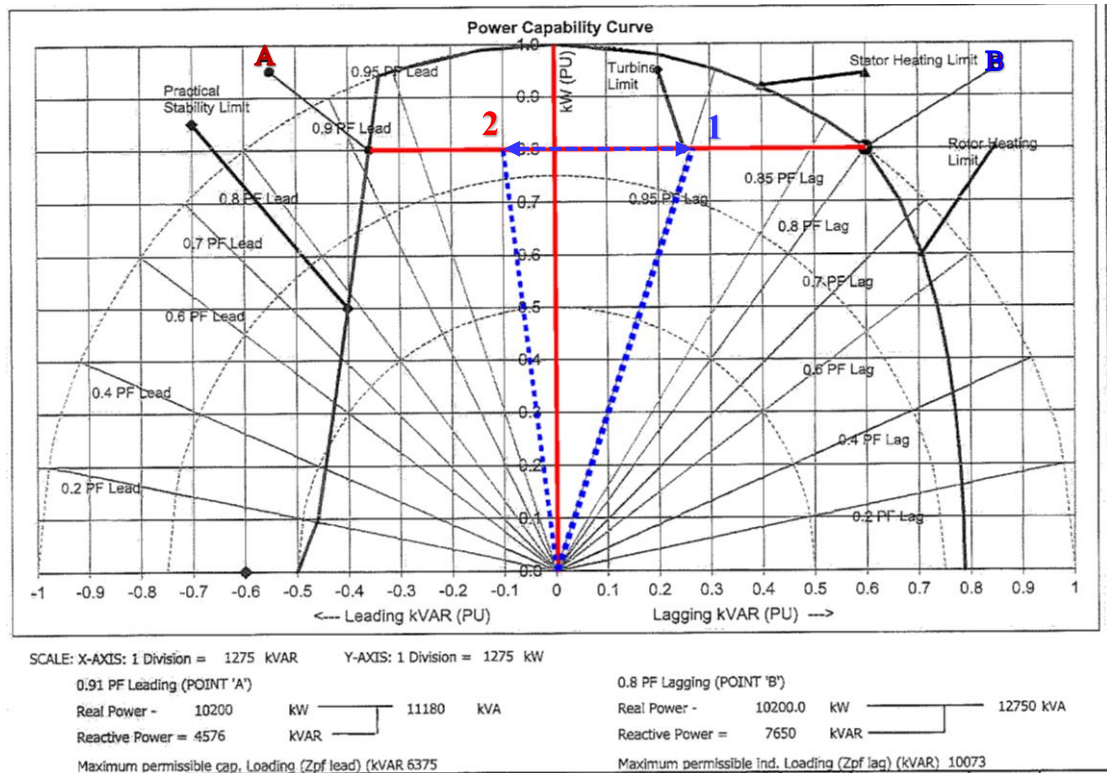
4.3 การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า

ในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาและพิจารณาจากขีดจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Capability Diagram) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังในรูปที่ 7 ได้ดังนี้

1) การผลิตกำลังไฟฟ้าในสภาวะ Under Excited (Power Factor Leading) ในกรณีที่ต้องการผลิตให้ได้กำลังไฟฟ้า, P ให้สูงสุด โดยจะผลิตประมาณ 9.9 MW. หรือไม่เกิน 0.8 pu. ตามในรูปที่ 8 นั้น ตัวประกอบกำลังจะนำหน้า มีผลทำให้รับกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q เข้ามาในระบบของโรงไฟฟ้า ในขณะที่ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง, P เข้าระบบการไฟฟ้าตามปกติ ซึ่งในสภาวะนี้ โรงไฟฟ้าจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการรับกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q ให้กับกรไฟฟ้า

2) การผลิตกำลังไฟฟ้าในสภาวะ Over Excited (Power Factor Lagging) จะต้องทำการปรับค่ากระแสสนามกระตุ้น I_f เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า E_d เพิ่มมากขึ้นกว่าแรงดันของการไฟฟ้า V_t จะมีผลทำให้รับกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q จะไหลเข้าระบบการไฟฟ้า ในขณะที่ยังควบคุมต้นกำลังทางกลที่มาจากTurbine เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้า, P ให้มีค่าสูงสุดเท่าเดิม โดยปกติก็ไม่ควรเกิน 0.8 pu. หรือประมาณ 9.9 MW. ตามในรูปที่ 8 ซึ่งก็คือบริเวณภายในจุด B ซึ่งกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q ไหลเข้าสู่ระบบการไฟฟ้า ในขณะที่กำลังไฟฟ้าจริง, P ยังไหลเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าตามปกติ ซึ่งในสภาวะนี้ โรงไฟฟ้าจะไม่เสียค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q

ซึ่งในการปรับกระแสสนามกระตุ้น I_f นั้น เราควรพิจารณาแรงดันของการไฟฟ้าควบคู่ไปด้วย เพื่อไม่เกินข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คือ 34.6 kV หรืออาจเกินได้เล็กน้อย และทำให้การจ่ายไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าอยู่ในสภาวะ Over Excited ซึ่งเป็นสภาวะที่ทางโรงไฟฟ้าจะได้ประโยชน์มากที่สุด หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ ลดค่าใช้จ่ายในการรับกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q นั้นเอง



รูปที่ 7 จิตจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Capability Diagram) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและทดสอบการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพบว่า การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q สามารถทำได้ดังนี้

1. หากแรงดันของกริดการไฟฟ้าปกติ (33 kV) ให้ทำการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ใน จุดที่ B ดังในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นขอบเขตของการปรับกระแสกระตุ้น I_f ให้อยู่ในสภาวะ Over Excited (Power Factor Lagging) โดยค่ากำลังไฟฟ้าจริง, P มีค่าไม่เกิน 0.8 pu. หรือ ไม่เกิน 9.9 MW และแรงดันไม่เกิน 34.6 kV (ตามข้อกำหนดของ PEA) จะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง, P และกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q ไหลเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าตามปกติ

2. หากแรงดันของการไฟฟ้าสูงเกิน 34.6 kV ให้ทำการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ใน จุดที่ A ในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นขอบเขตของการปรับกระแส I_f ในสภาวะ Under Excited (Power Factor Leading) โดยค่ากำลังไฟฟ้าจริง, P มีค่าไม่เกิน 0.8 pu. หรือ ไม่เกิน 9.9 MW เช่นกัน และแรงดันไม่เกิน 34.6 kV (ตามข้อกำหนดของ PEA) จะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง, P ไหลเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าตามปกติ แต่โรงไฟฟ้าจะต้องรับกำลังไฟฟ้าเสมือน, Q เข้ามา แต่ต้องพยายามควบคุมให้เข้ามาเพียงเล็กน้อย เพื่อลดค่าใช้จ่ายจากการเรียกเก็บค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน

ดังนั้น เส้นสีน้ำเงินที่เชื่อมโยงระหว่างจุดที่ 1 และ จุดที่ 2 ในรูปที่ 7 เป็นขอบเขตของการควบคุมการเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับโรงไฟฟ้านี้ เพื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง, P ไหลเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าที่เป็นไปได้ทั้งสองสภาวะที่จะไม่เสียค่าใช้จ่ายหรือเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

6. เอกสารอ้างอิง

- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2559). *ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า*. เอกสารแนบท้ายประกาศ.
- Aye Phyu, Zaw Lin Htun(2014). Implementation of Synchronous Generator for Biomass Energy Electricity Generation. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 3(14), 3005-3011.
- Buta Singh, Zoltán Szamosi , Zoltán Siménfalvi , Martí Rosas-Casals (2020). Decentralized biomass for biogas production. Evaluation and potential assessment in Punjab (India). *Electrical Power and Energy Systems*, 6, 1702–1714.
- Constantin GHITA1, Aurelian CRACIUNESCU2, Valentin NAVRAPESCU3, Ioan Dragos DEACONU4, Aurel –Ionut CHIRILA5, Ion – Daniel ILINA6. (2010). Optimal reactive power compensation using synchronous generators. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality(ICREPG'10)*, 1(8), April 2010.
- D.K.Yadav, T.Sbhatti.(2014). Voltage control through reactive power support for WECS based hybrid power system. *Electrical Power and Energy Systems*, 62, 507–518.
- Han Phoumin, Shigeru Kimura, Wongkot Wongsapai and Yaowateera Achawangku(2019). *Study on Biomass Supply Chain for Power Generation in Southern Part of Thailand*. ERIA Research Project Report 2019, No.9. ERIA Economic Research Institute for ASEA and East Asia.
- Ramadoni Syahputra, Andi Wahyu Nugroho, Anna Nur Nazilah Chamim, Widyasmoro and Teguh Iman Prasetyo(2018). Performance Analysis of Synchronous Generator: A Case Study in Steam Power Plant at PT POMI Paiton Unit 7 Probolinggo, East Java, Indonesia. *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 2(4), 144- 152.

การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย:

กรณีศึกษาผู้รับเหมางานตอกเสาเข็ม

APPLICATION OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

FOR SELECTING SUBCONTRACTORS: CASE STUDY OF

PILE DRIVING SUBCONTRACTOR

ตำราญ คะปัญญา¹, ไพจิตร ผาวัน²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: Yokin4414@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย ด้วยวิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น งานวิจัยเริ่มจากการเก็บรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย (งานเสาเข็ม) จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน ให้คะแนนเปรียบเทียบเป็นรายชื่อของปัจจัยด้านเทคนิคประกอบด้วยปัจจัยหลักทั้งหมด 5 ปัจจัย จากการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญพบว่า ปัจจัยด้านการเงิน 22.2% ด้านประสบการณ์และผลงานในรอบ 5 ปี 9.8% ด้านบุคลากร 22.5% ด้านเครื่องจักร-อุปกรณ์ 20.8% และด้านการวางแผนงานและบริหารงาน 24.7% จากการศึกษาได้นำไปใช้กับโครงการ (งานเสาเข็ม) โดยมีผู้รับเหมางานเสาเข็ม ทั้งหมด 5 บริษัท เสนอคุณสมบัติเบื้องต้น และราคาประมูล พบว่าคะแนนด้านเทคนิคและราคาเสนอ บริษัท PA มีคะแนนเป็นอันดับ 1 คือ 61.29% ดังนั้นทางโครงการฯ จึงเลือกบริษัท PA เป็นผู้ได้รับการคัดเลือก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความยืดหยุ่น และสามารถนำไปใช้ในการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อยประเภทอื่นๆ ได้

คำสำคัญ: วิธีกระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์ลำดับชั้น, การตัดสินใจเลือก, ผู้รับเหมาย่อย

ABSTRACT

The objective of this research was to develop model using Analytic Hierarchy Process for the selection of subcontractors. The data collection factors affecting the selection of subcontractors from 10 expert's creativity scores on a pairwise for the calculating weighted rating of the 5 main factors. The weighted values of main factors show the percentage of the experience and performance, the financial status, the officer/staff and the machine-equipment are 22.3%, 9.8%, 22.5%, 20.8% and 24.8% respectively. In this study, it has been applied to the piling work with a total 5 sub-contractors. The criteria for pre-qualification and bidding price by the sub-contractor to obtain the job was evaluated in order to determine the rating of each company. The results of these study were found that PA Company was ranked No.1 at 61.29%. The PA Company was chosen for piling contractor work. It showed that the model was flexible and can be applied to select other types of sub-contractors.

Keywords: AHP, Decision Making, Subcontractor

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วยที่ผ่านมามีความเข้มงวดหรือจำกัดขอบเขตมากเกินไป จึงทำให้ผู้รับเหมาช่วยเข้าสู่กระบวนการคัดเลือกน้อยทำให้เกิดสภาวะผูกขาด ในทางกลับกันหากข้อกำหนดหลวมเกินไป อาจทำให้ผู้รับเหมาที่มีคุณสมบัติไม่เพียงพอผ่านการคัดเลือกซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาและอุปสรรคระหว่างดำเนินการก่อสร้าง ดังนั้นการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วย ถือเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างประการหนึ่ง (กองกฤษณ์ โทษย์วัฒน์และคณะ, 2555) และการพิจารณาทางเลือกที่ดีที่สุดจากหลายทางเลือก ผู้ตัดสินใจต้องตัดสินใจด้วยหลักเหตุผล เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติ ซึ่งจะทำให้การตัดสินใจเกิดประสิทธิภาพสูงสุด (ปรีชาดิ เดชะคุ้มและคณะ, 2560) คุณสมบัติเบื้องต้น (Pre-Qualification) เป็นหลักเกณฑ์ในการคัดเลือกผู้รับเหมาที่นิยมกันในวงการก่อสร้าง (Alarcon, 2002) โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยเกณฑ์ในการพิจารณา ได้แก่ ด้านประสบการณ์ ด้านปริมาณงานที่รับผิดชอบ ด้านการบริหารโครงการ ด้านผลงานที่ผ่านมา ด้านความสัมพันธ์กับผู้ค้าวัสดุ ด้านการเงิน ด้านบุคลากร และด้านเทคนิคการก่อสร้าง แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยด้านต่างๆ ยังขาดหลักเกณฑ์การประเมินค่าอย่างเป็นระบบ ผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) (Saaty, 1980) ในการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วยกรณีศึกษาผู้รับเหมางานตอกเสาเข็ม เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับผู้บริหาร โครงการในการตัดสินใจทางเลือกที่ดีที่สุด

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

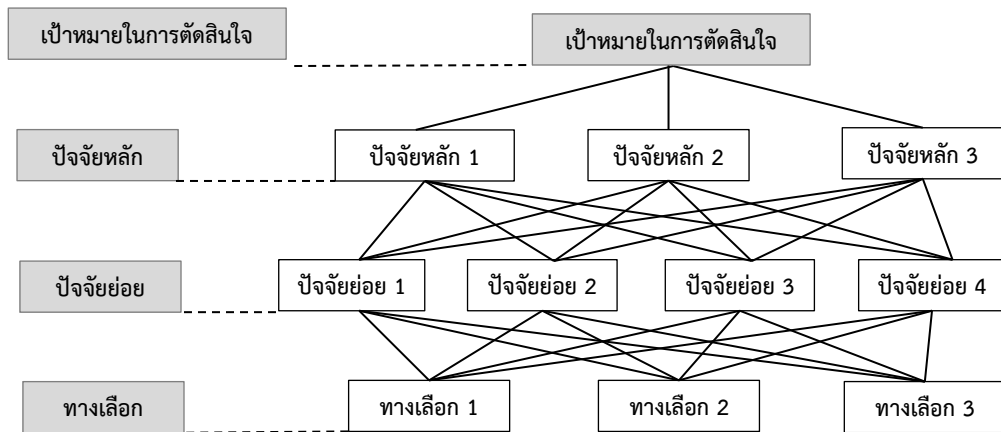
1. เพื่อศึกษาปัจจัยและเกณฑ์ที่มีผลกระทบต่อกรคัดเลือกผู้รับเหมาช่วย
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วยด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Saaty, 1980)

ถูกพัฒนาขึ้น โดย Thomas L. Saaty ในปี 1970 โดยมีหลักการ คือแบ่งโครงสร้างของปัญหาออกเป็นแต่ละชั้น ชั้นแรกคือ การกำหนดเป้าหมาย (Goal) กำหนดเกณฑ์ (Criteria) เกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) และทางเลือก (Alternatives) แล้วจึงวิเคราะห์หาทางเลือกที่ดีที่สุด โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบ (Trade off) เกณฑ์ในการเลือกทางเลือกทีละคู่ (Pairwise) เป็นการพิจารณาวิเคราะห์ทางเลือกทีละคู่ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ทีละเกณฑ์จนครบทุกเกณฑ์ ถ้าการให้คะแนนความสำคัญ หรือความชอบนั้นสมเหตุสมผลจะสามารถจัดลำดับทางเลือก เพื่อหาทางเลือกที่ดีที่สุดได้ (วัชรินทร์ ขวัญชัยและคณะ, 2562)

1. การแยกปัญหาและการสร้างลำดับชั้น เริ่มต้นด้วยการแยกปัญหาที่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปของลำดับชั้นของส่วนย่อยระดับชั้นที่สูงที่สุด คือวัตถุประสงค์โดยรวมส่วนย่อยซึ่งมีผลต่อการตัดสินใจเรียกว่าเกณฑ์ (Criteria) ส่วนย่อยในระดับรองลงไปเรียกว่าเกณฑ์ย่อย (Sub-Criteria) ระดับล่างสุดของลำดับชั้นเรียกว่าทางเลือกของการตัดสินใจ (Decision Alternatives) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างแผนภูมิของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP)

2. การใช้คู่มือพินิจเชิงเปรียบเทียบ สำหรับการใช้น้ำหนักในการเปรียบเทียบแต่ละคู่พบว่าตัวเลข 1 – 9 นั้นเหมาะสมกับเหตุผลและสะท้อนถึงระดับที่สามารถแยกแยะความสัมพัทธ์ได้ดี โดยได้มีการอธิบายตัวเลขไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหมายของการเปรียบเทียบเป็นรายคู่

ระดับความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 เกณฑ์ส่งผลกระทบต่อวัตถุประสงค์เท่าๆ กัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับปานกลาง
5	สำคัญมากกว่า	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมาก
7	สำคัญกว่ามากที่สุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด
9	สำคัญกว่าสูงสุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับสูงสุด
2, 4, 6, 8	อยู่ระหว่างกลาง	อยู่ระหว่างระดับที่ได้อธิบายมาข้างต้น

3. เปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ตัดสินใจรายคู่ เมื่อผู้เชี่ยวชาญได้ทำการศึกษาตามตารางที่ 1 เป็นอย่างดีแล้ว จึงทำการเปรียบเทียบความสำคัญดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความสำคัญเป็นคู่

คู่ที่	ปัจจัยแรก	ปัจจัยแรก สำคัญมากกว่า									ปัจจัยหลัง สำคัญมากกว่า									ปัจจัยหลัง
		ปัจจัยหลัง									ปัจจัยแรก									
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	ปัจจัยแรก	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	ปัจจัยหลัง

การพิจารณาจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบความสำคัญรายคู่ได้ ดังสมการที่ 1

$$N = \left(\frac{n^2 - n}{2} \right) \quad (1)$$

เมื่อ N = จำนวนครั้งในการเปรียบเทียบ และ n = จำนวนปัจจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบเป็นคู่

4. การตรวจสอบอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR)

เมื่อทำการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยแบบรายคู่ในตารางที่ 2 แล้วทำการพิจารณาและตัดสินใจระดับความสำคัญและทำการตรวจสอบค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR) ดังสมการที่ 2 และ 3

$$CR = CI/RI \quad (2)$$

โดยที่ ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) ดังสมการที่ 2

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index : RI) พิจารณา ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (RI) ที่มา: (Saaty T.L, 1980)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

ในกรณีที่ค่า CR น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.10 ถือว่ายอมรับได้ แต่ถ้าค่า CR มากกว่า 0.10 ถือว่ายอมรับไม่ได้ ต้องทำการทบทวนค่าน้ำหนักเปรียบเทียบในเกณฑ์นั้นใหม่

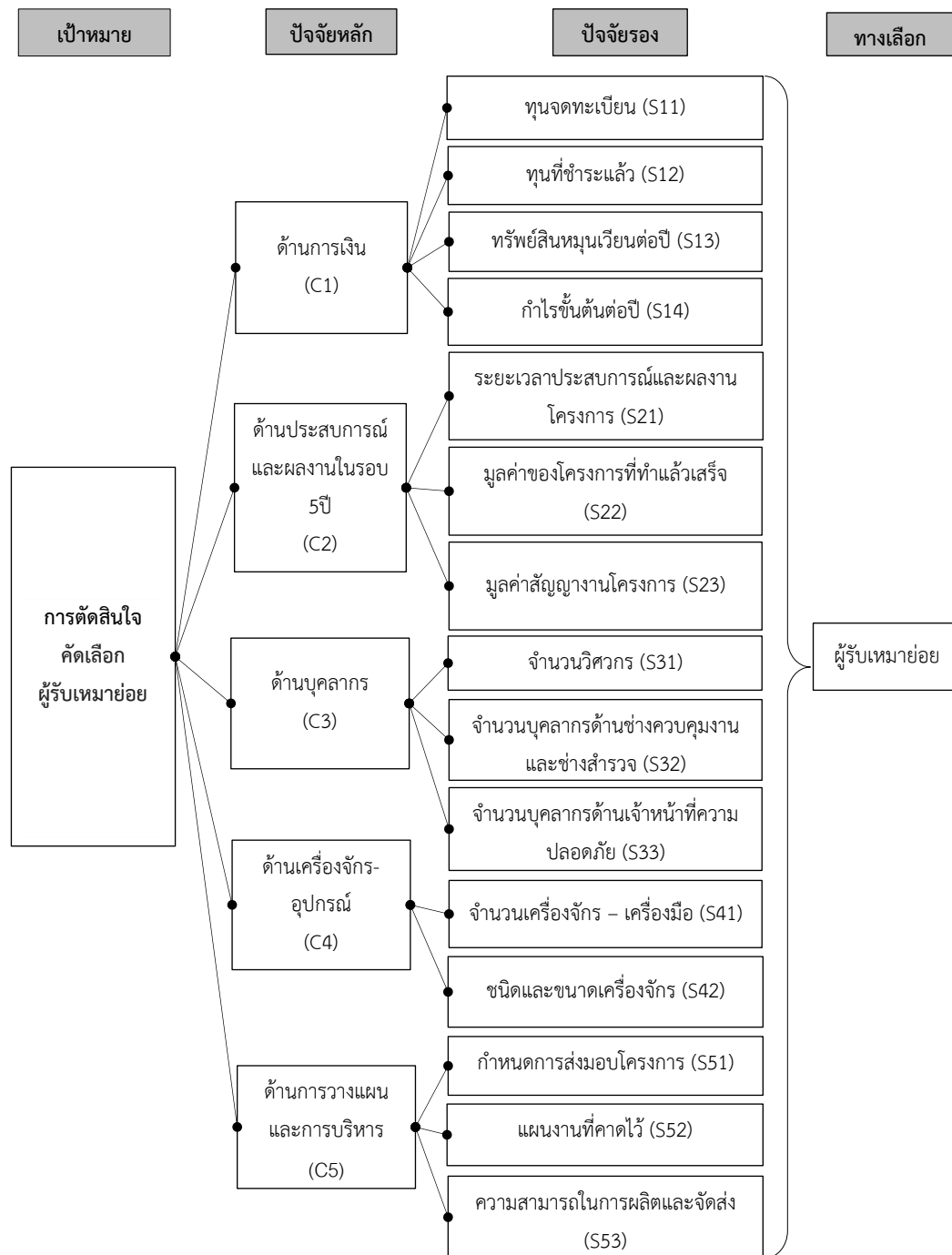
2.2 แนวคิดเกี่ยวกับการตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย

การตัดสินใจ หมายถึงการพิจารณาทางเลือกที่ดีที่สุดจากทางเลือกหลายๆ ทาง ผู้ตัดสินใจต้องตัดสินใจด้วยหลักเหตุผล ตามหลักคุณสมบัติขั้นต้น เพื่อใช้เป็นแนวทาง ในการตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย ซึ่งการตัดสินใจดังกล่าวจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด (Amisha Rathod, 2020).

(Barnard, 1938) ได้ให้ความหมายของการตัดสินใจไว้ว่า คือ "เทคนิคในการที่จะพิจารณาทางเลือกต่างๆ ให้เหลือทางเลือกเดียว" การตัดสินใจในการคัดเลือกผู้รับเหมามีขั้นตอนแรก คือ การตั้งข้อกำหนดที่จะใช้ในการคัดเลือก เป็นหน้าที่ของเจ้าของโครงการที่จะตั้งข้อกำหนดนี้ ขั้นตอนต่อมาคือการนำข้อมูลของผู้รับจ้างมาพิจารณาว่ามีความครบถ้วนตามที่ต้องการหรือไม่ถ้าขาดข้อมูลใดก็จะให้ผู้รับจ้างส่งมาเพิ่ม จากนั้นก็จะทำการพิจารณาว่าผู้รับจ้างมีคุณสมบัติตรงตามที่ได้ตั้งไว้หรือไม่ ผู้รับจ้างรายใดที่ผ่านการคัดเลือกก็จะสามารถเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป ผู้ที่ไม่มีคุณสมบัติเพียงพอจะถูกคัดออกไป (Russell, 1992)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย (งานเสาเข็ม) จากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน และเจ้าของโครงการ 5 ท่าน ซึ่งมีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างมากกว่า 10 ปี โดยสามารถจำแนกปัจจัยออกเป็นเกณฑ์ปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย และเกณฑ์ปัจจัยย่อย 15 ปัจจัย



ภาพที่ 3 แผนภูมิลำดับชั้นปัจจัยการตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย (งานเสาเข็ม)

3.1 การพัฒนาแบบจำลอง

แบบจำลองการตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย (Subcontractor Model) โดยแบบจำลองมีชื่อว่า Subcon-Model มีขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง ดังนี้

ก) สรรหาผู้เชี่ยวชาญ

สรรหาผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน ในการเก็บรวบรวมข้อมูล แบบเดลฟาย (Delphi) จำนวน 2 รอบ รอบแรกพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย และรอบ 2 กำหนดการให้คะแนนเปรียบเทียบ ความสำคัญเป็นคู่ และสรรหาผู้ประเมินจากหัวหน้าแผนก จำนวน 5 ท่าน

ข) สร้างแผนภูมิลำดับขั้น ด้านเทคนิค

จากปัจจัยหลัก จำนวน 5 ปัจจัยและปัจจัยรอง 15 ปัจจัย ที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาทางเลือกการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย (งานเสาเข็ม) ดังภาพที่ 3

ค) สอบถามผู้เชี่ยวชาญ ด้านเทคนิค

สอบถามผู้เชี่ยวชาญ โดยให้ผู้เชี่ยวชาญทำการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ตัดสินในรายการคู่ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คะแนนเฉลี่ยจากการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	ด้านการเงิน	ด้านประสิทธิภาพและผลงานใน 5 ปี	ด้านบุคลากร	ด้านเครื่องจักร-เครื่องมือ	ด้านการวางแผนและการบริหาร
ด้านการเงิน	1.0	2.0	2.0	1.0	0.5
ด้านประสิทธิภาพและผลงานใน 5 ปี	0.5	1.0	0.5	0.3	0.5
ด้านบุคลากร	0.5	2.0	1.0	2.0	1.0
ด้านเครื่องจักร-เครื่องมือ	1.0	3.0	0.5	1.0	1.0
ด้านการวางแผนและการบริหาร	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0
ผลรวม	5.0	10.0	5.0	5.3	4.0

ง) กำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญ

การกำหนดค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยหลัก โดยทำการปรับ “ผลรวม” แต่ละคอลัมน์ให้เป็น 1 และนำผลของแต่ละด้านในคอลัมน์ มาหารด้วยผลรวมในคอลัมน์ของด้านที่มากำหนด จะได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก และปัจจัยรอง ดังตารางที่ 6

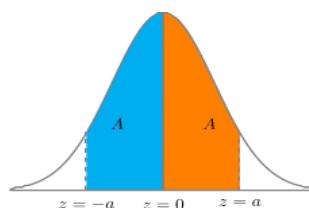
จ) ผู้ประเมินกำหนดคะแนนแต่ละเกณฑ์ ด้านเทคนิค

ผู้ประเมิน ที่เป็นตัวแทนบริษัทผู้ว่าจ้าง (ตำแหน่งหัวหน้าแผนก) ของแต่ละแผนก เป็นผู้กำหนดคะแนน ซึ่งมีเกณฑ์คะแนน 1-100 คะแนน ดังตารางที่ 7

ฉ) ประเมินคะแนนด้านการเสนอราคา

การเสนอราคาของแต่ละ บริษัท จำเป็นต้องแปลงราคาเสนอให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน จากค่าคะแนนมาตรฐาน (Z- Score) ดังสมการที่ 4 และภาพที่ 4

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma} \quad (4)$$



ภาพที่ 4 กราฟเส้นโค้งปกติ (Normal Curve)

ตารางที่ 6 ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง ด้านเทคนิค

ปัจจัยหลัก		ค่าน้ำหนัก %	ปัจจัยย่อย		ค่าน้ำหนัก %
C ₁	ด้านการเงิน	22.3	S ₁₁	ทุนจดทะเบียน	4.8
			S ₁₂	ทุนที่ชำระแล้ว	2.9
			S ₁₃	ทรัพย์สินหมุนเวียนต่อปี	5.4
			S ₁₄	กำไรขั้นต้นต่อปี	9.2
C ₂	ด้านประสิทธิภาพและผลงานในรอบ 5 ปี	9.8	S ₂₁	ระยะเวลาของประสิทธิภาพและผลงานโครงการ	4.8
			S ₂₂	มูลค่างานโครงการรวมทั้งทำแล้วเสร็จ	3.0
			S ₂₃	มูลค่าสัญญางานโครงการ	1.9
C ₃	ด้านบุคลากร	22.5	S ₃₁	จำนวนวิศวกร	10.8
			S ₃₂	จำนวนบุคลากรด้านช่างควบคุมงานและสำรวจ	9.1
			S ₃₃	จำนวนบุคลากรด้านเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย	2.6
C ₄	ด้านเครื่องจักรและอุปกรณ์	20.8	S ₄₁	จำนวนเครื่องจักร – เครื่องมือ	13.8
			S ₄₂	ชนิดและขนาดเครื่องจักร	6.9
C ₅	ด้านการวางแผนและการบริหารงาน	24.8	S ₅₁	กำหนดการส่งมอบโครงการ	15.7
			S ₅₂	แผนอัตรากำลังที่คาดไว้	6.5
			S ₅₃	ความสามารถในการผลิตและจัดส่ง	2.6

ตารางที่ 7 ค่าคะแนนของเกณฑ์ปัจจัยย่อย ด้านเทคนิค

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยย่อย	เกณฑ์ปัจจัยย่อย	คะแนน
C ₁ ด้านการเงิน	ทุนจดทะเบียน (S11)	1-100 ล้านบาท	20
		101-200 ล้านบาท	40
		201-300 ล้านบาท	60
		301-400 ล้านบาท	80
		401 ล้านบาท ขึ้นไป	100
	ทุนที่ชำระแล้ว (S12)	1%-20% ล้านบาท	20
		21%-40% ล้านบาท	40
		41%-60% ล้านบาท	60
		61%-80% ล้านบาท	80
		81% -100% ล้านบาท	100
	ทรัพย์สินหมุนเวียนต่อปี (S13)	1-500 ล้านบาท	20
		501-1000 ล้านบาท	40
		1001-1500 ล้านบาท	60
		1501-2000 ล้านบาท	80
		2001 ล้านบาท ขึ้นไป	100
	กำไรขั้นต้นต่อปี (S14)	1-50 ล้านบาท	20
		51-100 ล้านบาท	40
		101-150 ล้านบาท	60
		151-200 ล้านบาท	80
		201 ล้านบาท ขึ้นไป	100

4. การประยุกต์ใช้งาน

เมื่อได้เกณฑ์การให้คะแนนในแต่ละปัจจัยแล้วก็นำมาให้คะแนนทั้ง 5 บริษัท เพื่อจัดอันดับคะแนนในการคัดเลือก ยกตัวอย่างการให้คะแนนด้านการเงินทั้ง 5 บริษัท ได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 คะแนนปัจจัยด้านเทคนิค C1

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยย่อย	คะแนนคุณสมบัติผู้รับเหมาย่อย				
		PA	SA	SC	PB	ST
C1 ด้าน การเงิน	ทุนจดทะเบียน/ล้านบาท (4.8)	205	300	300	280	521.5
	คะแนน	60	60	60	60	100
	รวมคะแนน((ค่าน้ำหนักคะแนน)/100)	2.88	2.88	2.88	2.88	4.8
	ทุนที่ชำระแล้ว (2.9)	100%	100%	100%	100%	100%
	คะแนน	100	100	100	100	100
	รวมคะแนน((ค่าน้ำหนักคะแนน)/100)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
	ทรัพย์สินหมุนเวียนต่อปี/ล้านบาท (5.4)	1,218	1,596	2,398	941	1,802
	คะแนน	60	80	100	60	80
	รวมคะแนน((ค่าน้ำหนักคะแนน)/100)	3.24	4.32	5.4	3.24	4.32
	กำไรขั้นต้นต่อปี/ล้านบาท (9.2)	150	152	215	51	140
	คะแนน	80	80	100	40	60
	รวมคะแนน((ค่าน้ำหนักคะแนน)/100)	7.36	7.36	9.2	3.68	5.52

ตารางที่ 9 คะแนนประเมินด้านเทคนิค

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยย่อย	คะแนนคุณสมบัติผู้รับเหมาย่อย				
		PA	SA	SC	PB	ST
C1 ด้านการเงิน (22.3)	S11 ทุนจดทะเบียน (4.8)	2.88	2.88	2.88	2.88	4.8
	S12 ทุนที่ชำระแล้ว (2.9)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
	S13 ทรัพย์สินหมุนเวียนต่อปี (5.4)	3.24	4.32	5.4	3.24	4.32
	S14 กำไรขั้นต้นต่อปี (9.2)	7.36	7.36	9.2	3.68	5.52
C2 ด้าน ประสิทธิภาพและ ผลงานในรอบ 5 ปี (9.8)	S21 ระยะเวลาประสบการณ์และผลงาน (4.8)	4.8	3.84	2.88	2.88	4.8
	S22 มูลค่างาน โครงการรวมทั้งแล้วเสร็จ (3)	2.4	2.4	1.8	1.8	2.4
	S23 มูลค่าสัญญางาน โครงการ (1.9)	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
C3 ด้านบุคลากร (22.5)	S31 จำนวนวิศวกร (10.8)	8.64	4.32	6.48	4.32	8.64
	S32 จำนวนบุคลากรช่างควบคุมงานและสำรวจ (9.1)	7.28	9.1	5.46	5.46	5.46
	S33 จำนวนบุคลากรเจ้าหน้าที่ความปลอดภัย (2.6)	2.6	2.08	2.08	2.08	2.6
C4 ด้านเครื่องจักร และ อุปกรณ์ (20.8)	S41 จำนวนเครื่องจักร – เครื่องมือ (13.8)	8.28	8.28	5.52	5.52	8.28
	S42 ชนิดและขนาดเครื่องจักร (6.9)	6.9	4.14	4.14	4.14	5.52
C5 ด้านการวางแผน และการบริหารงาน (24.8)	S51 กำหนดการส่งมอบโครงการ (15.7)	12.56	12.56	12.56	9.42	9.42
	S52 แผนอัตราการตกเข็มนาฬิกา (6.5)	6.5	5.2	6.5	6.5	6.5
	S53 ความสามารถในการผลิตและจัดส่ง (2.6)	6.5	6.5	5.2	3.9	5.2
คะแนนรวม		83.98	75.64	70.60	57.88	76.12
อันดับ		1	3	4	5	2

ตารางที่ 9 จะได้คะแนนประเมินด้านเทคนิค และอันดับบริษัทที่ได้จากการประเมินของแบบจำลองฯ คือ บริษัท PA ได้คะแนนรวม 83.98 บริษัท SA ได้คะแนนรวม 75.64 บริษัท ST ได้คะแนนรวม 76.12 บริษัท SC ได้คะแนนรวม 70.60 และบริษัท PB ได้คะแนนรวม 57.88 ตามลำดับ

เมื่อผู้รับเหมาแต่ละรายเสนอราคา จะได้ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน งานเสาเข็มจะได้ราคากลาง 100 ล้าน $100 \pm 10\%$ ซึ่งอยู่ในพื้นที่ A- และ A+ ดังนั้นคะแนนมาตรฐาน และลำดับ จากบริษัททั้ง 5 บริษัท ที่เสนอราคาเพื่อเข้ายื่นประมูล ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 คะแนนประเมินด้านเทคนิค และราคาประมูลของผู้รับเหมางานเสาเข็ม

คะแนนการคัดเลือก	ผู้รับเหมาย่อย				
	PA	SA	SC	PB	ST
ราคาเสนอ	95,000,000	94,000,000	90,000,000	117,000,000	93,000,000
คะแนนประเมินด้านเทคนิค	83.98	75.64	70.60	57.88	76.12
คะแนนเปอร์เซ็นต์ไทล์ ด้านราคาเสนอ	38.59%	34.83%	21.19%	2.44%	31.21%
คะแนนรวมการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย = (คะแนนประเมินด้านเทคนิค+คะแนน เปอร์เซ็นต์ไทล์ด้านราคาเสนอ)/2	61.29	55.23	45.89	30.16	53.67
ลำดับ	1	2	4	5	3

อภิปรายผลผลการวิจัย

จากการนำแบบจำลอง Subcon-Model มาประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อยงานเสาเข็มของโครงการก่อสร้างห้างสรรพสินค้า ซึ่งมีเสาเข็มตอกจำนวน 4,800 ต้น มีมูลค่า 100 ล้านบาท (ราคากลาง) โดยอาศัยหลักการคัดเลือกตามแบบจำลอง ที่ประกอบด้วย คุณสมบัติด้านเทคนิค และราคาที่เสนอของบริษัทผู้รับเหมาย่อย โดยแต่ละบริษัทมีคะแนนด้านเทคนิคสูงสุด คือ บริษัท PA (83.98) บริษัท SA (75.64) บริษัท ST (76.12) บริษัท SC (70.60) และ บริษัท PB (57.88) ตามลำดับ สำหรับคุณสมบัติด้านราคาเสนอ บริษัท SC ได้เสนอราคาต่ำสุด คือ 90 ล้านบาท โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ เท่ากับ 21.19 หากพิจารณาโดยใช้หลักราคาต่ำสุดเป็นเกณฑ์ บริษัท SC จะเป็นผู้ชนะการประมูลครั้งนี้ แต่แบบจำลอง Subcon-Model ได้พิจารณาคุณสมบัติด้านเทคนิคพร้อมกับราคาเสนอ โดยที่ราคาเสนอ จะถูกแปลงเป็นคะแนนเปอร์เซ็นต์ไทล์ ด้านราคาเสนอ ก่อนที่จะนำมารวมกับคะแนนประเมินด้านเทคนิค แล้วหารด้วย 2 (เนื่องจากเป็นการเฉลี่ยค่าคะแนนของสองปัจจัย) จึงเห็นว่าบริษัท PA เสนอราคา 95 ล้านบาท (ไม่ใช่ราคาต่ำสุด) เมื่อนำราคาที่เสนอเข้าพิจารณาในแบบจำลอง เพื่อคำนวณคะแนนรวมการคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย พบว่า บริษัท PA มีคะแนนรวมฯ เท่ากับ 61.29 ซึ่งเป็นลำดับที่ 1 จึงเป็นบริษัทที่ได้รับงานตอกเสาเข็มของโครงการนี้

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาปัจจัยและเกณฑ์ที่มีผลกระทบต่อคัดเลือกผู้รับเหมาย่อย (งานเสาเข็ม) โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อทำการศึกษาคือต่อไปนี

1. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยควรศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับข้อมูลของผู้รับเหมาให้ละเอียดถี่ถ้วน ซึ่งหากข้อมูล ไม่เพียงพอ อาจทำให้การคำนวณผิดพลาดส่งผลให้ลำดับคะแนนของผู้รับเหมาเปลี่ยนไป

2. การกำหนดปัจจัยและเกณฑ์ ควรจะเพิ่มเกณฑ์ด้านการระยะเวลาวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผู้รับเหมามีคุณภาพที่เหมาะสมกับราคาราคามูลค่าของงานและสำเร็จลุล่วงตามวันเวลาที่กำหนด

3. การวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการคัดเลือกผู้รับเหมางานดอกเส้าเข็ม จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการคัดเลือกผู้รับเหมาอื่นในงานลักษณะอื่นๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

กองกฤษณ์ โตชัยวัฒน์. (2555). คุณสมบัติในการคัดเลือกผู้รับเหมาก่อสร้างงานสาธารณูปโภคในโครงการหมู่บ้านจัดสรร. *วารสารวิจัยและพัฒนา เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 35(2) เดือนเมษายน-มิถุนายน.

ปาริชาติ เศษะคุ้ม, อภิชัย อภิรัตน์พิมลชัย และสุวทนา เจริญสุข. (2560). เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาก่อสร้างในเขตนิคมอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี. *วารสารวิชาการศรีปทุม ชลบุรี*, 14(1), 192-201.

วัชรินทร์ ขวัญชัย และไพจิตร พาวาน. (2562). “การตัดสินใจเลือกแบบหล่อคอนกรีตในงานก่อสร้างอาคารสูงด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ เป็นการศึกษาเพื่อตัดสินใจเลือกแบบหล่อคอนกรีตในแนวราบสำหรับอาคารสูง”.

Alarcon, L. F. & Mourgues C. (2002). Performance Modeling for Contractor Selection, *Journal of Management in Engineering*, 18, 52-60.

Amisha Rathod and Rameshwar Ingalkar. (2020). *A Case Study on Selection of Contractor using Analytical Hierarchy Process*.

Barnard, C. I. (1938). *The functions of the executive*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Russell, Hancher and Skibniewski. (1992). Contractor prequalification data for construction owners, *Construction Management and Economics*. Taylor & Francis journal Suggester.

Saaty, T., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. 1980.