



มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การจำลองแบบและการวิเคราะห์ตัวแปรของระบบชุปและอบสีถังสะสม
สารทำความเย็นด้วยอุโมงค์สายพานลำเลียง

**PARAMETERS ANALYSIS AND SYSTEM SIMULATION OF
REFRIGERANT ACCUMULATOR DIP LINE**

อมตะ ทัศนภักดี

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีการศึกษา 2550

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยการจำลองแบบและการวิเคราะห์ตัวแปรของระบบชุปและอบสีถังผสมสารทำความเย็นด้วย
อุโมงค์สายพานลำเลียงประสบความสำเร็จและสมบูรณ์ได้ในครั้งนี้ ขอขอบคุณบริษัท APET (Thailand) ที่ให้
ความอนุเคราะห์ในการให้ใช้อุโมงค์อบสีเป็นต้นแบบในการทำวิจัยและขอขอบคุณ รศ.ดร. ธนาคม สุนทรชัยนาค
แสง เป็นอย่างยิ่งที่ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาในโครงการวิจัยในครั้งนี้

พฤษภาคม 2552



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

หัวข้อวิจัย : การจำลองแบบและการวิเคราะห์ตัวแปรของระบบซูปและอบสีถึงสะสมสารทำความเย็นด้วย

อุโมงค์สายพานลำเลียง

ผู้วิจัย : ดร. อมตะ ทศนภักดิ์

หน่วยงาน : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีที่พิมพ์ : พ.ศ. 2552

บทคัดย่อ

การศึกษาอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็นและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, อุณหภูมิแวดล้อม, และฉนวนของอุโมงค์อบสีที่มีต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีและการกระจายของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีรวมทั้งศึกษาหาแนวทางจัดทำมาตรการการประหยัดพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของอุโมงค์อบสี

โดยจากการสำรวจภายในอุโมงค์อบสีพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการแห้งของสีที่เคลือบคือการกระจายของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศร้อนที่จะต้องมีความเร็วต่ำมากเพื่อให้การแห้งของสีเคลือบเป็นแบบแห้งอย่างช้าๆและทั่วทั้งถึงสะสมสารทำความเย็นดังนั้นการอบสีเคลือบเป็นลักษณะที่ถึงสะสมสารทำความเย็นที่ผ่านการเคลือบสีแล้วจุ่มอยู่ในอากาศร้อนที่เคลื่อนตัวด้วยความเร็วต่ำๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่บนพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนพบว่าฉนวนของอุโมงค์อบสีและอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมมีผลกระทบในลักษณะแปรผันตรงต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีที่อยู่ในรูปแบบความร้อนสูญเสียจากภายในอุโมงค์อบสีสู่อากาศแวดล้อมภายนอก

ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์อุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของอากาศแวดล้อมรวมทั้งความหนาของฉนวนใยแก้วจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมในช่วง $25^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ มีผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีเฉลี่ย $1^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$
2. การมีฉนวนใยแก้วและช่องอากาศระหว่างผนังเหล็กทำให้ผลต่างของโปรไฟล์อุณหภูมิภายในในมากขึ้นเฉลี่ย $1^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$ ในช่วงแรกจากช่องทางเข้าของอุโมงค์อบสีและเพิ่มเป็น $3^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}$ ในช่วงกลางอุโมงค์อบสีและเพิ่มเป็น $6^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$ ในช่วงท้ายอุโมงค์อบสี
3. ความหนาของใยแก้วที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 50 mm มีผลทำให้อุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีเพิ่มขึ้น $0.5^{\circ}\text{C} - 1^{\circ}\text{C}$ ในช่วง 3.3 m แรกและเพิ่มขึ้น $2^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C}$ ในช่วงกลางและช่วงท้ายของอุโมงค์อบสี
4. โปรไฟล์ของอุณหภูมิของอุโมงค์อบสีจะมีความชันมากในช่วงแรกและความชันของโปรไฟล์จะลดลงจนเกือบจะคงที่ที่ตำแหน่งกลางและท้ายของอุโมงค์อบสี
5. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} - 80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) เป็นตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิและการกระจายของอุณหภูมิน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม

คำสำคัญ : อุโมงค์อบสี อุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การนำความร้อน ฉนวนใยแก้ว

Research Title : Parameters Analysis and System Simulation of Refrigerant Accumulator DIP
Line

Name of Researcher : Dr. Ammata Tusnapuckdi

Name of Institute : Faculty of Engineering Sripatum University

Year of Publication : B.E. 2552

ABSTRACT

The study of refrigerant accumulator dip line tunnel and its mathematic model was conducted with objective to gain insights on the relationship of natural film coefficient of environmental air, environmental air temperature, and insulator of tunnel that effected to inside tunnel temperature and temperature distribution as well as to study to save the energy and to improve the efficiency.

The inside tunnel exploration showed that the parameters which effected to film laminated material were inside tunnel temperature and hot air velocity which must be very low velocity in order to slowly dry the whole film laminated material of the refrigerant accumulator therefore type of film laminated material fumigation was dip in very slow moving hot air. According to mathematic model based on conductive heat transfer, insulator of tunnel and environmental air temperature proportional effected to inside tunnel temperature that was in form of heat loss from inside tunnel to environmental air.

From the study and analyses of temperature and natural film coefficient of environmental air as well as glass wool insulator thickness, mathematic model give the result as follows:

1. Environmental air temperature in range 25 °C- 35 °C influenced to inside tunnel temperature about 1 °C – 2 °C
2. Glass Wool insulator and air gap increased the difference of inside temperature profile that first entry section of tunnel increased 1 °C – 2 °C and 3 °C – 5 °C in middle section and 6 °C – 10 °C end section
3. The increment of glass wool insulator thickness in every 50 mm increased inside tunnel temperature in rage 0.5 °C-1 °C in first 3.3 m of tunnel and 2 °C-3 °C in middle and end section of tunnel
4. The slop of tunnel temperature profile is steep in first entry section of tunnel and declined in middle and end section of tunnel
5. The natural film coefficient of environmental air (10 W/m²·K - 80 W/m²·K) was parameter which was very less influenced to temperature and temperature distribution when compare to environmental air temperature

Keywords : Tunnel, Temperature, Relative Humidity, Glass Wool Insulator

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 คำถามการวิจัย.....	2
1.4 สมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 นิยามคำศัพท์เฉพาะ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับกรวิจัย.....	5
2.2 ทฤษฎีที่รองรับในการวิจัย.....	6
2.3 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	8
3.1 แบบแผนทางการวิจัย.....	8
3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	8
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	8
3.5 เครื่องมือการวิจัย.....	9

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.6 หลักการทำงานของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น.....	9
3.7 การควบคุมการทำงานของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น ...	10
3.8 การสำรวจและผลการเก็บข้อมูล (อุณหภูมิ) เบื้องต้น.....	11
3.9 ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด.....	14
3.10 ฤดูกาลความชื้น.....	18
3.11 การจำลองแบบปริมาณความชื้นที่สูญเสียผ่านผนังอุโมงค์อบสี.....	19
บทที่ 4 การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของอุโมงค์อบสี.....	20
4-1 สมมุติฐานการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
4.2 ทฤษฎีของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของอุโมงค์อบสี.....	20
บทที่ 5 ผลการวิจัย.....	25
5.1 หลักการทำงานของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น.....	25
5.2 การควบคุมการทำงานของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสม สารทำความเย็น.....	25
5.3 ตัวแปรที่ต้องทำการวิเคราะห์.....	26
5.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุม.....	35
5.5 เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	36
5.6 ขีดความสามารถของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสม สารทำความเย็น.....	36

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	37
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	37
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	37
บรรณานุกรม.....	39
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก รายละเอียดข้อมูลการบันทึกคุณหมุด้านเข้า.....	42
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลการบันทึกคุณหมุด้านออก.....	48
ภาคผนวก ค รูปการสำรวจจุดโมงค้อบสีเบื้องต้น.....	53
ภาคผนวก ง ตาราง.....	59
ภาคผนวก จ สมการการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ใน MATLAB.....	73
ภาคผนวก ฉ แผนภาพการเขียนโปรแกรมโดยใช้วิธี “Jacobi”.....	74
ภาคผนวก ช ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม MABLAB.....	75
ภาคผนวก ซ รายการคำนวณสถานะการใช้พลังงานของจุดโมงค้อบสี ถึงสะสมสารทำความเย็นเบื้องต้น.....	86
ภาคผนวก ฌ การหาระดับอ้างอิงของคุณหมุด้าน.....	90
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	91

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
3-1 หลักการทำงานของอุโมงค์อบสี่แบบสายพานลำเลียง.....	10
3-2 แสดงภาพตัดขวางและทิศทางการไหลเวียนของอากาศร้อน.....	11
3-3 การติดตั้ง RTD (Overview).....	12
3-4 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง RTD.....	13
3-5 แสดงภาพด้านบนและทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ภายในอุโมงค์อบสี่.....	13
3-6 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 1,2 และ 3.....	14
3-7 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 4,5 และ 6.....	15
3-8 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยกับตำแหน่งที่ทำการวัด..	16
3-9 แสดงตำแหน่งท่อที่ปล่อยความร้อนออกสู่บรรยากาศ.....	17
3-10 แสดงการวัดอุณหภูมิของอุโมงค์อบสี่จริง.....	18
4-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Conductive Heat Transfer และ Boundary Conditions.....	20
4-2 แบบภายในอุโมงค์อบสี่	20

สารบัญภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-3 แสดงการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ 2 มิติที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB.....	22
5-1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำการทดลองกับค่าที่ได้จาก ทฤษฎี(Matlab) ที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่ทำการทดลอง.....	26
5-2 แสดงลักษณะรูปแบบของโปรไฟล์ของการอบ เปรียบเทียบระหว่างแถวที่ 8, 12 และแถวที่ 15.....	27
5-3 แสดงการเปรียบเทียบค่า $T_a = 25-35^{\circ}\text{C}$ ที่เข้าเตาอบ พิจารณาที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์อบสี่ ในแนวแกน x และ ค่า $k = 0.08325 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	28
5-4 แสดงการเปรียบเทียบค่า k กับค่า $T_a = 35^{\circ}\text{C}$ ที่เข้าอุโมงค์อบสี่ พิจารณาที่ชั้นของอุณหภูมิกลางอุโมงค์อบสี่.....	29
5-5 แสดงการเปรียบเทียบค่า k กับค่า $T_a = 35^{\circ}\text{C}$ ที่เข้าอุโมงค์อบสี่ พิจารณาที่ตำแหน่งไหน 633 เป็นตำแหน่งกลางอุโมงค์อบสี่.....	30
5-6 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิกลางอุโมงค์อบสี่ โดยเปรียบเทียบค่าความหนาของฉนวนใยแก้ว.....	31
5-7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาของฉนวนใยแก้วพิจารณา ที่ตำแหน่งไหน 640 เป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่ทำการวัดจริงที่ตำแหน่งที่ 1 (ภาพที่ 2-4) โดยใช้ค่า $k = 0.045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	32

สารบัญภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-8 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิชั้นกลาง คู่มือคอบลีโดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของฉนวนระหว่าง Air Gap กับ Glass wool.....	33
5-9 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ช่องทางเข้าคู่มือคอบลี.....	34
5-10 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบ ค่าอุณหภูมิของพื้นคู่มือคอบลีที่วัดได้จริง ($T_{actual} = 198\text{ }^{\circ}\text{C}$) กับอุณหภูมิของพื้น คู่มือคอบลีที่ค่า set point ($T_{SP} = 215\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	35

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และคำย่อ	คำอธิบาย
delx	พื้นที่ในแนวแกน x
dely	พื้นที่ในแนวแกน y
Ta	อุณหภูมิของอากาศภายนอกอุโมงค์อบสี
hA	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่อยู่หน้า ช่องทางเข้าอุโมงค์อบสี
Tg	อุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าอุโมงค์อบสี
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ ภายในอุโมงค์อบสี
Tr	อุณหภูมิของลมร้อนที่กลับเข้าเข้าอุโมงค์อบ สีอีกครั้งหนึ่ง
L1	ความหนาของเหล็ก
k1	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็ก
L2	ความหนาของฉนวนใยแก้ว(Glass Wool)
k2	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนใยแก้ว (Glass Wool)
L3,L5	ความหนาของสังกะสี
k3,k5	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสังกะสี
L4	ความกว้างของชั้นอากาศ(Air)
k4	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของช่องอากาศระหว่าง ผนังเหล็ก
h6	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่อยู่ ภายนอกอุโมงค์อบสี
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

สัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบาย

 T_{ij}

ค่าคุณทรมุมในตำแหน่งที่ทำการคำนวณ

 $T_{i-1,j}$

ค่าคุณทรมุมในจุดทางซ้ายของตำแหน่งที่ทำการคำนวณ

 $T_{i+1,j}$

ค่าคุณทรมุมในจุดทางขวาของตำแหน่งที่ทำการคำนวณ

 $T_{i,j-1}$

ค่าคุณทรมุมในจุดข้างบนของตำแหน่งที่ทำการคำนวณ

 $T_{i,j+1}$

ค่าคุณทรมุมในจุดข้างล่างของตำแหน่งที่ทำการคำนวณ



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

โรงงานผลิตถังสะสมสารทำความเย็น (ผลิตภัณฑ์) โดยใช้ระบบสายพานลำเลียงให้ถังสะสมสารทำความเย็นผ่าน กระบวนการชุบสี (สีดำ) เป็นลำดับแรก แล้วผ่านเข้าสู่อุโมงค์อบสีเพื่อทำให้สีที่ชุบนั่นแห้ง จากการศึกษาพบว่ามักมีปัญหาเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อน (เมษายน – มิถุนายน) เพราะอากาศโดยรอบมีอุณหภูมิสูงส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ทำให้สีที่อบไม่เรียบ (เป็นคลื่น) ทางโรงงานต้องนำผลิตภัณฑ์ที่ไม่เรียบมาทำการลอกสี, ฟันทราย, ชุบสี, และอบสีใหม่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเป็น 2 เท่าของผลิตภัณฑ์ที่เสีย รวมทั้งวิธีจ่ายลมร้อนเข้าสู่อุโมงค์อบสีด้วยแหล่งความร้อนที่ได้จากฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำให้สูญเสียการใช้พลังงานไฟฟ้ามาก จากปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการวิจัยเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสีของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย อุณหภูมิ, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, คุณสมบัติและความหนาของฉนวนใยแก้วที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสี ซึ่งจะมีผลกระทบกับผลิตภัณฑ์ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ปรับค่าตัวแปรให้เหมาะสม และศึกษาหลักการฉีดลมร้อนเป็นลำของลมร้อนแทนรูปแบบเดิมที่ใช้การอัดลมร้อน ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณลมร้อนและลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์ เพื่อการประหยัดพลังงานของอุโมงค์อบสี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอุณหภูมิ, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, คุณสมบัติและความหนาของฉนวนใยแก้ว และข้อมูลของระบบ Accumulator DIP line ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และในด้านการประหยัดพลังงาน และลดต้นทุนในกระบวนการผลิต
2. เพื่อจำลองแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบและประเมินประสิทธิภาพของระบบ Accumulator DIP line ใหม่เปรียบเทียบกับระบบ Accumulator DIP line เดิม
3. เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของการชุบและอบสีถังสะสมสารทำความเย็น

1.3 คำถามการวิจัย

1. ระบบ Accumulator DIP line มีหลักการทำงานอย่างไร?
2. การควบคุมการทำงานใช้หลักการอะไร?
3. ตัวแปรที่ต้องทำการวิเคราะห์ประกอบด้วยอะไรบ้าง?
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมต้องอยู่ในช่วงใด?
5. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คืออะไร? ใช้โปรแกรมอะไร?
6. ปริมาณการของระบบอุโมงค์คอปส์ถึงสะสมสารทำความเย็นมีขีดความสามารถอยู่ในอัตราเท่าไร?
7. ผลกระทบที่ได้จากการวิจัยมีอะไรบ้าง?

1.4 สมมติฐานการวิจัย

การนำตัวแปรมาวิเคราะห์เพื่อการจำลองแบบของระบบ Accumulator DIP line จะสามารถควบคุมการทำงานของระบบให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ ความเร็วที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดภาระในช่วงการทำงานสูงสุด ทำให้ลดปริมาณการใช้พลังงานความร้อน และเพิ่มคุณภาพให้แก่ผลิตภัณฑ์ โดยมีคุณลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์เป็นตัวกำหนด

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

กลุ่มเป้าหมาย หรือประชากร

เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของอุโมงค์คอปส์โดยนำตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิตั้งแต่ 25-35°C, ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตั้งแต่ 10-80 W/m²·K และค่าการนำความร้อนของฉนวนใยแก้วตั้งแต่ 0.0045-0.09 W/m·°C มา

ทำการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพื่อปรับปรุงความหนาของฉนวนที่เคลือบให้สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

เนื้อหาของการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลฐานที่ได้จากการทำงานจริงของระบบในปัจจุบันด้านเปอร์เซ็นต์ของเสีย ทั้งด้านผลิตภัณฑ์และพลังงาน
2. ศึกษาข้อมูลสภาพการทำงานของระบบและตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่สัมพันธ์กับการควบคุมการทำงาน
3. จำลองพฤติกรรมกระจายตัวของอุณหภูมิของระบบรวมถึงการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของระบบ
4. ศึกษาพฤติกรรมในการควบคุมโดยการใช้วิธีการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสี
5. หาแนวทางการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของฮีตเตอร์

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ความร้อนสัมผัส (sensible heat) หมายถึง ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าหรือออกจากวัสดุ และ ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ
2. ความร้อนแฝง (latent heat) หมายถึง ความร้อนที่วัสดุดูดซับหรือถ่ายเทออก ระหว่างการเปลี่ยนสถานะโดยที่มีอุณหภูมิคงที่
3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural film coefficient) หมายถึง ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและลักษณะการไหลของของไหลโดยที่ของไหลเกิดการไหลด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิ
4. อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature) หมายถึง อุณหภูมิในส่วนของอากาศแห้งในอากาศ
5. อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature) หมายถึง อุณหภูมิในส่วนของไอน้ำในอากาศ
6. สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) หมายถึง ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของวัสดุซึ่งการนำความร้อนจะเกิดในของแข็งหรือของไหลก็ได้แต่ของไหลต้องมีความเร็วในการไหลน้อยๆ
7. สารทำความเย็น (Refrigerant) หมายถึง สารตัวกลางที่มีหน้าที่รับความร้อนจากภายในพื้นที่ปรับอากาศและนำไปถ่ายเททิ้งภายนอกพื้นที่ปรับอากาศ

8. ถังสะสมสารทำความเย็น (Refrigerant Accumulator) หมายถึง ถังที่มีหน้าที่แยกไอของสารทำความเย็นออกจากสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวก่อนที่สารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่คอมเพรสเซอร์

9. ระบบสายพานลำเลียงรูปสี่ (Dip Line) หมายถึง ระบบสายพานลำเลียงของถังสะสมสารทำความเย็นเข้าสู่ขบวนการรูปสี่



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ความรู้พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรของอุโมงค์ออสซี่มีดังต่อไปนี้

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนในชั้นของแข็งหรือในชั้นของไหลที่หยุดนิ่ง

2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free Convection Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนในชั้นของไหลที่การไหลไม่ได้เกิดจากการขับเคลื่อนของแรงจากภายนอกแต่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

3. การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนในชั้นของไหลที่การไหลเกิดจากการขับเคลื่อนของแรงจากภายนอกเช่น Pump, Blower เป็นต้น

4. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลการแผ่รังสีความร้อนเป็นพลังงานที่ออกไปจากวัตถุในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีจะไม่อาศัยตัวกลางและมีการถ่ายเทพลังงานเร็วที่สุดด้วยอัตราเร็วของแสง

5. เฮอร์โมไดนามิกส์

เป็นการศึกษากลไกของการเปลี่ยนแปลงพลังงานหรือพลังงานความร้อนและในความรู้ทางเฮอร์โมไดนามิกส์นั้นความร้อนเป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายโอนเปลี่ยนเป็นพลังงานกลที่ทำประโยชน์ให้แก่มนุษย์ได้

2.2 ทฤษฎีที่รองรับในการวิจัย

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรของอุโมงค์คอบส์มีดังต่อไปนี้

1. ทฤษฎี Fourier's law
2. ทฤษฎี Newton's law of cooling
3. ทฤษฎี Finite Difference แบบ 2 มิติ
4. ทฤษฎี 1st law of thermodynamics (Conservation of Energy)
5. ทฤษฎี Energy balance of moist air
6. ทฤษฎี Mass balance on the dry air
7. ทฤษฎี Mass balance on the water vapor

2.3 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และคณะ การวิเคราะห์ตัวแปร จำลองแบบระบบ และปรับปรุง ตู้อบผ้าในเชิงพาณิชย์

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และคณะ (รายงานผลการวิจัยโครงการ วิจัยร่วมภาครัฐและเอกชนเชิงพาณิชย์

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ. 2549) ได้ทำการศึกษาวิจัย เรื่อง การศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปร

จำลองแบบและปรับปรุงตู้อบผ้าเชิงพาณิชย์ ของ บริษัท เท็กซ์มาสเตอร์ จำกัด โดยใช้ความร้อนจากไอน้ำอิ่มตัว

(Saturated Steam) และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam) ตู้อบผ้ามีขนาดความกว้าง 4,400 mm.

ความยาว 15,550 mm. และความสูง 5,210 mm. ความสามารถในการอบผ้าได้ 6 ถึง 60 m/min. ตัวแปร

สำคัญที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของการแพร่ความร้อน โดยการจำลองแบบทางทฤษฎี

ของระบบตู้อบผ้าด้วยโปรแกรม Airpak 2.0 แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่หนึ่ง การอบผ้าด้วยไอน้ำอิ่มตัวในช่วง

อุณหภูมิต่ำ 102°C ถึง 106°C กรณีที่สอง การอบผ้าด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในช่วงอุณหภูมิสูง 170°C ถึง

190°C ผลจากการจำลองแบบของระบบโดยการเปรียบเทียบระหว่างการอบผ้า 3 lane กับ 6 lane พบว่า

ในช่วงอุณหภูมิต่ำระหว่าง 102°C ถึง 106°C ที่ช่วงความเร็วของการแพร่ความร้อนในช่วง 0.5 m/s ถึง 1.5 m/s

ได้ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันเฉลี่ยช่วง 2.49 % ถึง 3.39 % และช่วงอุณหภูมิสูง 170°C ถึง 190°C ที่ช่วงความเร็ว 0.5 m/s ถึง 1.5 m/s ได้ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันเฉลี่ย 1.07 % ถึง 1.87 %

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และ จิตติ พัทธวณิช การศึกษาผลของการจัดวางตำแหน่งและความเร็วของช่องระบายอากาศ ในโรงงานผลิตอุปกรณ์ทางแพทย์

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และ จิตติ พัทธวณิช(รายงานผลการวิจัย 2544) ได้ทำการศึกษาวิจัย เรื่อง การคำนวณและวิเคราะห์ของการจัดวางระบบการระบายอากาศและความเร็วของลม ในการผลิตและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลขใน 3 มิติ ในสภาวะที่คงตัว การจำลองแบบด้วยการคำนวณหาค่าความเร็วที่ต้องระบายอากาศ ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลด้วยการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ผลที่ได้จากการจำลองแบบพบว่าได้ค่าความเร็วลมและตำแหน่งของช่องระบายอากาศ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง เป็นผลการจำลองระบบระบายอากาศในห้องผลิตขวดน้ำเกลือ ได้ช่องดึงอากาศจากนอกอาคารที่ต้องติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาด 1 m x 1 m โดยพัดลมต้องใช้พัดลม 8 ตัว แต่ละตัวมีอัตราการไหลตัวละ 5m³/s เพื่อดึงอากาศจากภายนอกเข้ามาในโรงงาน และช่องติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 1 m x 1 m โดยพัดลมต้องใช้พัดลม 4 ตัว แต่ละตัวมีอัตราการไหล 10 m³/s เพื่อดึงอากาศร้อนจากภายในโรงงาน จะสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงงานจาก 32-35 °C เป็น 30-32 °C ส่วนที่สอง เป็นผลการจำลองระบบระบายอากาศในโรงเก็บผลิตภัณฑ์ ได้ช่องดูดอากาศ เพื่อติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 1 m x 1 m โดยพัดลมต้องใช้พัดลมจำนวน 10 ตัว แต่ละตัวมีอัตราการไหล 10m³/s เพื่อให้ดูดอากาศจากภายนอกโรงงานจะสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเก็บยาจาก 36-40 °C เป็น 32-34 °C

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 แบบแผนทางการวิจัย

1. ทำการศึกษาข้อมูลโดยการค้นคว้าจากเอกสารที่ตีพิมพ์ทางวิชาการในหัวข้อที่เกี่ยวข้อง
2. นำตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับระบบมาใช้สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยสรุปผลการคำนวณจาก

โปรแกรมดังกล่าว

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ผลข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ ที่แสดงพฤติกรรมทางความร้อน และอุณหภูมิของระบบอุโมงค์อบสีในสภาวะแวดล้อมที่เป็นจริง

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

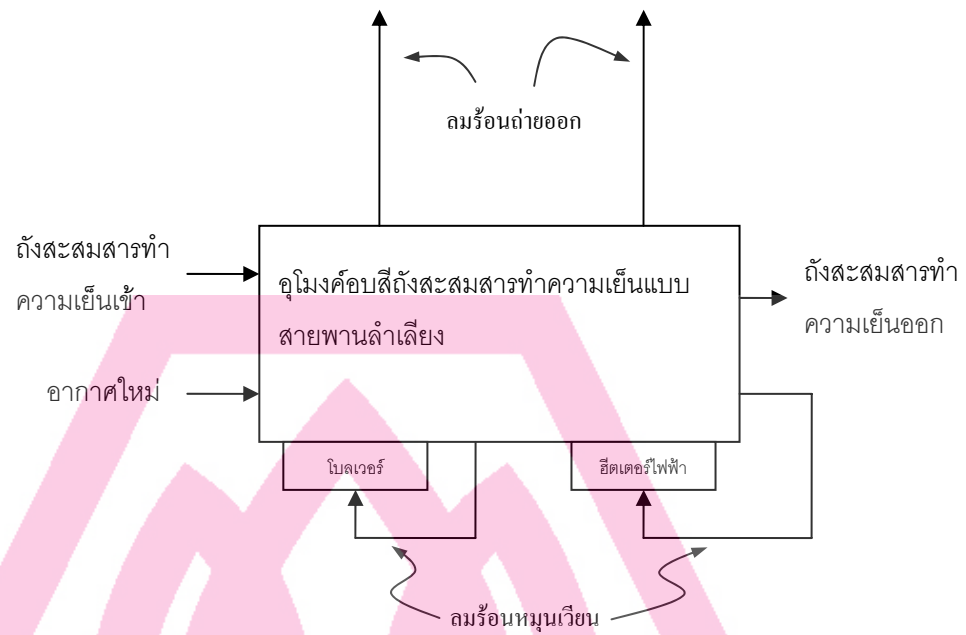
1. ศึกษาค้นคว้าหลักการการทำงานของระบบอุโมงค์อบสี
2. ศึกษาค้นคว้าและเก็บข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ สภาวะแวดล้อมที่เป็นจริงในพื้นที่เป้าหมายที่ทำการวิจัย โดยใช้อุปกรณ์วัดความเร็วลม, อุณหภูมิที่จ่ายให้กับอุโมงค์อบสีรวมทั้งอากาศที่ถูกปล่อยออกจากอุโมงค์อบสีสู่บรรยากาศภายนอก(Exhaust Air) และอากาศที่ถูกดูดจากบรรยากาศภายนอกสู่อุโมงค์อบสี(Fresh Air) ก่อนปรับปรุง
3. สร้างโปรแกรมการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้วิเคราะห์และแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) ภายในระบบอุโมงค์อบสี ที่สอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมที่เป็นจริงก่อนปรับปรุง
4. วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆโดยวิธี “Parametric Study” รวมทั้งวิเคราะห์หาแนวทางในการประหยัดพลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า
5. สร้างโปรแกรมการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้วิเคราะห์และแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) ภายในระบบอุโมงค์อบสี ที่สอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมที่เป็นจริงหลังปรับปรุง
6. ศึกษารวบรวมข้อมูลจากการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ ทำการวิเคราะห์ผลจากข้อมูลที่ได้
7. สรุป, จัดทำเอกสารต่างๆ, และรายงานผล

3.5 เครื่องมือการวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ จำนวน ...1...ชุด.
2. ใช้โปรแกรม MATLAB 7.6.0 (R2008a)
3. อุปกรณ์วิเคราะห์ผลและทำรายงาน (โปรแกรม MS Word, MS Excel, กล้องถ่ายรูป, printer)
4. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ(RTD, 0-650 °C) และความเร็วของอากาศ

3.6 หลักการทำงานของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น

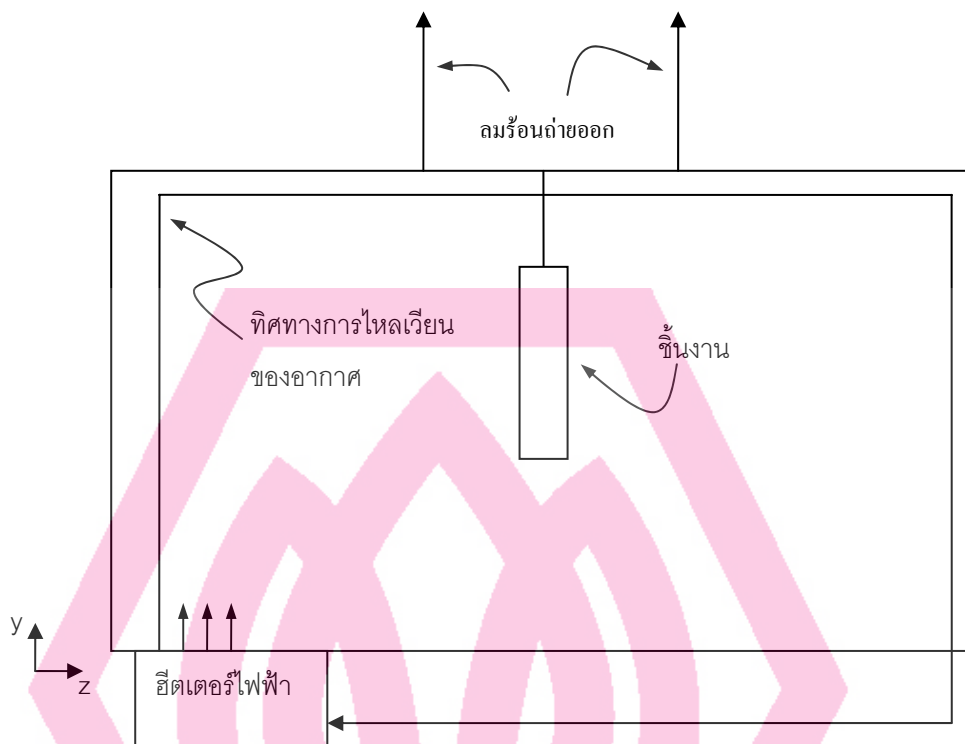
การเคลือบและอบสีถึงสะสมสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบการทำความเย็น และการปรับอากาศ เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ โดยใช้ระบบ Accumulator DIP line นี้ มีหลักการทำงานดังภาพที่ 3-1 เริ่มตั้งแต่การนำถึงสะสมสารทำความเย็น(ชิ้นงาน) มาทำการเคลือบสี(ชุบสี) เสร็จแล้วแขวนชิ้นงานไว้ที่สายพานลำเลียง สายพานลำเลียงนี้เป็นแบบต่อเนื่องมีจุดแขวนทั้งหมด 198 จุด แต่ละจุดแขวนมี 3 ตะขอ ขนาดของชิ้นงานแบ่งเป็น 2 ขนาด คือ ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ขนาดเล็กมีน้ำหนัก 2.5-4 kg แขวน 3 ลูกต่อ 1 จุดแขวน ส่วนขนาดใหญ่มีน้ำหนัก 20 kg แขวน 1 ลูกต่อ 3 จุดแขวน สายพานลำเลียงนำชิ้นงานเข้าเตาอบสีด้วยความเร็ว 0.45 m/min ความร้อนที่ใช้ในการอบสีได้มาจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า ที่ตรงตำแหน่งกลางเตาอบสีมี hot air circulation fan ขนาด 100 cmm × 70 mmA × 2.2 kW สายพานลำเลียงชิ้นงานเข้าเตาอบสีอย่างต่อเนื่อง ที่จุดก่อนออกต้องผ่าน air curtain fan ขนาด 60 cmm × 30 mmA × 1.5 kW แล้วลำเลียงต่อไปยังกระบวนการผลิตอื่น สำหรับความร้อนที่ใช้เคลือบอบสีแล้วปล่อยออกสู่อากาศ



ภาพที่ 3-1 หลักการทำงานของอุโมงค์อบสี่แบบสายพานลำเลียง

3.7 การควบคุมการทำงานของระบบอุโมงค์อบสี่ถึงสะสมสารทำความเย็น

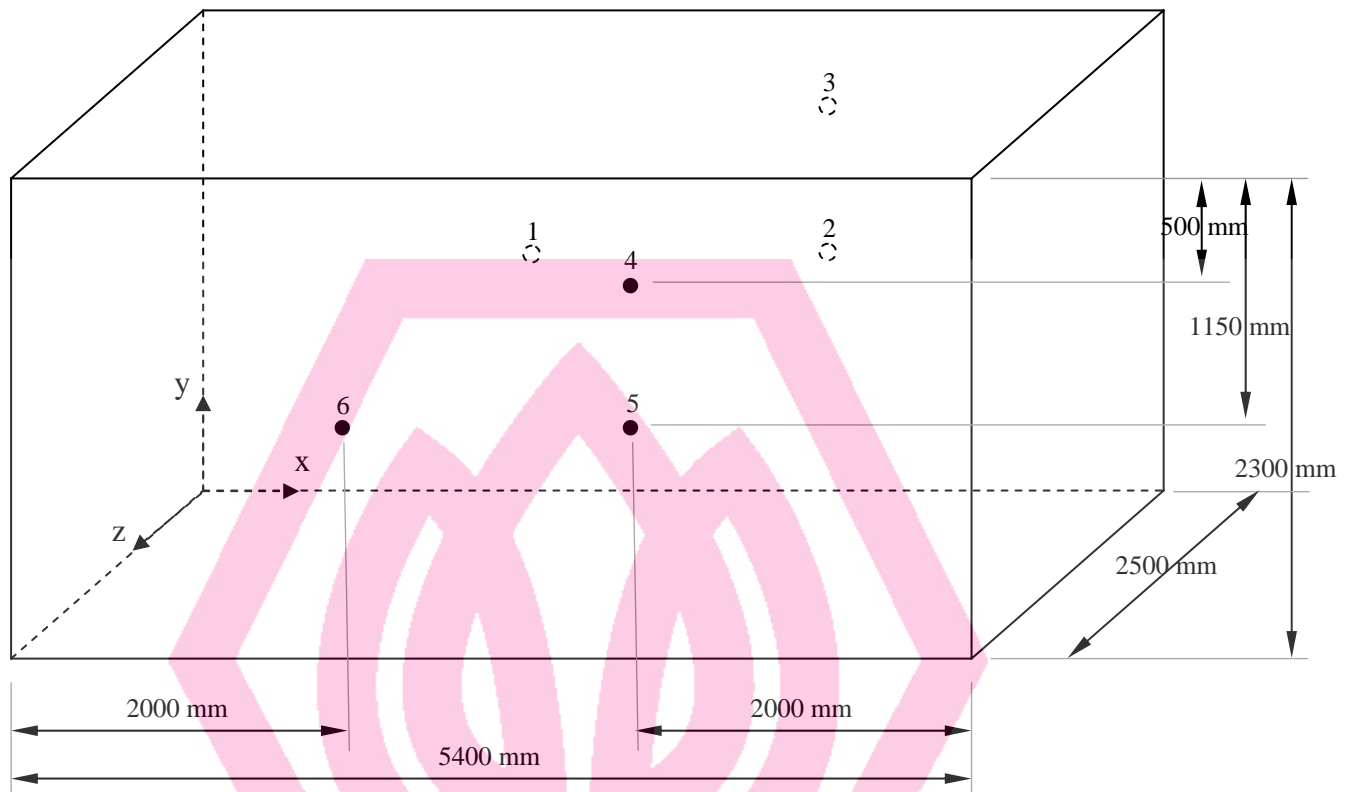
ผลจากการตรวจวัดความเร็วลมที่ช่องจ่ายลม(Diffuser) ทั้ง 18 จ่ายลมภายในอุโมงค์อบสี่พบว่าความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่สูงจากพื้นภายในอุโมงค์อบสี่ 40 cm ขึ้นไปมีค่าน้อยมากๆ แสดงว่าบริเวณลมร้อนรอบถึงสะสมสารทำความเย็นเคลื่อนที่ช้ามากๆ เพื่อให้สี่เคลือบแห้งอย่างช้าๆและสม่ำเสมออย่างทั่วถึงโดยที่อุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสี่ควบคุมด้วยเซนเซอร์ควบคุมอุณหภูมิ(Temperature RTD) ติดตั้งภายในช่องลมกลับและถูกตั้งค่าไว้ที่ 160 °C (Temperature Setting) ตลอดเวลาเพื่อควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 3-2



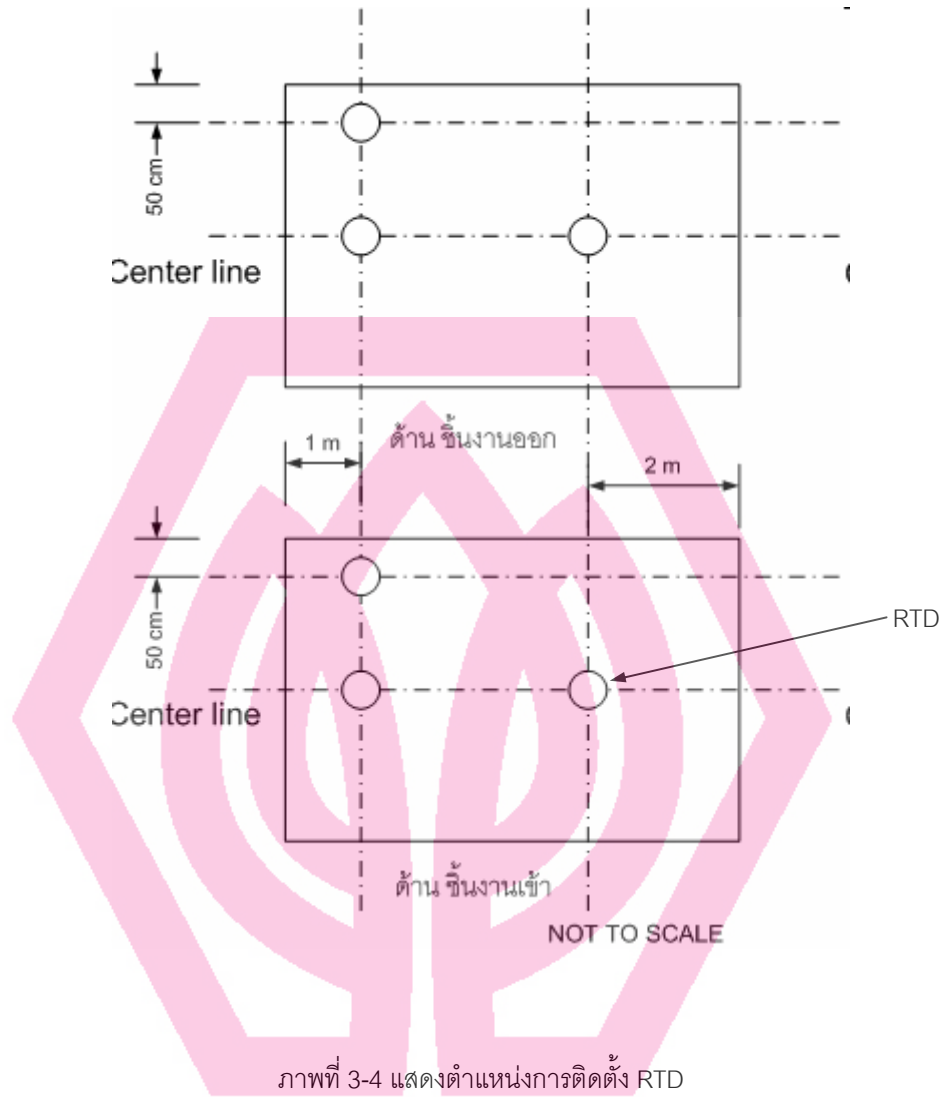
ภาพที่ 3-2 แสดงภาพตัดขวางและทิศทางการไหลเวียนของอากาศร้อน

3.8 การสำรวจและผลการเก็บข้อมูล (อุณหภูมิ) เบื้องต้น

การสำรวจเพื่อเก็บค่าความร้อนภายในอุโมงค์อบสตีโดยใช้อุปกรณ์วัดความร้อน ชนิด RTD มีพิกัดอุณหภูมิ 0°C ถึง 650°C ตามตำแหน่งการวัด ที่กำหนดโดยทีมที่ปรึกษาและผู้วิจัยมหาวิทยาลัยศรีปทุม จำนวน 6 จุด แต่ละจุดได้ติดตั้ง หัว sensor ห่างจากผิวผนังด้านใน ประมาณ 50 cm เก็บข้อมูลทุกๆ 30 วินาที การเก็บข้อมูลดังกล่าวแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงด้านชิ้นงานเข้าจำนวน 3 จุดและช่วงด้านชิ้นงานออกจำนวน 3 จุด ดังภาพที่ 3-3



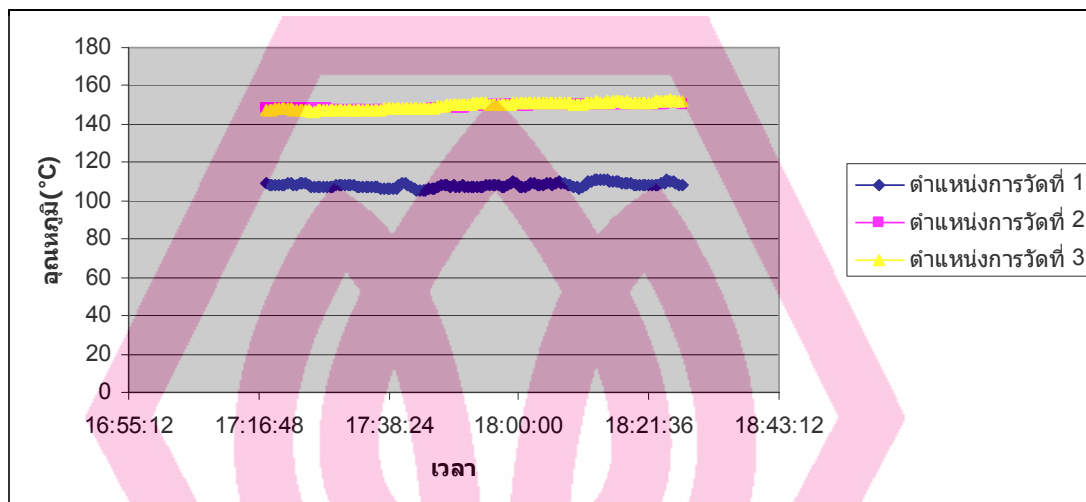
ภาพที่ 3-3 การติดตั้ง RTD (Overview)



ภาพที่ 3-5 แสดงภาพด้านบนและทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานภายในอุโมงค์อบสี

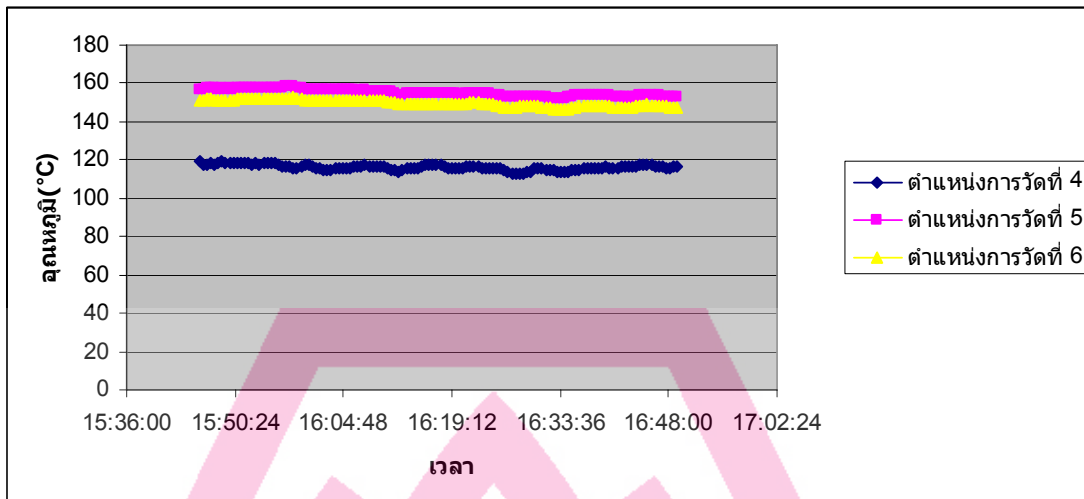
3.9 ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

การทำงานของอุโมงค์อบสีให้ปรับตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 160°C และเก็บข้อมูลที่เป็นค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีที่ตำแหน่งที่ 1,2 และ 3 (ค่าของข้อมูลอยู่ที่ภาคผนวก) จากข้อมูลนำมาพล็อตกราฟได้ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิในตำแหน่งการวัดที่ 1,2 และ 3

จากภาพที่ 3-6 แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งการวัดที่ 1 เป็นตำแหน่งช่องทางเข้า ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์อบสีที่ตำแหน่งการวัดที่ 2 และ 3 โดยจากภาพอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่ตำแหน่งการวัดภายในท่อรีเทิร์นซึ่งตั้งค่าไว้ที่ 160°C ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่อุโมงค์อบสีสูญเสียพลังงานความร้อนหรือฮีตเตอร์ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับลมร้อนที่รีเทิร์นกลับมาได้ดี



ภาพที่ 3-7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 4,5 และ 6

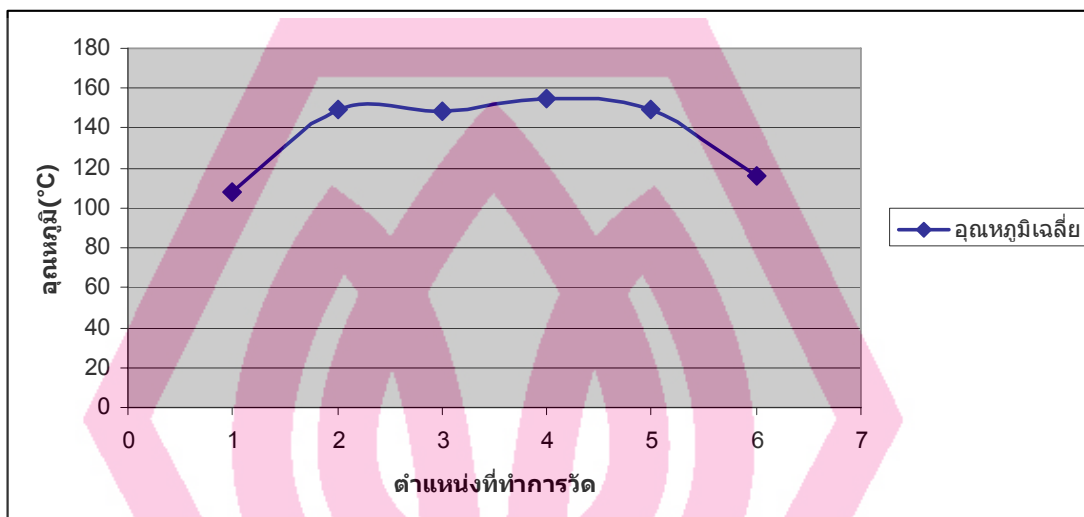
จากภาพที่ 3-7 แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งการวัดที่ 6 เป็นตำแหน่งช่องทางออก ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์คอบสีที่ตำแหน่งการวัดที่ 4 และ 5 โดยจากภาพอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่ตำแหน่งการวัดภายในเทอร์ริทรีนซึ่งตั้งค่าไว้ที่ 160°C ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่อุโมงค์คอบสีสูญเสียพลังงานความร้อนหรือฮีตเตอร์ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับลมร้อนที่รีเทิร์นกลับมาได้ดี

จากการคำนวณหาค่าอุณหภูมิอ้างอิงตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 6 มีค่า 126.59°C และ 118.54°C ตามลำดับ

ข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลในแต่ละช่วงเวลานำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อหาโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีและเพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณ จากข้อมูลที่ได้นำมาหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

ตำแหน่งที่ทำการวัด	ค่าเฉลี่ย
1	108.18
2	149.64
3	148.85
4	155.02
5	149.62
6	116.21

เพราะฉะนั้นในตำแหน่งที่ 1 มีระดับอ้างอิงที่ 126.59 °C ในตำแหน่งที่ 2,3,4,5 มีระดับอ้างอิงที่ 160 °C และในตำแหน่งที่ 6 มีระดับอ้างอิงที่ 118.54 °C แต่จากภาพที่ 3-3 และ ภาพประกอบที่ 3-4 จะเห็นว่าในแต่ละตำแหน่งที่วัดมาไม่มีตำแหน่งที่มีค่าเท่ากับระดับอ้างอิง



ภาพที่ 3-8 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยในตำแหน่งที่ทำการวัด

จากภาพที่ 3-8 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในอุโมงค์คอปสียูอยู่ที่ 137.92 °C และแสดงให้เห็นว่าอุโมงค์คอปสียูจะค่อยๆให้ความร้อนกับถังสะสมสารทำความเย็นในแต่ละช่วงเวลาที่ยังงานเคลื่อนตัวเข้าไปภายในอุโมงค์คอปสียูจนถึงตำแหน่งที่ 2 จึงทำให้ถังสะสมสารทำความเย็นและฮีตแล็บค่อยๆได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น เพื่อป้องกันการเกิด thermal shock กับฮีตแล็บและที่ตำแหน่ง 2 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและพยายามรักษาอุณหภูมิให้คงที่จนถึงตำแหน่งที่ 5 เพื่อทำให้ฮีตแล็บแข็งแล้วค่อยๆลดอุณหภูมิลงจนถึงตำแหน่งที่ 6 เพื่อทำให้ฮีตแล็บเย็นตัวลงก่อนที่ชิ้นงานจะเคลื่อนออกจากอุโมงค์คอปสียูแต่อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 3-8 แสดงให้เห็นว่ารูปโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอปสียูไม่เปลี่ยนแปลงแต่อุณหภูมิเฉลี่ยในอุโมงค์คอปสียูมีค่าต่ำกว่าระดับอ้างอิง 9.6 °C

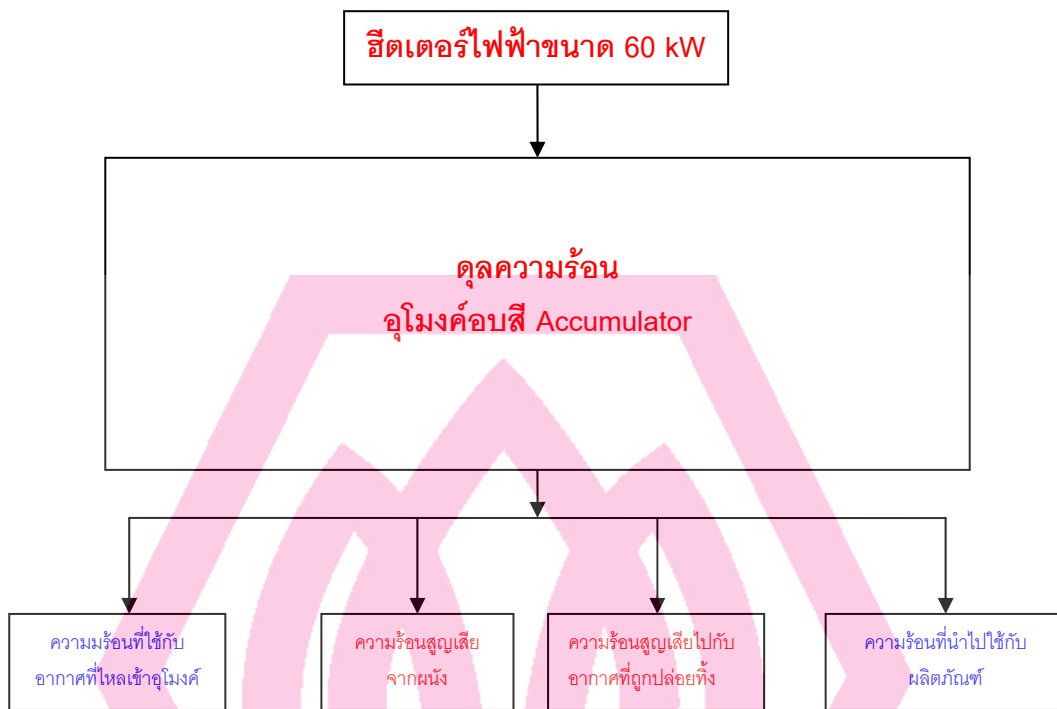


ภาพที่ 3-9 แสดงตำแหน่งท่อที่ปล่อยลมร้อนออกสู่บรรยากาศ

จากภาพที่ 3-9 จะเห็นว่ามีท่อปล่อยความร้อนหรืออากาศร้อนออกสู่บรรยากาศอีก 3 ท่อ เริ่มจากท่อที่อยู่ข้างนอกสุดเข้าไปข้างใน เป็นท่อที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ค่าที่วัดได้มีดังนี้

	ท่อที่ 1	ท่อที่ 2	ท่อที่ 3
ความเร็ว	1.0 m/s	0.5 m/s	3.2 m/s
อุณหภูมิ	54°C	42°C	63°C

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดพบว่ามีส่วนที่ปล่อยลมร้อนทั้งออกมามากพอสมควร เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อุณหภูมิภายในเตาอบสีไม่ถึง 160 °C ตามที่ตั้งค่าเอาไว้ ตรงส่วนนี้ต้องทำการศึกษาดูว่าจะสามารถลดปริมาณความร้อนที่ปล่อยทิ้งหรือนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งนี้ นากลับเข้ามาใช้ในระบบได้อีกหรือไม่



ภาพที่ 3-10 แสดงการดุลความร้อนของอุโมงค์อบสีจริง

3.10 ดุลความร้อน (Heat Balance)

พลังงานความร้อนที่ฮีตเตอร์ต้องให้กับลมร้อนที่รีเทิร์นกลับมา จะเป็นพลังงานความร้อนรวมที่นำไปใช้ประโยชน์ภายในอุโมงค์อบสีกับพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกจากอุโมงค์อบสี ดังสมการที่ 3.1

$$Q(\text{heater}) = \sum Q_{\text{Gain}} + \sum Q_{\text{Loss}} \quad (3.1)$$

$$Q(\text{heater}) = Q(\text{product}) + Q(\text{int ake - air}) + Q(\text{loss - wall}) + Q(\text{exited - air}) \quad (3.2)$$

$$Q(\text{loss - wall}) = Q(\text{heater}) - Q(\text{int ake - air}) - Q(\text{products}) - Q(\text{exited - air}) \quad (3.3)$$

หมายเหตุ: ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนใยแก้วที่ใช้เป็นแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่น (ใหม่) มีค่า

โดยประมาณ 0.045 W/m·K

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนใยแก้วในปัจจุบันมีค่าสภาพการนำความร้อนเป็น 0.083 W/m·K ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ติดตั้งเมื่อ 10 ปีที่แล้ว 84.44 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฉนวนใย

แก้ในปัจจุบันหมดสภาพการเป็นฉนวนแล้วทำให้สูญเสียความร้อนผ่านผนังอุโมงค์อบสีเพิ่มขึ้น 84.44 % และจะส่งผลกระทบต่อตรงต่อการเพิ่มและรักษาอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสี

3.11 การจำลองแบบปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังอุโมงค์อบสี

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวอุโมงค์อบสีด้านในที่มีอุณหภูมิเฉลี่ย 147.52°C ถึงผิวอุโมงค์อบสีด้านนอกที่มีอุณหภูมิ 40 °C โดยระหว่างผิวอุโมงค์อบสีด้านในและด้านนอกมีฉนวนใยแก้วแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่น (ใหม่) หนา 2 นิ้ว

$$\begin{aligned} \dot{Q}(\text{loss} - \text{wall}) &= \frac{kA(T_1 - T_2)}{x} & (3.4) \\ &= \frac{(0.045 \text{ W/m} \cdot \text{K})(58.55 \text{ m}^2)(420.52 - 313)\text{K}}{0.05 \text{ m}} \\ &= 5665.85\text{W} \quad \approx 5.67\text{kW} \end{aligned}$$

จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งฉนวนใหม่จะทำให้เกิดความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.67 kW และมีค่าน้อยกว่าความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังในสภาพปัจจุบันซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.6 kW โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในอุโมงค์อบสีมีค่าเท่ากับ 147.52°C ซึ่งเพิ่มขึ้น 9.6°C จากอุณหภูมิเฉลี่ยภายในอุโมงค์อบสี

ในปัจจุบัน

บทที่ 4

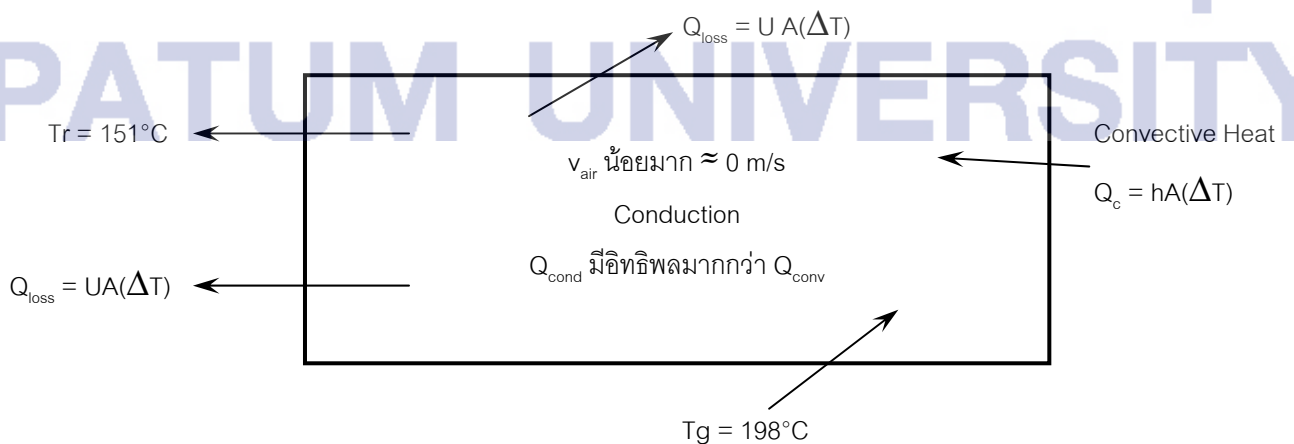
การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของอุโมงค์อบสี

4.1 สมมุติฐานการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

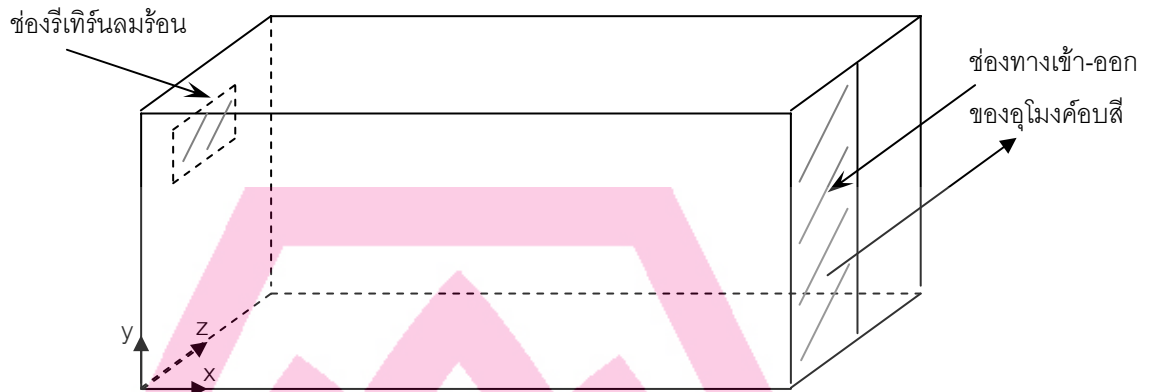
1. แบบจำลองเป็น 2 มิติ
2. การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ Steady State และ Conductive Heat Transfer
3. มวลอากาศภายในอุโมงค์อบสีมีความเร็วช้ามาก
4. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัตถุและอากาศคงที่
5. Boundary Condition ทางช่องรีเทิร์นและพื้นของอุโมงค์อบสีเป็นอุณหภูมิคงที่
6. Boundary Condition ทางผนังด้านซ้ายและด้านบนมีการสูญเสียความร้อน (Q_{loss})
7. Boundary Condition ทางด้านขวาเป็น Convective Heat Transfer

4.2 ทฤษฎีของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของอุโมงค์อบสี

จากสมมุติฐานมวลอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วช้ามาก ดังนั้น หลักการการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนจึงถูกนำมาใช้กับการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ โดยในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุโมงค์อบสีจะให้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิคงที่ที่ 198°C ไหลเข้าและกระจายตัวไปตามพื้นของอุโมงค์อบสี และมีความร้อนสูญเสียผ่านผนังอุโมงค์อบสีทางด้านบนของอุโมงค์อบสีและพื้นที่ผนังด้านล่างที่ต่ำกว่าช่องรีเทิร์นลมร้อน ส่วนอุณหภูมิของลมร้อนในช่องรีเทิร์นจะถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 151°C และมีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนที่ตำแหน่งช่องทางเข้าอุโมงค์อบสี ดังแสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Conductive Heat Transfer และ Boundary Conditions



ภาพที่ 4-2 แบบจำลองอุโมงค์อบสี 3 มิติ

ใช้ Steady State Heat Conduction equation กับอากาศภายในอุโมงค์อบสี

[Heat gain by Conduction in x direction] + [Heat gain by Conduction in y direction] = 0

$$\text{I} \quad : \quad A_c q_x - A_c q_{x-\Delta x} \quad \text{II} \quad \text{III} \quad (4.1)$$

$$\text{II} \quad : \quad A_c q_y - A_c q_{y-\Delta y} \quad (4.2)$$

$$\text{III} \quad : \quad \dot{Q}_L = UA_s (T(x,t) - T_\infty(t)) \quad \text{โดยที่ } T_\infty(t) \text{ เป็น Input Data} \quad (4.3)$$

ดังนั้น ให้ $\Delta x = \Delta y$

$$A_c q_x - A_c q_{x+\Delta x} + A_c q_y - A_c q_{y+\Delta y} = 0 \quad (4.4)$$

$$A_c \left[\frac{q_x - q_{x+\Delta x}}{\Delta x} \right] + A_c \left[\frac{q_y - q_{y+\Delta y}}{\Delta y} \right] = 0 \quad (4.5)$$

เนื่องจาก $\frac{\Delta q_{x \rightarrow x+\Delta x}}{\Delta x}$ ซึ่ง $g_{cond} = -k \frac{\partial T}{\partial x}$ ดังนั้น $\frac{\Delta q_{x \rightarrow x+\Delta x}}{\Delta x}$ สามารถเปลี่ยนเป็น $\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$

แล้วใช้ Equivalent Method ช่วยจะได้ $k \frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2}$ โดยที่ k คงที่ตลอดช่วงความยาวในแนวแกน x ของอุโมงค์

อบสี แทนค่าลงในสมการ 4.5 และ $\frac{\Delta q_{y \rightarrow y+\Delta y}}{\Delta y}$ โดยใช้เทคนิคเดียวกัน

$$k \frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} + k \frac{\Delta^2 T}{\Delta y^2} = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 T}{\Delta y^2} = 0 \quad (4.7)$$

และ $\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2}$ ซึ่งใช้ finite difference method สามารถเปลี่ยนเป็น $\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} = \frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2}$

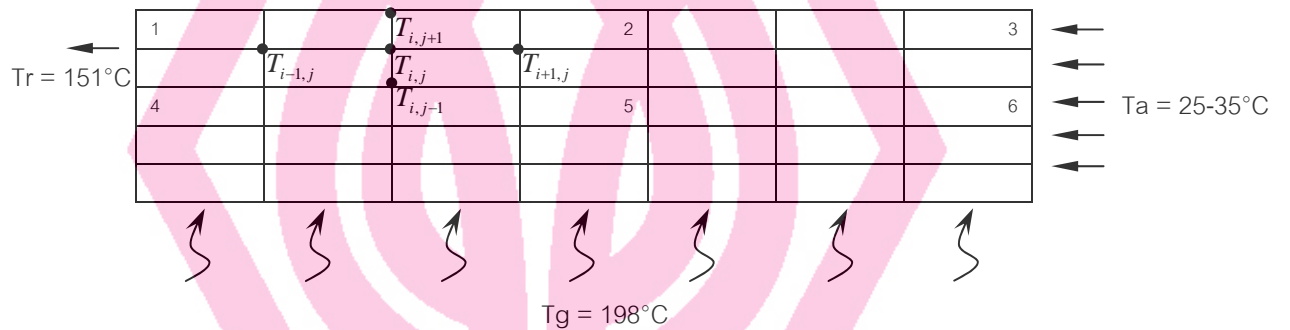
และ $\frac{\Delta^2 T}{\Delta y^2} = \frac{T_{m,n-1} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1}}{\Delta y^2}$ แทนลงในสมการ 4.7

ดังนั้น สมการที่ 4.7 สามารถเขียนอยู่ในรูป Discretation Equation ได้ดังนี้

$$\frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} + \frac{T_{m,n-1} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1}}{\Delta y^2} = 0 \tag{4.8}$$

Discretation Equation ของ Node ภายใน (Conduction)

$$\frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} + \frac{T_{m,n-1} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1}}{\Delta y^2} = 0 \tag{4.9}$$



ภาพที่ 4-3 แสดงการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติที่ใช้

ในโปรแกรม MATLAB ในการคำนวณด้วยวิธี “Jacobi Method”

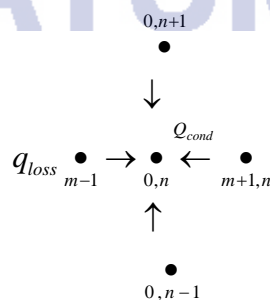
จากภาพประกอบที่ 4-3 กำหนดตัวแปรดังนี้ Ta คือ อุณหภูมิของอากาศที่บรรยากาศเข้าอุโมงค์อบดี

ทดสอบที่ 25°C ถึง 35°C ส่วน Tg คือ อุณหภูมิของลมร้อนเข้าเตาอบที่ 198°C ตามอุณหภูมิที่วัดได้จริง และ Tr

คือ อุณหภูมิของลมร้อนออกจากอุโมงค์อบดีที่ 151°C ตามอุณหภูมิที่วัดได้จริง โดยตัวเลข 1 ถึง 6 ใช้บอก

ตำแหน่งสมการที่ 1 ถึง 6 ตามสมการข้างล่าง

ที่ Node m = 0 (Left Boundary Condition) : อุณหภูมิคงที่และความร้อนสูญเสียผ่านผนังอุโมงค์อบดี



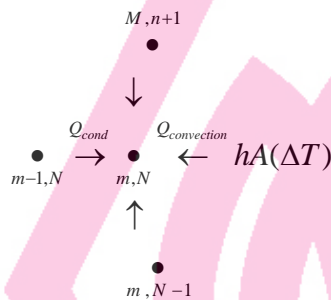
- $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$

- $q_{\text{loss}} = \left(\frac{U}{k\Delta x} \right) A_s (T_a - T_{0,n})$

โดยที่

U ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุโมงค์คอปสี่, $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$

ที่ Node $m = M$ (Right Boundary Condition): Heat Flux



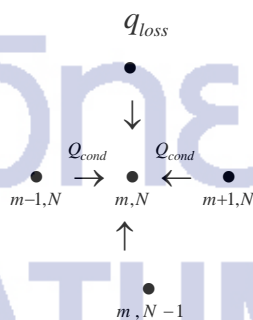
$$\sum_{\text{all side}} \dot{Q} = 0$$

$$hA_c(T_a - T_{M,n}) + kA_c \left(\frac{T_{M-1,n} - T_{M,n}}{\Delta x} \right) + kA_c \left[\frac{T_{n-1,M} - T_{n,M}}{\Delta y} \right] + kA_c \left[\frac{T_{n+1,M} - T_{n,M}}{\Delta y} \right] = 0 \quad (4.10)$$

โดยที่

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$

ที่ Node $n = N$ (Top Boundary Condition): ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา



$$\sum_{\text{all side}} \dot{Q} = 0$$

$$kA_c \left(\frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \right) + kA_c \left[\frac{T_{n-1,M} - T_{n,M}}{\Delta y} \right] + kA_c \left[\frac{T_{m+1} - T_{m,M}}{\Delta x} \right] - \frac{UA_s}{k} [T_a - T_{m,N}] = 0 \quad (4.11)$$

โดยที่

U ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุโมงค์คอปสี่, $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$

ที่ Node $n = 0$ (Bottom Boundary Condition) : อุณหภูมิคงที่

$$T = 198 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Input Data

$\rho_{\text{air mean in tunnel}}$		T_{∞} อุณหภูมิแวดล้อมในเวลาต่างๆ
$\rho_{\text{air intake } 30^{\circ}\text{C}}$		%RH:Relative humidity ในเวลาต่างๆ
$C_{p \text{ air}}$ ค่าความจุความร้อนของอากาศ		Δx ขนาดของพื้นที่ในแกน x
$k_{\text{air mean in tunnel}}$ ค่าการนำความร้อนของอากาศ		Δy ขนาดของพื้นที่ในแกน y
A_c พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์คอบบี้		
A_s พื้นที่ ผิวของผนังอุโมงค์ด้านบน, ซ้าย, ขวา		



บทที่ 5

ผลการวิจัย

5.1 หลักการทำงานของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น

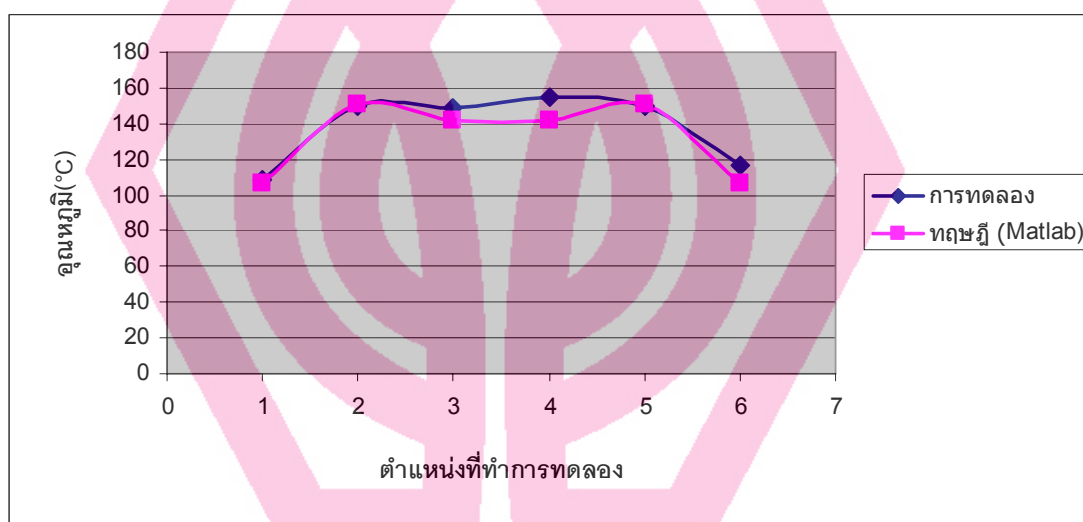
การเคลือบและอบสีถึงสะสมสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบการทำความเย็น และการปรับอากาศ เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ โดยใช้ระบบ Accumulator DIP line นี้ มีหลักการทำงานดังภาพที่ 3-1 เริ่มตั้งแต่การนำถึงสะสมสารทำความเย็น(ชิ้นงาน) มาทำการเคลือบสี(ชุบสี) เสร็จแล้วแขวนชิ้นงานไว้ที่สายพานลำเลียง สายพานลำเลียงนี้เป็นแบบต่อเนื่องมีจุดแขวนทั้งหมด 198 จุด แต่ละจุดแขวนมี 3 ตะขอ ขนาดของชิ้นงานแบ่งเป็น 2 ขนาด คือ ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ขนาดเล็กมีน้ำหนัก 2.5-4 kg แขวน 3 ลูกต่อ 1 จุดแขวน ส่วนขนาดใหญ่มีน้ำหนัก 20 kg แขวน 1 ลูกต่อ 3 จุดแขวน สายพานลำเลียงนำชิ้นงานเข้าเตาอบสีด้วยความเร็ว 0.45 m/min ความร้อนที่ใช้ในการอบสีได้มาจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า ที่ตรงตำแหน่งกลางเตาอบสีมี hot air circulation fan ขนาด 100 cmm × 70 mmA × 2.2 kW สายพานลำเลียงชิ้นงานเข้าเตาอบสีอย่างต่อเนื่อง ที่จุดก่อนออกต้องผ่าน air curtain fan ขนาด 60 cmm × 30 mmA × 1.5 kW แล้วลำเลียงต่อไปยังกระบวนการผลิตอื่น สำหรับความร้อนที่ใช้เคลือบอบสีแล้วปล่อยให้ระบายอากาศ

5.2 การควบคุมการทำงานของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น

ผลจากการตรวจวัดความเร็วลมที่ช่องจ่ายลม(Diffuser) ทั้ง 18 จ่ายลมภายในอุโมงค์อบสีพบว่าความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่สูงจากพื้นภายในอุโมงค์อบสี 40 cm ขึ้นไปมีค่าน้อยมากๆ แสดงว่าบริเวณลมร้อนรอบถึงสะสมสารทำความเย็นเคลื่อนที่ช้ามากๆ เพื่อให้สีเคลือบแห้งอย่างช้าๆและสม่ำเสมออย่างทั่วถึงโดยที่อุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีควบคุมด้วยเซนเซอร์ควบคุมอุณหภูมิ(Temperature RTD) ติดตั้งภายในช่องลมกลับและถูกตั้งค่าไว้ที่ 160 °C (Temperature Setting) ตลอดเวลาเพื่อควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 3-2

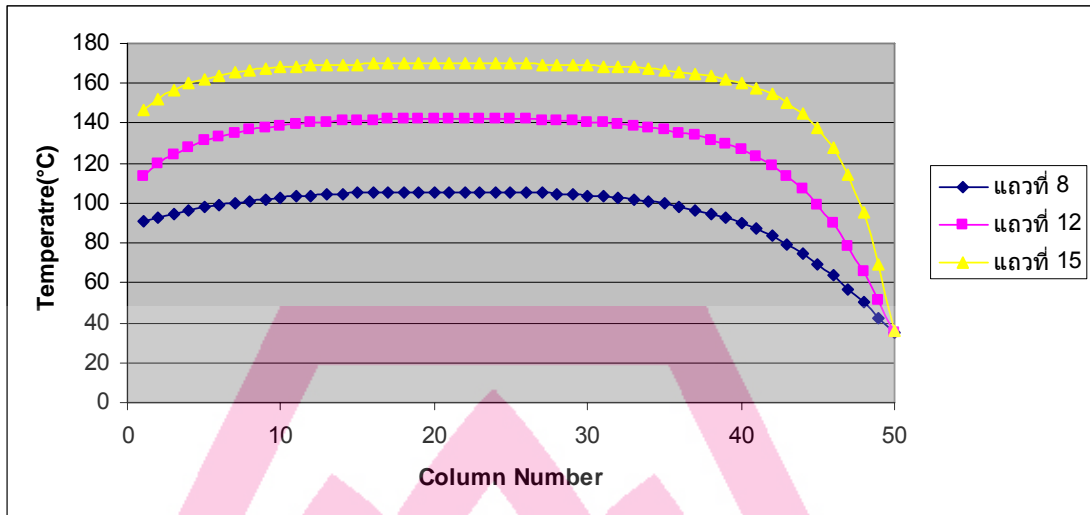
5.3 ตัวแปรที่ต้องทำการวิเคราะห์

การควบคุมตัวแปรการทำงานของอุโมงค์อบสีถึงจะสมารถทำความเข้าใจ ใช้การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ ด้วยหลักการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน(Heat Conduction) ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์คืออุณหภูมิ และการกระจายตัวของอุณหภูมิอันเป็นผลกระทบมาจากอุณหภูมิของพื้นอุโมงค์อบสีคั้งที่, อุณหภูมิคั้งที่ตำแหน่งช่องลมร้อนไหลกลับ, อุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์อบสี, วัสดุฉนวนและความหนาของฉนวนที่ใช้กับอุโมงค์อบสีและอุณหภูมิบรรยากาศรอบอุโมงค์ ผลการวิเคราะห์ตัวแปรการทำงานของอุโมงค์อบสีถึงจะสมารถทำความเข้าใจ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



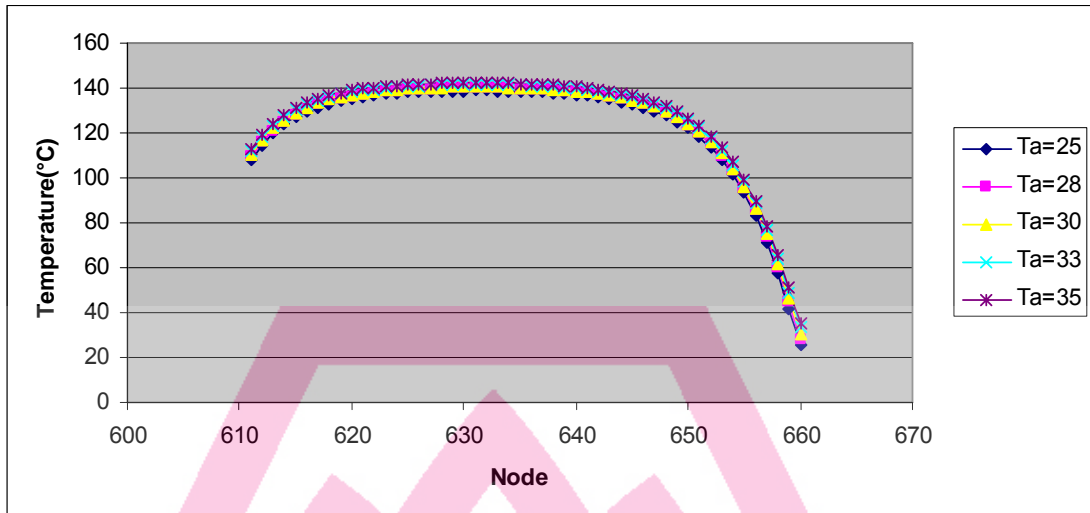
ภาพที่ 5-1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำการทดลองกับค่าที่ได้จากทฤษฎี (MATLAB) ที่ตำแหน่งเดียวกัน กับตำแหน่งที่ทำการทดลอง

ผลจากภาพที่ 5-1 พบว่าโปรไฟล์ของอุณหภูมิกายในอุโมงค์อบสีที่ได้จากการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับโปรไฟล์ของอุณหภูมิกายในอุโมงค์อบสีที่ได้จากการตรวจวัดจริงโดยตำแหน่งของจุดอ้างอิงจากภาพที่ 3-4 ซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงสุด 8.57 % ที่ตำแหน่งที่ 4 เนื่องจากที่ตำแหน่งการวัดที่ 4 เซ็นเซอร์ของ RTD ได้รับลมร้อนมากกว่าตำแหน่งการวัดอื่น เพราะแผ่นเหล็กลดความเร็วของลมร้อนที่ช่องจ่ายลมร้อนบริเวณตำแหน่งการวัดที่ 4 หายไป



ภาพที่ 5-2 แสดงลักษณะรูปแบบของโปรไฟล์ของการอบ เปรียบเทียบระหว่างแถวที่ 8, 12 และแถวที่ 15

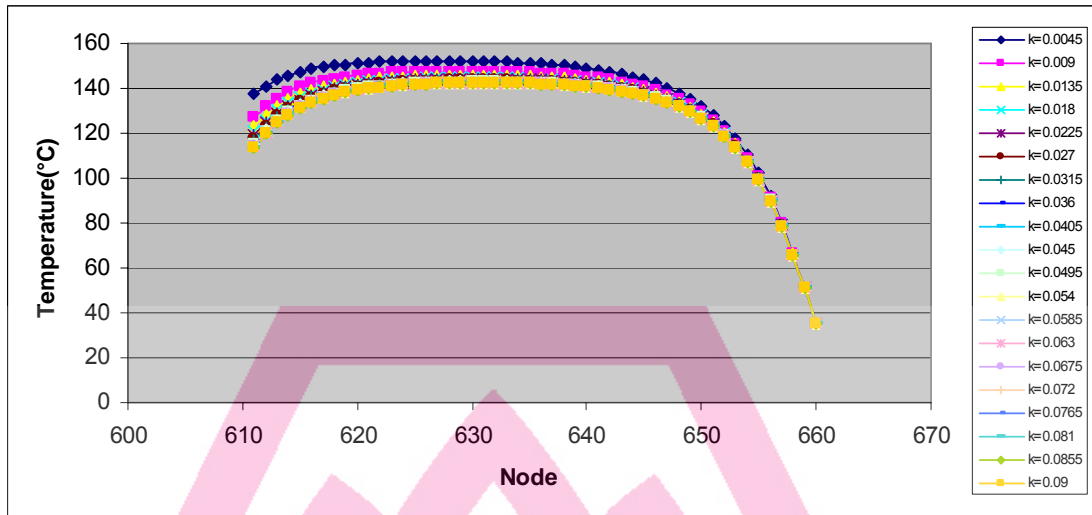
ภาพที่ 5-2 แสดงลักษณะรูปแบบของโปรไฟล์ของการอบ เปรียบเทียบระหว่างแถวที่ 8, 12 และแถวที่ 15 โดยที่แถวที่ 8-15 เป็นชั้นของอุณหภูมิที่เรียงลำดับจากชั้นที่ใกล้กับผนังอุโมงค์อบสี่ด้านบน (เพดานอุโมงค์) เรื่อยลงมาจนถึงชั้นของอุณหภูมิที่ใกล้กับพื้นของอุโมงค์ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้กับอุโมงค์อบสี่ จากโปรไฟล์ แสดงว่าถัง (Accumulator) เริ่มรับความร้อนที่ช่องทางเข้าที่เป็น column ที่ 50 แล้วอุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อยไป จากซ้ายไปขวาโดยช่วงแรกการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเร็วมากและการเพิ่มของอุณหภูมิจะน้อยลงช่วงกลาง อุโมงค์จนถึงจุดรีเทิร์นที่ column ที่ 10 และเริ่มลดอุณหภูมิลงจนถึงจุดทางออกอุโมงค์ที่ column ที่ 50 เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็น 2 มิติ ดังนั้นโปรไฟล์จะสมมาตรกันและชั้นของอุณหภูมิที่พื้นอุโมงค์จะมี อุณหภูมิสูงกว่าชั้นของอุณหภูมิที่อยู่สูงขึ้นไป แสดงว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากทางเข้าอุโมงค์ไปถึงท้าย อุโมงค์และจากล่างขึ้นบน



ภาพที่ 5-3 แสดงการเปรียบเทียบค่า $T_a = 25-35^{\circ}\text{C}$ ที่เข้าเตาอบ พิจารณาที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์อบดี

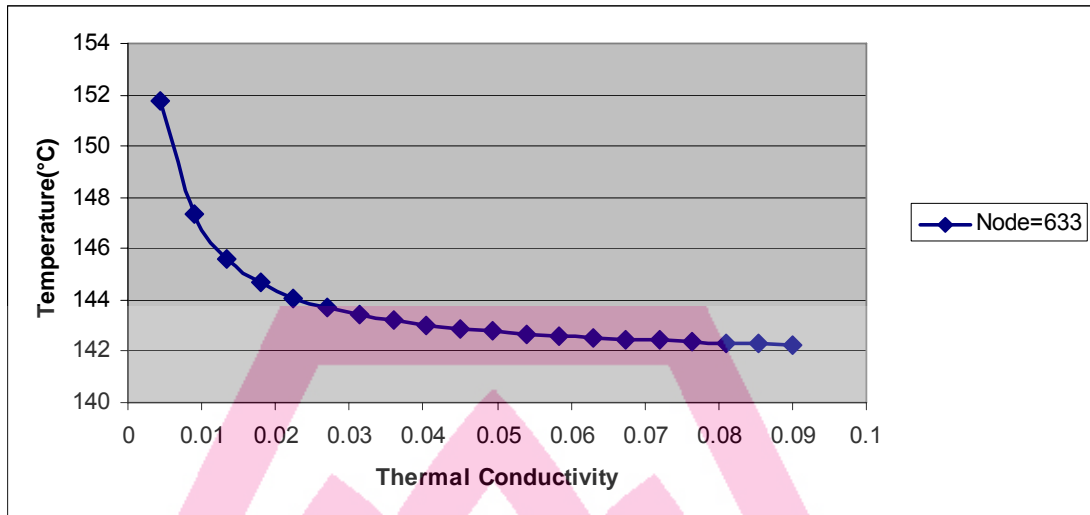
ในแนวแกน x และค่า $k = 0.08325 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

ภาพที่ 5-3 แสดงเปรียบเทียบค่า T_a ในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 35°C ผลที่ได้ คือ ค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบดีที่ $T_a = 25^{\circ}\text{C}$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบดีที่ $T_a = 35^{\circ}\text{C}$ อยู่ประมาณ 5°C ถึง 9°C ในช่วง 0.9 m แรกจากช่องทางเข้าอุโมงค์และจากช่วง 0.9 m ไปจนถึงช่วงท้ายอุโมงค์อุณหภูมิภายในอุโมงค์อบดีที่ $T_a = 25^{\circ}\text{C}$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบดีที่ $T_a = 35^{\circ}\text{C}$ อยู่ประมาณ 3°C ถึง 4°C ซึ่งแสดงว่า T_a ที่ช่องทางเข้าอุโมงค์มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์ในช่วงต้นทางของอุโมงค์



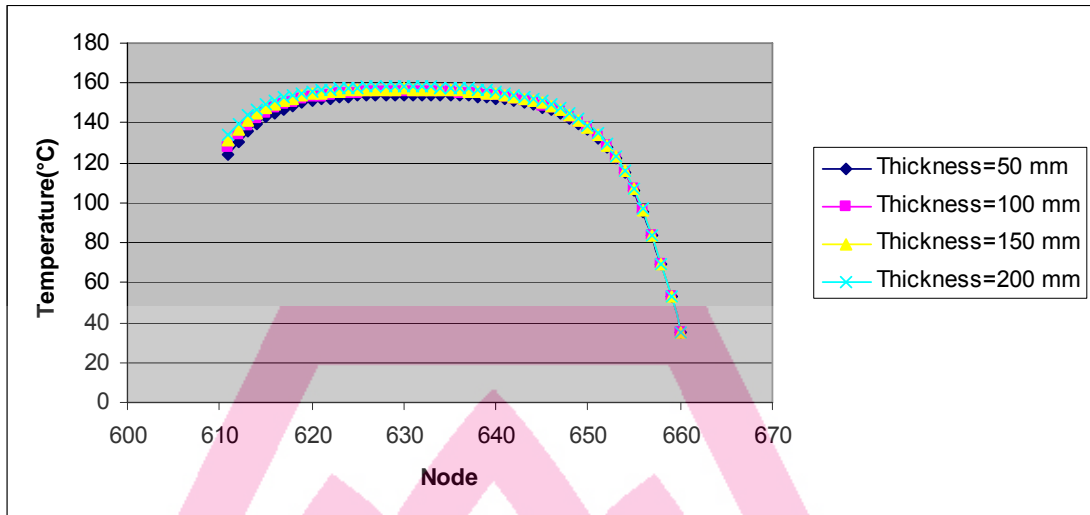
ภาพที่ 5-4 แสดงการเปรียบเทียบค่า k กับค่า $T_a = 35^\circ\text{C}$ ที่เข้าอุโมงค์อบสีพิจารณาที่ชั้นของอุณหภูมิ
กลางอุโมงค์อบสี

ภาพที่ 5-4 แสดงถึงการเปรียบเทียบลักษณะของโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีเมื่อค่า
สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนเปลี่ยนแปลงจาก $0.0045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ถึง $0.090 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ จากโปรไฟล์แสดงให้เห็น
เห็นว่าผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์ช่วง 1 m แรก
จากทางเข้าอุโมงค์และจะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์อย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ช่วง 2 m ขึ้นไป



ภาพที่ 5-5 แสดงการเปรียบเทียบค่า k กับค่า $T_a = 35^\circ\text{C}$ ที่เข้าอุโมงค์อบสีที่พิจารณาที่ตำแหน่งโหนด 633 เป็นตำแหน่งกลางอุโมงค์อบสี

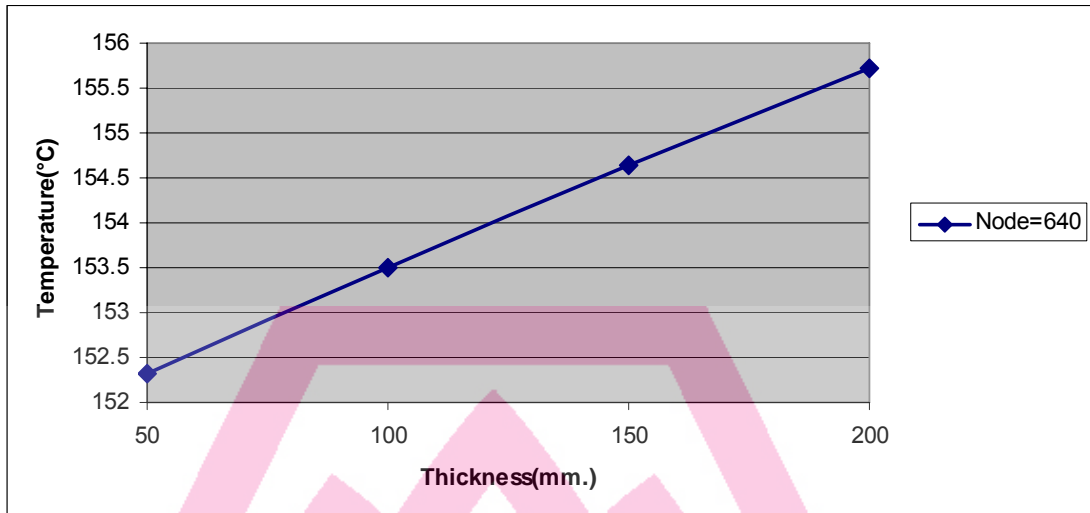
ผลจากภาพที่ 5-5 พบว่าฉนวนใยแก้วที่มีคุณภาพดีจะมีค่า k ที่ต่ำ เห็นได้จากผลการคำนวณในตารางที่ 5 เริ่มตั้งแต่ $0.0045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ถึง $0.090 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ โดยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน (k) ขึ้นครั้งละ 10% ค่าที่ได้พบว่าค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีจะลดลงเป็นส่วนกลับกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน (k) ที่จะเพิ่มสูงขึ้น โดยตั้งแต่ว่า $k = 0.072 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ไปแล้ว อุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีค่อนข้างจะคงที่



ภาพที่ 5-6 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิกลางอุโมงค์คอบสีโดยเปรียบเทียบค่าความหนาของฉนวนใยแก้ว

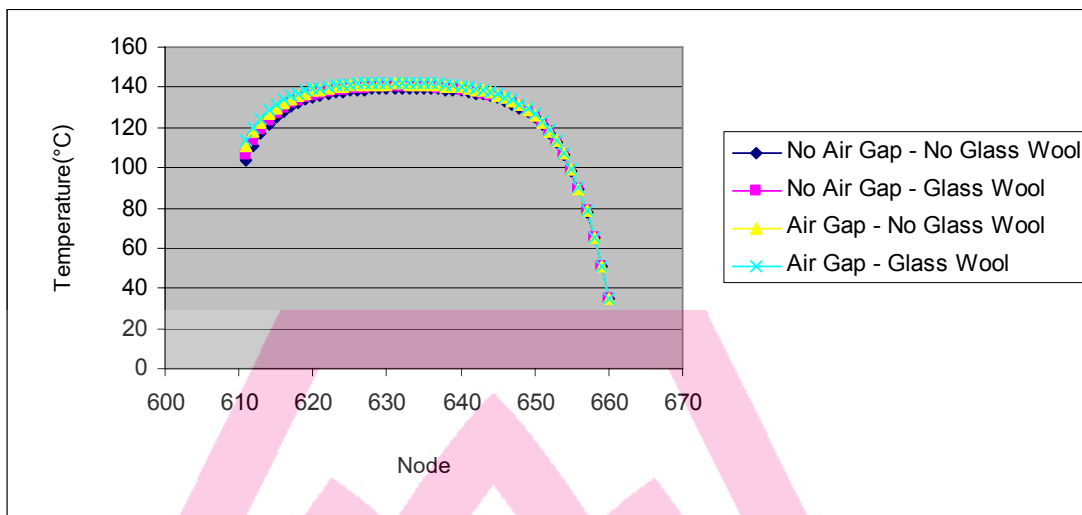
ผลจากภาพที่ 5-6 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าความหนาของฉนวนใยแก้ว

พิจารณาที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์คอบสีในแนวแกน x เมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนใยแก้วขึ้นทำให้ค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีเพิ่มขึ้น 0.5 °C ถึง 1 °C ในช่วง 3.3 m แรก จากช่องทางเข้าอุโมงค์และในช่วงท้ายของอุโมงค์คอบสีอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีเพิ่มขึ้น 2 °C ถึง 3 °C ดังนั้นการเพิ่มฉนวนใยแก้วทำให้อุโมงค์สามารถรักษาอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีได้ดีขึ้น เมื่ออุโมงค์คอบสามารถรักษาอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบได้ดีขึ้น พลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่อุโมงค์คอบสีก็ลดลง จึงเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าลง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตสินค้าลงได้



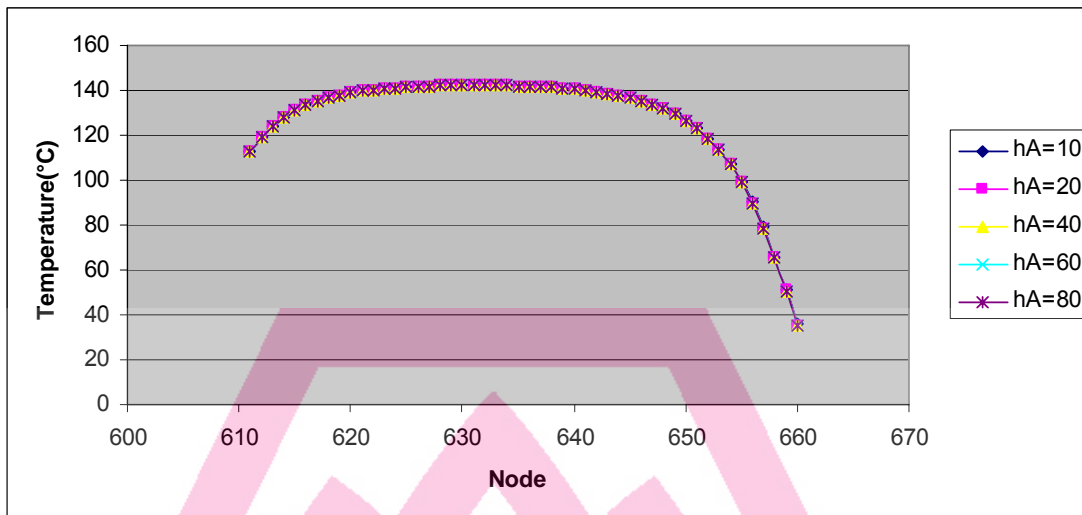
ภาพที่ 5-7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาของฉนวนใยแก้วพิจารณาที่ตำแหน่งโหนด 640 เป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่ทำการวัดจริงที่ตำแหน่งที่ 1 (ภาพที่ 2-4) โดยใช้ค่า $k = 0.045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

ผลจากภาพที่ 5-7 แสดงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาตั้งแต่ 50 mm ถึง 200 mm ค่า $k = 0.045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ และค่า $T_a = 35^\circ\text{C}$ ที่ตำแหน่งหนึ่งภายในอุโมงค์อบสีจากภาพที่ 5-7 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความหนาขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีสูงขึ้นตามไปด้วย เห็นได้จากเส้นกราฟนั้นเป็นเส้นตรง เพราะว่าเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนใยแก้วขึ้นแล้ว จะทำให้อุโมงค์อบสีสามารถรักษาอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีได้ดีขึ้น แต่ถ้าเพิ่มความหนาของฉนวนใยแก้วขึ้นมากไปจะเป็นการสิ้นเปลืองต้นทุนเกินไป ดังนั้นควรทำการเปรียบเทียบค่าความหนาของฉนวนใยแก้วที่เหมาะสมทั้งผลกระทบต่อความร้อนและราคาของฉนวนใยแก้ว



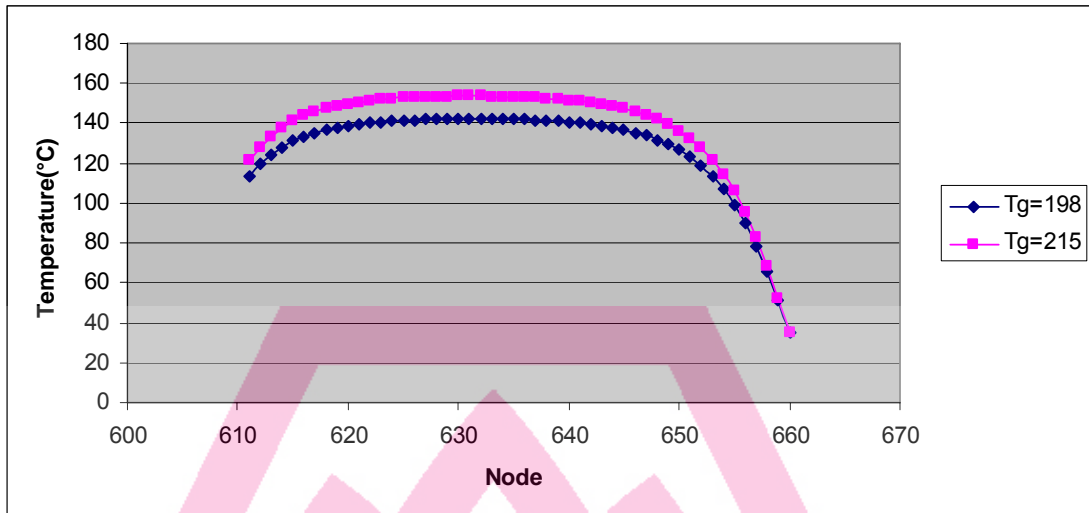
ภาพที่ 5-8 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิชั้นกลางอุโมงค์คอบสีโดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของฉนวนระหว่าง Air กับ Glass wool

จากภาพที่ 5-8 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิชั้นกลางอุโมงค์คอบสีโดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของฉนวนระหว่าง Air กับ Glass Wool จะเห็นว่า No Air – No Glass Wool, No Air – Glass Wool, Air – No Glass Wool และ Air - Glass Wool มีค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีตั้งแต่ต่ำไปหาสูงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการมีฉนวนทั้ง Air gap และ Glass Wool นั้น ทำให้อุโมงค์คอบสีสามารถรักษาอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากช่องอากาศ (Air Gap) ระหว่างแผ่นเหล็กกับฉนวนใยแก้ว (Glass Wool) มีค่าการนำความร้อนต่ำมากทำให้ความร้อนสูญเสียผ่านทางผนังอุโมงค์คอบสีมีค่าน้อยลง



ภาพที่ 5-9 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ช่องทางเข้าอุโมงค์คอบสี

จากภาพที่ 5-9 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ช่องทางเข้าอุโมงค์คอบสี พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วง $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ถึง $80 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ซึ่งเป็นช่วงที่อากาศของบรยายกาศภายนอกไหลเวียนโดยไม่มีผลกระทบกับโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสี



ภาพที่ 5-10 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของพื้นอุโมงค์ที่วัดได้จริง

($T_{\text{actual}} = 198 \text{ }^{\circ}\text{C}$) กับอุณหภูมิของพื้นอุโมงค์ที่ค่า set point ($T_{\text{sp}} = 215 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

ผลจากภาพที่ 5-10 แสดงว่าอุณหภูมิที่พื้นอุโมงค์ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนของอุโมงค์คอบสีมีอิทธิพลต่อโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีในช่วงกลางถึงท้ายของอุโมงค์คอบสีอย่างมาก ผลต่างของอุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะช่วง 2.4 m จากช่องทางเข้าอุโมงค์ถึงช่วง 3.4 m ของอุโมงค์มีผลต่างของอุณหภูมิ $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่ในช่วง 0.1 m แรกจากช่องทางเข้าอุโมงค์โปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีมีผลต่างของอุณหภูมิเพียง $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับกลางอุโมงค์คอบสี

5.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุม

ผลจากการตรวจสอบอุโมงค์คอบสีพบว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ที่ผู้ควบคุมอยู่ที่ $160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่จากการวัดด้วย TRD ในตำแหน่งที่ตั้งพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิมิถึงที่ตั้งไว้และอุณหภูมิตั้งตำแหน่งช่องลมร้อนไหลกลับมีอุณหภูมิ $151 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากภายในอุโมงค์คอบสีมีการเคลื่อนที่ของอากาศน้อยมากโดยเฉพาะในช่วงความสูงที่ถึงสระสารทำความเย็นแขวนและจุ่มอยู่ในลมร้อน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีผลต่ออุณหภูมิและการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในอุโมงค์คอบสีน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศในตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์และอุณหภูมิที่พื้นอุโมงค์คอบสี ดังนั้นจากภาพที่ 5-3 และภาพที่ 5-10 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ควบคุมอุณหภูมิภายในอุโมงค์คอบสีคืออุณหภูมิของอากาศในตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์ควรมีค่าสูงกว่า $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่ไม่ควรเกิน $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิตั้งตำแหน่งอุโมงค์คอบสีควรมีค่าของอุณหภูมิที่ $215 \text{ }^{\circ}\text{C}$

5.5 เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องมือตรวจวัดค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีคือ RTD (Remote Temperature Detector) ที่ติดตั้งในตำแหน่งต่างๆดังภาพที่ 3-4. เครื่องมือตรวจวัดค่าอุณหภูมิภายนอกอุโมงค์อบสีและความเร็วของอากาศภายในอุโมงค์อบสีคือ multi-meter ประกอบด้วย anemometer, thermometer, และ humidity meter. โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ MATLAB Program และวิธีที่ใช้ในแก้ปัญหา (Solving Method) คือวิธี Iteration (Jacobi Method)

5.6 ขีดความสามารถของระบบอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็น

ขีดความสามารถของระบบอุโมงค์อบสีนั้นสามารถปรับได้โดยปรับที่ความเร็วของสายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิของลมร้อนที่พื้นอุโมงค์อบสี แต่ความเร็วของสายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์จะต้องสัมพันธ์กับความยาวของอุโมงค์อบสี, ขนาดของผลิตภัณฑ์ และการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในอุโมงค์อบสี ซึ่งจะมีผลต่อความแห้งของสีเคลือบและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในปัจจุบันความเร็วของสายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์อยู่ที่ 0.45 m/min และอุณหภูมิของลมร้อนที่พื้นอุโมงค์อบสีถูกปรับตั้งที่ 198°C

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ผลสรุปการวิจัยพบว่าสถานะของอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็นในปัจจุบันหรือสภาพก่อนการปรับปรุงอยู่ในสภาวะที่เบี่ยงเบนไปจากสภาวะติดตั้ง เช่นสภาพของแผ่นเหล็กที่ช่องจ่ายลมร้อน, สีเคลือบที่หดยึดปิดช่องจ่ายลมร้อนเนื่องจากแผ่นเหล็กหาย, ฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีสีเคลือบเคลือบที่หลุดหรือขาดลวดกำเนิดความร้อน, การปล่อยอากาศร้อนทิ้งมากเกินไปซึ่งทั้งหมดนี้มีผลต่อการใช้พลังงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าและคุณภาพของผลิตภัณฑ์และทั้งหมดนี้เนื่องมาจากการใช้งานโดยขาดการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องอีกทั้งฉนวนใยแก้วของอุโมงค์อบสีเสื่อมคุณภาพ 84.44 % จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์พบว่าความหนาและคุณภาพของฉนวนใยแก้วมีผลกระทบต่อการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในอุโมงค์อบสีโดยความหนาของฉนวนเป็นสัดส่วนโดยตรงกำลังหนึ่งกับอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีที่ตำแหน่งใดๆและคุณภาพของฉนวนมีอิทธิพลต่อโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อย่างมากโดยเฉพาะช่วงกลางและทำอุโมงค์อบสีและที่ตำแหน่งใดๆคุณภาพของฉนวนเป็นสัดส่วนกำลังสองกับอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีอีกทั้งอุณหภูมิของอากาศที่ช่องทางเข้าอุโมงค์อบสีและอุณหภูมิที่พื้นอุโมงค์อบสีมีอิทธิพลต่อโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในอุโมงค์อย่างมากโดยเฉพาะช่วงกลางและทำอุโมงค์อบสี อุณหภูมิแวดล้อมของอุโมงค์อบสีเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิของอุโมงค์อบสีแต่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุโมงค์อบสีโดยเฉพาะความหนาฉนวนและชนิดของฉนวน

6.2 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง

ผลจากการวิจัยและการตรวจสอบและวัดค่าตัวแปรภายในอุโมงค์อบสีผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. เตาอบสีไม่สามารถรักษาอุณหภูมิที่ 160 °C ได้ตามที่ตั้งค่าเอาไว้ ทำให้ฮีตเตอร์ต้องทำงานตลอดเวลาจึงเป็นเหตุสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก ควรติดตั้งฉนวนใหม่แทนฉนวนเก่าเนื่องจากฉนวนเก่าเสื่อมสภาพ

2. ที่ตัวฮีตเตอร์มีไอของสีเคลือบเกาะและเคลือบผิวของขดลวดกำเนิดความร้อนทำให้ลวดกำเนิดความร้อนถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศได้ไม่มากเป็นผลทำให้อุณหภูมิของอากาศต่ำกว่า 215°C ซึ่งเป็นค่าที่ตั้งไว้ที่ตำแหน่ง Cut Off ทำให้ลวดกำเนิดความร้อนทำงานและใช้กระแสไฟฟ้าตลอดเวลา ดังนั้นควรทำความสะอาดลวดกำเนิดความร้อนเพื่อให้ลวดกำเนิดความร้อนลดการใช้พลังงานได้

3. มีการปล่อยความร้อนทิ้งมากเกินไป (0.33 kg/s) ควรหาวิธีนำความร้อนนี้กลับมาใช้ในระบบอีก หรือลดปริมาณอากาศที่ปล่อยทิ้งโดยไม่มีผลกระทบต่อชิ้นงาน

4. มีการแขวนถึงสะสมสารทำความเย็นลูกเล็กสลับกับลูกใหญ่ จึงไม่สามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิและความเร็วของสายลำเลียงผลิตภัณฑ์ภายในอุโมงค์อบสีได้อย่างเหมาะสม ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

5. ในระหว่างที่เป็นเวลาพักงานนั้น สังเกตเห็นว่ามีชิ้นงานค้างอยู่ในเตาอบสี เนื่องจากสายพานไม่ลำเลียงออกมาแต่ฮีตเตอร์ยังคงทำงานอยู่ในลักษณะนี้จะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนมากเกินไป ควรปล่อยให้สายพานลำเลียงชิ้นงานออกมาอย่างต่อเนื่องเหมือนช่วงเวลาทำงานปกติ

6. แผ่นเหล็ก (Cover Plate) ของช่องปล่อยลมร้อน (Diffuser) ภายในอุโมงค์อบสีถูกถึงสะสมสารทำความเย็นที่แขวนอยู่ที่สายพานลำเลียงหล่นทับทำให้แผ่นเหล็กนั้นเสียรูปซึ่งปิดกระแสลมร้อนที่จะไหลเข้าอุโมงค์อบสีทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณอื่นและเป็นสาเหตุทำให้โปรไฟล์ของอุณหภูมิเปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งส่งผลทำให้สีเคลือบแห้งไม่เท่ากัน

7. ชิ้นงานที่ผ่านการอบสีแล้วบางส่วนมีลักษณะเป็นคลื่นไม่เรียบ โดยอาจจะเกิดจากช่องปล่อยลมร้อนบางช่องชำรุดเสียหายเองจากไม่มีแผ่นเหล็ก (Cover Plate) ลดความเร็วลมทำให้กระแสลมร้อนไหลพุ่งขึ้น

ด้วยความเร็วที่สูงกว่าบริเวณอื่นมากและปะทะกับสีเคลือบที่ยังไม่แห้งเนื่องจากปัญหาในข้อ 6

8. ชิ้นงานที่ผ่านการอบสีแล้วบางส่วนมีรอยขีดข่วน ควรตรวจวิธีการขนส่งภายในโรงงานว่ามีจุด

ใดบ้างที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน เมื่อตรวจพบแล้วให้หาวิธีป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาขึ้นอีก



บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

บรรณานุกรม

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และคณะ. 2549 การวิเคราะห์ตัวแปร จำลองแบบระบบ และปรับปรุง
ตู้อบผ้าในเชิงพาณิชย์.กรุงเทพฯ:มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และ จิตติ พัทธวิช. 2544 การศึกษาผลของการจัดวางตำแหน่งและ
ความเร็วของช่องระบายอากาศ ในโรงงานผลิตอุปกรณ์ทางแพทย์.กรุงเทพฯ:มหาวิทยาลัย
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ไตรฎา แข็งการ และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์. 2551 การใช้ MABLAB สำหรับงานทางวิศวกรรม พิมพ์
 ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Cengel, A Yunus. 2006 Heat and Mass Transfer. 3rd ed. USA: McGraw Hill.

Fausett, V Laurene. 1999 Applied Numerical Analysis using MATLAB. USA: Prentice Hall.

Incropera, P Frank. and David P Dewitt. 1990 Introduction to Heat Transfer. 2nd ed. USA: John
 Wiley and Sons.

Patankar, V Suhas. 1980 Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. USA: Taylor and Francis.

ภาคผนวก ก

รายละเอียดข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิด้านเข้า

Wisco Datalogger				
AI210				
Store Time	0:00:30			
Start Time	27/12/2550 17:17			
Record Count	140			
Date	Time	InFront(C)	InTop(C)	InMid(C)
27/12/2007	17:17:35	0	0	0
27/12/2007	17:18:05	108.7	148.6	147.7
27/12/2007	17:18:35	108.4	148.7	147.7
27/12/2007	17:19:05	108.5	148.7	147.8
27/12/2007	17:19:35	108.6	148.7	148
27/12/2007	17:20:05	108.3	148.6	148.2
27/12/2007	17:20:35	108.5	148.5	148.2
27/12/2007	17:21:05	108.3	148.5	148.1
27/12/2007	17:21:35	109.3	148.2	148
27/12/2007	17:22:05	109	148.1	147.9
27/12/2007	17:22:35	108.6	148	147.7
27/12/2007	17:23:05	108.6	148	147.6
27/12/2007	17:23:35	108.8	147.9	147.5
27/12/2007	17:24:05	108.8	147.8	147.3
27/12/2007	17:24:35	109	147.9	147.1
27/12/2007	17:25:05	108.4	147.9	146.9
27/12/2007	17:25:35	107.7	148	146.8
27/12/2007	17:26:05	106.9	148	146.8
27/12/2007	17:26:35	107.5	148	146.9
27/12/2007	17:27:05	107.5	148.1	147.1
27/12/2007	17:27:35	107.2	148	147.2
27/12/2007	17:28:05	107.4	147.9	147.3

Date	Time	InFront(C)	InTop(C)	InMid(C)
27/12/2007	17:28:35	107.3	147.7	147.2
27/12/2007	17:29:05	107.3	147.4	147.1
27/12/2007	17:29:35	108.1	147.1	147.2
27/12/2007	17:30:05	108	147.1	147.3
27/12/2007	17:30:35	108	146.9	147.3
27/12/2007	17:31:05	108.1	146.8	147.3
27/12/2007	17:31:35	107.8	146.8	147.5
27/12/2007	17:32:05	108	146.9	147.6
27/12/2007	17:32:35	108.1	147	147.6
27/12/2007	17:33:05	107.6	147	147.5
27/12/2007	17:33:35	107.5	147	147.7
27/12/2007	17:34:05	107.4	146.9	147.4
27/12/2007	17:34:35	107.2	146.9	147.5
27/12/2007	17:35:05	107	146.7	147.5
27/12/2007	17:35:35	107	146.8	147.6
27/12/2007	17:36:05	106.9	146.9	147.7
27/12/2007	17:36:35	106.9	146.9	147.7
27/12/2007	17:37:05	106.7	147	147.8
27/12/2007	17:37:35	106.5	147.1	147.9
27/12/2007	17:38:05	106.4	147.1	147.9
27/12/2007	17:38:35	106.6	147.1	148.1
27/12/2007	17:39:05	106.7	147.2	148.2
27/12/2007	17:39:35	106.7	147.2	148.2
27/12/2007	17:40:05	108.4	147.3	148.2
27/12/2007	17:40:35	109.3	147.3	148.2
27/12/2007	17:41:05	109.3	147.2	148.2
27/12/2007	17:41:35	108.3	147	148
27/12/2007	17:42:05	107	147	147.9
27/12/2007	17:42:35	106.2	147.2	148
27/12/2007	17:43:05	105.5	147.2	148.1
27/12/2007	17:43:35	105.4	147.1	148.1

Date	Time	InFront(C)	InTop(C)	InMid(C)
27/12/2007	17:44:05	105.4	147.1	148
27/12/2007	17:44:35	105.8	147.3	148.2
27/12/2007	17:45:05	106.1	147.7	148.5
27/12/2007	17:45:35	106.3	148.1	148.7
27/12/2007	17:46:05	106.7	148.1	148.7
27/12/2007	17:46:35	107.2	148	148.9
27/12/2007	17:47:05	108	148.1	149.2
27/12/2007	17:47:35	108.2	148.2	149.6
27/12/2007	17:48:05	107.8	148.3	149.7
27/12/2007	17:48:35	107.7	148.4	149.7
27/12/2007	17:49:05	107.8	148.4	149.9
27/12/2007	17:49:35	106.9	148.5	149.9
27/12/2007	17:50:05	107.1	148.5	150
27/12/2007	17:50:35	107.8	148.7	150.1
27/12/2007	17:51:05	107.5	148.7	150.2
27/12/2007	17:51:35	107.4	148.8	150.2
27/12/2007	17:52:05	107.6	148.9	150.5
27/12/2007	17:52:35	107.7	149	150.7
27/12/2007	17:53:05	107.5	149.1	150.8
27/12/2007	17:53:35	107.5	149.1	150.8
27/12/2007	17:54:05	107.7	149.2	150.8
27/12/2007	17:54:35	108.2	149.3	150.7
27/12/2007	17:55:05	108.6	149.6	150.6
27/12/2007	17:55:35	108.3	149.8	150.5
27/12/2007	17:56:05	107.9	149.6	150.1
27/12/2007	17:56:35	107.8	149.4	150.1
27/12/2007	17:57:05	107.6	149.5	150.2
27/12/2007	17:57:35	107.6	149.8	150.4
27/12/2007	17:58:05	107.9	149.9	150.4
27/12/2007	17:58:35	109.2	149.9	150.6
27/12/2007	17:59:05	109.7	149.9	150.8

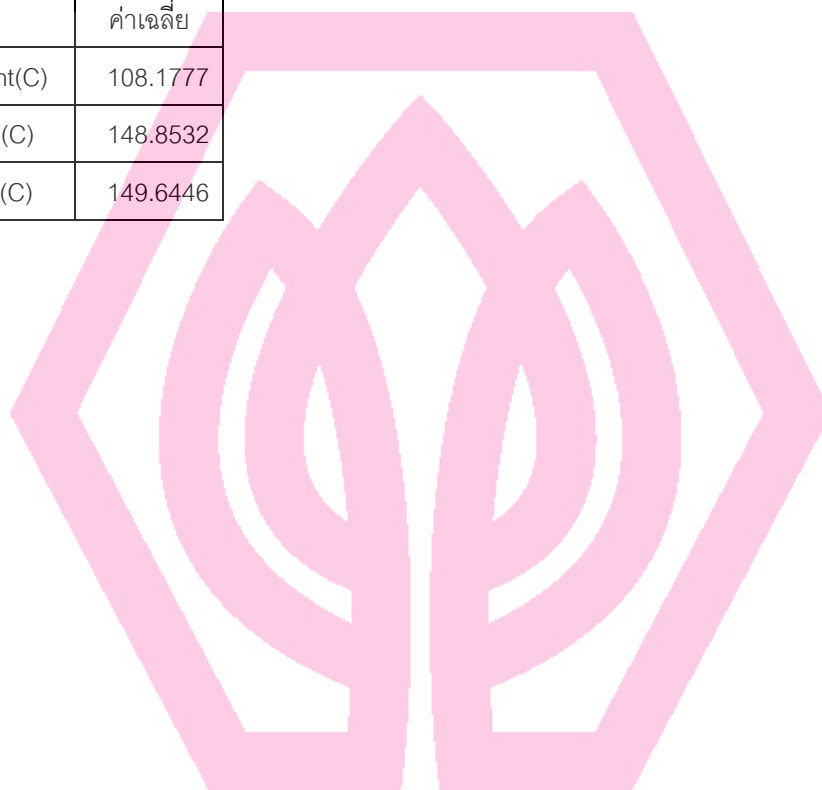
Date	Time	InFront(C)	InTop(C)	InMid(C)
27/12/2007	17:59:35	108.7	149.8	150.9
27/12/2007	18:00:05	107.6	149.6	150.9
27/12/2007	18:00:35	107.4	149.4	150.8
27/12/2007	18:01:05	107.5	149.3	150.9
27/12/2007	18:01:35	108.4	149.5	150.8
27/12/2007	18:02:05	109	149.9	151.1
27/12/2007	18:02:35	108.8	150.2	151.2
27/12/2007	18:03:05	108.6	150.2	151.1
27/12/2007	18:03:35	108.4	150.1	151.2
27/12/2007	18:04:05	108.5	150	151.2
27/12/2007	18:04:35	109	149.9	151.1
27/12/2007	18:05:05	108.9	150	151.3
27/12/2007	18:05:35	108.6	150.2	151.2
27/12/2007	18:06:05	109.2	150.2	151.1
27/12/2007	18:06:35	109.8	150.1	151.3
27/12/2007	18:07:05	109.4	150	151.3
27/12/2007	18:07:35	108.7	149.8	151.2
27/12/2007	18:08:05	108.3	149.7	151
27/12/2007	18:08:35	108.1	149.8	150.8
27/12/2007	18:09:05	107.7	149.6	150.6
27/12/2007	18:09:35	107.2	149.7	150.5
27/12/2007	18:10:05	106.7	149.8	150.5
27/12/2007	18:10:35	107.5	149.7	150.6
27/12/2007	18:11:05	108.4	149.9	150.9
27/12/2007	18:11:35	110.1	150.1	151.3
27/12/2007	18:12:05	110.3	150.2	151.3
27/12/2007	18:12:35	111	150.2	151.4
27/12/2007	18:13:05	111.4	150.2	151.6
27/12/2007	18:13:35	110.8	150.1	151.5
27/12/2007	18:14:05	110.8	149.9	151.5
27/12/2007	18:14:35	110.6	150	151.6

Date	Time	InFront(C)	InTop(C)	InMid(C)
27/12/2007	18:15:05	110.4	150.1	151.5
27/12/2007	18:15:35	110	150.4	151.6
27/12/2007	18:16:05	109.7	150.5	151.6
27/12/2007	18:16:35	109.7	150.5	151.6

Date	Time	InFront(C)	InTop(C)	InMid(C)
27/12/2007	18:17:05	109.4	150.3	151.6
27/12/2007	18:17:35	108.9	150.3	151.5
27/12/2007	18:18:05	109.1	150.2	151.6
27/12/2007	18:18:35	108.8	150.2	151.4
27/12/2007	18:19:05	108.5	150.2	151.1
27/12/2007	18:19:35	108.3	150.2	151.3
27/12/2007	18:20:05	107.9	150.4	151.2
27/12/2007	18:20:35	107.8	150.4	151.1
27/12/2007	18:21:05	108	150.2	151.3
27/12/2007	18:21:35	108.3	150.1	151.3
27/12/2007	18:22:05	108.6	150	151.4
27/12/2007	18:22:35	108.5	150.1	151.7
27/12/2007	18:23:05	108.2	150.3	151.9
27/12/2007	18:23:35	108.9	150.4	152.1
27/12/2007	18:24:05	109.4	150.6	152.2
27/12/2007	18:24:35	110.6	150.7	152.3
27/12/2007	18:25:05	110.5	150.8	152.5
27/12/2007	18:25:35	110	150.8	152.4
27/12/2007	18:26:05	109.3	150.7	152
27/12/2007	18:26:35	108.5	150.7	151.9
27/12/2007	18:27:05	108.3	150.6	152

	Max Value	At Time		Min Value	At Time	
InFront(C)	111.4	27/12/2007	18:13:05	0	27/12/2007	17:17:35
InTop(C)	150.8	27/12/2007	18:25:05	0	27/12/2007	17:17:35
InMid(C)	152.5	27/12/2007	18:25:05	0	27/12/2007	17:17:35

	ค่าเฉลี่ย
InFront(C)	108.1777
InTop(C)	148.8532
InMid(C)	149.6446



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

รายละเอียดข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิด้านนอก

Wisco Datalogger				
AI210				
Store Time	0:00:30			
Start Time	27/12/2550 15:45			
Record Count	128			
Date	Time	OutFront(C)	OutTop(C)	OutMid(C)
27/12/2007	15:45:40	119.6	157	151.2
27/12/2007	15:46:10	117.5	157.1	151.5
27/12/2007	15:46:40	117.7	157.3	151.7
27/12/2007	15:47:10	118	157.6	151.8
27/12/2007	15:47:40	117.8	157.2	151.3
27/12/2007	15:48:10	118.4	157.1	151.2
27/12/2007	15:48:40	119	157.2	151.3
27/12/2007	15:49:10	118.8	157.1	151.2
27/12/2007	15:49:40	118.9	157.2	151.4
27/12/2007	15:50:10	118.6	157.1	151.4
27/12/2007	15:50:40	118.8	157.5	151.8
27/12/2007	15:51:10	118.7	157.8	152
27/12/2007	15:51:40	118.4	157.8	152
27/12/2007	15:52:10	118	157.9	152.1
27/12/2007	15:52:40	117.7	157.8	152.2
27/12/2007	15:53:10	118.2	158	152.4
27/12/2007	15:53:40	117.9	157.8	152.3
27/12/2007	15:54:10	118.1	157.5	152.1
27/12/2007	15:54:40	118.1	157.6	152
27/12/2007	15:55:10	118	157.8	152.2
27/12/2007	15:55:40	118.2	157.7	152.2
27/12/2007	15:56:10	117.3	157.5	152.1
27/12/2007	15:56:40	116.7	157.7	152.1

Date	Time	OutFront(C)	OutTop(C)	OutMid(C)
27/12/2007	15:57:10	116.9	158.1	152.4
27/12/2007	15:57:40	116.5	158.2	152.4
27/12/2007	15:58:10	116.1	158.1	152.6
27/12/2007	15:58:40	116.1	157.7	152.3
27/12/2007	15:59:10	116.5	157.4	151.9
27/12/2007	15:59:40	117.2	156.9	151.4
27/12/2007	16:00:10	117.4	156.4	150.9
27/12/2007	16:00:40	116.7	156.4	151
27/12/2007	16:01:10	116.1	156.4	151.1
27/12/2007	16:01:40	115.2	156.6	151.4
27/12/2007	16:02:10	114.8	156.7	151.3
27/12/2007	16:02:40	114.7	156.4	151
27/12/2007	16:03:10	115.1	156.6	151
27/12/2007	16:03:40	115.3	156.6	151.2
27/12/2007	16:04:10	115.6	156.7	151.2
27/12/2007	16:04:40	115.4	156.6	151
27/12/2007	16:05:10	115.3	156.6	151
27/12/2007	16:05:40	115.6	156.4	151
27/12/2007	16:06:10	116.3	156.3	151
27/12/2007	16:06:40	116.5	156.2	151.2
27/12/2007	16:07:10	116.7	156.2	151.1
27/12/2007	16:07:40	117.1	156.3	151.2
27/12/2007	16:08:10	116.8	156.2	151.1
27/12/2007	16:08:40	116.6	156.1	150.9
27/12/2007	16:09:10	116.6	156.2	150.9
27/12/2007	16:09:40	116.8	156	150.9
27/12/2007	16:10:10	116.4	155.7	150.7
27/12/2007	16:10:40	115.9	155.7	150.5
27/12/2007	16:11:10	115.1	155.3	150.2
27/12/2007	16:11:40	114.3	154.7	149.7
27/12/2007	16:12:10	114	154.3	149.2

Date	Time	OutFront(C)	OutTop(C)	OutMid(C)
27/12/2007	16:12:40	115	154.3	149.1
27/12/2007	16:13:10	115.4	154.5	149.2
27/12/2007	16:13:40	115.7	154.7	149.3
27/12/2007	16:14:10	115.7	154.7	149.4
27/12/2007	16:14:40	116.1	154.5	149.3
27/12/2007	16:15:10	116.7	154.6	149.2
27/12/2007	16:15:40	117.1	154.6	149.1
27/12/2007	16:16:10	117.2	154.5	148.9
27/12/2007	16:16:40	117.4	154.5	149
27/12/2007	16:17:10	117.4	154.9	149.3
27/12/2007	16:17:40	117.1	154.9	149.3
27/12/2007	16:18:10	116.5	154.7	149.3
27/12/2007	16:18:40	115.7	154.8	149.3
27/12/2007	16:19:10	115.7	154.7	149.3
27/12/2007	16:19:40	115.8	154.5	149.3
27/12/2007	16:20:10	115.2	154.2	149
27/12/2007	16:20:40	115.7	154.2	149.1
27/12/2007	16:21:10	116.4	154.4	149.4
27/12/2007	16:21:40	116.7	154.8	149.7
27/12/2007	16:22:10	117	154.8	149.8
27/12/2007	16:22:40	116.3	154.8	149.7
27/12/2007	16:23:10	115.8	154.7	149.6
27/12/2007	16:23:40	115.8	154.8	149.6
27/12/2007	16:24:10	115.9	154.7	149.5
27/12/2007	16:24:40	116	154.2	149
27/12/2007	16:25:10	115.9	154	148.7
27/12/2007	16:25:40	115.5	153.5	148.2
27/12/2007	16:26:10	114.8	153	147.7
27/12/2007	16:26:40	114	152.7	147.6
27/12/2007	16:27:10	113.1	152.6	147.5
27/12/2007	16:27:40	112.6	152.7	147.6

Date	Time	OutFront(C)	OutTop(C)	OutMid(C)
27/12/2007	16:28:10	112.6	152.9	148
27/12/2007	16:28:40	113.1	153.1	148.3
27/12/2007	16:29:10	113.7	153.3	148.4
27/12/2007	16:29:40	114.2	153.3	148.3
27/12/2007	16:30:10	115.2	153.3	148
27/12/2007	16:30:40	115.6	153.3	147.9
27/12/2007	16:31:10	115.5	153.1	147.6
27/12/2007	16:31:40	114.8	152.8	147.4
27/12/2007	16:32:10	114.7	152.3	146.9
27/12/2007	16:32:40	114.4	152	146.7
27/12/2007	16:33:10	114	151.6	146.3
27/12/2007	16:33:40	113.7	151.7	146.3
27/12/2007	16:34:10	113.5	151.9	146.3
27/12/2007	16:34:40	113.8	152.6	146.8
27/12/2007	16:35:10	114.3	153.4	147.3
27/12/2007	16:35:40	114.4	153.6	147.7
27/12/2007	16:36:10	115.1	153.6	147.9
27/12/2007	16:36:40	115.5	153.7	148.2
27/12/2007	16:37:10	116.1	153.7	148.2
27/12/2007	16:37:40	116.1	153.7	148.3
27/12/2007	16:38:10	116.1	153.9	148.4
27/12/2007	16:38:40	116.1	153.8	148.4
27/12/2007	16:39:10	116	153.8	148.3
27/12/2007	16:39:40	116.2	153.6	147.9
27/12/2007	16:40:10	116.1	153.5	147.9
27/12/2007	16:40:40	116	153.3	147.8
27/12/2007	16:41:10	116	153.1	147.7
27/12/2007	16:41:40	116.3	152.9	147.5
27/12/2007	16:42:10	116.6	152.7	147.2
27/12/2007	16:42:40	116.4	152.4	147.1
27/12/2007	16:43:10	116.5	152.9	147.5

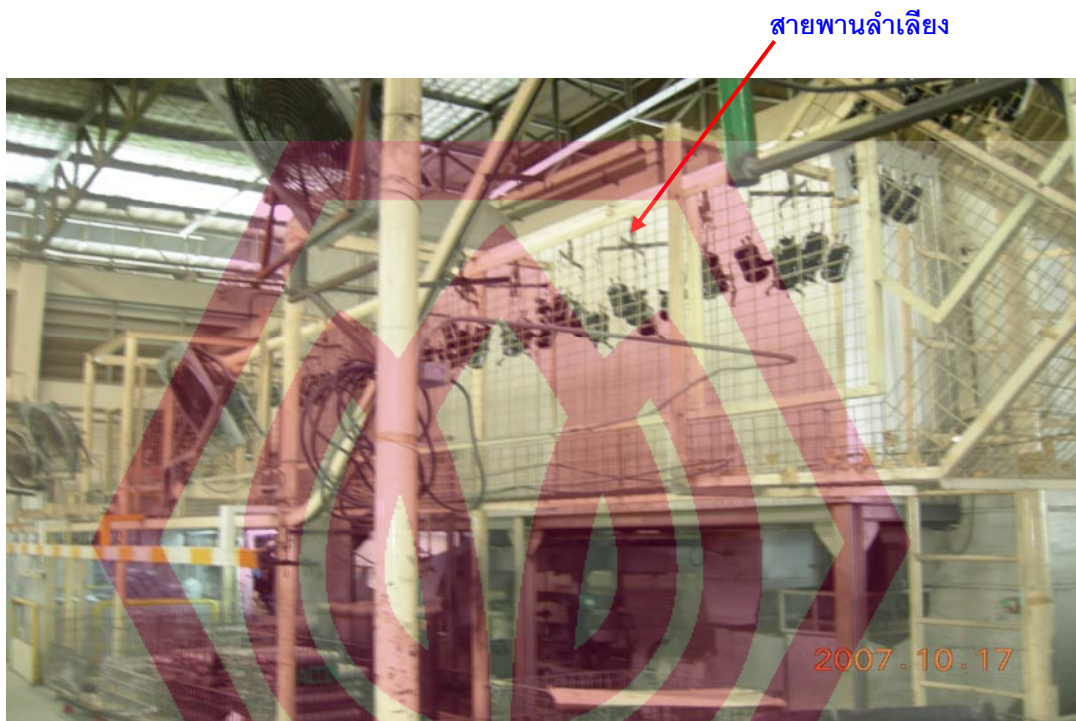
Date	Time	OutFront(C)	OutTop(C)	OutMid(C)
27/12/2007	16:43:40	117	153.4	148
27/12/2007	16:44:10	117.3	153.7	148.4
27/12/2007	16:44:40	117.3	153.9	148.7

Date	Time	OutFront(C)	OutTop(C)	OutMid(C)
27/12/2007	16:45:10	117.6	154	148.8
27/12/2007	16:45:40	117.3	154	148.7
27/12/2007	16:46:10	116.8	153.9	148.6
27/12/2007	16:46:40	116.6	153.6	148.4
27/12/2007	16:47:10	116.2	153.4	148.2
27/12/2007	16:47:40	115.7	153	148
27/12/2007	16:48:10	116	152.9	147.8
27/12/2007	16:48:40	116.4	153	147.6
27/12/2007	16:49:10	116.5	153.1	147.6

	Max Value	At Time	Min Value	At Time	
OutFront(C)	119.6	27/12/2007	112.6	27/12/2007	16:27:40
OutTop(C)	158.2	27/12/2007	151.6	27/12/2007	16:33:10
OutMid(C)	152.6	27/12/2007	146.3	27/12/2007	16:33:10

	ค่าเฉลี่ย
OutFront(C)	116.207
OutTop(C)	155.0195
OutMid(C)	149.6211

ภาคผนวก ค

ภาพการสำรวจอุโมงค์อบสีเบื้องต้น

ภาพที่ 1 แสดงภาพด้านข้างของอุโมงค์อบสี



Electrical Heater

ภาพที่ 2 แสดงแหล่งผลิตความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าของอุโมงค์อบสี

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY



Hot Air Return

ภาพที่ 3 แสดงภาพด้านหน้าของอุโมงค์อบสี

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY



Refrigerant
Accumulator

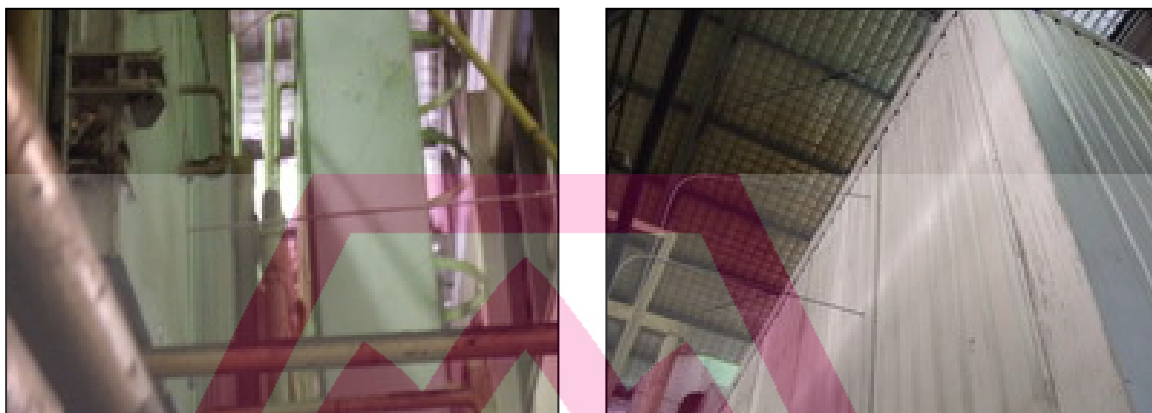
Intake
Fresh Air

2007.10.17

ภาพที่ 4 แสดงภาพทางเข้าของอุโมงค์อบสี

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

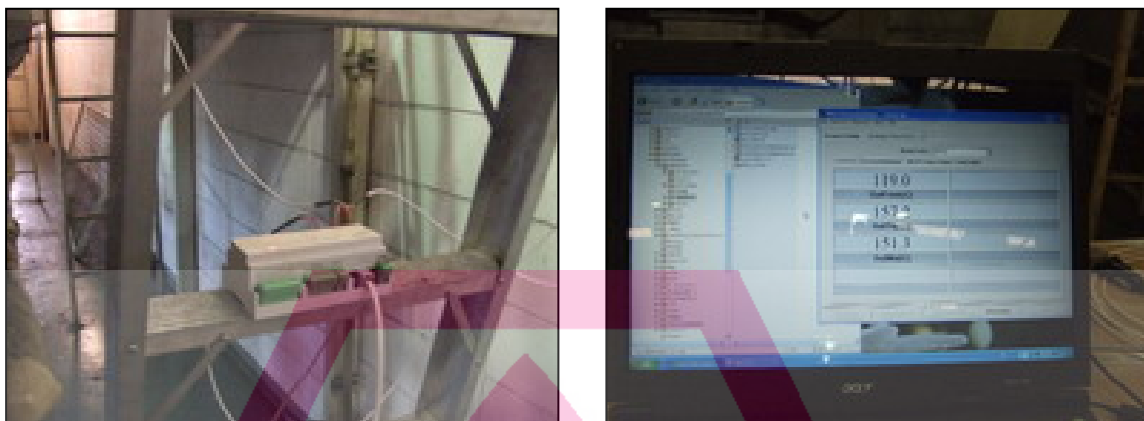
ภาพการวัดและการบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 5 แสดงภาพการวัดอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสียด้วย RTD



ภาพที่ 6 แสดงภาพกิจกรรมในการวัดและเก็บข้อมูล



ภาพที่ 7 แสดงภาพเครื่องวัดและอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

ภาคผนวก ง

ตาราง

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าอนุหภูมิที่จุดต่างๆของค่าที่คำนวณได้จาก MATLAB และค่าที่ได้จากการวัด

	วัดจริง	Matlab	ผลต่าง	Error
จุดที่ 1	108.18	107.05	1.13	1.044555
จุดที่ 2	149.64	151	-1.36	-0.90885
จุดที่ 3	148.85	141.72	7.13	4.790057
จุดที่ 4	155.02	141.72	13.3	8.579538
จุดที่ 5	149.62	151	-1.38	-0.92234
จุดที่ 6	116.21	107.05	9.16	7.882282

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอนุหภูมิของแถวที่ 8, 12, และ 15

0.08325	แถวที่ 8	แถวที่ 12	แถวที่ 15
1	90.62	113.05	146.84
2	92.71	119.32	152.52
3	94.56	124.22	156.7
4	96.23	128.05	159.82
5	97.7	131.05	162.17
6	99.01	133.41	163.95
7	100.15	135.27	165.32
8	101.14	136.76	166.38
9	101.99	137.94	167.21
10	102.71	138.89	167.86
11	103.33	139.65	168.37
12	103.85	140.26	168.77
13	104.29	140.76	169.09
14	104.65	141.15	169.34
15	104.95	141.47	169.54
16	105.19	141.72	169.7
17	105.38	141.91	169.82
18	105.52	142.05	169.91

0.08325	แถวที่ 8	แถวที่ 12	แถวที่ 15
19	105.61	142.15	169.97
20	105.67	142.21	170.01
21	105.69	142.23	170.02
22	105.67	142.22	170.02
23	105.61	142.17	169.99
24	105.51	142.08	169.94
25	105.37	141.95	169.86
26	105.18	141.78	169.76
27	104.93	141.56	169.63
28	104.62	141.28	169.47
29	104.25	140.93	169.26
30	103.79	140.51	169.01
31	103.23	139.99	168.7
32	102.56	139.37	168.33
33	101.76	138.61	167.88
34	100.81	137.7	167.32
35	99.68	136.6	166.65
36	98.33	135.27	165.82
37	96.74	133.66	164.81
38	94.85	131.71	163.56
39	92.64	129.34	162.02
40	90.03	126.46	160.08
41	87	122.95	157.63
42	83.46	118.67	154.5
43	79.39	113.44	150.44
44	74.72	107.05	145.1
45	69.44	99.27	137.92
46	63.54	89.87	128.1
47	57.06	78.66	114.42
48	50.07	65.61	95.24
49	42.71	50.95	68.9
50	35.15	35.3	35.65

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่า $T_a = 25-35^{\circ}\text{C}$ ที่เข้าเตาอบ พิจารณาที่ตำแหน่งกลางเตาอบในแนวแกน x
และค่า $k = 0.08325 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

0.08325	25	28	30	33	35
611	108.02	109.53	110.54	112.04	113.05
612	114.67	116.06	116.99	118.39	119.32
613	119.86	121.16	122.04	123.34	124.22
614	123.9	125.15	125.98	127.22	128.05
615	127.07	128.27	129.06	130.25	131.05
616	129.56	130.72	131.49	132.64	133.41
617	131.53	132.65	133.4	134.53	135.27
618	133.09	134.19	134.92	136.02	136.76
619	134.33	135.41	136.14	137.22	137.94
620	135.33	136.4	137.11	138.18	138.89
621	136.13	137.18	137.89	138.95	139.65
622	136.77	137.82	138.52	139.57	140.26
623	137.29	138.33	139.02	140.06	140.76
624	137.7	138.74	139.43	140.46	141.15
625	138.03	139.06	139.75	140.78	141.47
626	138.29	139.32	140	141.03	141.72
627	138.49	139.52	140.2	141.23	141.91
628	138.64	139.66	140.35	141.37	142.05
629	138.74	139.76	140.45	141.47	142.15
630	138.8	139.83	140.51	141.53	142.21
631	138.82	139.85	140.53	141.55	142.23
632	138.81	139.83	140.51	141.54	142.22
633	138.75	139.78	140.46	141.49	142.17
634	138.66	139.69	140.37	141.4	142.08
635	138.52	139.55	140.24	141.27	141.95
636	138.34	139.37	140.06	141.09	141.78
637	138.1	139.14	139.83	140.87	141.56
638	137.8	138.85	139.54	140.58	141.28
639	137.44	138.48	139.18	140.23	140.93
640	136.98	138.04	138.75	139.8	140.51
641	136.44	137.5	138.22	139.28	139.99

0.08325	25	28	30	33	35
642	135.77	136.85	137.57	138.65	139.37
643	134.97	136.06	136.79	137.88	138.61
644	134	135.11	135.85	136.96	137.7
645	132.83	133.96	134.72	135.85	136.6
646	131.42	132.57	133.34	134.5	135.27
647	129.71	130.89	131.68	132.87	133.66
648	127.64	128.86	129.67	130.89	131.71
649	125.13	126.39	127.23	128.5	129.34
650	122.07	123.39	124.26	125.58	126.46
651	118.35	119.73	120.65	122.03	122.95
652	113.8	115.26	116.24	117.69	118.67
653	108.25	109.8	110.84	112.4	113.44
654	101.47	103.14	104.26	105.93	107.05
655	93.21	95.03	96.24	98.06	99.27
656	83.23	85.22	86.55	88.54	89.87
657	71.34	73.53	75	77.19	78.66
658	57.48	59.92	61.55	63.98	65.61
659	41.93	44.63	46.44	49.14	50.95
660	25.32	28.32	30.31	33.31	35.3

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่า $k = 0.0045-0.09 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

35-50	0.0045	0.009	0.0135	0.018	0.0225	0.027	0.0315
611	137.42	127.52	123.09	120.56	118.93	117.79	116.94
612	140.96	132.08	128.15	125.92	124.48	123.48	122.73
613	143.66	135.6	132.07	130.08	128.79	127.9	127.24
614	145.74	138.31	135.1	133.3	132.14	131.34	130.75
615	147.32	140.41	137.45	135.81	134.76	134.03	133.49
616	148.55	142.04	139.29	137.77	136.8	136.13	135.64
617	149.49	143.31	140.73	139.31	138.41	137.79	137.33
618	150.22	144.3	141.86	140.53	139.68	139.1	138.67
619	150.79	145.09	142.76	141.49	140.69	140.14	139.74
620	151.23	145.71	143.47	142.26	141.5	140.97	140.59
621	151.57	146.2	144.04	142.87	142.14	141.64	141.27

35-50	0.0045	0.009	0.0135	0.018	0.0225	0.027	0.0315
622	151.83	146.58	144.49	143.36	142.66	142.17	141.82
623	152.02	146.89	144.85	143.75	143.07	142.6	142.26
624	152.16	147.12	145.13	144.06	143.4	142.94	142.61
625	152.26	147.3	145.35	144.31	143.66	143.21	142.89
626	152.31	147.43	145.52	144.49	143.86	143.42	143.11
627	152.33	147.52	145.64	144.63	144.01	143.58	143.27
628	152.32	147.57	145.72	144.73	144.11	143.69	143.39
629	152.28	147.59	145.76	144.78	144.18	143.77	143.47
630	152.2	147.57	145.77	144.81	144.21	143.8	143.51
631	152.09	147.52	145.74	144.79	144.2	143.8	143.51
632	151.95	147.44	145.68	144.74	144.16	143.77	143.48
633	151.77	147.32	145.58	144.66	144.09	143.7	143.41
634	151.54	147.16	145.45	144.54	143.97	143.59	143.31
635	151.27	146.96	145.27	144.37	143.82	143.44	143.16
636	150.95	146.71	145.05	144.17	143.62	143.24	142.97
637	150.57	146.4	144.77	143.9	143.36	143	142.73
638	150.12	146.03	144.43	143.58	143.05	142.69	142.43
639	149.59	145.59	144.03	143.19	142.67	142.32	142.06
640	148.96	145.06	143.53	142.72	142.21	141.86	141.61
641	148.23	144.43	142.94	142.15	141.65	141.32	141.07
642	147.37	143.69	142.24	141.47	140.98	140.66	140.42
643	146.35	142.8	141.4	140.65	140.18	139.86	139.63
644	145.16	141.74	140.39	139.66	139.21	138.91	138.68
645	143.76	140.48	139.18	138.49	138.05	137.76	137.54
646	142.11	138.97	137.74	137.07	136.66	136.38	136.17
647	140.15	137.18	136	135.37	134.98	134.71	134.52
648	137.82	135.03	133.92	133.33	132.96	132.7	132.52
649	135.06	132.45	131.41	130.86	130.51	130.27	130.1
650	131.76	129.34	128.38	127.87	127.55	127.33	127.17
651	127.8	125.59	124.71	124.24	123.95	123.75	123.6
652	123.05	121.06	120.26	119.84	119.57	119.39	119.26
653	117.33	115.56	114.85	114.47	114.24	114.08	113.96
654	110.42	108.89	108.28	107.95	107.74	107.6	107.5
655	102.11	100.82	100.31	100.03	99.86	99.74	99.65

35-50	0.0045	0.009	0.0135	0.018	0.0225	0.027	0.0315
656	92.17	91.12	90.71	90.48	90.34	90.24	90.17
657	80.4	79.61	79.29	79.12	79.02	78.95	78.89
658	66.78	66.25	66.03	65.92	65.85	65.8	65.76
659	51.54	51.27	51.16	51.11	51.07	51.05	51.03
660	35.31	35.31	35.31	35.31	35.31	35.3	35.3

35-50	0.036	0.0405	0.045	0.0495	0.054	0.0585	0.063
611	116.29	115.77	115.35	115	114.71	114.46	114.24
612	122.16	121.71	121.34	121.03	120.77	120.56	120.37
613	126.73	126.33	126	125.73	125.51	125.31	125.14
614	130.29	129.93	129.64	129.4	129.2	129.02	128.87
615	133.08	132.75	132.49	132.27	132.08	131.93	131.79
616	135.26	134.96	134.72	134.52	134.35	134.21	134.09
617	136.98	136.71	136.48	136.3	136.14	136.01	135.9
618	138.35	138.09	137.88	137.71	137.57	137.44	137.34
619	139.43	139.19	138.99	138.83	138.7	138.58	138.48
620	140.3	140.07	139.89	139.73	139.61	139.5	139.4
621	141	140.78	140.6	140.46	140.33	140.23	140.14
622	141.56	141.34	141.18	141.04	140.92	140.82	140.73
623	142	141.8	141.64	141.5	141.39	141.29	141.21
624	142.36	142.16	142.01	141.87	141.77	141.67	141.59
625	142.65	142.45	142.3	142.17	142.06	141.97	141.9
626	142.87	142.68	142.53	142.4	142.3	142.21	142.13
627	143.04	142.85	142.7	142.58	142.48	142.39	142.32
628	143.16	142.98	142.83	142.71	142.61	142.53	142.45
629	143.24	143.06	142.92	142.8	142.7	142.62	142.55
630	143.28	143.11	142.97	142.85	142.75	142.67	142.6
631	143.29	143.12	142.98	142.86	142.77	142.69	142.62
632	143.26	143.09	142.95	142.84	142.75	142.67	142.6
633	143.2	143.03	142.9	142.78	142.69	142.61	142.54
634	143.1	142.93	142.8	142.69	142.6	142.52	142.45
635	142.95	142.79	142.66	142.55	142.46	142.38	142.32
636	142.77	142.61	142.48	142.37	142.28	142.2	142.14

35-50	0.036	0.0405	0.045	0.0495	0.054	0.0585	0.063
637	142.53	142.37	142.24	142.14	142.05	141.97	141.91
638	142.23	142.08	141.95	141.85	141.76	141.69	141.62
639	141.87	141.71	141.59	141.49	141.41	141.33	141.27
640	141.42	141.27	141.15	141.05	140.97	140.9	140.84
641	140.89	140.74	140.62	140.53	140.44	140.38	140.32
642	140.24	140.1	139.98	139.89	139.81	139.74	139.68
643	139.46	139.32	139.21	139.12	139.04	138.97	138.92
644	138.51	138.38	138.27	138.19	138.11	138.05	138
645	137.38	137.25	137.15	137.07	136.99	136.93	136.88
646	136.02	135.89	135.8	135.71	135.65	135.59	135.54
647	134.37	134.25	134.16	134.08	134.02	133.96	133.91
648	132.38	132.27	132.18	132.11	132.05	131.99	131.95
649	129.97	129.87	129.78	129.71	129.66	129.61	129.57
650	127.04	126.95	126.87	126.81	126.76	126.71	126.67
651	123.49	123.4	123.33	123.27	123.22	123.18	123.15
652	119.15	119.08	119.01	118.96	118.91	118.88	118.84
653	113.87	113.8	113.74	113.69	113.65	113.62	113.59
654	107.42	107.36	107.31	107.27	107.24	107.21	107.18
655	99.58	99.53	99.49	99.46	99.43	99.4	99.38
656	90.12	90.08	90.05	90.02	90	89.98	89.96
657	78.85	78.82	78.8	78.77	78.76	78.74	78.73
658	65.74	65.72	65.7	65.69	65.67	65.66	65.65
659	51.01	51	50.99	50.99	50.98	50.98	50.97
660	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3

35-50	0.0675	0.072	0.0765	0.081	0.0855	0.09
611	114.06	113.89	113.74	113.61	113.49	113.39
612	120.2	120.05	119.93	119.81	119.71	119.61
613	125	124.87	124.75	124.65	124.56	124.48
614	128.74	128.63	128.53	128.43	128.35	128.28
615	131.67	131.57	131.48	131.4	131.32	131.26
616	133.98	133.88	133.8	133.73	133.66	133.6
617	135.8	135.71	135.64	135.57	135.51	135.45
618	137.25	137.16	137.09	137.03	136.97	136.92

35-50	0.0675	0.072	0.0765	0.081	0.0855	0.09
619	138.4	138.32	138.26	138.2	138.14	138.09
620	139.32	139.25	139.19	139.13	139.08	139.03
621	140.06	139.99	139.93	139.88	139.83	139.79
622	140.66	140.59	140.54	140.48	140.44	140.4
623	141.14	141.07	141.02	140.97	140.92	140.88
624	141.52	141.46	141.41	141.36	141.32	141.28
625	141.83	141.77	141.72	141.67	141.63	141.59
626	142.07	142.01	141.96	141.91	141.87	141.84
627	142.25	142.2	142.15	142.1	142.06	142.02
628	142.39	142.33	142.28	142.24	142.2	142.17
629	142.48	142.43	142.38	142.34	142.3	142.26
630	142.54	142.48	142.44	142.39	142.36	142.32
631	142.56	142.5	142.46	142.41	142.38	142.34
632	142.54	142.49	142.44	142.4	142.36	142.33
633	142.48	142.43	142.39	142.34	142.31	142.27
634	142.39	142.34	142.29	142.25	142.22	142.19
635	142.26	142.21	142.16	142.12	142.09	142.06
636	142.08	142.03	141.99	141.95	141.91	141.88
637	141.85	141.81	141.76	141.72	141.69	141.66
638	141.57	141.52	141.48	141.44	141.41	141.38
639	141.22	141.17	141.13	141.09	141.06	141.03
640	140.79	140.74	140.7	140.66	140.63	140.6
641	140.27	140.22	140.18	140.14	140.11	140.08
642	139.63	139.59	139.55	139.52	139.48	139.46
643	138.87	138.83	138.79	138.76	138.73	138.7
644	137.95	137.91	137.87	137.84	137.81	137.78
645	136.84	136.8	136.76	136.73	136.7	136.68
646	135.5	135.46	135.42	135.39	135.37	135.34
647	133.87	133.84	133.81	133.78	133.75	133.73
648	131.91	131.88	131.85	131.82	131.8	131.77
649	129.53	129.5	129.47	129.44	129.42	129.4
650	126.64	126.61	126.58	126.56	126.54	126.52
651	123.11	123.09	123.06	123.04	123.02	123.01
652	118.82	118.79	118.77	118.75	118.73	118.72

35-50	0.0675	0.072	0.0765	0.081	0.0855	0.09
653	113.57	113.55	113.53	113.51	113.49	113.48
654	107.16	107.14	107.13	107.11	107.1	107.08
655	99.36	99.35	99.33	99.32	99.31	99.3
656	89.94	89.93	89.92	89.91	89.9	89.89
657	78.72	78.71	78.7	78.69	78.68	78.68
658	65.65	65.64	65.63	65.63	65.62	65.62
659	50.97	50.96	50.96	50.96	50.96	50.95
660	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่า $K = 0.0045-0.09 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ พิจารณาที่ตำแหน่งโหนด 633 เป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่ทำการวัดจริง

35-50	0.0045	0.009	0.0135	0.018	0.0225	0.027	0.0315
633	151.77	147.32	145.58	144.66	144.09	143.7	143.41

35-50	0.036	0.0405	0.045	0.0495	0.054	0.0585	0.063
633	143.2	143.03	142.9	142.78	142.69	142.61	142.54

35-50	0.0675	0.072	0.0765	0.081	0.0855	0.09
633	142.48	142.43	142.39	142.34	142.31	142.27

ตารางที่ 6 แสดงลักษณะโปรไฟล์โดยเปรียบเทียบความหนาของฉนวนใยแก้ว

0.045	50	100	150	200
611	123.85	127.84	131.38	134.54
612	130.43	133.94	137.06	139.86
613	135.56	138.68	141.46	143.97
614	139.57	142.37	144.88	147.15
615	142.71	145.25	147.54	149.63
616	145.18	147.5	149.62	151.56
617	147.13	149.28	151.25	153.07
618	148.67	150.69	152.54	154.26
619	149.91	151.81	153.57	155.2

0.045	50	100	150	200
620	150.9	152.7	154.38	155.95
621	151.69	153.42	155.04	156.55
622	152.33	154	155.55	157.02
623	152.84	154.45	155.97	157.39
624	153.25	154.82	156.3	157.69
625	153.58	155.11	156.55	157.91
626	153.84	155.33	156.75	158.09
627	154.03	155.5	156.89	158.21
628	154.17	155.62	156.99	158.28
629	154.27	155.69	157.04	158.32
630	154.33	155.73	157.06	158.32
631	154.34	155.72	157.03	158.28
632	154.31	155.68	156.97	158.2
633	154.25	155.59	156.87	158.08
634	154.14	155.47	156.73	157.92
635	153.99	155.3	156.54	157.72
636	153.78	155.07	156.3	157.46
637	153.52	154.79	156	157.14
638	153.2	154.45	155.63	156.75
639	152.8	154.03	155.18	156.28
640	152.32	153.51	154.64	155.72
641	151.73	152.9	154	155.04
642	151.02	152.16	153.23	154.24
643	150.16	151.26	152.3	153.28
644	149.13	150.19	151.2	152.14
645	147.89	148.91	149.87	150.78
646	146.39	147.36	148.28	149.15
647	144.58	145.51	146.38	147.2
648	142.39	143.26	144.09	144.87
649	139.74	140.56	141.33	142.06
650	136.52	137.28	137.99	138.67
651	132.6	133.3	133.96	134.57
652	127.83	128.46	129.05	129.61
653	122	122.56	123.09	123.59

0.045	50	100	150	200
654	114.9	115.39	115.84	116.27
655	106.26	106.67	107.05	107.42
656	95.82	96.15	96.47	96.76
657	83.39	83.64	83.88	84.1
658	68.92	69.09	69.25	69.4
659	52.68	52.76	52.85	52.92
660	35.35	35.35	35.35	35.35

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความหนาของฉนวนใยแก้วอุณหภูมิที่ตำแหน่งโหนด 640 โดยที่ค่า $k = 0.045$ W/m·K

0.045	50	100	150	200
640	152.32	153.51	154.64	155.72

ตารางที่ 8 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ของฉนวนระหว่าง Air Gap ระหว่างผนังเหล็กของอุโมงค์คอปส์ กับ Glass wool

0.08325	No Air Gap - No Glass Wool	No Air Gap - Glass Wool	Air Gap - No Glass Wool	Air Gap - Glass Wool
611	103.4	106.3	111.28	113.55
612	110.86	113.41	117.77	119.76
613	116.77	119.02	122.85	124.61
614	121.45	123.43	126.83	128.39
615	125.15	126.91	129.95	131.36
616	128.09	129.67	132.41	133.69
617	130.42	131.86	134.36	135.54
618	132.29	133.6	135.91	137
619	133.8	135	137.15	138.17
620	135	136.13	138.14	139.1
621	135.98	137.04	138.94	139.85
622	136.77	137.77	139.59	140.46
623	137.41	138.37	140.11	140.95
624	137.93	138.85	140.52	141.34
625	138.34	139.23	140.86	141.65

0.08325	No Air Gap - No Glass	No Air Gap - Glass	Air Gap - No Glass	Air Gap - Glass
	Wool	Wool	Wool	Wool
626	138.68	139.54	141.12	141.89
627	138.94	139.78	141.33	142.08
628	139.14	139.96	141.48	142.22
629	139.3	140.1	141.59	142.32
630	139.4	140.19	141.66	142.37
631	139.47	140.24	141.69	142.39
632	139.49	140.26	141.68	142.38
633	139.48	140.23	141.64	142.33
634	139.43	140.17	141.56	142.24
635	139.34	140.07	141.44	142.11
636	139.2	139.92	141.27	141.93
637	139.02	139.73	141.06	141.71
638	138.78	139.48	140.78	141.42
639	138.48	139.17	140.45	141.07
640	138.11	138.78	140.03	140.65
641	137.65	138.31	139.53	140.13
642	137.08	137.72	138.92	139.5
643	136.39	137.02	138.17	138.74
644	135.55	136.16	137.28	137.82
645	134.53	135.11	136.19	136.72
646	133.28	133.84	134.88	135.38
647	131.77	132.3	133.28	133.76
648	129.92	130.42	131.35	131.81
649	127.66	128.14	129.01	129.43
650	124.9	125.34	126.15	126.55
651	121.52	121.92	122.67	123.03
652	117.37	117.74	118.41	118.74
653	112.28	112.61	113.21	113.5
654	106.04	106.33	106.85	107.1
655	98.42	98.66	99.1	99.32
656	89.18	89.37	89.73	89.9
657	78.14	78.29	78.56	78.69
658	65.26	65.36	65.54	65.63

0.08325	No Air Gap - No Glass Wool	No Air Gap - Glass Wool	Air Gap - No Glass Wool	Air Gap - Glass Wool
659	50.77	50.82	50.91	50.96
660	35.3	35.3	35.3	35.3

ตารางที่ 9 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($h = 10-80$
 $W/m^2 \cdot K$)

35	10	20	40	60	80
636	141.79	141.78	141.78	141.78	141.78
637	141.56	141.56	141.56	141.56	141.55
638	141.29	141.28	141.28	141.27	141.27
639	140.94	140.93	140.93	140.93	140.93
640	140.52	140.51	140.5	140.5	140.5
641	140	139.99	139.99	139.99	139.99
642	139.38	139.37	139.36	139.36	139.36
643	138.63	138.61	138.6	138.6	138.6
644	137.72	137.7	137.69	137.69	137.69
645	136.62	136.6	136.59	136.58	136.58
646	135.3	135.27	135.25	135.25	135.25
647	133.69	133.66	133.64	133.63	133.63
648	131.75	131.71	131.68	131.68	131.67
649	129.39	129.34	129.31	129.3	129.3
650	126.52	126.46	126.43	126.42	126.41
651	123.03	122.95	122.91	122.9	122.89
652	118.76	118.67	118.62	118.61	118.6
653	113.55	113.44	113.38	113.36	113.35
654	107.18	107.05	106.98	106.96	106.94
655	99.43	99.27	99.18	99.16	99.14
656	90.06	89.87	89.77	89.73	89.72
657	78.89	78.66	78.54	78.5	78.48
658	65.87	65.61	65.47	65.43	65.41
659	51.24	50.95	50.8	50.75	50.73
660	35.61	35.3	35.15	35.1	35.08

ตารางที่ 10 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่า $T_g = 198^{\circ}\text{C}$ กับ $T_g = 215^{\circ}\text{C}$

0.08325	198	215	0.08325	198	215
611	113.05	121.27	636	141.78	153
612	119.32	128.16	637	141.56	152.75
613	124.22	133.56	638	141.28	152.44
614	128.05	137.78	639	140.93	152.06
615	131.05	141.1	640	140.51	151.59
616	133.41	143.7	641	139.99	151.02
617	135.27	145.77	642	139.37	150.33
618	136.76	147.41	643	138.61	149.49
619	137.94	148.72	644	137.7	148.48
620	138.89	149.77	645	136.6	147.26
621	139.65	150.62	646	135.27	145.79
622	140.26	151.3	647	133.66	144.01
623	140.76	151.85	648	131.71	141.85
624	141.15	152.29	649	129.34	139.23
625	141.47	152.64	650	126.46	136.05
626	141.72	152.92	651	122.95	132.17
627	141.91	153.13	652	118.67	127.44
628	142.05	153.29	653	113.44	121.66
629	142.15	153.41	654	107.05	114.6
630	142.21	153.47	655	99.27	106
631	142.23	153.5	656	89.87	95.62
632	142.22	153.48	657	78.66	83.24
633	142.17	153.43	658	65.61	68.82
634	142.08	153.33	659	50.95	52.63
635	141.95	153.19	660	35.3	35.34

ภาคผนวก จ

สมการการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

$$U\left(\frac{\Delta y}{2}\right)(T_a - T_{i,j}) + U\left(\frac{\Delta x}{2}\right)(T_a - T_{i,j}) + k\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}\right) + k\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{T_{i,j-1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) = 0$$

$$\frac{1}{2}\left(U(\Delta y + \Delta x) + k\left(\frac{\Delta y + \Delta x}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta y}\right)\right)T_{i,j} - \frac{k}{2}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)T_{i+1,j} - \frac{k}{2}\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j-1} = \frac{U}{2}(\Delta y + \Delta x)T_a$$

(1)

$$k\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}\right) + U(\Delta x)(T_a - T_{i,j}) + k\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}\right) + k(\Delta x)\left(\frac{T_{i,j-1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) = 0$$

$$-\frac{k}{2}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)T_{i-1,j} + \left(U(\Delta x) + k\left(\frac{\Delta y + \Delta x}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta y}\right)\right)T_{i,j} - \frac{k}{2}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)T_{i+1,j} - k\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j-1} = U(\Delta x)T_a$$

(2)

$$k\left(\frac{\Delta y}{2}\right)\left(\frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}\right) + U\left(\frac{\Delta x}{2}\right)(T_a - T_{i,j}) + \left(\frac{\Delta y}{2}\right)h_a(T_a - T_{i,j}) + k\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{T_{i,j-1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) = 0$$

$$-\frac{k}{2}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)T_{i-1,j} + \frac{1}{2}\left(U(\Delta x) + k\left(\frac{\Delta y + \Delta x}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta y}\right) + (\Delta y * hA)\right)T_{i,j} - \frac{k}{2}\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j-1}$$

$$= \frac{1}{2}(U(\Delta x) + (\Delta y * hA))T_a$$

(3)

$$U(\Delta y)(T_a - T_{i,j}) + k\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) + k(\Delta y)\left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}\right) + k\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{T_{i,j-1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) = 0$$

$$-\frac{k}{2}\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j+1} + \left(U(\Delta y) + k\left(\frac{\Delta y + \Delta x}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta y}\right)\right)T_{i,j} - k\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)T_{i+1,j} - k\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j-1} = U(\Delta y)T_a$$

(4)

$$k(\Delta y)\left(\frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}\right) + k(\Delta x)\left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) + k(\Delta y)\left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}\right) + k(\Delta x)\left(\frac{T_{i,j-1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) = 0$$

$$k\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j+1} + k\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)T_{i-1,j} - \left(2k\left(\frac{\Delta y + \Delta x}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta y}\right)\right)T_{i,j} + k\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)T_{i+1,j} + k\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j-1} = 0$$

(5)

$$k(\Delta y)\left(\frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta x}\right) + k\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) + (\Delta y)h_a(T_a - T_{i,j}) + k\left(\frac{\Delta x}{2}\right)\left(\frac{T_{i,j-1} - T_{i,j}}{\Delta y}\right) = 0$$

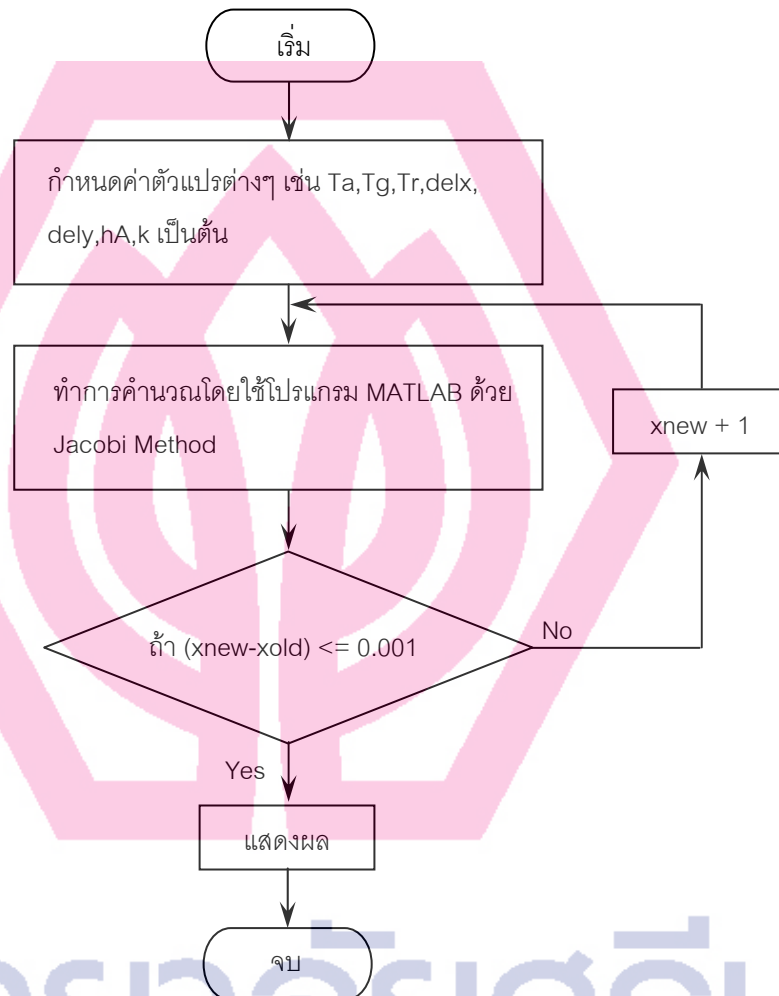
$$-\frac{k}{2}\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j+1} - k\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)T_{i-1,j} + \left(k\left(\frac{\Delta y + \Delta x}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta y}\right) + (\Delta y * hA)\right)T_{i,j} - \frac{k}{2}\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)T_{i,j-1}$$

$$= (\Delta y * hA)T_a$$

(6)

ภาคผนวก จ

แผนภาพการเขียนโปรแกรมโดยใช้วิธี "Jacobi"



ภาคผนวก ช

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม MATLAB (Sample Source Code)

```

function x = Jacobi_f(A, b, x0, tol, max)
% Solution of the system of linnear equatiion
% Ax = b
% using iterative Jacobi algorithm
% Inputs :
% A coefficient matrix (n-by-n)
% b right-hand side (n-by-1)
% x0 initial solution (n-by-1)
% tol stop if norm of change in x < tol.
% max maximum number of iterations
% Outputs :
% x solution vecter (n-by-1)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

delx = 0.1; % (m)
dely = 0.1; % (m)

Ta = 35; % Assumption temperature at atm. (C)
hA = 20;
Tg = 198; % Combustion temperature (C)[471K]
k = 38.728*(10^-3); % Thermal conductivity of air at 471K
Tr = 151; % At temperature return (C)

L1 = 0.002; % At thickness of SUS. 2 mm.
k1 = 16.968; % Thermal conductivity of SUS.at 423K (150C)

L2 = 0.05; % At thickness of glass 50 mm.
k2 = 0.08325; % Thermal conductivity of glass wool

```



```

[n m] = size(A);
xold = x0;
C = -A;
for i = 1:n
    C(i,i) = 0;
end
for i = 1:n
    C(i,:) = C(i,+)/A(i,i);
end
for i = 1:n
    d(i,1) = b(i)/A(i,i);
end
i = 1;
disp(' i x1 x2 x3 ....');
while (i <= max)
    xnew = C * xold + d;
    if norm(xnew-xold) <= tol
        x = xnew;
        format bank;
        disp(' Jacobi method converged');
        return;
    else
        xold = xnew;
    end
    disp([i xnew]);
    i = i + 1;
end
disp('Jacobi method did not converge');
disp('results after maximum nummber of iterations');
x = new;

```

ภาคผนวก ซ

รายการคำนวณสถานะการใช้พลังงานของอุโมงค์อบสีถึงสะสมสารทำความเย็นเบื้องต้น

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ปล่อยปล่อยทิ้ง \dot{Q} (Exited Air)

ท่อที่ 1

$$\dot{m} = \rho u_m A$$

$$= (1.080524 \text{ kg/m}^3)(1.0 \text{ m/s})(0.155 \text{ m})^2$$

$$= 0.026 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$$

$$= (0.026 \text{ kg/s})(1.007482 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C})(54-32) ^\circ\text{C}$$

$$= 0.5763 \text{ kJ/s}$$

$$= 0.5763 \text{ kW}$$

ท่อที่ 2

$$\dot{m} = \rho u_m A$$

$$= (1.2358 \text{ kg/m}^3)(0.5 \text{ m/s})(0.155 \text{ m})^2$$

$$= 0.0014845 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$$

$$= (0.0014845 \text{ kg/s})(1.00669 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C})(42-32) ^\circ\text{C}$$

$$= 0.01494 \text{ kJ/s}$$

$$= 0.01494 \text{ kW}$$

ท่อที่ 3

$$m = \rho u_m A$$

$$= (1.048232 \text{ kg/m}^3)(3.2 \text{ m/s})(0.3 \text{ m})^2$$

$$= 0.30189 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = m c_p \Delta T$$

$$= (0.30189 \text{ kg/s})(1.008076 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(63-32)^\circ\text{C}$$

$$= 9.4342 \text{ kJ/s}$$

$$= 9.4342 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}(\text{รวม}) = 0.5763 \text{ kW} + 0.01494 \text{ kW} + 9.4342 \text{ kW}$$

$$= 10.02 \text{ kW}$$

จากการคำนวณสามารถบอกได้ว่าค่าปริมาณความร้อนที่ปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศ มีดังนี้

ท่อที่ 1 = 0.5763 kW, ท่อที่ 2 = 0.01494 kW, ท่อที่ 3 = 9.4342 kW, ความร้อนรวม = 10.02 kW

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการอบสีชิ้นงาน \dot{Q} (Product)

อัตราการไหลของมวลชิ้นงานสูงสุดคิดที่ชิ้นงานขนาด 20 kg ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ใหญ่และหนักที่สุดในการผลิตช่วงนี้ของบริษัท โดยสายพานมีอัตราเร็ว 0.45 m/min หรือ 0.0075 m/s และ ระยะที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ภายใน

อุโมงค์อบสีเท่ากับ 10.8 m (2x5.4 m) ซึ่ง ณ เวลาใดๆ ภายในอุโมงค์อบสีจะมีจุดแขวน 33 จุดแขวนแต่ชิ้นงานขนาด 20 kg ต้องใช้ 3 จุดแขวนดังนั้น ณ เวลาใดๆ ภายในอุโมงค์อบสีจะมีชิ้นงานขนาด 20 kg ทั้งหมด 11

ชิ้นงานซึ่งเป็นจำนวนชิ้นงานที่มากที่สุด ณ ช่วงเวลาใดๆ ภายในอุโมงค์อบสี การคำนวณนี้อยู่บนพื้นฐานที่ไม่คิดความร้อนที่ให้กับสายพานลำเลียงและอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบสีเสกียร์และคองที่ในแต่ละตำแหน่ง

$$\dot{m} = \left(\frac{20 \times 11}{1440} \right) = 0.15 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$$

$$= (0.15 \text{ kg/s})(0.45 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(137.92 - 32)^\circ\text{C}$$

$$= 7.15 \text{ kW}$$

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศ \dot{Q} (Intake Air)

สมดุลมวล (Mass Balance)

$$\dot{m}(in) = \dot{m}(out)$$

$$\dot{m}(in) = \dot{m}(out) = 0.026 \text{ kg/s} + 0.0014845 \text{ kg/s} + 0.30189 \text{ kg/s}$$

$$= 0.33 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$$

$$= (0.33 \text{ kg/s})(1.008 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(137.92 - 32)^\circ\text{C}$$

$$= 35.23 \text{ kW}$$

ปริมาณความร้อนจากฮีตเตอร์ \dot{Q} (Heater)

$$\dot{Q}(\text{Heater}) = 60 \text{ kW}$$

การคำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังอุโมงค์อบ \dot{Q} (Loss from Wall)

จากการทำสมดุลความร้อน

$$\dot{Q}(\text{loss - wall}) = \dot{Q}(\text{heater}) - \dot{Q}(\text{intake - air}) - \dot{Q}(\text{products}) - \dot{Q}(\text{exited - air})$$

$$\dot{Q}(\text{Loss-Wall}) = 60 \text{ kW} - 35.23 \text{ kW} - 7.15 \text{ kW} - 10.02 \text{ kW} = 7.6 \text{ kW}$$

การคำนวณและประเมินหาค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนใยแก้วในสถานะเบื้องต้น

$$\dot{Q} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{x}$$

$$k = \frac{\dot{Q}x}{A(T_1 - T_2)}$$

$$= \frac{(7.6 \text{ kW})(0.05 \text{ mm})}{(58.55 \text{ m}^2)(410.92 - 333) \text{ K}}$$

$$= 0.083 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

หมายเหตุ: ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนใยแก้วที่ใช้เป็นแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่น (ใหม่) มีค่าโดยประมาณ

0.045 W/m·K

ภาคผนวก ฅ

การหาระดับอ้างอิงของอุณหภูมิ

การหาระดับอ้างอิงของอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 1

$$Q_{\text{จากการวัด}} = Q_{\text{คำนวณ}}$$

~~$$MC\Delta T_{\text{จากการวัด}} = MC\Delta T_{\text{คำนวณ}}$$~~

$$149.62 - 116.21 = 160 - X$$

$$X = 126.59$$

การหาระดับอ้างอิงของอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 6

$$Q_{\text{จากการวัด}} = Q_{\text{คำนวณ}}$$

~~$$MC\Delta T_{\text{จากการวัด}} = MC\Delta T_{\text{คำนวณ}}$$~~

$$149.64 - 108.18 = 160 - X$$

$$X = 118.54$$

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล: ดร. อมตะ ทศนภักดิ์

วัน/เดือน/ปี: 29/06/2512

สถานที่เกิด: จังหวัดสุรินทร์

ที่อยู่ปัจจุบัน: 33 ซ.ยิ้มอุปลัมภ์ ถ.สุทธิสาร ดินแดง กรุงเทพฯ

ตำแหน่ง: อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สถานที่ทำงาน: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ประวัติการศึกษา: ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
University of Pittsburgh-Pittsburgh, PA, USA.
ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
Bradley University-Peoria, IL, USA.
ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยรังสิต

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY