

กลุ่ม 1
กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
(วิจัย)

การปรับปรุงการบริการการศึกษาในระดับอุดมศึกษาโดยประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่
เชิงคุณภาพ กรณีศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์
IMPROVING EDUCATION SERVICE IN HIGHER EDUCATION
BY USING QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT (QFD)
CASE STUDY: FACULTY OF ENGINEERING

ชวลิต มณีศรี

อาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: chawalit.ma@spu.ac.th

บทคัดย่อ

การแข่งขันของธุรกิจการบริการศึกษา โดยเฉพาะในระดับอุดมศึกษามีความเข้มข้นมากขึ้นเรื่อยๆ โดยแต่ละสถาบันกำหนดแนวทางในการดำเนินการด้านการบริการการศึกษาโดยมุ่งหวังที่จะตอบสนองต่อความต้องการของนักศึกษา เพื่อให้มีจำนวนนักศึกษามาสมัครเรียนในสถาบันได้มากที่สุด ผู้วิจัยเห็นว่าสิ่งหนึ่งที่จะแสดงให้เห็นถึงโอกาสของความสำเร็จก็คือ การย้อนกลับไปพิจารณาถึงกระบวนการหรือเทคนิคการค้นหาคำความต้องการของนักศึกษาทั้งผู้ที่เข้าศึกษา ผู้ที่กำลังศึกษาอยู่ และผู้ใช้บัณฑิต (ลูกค้า) ที่มีอยู่เหมาะสมเพียงใด เนื่องจากถ้าไม่สามารถทราบถึงความต้องการที่แท้จริงของลูกค้าได้ก็จะไม่สามารถกำหนดแนวทางในการมุ่งใจให้นักศึกษามาสมัครเรียนได้ การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าเอาความต้องการของลูกค้าที่ได้จากการวิเคราะห์เสียงเรียกร้องของลูกค้า ผ่านกระบวนการตามขั้นตอน 4 ขั้นตอนโดยใช้ตารางไขว้ (Matrix) แสดงความสัมพันธ์ มีขั้นตอนเริ่มจากการวางแผนผลิตภัณฑ์ การออกแบบผลิตภัณฑ์ การวางแผนกระบวนการ และการสร้างเอกสารปฏิบัติงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่า QFD เป็นเทคนิคที่สามารถสร้างแนวทางการปฏิบัติงานที่สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าได้

หลังจากที่ได้ดำเนินงานตามขั้นตอนของ QFD แล้วพบว่าสิ่งที่ลูกค้าต้องการมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ โอกาสการทำงาน หลักสูตรหรือรายวิชาที่สอน และรายได้หลังจบการศึกษา โดยพบว่าสาขาวิชาที่น่าสนใจมากที่สุดของผู้ตอบแบบประเมินทั้ง 3 กลุ่มยังไม่ตรงกัน คือผู้เรียนเลือกเรียนไม่ตรงกับความต้องการของผู้ใช้บัณฑิต ซึ่งเห็นว่าน่าจะมีปัญหาจากการแนะแนวการศึกษา และสุดท้ายผลจากการดำเนินงานตามขั้นตอนของ QFD ทำให้มีแผนกระบวนการซึ่งมีผลต่อการบริการการศึกษาที่ทำให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้มากที่สุด จำนวน 13 แผน ซึ่งแผนกระบวนการ 3 อันดับแรกที่ควรดำเนินการก่อน คือ การเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการวิชาการแก่สังคม การพัฒนาระบบบริหารบุคคลและพัฒนาขีดความสามารถของบุคลากร และการพัฒนามาตรฐานการเรียนการสอน เพื่อผลิตบัณฑิตนักปฏิบัติที่พึ่งพาตนเองได้

คำสำคัญ : การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เสียงเรียกร้องจากลูกค้า การบริการการศึกษา

ABSTRACT

An education service is an intensely competitive business, especially in higher education. Each institute has been trying to find a way to meet its customer needs to get the highest number of undergraduate applicants. As a result, a process of needs identification is considered from three groups of customers: future students, present students, and employers. Unless the exact needs are addressed, it is hard to encourage future students to apply to universities. The quality function deployment (QFD) is a technique applied to identify the needs by analyzing the voice of customers (VOC). This technique divided into four phases presenting on a cross relationship or matrix. These phases are product planning, product design, process planning, and work instruction development. As a result, the QFD can help to create an action plan to meet the needs.

After applying the QFD technique, it is found that the top three customer needs are job opportunities, curricula or course subjects, and future job salary. However, the needs of future and present students are different from the needs of employers. This might be caused by poor student counseling. In order to satisfy the needs, eventually, thirteen process plans are developed. The first three include competency development of academic services, human resource development and personal potential enhancement, as well as teaching and learning standard development to produce ideal graduates.

KEYWORDS : Quality function deployment (QFD), Voice of customer (VOC), Education service

1. บทนำ

ปัจจุบันธุรกิจบริการการศึกษาในระดับต่างๆ มีการแข่งขันสูงมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในระดับอุดมศึกษาที่แต่ละสถาบันต้องการลูกค้าเข้ามาศึกษาต่อในระดับต่างๆ อันได้แก่ ระดับปริญญาตรี ระดับปริญญาโท และระดับปริญญาเอก โดยมีแนวทางในการดำเนินธุรกิจแตกต่างกันไป เช่น เปิดสอนหลักสูตรให้มีมากขึ้น ขยายวิทยาเขตไปในภูมิภาคต่างๆ และวิธีการจูงใจหรือเงื่อนไขต่างๆ ที่ทำให้ได้จำนวนนักศึกษาตามเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งแนวทางในการดำเนินการธุรกิจบริการการศึกษาที่แต่ละสถาบันได้กำหนดขึ้นมานั้น จะตอบสนองต่อความต้องการของนักศึกษาสามารถนำพานักศึกษามาสมัครเรียนในสถาบันได้มากเพียงใด สิ่งหนึ่งที่จะแสดงให้เห็นถึงโอกาสของความสำเร็จก็คือ การย้อนกลับไปพิจารณาถึงกระบวนการหรือเทคนิคการค้นหาความต้องการของนักศึกษาทั้งผู้ที่กำลังจะเข้าศึกษา และผู้ที่กำลังศึกษาอยู่ รวมทั้งผู้ใช้บัณฑิต ซึ่งทั้งหมดถือว่าเป็นลูกค้าของบริการการศึกษาทั้งสิ้น ว่ารูปแบบกระบวนการดังกล่าวมีความเหมาะสมเพียงใด เนื่องจากถ้าไม่สามารถทราบถึงความต้องการที่แท้จริงของกลุ่มลูกค้าได้ก็จะไม่สามารถกำหนดแนวทางในการจูงใจให้นักศึกษามาสมัครเรียนได้ หรือผลิตบัณฑิตที่เป็นที่ต้องการได้

จากความเป็นข้างต้นจะเห็นได้ว่า การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าเอาความต้องการของลูกค้าที่ได้จากการวิเคราะห์เสียงเรียกร้องของลูกค้า (Voice of Customer: VOC) มาผ่านกระบวนการตามขั้นตอน 4 ขั้นตอน (QFD Four-Phase) ซึ่งจะมีทั้งการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (Benchmarking) และตารางไขว้ (Matrix) แสดงความสัมพันธ์ มีขั้นตอนเริ่มจากการวางแผน

ผลิตภัณฑ์ การออกแบบผลิตภัณฑ์ การวางแผนกระบวนการ และการสร้างเอกสารปฏิบัติงาน น่าจะทำให้สามารถสร้างแนวทางการปฏิบัติงานที่สอดคล้องกับความต้องการของกลุ่มลูกค้าได้

ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ซึ่งจะนำความต้องการของลูกค้าทั้ง 3 กลุ่มข้างต้น โดยกำหนดขอบเขตทั้งหมดเฉพาะในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลมาแปลงเป็นระบบและกระบวนการที่จำเป็นต่อการตอบสนองลูกค้า เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการบริการการศึกษาในระดับอุดมศึกษา โดยใช้คณะวิศวกรรมศาสตร์เป็นกรณีศึกษา โดยเสนอแนะแนวทางการให้บริการการศึกษาที่สามารถตอบสนองความต้องการของนักศึกษาที่จะเข้ามาศึกษาต่อได้ และยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการการศึกษาในอีกทางหนึ่งอีกด้วย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นเทคนิคซึ่งผ่านการใช้งานมายาวนาน มีผู้ให้นิยามไว้หลายอย่าง โดยในที่นี้ได้ยกเอาความหมายหนึ่งซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าได้พรรณาได้ครอบคลุมการแปลงหน้าที่ไว้เป็นอย่างมาก โดยให้ความหมายว่า

“การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัด โครงสร้างเพื่อจัดการออกแบบ วางแผนและพัฒนาผลิตภัณฑ์/ บริการ/ กระบวนการ ซึ่งเน้นที่การตอบสนองความต้องการของลูกค้า/ ผู้รับบริการ/ ผู้ใช้เป็นหลัก มากกว่าการพัฒนานวัตกรรมทางด้านเทคโนโลยี โดยเทคนิคนี้จะช่วยระบุความต้องการของลูกค้าได้อย่างชัดเจน และประเมินคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ว่าสามารถตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้ามากน้อยเพียงใด”

(อรดี พฤตศรันยชนนท์, 2543)

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Dr.Yoji Akao ซึ่งได้นำมาใช้เป็นครั้งแรกในการออกแบบถังเก็บน้ำมันของอู่ต่อเรือ (Shipyards) บริษัท Kobe Shipyards of Mitsubishi Heavy Industry ประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี ค.ศ. 1972 โดยพัฒนามาจากแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) เนื่องจากผังก้างปลาเดิมไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผล (Effects) และ เหตุ (Causes) ได้จึงต้องคิดแปลง ให้มีลักษณะเป็น ตารางคำนวณ (Spreadsheet) หรือ เมตริก (Matrix) โดยที่ แถว (Rows) แสดงผลความปรารถนาจากความพึงพอใจของลูกค้า และ สดมภ์ หรือ หลัก (Columns) แสดง เหตุของการควบคุมและความสามารถในการวัด โดยปัจจุบันการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพได้ถูกพัฒนาและนำไปใช้ต่อทั้งในด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการบริการ เช่น การปรับปรุงสินค้าของเล่นไม้เพื่อการศึกษาซึ่งผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงในส่วนของการออกแบบผลิตภัณฑ์ (อมรรัตน์ ปินดา, 2545) การออกแบบโครงสร้างของระบบทะเบียนนิสิตของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยทำให้เกิดการลดระบบย่อยในการลงทะเบียนที่ไม่จำเป็นออกไปทำให้มีผลความพึงพอใจในการบริการมากขึ้น (อรดี พฤตศรันยชนนท์, 2543) การออกแบบกรอบการทำงานสำหรับคุณภาพบริการและความพึงพอใจของลูกค้าในอุตสาหกรรมที่พักแรมซึ่งทำให้ทราบว่าต้องทำอะไรถึงจะตอบสนองต่อความพึงพอใจในการบริการลูกค้าได้ (Miyoung and Haemoon, 1998, 375-390) การประเมินคุณภาพการบริการการศึกษาในระดับปริญญาตรีของสาขาพยาบาลศาสตร์ในประเทศไทยได้หวัน (Chou, 2004, 310-318) ซึ่งทำให้ทราบว่านักศึกษาพยาบาลส่วนใหญ่มีความต้องการให้สถาบันมีการบริการการศึกษาอย่างไรในระหว่างที่เข้าศึกษา และการสร้างแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นคลุมเครือสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ด้วย QFD ซึ่งทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดในการออกแบบกับ

ความพึงพอใจของลูกค้าและลดความเสี่ยงที่เกิดกับการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่อีกด้วย (Liang-Hsuan Chen and Wen-Chang Ko, 2010, 619-632)

ขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งก่อนที่จะเริ่มการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ คือ การหาความต้องการของลูกค้า หรือเรียกว่า “เสียงเรียกร้องของลูกค้า (Voice of Customer: VOC)” การหาข้อมูลดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้แบบสอบถาม หรือการสัมภาษณ์ เมื่อได้ข้อมูลมาแล้วจะต้องนำไปเรียบเรียงและจัดกลุ่มใหม่ด้วยแผนผังการจัดกลุ่ม (Affinity Diagram) และแผนภูมิต้นไม้ (Tree Diagram) หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนหลักการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพทั้ง 4 ขั้นตอน หรือเรียกว่า วิธี QFD แบบ Four-phases Model ซึ่งประกอบด้วย การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning Matrix or House of Quality: HOQ) การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Part Deployment or Design Deployment Matrix) การวางแผนกระบวนการ (Process Planning Matrix) และการสร้างเอกสารปฏิบัติงาน (Operator Instruction Sheet) (ณัฐกาญจน์ พรหมสุวรรณ, 2545)

นอกจากการดำเนินงานตามขั้นตอนของการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพที่ได้กล่าวถึงไปแล้วนั้น ผู้วิจัยเห็นว่า ควรจะนำหลักการด้านการประกันคุณภาพการศึกษามาใช้ร่วมในการพัฒนาการบริการการศึกษาอีกทางหนึ่ง โดยสถาบันอุดมศึกษามีพันธกิจหลัก 4 ด้าน คือ การเรียนการสอน การบริการวิชาการ การวิจัย และการทำนุบำรุง ศิลปะวัฒนธรรม (สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา, 2551) ในแต่ละด้านจะมีแนวทางที่ทำให้การดำเนินงาน บริการการศึกษามีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดความพึงพอใจในกลุ่มลูกค้าทั้ง 3 กลุ่มได้มากที่สุด

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เสียงเรียกร้องของลูกค้า

ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นดำเนินการหาข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้าระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2550 – เดือน มิถุนายน 2551 โดยสร้างแบบสอบถามออกเป็น 2 ชนิด คือแบบสอบถามสำหรับผู้ใช้บัณฑิต และแบบสอบถาม สำหรับนิสิต/นักศึกษา ซึ่งใช้ร่วมกันทั้งกลุ่ม นักศึกษาในระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 และอาชีวศึกษาที่กำลังเลือกเข้า ศึกษาต่อ และกลุ่มนิสิต/นักศึกษาที่กำลังศึกษาอยู่ในสถาบันอุดมศึกษาที่สภาวิศวกรให้การรับรองหลักสูตร 30 สถาบัน ซึ่งกำหนดเงื่อนไขว่าต้องผ่านการศึกษามาแล้วอย่างน้อย 1 ภาคเรียน โดยทั้งหมดอยู่ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล สำหรับลักษณะของแบบสอบถามประกอบด้วย 3 ส่วน เป็นการตั้งคำถามทั้งคำถามปลายปิด และคำถามปลายเปิด คือ

1. ข้อมูลเบื้องต้นของผู้ตอบแบบสอบถาม
2. ข้อมูลด้านความต้องการที่มีต่อคุณลักษณะบัณฑิต
3. ความคิดเห็นเพิ่มเติม

จากนั้นหาจำนวนแบบสอบถามที่กระจายสู่กลุ่มต่างๆ โดยคำนวณจากสูตรคำนวณของ Taro Yamane ที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังสมการที่ 1

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2} \quad (1)$$

n = จำนวนตัวอย่าง, N = จำนวนประชากร, e = ค่าความคลาดเคลื่อน

ทำให้ได้จำนวนแบบสอบถามซึ่งแยกไปยังกลุ่มต่างๆ รวมทั้งสิ้น 1,200 ชุด จาก 3 กลุ่ม คือ ผู้ใช้บัณฑิต 400 ชุด กลุ่มนิสิต/นักศึกษาที่กำลังศึกษาอยู่ 30 สถาบัน จำนวน 400 ชุด และนักศึกษาที่กำลังเลือกที่เรียนต่อ ซึ่งแบ่งโรงเรียนประเภทสามัญศึกษา 50 โรงเรียน จำนวน 250 ชุด และโรงเรียนประเภทอาชีวศึกษา 30 โรงเรียน จำนวน 150 ชุด ผลจากแบบสอบถามดังกล่าวถูกนำไปเรียบเรียงและจัดกลุ่มใหม่ด้วยแผนผังการจัดกลุ่ม (Affinity Diagram) และแผนภูมิต้นไม้ (Tree Diagram)

3.2 การดำเนินงานตามขั้นตอนของ QFD แบบ Four-phases Model

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ จะนำข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้ามาทำการการวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning Matrix or House of Quality: HOQ) โดยในการวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพนั้น จะทำการหาระดับค่าเฉลี่ยความสำคัญของความต้องการของลูกค้า ซึ่งใช้ข้อมูลจากความต้องการที่ได้จัดกลุ่มแล้วจะต้องนำไปสร้างแบบสอบถามอีกชุดเพื่อศึกษาว่าความต้องการแต่ละอย่างกลุ่มลูกค้าได้ความสำคัญอย่างไรบ้าง สำหรับการคำนวณหาค่าเฉลี่ยระดับคะแนนความสำคัญที่มีต่อความต้องการในการบริการการศึกษาของคณะวิศวกรรมศาสตร์นั้นจะนำคะแนนที่ได้ของแต่ละหัวข้อมาหาค่าเฉลี่ยด้วยสูตรค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean) เนื่องจากข้อมูลจากแบบสอบถามมีลักษณะเป็นการเลือกให้ระดับคะแนน (Ratings) จากข้อมูลที่ได้รับ (Data) เป็นวิธีที่ให้ค่าเฉลี่ยที่น่าเชื่อถือที่สุด พร้อมทั้งจะนำไปสร้างเป็น House of Quality ตามวิธี QFD แบบ Four-phases Model ต่อไป ซึ่งสิ่งที่พิสูจน์ว่ากระบวนการดังกล่าวจะสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้นั้นจะเป็นการพิจารณาย้อนกลับกระบวนการ จาก QFD Phase IV ไปยัง QFD Phase III จาก QFD Phase III ไปยัง QFD Phase II และสุดท้ายจาก QFD Phase II ย้อนกลับไปยัง QFD Phase I ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงถึงความต้องการของลูกค้านั่นเอง

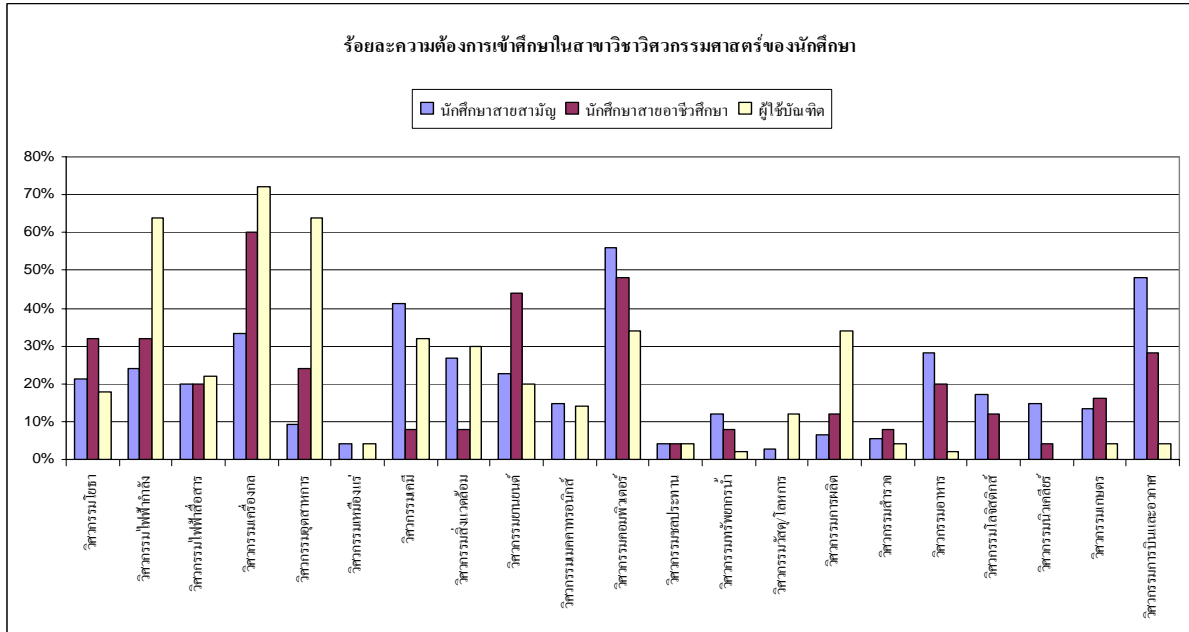
4. ผลการวิจัย

ในขั้นตอนของ VOC มีผลจากการเก็บข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้าทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งได้ให้ข้อมูลที่น่าสนใจไว้ดังนี้

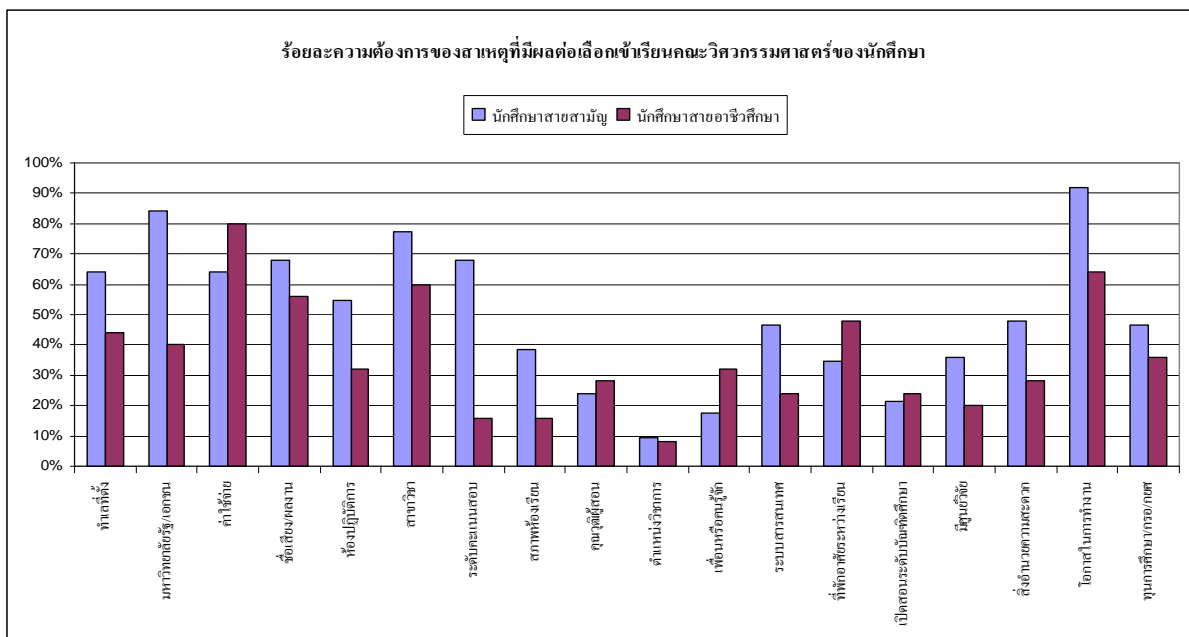
1. มุมมองในด้านสาขาวิชาระหว่างผู้ที่เข้าศึกษากับผู้ใช้บัณฑิตอาจยังไม่ตรงกันนัก ซึ่งหมายถึงผู้เรียนเลือกเรียนในสาขาวิชาที่มีไม่เป็นที่ต้องการของตลาดแรงงาน ดังนั้นถ้าความต้องการของผู้เข้าศึกษาต้องการที่จะได้งานทำเป็นหลัก ก็ควรที่จะมีการแนะแนวการศึกษาทั้งจากผู้ใช้บัณฑิตโดยตรงหรือจากทางสถาบันการศึกษาเอง ดังภาพที่ 1

2. ลักษณะการเลือกเข้าเรียนของนักศึกษาสายสามัญและอาชีวะ มีความแตกต่างกันที่ การเป็นมหาวิทยาลัยของรัฐหรือเอกชน โดยนักศึกษาสายอาชีวะไม่ได้ให้ความสำคัญกับส่วนนี้มากนัก และเมื่อมองไปที่ผู้ใช้บัณฑิต ข้อมูลได้แสดงให้เห็นถึงส่วนที่ขาดไปในการเรียนการสอนของสถาบันการศึกษา เช่นกัน โดยทางด้านความรู้ไม่ใช่ประเด็นหลักเท่ากับ ส่วนเสริมเช่น การมีทักษะการอยู่ร่วมในสังคม ความอดทน ความขยัน ทักษะด้านภาษาและ IT ดังภาพที่ 2

จากนั้นเมื่อเริ่มต้น QFD Phase I ทำให้สามารถแบ่งกลุ่มความต้องการที่มีต่อการบริการการศึกษาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ได้ 6 กลุ่ม คือ ส่วนสนับสนุน บุคคลากร การเรียนการสอน การคัดเลือก ทักษะ และสิ่งจูงใจ ซึ่งจะต้องนำไปสร้างแบบสอบถามอีกชุดเพื่อศึกษาว่าความต้องการแต่ละอย่างกลุ่มลูกค้าได้ให้ความสำคัญอย่างไรบ้าง โดยพบว่า 5 อันดับแรกที่ผู้ตอบแบบสอบถามให้ความสำคัญคือ โอกาสในการทำงาน หลักสูตร/รายวิชาที่สอน รายได้หลังจบการศึกษา คุณวุฒิผู้สอน และความพร้อมของห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 1 ร้อยละความต้องการเข้าศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ของนักศึกษา กับผู้ใช้บัณฑิต



ภาพที่ 2 ร้อยละความต้องการของสาเหตุที่มีผลต่อการเลือกเข้าเรียนคณะวิศวกรรมศาสตร์ของนักศึกษา

จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จาก QFD Phase I ดำเนินการตามกระบวนการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพทั้ง 4 ขั้นตอนแล้ว ทำให้ได้เอกสารปฏิบัติงาน 13 แผน ที่สามารถสร้างให้เกิดการบริการการศึกษาที่ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าทั้ง 3 กลุ่มได้ ซึ่งประกอบด้วย (1) เพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการวิชาการแก่สังคม (2) พัฒนาระบบบริหารบุคคลและพัฒนาขีดความสามารถของบุคลากร (3) พัฒนามาตรฐานการเรียนการสอน เพื่อผลิตบัณฑิตนักปฏิบัติที่พึ่งพาตนเองได้ (4) พัฒนา และถ่ายทอดงานวิจัยนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และ เทคโนโลยี โดยมุ่งเน้นให้เกิดทรัพย์สินทางปัญญา (5) จัดตั้งศูนย์วิจัยเฉพาะทางและเพิ่มศักยภาพระบบบริหารจัดการวิจัยเชิงบูรณาการ (6) เพิ่มขีดความสามารถ ในการวิจัยและพัฒนา (7) พัฒนาระบบการรับสมัคร (8) พัฒนาห้องปฏิบัติการให้ส่งเสริมการเรียนการสอน และการประกอบอาชีพ (9) พัฒนาระบบการเงิน บัญชี งบประมาณ และการพัสดุ (10) พัฒนาระบบบริหารการจัดการภาครัฐที่ดี และระบบประกันคุณภาพ (11) ส่งเสริม และพัฒนาหลักสูตร โดยเน้นการจัดหลักสูตรที่หลากหลาย (12) จัดสรรทุนการศึกษา และกองทุนต่างๆ และ (13) พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านต่างๆ เช่น ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ และการสื่อสารรวมทั้งสภาพแวดล้อมทั่วไป

5. สรุปผลการวิจัย

การดำเนินการตามขั้นตอนการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพทั้ง 4 ขั้นตอน ซึ่งเริ่มตั้งแต่การเก็บข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้าซึ่งในที่นี้คือ ผู้ที่ต้องการเข้าศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ผู้ที่กำลังศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และผู้ใช้บัณฑิต ใน Phase I ข้อมูลดังกล่าวได้แปลงเป็นความต้องการของลูกค้าเพื่อใช้ในการพิจารณาหาความต้องการทางเทคนิคที่เหมาะสมที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ ใน Phase II ความต้องการทางเทคนิคถูกแปลงเป็นคุณลักษณะการบริการการศึกษา ใน Phase III คุณลักษณะการบริการการศึกษาถูกแปลงเป็นคุณสมบัติกระบวนการ ซึ่งได้พัฒนาต่อเป็นแผนกระบวนการ ที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการข้างต้นได้ในที่สุด

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจะระดับคะแนนจาก QFD Phase IV แล้ว พบว่าแผนกระบวนการ 3 อันดับแรกซึ่งควรได้รับการพัฒนา ก่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริการศึกษาจนส่งผลให้มีจำนวนนักศึกษาเข้าสมัครเรียนในสถาบันการศึกษาได้มากขึ้น คือ

1. การเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการวิชาการแก่สังคม เนื่องจากสถานะในปัจจุบันสถานประกอบการต่างๆ ต้องการเพิ่มศักยภาพการแข่งขัน การเป็นสถาบันการศึกษาควรเป็นหลักในการช่วยเหลือด้านวิชาการแก่ภาคธุรกิจ อีกทั้งยังเป็นการแสดงศักยภาพของอาจารย์และนักศึกษาอีกด้วย
2. การพัฒนาระบบบริหารบุคคลและพัฒนาขีดความสามารถของบุคลากร โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำให้บุคลากรมีองค์ความรู้ที่ทันสมัยและสามารถใช้ประโยชน์ได้จริง ซึ่งทำให้สามารถผลิตบัณฑิตได้มีคุณภาพ และตรงต่อความต้องการของผู้ใช้มากขึ้น รวมทั้งยังสามารถพัฒนางานวิจัย และหลักสูตรที่เหมาะสมกับสถานการณ์ได้
3. การพัฒนามาตรฐานการเรียนการสอน เพื่อผลิตบัณฑิตนักปฏิบัติที่พึ่งพาตนเองได้ เนื่องจากจะมีส่วนให้นักศึกษาได้ เรียนรู้ได้เข้าใจมากยิ่งขึ้น สามารถเรียนรู้ด้วยตนเอง และสามารถปรับตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อจบออกไปทำงานในอนาคต

นอกจากนี้ผลของการดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้อาจมีข้อจำกัดในเรื่องความเหมาะสมของช่วงเวลาในการนำไปใช้ เนื่องจากปัจจุบันสถานะเศรษฐกิจที่ถดถอย แผนกระบวนการซึ่งมีลำดับต่อจาก 3 แผนที่เป็นต้องดำเนินการข้างต้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ผลที่ปรากฏในงานวิจัยนี้ซึ่งทำในช่วงเวลาที่เศรษฐกิจยังอยู่ในภาวะปกติ ซึ่งควรพิจารณาเพิ่มเติมในประเด็นของกลุ่มธุรกิจที่ฟื้นตัวได้หลังจากการถดถอย ค่าครองชีพ รวมไปถึงมาตรฐานทางการศึกษา เช่น กรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติ (TQF:HEd) การประกันคุณภาพการศึกษาทั้งภายในและภายนอก และกฎหมายหรือข้อกำหนดที่ได้มีการประกาศใช้ซึ่งอาจมีผลต่อภาคธุรกิจหรือภาคการศึกษา นอกจากนี้ผู้วิจัยเห็นว่าควรปลูกฝังให้บัณฑิตมีส่วนร่วมในองค์กร และตระหนักถึงผลกระทบที่สถานประกอบการได้รับมากกว่าการหวังเพียงแต่รายได้เท่านั้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยสำหรับบุคลากรภายใน มหาวิทยาลัยศรีปทุม จึงขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยศรีปทุมที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยใน ณ ที่นี้ด้วย

7. รายการอ้างอิง

- ณัฐกาญจน์ พรหมสุวรรณ. 2545. “การปรับปรุงคุณภาพและการให้บริการของผลิตภัณฑ์ไอแก้ว โดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนหน้าที่ทางคุณภาพ: กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ P209 ของโรงงานตัวอย่าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- รุ่งทรัพย์ มิ่งวัฒนบุญ. 2545. “การประยุกต์เทคนิคคิวเอดีเพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์และบริการในหน่วยงานขายของธุรกิจปิโตรเลียม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา. 2551. **คู่มือการประกันคุณภาพการศึกษาภายในสถาบันการศึกษาระดับอุดมศึกษา**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์.
- อมรรัตน์ ปินตา. 2545. “การปรับปรุงสินค้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการเปลี่ยนหน้าที่ทางคุณภาพ (QFD) กรณีศึกษาโรงงานผลิตของเล่นไม้เพื่อการศึกษา.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อรดี พุดดิศรีนนท์. 2543. “การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปรหน้าที่คุณภาพ เพื่อออกแบบโครงสร้างของระบบทะเบียนนิติของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Abbie Griffin. 1992. “Evaluating QFD's use in US firms as a process for developing products.” **Journal of product innovation management**. September 1992, 9, 3: 171-187.
- Gülser Köksal and Alpay Egitman. 1998. “Planning and design of industrial engineering education quality.” **Computers & industrial engineering**. December 1998, 35, 3-4: 639-642.

การเพิ่มประสิทธิภาพแผงรับรังสีแสงอาทิตย์โดยการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์
แบบปรับองศาที่เหมาะสม

THE EFFICIENCY IMPROVEMENT OF SOLAR CELL BY USING
OPTIMUM ANGLE ADJUSTMENT SOLAR TRACKING

ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี

อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบเครื่องติดตามรังสีดวงอาทิตย์แบบปรับองศาได้ทั้งในแนว
อัลติจูดและอซิมูทเพื่อกำหนดองศาที่เหมาะสมในการติดตามดวงอาทิตย์ ซึ่งมีการออกแบบให้ติดตามดวงอาทิตย์
แบบกำหนดช่วงโดยใช้หลักการบังเงาของฉากกัน โดยมีโฟโต้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจจับรังสีตรงของ
ดวงอาทิตย์ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยใช้ความสูงของฉากกันเป็นตัวกำหนดองศาการติดตามโดยไม่มี
จำเป็นต้องใช้วงจรควบคุม ตำแหน่งของโฟโต้ทรานซิสเตอร์ถูกออกแบบให้ติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน
ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแผงโซลาร์เซลล์
จากการทดสอบการทำงานพบว่าการติดตามดวงอาทิตย์เป็นไปตามองศาที่ได้ออกแบบไว้ ในส่วนของ
การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังงานไฟฟ้าที่แผงโซลาร์เซลล์ได้รับพบว่าการติดตามดวงอาทิตย์ทุกๆ ช่วง 15 องศา ให้
กำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมากกว่าการติดตามทุกๆ ช่วงและเมื่อทำการเปรียบเทียบพลังงานที่ผลิตได้ระหว่างการติดตาม
ดวงอาทิตย์ทุกๆ 15 องศา กับการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์แบบอยู่กับที่พบว่า ที่แผงขนาด 5 Wp. ให้กำลังงานไฟฟ้า
เพิ่มขึ้น 20.35 % ที่แผงขนาด 30 Wp. ให้กำลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 23.24 % และที่แผงขนาด 50 Wp. ให้กำลังงาน
ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 18.38 %

คำสำคัญ : แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ แผงโซลาร์เซลล์ การติดตามดวงอาทิตย์

ABSTRACT

This article presents design and testing of adaptive sun tracking system with both attitude and azimuth lines. The proposed method aims at determining for optimum sun tracking degree that designed to track the sun as determined by the principle shade blocking of a screen. The developed prototype includes phototransistor to detect the direct beam radiation of the sun using partition height for determine the degree of monitoring without control circuit. Location of the photo transistors are designed to track the sun for two axes and the

microcontroller based DC motors controller is used to reposition the solar panel cells. The experimentation shown that, the proposed method can carry out the optimal solar panel tracking, in accordance with sun position. The electrical power of solar cells has been recorded for every 15 degrees of sun position and used to determine the average power over every track. The results shown that, the energy consumption is increased from fix panel. The experimentation with 5 Wp solar panel shown that the power can be increased up to 20.35%. For the 30 Wp solar panel, the power can be increased up to 23.24%. For the 50 Wp solar panel, the power can be increased up to 18.38%.

KEYWORDS : Sun tracking, Solar cell, Shade blocking

1. บทนำ

เทคนิคและวิธีการในการสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับอุปกรณ์รับพลังงานแสงอาทิตย์ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หากจำแนกตามวิธีการที่ใช้ในการติดตาม(P.Roth , A. Georgiev and H. Boudinov, 2004:393-402.) สามารถจำแนกการควบคุมออกได้ 3 แบบ คือ ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบพาสซีฟ (Passive controlled unit)(Soteris A. Kalogirou,1996:465-469) เป็นระบบที่ปราศจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อาศัยการเปลี่ยนแปลงสถานะของของเหลว มวลของของเหลวที่ถ่ายเทไปมาจะทำหน้าที่ยกแผงรับพลังงานให้เคลื่อนที่ไปเสมือนว่าเคลื่อนที่ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ ข้อดีของระบบติดตามดวงอาทิตย์ลักษณะนี้คือไม่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของแผงรับพลังงาน ข้อเสียคือระบบมีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ แบบที่สองระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุม (Microprocessor controlled unit) (ชนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี และเอกชัย ดีศิริ,2550:72-80) เป็นระบบที่มีการควบคุมตำแหน่งการติดตามด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ อาจะระบุตำแหน่งดวงอาทิตย์ด้วยการคำนวณจากสมการหรืออาจทำงานร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์ ข้อดีคือมีความแม่นยำค่อนข้างสูงแต่มีความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบค่อนข้างสูง และสุดท้ายเป็นระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงร่วมกับวงจรควบคุม (Electro-Optically controlled unit) (พัชรินทร์ มงคลวัฒนา กุล และเพ็ญพร ศิริลัทพร,2548:11-16) อาศัยอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยการตรวจจับรังสีตรงด้วยอุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มแสง ซึ่งสามารถประยุกต์เอาคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับรังสีตรงของดวงอาทิตย์ เช่น โฟโตไดโอด, โฟโตทรานซิสเตอร์หรือแอลดีอาร์เป็นต้น ส่วนสำคัญของเทคนิคการติดตามดวงอาทิตย์ในลักษณะนี้คือ ความแม่นยำในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง ระบบอาจไม่ทำงานเมื่อมีความเข้มของแสงน้อย เช่น เมื่อเกิดการบังเงาของเมฆ หรือในสภาพที่ท้องมืดครึ้ม อย่างไรก็ตามไม่จำเป็นต้องติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา การติดตามในลักษณะเป็นช่วงอาจได้ประโยชน์มากกว่าในแง่ของการประหยัดพลังงาน งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการสร้างระบบตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยการตรวจจับรังสีตรงด้วยหลักการวงจรดิจิตอล(อนุชา ดีผาง และคณะ, 2548:101-103) อีกทั้งยังได้นำเทคโนโลยีของไมโครคอนโทรลเลอร์ มาใช้งานเพื่อลดการสูญเสียพลังงานของวงจรติดตามดวงอาทิตย์ใช้และทำให้ได้พลังงานมากกว่าระบบติดตามแบบเก่าที่ติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา

2. การออกแบบ

ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นอาศัยหลักการบังเงาในการตามรังสีตรงของดวงอาทิตย์ โดยมอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่ขับเคลื่อนชุดติดตามอุปกรณ์ตรวจจับรังสีตรงของดวงอาทิตย์สร้างจากโฟโตทรานซิสเตอร์ให้หันหน้าและตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ในส่วนของการออกแบบจะแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของโครงสร้างทางกลของระบบติดตามดวงอาทิตย์ ส่วนของวงจรตรวจจับรังสีตรงของดวงอาทิตย์และส่วนของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

2.1 โครงสร้างทางกลของเครื่องติดตามดวงอาทิตย์

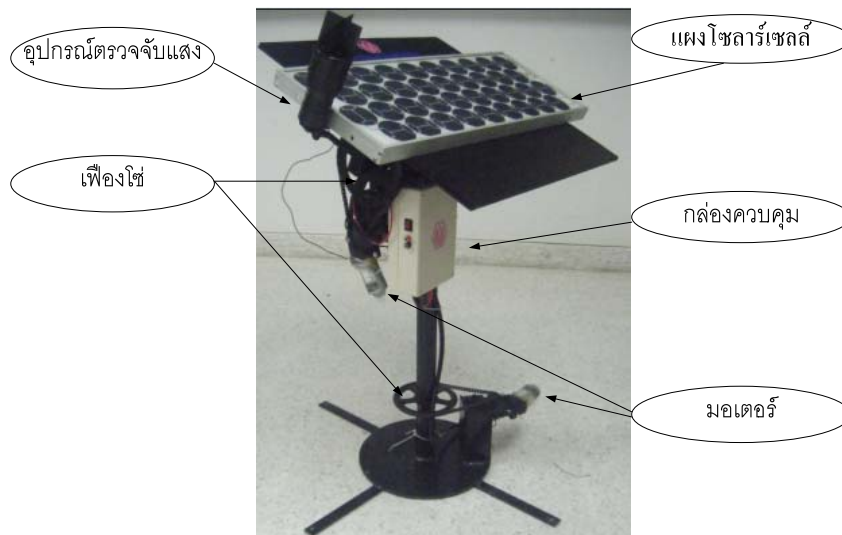
โครงสร้างทางกลของเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ หมายถึง อุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบของเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ประกอบไปด้วยส่วนเคลื่อนที่แนวอัลติจูดและแนวอะซิมูท มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 ส่วนเคลื่อนที่ตามแนวอัลติจูด

ประกอบไปด้วยโลหะรูปตัว T ซึ่งประยุกต์จากข้อต่อโลหะสามทางและชุดเฟืองโซ่พร้อมแกนหมุน โดยมีเหล็กพับจากสำหรับติดตั้งตัวเซ็นเซอร์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนโดยใส่ที่แกนหมุนและเพลลาของมอเตอร์ดังภาพที่ 1

2.1.2 ส่วนเคลื่อนที่ตามแนวอะซิมูท

ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนเฟืองโซ่ใส่ที่แกนหมุนและเพลลาของมอเตอร์ดังภาพที่ 2



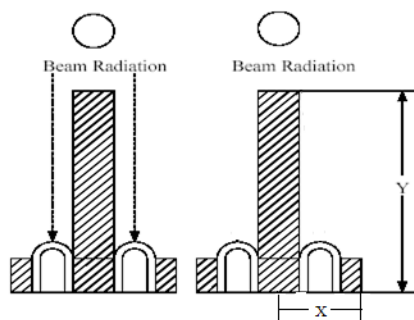
ภาพที่ 1 โครงสร้างทางกลรวมเมื่อติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

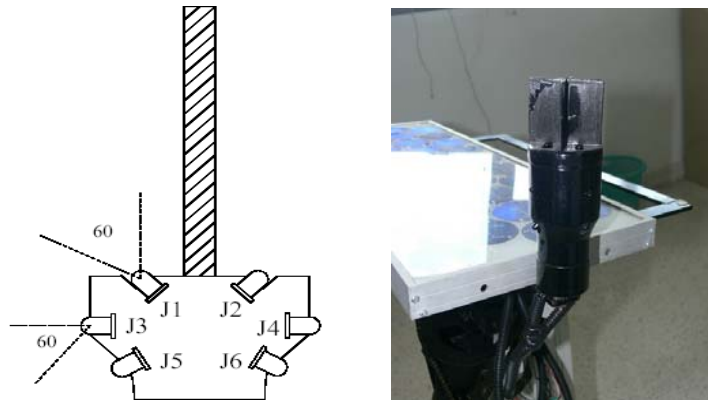


ภาพที่ 2 ชุดขับเคลื่อนติดตามดวงอาทิตย์

2.2 อุปกรณ์ตรวจจับรังสีตรงดวงอาทิตย์

งานวิจัยนี้เลือกใช้โฟโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์ โดยอาศัยการตรวจจับรังสีตรงของดวงอาทิตย์เป็นตัวบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์ สำหรับการตรวจจับรังสีตรงของดวงอาทิตย์แนวอัลติจูด การตรวจจับตำแหน่งของดวงอาทิตย์อาศัยการบังเงาของฉากกั้นดังภาพที่ 1 โดยมีหลักการคือเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งที่รังสีตรงขนานกับฉากกั้นโฟโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะได้รับแสงและอยู่ในสถานะ “ON” ทั้งคู่ และเมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมฉากกั้นจะบังลำแสงทำให้เกิดเงาทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์ที่ถูกบังจะอยู่ในสถานะ “OFF” คือไม่นำกระแสหรือนำกระแสน้อยมาก กำหนดสถานะที่โฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับแสงซึ่งอยู่ในสถานะ “ON” ให้มีสถานะลอจิกเป็น “1” และ กำหนดสถานะที่โฟโตทรานซิสเตอร์ไม่ได้รับแสงซึ่งอยู่ในสถานะ “OFF” ให้มีสถานะลอจิกเป็น “0” โฟโตทรานซิสเตอร์ ที่ใช้มีมุมรับแสงประมาณ 60 องศา ดังนั้น เพื่อให้การตรวจหาตำแหน่งดวงอาทิตย์ครอบคลุมตลอดแนวอัลติจูด จึงทำการออกแบบให้มีโฟโตทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 6 ตัว คือ J1,J2,J3,J4,J5 และ J6 ติดตั้งตามภาพที่ 3 ซึ่งการจัดวางโฟโตทรานซิสเตอร์ในลักษณะดังกล่าว จะทำให้ระบบสามารถติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้ทันทีไม่ว่าจะเริ่มต้นการใช้งานที่เวลาใดก็ตาม





ภาพที่ 3 การบังเงาของฉากกั้นมุมรับแสงและตำแหน่งหมายเลขของโฟโต้ทรานซิสเตอร์

ในส่วนของการกำหนดองศาการติดตามคำนวณได้จากสมการ (1) และแสดงตำแหน่งของการรับแสงของอุปกรณ์ตรวจรับแสงตามภาพที่ 3 โดยมีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อ J1 กับ J2 เป็น 0 คือไม่ได้รับแสงเอาท์พุทที่ได้ Q1 กับ Q2 จะเท่ากับ 0 ทั้งหมดและเมื่อ J1 กับ J3 ได้รับแสงพร้อมกันคือเป็น 1 เอาท์พุทที่ได้ Q1 จะเท่ากับ 1 เช่นเดียวกับ J2 กับ J4 ได้รับแสงพร้อมกันคือเป็น 1 เอาท์พุทที่ได้ Q2 จะเท่ากับ 1 คือโฟโต้ต้องทำงานกันเป็นคู่ๆ เช่น J1 กับ J3 และ J2 กับ J4 เพราะอยู่ฝั่งเดียวกัน ส่วน J5 กับ J6 นั้นเป็นตัวชานของ J1 กับ J2 คือ J1 กับ J5 และ J2 กับ J6 เพื่อจะได้มองเห็นทั้ง 180 องศา

สำหรับแนวอะซิมุทสามารถใช้หลักการเดียวกันในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรับรังสีโดยมีโฟโต้ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 6 ตัวคือ K1, K2, K3, K4, K5 และ K6 ซึ่งจัดวางตำแหน่งในลักษณะเดียวกันกับอุปกรณ์ตรวจรับรังสีตรงดวงอาทิตย์แนวอัลติจูดและสามารถรวมการตรวจรับรังสีตรงทั้งสองแนวไว้ที่อุปกรณ์ตรวจรับรังสีอื่นเดียวกัน

ความสูงของฉากกั้น (Y) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Y = \frac{X}{\tan \theta} \quad (1)$$

เมื่อ X คือ ระยะจากฉากกั้นจนถึงขอบของโฟโต้ทรานซิสเตอร์

θ คือ มุมที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่จากแนวเดิมที่ทำให้เกิดเงา

ใช้หลักการวงจรถติศาสตร์สร้างตารางความจริงได้และพีชคณิตบูลีนสามารถเขียนสมการบูลีนได้ตามสมการ (2) และ (3) และจากสมการสามารถสร้างวงจรถลอจิกเกตได้และนำไปเขียนโปรแกรมควบคุม โดยที่ Q1 และ Q2 คือเอาท์พุทของวงจรถตรวจรับรังสีตรง ซึ่งจะเป็นสัญญาณขับมอเตอร์แนวอัลติจูด

$$Q_1 = J_1 \bar{J}_2 + \bar{J}_2 \bar{J}_3 J_4 \quad (2)$$

$$Q_2 = \bar{J}_1 J_2 + \bar{J}_1 \bar{J}_4 J_3 \quad (3)$$

จากการวางตำแหน่งของโฟโตทรานซิสเตอร์สามารถกำหนดเงื่อนไขการทำงานและนำไปเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน

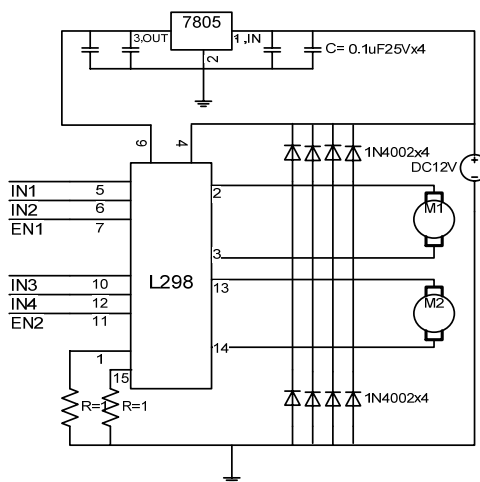
2.3 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3.1 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

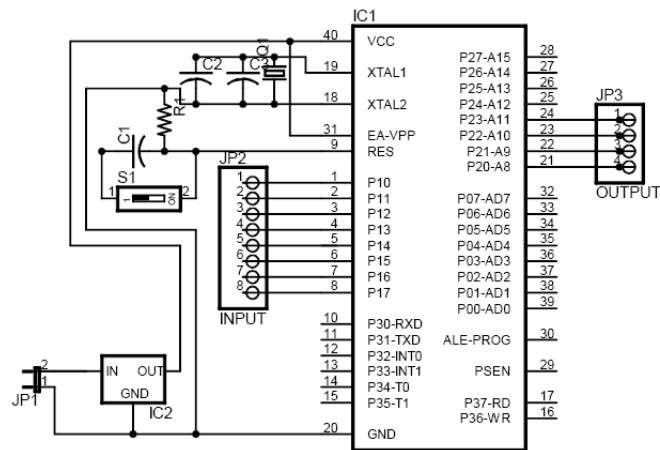
ซึ่งออกแบบให้สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ 2 ตัว คือขับเคลื่อนมอเตอร์แนวซิมูร์และอัลติจูด โดยมีหลักการการทำงานคือ เมื่อทำการจ่ายไฟ 12 โวลต์ และ 5 โวลต์ ให้กับวงจรโดยไอซี L298 จะทำหน้าที่ขยายกระแสซึ่งมีไดโอด 1N4002 ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายให้กับวงจร โดยรับสัญญาณอินพุตจากไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาที่ขา 5, 7, 10 และ 12 ส่วนขา EN1 และ EN2 จะเป็นขาจุดชนวนให้กับไอซี L298 ซึ่งจะต้องได้รับลอจิก 1 เสมอวงจรจึงจะทำงานจากนั้นจะส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปขับเคลื่อนมอเตอร์ผ่านทางขา 21 ถึง 24 ซึ่งแสดงตามภาพที่ 4

2.3.2 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51

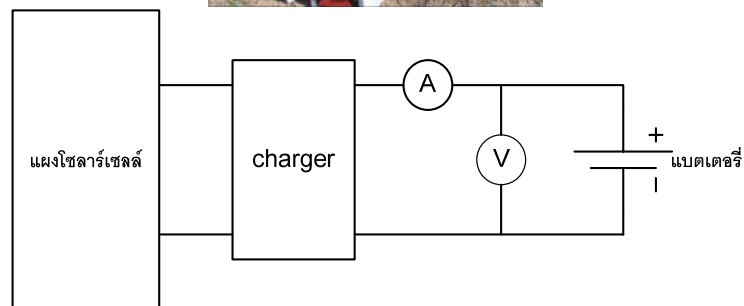
ตามภาพที่ 5 ในการใช้งานนั้นจะต้องจ่ายไฟเลี้ยง 5 โวลต์ ให้กับวงจรโดยจ่ายเข้าที่ขา 40 และต่อกราวด์ที่ขา 20 ของไอซี จากวงจรจะเห็นว่าขา 1 ถึง 8 จะทำหน้าที่เป็นอินพุตรับสัญญาณมาจากอุปกรณ์ตรวจจับแสงและขา 21 ถึง 24 จะทำหน้าที่เป็นเอาต์พุตซึ่งจะส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อให้ทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ทั้งในแนวซิมูร์และแนวอัลติจูด



ภาพที่ 4 แสดงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ของเครื่องติดตามดวงอาทิตย์



ภาพที่ 5 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51



ภาพที่ 6 การทดสอบรับพลังงานแสงอาทิตย์ของเครื่องติดตามดวงอาทิตย์

3. การทดสอบระบบติดตามดวงอาทิตย์

การทดสอบการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ได้ออกแบบไว้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

3.1 ส่วนที่ 1 การทดสอบรับพลังงานแสงอาทิตย์ของแผง โซลาร์เซลล์แบบติดตั้งอยู่กับที่ทำมุม 180 องศา กับพื้นดินในสภาวะที่มีโหลด

3.2 ส่วนที่ 2 การทดสอบรับพลังงานแสงอาทิตย์มีการติดตามดวงอาทิตย์ทุกๆ 15, 30 และ 45 องศา ในทุกขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ตามลำดับที่สถานะที่มีโหลด

3.3 ส่วนที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

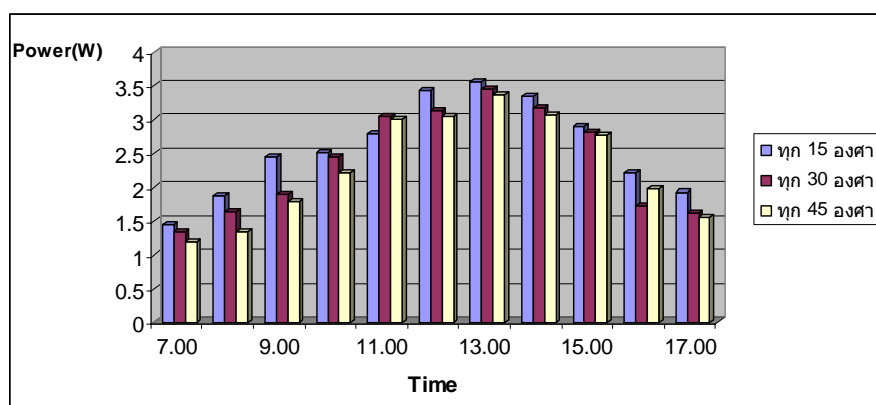
- (1) แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 5Wp., 30Wp. และ 50 Wp. ยี่ห้อ SOLATRON
- (2) โวลต์มิเตอร์ 1 เครื่อง ยี่ห้อ FLUKE รุ่น FLUKE 19
- (3) แอมป์มิเตอร์ 1 เครื่อง ยี่ห้อ FLUKE รุ่น FLUKE 19
- (4) แบตเตอรี่ 12 V. ขนาด 35 Ah. จำนวน 1 ลูก ยี่ห้อ 3K

3.4 ส่วนที่ 4 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อรับพลังงาน โดยติดตั้งระบบตามภาพที่ 6 ทำการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงโซลาร์เซลล์โดยทำการบันทึกผลทุกๆ 1 ชั่วโมง เริ่มตั้งแต่วันที่ 07.00 น. จนถึง 17.00 น. กับแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 5 Wp. ,30Wp.และ 50 Wp. ตามลำดับและทำการทดลองซ้ำในแต่ละขนาดแต่เปลี่ยนอุปกรณ์ตรวจจับแสงจาก 15 องศา เป็น 30, 45 องศาตามลำดับ

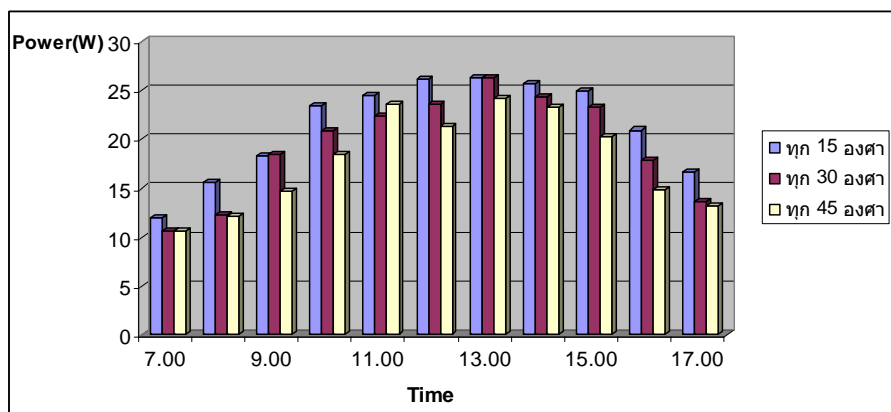
4. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในทุกๆ ชั่วโมงนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าที่แผงได้รับจากนั้นนำมาวิเคราะห์และนำเสนอเป็น 2 ส่วน คือ เปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าที่ได้รับระหว่างที่แผงโซลาร์เซลล์มีการเคลื่อนที่ในแต่ละองศาในทุกขนาดแผง และเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับระหว่างที่แผงโซลาร์เซลล์มีการเคลื่อนที่ทุก 15 องศา กับขณะที่แผงอยู่กับที่ไม่มีการเคลื่อนที่ว่าระบบที่สร้างขึ้นมีข้อดีกว่าอย่างไร

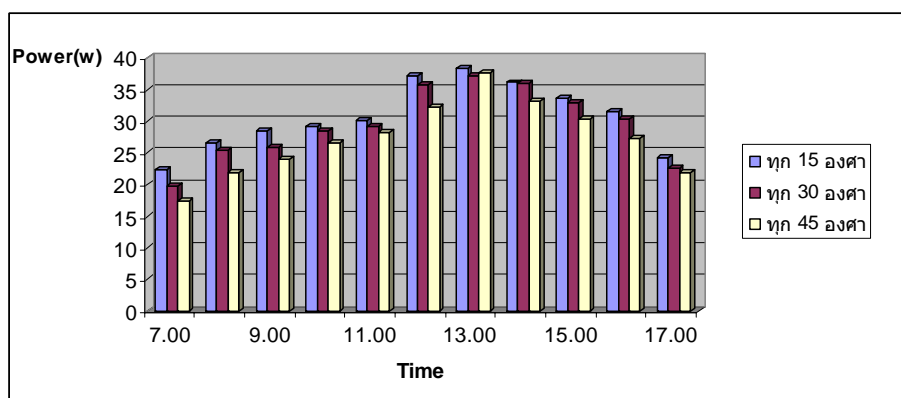
4.1 จากการเก็บข้อมูลการรับพลังงานนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับระหว่างที่แผงโซลาร์เซลล์มีการเคลื่อนที่ในแต่ละองศาและแต่ละขนาดแผงได้ผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับขนาดแผงโซลาร์เซลล์ 5 Wp.



ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับขนาดแผงโซลาร์เซลล์ 30 Wp.



ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับขนาดแผงโซลาร์เซลล์ 50 Wp.

4.2 การเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับระหว่างที่แผงโซลาร์เซลล์มีการเคลื่อนที่ทุก 15 องศา กับขณะที่แผงอยู่กับที่ ได้ผลดังต่อไปนี้

ขนาดแผง โซลาร์ เซลล์(Wp)	กำลังงานที่ได้รับโดยเฉลี่ย (W)		กำลังงานที่ได้รับ เพิ่มขึ้น (%)
	เคลื่อนที่ทุกๆ 15 องศา	ติดตั้งอยู่กับที่	
5 Wp	2.584	2.147	16.912
30 Wp	21.307	17.289	18.857
50 Wp	30.735	25.963	15.526

หมายเหตุ: ทำการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงโซลาร์เซลล์โดยทำการบันทึกผลทุกๆ 1 ชั่วโมง เริ่มตั้งแต่วันที่ 07.00 น. จนถึง 17.00 น. กับแผงขนาด 5 Wp., 30Wp. และ 50 Wp. นำค่าที่ได้มาคำนวณกำลังไฟฟ้าและหาค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมงที่ได้รับ

5. สรุป

งานวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพแผงรับรังสีแสงอาทิตย์โดยการติดตามตำแหน่ง ดวงอาทิตย์เชิงดิจิทัลซึ่งประกอบไปด้วยชุดตรวจสอบและติดตามดวงอาทิตย์ และทำการทดสอบการทำงานซึ่งผลที่ได้จากทดสอบพบว่าการติดตามดวงอาทิตย์ทุกๆ 15 องศา จะทำให้โซลาร์เซลล์สามารถรับพลังงาน ได้มากกว่าการติดตามดวงอาทิตย์ทุกๆ 30 และทุกๆ 45 องศา เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าระหว่างการติดตามดวงอาทิตย์ทุกๆ 15 องศา กับ การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์แบบอยู่กับที่พบว่าแผงขนาด 5 Wp. ให้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 16.91 เปอร์เซ็นต์ แผงขนาด 30 Wp. ให้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 18.86 เปอร์เซ็นต์ และแผงขนาด 50 Wp. ให้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 15.53 เปอร์เซ็นต์ ข้อเสนอแนะคือในอนาคตควรเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากการกำหนดองศาการติดตามที่ละเอียดขึ้น จากเดิมเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนกว่านี้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณทั้งหมดและขอขอบคุณ รศ.นรินทร์ วัฒนกุล ผู้ทรงคุณวุฒิที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัย ตลอดจนการดำเนินงานและการเขียนบทความนี้

7. รายการอ้างอิง

- ชนภัทร พรหมวัฒนภักดี และ เอกชัย ดีศิริ. 2550. “ระบบติดตามดวงอาทิตย์จากอุปกรณ์ตรวจจับเชิงดิจิทัลด้วยซีพีแอลดี.” *วารสารศรีปทุมปริทัศน์*. 7, 1 (มกราคม – มิถุนายน): 72 – 80.
- พัชรินทร์ มงคลวัฒนากุล และเพ็ญพร ศิริลัทพร. 2548. “ การเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เครื่องควบคุมทิศทางของแผงแบบตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์และตรวจจับความเข้มข้นของแสง.” *โครงการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*. 11-16.
- ภาณุวัฒน์ เนือยทอง และคณะ. 2548. “ การควบคุมทิศทางของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยการระบุตำแหน่งดวงอาทิตย์และการตรวจวัดความเข้มแสงอาทิตย์.” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลประเทศไทย ครั้งที่ 19*. 56-61.
- อนุชา ดีผาง และคณะ. 2548. “ระบบติดตามดวงอาทิตย์ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์เชิงดิจิทัล.” *การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1*. 101-103.
- P.Roth , A. Georgiev and H. Boudinov. 2004. “Design and construction of a system for sun-tracking.” *Renewable Energy Handbook*. 29. 393-402.
- Soteris A. Kalogirou. 1996. “Design and Construction of A One-Axis Sun-Tracking.” *Solar Energy Technology*. 465-469.

การศึกษาการกระจายความร้อนของการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยไมโครเวฟ
โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A STUDY OF HEAT DISTRIBUTION FOR MICROWAVE ABLATION
USING FINITE ELEMENT

เพชร นันทิวัฒนา

อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: petch.na@spu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการกระจายความร้อนของการทำลายเซลล์มะเร็งด้วยไมโครเวฟโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ความถี่ 2.45 GHz ผ่านสายอากาศที่นำมาทดลอง 4 แบบ ประกอบด้วย สายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ และสายอากาศแบบเปิดช่อง การศึกษาผลของการกระจายความร้อนเนื่องจากการปรับกำลังส่งที่ 50W, 100W และ 150W ที่เวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที จากการทดลองพบว่าหากมีการเพิ่มกำลังส่งหรือเพิ่มระยะเวลาจะทำให้เพิ่มปริมาตรในการทำลายเซลล์ โดยสายอากาศแบบปลายเปิดสามารถทำลายเซลล์ได้ปริมาตรสูงสุด แต่มีการกระจายความร้อนกลับมากที่ด้ามจับสูงสุด สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะและสายอากาศแบบปลายเป็นฉนวนมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบเปิดช่องมีการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอและมีรูปร่างการทำลายเซลล์ที่สมมาตร แต่ให้ปริมาตรในการทำลายเซลล์ต่ำที่สุด

คำสำคัญ : การทำลายเซลล์ ไมโครเวฟ ไฟไนต์เอลิเมนต์ การกระจายอุณหภูมิ

ABSTRACT

This research presents three-dimensional finite element analyses of microwave ablation at frequency of 2.45 GHz. We studied the characteristics of various antennas for microwave ablation. Four configurations of antennas were considered: open-tip, dielectric-tip, metal-tip and slot. We analyzed the temperature distributions power at 50w, 100w and 150w and time at 30s, 60s, 90s, 120s, 150s and 180s. From the simulation results, the open-tip antenna had a largest volume but causes backward heating problem at higher power levels or during extended ablations. The metal-tip antenna and dielectric-tip antenna had similar the open-tip antenna. The slot antenna had uniform temperature distributions and symmetry shape but it had a smallest volume.

KEYWORDS : Ablation, Microwave, Finite element, Temperature distribution

1. บทนำ

ในปัจจุบันอัตราของผู้ป่วยมะเร็งตับที่เกิดขึ้นมีจำนวนมาก วิธีการรักษามะเร็งสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น Alcohol Ablation เป็นการฉีดแอลกอฮอล์ ร่วมกับความร้อนเข้าไปทำลายเซลล์มะเร็ง ซึ่งจะทำให้แอลกอฮอล์รวมกับเลือดเกิดเป็นลิ่มเลือด ส่งผลให้แพทย์ไม่สามารถทราบตำแหน่งเซลล์มะเร็งที่แน่นอนขณะทำการรักษา Chemoemtherapy เป็นเพียงการยับยั้งเซลล์มะเร็งเท่านั้น ไม่สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้ LiTT (Laser-Induced Thermotherapy) วิธีการนี้แพทย์ต้องมีความเชี่ยวชาญเป็นอย่างยิ่ง และใช้ต้นทุนในการรักษาสูง Cryo Surgery เป็นการใช้ความเย็นในการรักษา และต้องมีการผ่าตัดร่วมด้วย ทำให้เกิดอัตราการติดเชื้อสูง RFA (Radio Frequency Ablation) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง โดยเรียกวิธีนี้ว่า HiTT (High Frequency Induced Thermotherapy) ซึ่งเป็นการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับทำให้เกิดความถี่สูงถึง 375 – 500 kHz และให้กำลังสูงสุด 60 วัตต์ โดยการรักษากระทำผ่านทางผิวหนังและใช้เข็มเป็นตัวเจาะเข้าไปยังเซลล์มะเร็ง ส่วนปลายเข็มจะเกิดความร้อน (D. Haemmerich et al., 2001) โดยจะมีน้ำเกลือเป็นตัวนำความร้อนจากปลายเข็มแผ่กระจายทำลายมะเร็งได้ดีขึ้น ส่วนพลังงานที่ใช้จะต้องขึ้นกับขนาดมะเร็งและคุณสมบัติของแพทย์ผู้ทำการรักษา สามารถรักษามะเร็งได้ในระยะที่ 1 จนถึงระยะที่ 3 ซึ่งถือได้ว่าเป็นระยะที่ค่อนข้างรุนแรงแล้ว การกระทำดังกล่าวจะต้องทำภายใต้เครื่องอัลตราซาวด์เพื่อจะดูตำแหน่งของเซลล์มะเร็งตลอดเวลาที่ทำการรักษา การใช้คลื่นความถี่วิทยุถึงแม้ดูเหมือนจะประสบความสำเร็จในการรักษา แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านของขนาดเซลล์มะเร็งที่จะถูกทำลาย คือก้อนมะเร็งที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถรักษาด้วยวิธีนี้ได้ เนื่องจากเมื่อเนื้อเยื่อตับมีอุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส จะทำให้ตับมีความต้านทานสูงมาก จนสนามไฟฟ้าไม่สามารถแพร่ออกไปในเนื้อเยื่อได้ ขนาดของเซลล์มะเร็งที่ถูกทำลายจึงมีขนาดค่อนข้างเล็ก และไม่สามารถกำหนดรูปแบบการกระจายความร้อนในก้อนมะเร็งที่จะทำลายได้ ไมโครเวฟ เป็นการแผ่รังสีความร้อน ในปัจจุบันยังไม่เป็นที่พอใจเท่าไรนักเพราะการทำลายเซลล์มะเร็งไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร การทำลายเซลล์มะเร็งด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นทำได้โดยการส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสายอากาศที่เสียบอยู่ในเซลล์เนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็ง ซึ่งเมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านสายอากาศ ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการกระจายออกไปยังเนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็ง ก็ทำให้เนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็งมีการดูดซับพลังงาน ซึ่งทำให้เกิดความร้อนในเนื้อเยื่อมะเร็งอย่างรวดเร็ว เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อที่เป็นมะเร็งสูง 50 องศาเซลเซียสก็จะทำให้เนื้อเยื่อมะเร็งนั้นตายหรือฝ่อ (A.S. Wright et al., 2003)

ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทางการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุและคลื่นความถี่ไมโครเวฟประกอบด้วย งานวิจัยด้านสายอากาศหรือโพรบที่มีการออกแบบทดลองใช้มีลักษณะหลายรูปแบบเช่น สายอากาศแบบโมโนโพล สายอากาศแบบไดโพล สายอากาศแบบเปิดช่อง (Labonte et al., 1996) ได้พิจารณาถึงลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแบบโมโนโพลหลายๆ รูปแบบเพื่อส่งคลื่นไมโครเวฟเข้าไปทำลายเนื้อหัวใจ สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะจะใช้ได้ดีที่สุด (L. Hamada al., 2000) ได้ทดลองสายอากาศแบบไดโพลที่มีความถี่ 915 MHz โดยมีความลึกของการสอดแทรกสายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อจำลองที่แตกต่างกัน สายอากาศที่นำมาทดลองเป็นสายอากาศแบบไดโพลอย่างง่าย (Conventional Antenna) และสายอากาศแบบไดโพลประยุกต์ (New Dipole Antenna) สายอากาศแบบ Cap-Choke (Jame C. Lin et al., 1996) เป็นสายอากาศที่มีการนำมาจำลองทั้งที่ความถี่ 2.45 GHz และ 915 MHz (S. Pisa et al., 2001) สายอากาศแบบ Cap-Choke ทำให้เกิดการกระจายของความร้อนในเนื้อเยื่อได้ โดยไม่มีการสะท้อนกลับของกระแสในสายส่ง นอกจากนี้ผลของความร้อนก็ไม่ขึ้นกับ

ความลึกที่สอดใส่สายอากาศลงไปในเนื้อเยื่อ สามารถควบคุมตำแหน่งความร้อนซึ่งมันจะเกิดรอบๆ บริเวณปลายของสายอากาศ นอกจากนี้ยังมีผลการทดลองวางสายอากาศแบบคู่ซึ่งทำให้ขนาดของเซลล์มะเร็งที่ทำลายได้มีขนาดใหญ่ขึ้น

งานวิจัยทางด้านของการทดลองจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เช่น การใช้วิธี Finite-Difference Time-Domain (FDTD), Antenna-Direction-Implicit Finite Difference (ADI-FC) สำหรับการแก้สมการความร้อน (S. Pisa et al., 2003) (Hurter et al., 1991) ได้ทำการออกแบบ และจำลองด้วยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์กับสายอากาศแบบไดโพล โดยในการจำลองได้ปรับเปลี่ยนความลึกที่สอดใส่สายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อซึ่งผลปรากฏว่าความลึกในการสอดใส่สายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อ มีผลต่อรูปแบบของแผลหรือการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น นอกจากนี้เขายังบอกว่าสายอากาศจะมีการถ่ายทอดพลังงานสูงสุดเมื่อสายอากาศมีความยาว L ดังนี้ $L = \lambda_{eff} / 2$ (G. Schaller et al., 1996) ได้พิจารณาสายอากาศแบบ Triaxial choke dipole ซึ่งสายอากาศแบบนี้สามารถทำให้เกิดการดูดซับความร้อน (SAR) ได้สูงกว่าสายอากาศแบบไดโพล และสายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot Antenna) SAR จะเกิดขึ้นสูงสุดที่ส่วนเปิดช่องของสายอากาศ และความยาวของ Choke มีค่า $\lambda_{eff} / 4$ ความยาวของ Choke จะช่วยลดผลที่เกี่ยวกับความลึกที่สอดใส่สายอากาศเข้าไปในเนื้อเยื่อและความลึกในการกระจายค่า SAR (Saito et al., 2001) ได้ทำการทดลองใช้สายอากาศแบบ Coaxial-Fed Slot สองอันมาทำการจำลองการทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธี Tip-Split ทำให้ขนาดเซลล์ที่ถูกทำลายมีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะขนาดของเซลล์ที่ถูกทำลายเกิดจากกระแสที่ไหลจากสายอากาศทั้งสองอัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติมาศึกษาแบบการกระจายความร้อนที่จะเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อตับที่เป็นมะเร็งเมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ผ่านสายอากาศแต่ละแบบ

2. สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปทั่วไปแล้วจะเป็นคลื่นซึ่งเป็นสัญญาณที่มีฮาร์โมนิก (Time – Harmonic Field) หรืออีกนัยหนึ่งคือ เป็นสัญญาณที่มีคาบการแกว่งที่แน่นอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะแทนด้วยผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ที่สามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ได้ดังสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega\vec{E} + \vec{C} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (2.4)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.5)$$

เมื่อ

\vec{E}	=	สนามไฟฟ้า
\vec{D}	=	ฟลักซ์ของสนามไฟฟ้า
\vec{H}	=	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
ρ	=	ความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร

\bar{B}	=	สนามแม่เหล็ก
\mathcal{E}	=	ค่าความยินยอมทางไฟฟ้า
μ	=	ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

3. สมการความร้อนในทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation)

ในการวิเคราะห์ด้วยความถี่ไมโครเวฟได้พิจารณาถึงสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ การดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ ซึ่งมีรูปแบบของสมการ หรือตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการกระจายความร้อน (M.G. Skinner et al., 1998), (H.H. Pennes, 1948) ดังสมการที่ (3.1)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \cdot \nabla T) - h_b c_b \omega_b (T_b - T) + Q_m + Q_{ext} \quad (3.1)$$

เมื่อ	ρ	=	ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเยื่อ (kg/m ³)
	c	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ (J/kg.K)
	k	=	ค่าความนำความร้อนของเนื้อเยื่อ (W/m.K)
	h_b	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ
	c_b	=	ค่าความร้อนจำเพาะของเลือด (J/kg.K)
	ω_b	=	อัตราไหลเลือด (1/s)
	T_b	=	ค่าอุณหภูมิเลือด (37 °C)
	Q_m	=	ค่าความร้อนจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (W/m ³)
	Q_{ext}	=	ค่าความร้อนจากภายนอก (W/m ³)

จากสมการ Bioheat (3.1) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ละทิ้งค่าตัวแปรจำนวน 2 ตัว คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ (h_b) และพลังงานที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด (Q_m) ซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ จะถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณ Q_{ext}

4. สมการการดูดซับความร้อน

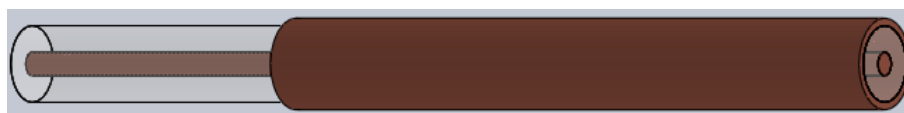
พิจารณาจาก สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่มีการแพร่กระจายลงเนื้อเยื่อ จะเกิดการสูญเสียพลังงานในเนื้อเยื่อ (K. Saito et al., 2000) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.1)

$$SAR = \frac{1}{\rho} Q_{ext} = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (4.1)$$

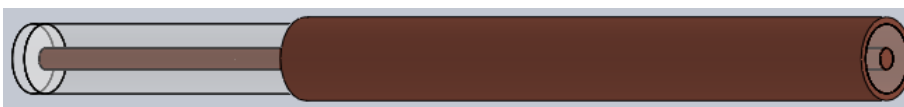
เมื่อ	SAR	=	Specific absorption rate (W/kg)
	σ	=	สภาพความนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ (S/m)

5. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

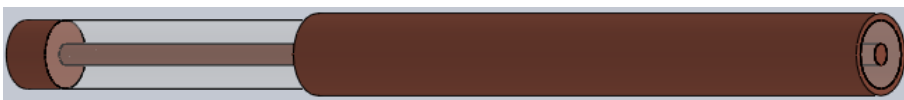
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ จะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ปัญหานั้นจะต้องประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ การหาค่าผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลยได้ จึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้ (Finite) ทำการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างๆ กัน จะเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ ทำการสร้างสมการให้แต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ จากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน รวมเป็นระบบสมการชุดใหญ่ จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ที่ให้มาลงในสมการชุดใหญ่ แล้วจึงทำการแก้สมการและได้ผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น



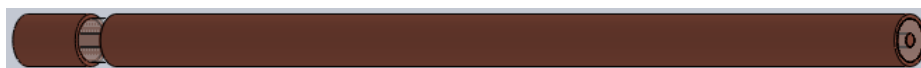
ภาพที่ 1 สายอากาศแบบปลายเปิด (Open tip: OT)



ภาพที่ 2 สายอากาศแบบมีปลายฉนวน (Dielectric tip: DT)



ภาพที่ 3 สายอากาศที่มีปลายเป็นโลหะ (Metal tip: MT)



ภาพที่ 4 สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot)

ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้วิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 1 สายอากาศแบบปลายเปิด (Open Tip) ซึ่งส่วนปลายของตัวนำจะสัมผัสกับเนื้อเยื่อโดยตรง ภาพที่ 2 สายอากาศแบบมีปลายฉนวน (Dielectric Tip) ที่ปลายของสายอากาศจะถูกปิดอย่างสมบูรณ์ด้วยฉนวน ภาพที่ 3 สายอากาศที่มีปลายเป็นโลหะ (Metal Tip) และภาพที่ 4 สายอากาศแบบเปิดช่อง (Slot) ซึ่งจะทำให้การเปิดช่องรอบตัวนำออกของสายอากาศ ในตารางที่ 1 แสดงขนาดทางมิติของสายอากาศ

ตารางที่ 1 แสดงขนาดทางมิติของสายอากาศ

พารามิเตอร์	มิติของสายอากาศ (มิลลิเมตร)			
	สายอากาศ OT	สายอากาศ DT	สายอากาศ MT	สายอากาศ Slot
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำใน	0.912	0.912	0.912	0.912
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำนอก	3.581	3.581	3.581	3.581
เส้นผ่านศูนย์กลางไดอิเล็กทริก	2.985	2.985	2.985	2.985
ความยาวสล้อต	-	-	-	2
ความยาวของปลายเปิด	13	13	13	-
ความยาวของปลายฉนวน	-	0.6	-	-
ความยาวของปลายเป็นโลหะ	-	-	2	-
ความยาวของสายอากาศ	42	42.6	44	70

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยจำลองการทำงานด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics Version 3.4 บนระบบปฏิบัติการ 64 บิต Intel® Core™ 2 Duo RAM DDR2 4 GB และ HDD 200 GB โดยการจำลองการทำงานประกอบด้วย โมดูล 2 โมดูล ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน คือ RF Module, Heat Transfer (Bioheat Equation) ในการคำนวณผลลัพธ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย ชุดสายอากาศ และเนื้อเยื่อ โดยสายอากาศจะแทงอยู่กึ่งกลางของเนื้อเยื่อรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร และความสูง 8 เซนติเมตร ส่วนของสายอากาศจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นย่อยๆ ด้วยเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยม ขนาดของเอลิเมนต์สายอากาศที่ใช้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01-1.00 มิลลิเมตร ในส่วนของเอลิเมนต์ในเนื้อเยื่อจะมีการกระจายของขนาดเอลิเมนต์โดยบริเวณรอบๆ สายอากาศจะมีขนาดของเอลิเมนต์ที่เล็ก ส่วนบริเวณที่ห่างออกจากสายอากาศจะมีขนาดของเอลิเมนต์ที่ใหญ่ขึ้น เพื่อลดขนาดของหน่วยความจำของเครื่องในการจำลองการทำงาน ขนาดของเอลิเมนต์ของเนื้อเยื่อมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิเมตร รายละเอียดของพารามิเตอร์ของการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 2

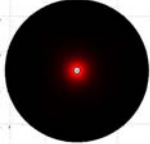
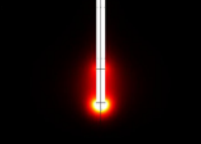
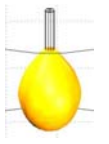

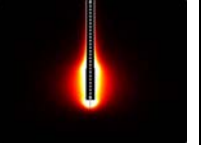


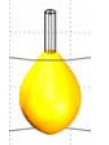
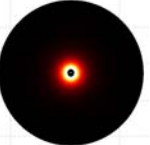


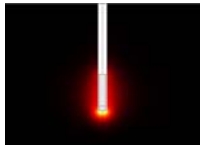

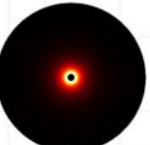






ตารางที่ 2 รายละเอียดของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อตับ

พารามิเตอร์	ค่า	พารามิเตอร์	ค่า
ρ_{liver} = Density of liver	1,050 [kg/m ³]	k = Thermal conductivity of liver	0.56 [S/m]
C_{liver} = Specific heat of liver	3,700 [J/ kg.K]	σ_{liver} = electrical conductivity of liver	1.69 [S/m]
ρ_{bl} = Density of blood	1,000 [kg/ m ³]	ϵ_{liver} = relative permittivity of liver	43.03
C_{bl} = Specific heat of blood	3,639 [J/ kg.K]	ϵ_{diel} = relative permittivity of dielectric	2.03
W_{bl} = Blood perfusion rate	3.6×10^{-3} [m ³ /kg.s]	ϵ_{insul} = relative permittivity of insulator	2.6

7. การทดลองและผลการทดลอง

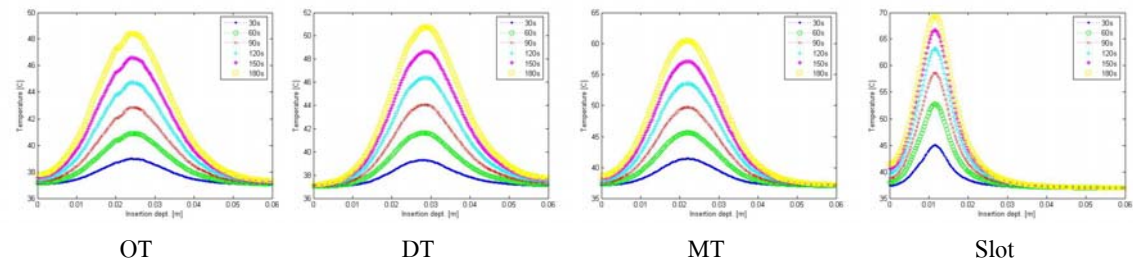
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณผลของการกระจายความร้อน และการกระจายค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบต่างๆ 4 แบบ ประกอบด้วย สายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบปลายเป็นฉนวน สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ และสายอากาศแบบเปิดช่อง โดยใช้วิธีการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics ที่ความถี่ 2.45 GHz ที่กำลังส่ง 50W, 100W และ 150W ที่เวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วินาที

ตารางที่ 3 ผลการกระจายความร้อนและค่า SAR ของสายอากาศที่ 50 W เวลา 60 วินาที

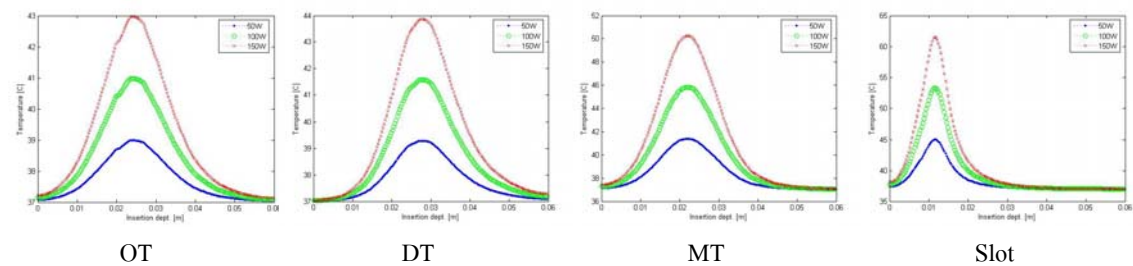
	Temperature			SAR	
	Top	Side	Volume	Top	Side
OT					
DT					
MT					
Slot					

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณของการทำลายเนื้อเยื่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส

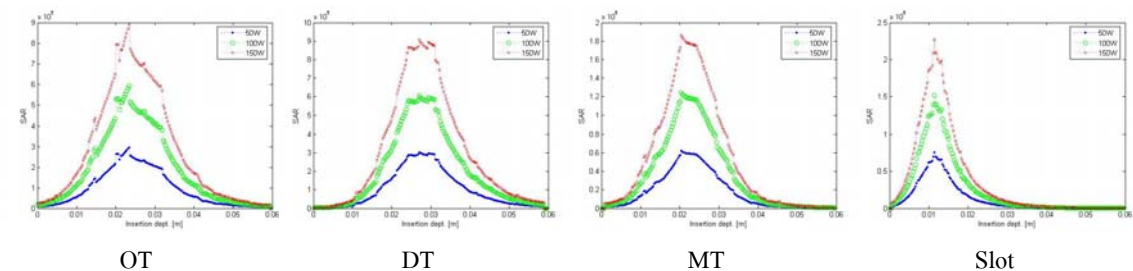
		ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)								ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)					
เวลา (วินาที)		30	60	90	120	150	180	เวลา (วินาที)		30	60	90	120	150	180
OT	50W	4.64	9.23	13.24	16.95	20.33	23.41	MT	50W	4.44	8.76	12.57	16.00	19.13	22.00
	100W	8.60	15.93	22.31	27.99	33.38	38.19		100W	8.55	15.75	21.87	27.49	32.34	36.90
	150W	11.99	21.52	29.60	36.98	43.50	49.89		150W	12.09	21.54	29.70	36.55	42.96	48.90
DT	50W	2.52	5.28	7.77	10.13	12.16	14.15	Slot	50W	0.67	1.48	2.23	2.96	3.65	4.26
	100W	5.29	10.19	14.49	18.35	21.87	25.23		100W	1.57	3.20	4.73	6.25	7.61	8.95
	150W	7.71	14.29	20.03	25.14	29.73	34.09		150W	2.35	4.72	6.92	9.06	11.15	13.08



ภาพที่ 5 ผลของการกระจายความร้อนของสายอากาศที่ 50W



ภาพที่ 6 ผลการของกระจายความร้อนของสายอากาศที่เวลา 30 วินาที



ภาพที่ 7 ค่า SAR ของสายอากาศ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5 จะเห็นว่าการกระจายความร้อนและค่า SAR มีการกระจายตัวอย่างสมมาตรรอบสายอากาศ และแพร่กระจายออกจากบริเวณปลายของสายอากาศที่ทำการเปิดคัตว้านอกออกของสายอากาศแต่ละแบบ และจากตารางที่ 6 แสดงปริมาณการทำลายเซลล์ของสายอากาศแต่ละแบบที่ระยะเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถทำงานเซลล์มะเร็งได้ ภาพที่ 7 แสดงของการกระจายความร้อน

ที่ 50 W ที่เวลาต่างๆ จะเห็นว่าหากทำการเพิ่มระยะเวลาจะสามารถเพิ่มความสามารถในการกระจายความร้อนได้ และในภาพที่ 6 แสดงของการกระจายความร้อนที่เวลา 30 วินาที ที่กำลังส่งต่างๆ จะเห็นว่าหากทำการเพิ่มกำลังส่ง ก็จะสามารเพิ่มความสามารถในการกระจายความร้อนได้เช่นเดียวกับการเพิ่มเวลา และภาพที่ 7 แสดงค่า SAR ของสายอากาศ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงไม่ขึ้นกับเวลาแต่ขึ้นกับกำลังส่งที่ป้อนให้สายอากาศ

8. สรุป

จากผลการทดลองจะเห็นว่าสายอากาศทุกแบบมีการกระจายความร้อนที่เพิ่มขึ้น หากมีการเพิ่มกำลังส่ง หรือเพิ่มเวลา เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าแพร่กระจายในเนื้อเยื่อเกิดการสูญเสียพลังงานในเนื้อเยื่อ เพราะเนื้อเยื่อมีการดูดซับพลังงาน ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปจะกลายเป็นความร้อน สำหรับค่า SAR ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า นั้น จะไม่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยสายอากาศแบบปลายเปิด เป็นสายอากาศที่มีการกระจายความร้อน ที่ตำแหน่งของ ปลายเปิด เริ่มจากปลายสุดของสายอากาศ และมีการเพิ่มการกระจายความร้อนอย่างต่อเนื่องหากให้เวลามากขึ้น หรือเพิ่มกำลังส่ง ทำให้ปริมาตรของการทำลายเซลล์สูงขึ้น โดยสายอากาศนี้จะให้ปริมาตรการทำลายเซลล์สูง ที่สุด เมื่อเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น แต่หากให้เวลาและกำลังงานที่มากจะทำให้เนื้อเยื่อบริเวณใกล้กับปลาย สายอากาศมีความร้อนสูง และมีการกระจายความร้อนกลับมาที่ด้ามจับสูงดังแสดงในผลการทดลอง สายอากาศ แบบปลายเป็นจนวน เป็นสายอากาศที่มีการกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งของปลายเปิด โดยเริ่มจากกลาง สายอากาศบริเวณรอยต่อระหว่างตัวนำนอกกับส่วนที่ปิดของสายอากาศ และมีการเพิ่มของการกระจายอุณหภูมิ อย่างต่อเนื่องหากมีการให้เวลามากขึ้น หรือเพิ่มกำลังส่ง และปริมาตรของการทำลายเซลล์สูงเป็นอันดับที่ 3 เทียบ กับสายอากาศชนิดอื่น มีการกระจายความร้อนกลับมาที่ด้ามจับสูงดังแสดงในผลการทดลอง แต่มีคุณสมบัติที่ ดีกว่าสายอากาศแบบปลายเปิด สายอากาศแบบปลายเป็นโลหะ เป็นสายอากาศที่มีการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่ง ของปลายเปิด โดยเริ่มจากปลายสุดของสายอากาศ เช่นเดียวกับสายอากาศแบบปลายเปิด และมีการเพิ่มของการ กระจายอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องหากมีการให้เวลามากขึ้น หรือเพิ่มกำลังส่ง ให้ปริมาตรของการทำลายเซลล์สูงเป็น อันดับที่ 2 เทียบกับสายอากาศชนิดอื่น หากให้เวลาและกำลังงานที่มากจะทำให้เนื้อเยื่อบริเวณใกล้กับปลาย สายอากาศมีความร้อนสูง และมีการกระจายความร้อนกลับมาที่ด้ามจับต่ำกว่าสายอากาศ 2 แบบแรก ดังแสดงใน ผลการทดลอง สายอากาศแบบเปิดช่อง เป็นสายอากาศที่มีการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งของช่องเปิด และมีการ เพิ่มของการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ และไม่เกิดปัญหาการกระจายความร้อนกลับมาที่ด้ามจับ มีรูปทรงที่ สม่ำเสมอกัน แต่จะมีขนาดของปริมาตรการทำลายเซลล์ที่ต่ำที่สุดเทียบกับสายอากาศชนิดอื่น ดังแสดงในผลการ ทดลอง ในการเลือกใช้งานการทำลายเซลล์จริงจะขึ้นอยู่กับ ขนาดและรูปทรงของมะเร็งในผู้ป่วยแต่ละคน ซึ่งจะมี รูปทรงที่ไม่แน่นอน และขึ้นอยู่กับลักษณะของแพทย์ โดยงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการทำงานของสายอากาศ 4 แบบ ที่ทำการปรับกำลังส่ง และเวลา เพื่อให้เห็นผลของการทำลายเซลล์เบื้องต้นประกอบการตัดสินใจของแพทย์ ประกอบการรักษา

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณทั้งหมดและได้ให้เวลาใน การทำโครงการวิจัยนี้ รวมทั้งขอขอบคุณสำนักวิจัยที่ได้อำนวยความสะดวกและประสานงานอย่างดียิ่งใน

การดำเนินโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น ผู้ทรงคุณวุฒิที่ปรึกษา
งานวิจัย ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในการแก้ไขปรับปรุงตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

10. รายการอ้างอิง

- A.S. Wright, F.T. Lee, Jr. and D.M. Mahvi. 2003. "Hepatic microwave ablation with multiple antennas results in synergistically larger zones of coagulation necrosis." **Ann sure Oncol.** 10: 275-283.
- D. Haemmerich, S.T. Sraelin, S. Tungjitkusolmun, F.T. Lee, Jr., D.M. Mahvi, and J.G. Webster. 2001. "Hepatic bipolar radio-frequency ablation between separated multiprong electrodes." **IEEE Trans Biomed Eng.** 48: 1145-1152.
- G. Schaller, J. Erb and R. Engelbrecht. 1996. "Field Simulation of Dipole Antenna for Interstitial Microwave Hyperthermia." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.** 44: 887-895.
- H.H. Pennes. 1948. "Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperature in Resting Forearm." **Journal of Applied Physiology.** 1: 93-122.
- James C. Lin and Yu-Jin Wang. 1996. "The Cap-Choke Catheter Antenna for Microwave Ablation Treatment." **IEEE Transactions on Biomedical Engineering.** 43, 6: 657-660.
- K. Saito, T. Taniguchi, H. Yoshimura and K. Ito. 2001. "Estimation of SAR Distribution of a Tip-Split Array Application for Microwave Coagulation Therapy Using the Finite Difference Method." **IECE Transactions Electronic.** E84-C: 948-954.
- L. Hamada, K. Saito, H. Yoshmura and K. Ito. 2000. "Dielectric-Loaded coaxial-slot antenna for interstitial microwave hyperthermia: longitudinal, control of heating patterns." **Int. J. Hyperthermia.** 16: 219-229.
- M.G. Skinner, M.N. Iizuka, M.C. Kolios and M.D. Sherar. 1998. "A theoretical comparison of energy sources- microwave, ultrasound and laser – for interstitial thermal therapy." **Physics in Medicine and Biology.** 43: 3535-3537.
- S. Labbonte, A. Blais, S.R Legault, H.O. Ali and L. Roy. 1996. "Monopole antennas for microwave catheter ablation." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.** 44: 1832-1840.
- S. Pisa, M. Cavagnaro, P. Bernardi and J.C. Lin. 2001. "A 915-MHz antenna for microwave thermal ablation treatment: physical design computer modeling and experimental measurement." **IEEE Transactions on Biomedical Engineering.** 48: 599-601.
- W. Hurter, F. Reinbold and W.J. Lorenz. 1991. "A Dipole Antenna for Interstitial Microwave Hyperthermia." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.** 39: 1048-1054.

การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกและการลดฮาร์มอนิกในห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์**THE EFFECT OF HARMONIC AND HARMONIC REDUCTION
ON COMPUTER STUDY CENTER****นิमित บุญภิรมย์****อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม****E-mail: nimit.bo@spu.ac.th****บทคัดย่อ**

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกและการลดฮาร์มอนิก จากผลของการใช้โหลดคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ วัตถุประสงค์เพื่อจะตรวจวัดและวิเคราะห์รูปแบบของการเกิดฮาร์มอนิกจากคอมพิวเตอร์ สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์รูปแบบของฮาร์มอนิก ออกแบบตัวกรองพาส-ซีส เพื่อลดฮาร์มอนิกให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล การทดสอบจากกลุ่มตัวอย่าง สามารถลดการเกิดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับมาตรฐานทุกประการ

คำสำคัญ: ฮาร์มอนิก ตัวกรองพาสซีส**ABSTRACT**

The effect of harmonics and the reduction of harmonics are discussed. The research aims to measure and analyze the pattern of harmonics that are generated from computer laboratory. The experimental samples are investigated. Also, passive harmonics filters are designed to reduce harmonics which is to meet the international standard. The improving results confirm the efficiency of harmonics reduction which meets the world class standard.

KEYWORDS : Harmonics, Harmonic filter**1. บทนำ**

ความเจริญก้าวหน้าทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และระบบสื่อสาร ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการจ่ายกำลังไฟฟ้า ในแหล่งจ่ายประเภทนี้จะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบ-ไฟฟ้ากำลังหลัก เกิดผลเสียหายมากมายกับระบบไฟฟ้า เช่น ทำให้เกิดความร้อนในตัวนำไฟฟ้า ท่อทางเดินไฟฟ้า ทำให้

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำ เกิดความบกพร่องของระบบป้องกันไฟฟ้า (David Chapman, 2001, Hooman E.M and Wilson X., 2009) หรืออาจเกิดความเสียหายจากสภาวะรีโซแนนซ์ได้ เป็นต้น คอมพิวเตอร์ถือเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกอีกแหล่งหนึ่ง (Thomas S.Key & Jip-Sheng Lai, 2010) ที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าทั้งในครัวเรือนและในสำนักงาน (EN61000 standard, 2004) ในสถาบันหรือสถานศึกษาที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการเรียนการสอนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในศูนย์ห้องเรียนคอมพิวเตอร์รวมถือเป็นแหล่งของการแพร่ของฮาร์โมนิกเข้าไปสู่ระบบไฟฟ้าหลักของอาคารหรือศูนย์การเรียนนั้น ๆ มาตรฐานสากลหลายมาตรฐานถูกสร้างขึ้นเพื่อควบคุมระดับของฮาร์โมนิกของผลิตภัณฑ์ หรือ คอมพิวเตอร์ เช่น มาตรฐาน IEEE 519-1992 และ IEC 1000-3-2 เป็นต้น

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลการเกิดฮาร์โมนิกจากคอมพิวเตอร์ในห้องเรียนรวมขนาดใหญ่และขนาดกลาง ในกรณีศึกษาก่อนการปรับปรุง คือห้องเรียนคอมพิวเตอร์รวมอาคาร 5 ชั้น 9 และ ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และอินเตอร์เฟสสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า อาคาร 5 ชั้น 14 ตรวจวัดหารูปแบบของแรงดัน-ฮาร์โมนิกและกระแสฮาร์โมนิก วิเคราะห์ หาค่าอัตราความเพี้ยนรวม (Total Harmonic Distortion: THD) เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ออกแบบตัวกรอง ทดสอบผลหลังติดตั้งตัวกรองกับคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

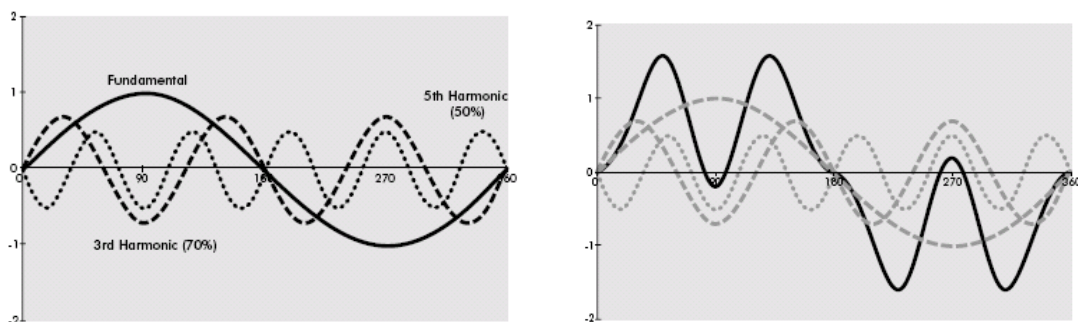
3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตรวจวัดแรงดันฮาร์โมนิกและกระแสฮาร์โมนิกที่ห้องเรียนคอมพิวเตอร์รวม 2 แห่ง คือ ห้องเรียนคอมพิวเตอร์รวม อาคาร 5 ชั้น 9 และห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และอินเตอร์เฟสสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
2. วิเคราะห์ลำดับรูปแบบของแรงดันฮาร์โมนิกและกระแสฮาร์โมนิก
3. ออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกแบบพาสซีฟ โดยใช้วิธีการแบบ ดิจนัล ทั้งสองแห่ง
4. ติดตั้งตัวกรองในกลุ่มตัวอย่าง ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และอินเตอร์เฟสจำนวน 5 เครื่อง

4. หลักการเบื้องต้นของฮาร์โมนิก

การเกิดฮาร์โมนิกเกิดจากการผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น แกน-เหล็ก และการใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลัง แรงดันหรือกระแสรูปไซน์จะมีการรวมของแรงดันหรือกระแสต่าง ๆ 1 ก. แสดงให้เห็นพื้นฐานของการเกิดแรงดันฮาร์โมนิกลำดับ 3 และลำดับ 5 เข้ามารวมกับสัญญาณที่ความถี่หลักหรือความถี่มูลฐาน ตามอนุกรมฟูเรียร์ ที่แสดงดังสมการที่ 1 ผลของการรวมของสัญญาณดังกล่าวจะทำให้เกิดรูปคลื่นรูปใหม่ดังแสดงในภาพที่ 1 ข. แสดงวงจรสมมูลการไหลของกระแสฮาร์โมนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลัก ได้ดังภาพที่ 2 (Arrillag, J & Watson, 2003) มาตรฐานการกำกับขนาดกระแสฮาร์โมนิก IEC10003-2 ในตารางที่ 1 และ เวกเตอร์ของกระแสฮาร์โมนิกจะแสดงดังภาพที่ 3 ตามลำดับ

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

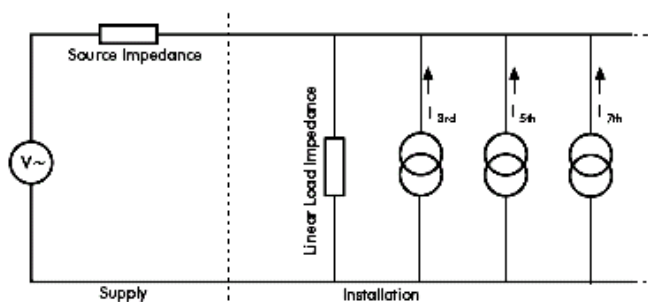


ก.

ข.

ภาพที่ 1 องค์ประกอบของสัญญาณฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ

- ก. สัญญาณฮาร์มอนิกความถี่ต่างๆ ข. ผลรวมของสัญญาณมูลฐานและฮาร์มอนิก



ภาพที่ 2 วงจรสมมูลแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 1 มาตรฐานกระแสฮาร์มอนิก IEC 1000-3-2

Harmonic Order	Maximum permissible current per watt	Maximum permissible harmonic current
3	3.4	2.3
5	1.9	1.14
	1.0	0.77
9	0.5	0.4
11	0.35	0.33
13 n <math>< 39</math>	3.85/n	Refer to Class A

กำหนดให้

- THD = ค่าผลรวมของค่าความเพี้ยนจากผลของฮาร์มอนิก (Total Harmonic Distortion)
 PF = ตัวประกอบกำลังจริง (True Power Factor)
 DPF = ตัวประกอบกำลังเฉพาะความถี่หลัก (Displacement Power Factor)
 HPF = ตัวประกอบกำลัง ฮาร์มอนิก (Harmonic Power Factor)

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

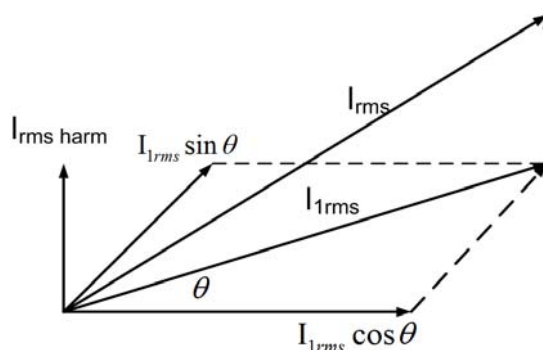
$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (3)$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + (THD_i)^2} \quad (4)$$

$$PF = \frac{\sum_{n=1}^N V_n I_n \cos \theta_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}} \quad (5)$$

หรือ

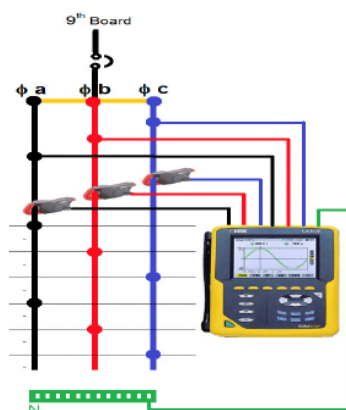
$$PF = DPF \times HPF = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_v)^2} \cdot \sqrt{1 + (THD_i)^2}} = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \quad (6)$$



ภาพที่ 3 เวกเตอร์กระแส rms เพิ่มขึ้นจากผลของกระแสฮาร์มอนิก ($I_{rms\ harm}$)

5. การวัดและการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่แพร่จากคอมพิวเตอรืในห้องเรียน คอมพิวเตอรืรวม อาคาร 5 ชั้น 9 และห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอรื และอินเตอร์เฟส

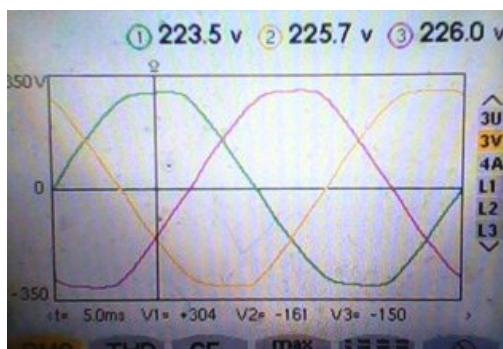
วัดแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิกจากคอมพิวเตอรืที่ใช้ในห้องเรียนคอมพิวเตอรืรวมอาคาร 5 ชั้น 9 ประกอบด้วยคอมพิวเตอรืขณะใช้งาน 30 เครื่อง เพื่อวิเคราะห์รูปแบบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากแรงดันและกระแสที่แพร่ออกจากคอมพิวเตอรื จากผลของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซิ่ง โดยใช้ Power Quality Analyzer ของ Chauvin Arnoux รุ่น C.A 8334



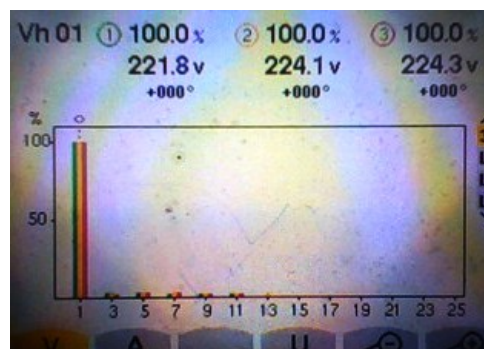
ภาพที่ 4 ตำแหน่งการวัดแรงดันฮาร์มอนิกและ กระแสฮาร์มอนิก

ตารางที่ 2 กระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกที่เฟส

Harmonic Order	Phase A			
	Current(A.)		Voltage(V.)	
	I	%THD	V	%THD
1	20.7	100%	222	100%
3	11.6	56.00%	2.9	1.30%
5	5.8	27.80%	4.2	1.90%
7	2	9.40%	2.4	1.10%
9	0.3	2.00%	1.1	0.50%
11	1	4.70%	1.3	0.60%
13	0.3	1.60%	0	0.00%
15	0.1	0.40%		
17	0.1	0.70%		
19	0.1	0.40%		
21	0.1	0.70%		
23	0.2	1.00%		
25	0.1	0.50%		



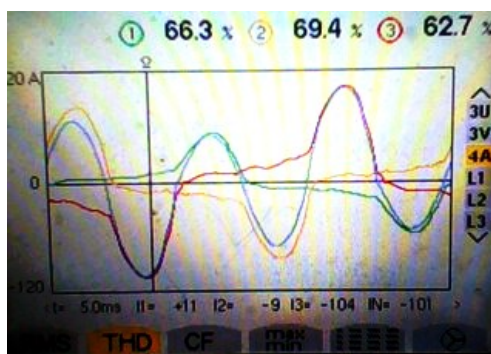
ก.



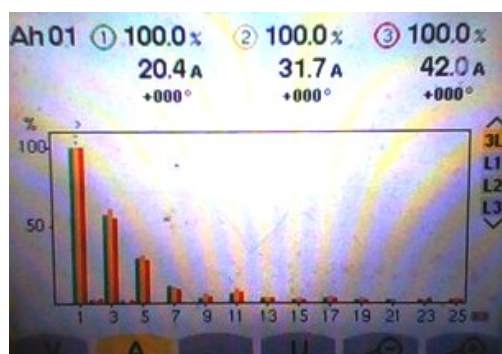
ข.

ภาพที่ 5 คลื่นแรงดันที่จ่ายเข้า และสเปคตรัมของแรงดันไฟฟ้า ตามลำดับ

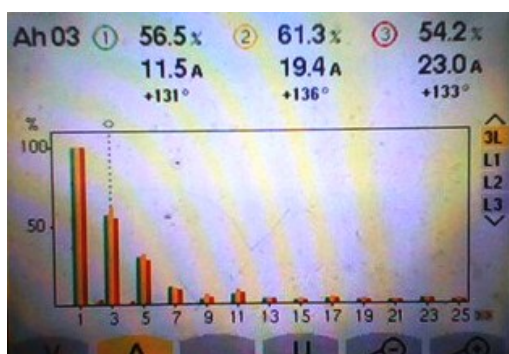
จากภาพที่ 4 ตารางที่ 2 และภาพที่ 5 แสดงการวัดและผลการวัดของแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งมีจำนวนมากเฉพาะกระแสจ่ายให้กับโหลดคอมพิวเตอร์ สามารถคำนวณค่าความเพี้ยนรวม (THD) ตามสมการที่(2) เท่ากับ 63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งภาพที่ 6 จะแสดงรูปคลื่นของกระแสในแต่ละเฟสและสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้ง 3 เฟสในลำดับที่ 3,5,7 ซึ่งไหลเข้าไปสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง



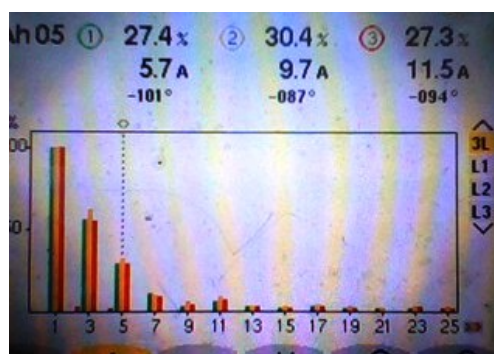
ก.



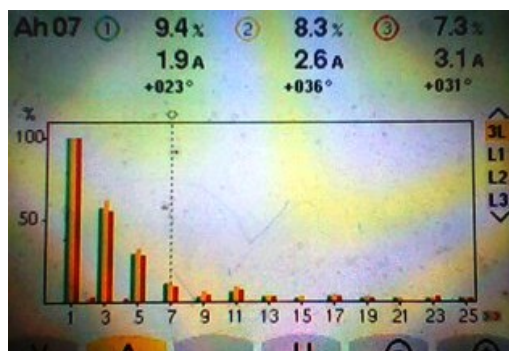
ข.



ค.



ง.



จ.

ภาพที่ 6 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิก 3 เฟส ก-จ เป็นค่ากระแสที่ฮาร์มอนิกลำดับ 1, 3, 5 และ 7 ตามลำดับ

5.1 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าแรงดันของระบบ และค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟรวมที่จะนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดชุดตัวกรอง ตามลำดับฮาร์มอนิกที่วัดได้ (ในที่นี้ต้องการถึงลำดับ 19)

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดความถี่ที่ต้องการ Cutout ในกรณีของ D-turn จะต่ำกว่าค่าที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดค่าพิกัดของตัวประจุที่ต้องการใช้ และคำนวณหาตัวประจุที่ต้องการ

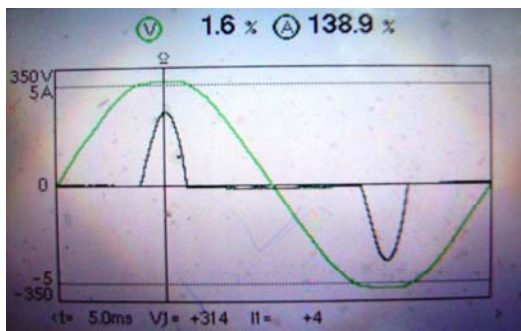
ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาตัวเหนี่ยวนำ และขนาดแกน และกำหนดค่า Quality Factor เพื่อหาค่าความต้านทานของตัวกรอง ผลการออกแบบได้ค่าขนาด อาร์ แอล ซี แสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ขนาดของตัวกรองที่คำนวณได้ที่อาคาร 5 ชั้น 9

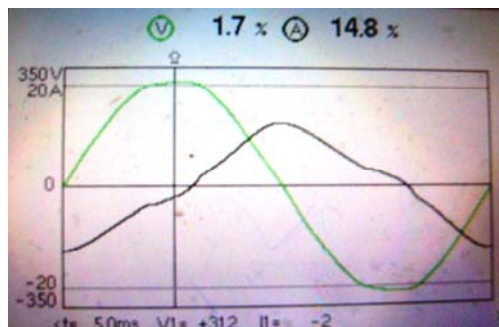
ลำดับกระแสฮาร์มอนิก	ลำดับ 3	ลำดับ 5	ลำดับ 7
Reactive Power	949 Var	49.3 Var	173 Var
Capacitor (C)	15 μ F	7.7 μ F	2.73 μ F
Inductor (L)	70 mH	54 mH	4.4 mH
Risistor(R)	1.1 Ω	1.3 Ω	2.34 Ω

ตารางที่ 4 ขนาดของตัวกรองที่คำนวณได้ที่ ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และอินเตอร์เฟส

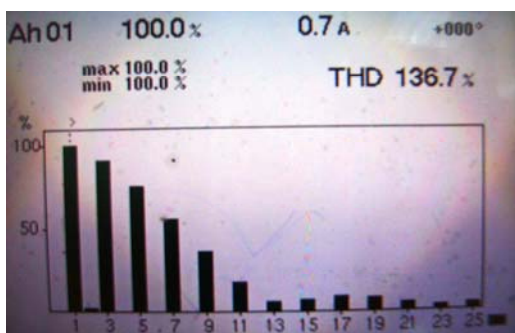
ลำดับกระแสฮาร์มอนิก	ลำดับ 3	ลำดับ 5	ลำดับ 7
Reactive Power	949 Var	49.3 Var	173 Var
Capacitor (C)	15 μ F	7.7 μ F	2.73 μ F
Inductor (L)	70 mH	54 mH	4.4 mH
Risistor(R)	1.1 Ω	1.3 Ω	2.34 Ω



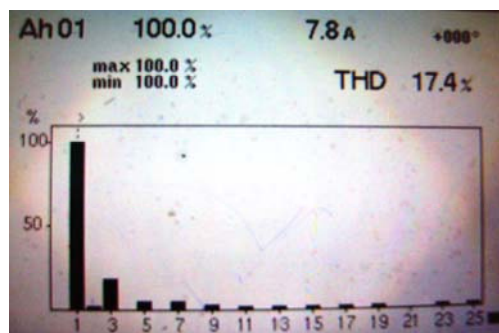
ก.



ข.



ค.



ง.

ภาพที่ 7 แรงดันและกระแสก่อนและหลังการติดตั้งตัวกรองที่ตัวอย่างห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และอินเตอร์เฟส

- ก. คลื่นแรงดันและกระแสก่อนติดตั้งตัวกรอง ข. คลื่นแรงดันและกระแสหลังติดตั้งตัวกรอง
 ค-ง. เป็นภาพสเปกตรัมก่อนและหลังติดตั้งตัวกรอง

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์ของแรงดันและกระแสหลังการปรับปรุง

ลำดับ ฮาร์มอนิกส์	เฟส c			
	กระแส (A)		แรงดัน (V)	
	I	%THD	V	%THD
1	7.8	100%	226.2	100%
3	1	13.10%	1.1	0.50%
5	0.3	3.80%	2.3	0.80%
7	0.3	3.80%	0.8	0.40%
9	0.1	1.0%	0.4	0.2%

6. การวิเคราะห์และปรับปรุงการเกิดฮาร์มอนิก

จากผลจากการวัดฮาร์มอนิกทั้งสองแห่ง พบว่า ห้องเรียนคอมพิวเตอร์รวมทั้ง อาคาร 5 ชั้น 9 และห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และอินเตอร์เฟส มีการกระจายของกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบเดียวกับ และจาก

การวิเคราะห์และสร้างตัวกรองเพื่อแก้ไขในกลุ่มตัวอย่างในห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตเฟส จำนวน 5 เครื่องเพื่อเป็นตัวอย่างในการปรับปรุงกระแสฮาร์มอนิก ได้รับผลคือ แรงดันฮาร์มอนิกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งมาตรฐาน IEEE 519 กำหนด %THD_v ไม่เกิน 5 % แต่การพิจารณาฮาร์มอนิกของกระแสคอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ Type D ในมาตรฐาน IEC1000-3-2 ซึ่งขนาดของกระแสที่แสดงในภาพที่ 7 และตารางที่ 5 จะมีค่ากระแสฮาร์มอนิกลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งขนาดของตัวกรอง ทั้งสองแห่งได้แสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

7. สรุปและเสนอแนะ

จากผลการตรวจวัดรูปแบบของฮาร์มอนิกในห้องเรียนรวมคอมพิวเตอร์ จะเห็นได้ว่าฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าจะเป็นฮาร์มอนิกลำดับคี่ จากการตรวจวัดทั้งสองห้องพบว่ามีรูปแบบคล้ายกันจากแก้ไขโดยการใช้ตัวกรองแบบพาสซีฟสามารถลดค่าฮาร์มอนิกให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดแต่การออกแบบแบบดีจูนโดยให้ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่ต้องการตัวจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานในกรณีเกิดการรีโซแนนซ์ได้ในการลดวิธีอื่นๆ เช่นการใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบซิกแซกก็เป็นวิธีที่สามารถพัฒนาต่อไปได้

8. รายการอ้างอิง

- 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 Institute.
- David, Chapman. 2001. **Harmonic Causes and Effect: Power Quality Application Guide**. USA:Copper.
- Hooman E. M. & Wilsun X. 2009. "Harmonic cancellation characteristic of specially connected transformers." **Electric Power Systems Research**. 1690-1697.
- IEEE Standard. 2003. **IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters**. USA: IEEE Power Engineering Society.
- Arrillag, J & Watson. 2003. **Power System Harmonics**. USA: John Willey & Sons.

คุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการถุกย่อยสลายของ
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากกลูเทนแป้งสาลี
**MECHANICAL AND BIODEGRADABLE PROPERTIES OF
BIOPLASTIC PRODUCEDS FROM WHEAT GLUTEN**

ประสงค์สม ปุณยอุปพัทธ์¹

ทองพุด นันทะแสง²

¹ห้องปฏิบัติการการใช้ประโยชน์จากของเสีย ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

E-mail : prasongsom@gmail.com

²ห้องปฏิบัติการการใช้ประโยชน์จากของเสีย ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

E-mail : timtong5@gmail.com

บทคัดย่อ

พลาสติกชีวภาพที่เกิดจากการผสมกลูเทนที่สกัดจากแป้งสาลี และกลีเซอรอล (สารเสริมแรง) ในอัตราส่วนของกลูเทน : กลีเซอรอลเท่ากับ 95:5, 90:10, 85:15 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง Compression molding ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ที่เวลา 10 นาที ความดัน 15 เมกกะปาสกาล (Mpa) ตามลำดับ และได้มีการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบ texture analyzer ผลการทดลองพบว่า พลาสติกชีวภาพที่มีอัตราส่วนของกลูเทนต่อกลีเซอรอลที่ 90:10 มีค่าเปอร์เซ็นต์ Elongation มากที่สุดเท่ากับ 420.21 ในขณะที่พลาสติกชีวภาพที่มีอัตราส่วนกลูเทนต่อกลีเซอรอล 95:5 ให้ค่า Strength at break มากที่สุดเท่ากับ 3704.08 N/m จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น (Young modulus : E) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลจะส่งผลให้พลาสติกชีวภาพสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างดีขึ้นเมื่อมีแรงกระทำ สำหรับการทดสอบความสามารถในการถุกย่อยสลายทำโดยการฝังดินพบว่าพลาสติกชีวภาพตัวอย่างสามารถถุกย่อยสลายภายในระยะเวลา 15 วัน

คำสำคัญ : พลาสติกชีวภาพ กลูเทน กลีเซอรอล สมบัติเชิงกล

ABSTRACT

Bioplastic from wheat gluten and glycerol (plasticizer), fresh wheat gluten and glycerol were blended in various formulations as, 95:5, 90:10, 85:15 and 80:20 % (w / w). The blend was then hot-molded by the compression molding machine at 140 C, with the pressure at 15 Mpa. for 10 minmutes. Bioplastic samples were

investigated the physical properties by using texture analyzer. The experimental results showed that the sample containing gluten:glycerol at 90:10 % (w / w) had the highest elongation percentages (420.21) while the sample containing gluten:glycerol at 95:5 % (w / w) had the highest strength at break (3704.08 N/m). The experimental results implied that amount of glycerol affected to the resistance to deformation property of bioplastics, with the high amount of glycerol resulting in low young modulus (E). The biodegradation test was investigated by buried all samples in soil for 15 day. The results showed that all of bioplastic samples were almost degraded within 15 days.

KEYWORDS : Bioplastics, Gluten, Glycerol, Mechanical property

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลาสติกมีการใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสะดวก และราคาถูก จึงมีการผลิตเป็นสิ่งของเครื่องใช้ ประเภทใช้แล้วทิ้ง พลาสติกที่ใช้ล้วนเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายยาก ซึ่งพลาสติกต้องใช้เวลาถึง 400 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการใช้และอัตราการย่อยสลายของพลาสติกนั้นไม่สมดุล จึงประสบกับปัญหาการจัดเก็บขยะและปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งปริมาณขยะจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นตามการขยายตัวของเศรษฐกิจและสังคม จึงมีการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยใช้วัตถุดิบทางการเกษตร เช่น แป้งมันสำปะหลัง ข้าวโพด และพลาสติกที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

Chandra และ Rustgi (1997) แบ่งพลาสติกที่สามารถย่อยสลายออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ที่จัดเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์
- พลาสติกที่สามารถย่อยสลายที่จัดเป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพ
- พลาสติกที่สามารถย่อยสลายโดยวิธีทางชีวภาพที่เกิดจากการผสมระหว่างพอลิเมอร์สังเคราะห์กับพอลิเมอร์ธรรมชาติ

นอกจากนั้นยังพบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาพลาสติกชีวภาพผสม (bio-composite-plastic) ที่มีส่วนประกอบของ แป้ง และโปรตีนที่ได้จากธรรมชาติอื่นๆ เช่น อัลบูมิน (albumin) กลูเทน (gluten) เซอีน (zein) เวย์ (whey) เจลาติน (gelatin) และคอลลาเจน (collagen) เป็นต้น ร่วมกับการใช้พลาสติกไซเซออร์ โดยมีจุดมุ่งหมายให้พลาสติกที่ได้มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่น และสามารถขึ้นรูปได้ดึ้นนั้นมีน้อยมาก แต่สามารถพบงานวิจัยในลักษณะการใช้โปรตีนเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มชีวภาพ ทั้งในประเทศ และต่างประเทศ เช่น

พรพรรณ จันทรไทร (2543:115) ใช้โปรตีนจากข้าวโพด (เซอีน) ในการปรับปรุงคุณสมบัติความคงทนต่อการดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีซอบิทอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มที่ได้มีความใส สามารถยืดตัวได้ดี และทนต่อน้ำได้มากขึ้น

ศุคนธา ศุคนธารา (2545:97) ศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่ผสมด้วยเจลาติน และมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ในอัตราส่วนต่างๆ ผลการทดลองพบว่า เจลาติน และกลีเซอรอลส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพเช่น มีความใส ความโปร่งแสง การทนต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดตัวเพิ่มขึ้น

Gennadios และคณะ (1998) พัฒนาและตรวจวัดคุณสมบัติของฟิล์มที่ทำจากไข่ขาว-แป้งคัดแปร ซึ่งพบว่าฟิล์มสามารถทนต่อแรงดึงได้มากขึ้นและเกิดการเชื่อมขวางระหว่างไข่ขาวกับแป้งคัดแปร

Rhim และคณะ (1999) ศึกษาและพัฒนาฟิล์มจากโปรตีนถั่วและโพรพรีลีนไกลคอลอัลจินต พบว่าฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการยึดตัว การละลายน้ำ และการซึมผ่านของไอน้ำลดลงตามปริมาณของโพรพรีลีนไกลคอลอัลจินต

แต่สำหรับงานวิจัยที่พัฒนาพลาสติกชีวภาพจาก แป้ง โปรตีนและพลาสติกไบโอคอมโพสิต (bio-composite plastic) นั้นพบน้อยมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ ตัวอย่างเช่น

วินัย อวงพิพัฒน์ และคณะ (2547) ผลิตฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากโปรตีนที่สกัดจากถั่วแดงหลวง แป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วน 1: 0.15 โดยมีชอบิทอลเป็นพลาสติกไบโอคอมโพสิต ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ทางกายภาพของฟิล์มและนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มห่อขนมหวาน

Otaigbe และคณะ (1999) พัฒนาพลาสติกชีวภาพจาก แป้งข้าวโพด และ โปรตีนถั่ว โดยการผสมด้วยเครื่อง extruder และนำไปขึ้นรูปด้วย injection molded

Huang และคณะ (1999) พัฒนาพลาสติกชีวภาพจากโปรตีนถั่ว และ แป้งโดยมี น้ำและกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไบโอคอมโพสิต ผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบเกลียวคู่ (twin-screw extruder) และทำการขึ้นรูปด้วย injection molding machine

Sun และคณะ (2008) ศึกษาคุณสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ที่ทำจากกลูเทน ใช้กลีเซอรอลเป็นตัวเสริมแรงขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 25-125 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่า Tensile strength และ Young's modulus และ Relaxation time

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายจากกลูเทนแป้งสาลี โดยศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกชีวภาพ และ ความสามารถในการย่อยสลาย ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาต่อยอดในขั้นต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้จากกลูเทนที่สกัดได้จากแป้งสาลี โดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารเสริมแรง
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

3. วิธีการดำเนินวิจัย

3.1 สกัดกลูเทนจากแป้งสาลี

ชั่งแป้ง 1000 กรัม เติมน้ำ 750 มิลลิลิตร นวดจนเกิดโด ใช้ผ้าขาวบางชุบน้ำหมาดๆ ห่อโดทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที นำโดไปล้างผ่านน้ำไหลจนกระทั่งแป้งละลายออกจนหมดเหลือเพียงกลูเทนสดจะได้กลูเทนที่มีลักษณะเหนียว สามารถดึงยืดได้

3.2 การผสมกลูเทนกับกลีเซอรอลเพื่อทำพลาสติกชีวภาพ

นำกลูเทนที่สกัดได้จากข้อ 3.1 มาผสมกับกลีเซอรอลโดยใช้อัตราส่วน กลูเทน : กลีเซอรอล 95:5, 90:10, 85:15 และ 80:20 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นำไปปั่นให้ละเอียดประมาณ 3 นาที แล้วนำไปบดด้วยครกหินจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3 การขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพ

นำส่วนผสมที่ได้จากข้อ 3.2 ไปขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพโดยใช้เครื่อง Compression molding ของบริษัท Qingdao Yadong Rubber Machinery รุ่น Qindao No.3 Rubber Machinery Factory ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ความดัน 15 เมกกะปาสคาล แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4 การเตรียมชิ้นตัวอย่าง

นำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.3 มาตัดให้มีขนาดความกว้าง 4 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร ใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดขนาดความกว้างและความยาว ที่ตำแหน่งต่างกัน 3 ตำแหน่ง แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย โดยใช้ชิ้นตัวอย่างทดสอบอย่างละ 5 ชิ้น

3.5 การทดสอบการทนแรงดึงของพลาสติกชีวภาพ (ตามมาตรฐานสากล ASTM D 882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting)

นำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.4 มายึดเข้ากับ Grip ของเครื่องทดสอบ แบบหัวดิ่งฟิล์ม, กระดาก (Bollard Grip) ระยะของ Corrected Gauge Length เท่ากับ 40 มิลลิเมตร ใช้ Load cell ขนาด 500 นิวตัน ทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer ของบริษัท LLOYD Instrument รุ่น LR5K s/n D56703 ดึงชิ้นตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 60 มิลลิเมตร/นาที จนชิ้นตัวอย่างขาดจากกัน ตัวอย่างละ 5 ชิ้น แล้วบันทึกผล

3.6 การทดสอบความสามารถในการยืด (% Elongation) ของพลาสติกชีวภาพ (ตามมาตรฐานสากล ASTM D 882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting)

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.5 แล้วคำนวณหาค่า % Elongation at break ของการยืด ณ จุดขาด เทียบกับความยาวเริ่มต้น ดังนี้

$$L = (L - L_0) / L_0 \times 100$$

เมื่อ L คือ ความยาว ณ จุดขาด

L_0 คือ ความยาวเริ่มต้น

3.7 ทดสอบการถดถอยสลายของพลาสติกชีวภาพโดยการฝังดิน

ตัดชิ้นงานให้มีขนาดความกว้าง 4 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ใส่ใน โถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ฝังชิ้นตัวอย่างลงดินให้ลึกจากผิวดิน 1 - 2 ฟุต เป็นเวลา 15 วัน โดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆวันที่ 3, 6, 9, 12 และ 15 วัน ตามลำดับ เมื่อถึงครบตามเวลาที่กำหนดให้นำพลาสติกชีวภาพออกจากดินอย่างระมัดระวัง บันทึกภาพ แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่นเบาๆ เพื่อเอาดินที่ติดบนผิวพลาสติกชีวภาพออก ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนชั่งน้ำหนักพลาสติกชีวภาพ ทำการทดลองตัวอย่างละ 5 ซ้ำ คำนวณค่าการถดถอยสลายของพลาสติกชีวภาพในเทอมของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของพลาสติกชีวภาพที่หายไปด้วยสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักพลาสติกชีวภาพที่หายไป} = (W_1 - W_2) / W_1 \times 100$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักชิ้นทดสอบเริ่มต้น

W_2 = น้ำหนักชิ้นทดสอบเมื่อระยะเวลาผ่านไปตามที่กำหนด

3.8 การขึ้นรูปของพลาสติกชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

นำอัตราส่วนกลูเทนต่อกลีเซอรอล 95:5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ 50 กรัม มาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเติมสีผสมอาหารเพื่อความสวยงาม แล้วนำมาใส่แม่พิมพ์จานรองแก้ว ขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

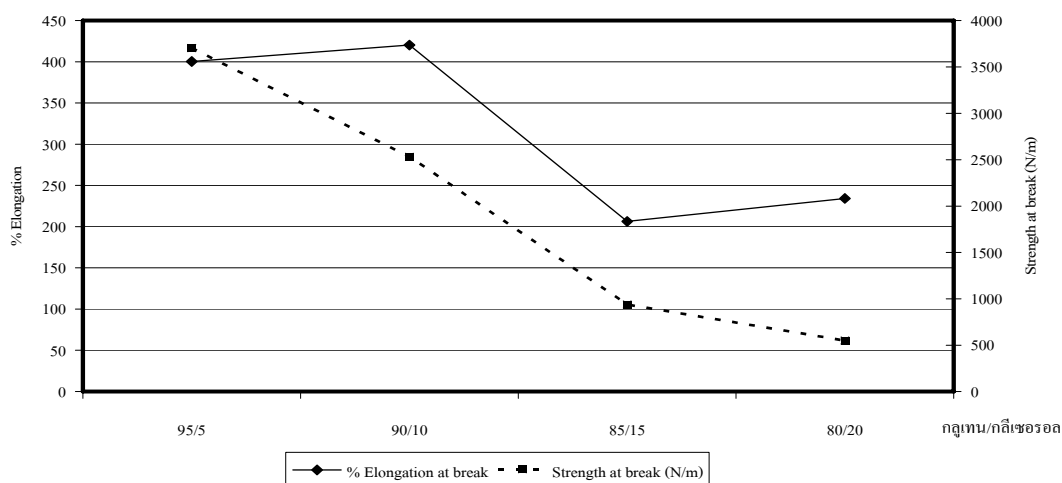
4. ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกชีวภาพ

คุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกชีวภาพที่มีกลูเทน: กลีเซอรอล ในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 95:5, 90:10, 85:15 และ 80:20 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Elongation ค่า Strength at break (N/m) และ ค่า Young modulus (E) ของพลาสติกชีวภาพแต่ละอัตราส่วน ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที

ลำดับที่	อัตราส่วน กลูเทน:กลีเซอรอล	Elongation (%)	Strength at break (N/m)	Young modulus (E)
1	95:5	400.31	3704.08	9.25
2	90:10	420.21	2530.84	6.02
3	85:15	206.42	938.65	4.55
4	80:20	234.30	550.05	2.35



ภาพที่ 1 เปอร์เซนต์ Elongation และค่า Strength at break (N/m) ของพลาสติกชีวภาพที่มีกลูเทน : กลีเซอรอล ในอัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 1 พบว่าที่คุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกชีวภาพที่มีอัตราส่วนของ กลูเทน : กลิเซอรอลที่ 95:5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น (Young modulus : E) สูงที่สุดเท่ากับ 9.25 ในขณะที่พลาสติกชีวภาพที่มีอัตราส่วนของ กลูเทน:กลิเซอรอลที่ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่นต่ำที่สุดเท่ากับ 2.35 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของกลิเซอรอลส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำของพลาสติกชีวภาพ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของกลิเซอรอลจะส่งผลให้พลาสติกชีวภาพสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำได้ดีขึ้น และ เมื่อนำค่าของเปอร์เซ็นต์ Elongation และค่า Strength at break (N/m) มา plot กราฟจะพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ Elongation และ ค่า Strength at break (N/m) ให้กราฟที่มีรูปทรงคล้ายคลึง และ สอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 1 จากนั้นจึงคัดเลือกเฉพาะพลาสติกชีวภาพที่มีค่าอัตราส่วนกลูเทนต่อกลิเซอรอล 95:5 และ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาทำการทดสอบคุณสมบัติในการถูกย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพในขั้นต่อไป

4.2 ทดสอบการถูกย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพโดยการฝังดิน

ผลการศึกษาการถูกย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพที่อัตราส่วนกลูเทนต่อกลิเซอรอล 95:5 และ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการฝังดินเป็นเวลา 15 วัน ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาทำการบันทึกภาพเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงและทำการคำนวณหาค่าการถูกย่อยสลาย ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2 ภาพที่ 3 และตารางที่ 2



ภาพที่ 2 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพอัตราส่วนกลูเทนต่อกลิเซอรอล 95:5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ภายในระยะเวลา 15 วัน



ภาพที่ 3 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพอัตราส่วนกลูเทนต่อกลีเซอรอล 90:10 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนัก ภายในระยะเวลา 15 วัน

ตารางที่ 2 ค่าการถูกย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพโดยการฝังดิน

อัตราส่วนของ กลูเทน : กลีเซอรอล	ค่าการถูกย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพในเทอมของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักพลาสติกชีวภาพที่หายไปตามระยะเวลาที่กำหนด (วัน)				
	3	6	9	12	15
95:5	32.41	43.41	57.10	62.10	69.75
90:10	38.03	46.86	51.80	63.57	64.40

จากตารางที่ 2 พบว่าพลาสติกชีวภาพในอัตราส่วนกลูเทน : กลีเซอรอล เท่ากับ 95:5 และ 90:10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จะให้ค่าการถูกย่อยสลายที่สูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าภายในระยะเวลา 15 วัน พลาสติกชีวภาพทั้งสองสูตรมีค่าการถูกย่อยสลายที่ 69.75 และ 64.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4.3 การขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

นำพลาสติกชีวภาพที่มีอัตราส่วนของ กลูเทนต่อกลีเซอรอลที่ 95:5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาผสมสี เพื่อให้เกิดความสวยงาม และ ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding และ แม่พิมพ์สำหรับการทำจานรอง แก้ว ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 จานรองแก้วที่ทำมาจากพลาสติกชีวภาพ : กลูเทนต่อกลีเซอรอล ในอัตราส่วน 95:5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองคุณสมบัติเชิงกลพบว่าพลาสติกชีวภาพที่มีอัตราส่วนของ กลูเทนต่อกลีเซอรอลที่ 95:5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่า Strength at break มากที่สุดเท่ากับ 3704.075 (N/m) และผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของกลีเซอรอลส่งผลต่อการลดลงของค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่นของพลาสติกชีวภาพ โดยปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พลาสติกชีวภาพสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำได้ดีขึ้น

ผลทดสอบคุณสมบัติในการย่อยสลายโดยการฝังดินพบว่าพลาสติกชีวภาพที่มีอัตราส่วนกลูเทนต่อกลีเซอรอล 95:5 และ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นมีการย่อยสลายร้อยละ 69.75 และ 64.40 ภายในระยะเวลา 15 วัน ตามลำดับ ซึ่งอัตราการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับปริมาณกลูเทนที่ผสม และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของรังสิมา ชลคุปและคณะ (2541: 247-357) ที่ผลิตและทดสอบค่าการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพจากการผสมแป้งและ polycarbonate (PCL) ในอัตราส่วน 75: 35 เปอร์เซ็นต์โดยการฝังดิน พบว่าพลาสติกชีวภาพดังกล่าวใช้เวลาในการถูกย่อยสลายนานถึง 4 เดือน ซึ่งแตกต่างจากพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากกลูเทนและกลีเซอรอลมีค่าการถูกย่อยสลายที่สูงกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนในการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์เคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่สำหรับทำงานวิจัยครั้งนี้

7. รายการอ้างอิง

- พรพรรณ จันทร์ไตร. 2543. “การปรับปรุงความคงทนต่อการดูดซับน้ำของฟิล์มบริโกล์ได้จากแป้งมันสำปะหลัง และการใช้ประโยชน์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รังสิมา ชลกุลป์ ชลธิชา นุ่มหอม และกล้าณรงค์ ศรีรอด. 2541. “ผลของแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติการย่อยสลายได้ของแป้ง/Polycaprolactone เบลนด์.” **การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36:** 247-357.
- วินัย อวงพิพัฒน์ สันต์ศิริโยธา และประไพศรี บริสุทธิคุณ. 2547. “การผลิตฟิล์มรับประทานได้จาก โปรตีนที่สกัดจากถั่วแดงหลวง.” **งานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วทท.) ครั้งที่ 30,** Retrieved February 2, 2007 from http://www.scisoc.or.th/stt/30/sec_f/paper/stt30_F0030.pdf
- สุคนธา สุคนธรา. 2545. “การเตรียมและสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมเจลาติน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ASTM D882. 1983. “Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting.” **Eston MD,USA,** 8.1: 326-331.
- Chandra, R. and Rustgi, R. 1997. “Biodegradation of maleated linear low density polyethylene and starch blends.” **Polymer Degradation and Stability.** 56, 2: 185-202.
- Gennadios, A., Handa, A., Gw., Weller and Hanna, M.A. 1998. “Physical properties of egg white-dialdehyde starch films.” **Journal of Agriculture and Food Chemistry.** 46: 1297-1302.
- Huang, H. C., Chang, T. C., and Jane, J. 1999. “Mechanical and physical properties of protein-starch based plastics produced by extrusion and injection molding.” **Journal of the American Oil Chemists' Society,** 76: 1101-1108.
- Otaigbe, J. U., Goel, H., Babcock, T., and Jane, J. 1999. “Processability and Properties of Biodegradable Plastics Made from Agricultural Biopolymers.” **Journal of Elastomers and Plastics.** 31, 1:56-71.
- Rhim, J.W., Wu., Y., Weller, C.L. and Schnepf, M. 1999. “Physical characteristics of a composite film of soy protein isolate and propyleneglycol alginate.” **Journal of Food science.** 64, 1: 149-152.
- Sun, S., Song, Y., and Zhenga, Q. 2008. “Thermo-molded wheat gluten plastics plasticized with glycerol: Effect of molding temperature.” **Food Hydrocolloids.** 22, 6: 1006-1013.