

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มประสิทธิภาพเตาอบไฟฟ้า

Efficiency improvement of an electric oven.



T119359

โดย

ชนดล โอวาทพารพร

ธีรยุทธ นิ่มนุ้ย

ธีรวิทย์ ไฉนยหิรัญโชติ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.จินรักษ์ เขียวพงษ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...119359
วัน,เดือน,ปี...- 7 S.ค. 2554

b.....46
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency improvement of an electric oven.

THANADON

OWATRANPORN

TEERAYUTH

NIMNUY

TEERAVEE

WAIZHAYHIRUNCHOTI



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพเตาอบไฟฟ้า

Efficiency improvement of an electric oven.

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|----------------|----------------|--------------|----------|
| 1. นาย ธนดล | โอวาทพารพร | รหัสประจำตัว | 50010600 |
| 2. นาย ชีรยุทธ | นันทนุ้ย | รหัสประจำตัว | 50010706 |
| 3. นายธีรวีร์ | ไฉฉายหิรัญโชติ | รหัสประจำตัว | 50010712 |



(Handwritten signature)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.ชินรักษ์ เรียงพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มประสิทธิภาพเตาอบไฟฟ้า

นาย ธนดล โอวาทพารพร
 นาย ชีรยุทธ นิ่มนุ้ย
 นาย ชีรวีร์ ไวลายหิรัญโชติ
 รศ.ดร.ชินรักษ์ เขียวพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์คือ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า การวิจัยจะทดสอบเตาอบไฟฟ้า 3 อย่างคือ 1.ทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า 2.ทดสอบการกระจายความร้อนภายในเตาอบ 3.ทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ

หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าคือ การดูดกลืนความร้อนที่ผนังด้านในของเตาอบ ถ้าค่าการดูดกลืนความร้อนนี้น้อย จะทำให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยลง ประสิทธิภาพของเตาอบก็จะเพิ่มขึ้น โดยการที่จะทำให้ผนังด้านในของเตาอบมีการดูดกลืนความร้อนน้อยนั้น ควรจะเลือกผนังด้านในของเตาอบที่มีค่า Emissivity น้อย (ค่า Reflectivity สูง) ซึ่งในการวิจัยได้ทำการบุผนังด้านในของเตาอบด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ ปัจจัยที่สองในการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาอบคือการไหลของอากาศร้อนภายในเตาอบที่เหมาะสม การไหลของอากาศร้อนจะช่วยให้การกระจายความร้อนภายในเตาอบดีขึ้น เวลาในการทำอุณหภูมิของเตาอบให้ถึงจุดที่ต้องการสั้นลง ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่อาหาร ทำให้อาหารสุกทั่วถึง และประหยัดพลังงานมากขึ้น ปัจจัยที่สามที่การศึกษาคุณสมบัติการนำความร้อนของฉนวน การวิจัยได้ศึกษาความหนาวิกฤติของฉนวนที่ใช้กับเตาอบไฟฟ้า และทำการเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50 mm ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า อะลูมิเนียมฟอยล์ สามารถลดเวลาการ preheat ไปได้ 94 วินาทีและเพิ่มประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าได้จาก 11.31% เป็น 13.73%

คำหลัก: การพาความร้อนแบบบังคับ, รูปแบบการไหลของอากาศ, ฉนวน

Efficiency improvement of an electric oven.

Tanadon Owatlanporn

Teerayuth Nimnuy

Teeravee Waizhayhirunchoti

Assoc.Prof.Dr.Chinnaruk Thianpong Advisor

ABSTRACT

The purpose of this project is to improve efficiency of and electric oven. The study will be measured the performance of electric oven: 1. Preheating test of the empty oven 2. Heat distribution test 3. Thermal efficiency test.

One of the major factors of increasing the efficiency of electric oven is heat absorption by inner wall. If the heat absorption is less, it will increase the efficiency. So should be used low emissivity material (high reflectivity) as inner wall.

Flow pattern inside the oven is one of the factors in convection heat transfer. The suitable flow will reduce the preheating time, dead zones and hot spots. Therefore, the temperature distribution in oven chamber will be more even. The oven reaches the desire temperature in shorter time. Food will be better cooked and better energy saving.

The insulator is to prevent heat loss from the oven. The capability to insulate of the insulator is up to thermal conductivity and insulator thickness. The thicker insulator will reduce the oven heat loss. From experiment found that aluminium foil can reduce preheating time to 94 seconds and increase efficiency of electric oven from 11.31% to 13.73%

Keywords: forced convection, air flow pattern, insulator

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีเพราะได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร.ชินรักษ์ เขียรพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการแก้ปัญหา การให้ความดูแลเอาใจใส่ และต้องขอขอบพระคุณท่านอาจารย์สาขาวิชาเครื่องกลทุกท่าน ที่คอยดูแลเอาใจใส่คอยชี้แนะและช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณพี่นพดล รักษาดี วิศวกรแผนกเตาอบไฟฟ้าจากบริษัทไทยซัมซุง อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ที่เสียสละเวลามาทดสอบค่าเพื่อให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงความรู้เกี่ยวกับเตาอบไฟฟ้า

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือบิดามารดา อันเป็นที่เคารพยิ่งที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนด้านทุนทรัพย์และให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่อีกทั้งยังให้กำลังใจและเอาใจใส่เสมอมาอันหาที่เปรียบมิได้ ทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในวันนี้ ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นาย ธนดล โอวาทพารพร

นาย ธีรยุทธ นิ่มนุ้ย

นาย ธีรวิทย์ ไวลายหิรัญโชติ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัย	5
3.1 การนำความร้อนในสถานะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ	5
3.1.1 ผงักรีขบ	6
3.1.1.1 การกระจายของอุณหภูมิ	7
3.1.1.2 ความต้านทานความร้อน	8
3.1.1.3 ผงักรหลายชั้น	9
3.2 การพาความร้อนแบบอิสระ	11
3.2.1 สมการควบคุมของการพาความร้อนอิสระและพารามิเตอร์ไร้มิติ	12
3.2.2 สมการเอมไพริคัลสำหรับการไหลภายนอกวัตถุ	16
3.2.2.1 แผ่นเรียบวางในแนวตั้ง	16
3.2.2.2 แผ่นราบเรียบในแนวนอน	17
3.3 การแผ่รังสีความร้อน	19
3.3.1 มโนทัศน์พื้นฐาน	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.3.2	กำลังการปล่อยออก	21
3.3.3	เออร์ดิเอชัน	22
3.3.4	การแผ่รังสีของวัตถุดำ	23
3.3.5	กฎของ Stefan BoltZmann	24
3.3.6	การปล่อยออกของผิว	25
3.3.7	การดูดกลืนการสะท้อนและการผ่านทะลุของผิวรังสีของผิว	26
3.3.7.1	ค่าการดูดกลืนของผิว	27
3.3.7.2	ค่าการสะท้อนของผิว	28
3.3.7.3	ค่าการผ่านทะลุของผิว	29
3.4	การถ่ายเทความร้อนโดยการพา	29
3.5	การไหลผ่านทรงกระบอกในแนวขวาง	30
3.5.1	การไหลของไหล	30
3.5.2	การพาความร้อน	33
3.5.3	สัมประสิทธิ์ Zhukauskas	35
บทที่ 4	ลักษณะทั่วของเตาอบไฟฟ้า	36
4.1	ลักษณะทั่วไป	36
4.2	ส่วนประกอบสำคัญต่างๆภายในเตาอบ	39
4.3	การทำงานของเตาอบไฟฟ้า	42
บทที่ 5	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	44
5.1	การทดสอบให้ความร้อนของเตาอบเปล่า	44
5.1.1	อุปกรณ์การทดลอง	44
5.1.2	ขั้นตอนการทดลอง	44
5.2	การทดสอบการกระจายความร้อนภายในเตาอบ	45
5.2.1	อุปกรณ์การทดลอง	45
5.2.2	ขั้นตอนการทดลอง	45
5.3	การทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ	46
5.3.1	การเตรียมก่อนทดสอบ	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 อุปกรณ์การทดลอง	48
5.3.3 สภาพแวดล้อมในการทดสอบ	49
5.3.4 การเตรียมการทดสอบ	49
5.3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	49
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	51
6.1 ผลการทดลองการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า	51
6.2 ผลการทดลองการทดสอบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ	52
6.2.1 ฟาโครบพิคัลสมแบบดั้งเดิม	52
6.2.2 ฟาโครบพิคัลสมแบบที่ 1	57
6.2.3 ฟาโครบพิคัลสมแบบที่ 2	61
6.2.4 ฟาโครบพิคัลสมแบบที่ 3	66
6.3 ผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ	70
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	72
7.1 สรุปผลการทดลอง	72
7.2 ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าคงที่ของสมการ(3.85) สำหรับทรงกระบอกกลมในการไหลตัด	34
3.2 ค่าคงที่ของสมการ(3.85) สำหรับทรงกระบอกที่ไม่กลมในการไหลตัดของแก๊ส	34
3.3 ค่าคงที่ของสมการ(3.86) สำหรับทรงกระบอกกลมในการไหลตัด	35
5.1 ขนาดมาตรฐานของก้อนอะลูมิเนียมอัลลอย	47
5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของเตาอบไฟฟ้ากับขนาดก้อนทดสอบ	48



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ	7
3.2 วงจรความร้อนสมมูลย์สำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม	10
3.3 วงจรความร้อนสมมูลย์แบบผสม	10
3.4 บาวน์คาร์เลเยอร์สำหรับการพาความร้อนแบบอิสระบนแผ่นเรียบวางในแนวดิ่ง	11
3.5 การไหลของชั้นขอบเขตอิสระซึ่งเคลื่อนโดยการลอยตัว	12
3.6 การไหลเนื่องจากการลอยตัวบนแผ่นเรียบในแนวนอน	18
3.7 การเย็นตัวโดยการแผ่รังสีของของแข็งที่ร้อน	20
3.8 ขบวนการปล่อยออก (a) เป็นปรากฏการณ์ทางปริมาตร (b) ปรากฏการณ์ของพื้นผิว	20
3.9 การปล่อยรังสีออกจากชิ้นส่วนเล็กๆของผิว da_1 เข้าไปในครึ่งทรงกลมสมมติ ซึ่งมีศูนย์กลางที่จุดบน da_1	21
3.10 ลักษณะรังสีตกกระทบ	22
3.11 คุณลักษณะช่องกลางของวัตถุดำอุณหภูมิคงที่	24
3.12 ขบวนการดูดกลืน การสะท้อน และการผ่านทะลุของตัวกลางโปร่งแสง	26
3.13 รูปแบบบาวน์คาร์เลเยอร์และการแยกตัวบนการไหลผ่านทรงกระบอกและแนวขวาง	30
3.14 รูปร่างของความเร็วและการแยกตัวในการไหลผ่านทรงกระบอกกลม	31
3.15 ผลของเทอร์บูเลนซ์ต่อการแยกตัว	32
3.16 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการไหลผ่านทรงกระบอกกลมเรียบและทรงกลม	33
3.17 ค่า Nu_x สำหรับอากาศไหลตั้งฉากกับทรงกระบอกกลม	33
4.1 แสดงการทำงานภายในเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST	37
4.2 ลักษณะภายนอกของเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST	37
4.3 ขนาดภายนอกของเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST	37
4.4 ส่วนประกอบของเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST	38
4.5 ปุ่มควบคุมเตาอบ	38
4.6 ขดลวดรอบพัดลม	39
4.7 ขดลวดบนผนังเตาอบ	39
4.8 ขดลวดด้านล่างเตาอบ	40
4.9 พัดลมในเตาอบ	40
4.10 ฝาครอบพัดลม	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ฉนวนกันความร้อน	41
4.12 กราฟแสดงอุณหภูมิการตัดต่อของเทอร์โมสตัดในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง	42
5.1 ความห่างแต่ละชั้นของของตำแหน่งการติดเทอร์โมคัปเปิล	45
5.2 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในแต่ละชั้น	46
5.3 วงจรทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า	48
5.4 กราฟแสดงการตัดต่อของเทอร์โมสตัด	49
6.1 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า	51
6.2 กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า	52
6.3 ฝาครอบปิดลมแบบดั่งเดิม	52
6.4 ฝาครอบปิดลมแบบที่ 1	57
6.5 ฝาครอบปิดลมแบบที่ 2	61
6.6 ฝาครอบปิดลมแบบที่ 3	66
6.7 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า	71
6.8 กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากทุกวันนี้ครัวเรือนส่วนใหญ่มีการประกอบอาหารโดยใช้เตาอบไฟฟ้า ถ้าเตาอบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพต่ำ คือมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงเกินไป จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

โดยทั่วไปพลังงานที่เตาอบใช้ (Energy input) [2] ประมาณ 47% จะถูกดูดซับโดยโครงสร้างของเตาอบ, 25% จะสูญเสียไปทางผนังของเตาอบ และ 15% จะสูญเสียไปเนื่องจากการระเหยของไอน้ำของอากาศภายในเตาอบ ดังนั้นหากมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาอบไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น และมีการสูญเสียความร้อนภายในเตาอบให้น้อยลง โดยที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้ยังคงเท่าเดิมหรือลดน้อยลง ทำให้ช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าภายในครัวเรือนและช่วยประเทศชาติลดพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าลงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) ศึกษาหลักการการทำงานของเตาอบไฟฟ้า
- 2) วัดประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า
- 3) ปรับปรุงเตาอบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

โครงการนี้เป็นกรปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า โดยทำการทดสอบเตาอบไฟฟ้า 3 อย่างคือ

- 1) ทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test of the empty oven)
- 2) ทดสอบการกระจายความร้อนภายในเตาอบ (Heat distribution test)
- 3) ทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ (Thermal efficiency test)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) รวบรวมและศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าและการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า

2) กำหนดตัวแปรที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าและทำการวางแผนเพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า

3) ทำการติดตั้ง เตาอบไฟฟ้าและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าเตาอบไฟฟ้า

4) ทำการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า และหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้า

5) ทำการคำนวณเชิงตัวเลขและหาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนและคำนวณค่าพิสัยของการกระจายตัวของอุณหภูมิ

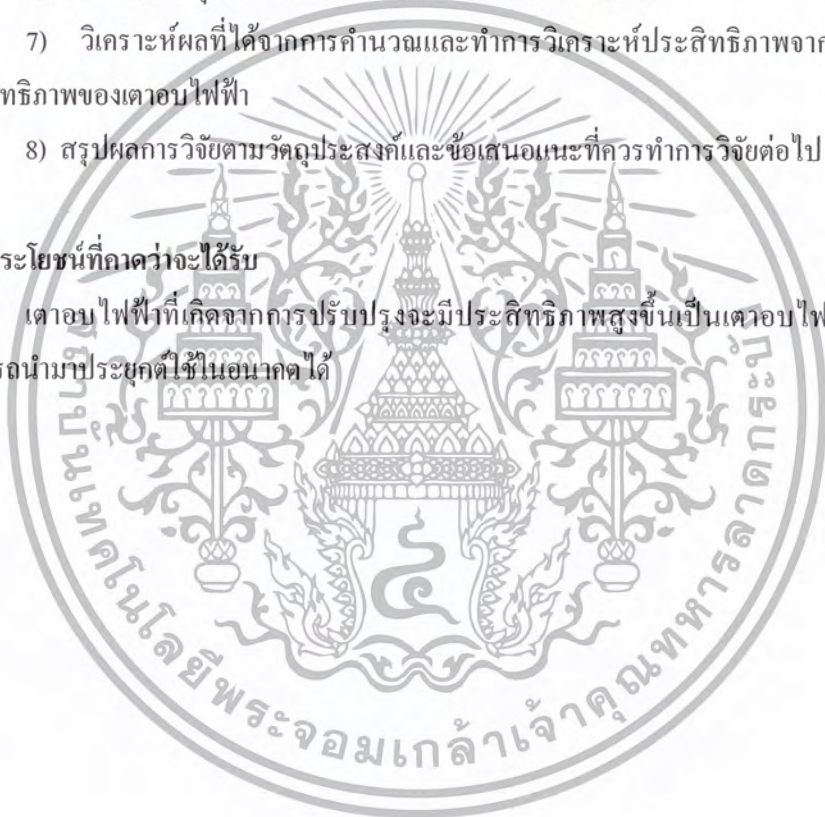
6) ทำการปรับปรุงโครงสร้างภายในเตาอบตามที่ได้วางแผน

7) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณและทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า

8) สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์และข้อเสนอแนะที่ควรทำการวิจัยต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เตาอบไฟฟ้าที่เกิดจากการปรับปรุงจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นเตาอบไฟฟ้าต้นแบบที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอนาคได้



บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาในเรื่องการปรับปรุงเตาอบไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความร้อนเพื่อที่จะหาวิธีในการลดต้นทุนในด้านพลังงาน และได้มีการค้นคว้าวิธีการปรับปรุงเตาอบไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วงศ์ วิชโรคมประเสริฐ, วิชัย ศิวะโกศิษฐ. (2006) [12] ศึกษาการจำลองแบบทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า เพื่อหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของวัตถุภายในเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยไม่ต้องใช้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุในเตาอบ งานวิจัยนี้ได้แสดงการจำลองโดยใช้ Correction Filter เพื่อชดเชยผลของสัมประสิทธิ์ดังกล่าว และทำให้การตอบสนองเชิงอุณหภูมิของแบบจำลองแม่นยำขึ้น

B.M. Shaughnessy, M. Newborough. (1999) [4] ศึกษาการออกแบบเตาอบแบบปล่อยพลังงานต่ำ ทำให้มีการดูดกลืนของความร้อนที่ผนังน้อยลง โดยเปรียบเทียบกับเตาอบทั่วไปที่ใช้ในบ้านซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานและกำลังไฟฟ้าลงได้

C. Scarisbrick, M. Newborough, S.D. Probert. (1991) [13] ทำการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ ดังนี้ (1) เปลี่ยนรูปแบบต่างๆของขดลวดทำความร้อน (2) ผนังด้านในของเตาอบบุด้วยวัสดุที่มีค่า emissivity ต่ำ (3) ควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบด้วย PID controller (4) เปลี่ยนฉนวนชนิดต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบจาก 13% เป็น 26%

James K. Carson, Jim Willix, Mike F. North. (2005) [11] วัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาอบ โดยใช้ 4 วิธีคือ (1) วิธี back-calculation จากข้อมูลอุณหภูมิแบบทรานเซียน (2) ใช้ heat flux sensor (3) ใช้อัตราการสูญเสียมวล (mass-loss rate) (4) วิธี Psychrometric ค่าที่ได้จะอยู่ระหว่าง 15 และ 40 $Wm^{-2}K^{-1}$ จากวิธีทั้ง 4 วิธีพบว่าวิธีที่ใช้ heat flux sensor เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและเป็นวิธีเดียวที่พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของเวลาในสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

J. Xamán, J. Arce, G. Álvarez, Y. Chávez. (2008) [9] ศึกษาเชิงตัวเลขสองมิติ (two-dimensional) ของการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาความร้อนธรรมชาติแบบราบเรียบ (Laminar) และการพาความร้อนแบบปั่นป่วน (Turbulent) กับการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวของช่องสี่เหลี่ยม (Square cavity) ที่ใช้กระจกเป็นผนัง ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการไหลมีลักษณะที่ไม่

สมมาตรเนื่องจากผลกระทบจากอุณหภูมิไม่คงที่ของผนังกระจก (non-isothermal glass wall) และการแผ่รังสีที่เกิดขึ้น

Melike Sakin, Figen Kaymak-Ertekin, Coskan Ilicali. (2009) [8] ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนร่วมของการพาความร้อนและการแผ่รังสี อุณหภูมิภายในเตาอบอยู่ในช่วง 70-220°C แบบใช้พัดลมและแบบไม่ใช้พัดลม งานวิจัยใช้วิธี Lumped Capacity และ Time-Temperature Matching



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัย

3.1 การนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ (one dimensional, Stead-State Conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ โดยความร้อนเคลื่อนที่ไปตามเนื้อวัสดุ แต่เนื้อวัสดุที่เป็นตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่แต่ใด เช่น เมื่อเผาปลายข้างหนึ่งของแท่งโลหะที่ปลายข้างนั้นจะสันสะเก็ทอนหรือเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น โมเลกุลของโลหะที่ปลายข้างนั้นจะสันสะเก็ทอนหรือเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น โมเลกุลนี้จะไปชนกับโมเลกุลที่อยู่เคียงอื่นๆ ทำให้โมเลกุลข้างเคียงสันสะเก็ทอนหรือเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วย เป็นลักษณะเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป โดยวิธีนี้ความร้อนสามารถถูกส่งไปยังอีกปลายข้างหนึ่งได้ กฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำหนดจากบิโอต์(Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน และเกร็ดียนอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{W} \quad (3.1)$$

หรือ

$$q_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{W/m}^2 \quad (3.2)$$

โดยที่ q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x

q_x คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity of material) และเป็นค่า

บวก

จากสมการ (3.1) ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวกของ x แล้ว $\frac{dT}{dx}$ เป็นลบ ดังนั้น q_x (หรือ q_x) มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายลบติดอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการ และเพื่อให้แน่ใจว่า q_x (หรือ q_x) เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศ

ทางบวกของ x ในทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ x

จุดประสงค์หลัก ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหา สนามอุณหภูมิ (Temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตของมัน นั่นคือต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาฟลักซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้น จากกฎฟูริเยร์(Fourier's Law) การหาค่านี้ทำโดยการใช้อนุพันธ์พลังงาน (Energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะทำให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

สารต่างๆจะมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีและเร็วไม่เท่ากัน สารที่สามารถนำความร้อนได้ดีและเร็วไม่เท่ากัน สารที่สามารถนำความร้อนได้ดีและเร็ว เรียกว่า ตัวนำความร้อน ได้แก่ พวกโลหะต่างๆเช่น เงิน (เป็นตัวนำความร้อนที่ดีที่สุด) ทองแดง อะลูมิเนียม เหล็ก ส่วนสารที่นำความร้อนไม่ดีหรือช้า เรียกว่า ฉนวนความร้อน ได้แก่ พวกอโลหะต่างๆ เช่น กระจก แก้ว ไม้ อากาศ และในจำนวนสารทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ ก๊าซจะเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีที่สุด

3.1.1 ผนังเรียบ(Plane wall)

สำหรับการนำความร้อนในหนึ่งมิติของผนังเรียบ อุณหภูมิจะเป็นฟังก์ชันของโคออร์ดิเนต x และการส่งผ่านความร้อนที่จําแนกเฉพาะในทิศทางนี้ ชนิดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันไหลผ่านในแต่ละด้านของผนังเรียบ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการพาความร้อนจากของไหลร้อนที่ $T_{\infty,1}$ ผู้ผิวหนึ่งของผนังที่ T_{s1} และผ่านผนังโดยการนำไปยังอีกด้านหนึ่งที่ T_{s2} จากนั้นความร้อนจะถูกพาออกไปโดยของไหลเย็นที่ $T_{\infty,1}$ ผู้ผิวผนังที่ T_{s1} และผ่านผนังโดยการนำไปยังอีกด้านหนึ่งที่ T_{s2} จากนั้นความร้อนจะถูกพาออกไปโดยของไหลเย็นที่ $T_{\infty,2}$

ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ สิ่งแรกที่จะต้องรู้ก็คือ การกระจายของอุณหภูมิภายในผนังเรียบ

3.1.1.1 การกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution)

การกระจายของอุณหภูมิภายในผนัง หาได้จากสมการการฟุ้งกระจายของความร้อนและเงื่อนไขที่ขอบแบบต่างๆตามเงื่อนไขดังกล่าว และไม่มีการผลิตความร้อนภายในผนังสมการจะลดรูปเป็น

$$\frac{d(kdT/dx)}{dx} = 0 \quad (3.3)$$

ถ้าสมมติค่า k คงที่ โดยการอินทิเกรต 2 ครั้ง ได้คำตอบทั่วไปเป็น

$$T(x) = c_1x + c_2 \quad (3.4)$$

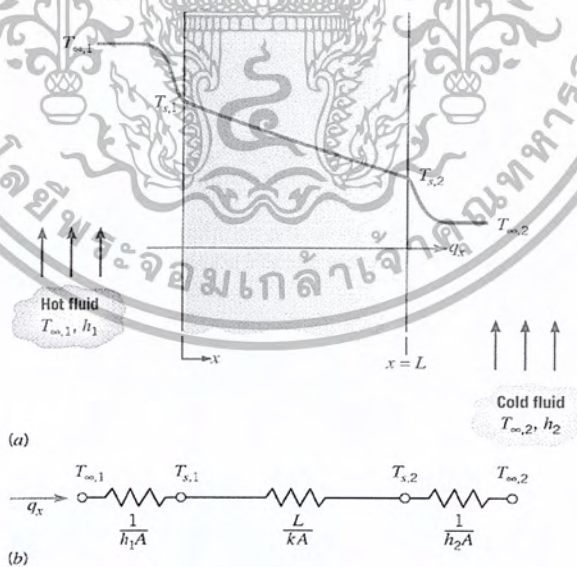
โดยเงื่อนไขที่ขอบตามรูปได้ว่า $T(0) = T_{s1}$ และ $T(L) = T_{s2}$ แทนใน (3.4) จะได้

$$C_1 = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{L}$$

$$C_2 = T_{s1}$$

ดังนั้นคำตอบทั่วไปของการกระจายของอุณหภูมิในผนัง คือ

$$T(x) = (T_{s2} - T_{s1}) \frac{x}{L} + T_{s1}$$



รูปที่ 3.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ [7]

โดยใช้กฎของฟูริเยร์ เพื่อหาคำตอบของการส่งผ่านความร้อน นั่นคือ

$$T(x) = (T_{S1} - T_{S2}) \frac{x}{L} + T_{S1} \quad (3.5)$$

สังเกตว่า A เป็นพื้นที่ของผนังซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน และฟลักซ์ความร้อนนั้นก็

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{S1} - T_{S2}) \quad (3.6)$$

3.1.1.2 ความต้านทานความร้อน (Thermal resistance)

ในที่นี้เราจะนำสมการ (3.6) ซึ่งให้แนวทางที่สำคัญมากมาใช้นั้นคือความคล้ายคลึงกันระหว่างการฟุ้งกระจายของความร้อนและประจุไฟฟ้า โดยที่ความต้านทานไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า ดังนั้น ความต้านทานความร้อนก็ต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า ดังนั้น ความต้านทานความร้อนก็ต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำความร้อน จากสมการ (3.6)

ความต้านทานการนำความร้อน คือ

$$R_{t,cond} \equiv \left(\frac{T_{S1} - T_{S2}}{q_x} \right) = \frac{L}{kA} \quad (3.7)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับการนำไฟฟ้าในระบอบเดียวกัน กฎของโอห์มได้ให้รูปแบบความต้านทานไฟฟ้าเป็น

$$R_e = \frac{E_1 - E_2}{I} = L/(\sigma A) \quad (3.8)$$

นอกจากนี้ ความต้านทานความร้อนยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับการพาความร้อนจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q = hA(T_S - T_\infty) \quad (3.9)$$

ความต้านทานความร้อนสำหรับการพา คือ

$$R_{t,conv} \equiv \left(\frac{T_{S1} - T_{S2}}{q_x} \right) = \frac{1}{hA} \quad (3.10)$$

วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังเรียบที่มีการพาความร้อนที่ผิว แสดงในรูปที่ 3.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จาก การแยกพิจารณาของแต่ละช่วงในวงจร ซึ่งได้

$$q_x = \left(\frac{T_{\infty 1} - T_{S1}}{1/h_1 A} \right) = \left(\frac{T_{S1} - T_{S2}}{L/kA} \right) = \left(\frac{T_{S2} - T_{\infty 2}}{1/h_2 A} \right) \quad (3.11)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนอาจเขียนแทนด้วยเทอมของผลต่างอุณหภูมิทั้งหมด ($T_{\infty 1} - T_{\infty 2}$)

และความต้านทานความร้อนรวม R_{t0}

$$q_x = \left(\frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{t0}} \right) \quad (3.12)$$

เนื่องจากความต้านทานการนำและการพาต่ออนุกรมกัน จึงได้

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (3.13)$$

3.1.1.3 ผนังหลายชั้น (Composite wall)

วงจรร้อนสมมูลอาจใช้สำหรับระบบที่ซับซ้อนได้เหมือนกัน เช่น ผนังหลายชั้น ซึ่งจำนวนความต้านทานความร้อนที่ต่ออนุกรมและขนานกัน จะขึ้นอยู่กับชั้นของวัสดุที่แตกต่างกัน พิจารณาผนังเรียบ หลายชั้นที่ต่ออนุกรมกันของรูปที่ 3.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติของระบบนี้ เขียนได้เป็น

$$q_x = \left(\frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 4}}{\sum R_t} \right) \quad (3.14)$$

โดยที่ $T_{\infty 1} - T_{\infty 4}$ เป็นผลต่างของอุณหภูมิทั้งหมด และ $\sum R_t$ เป็นผลรวมของความต้านทานความร้อนรวม ดังนั้น

$$q_x = \left(\frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 4}}{[(1/h_1 A) + (L_A/k_A A) + (L_B/k_B A) + (L_C/k_C A) + (1/h_4 A)]} \right) \quad (3.15)$$

หรืออาจหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากกริดคิดในแต่ละช่วงก็ได้

$$q_x = \left(\frac{T_{\infty 1} - T_{s1}}{1/h_1 A} \right) = \left(\frac{T_{s1} - T_{s2}}{L_A/k_A A} \right) = \left(\frac{T_{s2} - T_3}{L_B/h_1 A} \right) = \dots \quad (3.16)$$

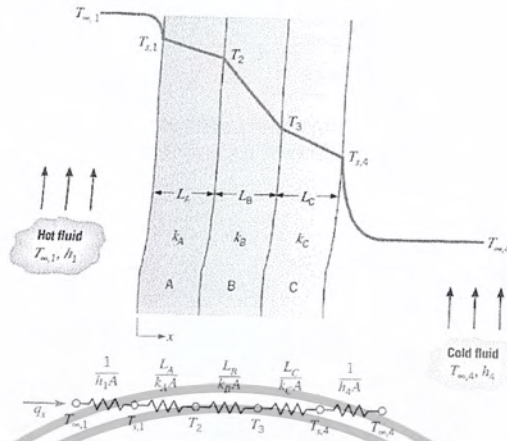
และโดยให้ U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient) ซึ่งกำหนดขึ้นมาจากความคล้ายคลึงกันกับกฎของการเย็นตัวของนิวตัน จะได้ว่า

$$q_x = UA\Delta T \quad (3.17)$$

ซึ่ง ΔT เป็นผลต่างของอุณหภูมิรวม จากสมการผลต่างอุณหภูมิรวม จากสมการ 3.14 และ 3.17 จะพบว่า

$UA = 1/R_{tot}$ และสำหรับผนังหลายชั้นตามรูปที่ 3.2

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} = \frac{1}{[(1/h_1)+(L_A/k_A)+(L_B/k_B)+(L_C/k_C)+(1/h_4)]} \tag{3.18}$$

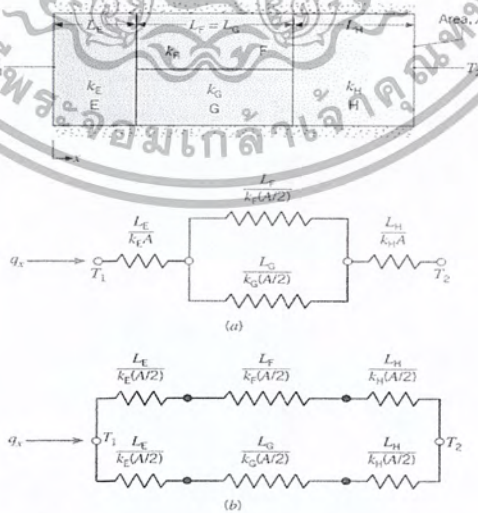


รูปที่ 3.2 วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม [7]

โดยทั่วไปอาจเขียนได้เป็น

$$R_{tot} = \sum R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA} \tag{3.19}$$

ผนังหลายชั้นอาจมีคุณลักษณะตามรูปร่างเป็นแบบอนุกรม ขนานก็ได้ ดังเช่นแสดงในรูปที่ 3.3 ถึงแม้ว่าการไหลของความร้อนจะเป็น 2 มิติ แต่อาจสมมติเป็นเงื่อนไขที่ผิวหนึ่งมิติได้โดยสมมติว่าผิวที่ตั้งฉากกับทิศทาง x มีอุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาหรืออาจสมมติว่าผิวซึ่งขนานกับแกน x เป็นอะเดียบาติกอย่างใดอย่างหนึ่ง

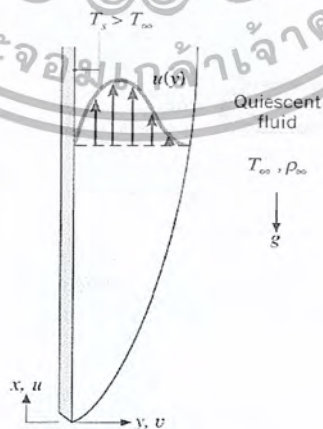


รูปที่ 3.3 วงจรความร้อนสมมูลแบบผสม [7]

3.2 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection)

การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ(Free or natural convection) ตัวอย่างเช่นเมื่อวางแผ่นร้อนแนวดิ่งในของไหลที่อยู่ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผ่นร้อนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นก่อน โดยการนำความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นในของไหล การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิภายในของไหลนี้ จะทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นในสนามความโน้มถ่วง ผลก็คือของไหลที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งมีความหนาแน่นต่ำจะพยายามลอยตัวสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าจะเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ แรงที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่พาความร้อน ได้นี้ เรียกว่า แรงลอยตัว (Buoyancy force)

การเคลื่อนที่ของของไหลในการพาแบบอิสระ เกิดเนื่องจากแรงลอยตัวภายในของไหล ขณะที่การพาแบบบังคับนั้นเกิดจากการบังคับจากภายนอก การลอยตัวของของไหลเป็นผลมาจากการผสมกันของเกรเดียนต์ความหนาแน่นของของไหลและแรงจลน์ที่หนักซึ่งเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นแรงจากน้ำหนักนั้นโดยปกติทั่วไปจะเนื่องมาจากความโน้มถ่วงของโลก แม้ว่าบางครั้งอาจเป็นแรงหนีศูนย์กลางในการหมุนของเครื่องจักรกลของไหลหรืออาจเป็นแรง Coriolis ในการเคลื่อนที่แบบหมุนในบรรยากาศและในมหาสมุทร มีหลายวิธีเช่นกันในการทำให้เกรเดียนต์ความหนาแน่นของมวลเพิ่มมากขึ้นในของไหล แต่โดยทั่วไปแล้วจะเกิดเนื่องจากมีเกรเดียนต์อุณหภูมิ เราทราบว่าความหนาแน่นของก๊าซและของเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ($\frac{\partial \rho}{\partial T} < 0$)



รูปที่ 3.4 บาวนด์รีเลเยอร์สำหรับการพาความร้อนแบบอิสระบนแผ่นเรียบวางในแนวดิ่ง [7]

3.2.1 สมการควบคุมของการพาความร้อนอิสระและพารามิเตอร์ไร้มิติ

สมการต่างๆที่กล่าวถึงการถ่ายเทโมเมนตัมและพลังงานในการพาแบบอิสระ ได้มาจากกฎการอนุรักษ์ ซึ่งกว่านั้นกระบวนการเฉพาะต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพาแบบอิสระจะเป็นเหมือนกับสมการในการพาแบบบังคับ แรงจากความเฉื่อยและแรงจากความหนืดยังคงมีความสำคัญต่อการถ่ายเทพลังงาน โดยการแพร่และการพา ส่วนใหญ่ความแตกต่างระหว่างการไหลทั้ง 2 แบบคือว่า ในการพาแบบอิสระบทบาทส่วนใหญ่จะเกิดจากแรงลอยตัวซึ่งเป็นตัวสำคัญในการไหลของของไหล



รูปที่ 3.5 การไหลของชั้นขอบเขตอิสระซึ่งเคลื่อนโดยการลอยตัว [7]

พิจารณาการไหลในคามินารี่บาวน์คาร์เลเยอร์(รูปที่3.4) นั้นจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว โดยสมมติว่าเป็นสภาวะการไหลสม่ำเสมอสองมิติ และคุณสมบัติต่างๆที่ ซึ่งแรงโน้มถ่วงกระทำในทิศทางลบของแกน x เช่นเดียวกันเราจะพิจารณาของไหลเป็นสารที่อัดตัวไม่ได้ เนื่องจากความเร็วของการไหลต่ำ ข้อพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับผลของความหนาแน่นที่เปลี่ยนไปในแรงลอยตัว (เรียกว่า การประมาณแบบ Boussinesq) เนื่องจากการแปรเปลี่ยนของความหนาแน่นนี้เป็นผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหล ในที่สุดเราจะสันนิษฐานได้ว่าการประมาณชั้นของขอบเขตใช้ได้

โดยสมการโมเมนตัมสั้นๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในทิศทาง x จะลดรูปไปเป็นสมการบาวน์คาร์เลเยอร์ยกเว้นเทอมแรงจากน้ำหนักที่คงไว้ ถ้าแรงนี้กระทำโดยแรงดึงดูดของโลกแรงจาก

น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรก็คือ $F_x = -\rho g$ เมื่อ g คือความเร่งจากแรงดึงดูดของโลก สมการโมเมนตัมในทิศทาง x คือ

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.20)$$

เพื่อหาเกร็ดความดัน $\frac{\partial p}{\partial x}$ ใช้สมการโมเมนตัมทิศทาง x (3.20) หาที่ขอบของบาวนด์รีเลย์เบอร์ โดยที่

$u \rightarrow 0$ และ $\rho \rightarrow \rho_\infty$ ดังนั้น

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_\infty g \quad (3.21)$$

โดยที่ ρ_∞ เป็นความหนาแน่นของของไหลภายนอกบาวนด์รีเลย์เบอร์ และแทนสมการ (3.21) ใน (3.20)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{g}{\rho} (\rho_\infty - \rho) - g + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.22)$$

ถ้า β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนเชิงปริมาตรของของไหล การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นต่ออุณหภูมิซึ่งเกี่ยวข้องกับ β โดย

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \beta \quad (3.23)$$

หรือ (โดยประมาณ) $\Delta \rho \sim -\beta \rho \Delta T$

หรือ

$$\rho_\infty - \rho \sim \beta \rho (T_\infty - T) = \beta \rho (T - T_\infty) \quad (3.24)$$

แทนสมการ (3.24) ลงใน (3.22) จะได้

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \beta (T - T_\infty) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.25)$$

ซึ่งจะเห็นว่า แรงลอยตัว ซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างไร เนื่องจากอิทธิพลแรงลอยตัวจำกัดเฉพาะต่อสมการโมเมนตัมเท่านั้น สมการอนุรักษ์มวลและพลังงานไม่เปลี่ยนแปลงจากการพาแบบบังคับ ดังนั้นสมการควบคุมในการพาอิสระบนแผ่นเรียบวางในแนวตั้งคือ

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.26)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.27)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3.28)$$

ถ้าของไหลพิจารณาว่าเป็นก๊าซอุดมคติ ดังนั้น

$$\rho = \frac{p}{Rt} \quad (3.29)$$

แล้วก็สัมพันธ์การขยายตัว β ในสมการ(3.24) เป็น

$$\beta = \frac{\left(\frac{\rho_\infty}{\rho}\right)^{-1}}{T - T_\infty} = \frac{\left(\frac{T}{T_\infty}\right)^{-1}}{T - T_\infty} = 1/T_\infty \quad (3.30)$$

สำหรับของเหลว ค่า β หาได้จากตารางคุณสมบัติในภาคผนวก

เพื่อหาพารามิเตอร์ไร้มิติซึ่งควบคุมการถ่ายเทความร้อนในการพาอิสระ เราจำเป็นต้องทำสมการข้างบนให้อยู่ในรูปไร้มิติ โดยกำหนดตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$x^* = \frac{x}{L}, y^* = \frac{y}{L}, u^* = \frac{u}{u_0}, v^* = \frac{v}{u_0}, T^* = (T - T_\infty)/(T_s - T_\infty)$$

โดยที่ L เป็นความยาวเฉพาะ (Characteristic length)

u_0 เป็นความเร็วอ้างอิงใดๆ

เมื่อแทนตัวแปรใหม่เหล่านี้ในสมการ (3.26) ถึง (3.27) เราจะได้สมการไร้มิติ เป็น

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L T^*}{u_0^2} + \frac{1}{Re_L} \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \quad (3.32)$$

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{1}{Re_L} \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \quad (3.33)$$

ในที่นี้ เรโนลด์นัมเบอร์ และพรานกัมนัมเบอร์ กำหนดเป็น

$$Re_L = \frac{u_0 L}{\nu}, Pr = \nu/\alpha \quad (3.34)$$

กลุ่มไร้มิติในสมการโมเมนต์ จักรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{g\beta(T_s - T_\infty)L}{u_0^2} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)/\nu^2}{(u_0 L/\nu)^2} = Gr_L/Re_L^2 \quad (3.35)$$

โดยที่ แกรสซอพน์มเบอร์ (Grashof number Gr_L) กำหนดเป็น

$$Gr_L = \left[\frac{g\beta L^3 (T_s - T_\infty)}{\nu^2} \right] \quad (3.36)$$

แกรสซอพน์มเบอร์ แทนอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงจากความหนืด ซึ่งกระทำต่อของไหล คงจำกันได้ว่าในการพาแบบบังคับ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์แทนอัตราส่วนของแรงจากความหนืดต่อแรงจากความหนืดที่กระทำต่อการไหล เพราะฉะนั้นแกรสซอพน์มเบอร์ในการพาอิสระจะทำหน้าที่เหมือนกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ในการพาแบบบังคับทุกอย่าง ตัวอย่างเช่น ในการพาแบบบังคับช่วงการเปลี่ยนแปลง (transition) จากการไหลลามินาร์ไปเป็นเทอร์บูเลนซ์ควบคุมโดยค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์วิกฤติ ในทำนองเดียวกันในการพาอิสระช่วงการเปลี่ยนแปลง จากการไหลแบบลามินาร์ไปเป็นเทอร์บูเลนซ์ถูกควบคุมโดยค่าแกรสซอพน์มเบอร์วิกฤติ

สมการ (3.31) ถึง (3.33) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออิทธิพลของการพาแบบบังคับและอิสระมีขนาดที่สามารถเปรียบเทียบกันได้แล้ว ค่าหน้าตัดที่นัมเบอร์จะขึ้นอยู่กับค่า Re_L , Pr และ Gr_L

$$Nu = f(Re_L, Gr_L, Pr) \quad (3.37)$$

พารามิเตอร์ $\frac{Gr_L}{Re_L^2} = 1$ ใน (3.35) เป็นกรวัดความสำคัญที่เกี่ยวเนื่องของการพาอิสระต่อการพาแบบบังคับ เมื่อ $\frac{Gr_L}{Re_L^2} = 1$ การพาบังคับ และแบบอิสระมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นทั้ง 2 แบบต้องนำมาคิดจะพิจารณาเฉพาะแบบใดแบบหนึ่งไม่ได้ ถ้า $\left(\frac{Gr_L}{Re_L^2}\right) \ll 1$ การไหลจะเกิดเนื่องจากการพาแบบบังคับเป็นหลักแต่ถ้า $\frac{Gr_L}{Re_L^2} \gg 1$ การพาอิสระจะเป็นหลักใหญ่ และ Nu จะขึ้นอยู่กับ Gr_L และ Pr เท่านั้น

$$Nu = f(RGr_L, Pr) \quad (3.38)$$

ในการพาอิสระความเร็วของการไหลเกิดขึ้นจากแรงลอยตัวเท่านั้น ดังนั้นไม่มีการเกิดความเร็วของการไหลจากแรงภายนอก ด้วยเหตุนี้ Nu จึงไม่ขึ้นกับ Re_L

สำหรับก๊าซ $Pr = 1$ ดังนั้น Nu สำหรับการพาอิสระจึงเป็นฟังก์ชันของ Gr_L เพียงอย่างเดียว

นอกจากนี้ก็มีพารามิเตอร์ไร้มิติอื่นคือ เรย์เลย์นัมเบอร์ (Rayleigh number, Ra) กำหนดเป็น

$$Ra = Gr_L, Pr = \left[\frac{g\beta L^3 (T_s - T_\infty) Pr}{\nu^2} \right] = g\beta L^3 (T_s - T_\infty) / \nu \alpha \quad (3.39)$$

3.2.2 สมการอเนกประสงค์สำหรับการไหลภายนอกวัตถุ(external Free Convection Flows)

ในหัวข้อนี้ เราจะสรุปสหสัมพันธ์อเนกประสงค์ที่เหมาะสมซึ่งได้พัฒนาขึ้นสำหรับวัตถุรูปทรงเรขาคณิตต่างๆที่วางในของไหล สหสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการคำนวณทางวิศวกรรมที่สุด และโดยทั่วไปอยู่ในรูป

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k} = CRa_L^n \quad (3.40)$$

โดยที่

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} = 10^9 \quad (3.41)$$

ถ้าตามความยาวเฉพาะ L ของของรูปทรงและค่าของ $n = 1/4$ และ $1/3$ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ และแบบเทอร์บูเลนต์ตามลำดับ ส่วนการไหลแบบเทอร์บูเลนต์นั้นค่า \overline{h}_L จะขึ้นอยู่กับค่าต่างๆ L ซึ่งต้องแยกคิดเป็นช่วง เหมือนการพาแบบบังคับ นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติต่างๆ ต้องหาที่อุณหภูมิ

ฟิล์ม $T_f = \frac{(T_s - T_\infty)}{2}$ การไหลภายนอกวัตถุนี้แยกออกได้เป็น 3 กรณี คือแบบ แผ่นเรียบวางในแนวตั้ง วางในแนวนอน วางในแนวระดับ ทรงกระบอก และทรงกลม ดังต่อไปนี้

3.2.2.1 แผ่นเรียบวางในแนวตั้ง (Vertical plate)

Churchill และ Chu ได้แนะนำสมการซึ่งสามารถใช้ได้ตลอดช่วงทั้งหมดของ Ra_L ในรูปของ

$$\overline{Nu}_L = \left(0.825 + \frac{0.3787 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{1/4}} \right)^2 \quad (3.42)$$

สำหรับ $10^{-1} < Ra_L < 10^{12}$

สำหรับสมการ(3.42) ใช้ได้ทั้งลามินาร์และเทอร์บูเลนต์ ส่วนสมการที่มีความแม่นยำกว่าใช้เฉพาะในช่วงลามินาร์คือ

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$\overline{Nu}_L = \left(0.68 + \frac{0.67Ra_L^{1/4}}{\left[1+(0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}}\right)^2 \quad (3.43)$$

สำหรับ $0 < Ra_L < 10^9$

สมการทั้งสองนี้ใช้กับกรณีอุณหภูมิต่อผิวของแผ่นเรียบคงที่ถ้าเงื่อนไขที่ผิวเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันความ

ร้อนคงที่แทนแล้วสมการทั้งสองยังคงใช้ได้และให้ความถูกต้องพอประมาณ ตัวอย่างเช่นถ้าสมการ (3.43) ใช้สำหรับกรณี q_s'' คงที่ ค่า Gr ใน Ra ต้องปรับปรุงใหม่ เป็น ค่า Gr^* (modified Grashof number) ทำได้ดังนี้

$$Ra = Gr \cdot Pr \text{ และ } Gr^* = Gr \cdot \overline{Nu}$$

ดังนั้น $Ra_L = Gr^* \cdot Pr / \overline{Nu}$ แทนในขวามือของสมการ (3.43) และจัดใหม่ได้

$$\frac{1}{\overline{Nu}^4} (\overline{Nu} - 0.68) = \frac{0.67(Gr^* Pr)^{1/4}}{\left[1+(0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (3.44)$$

3.2.2.2 แผ่นราบเรียบในแนวนอน (Horizontal plate)

ในกรณีนี้รูปแบบสมการขึ้นอยู่กับว่าแผ่นเรียบเป็นแผ่นร้อนหรือเย็น (ตามรูปที่ 3.6) เมื่อเทียบกับของไหลที่ล้อมรอบ และขึ้นอยู่กับว่าแผ่นเรียบหงายหน้าขึ้น หรือคว่ำหน้าลงสัมพันธ์กับของไหล โดยถือว่าแผ่นเรียบมีหน้าเดียว McAdams ได้แนะนำสหพันธ์เอ็มไพริคัลที่ใช้กันมาก โดยปรับปรุงค่า L ใหม่ให้อยู่ในรูปความยาวเฉพาะ กำหนดเป็น

$$L = A_s / P \quad (3.45)$$

โดยที่ A_s และ P เป็นพื้นที่ผิว และเส้นรอบรูปของแผ่นตามลำดับ สหพันธ์ที่ใช้คือ

ก. สำหรับแผ่นร้อนหงายขึ้น หรือแผ่นเย็นคว่ำหน้าลง (Upper surface of heated plate or lower surface of cooled plate)

$$\overline{Nu}_L = 0.54Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (3.46)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15Ra_L^{1/4} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \quad (3.47)$$

ข. แผ่นร้อนคว่ำหน้าลงหรือแผ่นเย็นหงายหน้าขึ้น (Lower surface of heated plate or upper surface of cooled plate)

$$\overline{Nu}_L = 0.27Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (3.48)$$

สมการที่กล่าวมาใช้สำหรับกรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ ส่วนกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ต้องใช้สมการดังต่อไปนี้

ก. สำหรับแผ่นเรียบแนวนอนที่แผ่นร้อนหงายหน้าขึ้น

$$\overline{Nu}_L = 0.13Ra_L^{1/3} \quad (Ra_L \leq 2 \times 10^8) \quad (3.49)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.16Ra_L^{1/3} \quad (5 \times 10^8 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \quad (3.50)$$

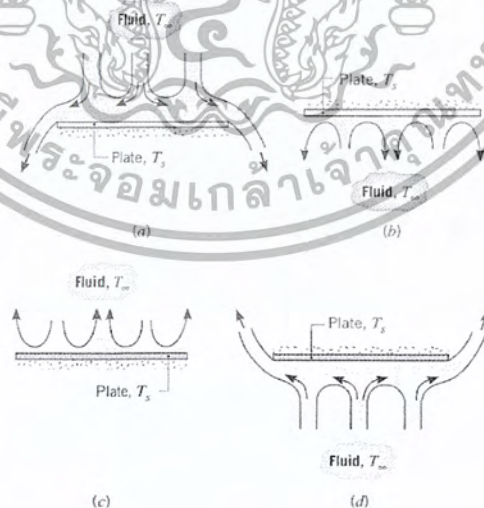
ข. แผ่นร้อนคว่ำลง

$$\overline{Nu}_L = 0.58Ra_L^{1/3} \quad (10^6 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \quad (3.51)$$

สมการ (3.49)-(3.50) ค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ใช้หาที่อุณหภูมิเฉลี่ยซึ่งกำหนดเป็น

$$T_f = T_s - 0.25(T_s - T_\infty)$$

นอกจากค่า β ที่ยังหาที่ $T_f = (T_s + T_\infty)/2$ เหมือนเดิม



รูปที่ 3.6 การไหลเนื่องจากการลอยตัวบนแผ่นเรียบในแนวนอน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

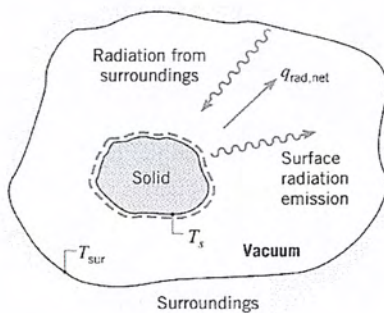
3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation)

3.3.1 มโนทัศน์พื้นฐาน

พิจารณาของแข็งชิ้นหนึ่งเริ่มต้นที่อุณหภูมิ T_S ซึ่งสูงมากกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม T_{Surr} โดยรอบๆ ของแข็งนี้เป็นสุญญากาศตามรูปที่ 3.7 เนื่องจากของแข็งนี้แยกตัวจากผนังสิ่งแวดล้อมโดยสุญญากาศดังนั้นจึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการพาเลย อย่างไรก็ตามเราพบว่าของแข็งนั้นจะเย็นตัวลงและในที่สุดเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวมัน การเย็นตัวนี้เกี่ยวข้องกับ การลดพลังงานภายในที่เก็บไว้โดยของแข็ง และเป็นผลโดยตรงของการส่งออกของการแผ่รังสีความร้อนจากผิว ในขณะที่เดียวกันผิวนั้นก็จะรับหรือดูดการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ถ้า $T_S > T_{\text{Surr}}$ แล้วอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิโดยการแผ่รังสี q_r จะออกจากพื้นผิว และพื้นผิวก็จะเย็นจนกระทั่ง ถ้า $T_S < T_{\text{Surr}}$ ตัวอย่างอื่นๆ เช่น การถ่ายเทพลังงานจากดวงอาทิตย์มาสู่พื้นผิวโลก พลังงานความร้อนจะถูกปล่อยออกจากดวงอาทิตย์เดินทางผ่านอากาศมาถึงพื้นผิวโลก การถ่ายเทพลังงาน โดยการแผ่รังสีนี้ไม่ต้องการการแทรกตัวของตัวกลางระหว่างพื้นผิวร้อนและพื้นผิวเย็น

สสารทุกรูปสามารถปล่อยออกรังสีได้ สำหรับก๊าซและของแข็ง โปร่งแสงเช่นแก้วหรือพลาสติกที่อุณหภูมิสูงๆ การส่งออกหรือปล่อยออกเรียกว่า “ปรากฏการณ์ทางปริมาตร” นั่นคือการแผ่รังสีซึ่งปล่อยออกมาจากปริมาตรที่จำกัดของสสารเป็นการรวมผลของการส่งออกที่จุดต่างๆ ทั่วทั้งปริมาตร อย่างไรก็ตามในที่นี้จะสนใจเฉพาะการส่งออกของรังสีบนพื้นผิวเท่านั้นซึ่งเรียกว่า “ปรากฏการณ์ของผิว”

เมื่อการแผ่รังสีถูกมองว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีจากวัตถุใดๆ ที่อุณหภูมิ T_S จะพิจารณาว่าปล่อยออกที่ทุกความยาวคลื่นจาก $\lambda = 0$ ถึง $\lambda = \infty$ ที่อุณหภูมิซึ่งพบมากที่สุด ในทางวิศวกรรม กลุ่มของพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกโดยวัตถุจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น $\lambda = 0.1$ และ $\lambda = 100 \mu\text{m}$ ด้วยเหตุนี้แถบช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัมระหว่าง $\lambda = 0.1$ และ $\lambda = 100 \mu\text{m}$ โดยทั่วไปจะถูกอ้างเป็นช่วง “การแผ่รังสีความร้อน”

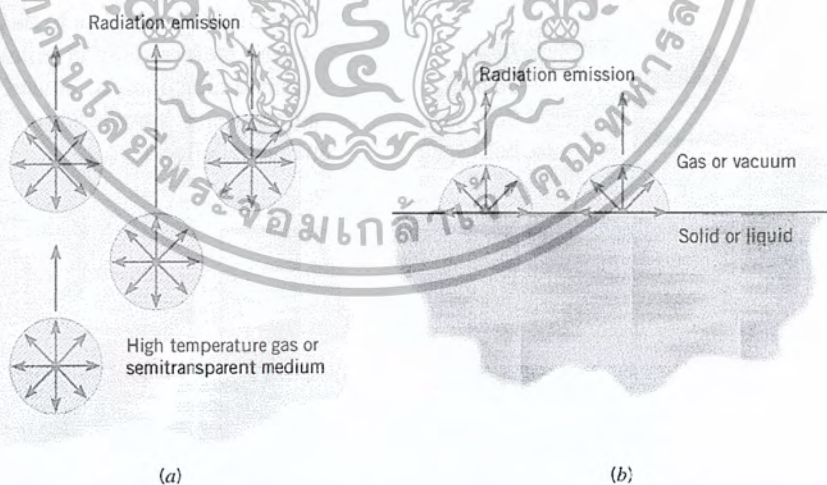


รูปที่ 3.7 การเย็นตัวโดยการแผ่รังสีของของแข็งที่ร้อน [7]

ธรรมชาติของคลื่นรังสีความร้อนแสดงให้เห็นได้ว่า ความยาวคลื่น λ จะเกี่ยวข้องกับความถี่ λ ของการแผ่รังสีสำหรับการแผ่รังสีซึ่งเคลื่อนที่ในตัวกลางเฉพาะคุณสมบัติทั้งสองเกี่ยวข้องกันโดย

$$\lambda = \frac{c}{\lambda} \tag{3.52}$$

โดยที่ c เป็นความเร็วของแสงในตัวกลาง สำหรับ $c = 2.998 \times 10^8$ m/s หน่วยของความยาวคลื่น โดยปกติเป็นไมโครเมตร (μm)

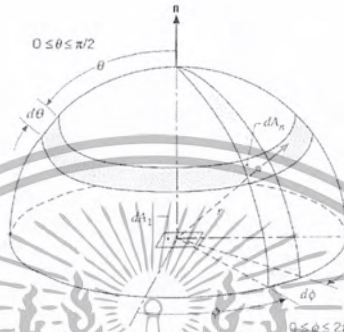


รูปที่ 3.8 ขบวนการปล่อยออก (a) เป็นปรากฏการณ์ทางปริมาตร (b) ปรากฏการณ์ของพื้นผิว [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 กำลังปล่อยออก(Emissive power , E)

ความเข้มของการแผ่รังสีเกี่ยวข้องกับฟลักซ์รังสีต่างๆมาก คงจำได้ว่าการปล่อยออกเกิดขึ้นจากผิวใดๆที่มีอุณหภูมิ แนวความคิดของกำลังปล่อยออก E หมายถึงปริมาณของการแผ่รังสีที่ปล่อยออกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวแบ่งเป็น 2 แบบคือ



รูปที่ 3.9 การปล่อยรังสีออกจากชิ้นส่วนเล็กๆของผิว dA_1 เข้าไปในครึ่งทรงกลมสมมติซึ่งมีศูนย์กลางที่จุดบน dA_1 [7]

ก. กำลังปล่อยออกที่ความยาวคลื่นหนึ่ง(spectral, hemispherical emissive power) ใช้สัญลักษณ์ E_λ นิยามเป็นอัตราการแผ่รังสีของความยาวคลื่น λ ที่ปล่อยออกในทุกทิศทางจากพื้นผิวต่อหนึ่ง หน่วยความยาวคลื่น $d\lambda$ รอบ λ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เพราะฉะนั้น E นี้เป็นการรวม I_λ ทุกทิศทางเข้าด้วยกันนั่นเอง สามารถแสดงได้ในรูป

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (\text{W/m}^2 \mu\text{m}) \quad (3.53)$$

สังเกตว่า E_λ เป็นฟลักซ์หนึ่งที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวแท้จริง ในขณะที่ I_λ ถู้อตามเกณฑ์พื้นที่ฉาย (projected area)

ข. กำลังปล่อยออกทั้งหมด(Total , hemispherical emissive power) สัญลักษณ์ E คือ อัตราการแผ่รังสีทั้งหมดที่ปล่อยออกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งก็คือการรวม E_λ ทุกความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \text{ w/m}^2 \mu\text{m} \quad (3.54)$$

ปกติแล้วจะเรียก E ให้สั้นลงเป็น total emissive power ในขณะที่ E_λ เรียกว่า spectral emissive power

3.3.3 เออริเดชัน (Irradiation)

ถึงแม้ว่าเราให้ความสนใจเกี่ยวกับการแผ่รังสีปล่อยออกโดยพื้นผิว แต่แนวความคิดที่ผ่าน มาสามารถขยายไปสู่รังสีที่มาตกกระทบพื้นผิวได้ตามรูปที่ 3.10 รังสีที่มากระทบนั้นอาจเกิดจาก การปล่อยออกและการสะท้อนที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวอื่น และรังสีนี้มี spectral และ directional distributions ซึ่งหาได้โดย spectral intensity $I_\lambda(\lambda, \theta, \phi)$ ปริมาณนี้นิยามเป็นพลังงานการแผ่รังสี ของความยาวคลื่นที่มาตกกระทบจากทิศทาง ต่อหน่วยพื้นที่ของผิวที่ติดตั้งฉากกับทิศทางนี้ ต่อ หน่วยมุมรองรับรูปกรวยรอบทิศทางนี้ และต่อช่วงหนึ่งหน่วยความยาว $d\lambda$ รอบ λ



รูปที่ 3.10 ลักษณะรังสีตกกระทบ [7]

ความเข้มของรังสีที่มากระทบเกี่ยวข้องกับเทอมฟลักซ์รังสีเรียกว่าเออริเดชัน (Irradiation) ซึ่งก็คือรังสีตกกระทบจากทุกทิศทาง ค่าเออริเดชันของความยาวคลื่นหนึ่งคือ spectral irradiation G_λ กำหนดเป็นอัตราที่รังสีที่ความยาวคลื่น λ ตกกระทบบนผิวหนึ่งต่อหนึ่ง หน่วยพื้นที่ของผิวและต่อช่วงความยาวคลื่นหนึ่งหน่วย $d\lambda$ รอบ λ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_\lambda = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (W/m^2 \mu m) \quad (3.55)$$

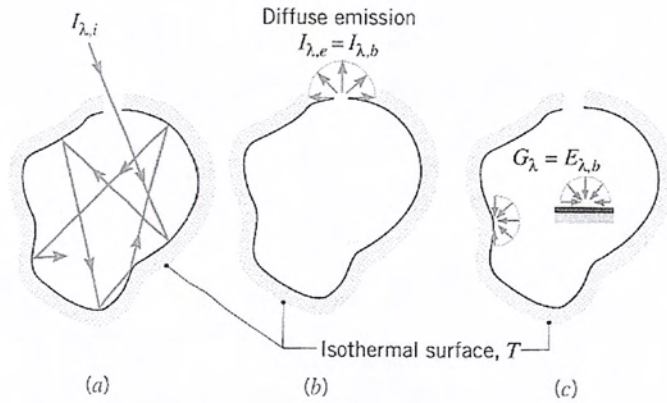
ค่าเอเรดิเอชันรวม (Total irradiation) G คือ อัตราที่รังสีตกกระทบบนหนึ่งหน่วยพื้นที่จากทุกทิศทางและทุกความยาวคลื่น ซึ่งก็คือ การรวม G_λ ทุกความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน

$$G = \int_0^\infty G_\lambda d\lambda \quad w/m^2 \quad (3.56)$$

3.3.4 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

เมื่อก้าวถึงคุณลักษณะการแผ่รังสีของผิวจริงทั่วไป จำเป็นต้องเข้าใจแนวความคิดของวัตถุดำก่อน วัตถุดำเป็นผิวทางจินตภาพ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. วัตถุดำจะดูดรังสีตกกระทบทั้งหมดไว้ ไม่มีการสะท้อนกลับ โดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นและทิศทาง
2. วัตถุดำจะแผ่รังสีได้มากกว่าวัตถุอื่นๆ ทุกชนิดที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน
3. วัตถุดำจะแผ่รังสีออกโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง นั่นคือวัตถุดำเป็น diffuse emitter เนื่องจากวัตถุดำเป็นตัวแผ่รังสี และดูดรังสีที่ดีที่สุด (perfect emitter and absorber) ดังนั้นวัตถุดำจึงใช้ เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิวจริงต่างๆ ในขณะที่วัตถุดำเป็นผิวในทางอุดมคติ แต่ก็เป็นไปได้ที่จะสร้างการแผ่รังสีในห้องทดลองซึ่งมีค่าใกล้เคียงที่สุดเหมือนกับที่กำเนิดจากผิวดำ เมื่อนี้ถึงช่องกลวง (Hollow cavity) เช่นที่แสดงในรูปที่ 3.11a ผนังมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ ถ้าผนังมีรูเล็กๆหลายๆแล้วรังสีใดๆของพลังงานรังสีแผ่ตกกระทบเข้าไปในรูเล็กๆนี้ จะเกิดการสะท้อนภายในจำนวนมาก โดยส่วนหนึ่งของรังสีจะถูกดูดกลืนในแต่สะการสะท้อน และมีรังสีตกกระทบน้อยมากๆ ที่ออกจากรูเล็กๆนี้ได้ นั่นคือ ระบายของรูจะปรากฏเป็นตัวดูดกลืนที่ดีที่สุดดังนั้นการแผ่รังสีที่กระจายจากรูจะปรากฏเหมือนว่ามาจากวัตถุดำ จากหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ พอที่จะกล่าวว่ารังสีที่ออกจากรูเล็กๆ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผิว และสอดคล้องกับการปล่อยออกของวัตถุดำ(รูปที่ 3.11b)เนื่องจากการปล่อยออกของวัตถุดำเป็น diffuse ค่าของ I_λ ของรังสีที่ออกจากรูเป็นอิสระกับทิศทาง เป็นผลให้ผิวเล็กๆในช่องกลวง (รูปที่ 3.11c) การแผ่รังสีของวัตถุดำเกิดจริงภายในช่องกลวงโดยไม่คำนึงว่าผิวของช่องกลวงนั้นจะสะท้อนหรือดูดกลืนได้ดีเพียงใด



รูปที่ 3.11 คุณลักษณะของกลางของวัตถุดำอุณหภูมิคงที่ [7]

- a. การดูดกลืนอย่างสมบูรณ์
- b. การปล่อยออกแบบ diffuse จากรู
- c. Diffuse irradiation ของผิวภายใน

3.3.5 กฎของ Stefan-Boltzmann

โดยการ Planck distribution ค่า total emissive power ของวัตถุดำ E_b เขียนได้ในรูป

$$E_b = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)} d\lambda \tag{3.57}$$

ตัวแปรของการอินทิเกรตเปลี่ยนจาก λ เป็น λT

$$E_b = T^4 \int_{\lambda T}^{\infty} \frac{C_1}{(\lambda T)^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)} d(\lambda T) \tag{3.58}$$

โดยการอินทิเกรต ผลลัพธ์จะเป็น

$$E_b = \sigma T^4 \tag{3.59}$$

โดยที่ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า C_1 กับ C_2 มีค่าเป็น

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{w/m}^2\text{K}^4 \tag{3.60}$$

สำหรับวัตถุดำ ความเข้มของการแผ่รังสีหาได้จาก

$$I_b = \frac{E_b}{\pi} \quad (3.61)$$

3.3.6 การปล่อยออกของผิว(Surface Emission)

หลังจากได้พัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุดำเพื่ออธิบายพฤติกรรมของผิวจินตภาพแล้วเราก็จะมาพิจารณาพฤติกรรมของผิวจริงบ้าง คงจำได้ว่าวัตถุดำเป็นตัวปล่อยออกจินตภาพในความรู้สึกที่ว่าไม่มีผิววัตถุใดสามารถส่งออกรังสีได้มากกว่าวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน เพราะฉะนั้นจึงเลือกวัตถุดำเป็นมาตรฐานในการอธิบายการปล่อยออกจากผิวจริง คุณสมบัติการแผ่รังสีของผิวเรียกว่า “ค่าการปล่อยออก” กำหนดเป็นอัตราส่วนของการแผ่รังสีของวัตถุใดๆ ต่อการแผ่รังสีจากวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน จะเห็นได้ว่าค่าการปล่อยออก (emissivity) มีค่าได้สูงสุดไม่เกินหนึ่งหมายความว่าผิวใดๆ สามารถแผ่รังสีสูงสุด เท่ากับวัตถุดำนั่นเองรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางด้วย เรากำหนด spectral , directional emissivity $\epsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T)$ ของผิวใดๆ ที่อุณหภูมิ T ว่าเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่น λ และ T เดียวกัน ดังนั้น

$$\epsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,e}(\lambda, T)} \quad (3.62)$$

สำหรับการคำนวณทางวิศวกรรม เราจะถือว่าคุณสมบัติของผิวสามารถปล่อยออกเฉลี่ยเท่ากันในทุกทิศทางเป็นผลให้ไม่ขึ้นกับทิศทาง ดังนั้นจะได้ spectral emissivity เป็น

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (3.63)$$

หรือ

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi} \quad (3.64)$$

ค่า total, hemispherical emissivity (เรียกสั้นๆว่า total emissivity) แทนค่าเฉลี่ยของทุกความยาวคลื่นและทุกๆทิศทางทั้งหมด กำหนดเป็น

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (3.65)$$

ค่า emissivity จะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิว การเป็นตัวนำ (conductor) หรือไม่เป็นตัวนำ (nonconductor) โดยทั่วไป ค่า emissivity ของผิวโลหะตัวนำจะมีค่าน้อย ยิ่งเป็นโลหะขจัดมันด้วยค่า ยิ่งน้อยคือน้อยกว่า 0.02 แต่ถ้าทำสีทึบบนผิวโลหะนั้นค่า อาจเพิ่มได้สูงมากและถ้าผิวโลหะมีสนิมก็ เพิ่มขึ้นได้มากเช่นกันเช่น $\epsilon = 0.10$ สำหรับเหล็กสเตนเลสมีสนิมเล็กน้อยแต่ถ้ามีสนิมมากเมื่อ ถูกออกซิไดซ์จะมีค่าประมาณ 0.5 ส่วนค่า ϵ ของวัตถุที่ไม่เป็นตัวนำปกติจะมากกว่า 0.6 ขึ้นไป และ อาจเพิ่มหรือลดก็ได้ถ้าอุณหภูมิเพิ่ม ในขณะที่วัตถุตัวนำค่า ϵ จะเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม

3.3.7 การดูดกลืน การสะท้อน และการผ่านทะลุรังสีของผิวรังสีของผิว(Surface Absorption , Reflection and Transmission)

ปรากฏการณ์ต่างๆไปนั้นรังสีจะตกกระทบกับตัวกลางโปร่งแสง เช่น ชั้นของน้ำหรือแผ่น แก้ว ตามที่แสดงในรูปที่ 3.12 สำหรับเอเรดิเอชันของคลื่นหนึ่ง G_λ เมื่อตกกระทบบนตัวกลางแต่ ละส่วนของรังสีนี้จะสะท้อน ถูกดูดกลืน และผ่านทะลุตัวกลาง



รูปที่ 3.12 ขบวนการดูดกลืน การสะท้อนและการผ่านทะลุของตัวกลางโปร่งแสง [7]

$$G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr} \quad (3.66)$$

หรือ

$$G = G_{ref} + G_{abs} + G_{tr} \quad (3.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปการหาค่ารังสีที่แยกแต่ละส่วนยุ่งยากมาก เนื่องจากขึ้นอยู่กับเงื่อนไขผิวด้านบนและผิวด้านล่าง ความยาวคลื่นของการแผ่รังสี และส่วนประกอบความหนาของตัวกลางนี้รวมทั้งสภาวะการณที่มีอิทธิพลสูงมากของปรากฏการณ์ทางปริมาตร(volumetric effects) ที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางนี้

3.3.7.1 ค่าการดูดกลืนของผิว(Absorptivity)

เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของพื้นผิวในการดูดกลืนรังสีความร้อนไว้ และยังแสดงลักษณะที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง(directional) และการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น (spectral) ค่า spectral directional absorptivity นิยามว่าเป็นเศษส่วนของความเข้มที่ความยาวคลื่นหนึ่งที่ตกกระทบผิว $I_{\lambda,i}$ ในทิศทางของ $(\theta, \phi,)$ ซึ่งดูดกลืนโดยผิวดังนั้น

$$\alpha_{\lambda,\theta} = \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)} \quad (3.68)$$

สำหรับการคำนวณในทางวิศวกรรม คุณสมบัติของผิวจะแทนด้วยค่าเฉลี่ยของทิศทาง เพราะฉะนั้นเรานิยาม spectral, hemispherical, absorptivity $\alpha_{\lambda}(\lambda)$ เป็น

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (3.69)$$

(เรียกสั้นๆว่า spectral absorptivity)

ส่วน Total, hemispherical, absorptivity, α (หรือ total absorptivity) แทนการรวมค่าเฉลี่ยทั่วทั้งทิศทางและทุกความยาวคลื่น โดยได้กำหนดเป็นเศษส่วนของ total irradiation ที่ดูดกลืนโดยผิว

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad (3.70)$$

หรือ

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda} \quad (3.71)$$

3.3.7.2 ค่าการสะท้อนของผิว (Reflectivity)

Reflectivity (ρ) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของพื้นผิวในการสะท้อนรังสีที่มาตกกระทบ หากได้จากเศษส่วนของรังสีที่ตกกระทบที่สะท้อนโดยพื้นผิว อย่างไรก็ตามนิยามเฉพาะนี้ให้รูปแบบที่แตกต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัตินี้เป็น bidirectional ตามธรรมชาติ นั่นคือ ขึ้นอยู่กับทิศทางของรังสีตกกระทบและขณะเดียวกันก็ขึ้นอยู่กับทิศทางของรังสีสะท้อนซึ่งอาจสะท้อนเป็นแบบกระจาย (diffuse) หรือแบบเป็นลำรังสีเหมือนก่อนตกกระทบ (specular) ตามลักษณะการสะท้อนของรังสี การสะท้อนแบบ diffuse เกิดขึ้นถ้าการสะท้อนทั้งหมดอยู่ในทิศทางที่ซุ่มสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบแล้วเรียกว่าการสะท้อนแบบ specular ตามปกติแล้วไม่มีพื้นผิวใดให้การสะท้อนเป็นแบบ diffuse หรือ specular ส่วนผิวหยาบหรือ ขรุขระให้การสะท้อนแบบ diffuse ผิวโดยทั่วไปแล้วจะสมมติว่าเป็นการสะท้อนแบบ diffuse

ค่า spectral, directional reflectivity $\rho_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi)$ ของผิว กำหนดเป็นเศษส่วนของความเข้มรังสีตกกระทบที่คลื่นหนึ่งในทิศทาง (θ, ϕ) ซึ่งถูกสะท้อนโดยผิว ดังนี้

$$\rho_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda, i, \text{ref}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (3.72)$$

เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยทั่วทั้งครึ่งทรงกลม นั่นคือ ไม่ขึ้นกับทิศทางเพราะฉะนั้นค่า spectral, hemispherical reflectivity, $\rho_{\lambda}(\lambda)$ นิยามว่าเป็นเศษส่วนของเอเรดิเอชันของคลื่นหนึ่งที่สะท้อนโดยพื้นผิว

$$\rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{ref}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (3.73)$$

ส่วนค่า total reflectivity, ρ (ชื่อเต็ม total, hemispherical reflectivity) กำหนดเป็น

$$\rho = \frac{G_{\text{ref}}(\lambda)}{G} \quad (3.74)$$

หรือ

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (3.75)$$

3.3.7.3 ค่าการผ่านทะลุของผิว (Transmissivity)

เป็นคุณสมบัติของพื้นผิวที่เกิดขึ้นในเฉพาะตัวกลางโปร่งแสงเท่านั้นหมายถึง คุณลักษณะอย่างหนึ่งของผิวที่ยอมให้รังสีผ่านทะลุ เรียกว่า transmissivity (τ) โดยใช้ hemispherical transmissivity จะได้ค่า spectral transmissivity ว่าเป็นส่วนหนึ่งของเอเรดิเอชัน (G) ที่ผ่านทะลุพื้นผิวดังนั้น

$$\tau_\lambda = \frac{G_{\lambda, tr}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad (3.76)$$

และค่า total transmissivity

$$\tau = \frac{G_{\lambda, \tau}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad (3.77)$$

หรือ

$$\tau = \alpha = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda(\lambda) G_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda d\lambda} \quad (3.78)$$

เนื่องจากค่า τ , α และ ρ ได้ถูกกำหนดว่าเป็นเศษส่วนของรังสีตกกระทบหรือเอเรดิเอชัน (G) ดังนั้นสำหรับพื้นผิวใดๆจะได้ว่า

$$\tau_\lambda + \rho_\lambda + \alpha_\lambda = 1 \quad (3.79)$$

และ

$$\tau + \alpha + \rho = 1 \quad (3.80)$$

3.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยมีวัตถุหรือตัวกลางที่ได้รับความร้อนเป็นตัวพาเอาความร้อนนั้นไป การพาความร้อนจะเกิดได้เฉพาะวัตถุพวกรวมของเหลวและก๊าซเท่านั้นพวกรวมของแข็งจะไม่เกิดการพาความร้อน

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือของไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อน ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ลมหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำให้ของไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้

เรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free or Natural convection) เช่นการปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่หยุดนิ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะเกรเดียนอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้เกรเดียนของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรม เพื่อให้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวร้อน T_w และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ถูกกำหนดเป็น

$$q'' = h[T_w - T_f] \quad (3.81)$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็น (มีหน่วยเป็น $\frac{W}{m^2}$) ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากของไหลที่ร้อน ไปยังผนังที่เย็น จะได้ว่า

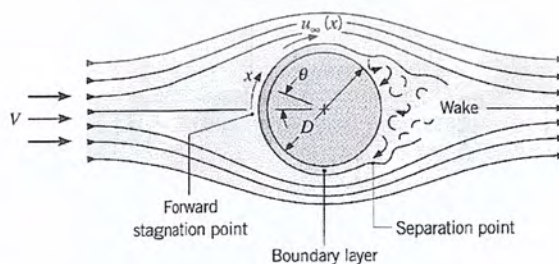
$$q'' = h[T_f - T_w] \quad (3.82)$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น สมการ (3.81) เป็นสมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of Cooling) โดยที่อุณหภูมิมีหน่วยเป็น เซลเซียส หรือ เคลวิน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีหน่วยเป็น $\frac{W}{m^2 \cdot C}$

3.5 การไหลผ่านทรงกระบอกในแนวขวาง (Cylinder in cross flow)

3.5.1 การไหลของของไหล

พิจารณาการไหลผ่านทรงกระบอกตามแนวขวางตามรูปที่ 3.13

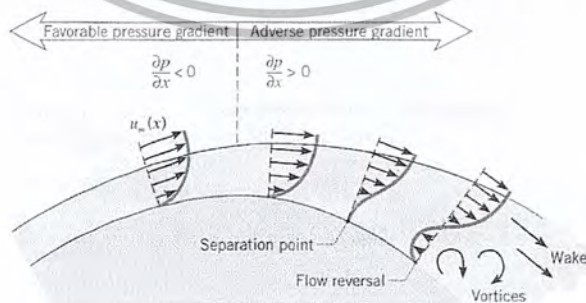


รูปที่ 3.13 รูปแบบวอร์เดรีเลเยอร์และการแยกตัวบนการไหลผ่านทรงกระบอกและแนวขวาง [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอิสระของไหลจะมาหยุดนิ่งที่ forward stagnation point โดยจะมีความดันเพิ่มขึ้น จากจุดนี้ความดันลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ X ซึ่งอยู่ตามแนวเส้นกระแส (streamline) และบาวนด์รีเลเยอร์จะก่อตัวขึ้นภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความดันที่พอใจ (favorable pressure gradient, $dp/dx < 0$) อย่างไรก็ตาม ความดันต้องถึงจุดต่ำสุด และจะเริ่มเพิ่มขึ้น เมื่อตรงมาทางด้านหลังของทรงกระบอกที่ซึ่งการปรับตัวของบาวนด์รีเลเยอร์เกิดขึ้นในช่วงที่เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงความดันได้กลับ (adverse pressure gradient, $dp/dx > 0$)

ในรูปที่ 3.13 สิ่งให้เห็นเด่นชัดระหว่างความเร็วช่วงต้น V และความเร็วกระแสอิสระ u_∞ ซึ่งไม่เหมือนสภาวะสำหรับแผ่นแบนเรียบ ความเร็วเหล่านี้แตกต่างออกไปซึ่ง u_∞ ขึ้นอยู่กับระยะทาง X จากจุดสแตกเนชั่น จากสมการของออยเลอร์สำหรับการไหลที่ไม่มีความเสียดทาน ค่า $u_\infty(X)$ ต้องแสดงพฤติกรรมตรงข้ามต่อค่าของ $p(X)$ นั่นคือจาก $u_\infty = 0$ ที่จุดสแตกเนชั่นของไหลจะเพิ่มความเร็วขึ้นเพราะว่าเป็นช่วง favorable pressure gradient ($du_\infty/dx > 0$ เมื่อ $dp/dx < 0$) จนถึงความเร็วสูงสุดเมื่อ $dp/dx = 0$ และลดความเร็วลงเมื่อเข้าสู่ช่วง adverse pressure gradient ($du_\infty/dx < 0$ เมื่อ $dp/dx > 0$) ขณะที่ของไหลที่มีความหน่วงหรือความเร็วลดลง การเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ผิว ($\partial u / \partial y|_{y=0}$) ในที่สุดจะกลายเป็นศูนย์ (รูปที่ 3.14) ที่ตำแหน่งนี้ เรียกว่า จุดแยกตัว (separation point) ของไหลใกล้ผิวไม่มีโมเมนตัมพอที่จะชนะการเปลี่ยนแปลงความดันและการเคลื่อนไปหาตามกระแสต่อไปนั้นเป็นไปได้เนื่องจากของไหลที่เข้ามาหมดสิ้นโอกาสที่จะไหลกลับไปข้างหน้าเช่นกัน การแยกตัวของบาวนด์รีเลเยอร์จึงเกิดขึ้นนี่ก็เป็นเงื่อนไขที่ซึ่งบาวนด์รีเลเยอร์แยกตัวจากพื้นผิว (คือการไหลเริ่มไม่สัมผัสกับผิว) และเกิดการหมุนวน (wake) ขึ้นในช่องทางด้านหลัง การไหลในช่วงนี้เป็นลักษณะของการเกิด vortex และผิดธรรมชาติมาก จุดที่แยกตัวนี้เป็นตำแหน่งที่ซึ่ง $(\partial u / \partial y)_s = 0$



รูปที่ 3.14 รูปร่างของความเร็วและการแยกตัวในการไหลผ่านทรงกระบอกกลม [7]

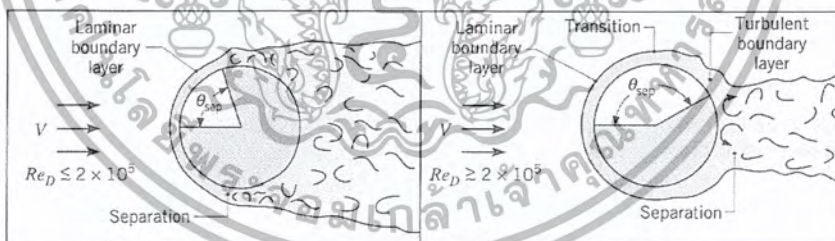
สิ่งสำคัญพบว่าการเกิดบาวนด์รีเลเยอร์ช่วง transition ซึ่งขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์นั้น มีอิทธิพลสูงมากต่อตำแหน่งของจุดที่เกิดการแยกตัว (separation point) สำหรับสังกระบอกกลมแล้วเรโนลด์นัมเบอร์มีนิยาม คือ

$$Re_D \equiv \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (3.83)$$

เพราะโมเมนต์ของของไหลในเทอร์บูเลนต์บาวนด์รีเลเยอร์นั้น โตกว่าในลามินาร์บาวนด์รีเลเยอร์ จึงสามารถที่จะคาดคะเนช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition) เพื่อที่จะชะลอการเกิดสภาวะการแยกตัวได้ ถ้า $Re_D \leq 2 \times 10^5$ บาวนด์รีเลเยอร์ก็ยังคงเป็นลามินาร์อยู่และการแยกตัวเกิดขึ้นที่ $\theta \approx 80^\circ$ (ดูรูปที่ 6.6) อย่างไรก็ตาม ถ้า $Re_D > 2 \times 10^5$ แล้ว ช่วงการเปลี่ยนแปลงในบาวนด์รีเลเยอร์เกิดขึ้น และการแยกตัวจะช้าลงจนถึง $\theta \approx 140^\circ$

ขบวนการที่กล่าวมาแล้วนี้มีผลอย่างสูงมากต่อแรงต้าน F_D (drag force) ที่กระทำต่อทรงกระบอกกลม แรงนี้มี 2 ส่วน โดยส่วนหนึ่งนั้นมาจากความเค้นเฉือนที่ผิวของบาวนด์รีเลเยอร์ (แรงต้านความเสียดทาน) อีกส่วนนั้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความดันในทิศทางการไหล อันเป็นผลจากการเกิดการอลวน (wake) สัมประสิทธิ์แรงต้านไร้มิติ C_D กำหนดเป็น

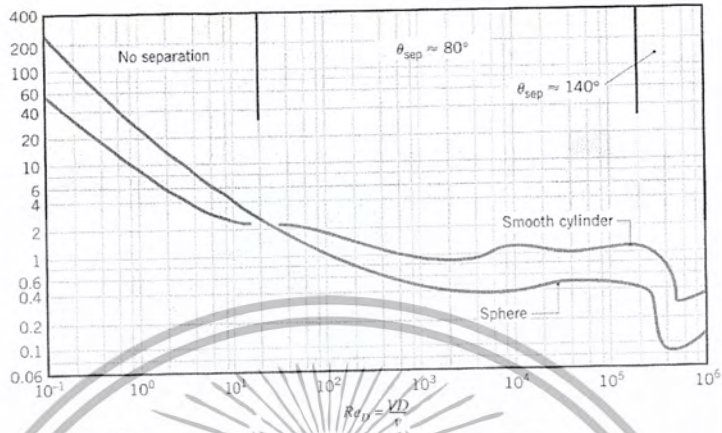
$$C_D \equiv \frac{F_D}{A_f(\rho V^2/2)} \quad (3.84)$$



รูปที่ 3.15 ผลของเทอร์บูเลนต์ต่อการแยกตัว [7]

โดยที่ A_f เป็นพื้นที่ด้านหน้าของทรงกระบอก (พื้นที่เงาที่ฉายตั้งฉากกับความเร็วกระแสอิสระ) สัมประสิทธิ์แรงต้านเป็นฟังก์ชันของเรโนลด์นัมเบอร์ และผลลัพธ์ถูกนำมาแสดงในรูปที่ 3.16 สำหรับ $Re_D < 2$ ผลการแยกตัวละทิ้งได้ไม่ต้องนำมาคิด และจะขึ้นต่อแรงต้านจากความเสียดทานเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเรโนลด์นัมเบอร์ ผลของการแยกตัวและแรงต้านที่ก่อตัวขึ้นจะ

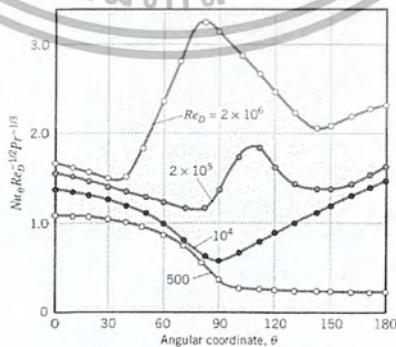
กลายมาเป็นสิ่งสำคัญมากกว่า ส่วนการลดขนาดของ C_D มากๆ นั้นเกิดขึ้นที่ $Re_D > 2 \times 10^5$ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงบาวนด์รีเลเยอร์ ซึ่งจะลดการแยกตัว ผลตามมาเป็นการลดบริเวณเกิด wake ขึ้น และขนาดของแรงต้านที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.16 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการไหลผ่านทรงกระบอกกลมเรียบและทรงกลม [7]

3.5.2 การพาความร้อน

การไหลในกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องแยกคิดเป็นส่วน q ลามินาร์ และ q เทอร์บูเลนซ์ เพราะสมการใช้หาค่า h ส่วนใหญ่จะเป็นสมการที่เฉลี่ยค่า h รอบเส้นรอบวงของทรงกระบอกอยู่แล้วเมื่อพิจารณารูปที่ 3.17 จะพบว่าค่า Nu_θ (คือค่า h) จะลดลงเรื่อยๆ จนถึงมุม $\theta \approx 80^\circ$ จากนั้นก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าการไหลเปลี่ยนจากลามินาร์เข้าสู่เทอร์บูเลนซ์ ต่อจากนั้นค่า Nu_θ ก็ลดลงอีก (สำหรับ Re_D สูงๆ) ที่ $\theta \approx 140^\circ$ ของไหลจะแยกตัวออกจากพื้นผิวทรงกระบอกและเกิดมี wakes ขึ้นทำให้ค่า h ลดลง



รูปที่ 3.17 ค่า Nu_x สำหรับอากาศไหลตั้งฉากกับทรงกระบอกกลม [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกกลม สมการเอมไพริคัลของ Hilpert ถูกใช้อย่างแพร่หลาย คือ



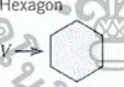


$$\overline{Nu}_D = \frac{hD}{k} = C Re_D^m R^{1/3} \quad (3.85)$$

ซึ่งค่า C และ m เป็นค่าคงที่หาจากตาราง 3.1 และตารางที่ 3.2 สำหรับแก๊สที่ไหลผ่านทางทรงกระบอกที่ไม่กลม

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของสมการ (3.85) สำหรับทรงกระบอกกลมในการไหลตัด [7]

cross flow [11, 12]		
Re_D	C	m
0.4–4	0.989	0.330
4–40	0.911	0.385
40–4000	0.683	0.466
4000–40,000	0.193	0.618
40,000–400,000	0.027	0.805

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ของสมการ (3.85) สำหรับทรงกระบอกที่ไม่กลมในการไหลตัดของแก๊ส [7]

cylinders in cross flow of a gas [13]			
Geometry	Re_D	C	m
Square 	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.246	0.588
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.102	0.675
Hexagon 	$5 \times 10^3 - 1.95 \times 10^4$ $1.95 \times 10^4 - 10^5$	0.160 0.0385	0.638 0.782
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.153	0.638
Vertical plate 	$4 \times 10^3 - 1.5 \times 10^4$	0.228	0.731

3.5.3 สมการที่มีความถูกต้องแม่นยำอีกสมการหนึ่งคือ สมการ Zhukauskas

$$\overline{\text{Nu}}_D = C \text{Re}_D^m \text{Pr}_\infty^n \left(\frac{\text{Pr}_\infty}{\text{Pr}_s}\right)^{1/4} \quad (3.86)$$

สำหรับ $0.7 < Pr < 500$

$$1 < \text{Re}_D < 10^6$$

โดยที่ C และ m มาจากตารางที่ 3.3 คุณสมบัติต่างๆ คัดที่ T_∞ ยกเว้น Pr_s คัดที่ T_s

ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่ของสมการ (3.86) สำหรับทรงกระบอกกลมในการไหลตัด [7]

Re_D	C	m
1-40	0.75	0.4
40-1000	0.51	0.5
$10^3-2 \times 10^5$	0.26	0.6
$2 \times 10^5-10^6$	0.076	0.7

ถ้า $Pr \leq 10$, ใช้ค่า $n = 0.37$ และถ้า $Pr > 10$ ใช้ค่า $n = 0.36$

นอกจากนี้ก็มี Churchill และ Berstein ได้เสนอสมการซึ่งกลุ่มค่า Re_D ทั้งหมด รวมทั้ง Pr ด้วย สมการนี้ใช้ได้สำหรับ $\text{Re}_D Pr > 0.2$ คือ

$$\overline{\text{Nu}}_D = 0.3 + \frac{0.62 \text{Re}_D^{1/2} \text{Pr}^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}_D}{28200}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

โดยที่คุณสมบัติต่างๆ หาที่อุณหภูมิฟิล์ม (T_f)

บทที่ 4

ลักษณะทั่วไปของเตาอบไฟฟ้า

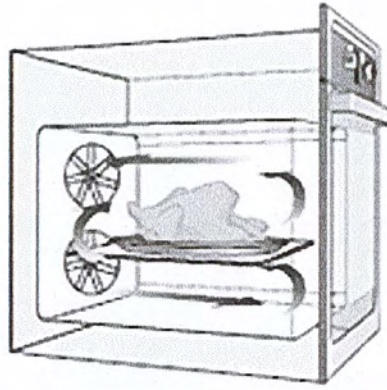
4.1 ลักษณะทั่วไป

การออกแบบเตาอบถือว่าไม่ซับซ้อนมากเมื่อเทียบกับสิ่งอื่น โดยห้องอบอาหาร (cooking compartment) จะถูกหุ้มด้วยฉนวนและโดยทั่วไปจะประกอบด้วยกระจกสองชั้น (double-glazed) เพื่อให้ลดการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอกของเตาอบน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ สำหรับอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบจะถูกควบคุมโดยขดลวดความร้อน (electric heating element) ด้วยระบบ on/off thermostatic control ขดลวดความร้อนโดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 mm ติดตั้งไว้บริเวณใกล้ผิวด้านบนและด้านล่างของช่องเตาอบและบริเวณรอบพัดลม ในยุโรปขดลวดความร้อนด้านล่างจะถูกปกปิดไว้ในผนัง แต่ขดลวดความร้อนด้านบนจะเปลือยไม่มีแผ่นปิดเพื่อความง่ายในการทำอาหารด้วยการย่าง เตาอบส่วนใหญ่จะทำงานด้วยการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) โดยใช้พัดลม (axial fan) ติดตั้งไว้บริเวณผนังด้านหลัง ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขดลวดความร้อนอยู่บริเวณรอบๆ พัด

สำหรับการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าได้ใช้เตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SAMSUNG รุ่น BF62CBST โดยมีข้อมูลดังนี้

แหล่งพลังงาน	464×370×410mm
ปริมาตร (ความจุที่ใช้งาน)	65 ลิตร
พลังงานเอาต์พุต	สูงสุด 3,050 วัตต์
น้ำหนัก	40 kg โดยประมาณ
ขนาดช่องของเตาอบ (กว้าง×สูง×ลึก)	440 x 365 x 405 มม.

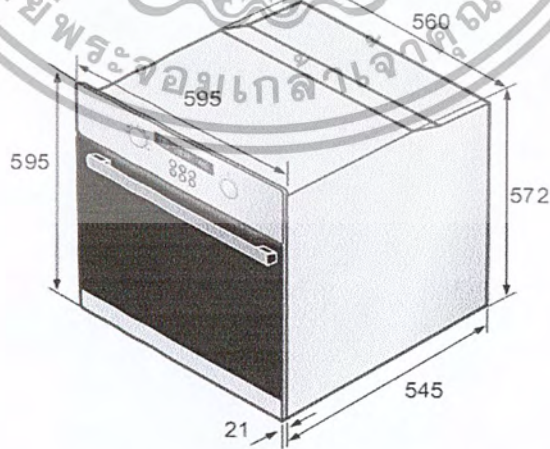
เตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST ใช้ระบบให้พลังงานความร้อนสองระบบภายในเตาเดียว มีระบบกระจายความร้อนสองชุดที่มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย ด้วยชุดทำความร้อนสองระบบ ส่งพลังงานความร้อนได้มากขึ้นอีกเท่าตัว ใช้เวลาในการทำอาหารได้น้อยลงกว่าครึ่งจากปกติ แยกการควบคุมอุณหภูมิและตั้งเวลาจากกัน โดยอิสระ สามารถปรุงอาหารสองชนิดพร้อมกันได้ที่อุณหภูมิ และการตั้งเวลาที่แตกต่างกัน ช่วยประหยัดทั้งพลังงานและเวลา



รูปที่ 4.1 แสดงการทำงานภายในเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST [14]

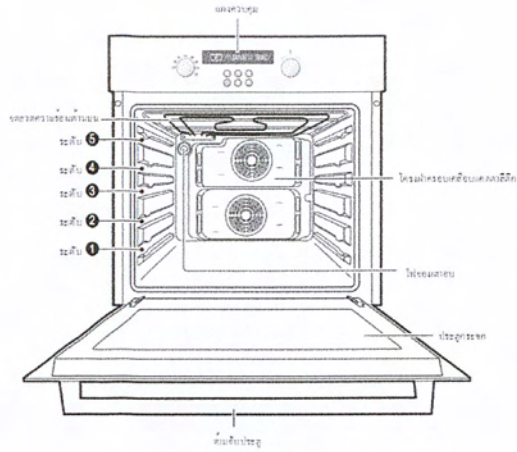


รูปที่ 4.2 ลักษณะภายนอกของเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST [14]



รูปที่ 4.3 ขนาดภายนอกของเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบของเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST [14]



รูปที่ 4.5 ปุ่มควบคุมเตาอบ [14]

1. ปุ่มเลือกฟังก์ชันปรุงอาหาร
2. จอมแสดงผล
3. ปุ่มควบคุมเวลาอุณหภูมิ
4. ปุ่มไฟ
5. ปุ่มล็อกป้องกันเด็ก
6. ปุ่มนาฬิกา
7. ปุ่มนาฬิกาจับเวลา
8. ปุ่มเวลาปรุงอาหาร
9. ปุ่มเวลาสิ้นสุด

4.2 ส่วนประกอบสำคัญต่างๆภายในเตาอบ

1. ขดลวดรอบพัดลม 2 อัน



รูปที่ 4.6 ขดลวดรอบพัดลม

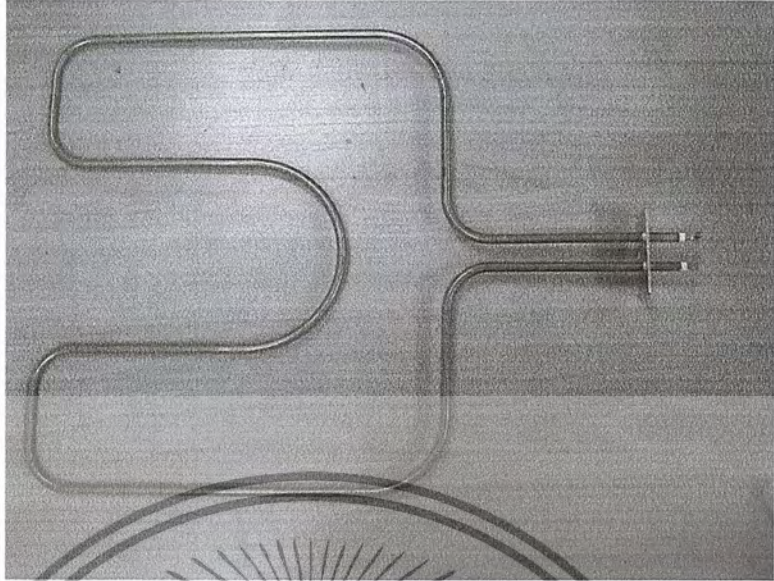
2. ขดลวดบนผนังเตาอบ 1 อัน



รูปที่ 4.7 ขดลวดบนผนังเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขดลวดด้านล่างเตาอบ 1 อัน



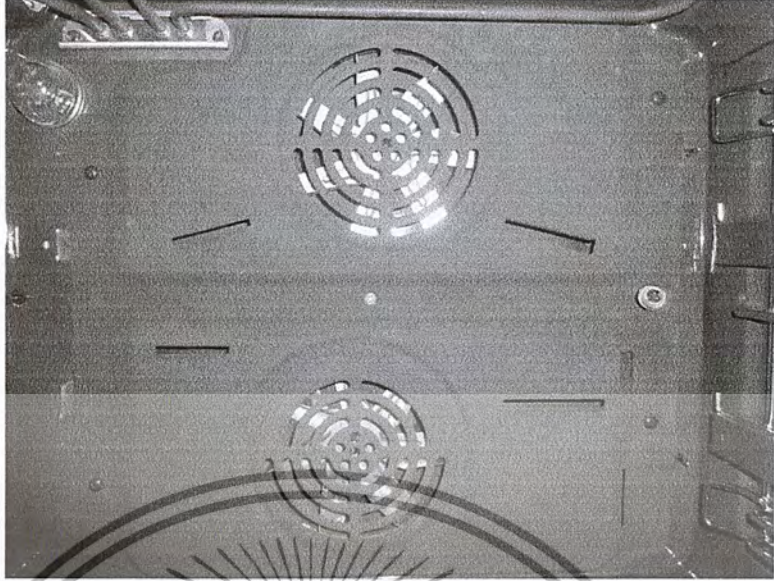
รูปที่ 4.8 ขดลวดด้านล่างเตาอบ

4. พัดลมในเตาอบ 2 อัน



รูปที่ 4.9 พัดลมในเตาอบ

5. ฝาครอบพัดลม 1 อัน



รูปที่ 4.10 ฝาครอบพัดลม

6. ฉนวนกันความร้อนขนาด 25 มิลลิเมตร

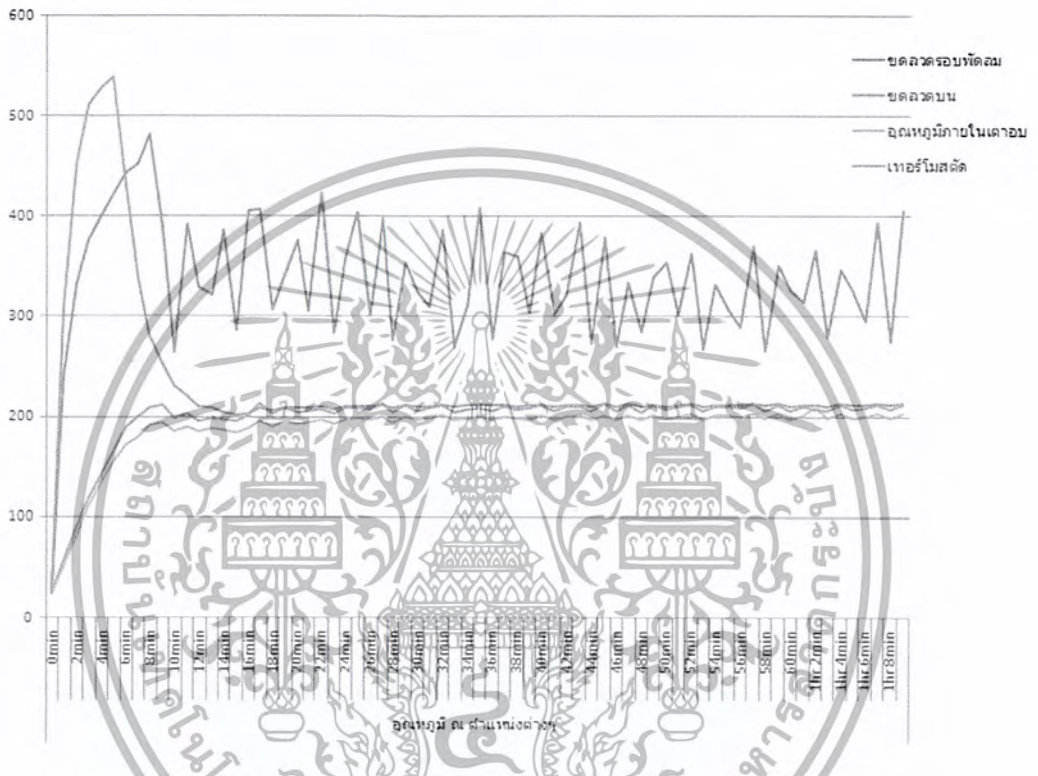


รูปที่ 4.11 ฉนวนกันความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทำงานของเตาอบไฟฟ้า SAMSUNG รุ่น BF62CBST

การทำงานของเตาอบไฟฟ้านี้ มีการติดตั้งเทอร์โมสแตทไว้ภายในเตาอบไฟฟ้า เพื่อทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดแล้วเทอร์โมสแตทจะทำการตัดการทำงานของเตาอบไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้าลดลงมาได้ระยะหนึ่ง เทอร์โมสแตทจะทำให้เตาอบไฟฟ้ากลับมาทำงานอีกครั้ง และจะทำการตัดต่ออย่างนี้ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอุณหภูมิการตัดต่อของเทอร์โมสแตทในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง

เส้นสีฟ้าคือ อุณหภูมิของเทอร์โมสแตท โดยที่เราตั้งค่าอุณหภูมิของเตาอบไว้ที่ 210°C เมื่ออุณหภูมิขึ้นถึง 210°C เทอร์โมสแตทจะตัดการทำงานและเมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงประมาณ 200°C เทอร์โมสแตทจะทำให้เตาอบกลับมาทำงานอีกครั้งและจะตัดต่ออย่างนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง steady

เส้นสีแดงคือ อุณหภูมิของขดลวดบนจากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงแรกอุณหภูมิของขดลวดบนจะขึ้นเร็วมากแต่เมื่อถึงช่วงที่เทอร์โมสแตท ตัดการทำงาน อุณหภูมิจะลดลงมาจนเข้าสู่ช่วง steady และจะไม่ทำงานอีกแต่ที่อุณหภูมิยังสูงอยู่เพราะว่าได้รับความร้อนจากขดลวดรอบพัดลม

เส้นสีน้ำเงินคือ อุณหภูมิของขดลวดรอบพัลคมจากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงแรกอุณหภูมิจะขึ้นเร็วแต่ไม่เท่ากับอุณหภูมิต่อมาและเมื่อเทอร์โมสแตคตัดการทำงานของเตาอบ อุณหภูมิก็จะลดลงมาและเมื่อเตาอบกลับมาทำงานจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิก็ตเพิ่มขึ้่นอีก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขดลวดรอบพัลคมจะทำงานตามการตัดต่อของเทอร์โมสแตคและเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด

เส้นสีเขียวคือ อุณหภูมิภายในเตาอบจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิกจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ steady แล้ว

ดังนั้นจากกราฟเราสามารถสรุปได้ว่าหลังจากการตัดของเทอร์โมสแตคครั้งแรกแล้วจะมีแต่ขดลวดรอบพัลคมที่ยังทำงานต่อ ในขณะที่ขดลวดด้านบนจะหยุดการทำงานไปเลย แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้ไปส่วนมากแล้วจะใช้ไปกับขดลวดรอบพัลคม



บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพของเตาอบจะเกี่ยวข้องกับการทดสอบทั้งหมด 3 อย่างคือ การทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating), การทดสอบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ และการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ

5.1 การทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test of the empty oven)

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electric consumption) และเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเตาอบเปล่า (Preheat) ให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Temperature rise) จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ โดยอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน IEC 60350 สำหรับฟังก์ชันที่มีการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced air circulation function) ให้อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบเพิ่มขึ้น 155 K

โดยทำการทดสอบกับเตาอบทั้งหมด 3 รูปแบบคือ

1. เตาอบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปลง
2. เตาอบไฟฟ้าที่พอยล์ภายในผนังเตาอบด้านใน
3. เตาอบไฟฟ้าที่พอยล์ภายในผนังเตาอบด้านในและเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50

มิลลิเมตร

5.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. Thermocouple type K
2. Data logger
3. Power meter

5.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่บริเวณกึ่งกลางของเตาอบ
2. บันทึกค่าเวลาและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ เมื่ออุณหภูมิภายในเตาอบเพิ่มขึ้น 155 K ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางบันทึกผลการทดลอง

รายการ	ผลการทดสอบ
อุณหภูมิห้อง	°C
อุณหภูมิของอากาศเริ่มต้น(T_1)	°C
อุณหภูมิของอากาศสุดท้าย($T_2=T_1+155$)	°C
เวลา	Min sec
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	Wh

5.2 การทดสอบการกระจายความร้อนภายในเตาอบ (Heat distribution test)

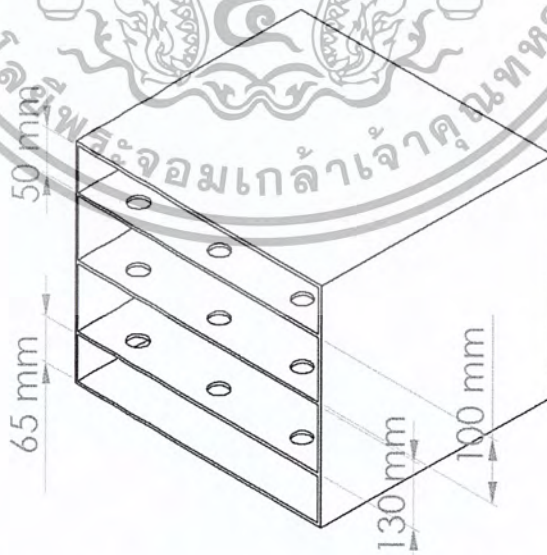
จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อวัดการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาอบว่าบริเวณใดภายในเตาอบมีอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด จากนั้นคำนวณหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดว่ามีค่าความแตกต่างกันเพียงใด

5.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. Thermocouple type K
2. Data logger
3. ตะแกรงลวด

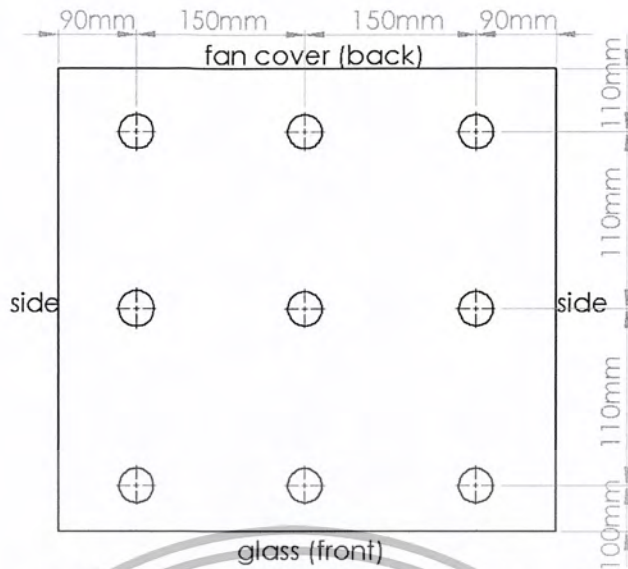
5.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้เทอร์โมคัปเปิลจำนวน 27 อันในการวัดค่าอุณหภูมิแต่ละจุดภายในเตาอบ โดยการวัดอุณหภูมิจะแบ่งปริมาตรภายในเตาอบออกเป็น 3 ชั้น แต่จะชั้นจะติดเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 9 อัน ดังรูป



รูปที่ 5.1 ความห่างแต่ละชั้นของของตำแหน่งการติดเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในแต่ละชั้น

2. ตั้งค่าอุณหภูมิของเตาอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส
3. บันทึกค่าอุณหภูมิของเตาอบจาก Data logger ทุกๆ หนึ่งนาที จนถึงนาทีที่ 15
4. ในแต่ละเวลาให้นำจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดและจุดที่มีอุณหภูมิต่ำสุด แล้วคำนวณหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสอง

5.3 การทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ (Thermal efficiency test)

เตาอบไฟฟ้าเป็นปรีคั้นไฟฟ้าสำหรับให้ความร้อนในการอบอาหาร โดยวิธีการให้ความร้อนประกอบด้วยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นหลักในการหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของเตาอบไฟฟ้าจะเป็นการหาอัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการที่จะทำให้ก้อนทดสอบ (Test block) อุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิหนึ่งไปสู่อีกอุณหภูมิหนึ่งต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน Federal register, 10 CFR Part 430, Department of Energy, USA ซึ่งสามารถหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของเตาอบไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$\eta = \frac{W_1 \times C_p \times T_s}{E_0 \times K_e} \times 100$$

เมื่อ

- W_1 น้ำหนักอะลูมิเนียมอัลลอยเริ่มต้น kg
- C_p ความจุความร้อนจำเพาะของวัตถุทดสอบ 0.96 kJ/kg.K
- T_s อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของวัตถุทดสอบ 130 °C
- E_0 การใช้พลังงานไฟฟ้า W-h

K_e ตัวคูณเพื่อเปลี่ยนหน่วยจาก W-h ไปเป็น Btu 3.6 kJ/W-h

η ค่าประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าร้อยละ

5.3.1 การเตรียมก้อนทดสอบ

ให้ใช้ก้อนทดสอบ (Test block) ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum alloy) โดยมีขนาดต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ขนาดมาตรฐานของก้อนอะลูมิเนียมอัลลอย

ก้อนทดสอบ	ขนาดใหญ่	ขนาดเล็ก
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	158 ± 1.3 mm	158.8 ± 1.3 mm
ความสูง	71.0 mm	35.5 mm
น้ำหนัก	3.86 ± 0.05 kg	1.93 ± 0.05 kg
เส้นผ่านศูนย์กลางของรูด้านบน	2.03 mm	2.03 mm
ความลึกของรู	20.3 mm	17.75 mm

หมายเหตุ :

1. ผงนิกเป็น Anodic black coating มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.025 mm
2. บริเวณผิวกลางของก้อนทดสอบ (Test block) ต้องเรียบโดยมีความหยาบต่างกันไม่เกิน 0.051 mm
3. ก้อนทดสอบ (Test block) ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminium alloy No. 6061) จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ความจุความร้อนจำเพาะ 0.96 kJ/kg.K

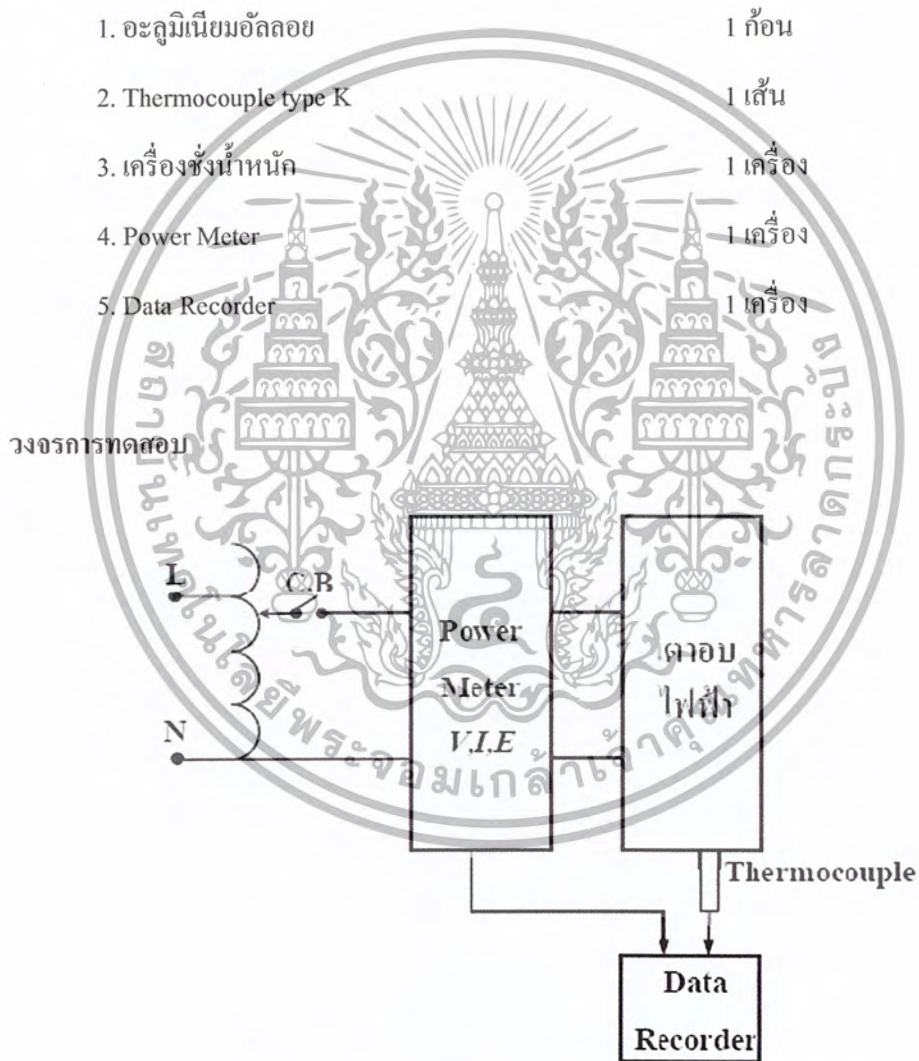
Coefficient of thermal conductivity $154.8-171.5$ W/m^oC

4. ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพพลังงานจะต้องใช้ข้อมูลจริงของก้อนทดสอบ (Test block) ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของเตาอบไฟฟ้ากับขนาดก้อนทดสอบ

ประเภท	ก้อนทดสอบ
ประเภทไม่มีระบบปรับตั้งอุณหภูมิขนาดต่ำกว่า 12 ลิตร	ขนาดเล็ก
ประเภทไม่มีระบบปรับตั้งอุณหภูมิขนาดตั้งแต่ 12 ลิตรขึ้นไป	ขนาดใหญ่
ประเภทมีระบบปรับตั้งอุณหภูมิขนาดต่ำกว่า 35 ลิตร	ขนาดใหญ่
ประเภทมีระบบปรับตั้งอุณหภูมิขนาดตั้งแต่ 35 ลิตร	ขนาดใหญ่

5.3.2 อุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 5.3 วงจรทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า

5.3.3 สภาพแวดล้อมในการทดสอบ

- ควบคุมอุณหภูมิห้องตลอดการทดสอบให้มีค่าเท่ากับ $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$
ระบบแสดงข้อมูลของเตาอบไฟฟ้า จะต้องมีความผิดพลาดไม่มากกว่า $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$
ระบบแสดงข้อมูลของก้อนทดสอบ จะต้องมีความผิดพลาดไม่มากกว่า $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$
- ควบคุมแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าตลอดการทดสอบให้มีค่าที่พิกัดเครื่องใช้ไฟฟ้า $\pm 2\%$
- อุณหภูมิปกติขณะที่ไม่ใช้งานก่อนการทดสอบ อุณหภูมิทั่วทุกพื้นที่ของทั้งเตาอบจะต้องมีอุณหภูมิเบี่ยงเบนไม่เกิน 2.8°C

5.3.4 การเตรียมการทดสอบ

- ทำการตั้งค่าเทอร์โมสแตทของเตาอบไฟฟ้าและทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลอยู่ที่ตำแหน่งประมาณจุดกึ่งกลางของปริมาตรที่ใช้สอยภายในเตาอบไฟฟ้า ตั้งอุณหภูมิภายในให้สูงกว่าอุณหภูมิห้องอยู่ที่ $180.6 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$ ทำได้โดยการวัดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของการตัดต่อของตัวทำความร้อนทั้งสิ้น 3 ครั้ง



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการตัดต่อของเทอร์โมสแตท

- เมื่อ Thermostat ถูกตั้งค่าเรียบร้อยแล้ว นำ Thermocouple ออกจากเตาอบไฟฟ้า

5.3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

- นำก้อนทดสอบ (Test block) ที่ทำจากอะลูมิเนียมอัลลอยที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นไม่เกิน $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ จากอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่ก้อนทดสอบต้องทำการปรับอุณหภูมิให้อยู่ในย่านอุณหภูมิที่ต้องการ ต้องทิ้งก้อนทดสอบไว้ไม่น้อยกว่า 2 นาที หลังจากการปรับอุณหภูมิ และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของก้อนทดสอบ T_1 และทำการชั่งน้ำหนักของก้อนทดสอบก่อนการทดสอบ W_1
- นำก้อนทดสอบ (Test block) วางไว้บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของเตาอบไฟฟ้า (Approximately in the center of the usable baking space)

3. เปิดการทำงานของเตอบไฟฟ้า บันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตอบไฟฟ้า E_0 เมื่ออุณหภูมิของก้อนทดสอบถึงระดับ 130 องศาเซลเซียสเหนืออุณหภูมิเริ่มต้นของก้อนทดสอบ T_1 และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของก้อนทดสอบ T_0

ตารางบันทึกผลการทดลอง

รายการ	ผลการทดสอบ
อุณหภูมิห้อง	°C
น้ำหนักของก้อนทดสอบ (W)	kg
อุณหภูมิเริ่มต้นของก้อนทดสอบ (T_1)	°C
อุณหภูมิก้อนทดสอบ ($T_0 = T_1 + 130$)	°C
เวลา	Min sec
การใช้พลังงานไฟฟ้า (E_0)	Wh
ประสิทธิภาพ (η)	%

บทที่ 6

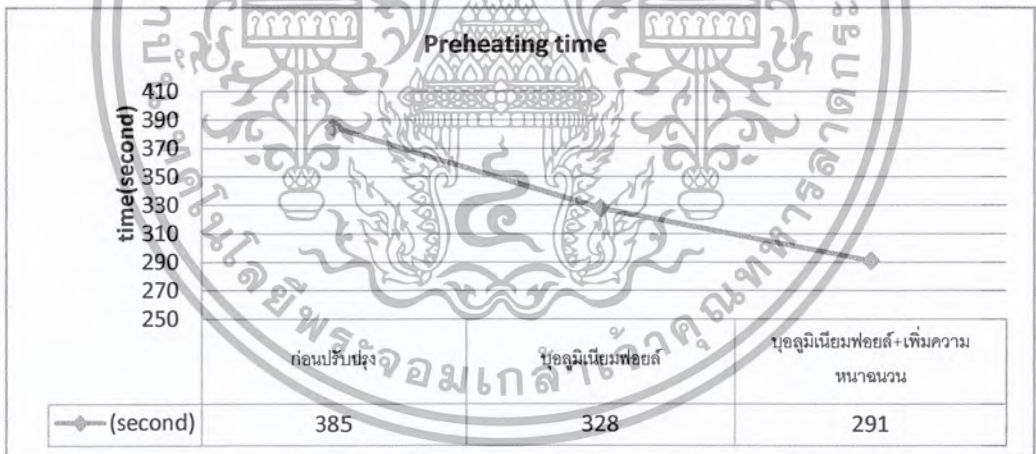
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test of the empty oven), การทดสอบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ (Heat distribution test) และการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ (Thermal efficiency test) ของเตาอบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปลง เตาอบไฟฟ้าที่บุฟอยล์ภายในผนังเตาอบด้านใน และเตาอบไฟฟ้าที่บุฟอยล์ภายในผนังเตาอบด้านในโดยเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50 มิลลิเมตร

6.1 ผลการทดลองการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test of the empty oven)

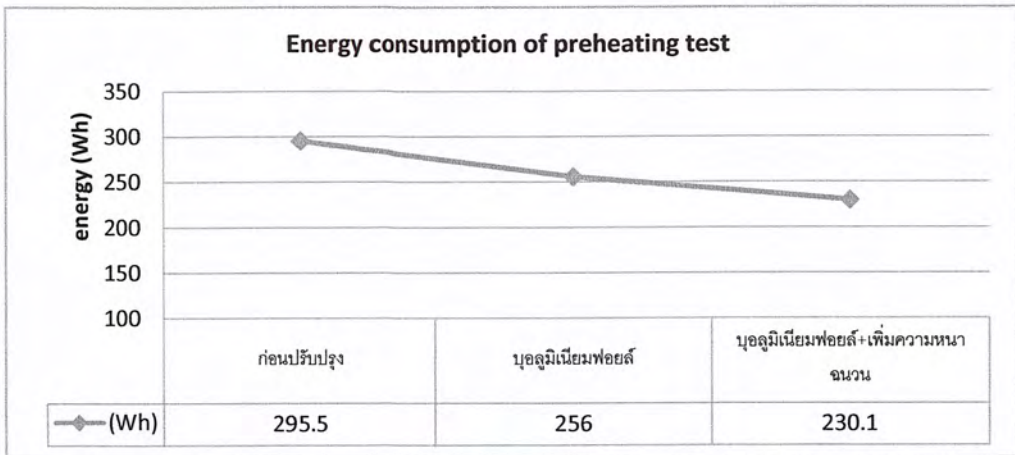
ในการทดลองการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test of the empty oven) จะทำการทดสอบเตาอบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปลง เตาอบไฟฟ้าที่บุฟอยล์ภายในผนังเตาอบด้านใน และเตาอบไฟฟ้าที่บุฟอยล์ภายในผนังเตาอบด้านในโดยเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50 มิลลิเมตร ซึ่งในการทดลองแต่ละแบบจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย

จากผลการทดลองการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test of the empty oven) ทั้ง 3 แบบ สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test)

จากกราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test) พบว่าก่อนปรับปรุงเตาอบไฟฟ้าใช้เวลาในการPreheat 385 วินาที เมื่อบุอะลูมิเนียมฟอยล์ใช้เวลาในการPreheat 328 วินาที (ลดเวลาลงไปได้ 57 วินาที) และเมื่อเพิ่มความหนาฉนวนเป็น 50 มิลลิเมตรใช้เวลาในการPreheat 291 วินาที (ลดเวลาลงไปได้ 94 วินาที)



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า
(Preheating test)

จากกราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test) พบว่าก่อนปรับปรุงเตาอบไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้าในการPreheat 295.5 Wh เมื่อบออลูมิเนียมพอยด์ใช้พลังงานไฟฟ้าในการPreheat 256 Wh (ลดพลังงานไฟฟ้าลงไปได้ 39.5 Wh) และเมื่อเพิ่มความหนาจนวนเป็น 50 มิลลิเมตรใช้พลังงานไฟฟ้าในการPreheat 230.1 Wh (ลดพลังงานไฟฟ้าลงไปได้ 65.4 Wh)

6.2 ผลการทดลองการทดสอบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ (Heat distribution test)

ในการทดสอบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ (Heat distribution test) จะทำการทดลองกับฝาครอบพัดลมทั้งหมด 4 แบบดังนี้

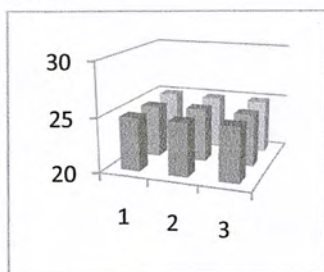
6.2.1 ฝาครอบพัดลมแบบดั้งเดิม



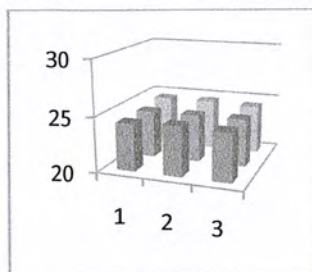
รูปที่ 6.3 ฝาครอบพัดลมแบบดั้งเดิม

ที่เวลา 0 นาที

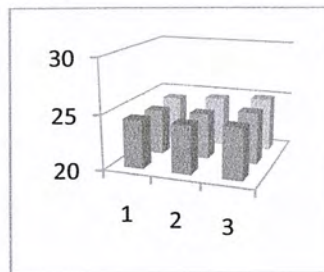
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

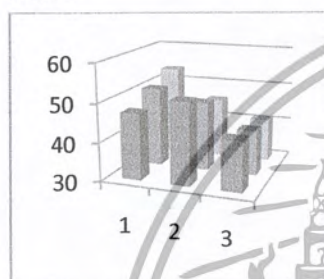


ชั้นที่ 3

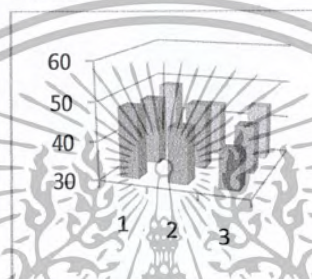


ที่เวลา 1 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 13.8°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 45.40741°C

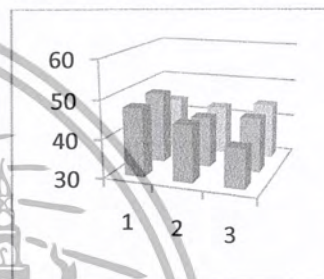
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

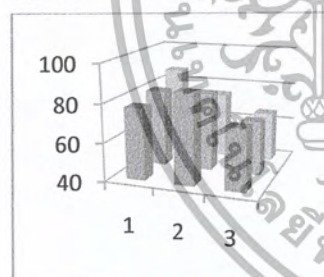


ชั้นที่ 3



ที่เวลา 2 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 26.9°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 72.80741°C

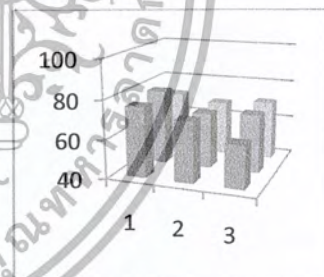
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

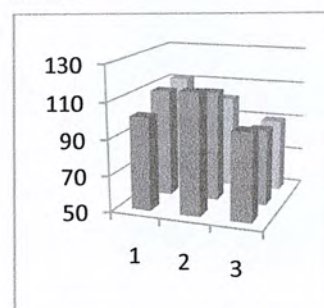


ชั้นที่ 3

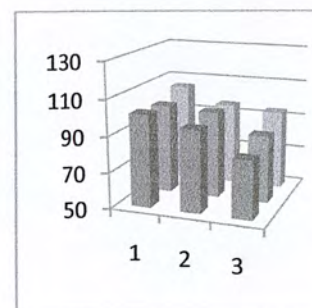


ที่เวลา 3 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 29.6°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 98.23704°C

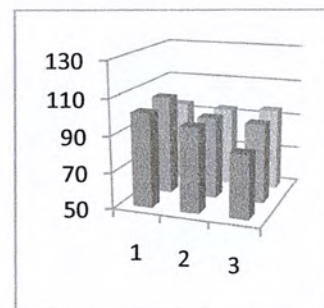
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2



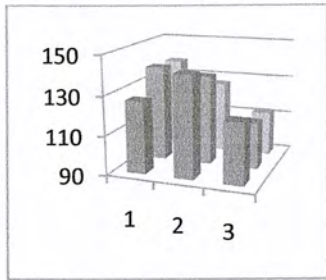
ชั้นที่ 3



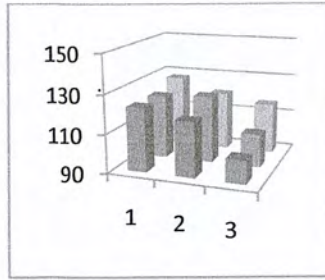
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา 4 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 36.8°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 121.2667°C

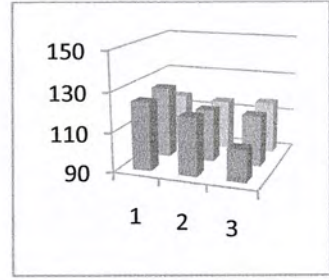
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

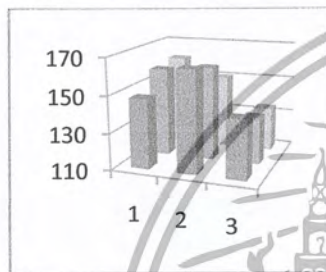


ชั้นที่ 3

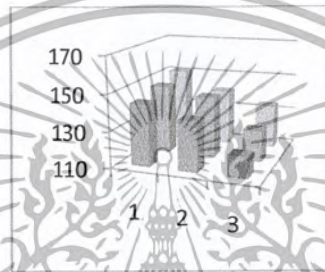


ที่เวลา 5 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 38.7°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 142.5°C

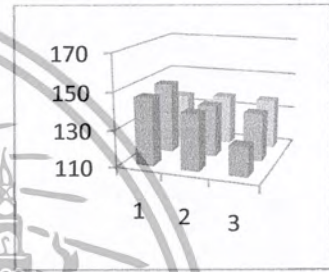
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

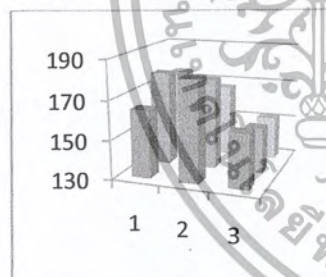


ชั้นที่ 3

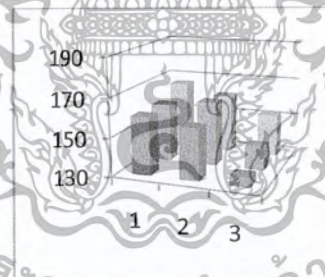


ที่เวลา 6 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 46.4°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 159.0593°C

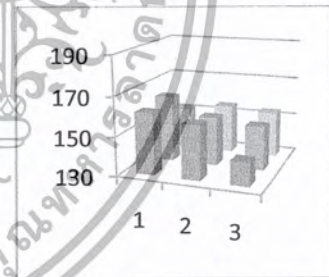
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

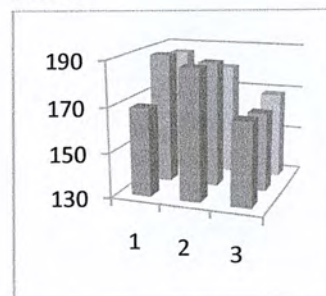


ชั้นที่ 3

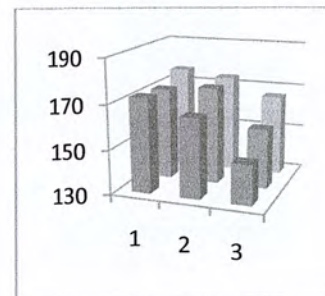


ที่เวลา 7 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 40.4°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 171.4111°C

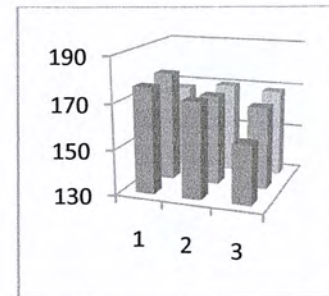
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2



ชั้นที่ 3

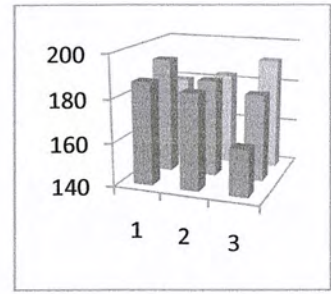
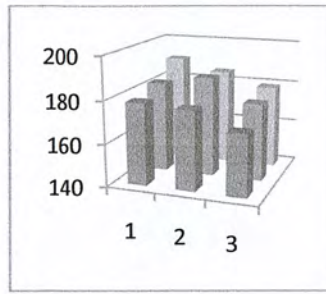
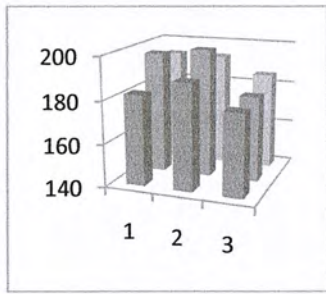


ที่เวลา 8 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 38.5°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 184.037°C

ชั้นที่ 1

ชั้นที่ 2

ชั้นที่ 3

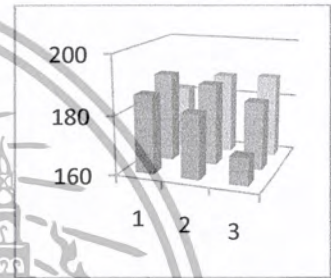
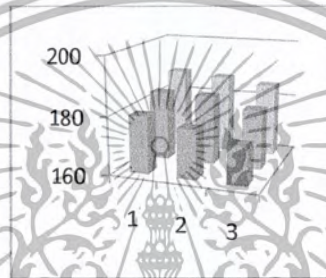
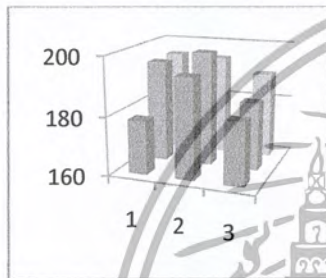


ที่เวลา 9 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 29.8°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 185.3407°C

ชั้นที่ 1

ชั้นที่ 2

ชั้นที่ 3

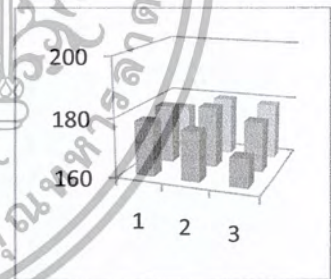
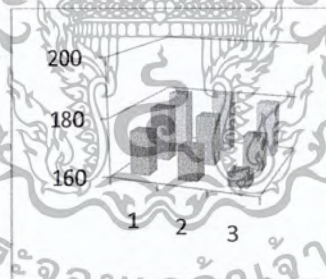
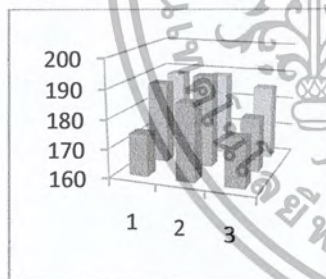


ที่เวลา 10 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 26.8°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 179.0481°C

ชั้นที่ 1

ชั้นที่ 2

ชั้นที่ 3

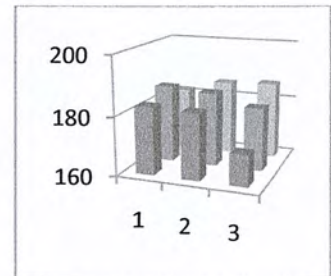
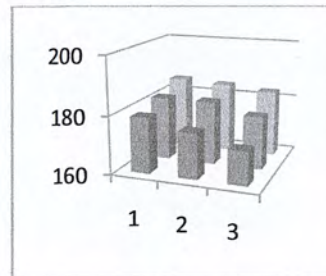
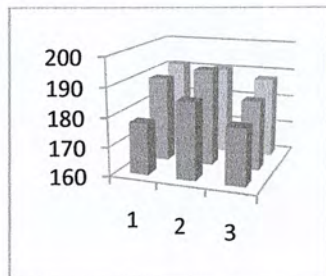


ที่เวลา 11 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 22.6°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 183.0259°C

ชั้นที่ 1

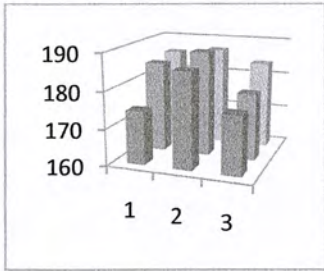
ชั้นที่ 2

ชั้นที่ 3

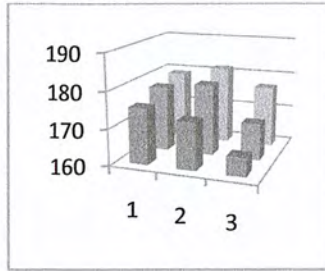


ที่เวลา 12 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 23.4°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 178.3074°C

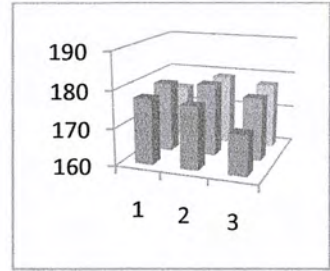
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

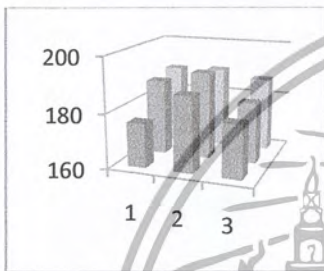


ชั้นที่ 3

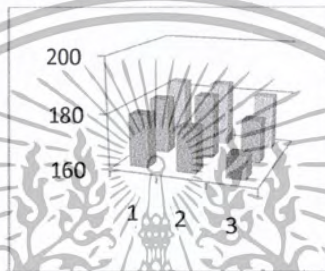


ที่เวลา 13 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 23.2°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 181.6148°C

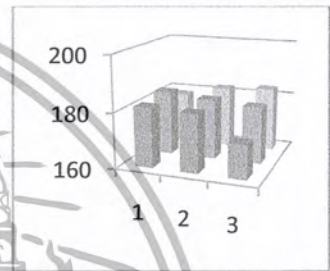
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

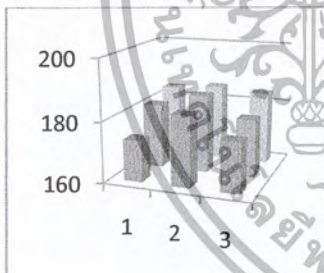


ชั้นที่ 3

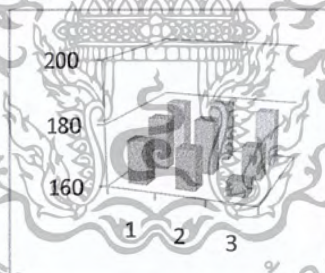


ที่เวลา 14 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 20.7°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 177.637°C

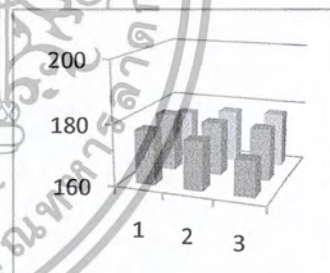
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

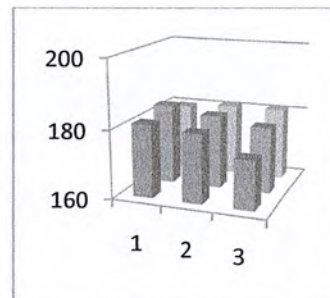
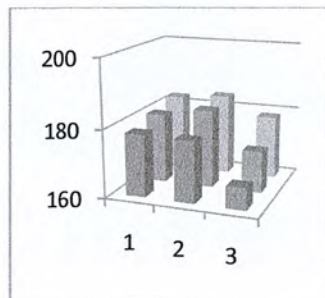
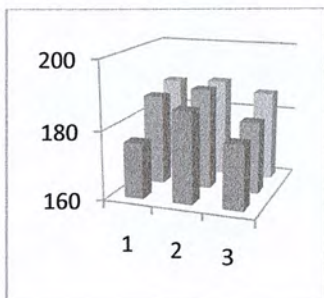


ชั้นที่ 3



ที่เวลา 15 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 22.9°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 180.963°C

ชั้นที่ 1



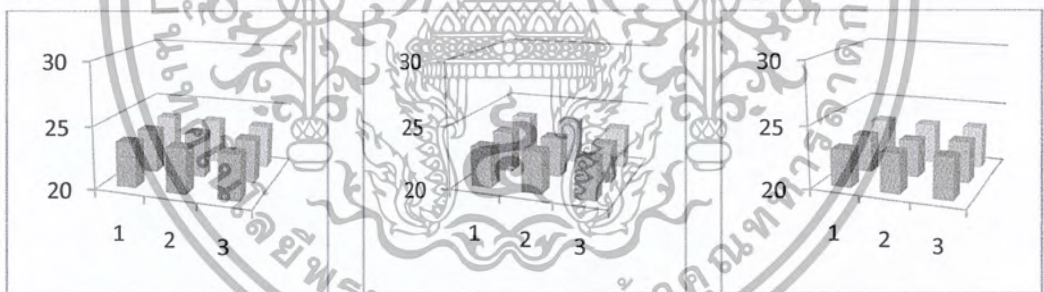
ผลจากการวัดการกระจายอุณหภูมิของฝักรอบพัฒลแบบดั้งเดิมทั้งหมด 15 นาทีพบว่าเกิด ความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุดที่เวลา 6 นาทีโดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 46.4 องศา เซลเซียส

6.2.2 ฝักรอบพัฒลแบบที่ 1

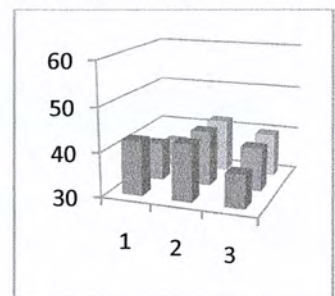
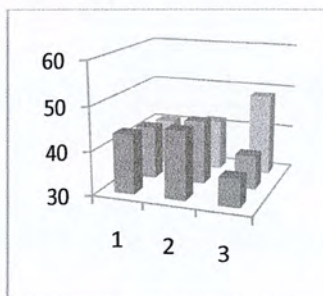
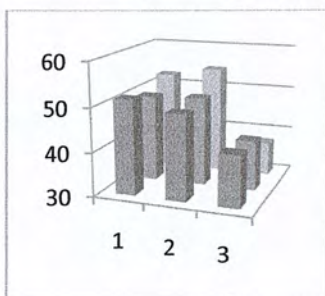


รูปที่ 6.4 ฝักรอบพัฒลแบบที่ 1

ที่เวลา 0 นาที
ชั้นที่ 1

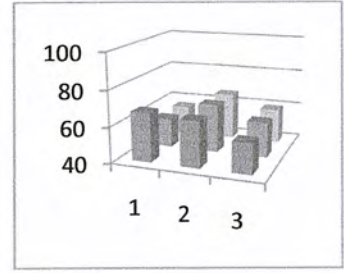
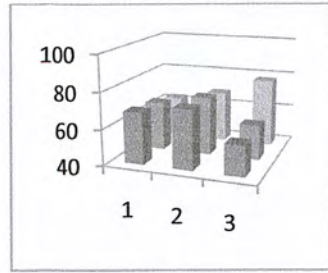
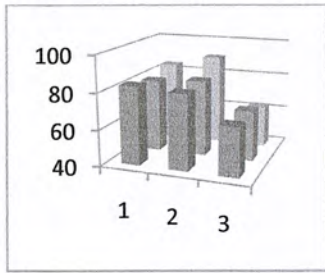


ที่เวลา 1 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 18.6°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 43.35926°C
ชั้นที่ 1

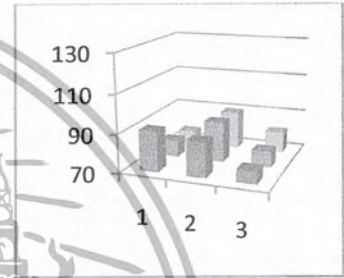
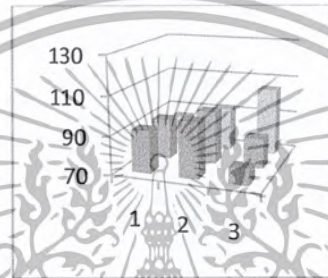
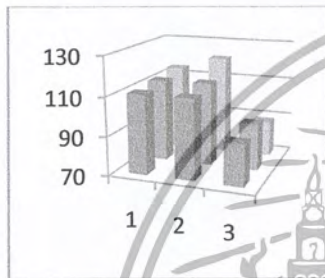


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

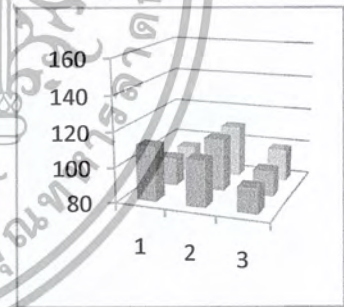
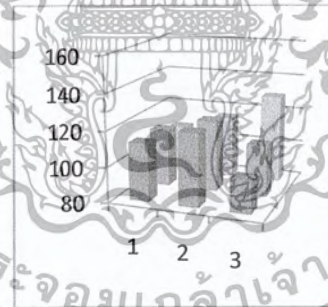
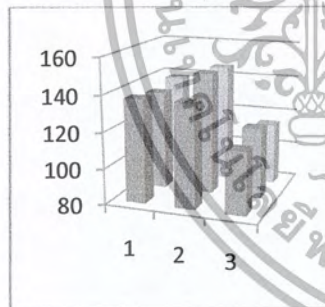
ที่เวลา 2 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 34°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $68.822222^{\circ}\text{C}$



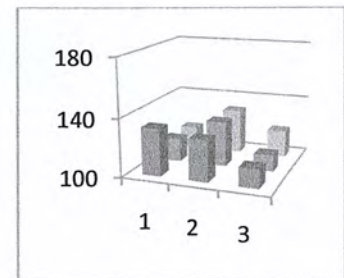
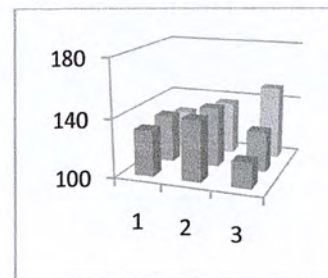
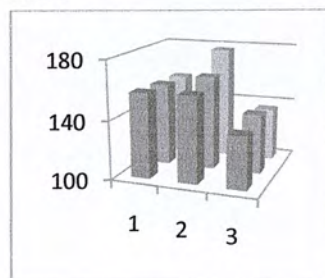
ที่เวลา 3 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 44.6°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $93.825926^{\circ}\text{C}$



ที่เวลา 4 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 52.9°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $116.022222^{\circ}\text{C}$

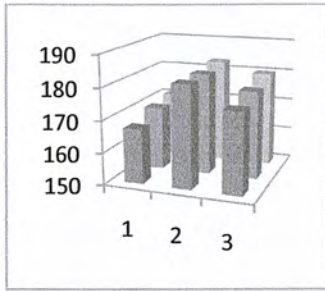


ที่เวลา 5 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 65.8°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $136.44074^{\circ}\text{C}$

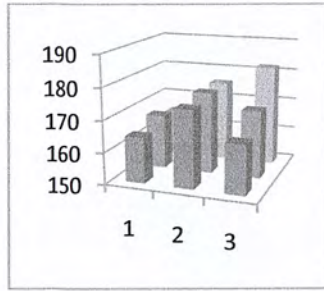


ที่เวลา 14 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 29°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $170.07407^{\circ}\text{C}$

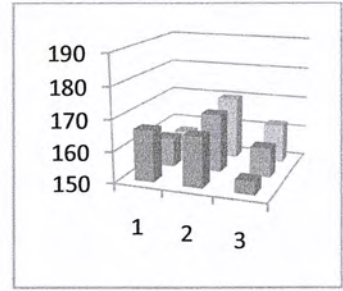
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

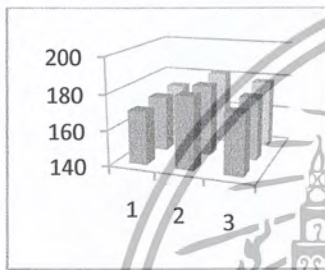


ชั้นที่ 3

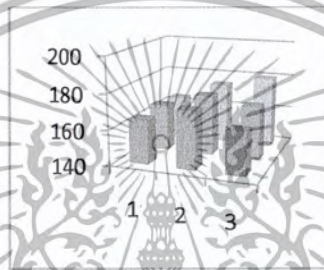


ที่เวลา 15 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 27.7°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $169.53333^{\circ}\text{C}$

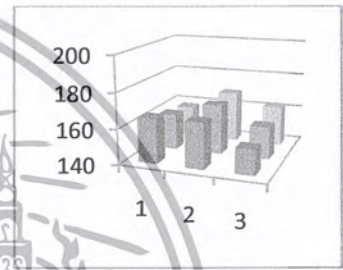
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2



ชั้นที่ 3



ผลจากการวัดการกระจายอุณหภูมิของฝากรอบพัลลมแบบดั้งเดิมทั้งหมด 15 นาทีพบว่าเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุดที่เวลา 5 นาทีโดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 65.8 องศาเซลเซียส

6.2.3 ฝากรอบพัลลมแบบที่ 2

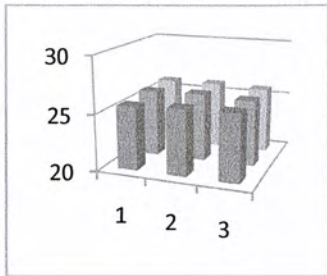


รูปที่ 6.5 ฝากรอบพัลลมแบบที่ 2

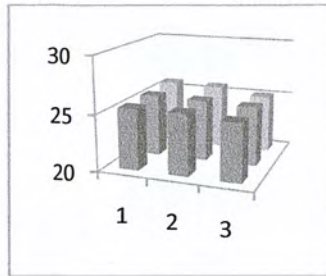
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา 0 นาที

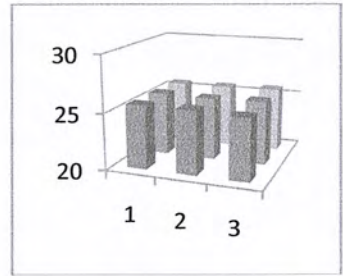
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

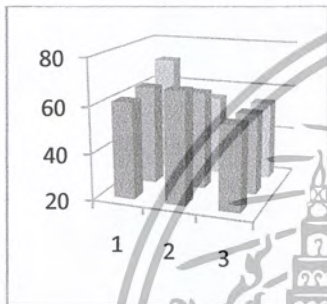


ชั้นที่ 3

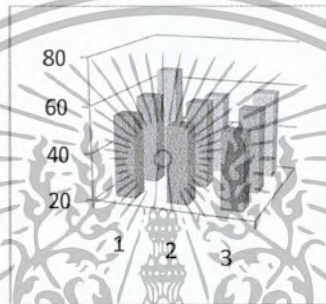


ที่เวลา 1 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 29.1°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $55.596296^{\circ}\text{C}$

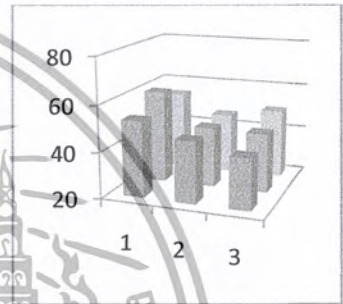
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

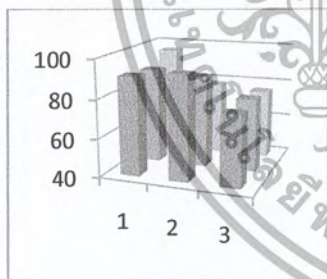


ชั้นที่ 3

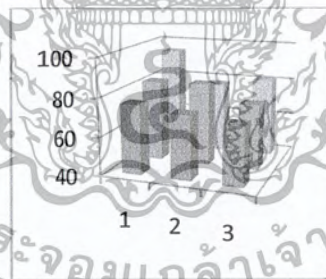


ที่เวลา 2 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 39.2°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 77.17037°C

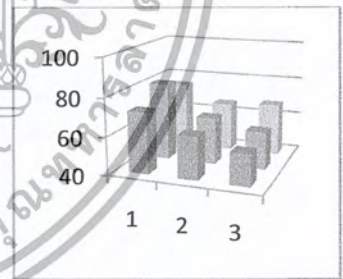
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

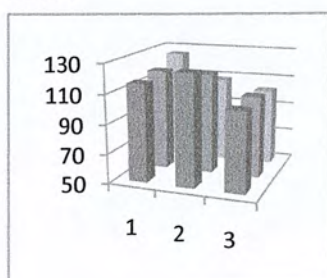


ชั้นที่ 3

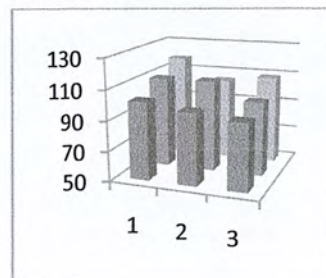


ที่เวลา 3 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 51.6°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $34.160494^{\circ}\text{C}$

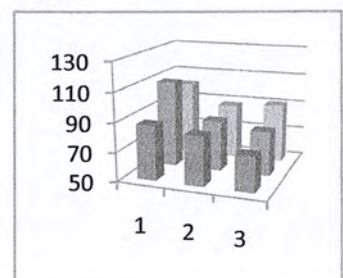
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2



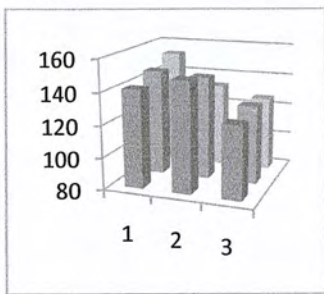
ชั้นที่ 3



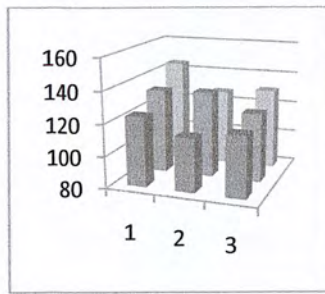
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา 4 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 61.9°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $41.790123^{\circ}\text{C}$

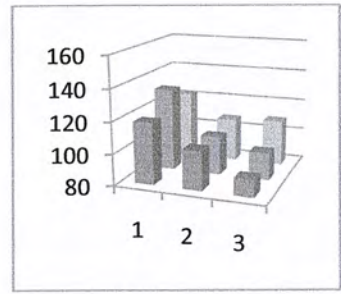
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

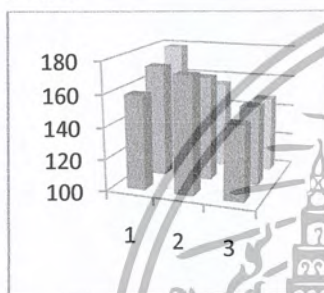


ชั้นที่ 3

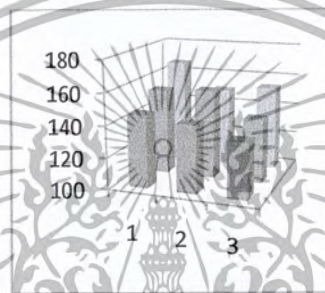


ที่เวลา 5 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 67.8°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $146.57037^{\circ}\text{C}$

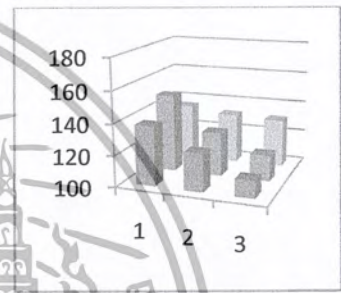
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

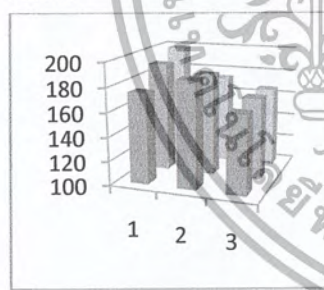


ชั้นที่ 3

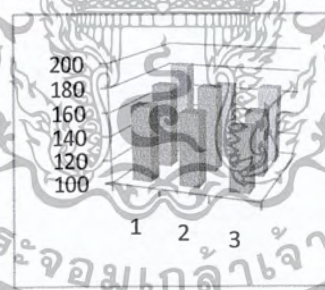


ที่เวลา 6 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 74.1°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $163.98148^{\circ}\text{C}$

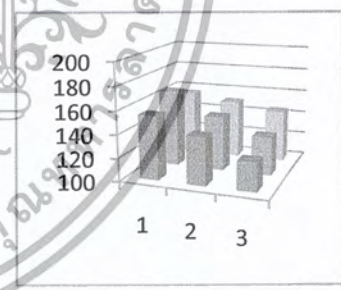
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

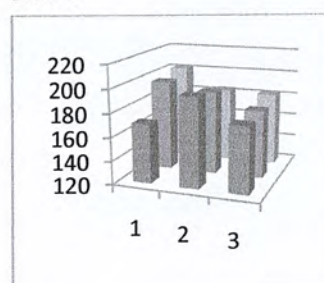


ชั้นที่ 3

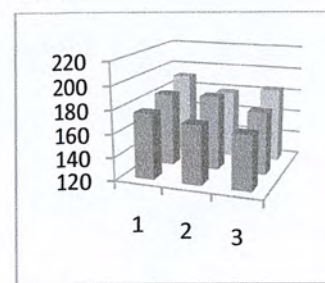


ที่เวลา 7 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 65.3°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $175.96296^{\circ}\text{C}$

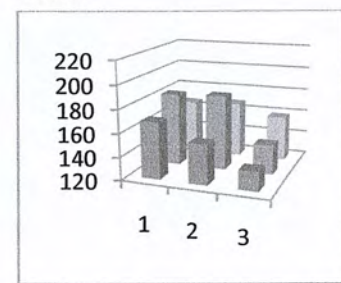
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

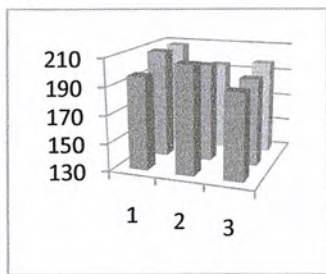


ชั้นที่ 3

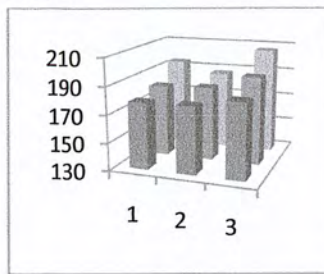


ที่เวลา 8 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 60.4°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $186.13704^{\circ}\text{C}$

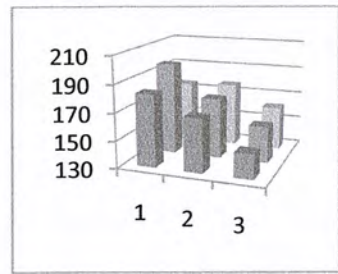
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

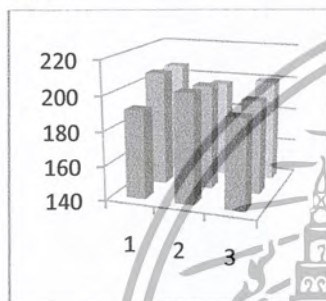


ชั้นที่ 3

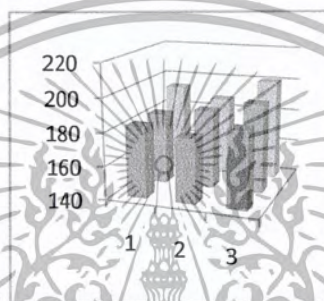


ที่เวลา 9 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 53.2°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $186.86667^{\circ}\text{C}$

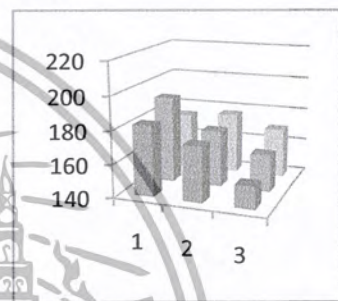
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

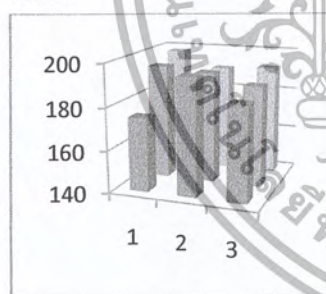


ชั้นที่ 3

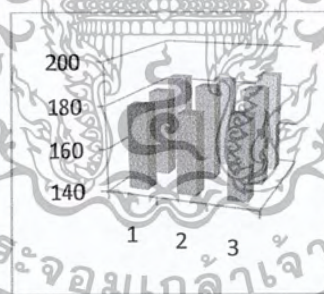


ที่เวลา 10 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 42.5°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $180.24444^{\circ}\text{C}$

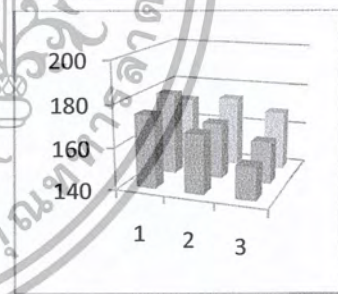
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

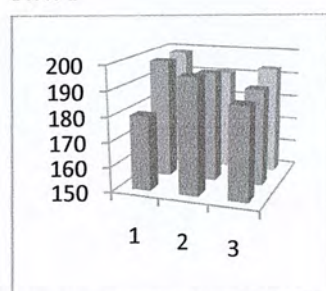


ชั้นที่ 3

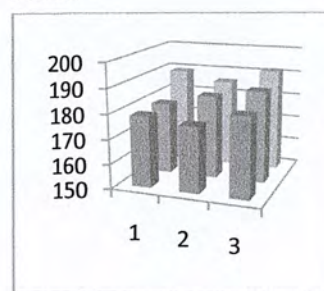


ที่เวลา 11 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 37.8°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $182.28889^{\circ}\text{C}$

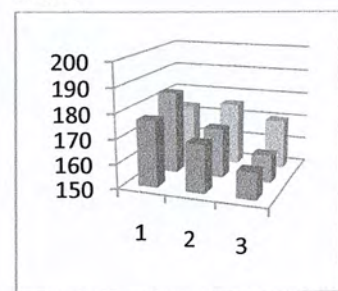
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

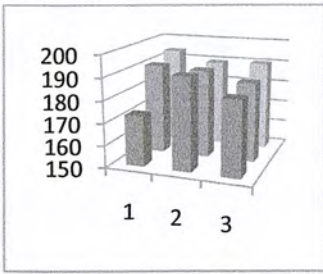


ชั้นที่ 3

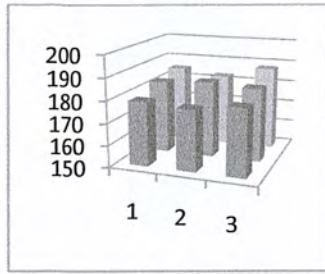


ที่เวลา 12 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 33.9°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $180.42222^{\circ}\text{C}$

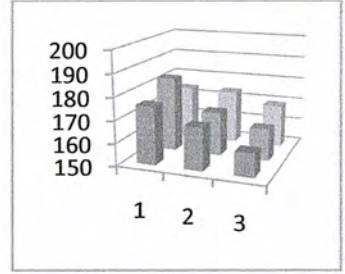
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

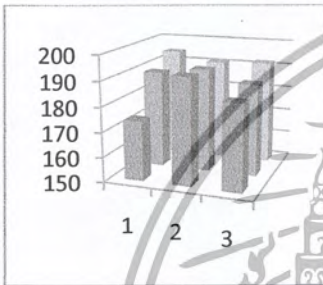


ชั้นที่ 3

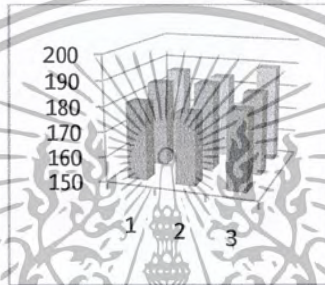


ที่เวลา 13 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 32.9°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 181.8037°C

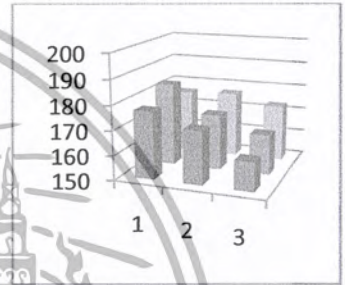
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

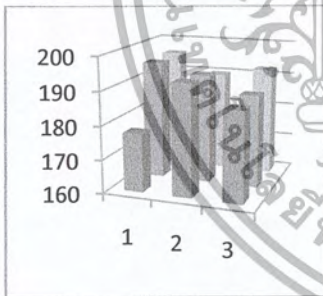


ชั้นที่ 3

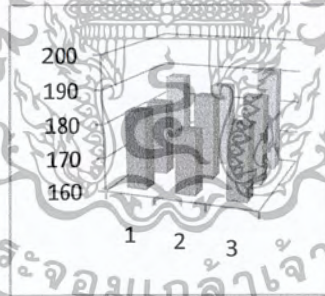


ที่เวลา 14 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 30.4°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $183.15556^{\circ}\text{C}$

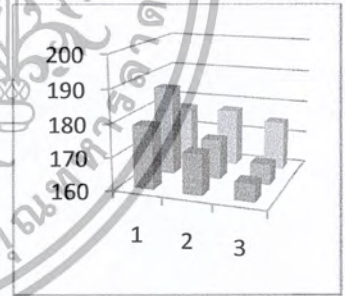
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

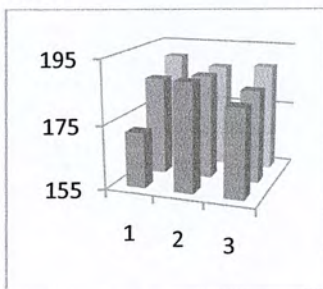


ชั้นที่ 3

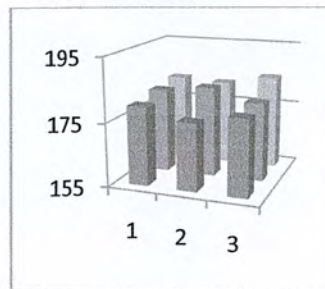


ที่เวลา 15 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 29.9°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 179.16667

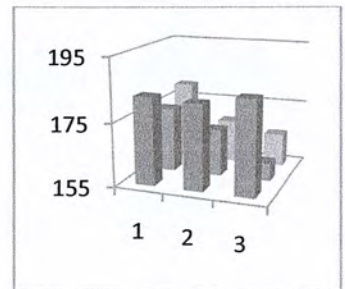
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2



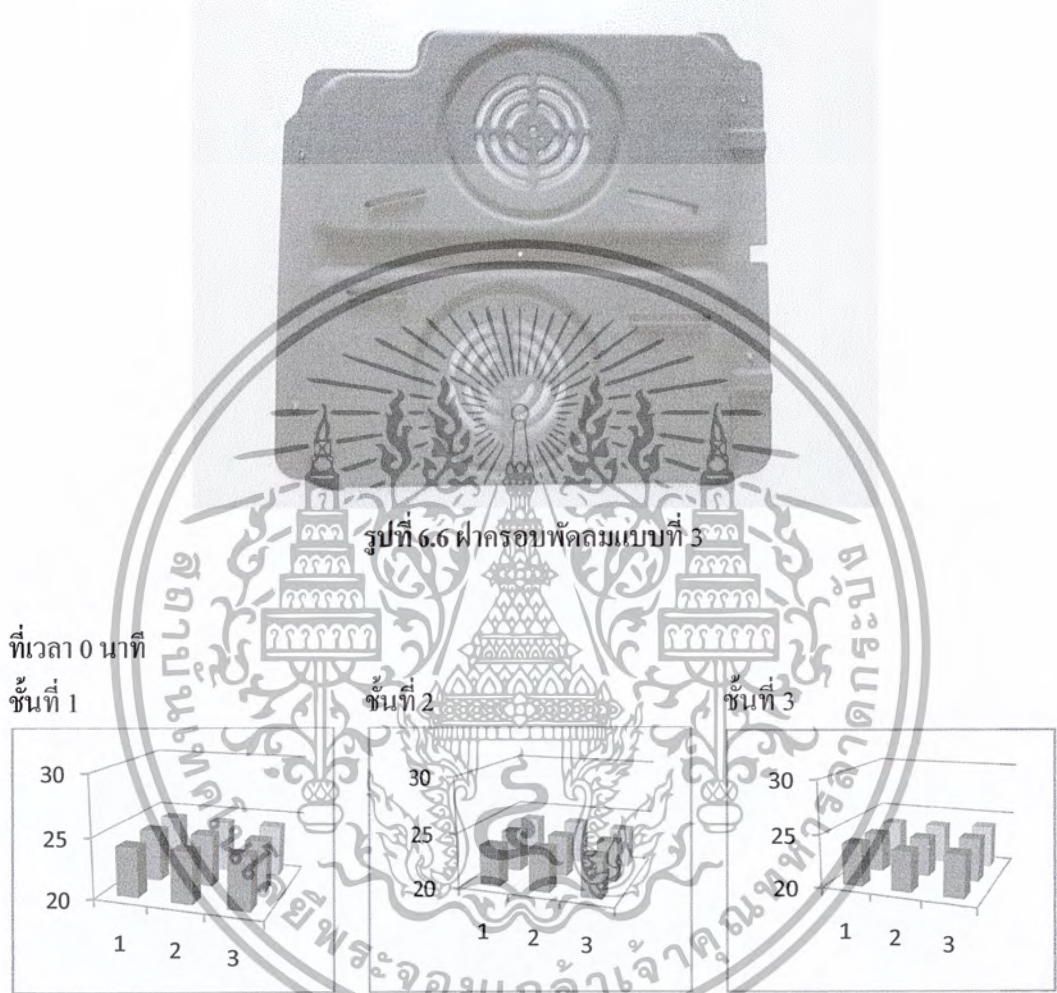
ชั้นที่ 3



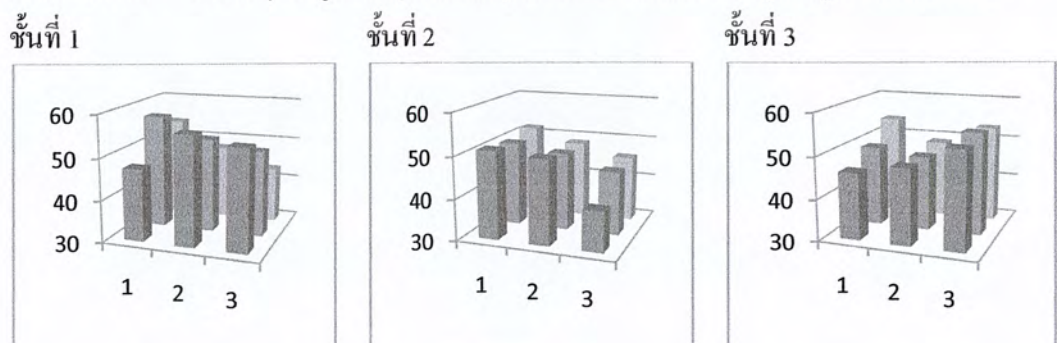
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการวัดการกระจายอุณหภูมิของฝากรอบพัสดมแบบดั้งเดิมทั้งหมด 15 นาทีพบว่าเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุดที่เวลา 6 นาทีโดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 74.1 องศาเซลเซียส

6.2.4 ฝากรอบพัสดมแบบที่ 3



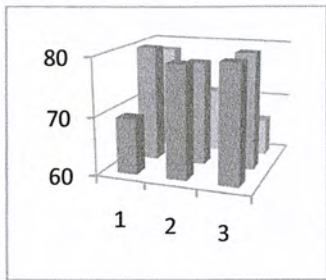
ที่เวลา 1 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 17.6°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $149.85556^{\circ}\text{C}$



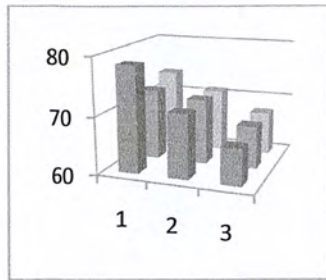
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา 2 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 23.5°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $73.181481^{\circ}\text{C}$

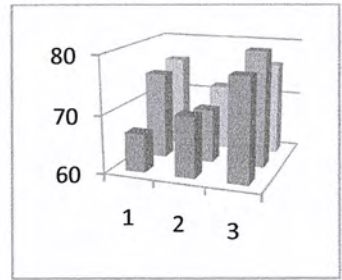
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

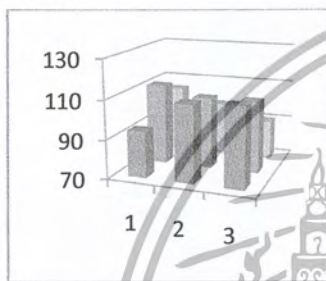


ชั้นที่ 3

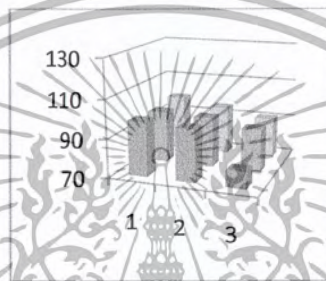


ที่เวลา 3 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 32.8°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $98.174074^{\circ}\text{C}$

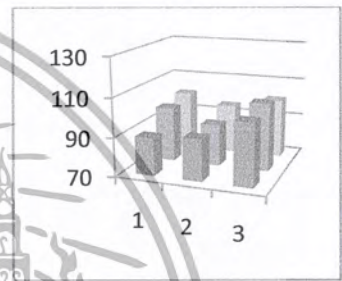
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

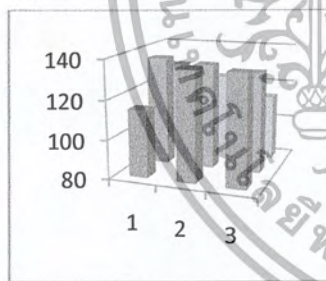


ชั้นที่ 3

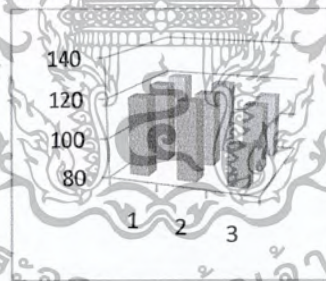


ที่เวลา 4 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด 36.2°C ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ 121.4037°C

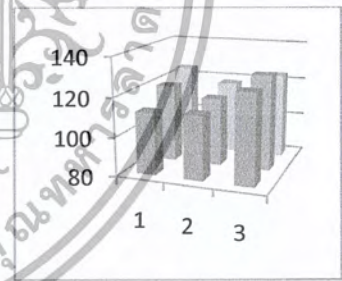
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

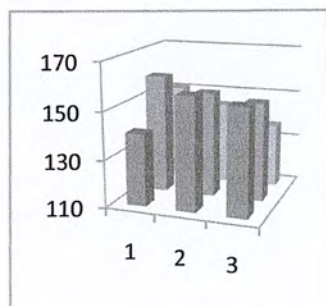


ชั้นที่ 3

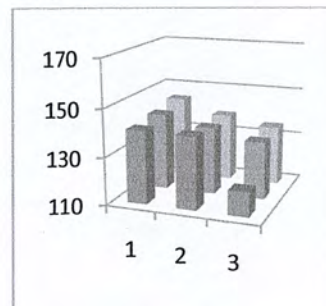


ที่เวลา 5 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 39.7 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 142.28889

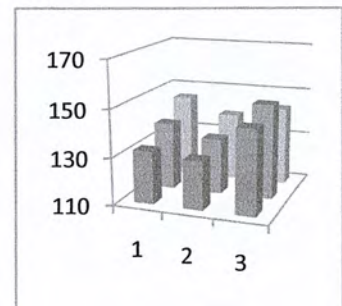
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

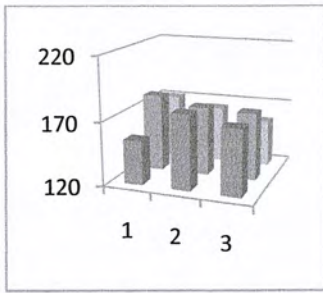


ชั้นที่ 3

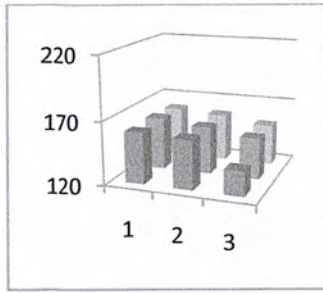


ที่เวลา 6 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 41.4 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 53.324691

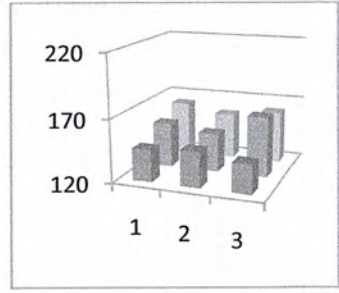
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

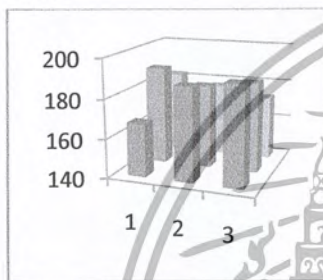


ชั้นที่ 3

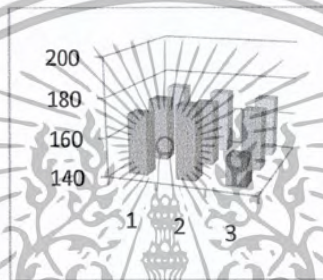


ที่เวลา 7 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 35.7 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 58.306173

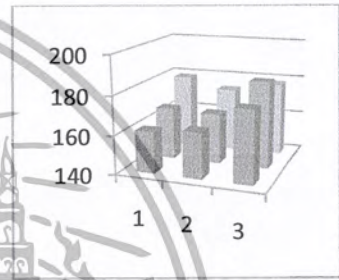
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

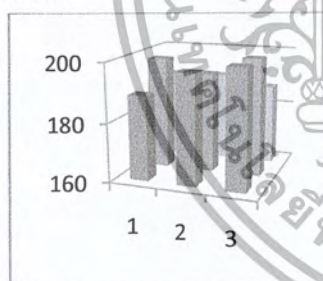


ชั้นที่ 3

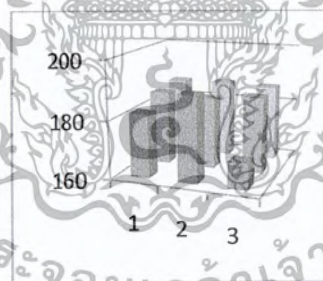


ที่เวลา 8 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 38.7 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 187.68148

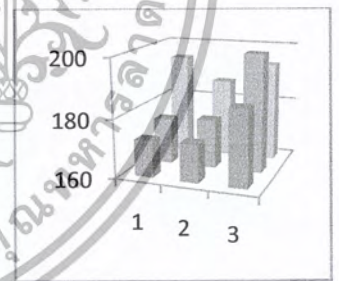
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

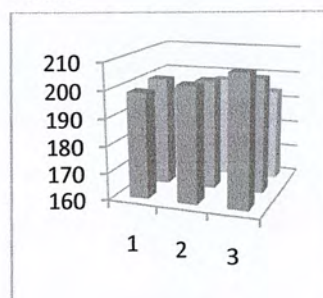


ชั้นที่ 3

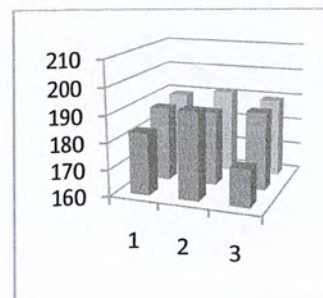


ที่เวลา 9 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 34.1 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 191.2963

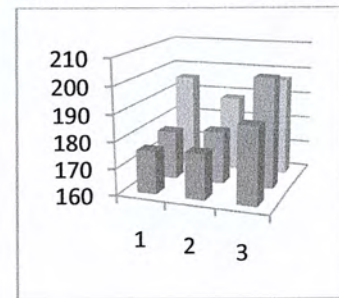
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2



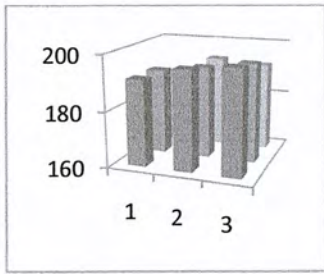
ชั้นที่ 3



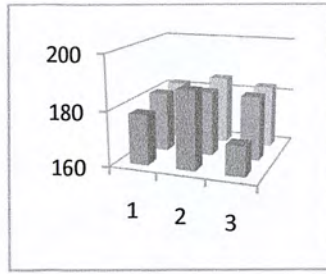
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา 10 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 26.4 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 184.55556

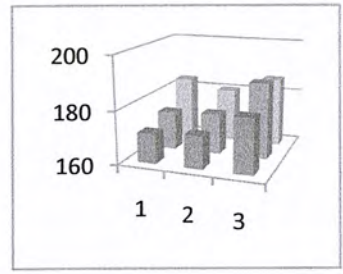
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

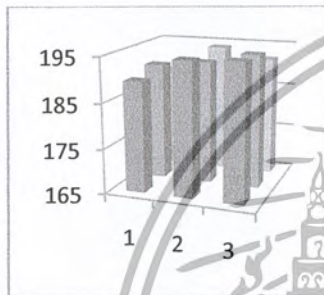


ชั้นที่ 3

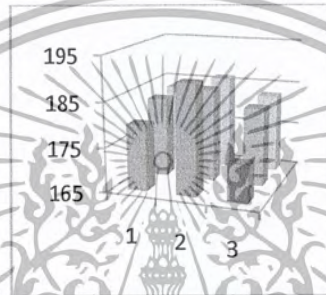


ที่เวลา 11 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 22.3 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 185.01852

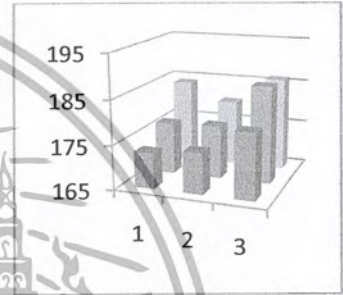
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

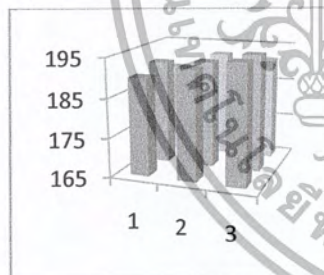


ชั้นที่ 3

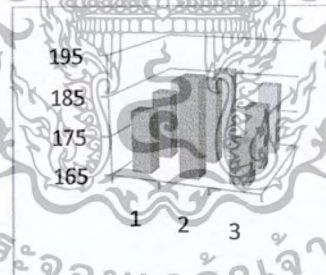


ที่เวลา 12 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 21.5 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 185.35185

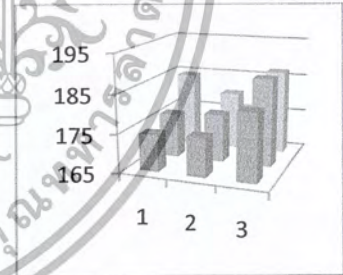
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

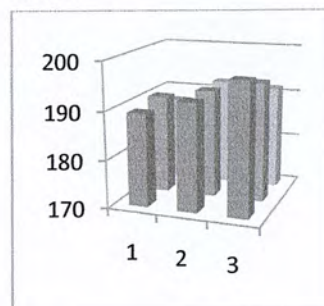


ชั้นที่ 3

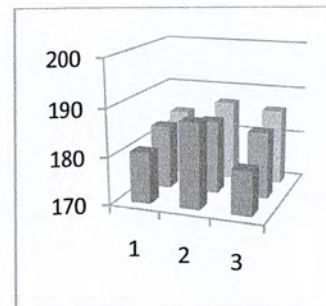


ที่เวลา 13 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 21.1 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 184.987654

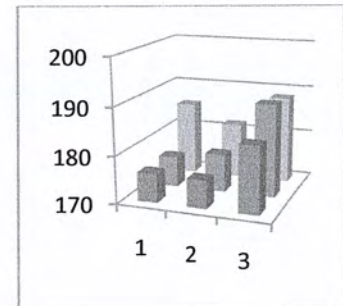
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

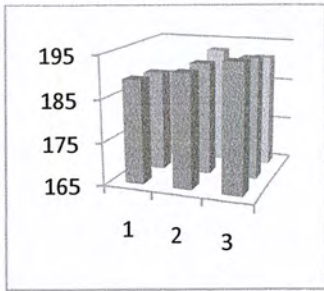


ชั้นที่ 3

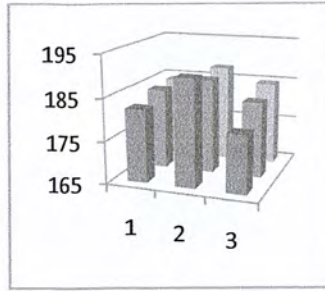


ที่เวลา 14 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 19.3 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 185.78519

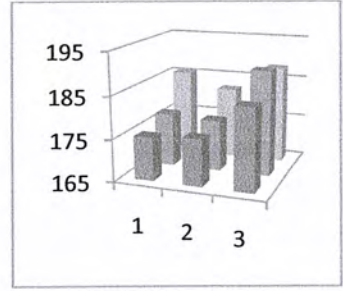
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

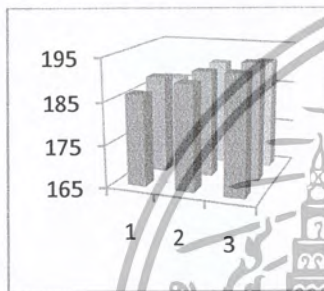


ชั้นที่ 3

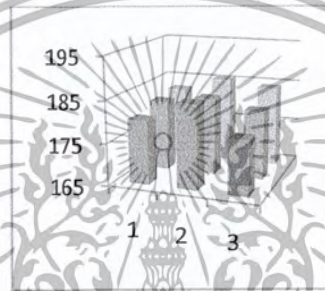


ที่เวลา 15 นาที ผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุด = 19.1 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ = 61.350617

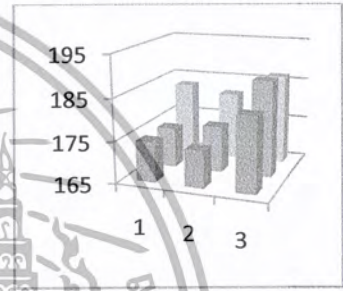
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2



ชั้นที่ 3

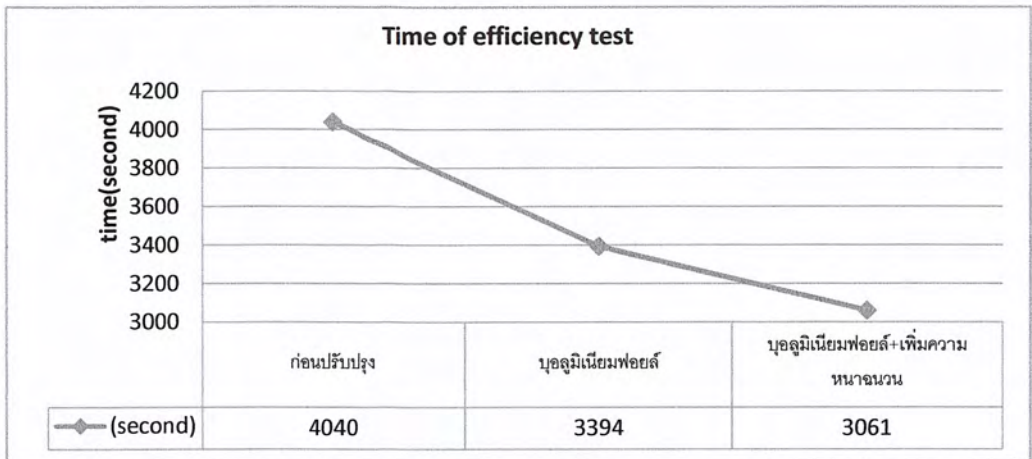


ผลจากการจัดการกระจายอุณหภูมิของฝ้ายรอบพัดลมแบบดั้งเดิมทั้งหมด 15 นาทีพบว่าเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุดที่เวลา 6 นาทีโดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 41.4 องศาเซลเซียส

6.3 ผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ (Thermal efficiency test)

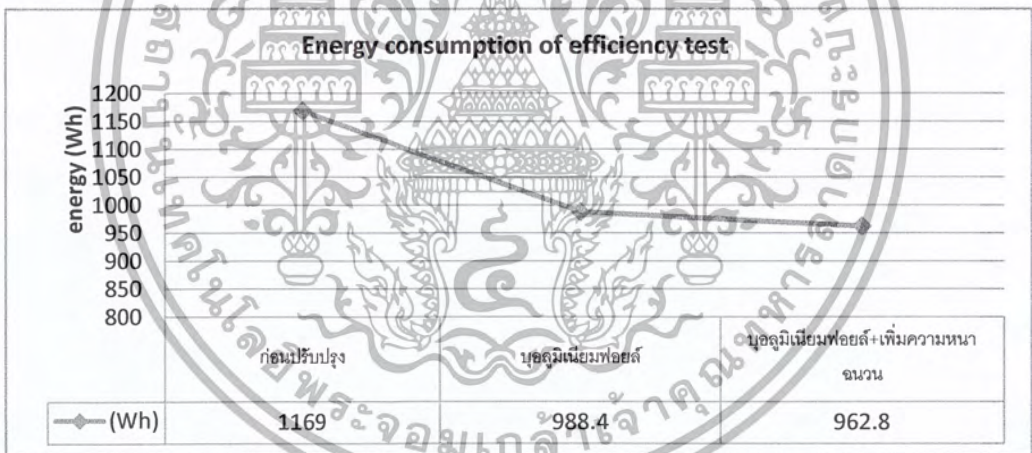
ในการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ (Thermal efficiency test) จะทำการสอบเตาอบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปลง เตาอบไฟฟ้าที่บุฟอยล์ภายในผนังเตาอบด้านใน และเตาอบไฟฟ้าที่บุฟอยล์ภายในผนังเตาอบด้านใน โดยเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50 มิลลิเมตร ซึ่งในการทดลองแต่ละแบบจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย

จากผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ (Thermal efficiency test) ทั้ง 3 แบบ สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า

จากกราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า พบว่า ก่อนปรับปรุงเตาอบไฟฟ้าใช้เวลา 4040 วินาที เมื่อบอคูมิเนียมฟอสเฟตใช้เวลา 3394 วินาที (ลดเวลาลงไปได้ 646 วินาทีหรือ 10 นาที 46 วินาที) และเมื่อเพิ่มความหนาจนเป็น 50 มิลลิเมตรใช้เวลา 3061 วินาที (ลดเวลาลงไปได้ 979 วินาทีหรือ 16 นาที 19 วินาที)



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า

จากกราฟแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า พบว่าก่อนปรับปรุงเตาอบไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้า 1169 Wh เมื่อบอคูมิเนียมฟอสเฟตใช้พลังงานไฟฟ้า 988.4 Wh (ลดพลังงานไฟฟ้าลงไปได้ 180.6 Wh) และเมื่อเพิ่มความหนาจนเป็น 50 มิลลิเมตรใช้พลังงานไฟฟ้า 962.8 Wh (ลดพลังงานไฟฟ้าลงไปได้ 206.2 Wh)

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้า โดยทำการทดสอบเตาอบไฟฟ้า 3 อย่างคือ ทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test of the empty oven) ทดสอบการกระจายความร้อนภายในเตาอบ (Heat distribution test) และทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบไฟฟ้า (Thermal efficiency test) และได้มีการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสูญเสียความร้อนของเตาอบไฟฟ้าซึ่งมีดังนี้คือ ผนังของเตาอบไฟฟ้า และ ฉนวนความร้อน โดยการคำนวณพบว่ามีค่าการแผ่รังสีความร้อนประมาณ 35% ของพลังงานความร้อนทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าอลูมิเนียมมีค่าการสะท้อนกลับของรังสีความร้อน (Reflectivity) ที่มากกว่าและค่าการดูดซึมความร้อน (Absorptivity) ที่น้อยกว่าสังกะสี จึงได้ทำการเลือกอลูมิเนียมฟอยล์เป็นกรณีศึกษาบุผิวผนังด้านในของเตาอบไฟฟ้าและอีกตัวแปรหนึ่งคือ ฉนวนความร้อน ซึ่งจากเดิมหนา 25mm เราได้ทำการเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50mm สำหรับการทดลองเรื่องการกระจายตัวของอุณหภูมิตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ฝาครอบพัดลมซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 4 แบบ ซึ่งทั้งหมดสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบเปล่า (Preheating test of the empty oven) โดยตั้งอุณหภูมิของเตาอบไว้ที่ 210 องศาเซลเซียส พบว่าการบุผนังด้วยอลูมิเนียมฟอยล์จะทำให้สามารถลดเวลาไปได้ 57 วินาทีและเมื่อทำการเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50 mm จะสามารถลดเวลาไปได้ 1 นาที 34 วินาที ซึ่งเป็นการลดการสูญเสียความร้อนทำให้ประสิทธิภาพของเตาอบเพิ่มขึ้น
2. การเปลี่ยนฝาครอบพัดลมจากแบบเดิมที่มากับเตาอบไฟฟ้าเป็นฝาครอบ แบบที่ 1,2 และ3 พบว่าฝาครอบแบบเดิมที่มาจากเตาอบไฟฟ้ามีการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำที่สุด โดยพิจารณาจากความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด
3. จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมีกว่ามากที่สุดก่อนเทอโมสแตทจะตัดประมาณนาที่ที่ 5-6 (โดยปกติเทอร์โมสแตทจะตัดประมาณนาที่ที่ 7)

4. ถ้าเตาอบไฟฟ้าที่มีผลของการแผ่รังสีความร้อนมาก ควรเลือกวัสดุที่มีค่าการดูดกลืนรังสีน้อยและมีการสะท้อนของรังสีมากเป็นผนังด้านในของเตาอบ เพราะจะช่วยลดการสูญเสียของความร้อนน้อยลง

5. การเพิ่มความหนาของเตาอบไฟฟ้าซึ่งจากเดิมหนา 25mm เป็น 50mm พบว่าความหนาของฉนวนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน

6. เมื่อทำการติดผนังเตาอบด้วยอลูมิเนียมฟอยล์และเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50mm สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้า 206.2 watt-hr เนื่องจากมีการสะท้อนของรังสีความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และมีค่าการดูดกลืนของรังสีลดน้อยลงจากเดิม

7.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้สามารถแสดงให้เห็นว่าการบ่มผนังด้วยอลูมิเนียมฟอยล์สามารถลดการสูญเสียพลังงานความร้อนของเตาอบไฟฟ้าได้ ดังนั้นควรใช้วัสดุที่มีค่าการดูดกลืนรังสีน้อยและมีค่าการสะท้อนกลับของรังสีสูงมาทำเป็นผนังด้านในของเตาอบไฟฟ้า สำหรับความหนาของฉนวนถ้าเราเพิ่มความหนาของฉนวนจะสามารถลดการสูญเสียความร้อนจากเตาอบไฟฟ้าได้แต่การเพิ่มความหนาฉนวนเป็น 2 เทา (50 มิลลิเมตร) มีผลต่อการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาอบน้อย ดังนั้นการที่จะตัดสินใจเพิ่มความหนาของฉนวนควรคำนึงถึงต้นทุนของเตาอบไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นด้วย และสุดท้ายควรจะมีการปรับตัวควบคุมการตัดต่อของเทอร์โมสแตทจากเดิมที่ใช้ระบบ on/off มาเป็น PID Controller เพื่อลดความแตกต่างของอุณหภูมิของขดลวดก่อนและหลังการตัดต่อของเทอร์โมสแตท ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้เพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์, “การถ่ายเทความร้อน”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปี พ.ศ. 2542
- [2] R.C. Erickson, “**Energy efficiency improvements in Residential gas and electric oven.**”, Proceedings of the International Conference on Energy Use Management, 24th-28th October, Tucson, AZ, USA, 1977, pp. 481-487.
- [3] Association of home appliance manufacturers American National Standard. “**household electric ranges.**”, ANSI/AHAM ER-1-1986, Chicago, IL, USA, 1986.
- [4] B.M. Shaughnessy and M. Newborough, “**Energy performance of a low-emissivity electrically heated oven.**”, School of Mechanical Engineering, Cranfield University, Bedford, MK34 0AL, UK.
- [5] Comite' Europe'en de Normalisation Electrotechnique (CENELEC), “**Methods to be used for measuring energy consumption of electric ovens for household use and for the purpose of informing consumers of it.**”, HD 376 S2, 1984.
- [6] D. Dixen and E. Junker, “**A new test method for measuring energy consumption in ovens.**” International Appliance Manufacturing 97, 1997, pp.
- [7] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman and Adrienns S. Lavine “**Introduction to heat transfer.**”, College of engineering University of Notre Dame, 2007.
- [8] Melike Sakin, Figen Kaymak-Ertekin and Coskan Ilicali, “**Convection and radiation combined surface heat transfer coefficient in baking ovens.**”, Ege University, Faculty of Engineering, Department of food Engineering, 35100 Bornova, Izmir, Turkey, 2009.
- [9] J. Xaman, J Arce, G. Alvarez and Y Chavez, “**Laminar and turbulent natural convection combined with surface thermal radiation in a square cavity with a glass wall**”, Centro

- Nacional de Investigacion y Desarrollo Tecnologico (CENIDET-DGEST-SEP), Prol. Av. Palmira S/N Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, CP 62490, Mexico, 2008.
- [10] Tribeni Das, R. Subramanian, A. Chakkaravarthi, Vasudeva Singh, S.Z. Ali and P.K. Bordoloi, “**Energy conservation in domestic rice cooking.**”, Department of Food Engineering, Central Food Technological Research Institute, Mysore 570 020, India, 2005.
- [11] James K. Carson, Jim Willix and Mike F. North, “**Measurements of heat transfer coefficients within convection ovens.**”, AgResearch MIRINZ Centre, Private Bag 3123, Hamilton, New Zealand, 2005.
- [12] วงศ์ วัชโรคมประเสริฐ และวิชัย ศิวะ โกศิษฐ, “การจำลองแบบการตอบสนองเชิงอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าขนาดเล็กโดยไม่ต้องใช้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร 10900
- [13] C.Scarisbrick, M. Newborough and S.D. Probert, “**Improving the Thermal Performances of Domestic Electric Ovens.**”, Department of Applied Energy, Cranfield Institute of Technology, Bedford MK43 0AL, UK, 1991.
- [14] SAMSUNG customer care center, “**คำแนะนำในการติดตั้งการใช้งานเตาอบแบบฝัง BF62CBST**”.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การคำนวณหาอัตราส่วนของการพาความร้อนและการแผ่รังสีที่เกิดจากขดลวดทำความร้อน

$$q = q_{conv} + q_{rad}$$

$$q = [hA(T_s - T_\infty)] + [\varepsilon AE_b(T_s) - \alpha AG]$$

$$q = [hA(T_s - T_\infty)] + [\varepsilon \sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4)]$$

$$q = [h(\pi DL)(T_s - T_\infty)] + [\varepsilon \sigma (\pi DL)(T_s^4 - T_{sur}^4)]$$

$$\frac{q}{L} = [h(\pi D)(T_s - T_\infty)] + [\varepsilon \sigma (\pi D)(T_s^4 - T_{sur}^4)] \text{ --- (1)}$$

กำหนด $T_s = 350^\circ\text{C}$, $T_\infty = 25^\circ\text{C}$, $T_{sur} = 25^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0.92$ (Teflon)

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ตารางคุณสมบัติของอากาศ

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709

จากตารางคุณสมบัติอากาศ ($T_\infty = 298\text{K}$)

$$\nu = 26.3 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}, \quad k = 26.3 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}, \quad Pr = 0.707$$

จากตารางคุณสมบัติอากาศ ($T_s = 623\text{K}$), $Pr = 0.687$

$$Re_D = \frac{VD}{\nu} = \frac{1.2 \times 0.00635}{15.89 \times 10^{-6}} = 508$$

ตารางค่าคงที่ของสมการ Zhukauskas สำหรับทรงกระบอกกลมในการไหลตัด

Re_D	C	M
1 – 40	0.75	0.4
400 – 1000	0.51	0.5
$10^3 - 2 \times 10^5$	0.26	0.6
$2 \times 10^5 - 10^6$	0.076	0.7

จากสมการของ Zhukauskas

$$\overline{Nu}_D = C Re_D^M Pr^n \left(\frac{Pr_\infty}{Pr_s} \right)^{1/4}$$

$$\overline{Nu}_D = 0.51 \times 508^{0.5} 0.707^{0.37} \left(\frac{0.707}{0.687} \right)^{1/4}$$

$$= 10.183$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D}$$

$$= 10.183 \times \frac{0.0263}{0.00635} = 42.177 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

แทนค่าในสมการที่ (1)

$$\frac{q}{L} = [(42.177)(6.35 \times 10^{-3})(350 - 25)] + [(0.92)(5.67 \times 10^{-8})(\pi)(6.35 \times 10^{-3})(623^4 - 298^4)]$$

$$\frac{q}{L} = 273.453 \text{ W/m} + 148.558 \text{ W/m} = 422.011 \text{ W/m}$$

คำนวณหาสัดส่วนความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสี

$$\% \text{ ความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสี} = \frac{148.558}{422.011} = 35.20\%$$

2. Standard test procedures of electric oven

The three procedures are outlined below. Common to each is the requirement of a consistent and accurate setting of the mean temperature rise of the air above its initial ambient temperature. The method employed is to calibrate the oven thermostat/dial setting against a thermocouple junction placed at the centre of the oven's usable volume.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The ambient temperature of the test room is specified as $25 \pm 5^\circ\text{C}$ for the US procedure, $20 \pm 5^\circ\text{C}$ for the current European procedure, and $23 \pm 2^\circ\text{C}$ for the proposed European procedure. The latter satisfies all of the standards and was, therefore, applied here.

2.1 ANSI-1986 test

This standard US test procedure provides a method for calculating an oven's thermal efficiency. The test load is a blackened cylindrical block (aluminium alloy type 6061, thermal mass, $m_{cp} = 3224 \text{ JK}^{-1}$, diameter 158 mm, height 71 mm, finished with an anodic black coating, or coating of equivalent radiative absorptivity). The block is placed in a cold oven and heated through a prescribed temperature rise whilst the oven energy consumption is recorded. This approach was found to give good repeatability and a derived thermal efficiency representative of annual oven energy consumption is the US even though its thermal conductivity is nearly three orders of magnitude greater than that of typical foods.

For both natural and forced convection modes the oven is set to give an air temperature rise of $181 \pm 3 \text{ K}$ and the test block is placed in the centre of the usable oven space. The block centroid temperature is monitored by a thermocouple. The time and energy required to heat the block through a temperature rise $\Delta T = 130 \text{ K}$ is recorded. The thermal efficiency is, therefore:

$$\eta = \frac{\text{Energy to heat block}}{\text{Energy supplied to oven}} = \frac{m_{cp}\Delta T}{E}$$

2.2 CENELEC-1984 test procedure

This current European test determines the hourly energy consumption of an empty oven when operating at steady-state. It is based on IEC 350 and is also implemented in British Standard 3999 Part 5

A thermocouple junction is positioned at the geometric centre of the oven's usable volume. The oven is set to give a mean temperature rise of $180 \pm 2 \text{ K}$ for the forced convection mode. After the oven has reached a steady-state condition, the energy consumption over a period of more than 2 h, comprising a whole number of complete on/off cycles, is measured. An hourly energy consumption value is calculated by dividing the energy consumption by this time.

In this work, steady-state conditions were reached within 2 h, so the average of the 2 hourly energy consumption values over the period 2-4 h after initial energisation was recorded.

To determine the energy needed to preheat an empty oven, the oven dial is first set to maximum. The time and energy required to heat the oven through a temperature rise of 180 K for the natural convection mode and 155 K for the forced convection mode are then recorded.

2.3 CENELEC-1998 test procedure

The initial development of this new procedure is described (for electric ovens) by Dixen and Junker. A brick having thermal properties and porosity similar to typical foods, was chosen as a food simulator. The transient weight loss and temperature response of the brick upon heating is similar to those of foods. The transient temperature response for successive heating of the brick in the same oven shows a high degree of repeatability: high weight loss corresponds to dry, overcooked, or burnt food; low or negligible weight loss corresponds to soggy or undercooked food. Further analysis and development of the test method is given in.

The test procedure involves heating a 23 mm × 114 mm × 64 mm brick from cold at each of the air temperature settings specified in Table. The brick must first be soaked in chilled water for a minimum of 8 h, so that its final temperature is $5 \pm 2^\circ\text{C}$. The brick temperatures are monitored at two locations near its centre. The cold saturated brick is placed in a cold oven and heated until both the temperature measured at these two locations have risen by 55 K. Once the brick has been removed, the oven operation is continued to allow it to reach a steady-state. The test stage concludes by recording the maximum and minimum temperatures of three oven cycles. The mean temperature rise for the oven setting is calculated from these measurements.

The heating time and energy consumption at a nominal temperature rise for the heating mode are calculated from the three sets of experimental data by linear regression. The energy consumption is only acceptable if the calculated standard deviation is within ± 50 Wh.

Temperature rise settings for the CENELEC-1998 test procedure

Test phase	Heating function		
	Natural convection	Forced convection	Hot-steam
1	140 ± 10 K	135 ± 10 K	135 ± 10 K
2	180 ± 10 K	155 ± 10 K	155 ± 10 K
3	220 ± 10 K	175 ± 10 K	175 ± 10 K

3.3 เตาอบไฟฟ้าที่บู่ตะถุณีนิยมพอยล์ภายในผนังเตาอบด้านในโดยเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50 มิลลิเมตร
การทดลองครั้งที่ 1

รายการ	ผลการทดสอบ		
อุณหภูมิห้อง	28.0		°C
อุณหภูมิของอากาศเริ่มต้น(T_1)	29.0		°C
อุณหภูมิของอากาศสุดท้าย($T_2=T_1+155$)	184.0		°C
เวลา	4	Min	46 sec
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	226.576		Wh

การทดลองครั้งที่ 2

รายการ	ผลการทดสอบ		
อุณหภูมิห้อง	27.2		°C
อุณหภูมิของอากาศเริ่มต้น(T_1)	27.3		°C
อุณหภูมิของอากาศสุดท้าย($T_2=T_1+155$)	182.3		°C
เวลา	4	Min	58 sec
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	231.026		Wh

การทดลองครั้งที่ 3

รายการ	ผลการทดสอบ		
อุณหภูมิห้อง	28.5		°C
อุณหภูมิของอากาศเริ่มต้น(T_1)	28.0		°C
อุณหภูมิของอากาศสุดท้าย($T_2=T_1+155$)	183.0		°C
เวลา	4	Min	50 sec
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	229.213		Wh

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

เวลาเฉลี่ย 4 min 51 sec

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 230.077 Wh

4. ผลการทดลองการทดสอบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ (Heat distribution test)

4.1 ฝาครอบแบบดั้งเดิม

เวลา	อุณหภูมิชั้นที่ 1			อุณหภูมิชั้นที่ 2			อุณหภูมิชั้นที่ 3		
0 min	25	24.9	24.9	24.6	24.6	24.4	24.3	24.6	24.9
	24.8	24.9	24.8	24.3	24.3	24.3	24.1	24.2	24.7
	24.9	24.9	25	24.3	24.5	24.4	24.4	24.4	24.6
1 min	53.6	45.6	41.2	48.5	43.8	44.4	43.9	42.8	44.5
	50.6	47.8	41.7	47.2	46.9	42.3	48.4	43	44
	47.2	51.2	42.9	48.2	44.2	39.8	47.6	44.6	40.1
2 min	86.9	74.5	65.9	77.9	70.4	69	71.6	68.4	70.5
	80.2	80.7	67.9	74.4	75.7	64.9	78.4	68.4	69.9
	77.3	86.8	71.6	74.9	70.5	60	76	71.1	62
3 min	111.8	101.7	90.2	105.2	96.3	94.1	95.1	93.8	95.2
	109.8	110.8	91.8	99.8	98.2	87.4	104.5	94.9	93.7
	101.4	116.6	98.1	101.4	95.5	82.2	101.7	96.5	84.7
4 min	138	126.8	112.7	127.6	120.5	116.3	116.8	115.3	116.6
	138.9	135.7	113.6	122.7	124.5	107	126.2	116.5	115.7
	126.8	141.7	121.1	122.9	118.3	102.1	124.6	119.3	106
5 min	160.4	150.5	134.1	151.4	141	134.3	136	137.2	136.9
	158.4	160.9	135.7	147.6	143.5	127.2	148.1	138	135.9
	147.9	164.9	141.9	144	137.5	121.7	146.4	140.2	125.9
6 min	174.6	167.1	152.2	166.2	161	152.4	151.6	155.1	153.5
	178.1	176.3	153.1	160	163.2	142.3	163.9	154.9	152.4
	164.7	181.5	157.6	159.9	156.7	135.1	161.4	157.7	142.1
7 min	186.3	180.2	1168.6	176.5	174	166.3	167.8	170.2	168.7
	188.3	186	165	171.3	173.4	156.6	178.4	169.7	166.2
	169.1	187.6	167.2	172.5	165.6	147.9	176.6	172.1	156
8 min	193.6	193.2	185.5	190.6	185.3	179.1	179.6	183.2	191.7
	197	199.9	179.8	182.6	186.7	176.2	193.3	184.8	179.9
	182.2	189.5	178.3	178.5	177.1	168.9	187.2	183.9	161.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	อุณหภูมิชั้นที่ 1			อุณหภูมิชั้นที่ 2			อุณหภูมิชั้นที่ 3		
9 min	195.1	194.5	189.7	188.3	187.2	185.3	182	187.6	188.2
	194.8	199	183.2	183.9	183.8	180.4	190	187.6	182.9
	178.4	194	181.3	179.8	176.9	173.2	186.3	181.6	169.2
10 min	188.5	188.8	185.4	180.4	181.5	179.2	175.5	179.9	179.1
	188	191.6	178.4	178.8	177.2	171.9	179.6	180.6	177
	174.4	186.2	176.5	174.8	171.3	164.8	178.4	176.8	169.7
11 min	191.5	190.6	187.8	185.3	184.3	182.9	181.7	185.5	186.2
	189.3	193.2	183.7	181.8	181.8	178.1	186.2	185.1	181.3
	177.6	186.2	179.3	179.1	175.7	171.6	182.9	182.4	170.6
12 min	185.8	187	183.8	179.2	181.5	176.9	175.1	179	177.6
	184.7	188.5	178.1	177.9	179.5	170	178.8	179.4	176.8
	174.4	185.9	176	175.3	172.9	165.1	177.6	176.7	170.8
13 min	189.3	189.6	187	183.5	183.8	180.3	178.6	182.2	183.2
	187.5	191.6	182	180.4	182.9	175.5	183.3	181.6	180.4
	176.1	187.3	179.2	179.1	176.1	168.4	181.5	180.9	172.3
14 min	184	185.3	184.1	179	179.9	178.3	175.6	177.3	177.8
	181.3	185.6	179	177.3	178	170.7	178.8	177.3	176.8
	173.6	183.1	176.5	174.1	173.1	164.9	177.5	175.8	171.5
15 min	188.4	189	186.2	182.7	184	178.6	179.9	181.1	181.1
	186.3	189.3	180.8	180.4	182.8	172.1	183.3	181.4	179.2
	176.1	186.5	178.6	178.3	177.9	166.4	181.3	180	174.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผ่าครอบเบมที่ 1

เวลา	อุณหภูมิชั้นที่ 1			อุณหภูมิชั้นที่ 2			อุณหภูมิชั้นที่ 3		
0 min	23.6	23.6	23.5	23.6	23.5	23.3	23.3	23.3	23.4
	23.5	23.6	23.5	23.3	23.2	23.1	23	23	23.3
	23.6	23.6	23.6	23.2	23.3	23.2	23	23.2	23.3
1 min	52.7	54.6	37.6	40.7	41.7	48.7	36	42.1	39.8
	49.7	50.1	41.3	42.1	44.5	37.7	38.5	42.5	39.8
	51.5	49.3	41.7	43.6	45.5	36.4	42.3	42.8	37.5
2 min	84.4	90.3	62.8	63.1	68.4	77.7	56.3	66.3	59.4
	80.1	81.9	67.5	66.8	72.1	59	56.4	66.8	59.5
	83.1	81.2	66.9	68.6	72.8	56.9	67.3	65.7	56.9
3 min	114.6	121.2	88.4	86	92.7	105.2	76.6	89.6	80.8
	112.3	112.7	93.9	90.9	97.4	85.5	78.6	90.9	78.2
	110.8	110.8	91.3	91.9	98.8	78.3	91	88.2	76.7
4 min	138.1	146.1	114.2	107.2	115.2	129.7	95	110.2	98.8
	134.9	147.3	119.1	112.4	120.1	108.8	96.2	110.4	94.8
	137.4	137.3	114.7	112.4	120.8	98.9	111.6	106.6	94.4
5 min	155.8	177.1	136	127.3	136.8	150.4	115.2	130.7	118.7
	156.5	163.7	140.4	132.6	140.9	127.5	115.8	131.1	111.3
	157.6	158.5	135.6	131.4	141.6	117.4	132.6	128.3	113.1
6 min	168.8	188	153.2	144.5	153.9	170.4	129.5	148.4	133.4
	171.4	178.6	156.3	149.2	158.1	144.8	131.3	148.5	127.1
	169	172.8	153.9	148	159.3	134.4	148.2	144.6	127.5
7 min	178.4	192.4	169.2	156.3	170.5	186.7	145.2	161.9	146.9
	181.9	185.8	171.4	164.1	172.6	160.4	146.2	161.7	139.6
	176.1	183.6	169.5	161.1	174.6	149.6	162.5	156.1	141.9
8 min	177.8	198.7	184.3	161.8	176.3	200	151.7	171	154.3
	176.8	193.5	185.2	167.1	179.6	178.1	152.4	169.9	152.1
	173.1	193.7	184.4	163.2	178.6	160.6	166.6	165.9	146.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	อุณหภูมิชั้นที่ 1			อุณหภูมิชั้นที่ 2			อุณหภูมิชั้นที่ 3		
9 min	173.7	191	181.4	159.7	173.1	183.2	151.2	167.8	156
	172.1	187.9	179	164.5	174.8	171.6	150.4	166.3	152.8
	170.4	186.5	175.9	161	173.8	160	164.2	164	149.1
10 min	171.6	186.6	179	160.5	173.4	182.1	150.7	167.5	155.2
	169.8	185	175.9	165.1	173.9	168.4	152.9	166.3	153.4
	168	182.2	173.8	161.1	171.9	157.9	163.7	163.2	150
11 min	169.8	185.1	178.4	160.6	173.2	179.4	152.4	167.5	158.1
	168.3	182.3	174.8	164.1	173.4	168.4	154	166.3	155.5
	166.8	180.8	172.3	160.8	171.9	160.3	163.3	164.2	150.9
12 min	173	186	180.4	165.3	175.7	185.3	156.1	170.6	160.6
	171.6	183.6	178	167.2	176.7	170.5	157.2	169.2	157.9
	169.8	182.9	176.5	164.6	174.8	162.9	166.6	167.3	154.5
13 min	170.2	181.1	177.2	162.2	172.3	176.5	154.5	167.3	160.1
	168.4	178.9	173.8	164.2	171.9	168	157.4	165.8	157.3
	166.7	178	171.5	160.8	170.2	162.4	162.4	163.6	152.4
14 min	170.9	183.1	180	164.6	175.7	181.9	157.2	170.1	162.4
	169.8	181.9	177.6	167.2	175.8	171.3	159.4	168.6	159.3
	167.1	182	175.4	164.4	174.4	165.6	166.3	165.9	154.1
15 min	172.3	181.9	178.3	164.5	174.7	180.2	158.1	169	162.8
	171.3	180	175.6	166.4	174	170	160.4	168.2	158.3
	170	180.4	174	164.9	172.5	164.2	165.3	165.9	154.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผ่ากรอบแบบที่ 2

เวลา	อุณหภูมิชั้นที่ 1			อุณหภูมิชั้นที่ 2			อุณหภูมิชั้นที่ 3		
0 min	26	26	25.8	25.8	25.7	25.1	25.6	25.6	25.7
	25.9	26	25.8	25.5	25.4	25.2	25.6	25.5	25.6
	25.6	25.8	25.9	25.4	25.4	25.1	25.6	25.6	25.4
1 min	71.1	54.9	54.3	65.8	55.4	58.5	54.4	46.3	50
	62.8	62.1	55	58.2	57.3	56.1	60.1	46	45.6
	61.3	67.8	56.1	55.2	52.8	52.4	53	46.6	42
2 min	95.8	78.2	75.9	94.7	77.8	81.5	74.9	66	67.4
	89.3	87.4	77.6	82.3	82.9	74.2	80.9	64.6	59.6
	90.8	93.8	76.5	76.2	73.4	70.8	72.1	62.4	56.6
3 min	125.6	108.3	102.3	118.6	104.6	108.5	101.7	87.7	90.6
	118.5	118.3	105.1	110	110.4	98.9	109.3	84.5	80.2
	116.1	125.3	103.8	101.6	97.5	94.3	87.5	83.8	74
4 min	152.8	133	126.7	145.3	127.9	130.7	122.8	107.6	109.2
	146.4	144.5	128.8	133	134	123.1	132.3	104.3	97.2
	141.2	148.5	125.3	123.7	113.7	118.4	118.9	104.8	90.9
5 min	178.9	155.5	147.7	166.9	150.2	153.7	135.7	132	130.9
	170.8	165.8	149.7	154.3	156.1	140.3	149.7	127.9	116.5
	159	172.9	146.3	145.8	142.6	135.1	138	124	111.1
6 min	198.9	174	166.3	183.6	167.6	167.9	156.1	150.7	145.1
	190.8	184.4	167.7	172.7	173.5	155.4	166.3	146.9	133.1
	175	187.5	164.6	163.8	161.4	153.1	155.1	141.2	124.8
7 min	201.9	184.2	182.6	191.5	179	184.1	166.4	168	158.7
	197.1	191	177.7	183.2	184.1	173.9	182.4	184.1	145.1
	170.3	196.2	176.2	176.3	170.7	166.6	168.8	154.3	136.6
8 min	208.1	194.7	197.8	194.6	187.1	206.7	175.2	176.9	161.7
	108.4	200.3	192.6	181.9	183.4	193.3	197	173.8	156.6
	196.8	207.2	191.1	178	178.3	184.3	182.7	169.2	148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	อุณหภูมิชั้นที่ 1			อุณหภูมิชั้นที่ 2			อุณหภูมิชั้นที่ 3		
9 min	206.2	196.8	200.2	193.9	187.9	200.9	174.5	177.1	170
	206.7	201	194.7	182.9	187.3	193.6	192	174	162.4
	191.3	203.1	192	182.9	178.6	186	182.5	173.4	153.5
10 min	198.1	190.5	192	183.6	183.7	187.6	171.5	173.7	168.4
	194.2	192.3	187.6	180.7	184.7	185.1	179.4	166.7	159.8
	174.7	194.7	184.4	179.2	177.2	178.6	174.7	167.9	155.6
11 min	198.6	190.8	193.3	189.3	185.8	191.6	173.5	175.8	170.1
	197.9	194.1	188.7	179.1	183.7	187.1	183.5	170.1	161.1
	179.8	196.2	187	178.7	176.5	182.2	176.9	169.6	160.8
12 min	194.3	189.6	190.4	185.3	182.9	187.9	174	173.8	169.1
	190.8	189.8	185.7	183.1	184.5	183.2	183.2	169.5	164
	172.9	191.7	183.7	179	177.5	180.3	175.9	168.9	160.4
13 min	194.6	191.1	191.9	185.9	184.4	189.6	176.2	176.8	173
	189.2	191.5	187	184.4	185.4	183.2	183.6	172.4	166.2
	174	192.6	184.4	180.8	178.6	181.3	177.3	171.6	161.7
14 min	195.9	189.9	192.3	187.6	185.6	191.5	177.3	177.5	175
	195.3	192.4	187.5	182.3	185.4	186.3	186.9	172	166.2
	177.4	193.1	186.8	183.2	178.8	182.2	179	172.3	165.5
15 min	190.6	187.8	188.7	182.7	181.9	184.6	175.5	174	170.8
	185.8	187.6	184	181.5	183.4	179.7	180.2	168.7	165.5
	172.3	188.8	182.6	179.7	176.2	179	175.4	169.8	160.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผ่าครอบแบบที่ 3

เวลา	อุณหภูมิชั้นที่ 1			อุณหภูมิชั้นที่ 2			อุณหภูมิชั้นที่ 3		
0 min	24.4	24.3	24.3	24	24	23.7	23.7	23.8	24.1
	24.3	24.3	24.2	23.8	23.8	23.7	23.7	23.7	24.1
	24.1	24.2	24.3	23.7	23.9	23.7	24	23.8	24
1 min	54	47.8	43.2	51.8	48.6	45.8	54.1	48.8	53.3
	57.2	52.5	50.3	50.2	48.6	45.2	49.2	47.8	54.5
	47.2	56.1	54	51.1	50.2	39.6	46	48.2	53.4
2 min	78.4	71.1	66.3	73.9	71	67.5	76.1	71.5	76.1
	81.7	77.9	80	72.3	71.3	67.4	75	69.3	80.2
	69.6	79.2	81.6	72.9	72.8	58.2	66.6	70.4	77.6
3 min	104.8	97.9	90.3	99.1	95.4	91.2	100.6	95.6	100.7
	111.5	106.6	106.8	96.9	96	92	98.2	91.5	104.8
	93.7	109.6	110.8	98.2	96.9	78.7	89.4	91.4	102.1
4 min	128.7	123.2	113.7	120.3	118	113	125	118	124
	136	133.9	131.4	120.8	117.7	113.7	119.9	114.9	128.8
	144.5	136.3	136.2	149.7	119.8	100	111.8	112.7	125.9
5 min	151	144.6	136.9	144.4	138.6	135.1	145.3	138.9	143.3
	160	154.1	151.4	142.2	138.1	134.1	138.3	133.5	149.9
	140.5	157.5	154.8	140.7	140.3	120.3	132.2	130.4	145.4
6 min	171.6	164.7	156.8	160	158	152.5	163	156.5	161.6
	181	174.4	173	161.4	157.6	152.4	155.4	150.7	167.6
	154.6	178.8	171.9	160.4	158.8	139.6	145.5	148.3	143.2
7 min	182.5	177.4	172.8	174	172.6	171.1	178.8	173.4	178.1
	190.1	182.5	186.1	172.5	172.3	170.8	166.8	166	184.5
	167.2	187.5	190.6	171	177.3	154.9	161.4	163.5	177.1
8 min	190.2	190.5	187.2	186.5	186.8	186.2	194.6	186.8	193.6
	198.2	193.9	199.9	185.4	184.5	186.1	175.5	176.5	199.9
	188.8	197.3	207.7	181.9	189.3	169	172.4	172.9	185.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	อุณหภูมิชั้นที่ 1			อุณหภูมิชั้นที่ 2			อุณหภูมิชั้นที่ 3		
9 min	191.7	197.8	194.1	189.2	191.7	189.5	195.7	188.5	197.1
	200.3	200.7	202.7	188	187.9	189.2	178.3	179.9	201.4
	198.9	202.6	208.1	183.2	192.7	174	176	177.1	188.7
10 min	186.9	193.3	191.8	181.9	185.2	182.9	183.7	180.3	186
	190.9	193	195.5	181.7	183.6	183.2	174.4	175.2	188.3
	191	195.6	197.3	178.3	188.3	170.9	171.2	172.1	180.5
11 min	187.9	194	191.8	183.4	186.3	182.8	184	180	186.2
	191.1	192.3	194.6	182.9	185.8	182.4	176.7	177.1	186.9
	189.5	194.6	195.4	179.7	189.6	173.3	173.1	174.3	179.8
12 min	188.1	192.2	191.4	183.4	187	183.7	184.6	180.1	186.9
	191.5	192.2	194.7	182.6	186.9	181	176.4	177.4	187.6
	189.8	192.7	196	180.7	190.1	175.5	174.5	175	182.5
13 min	187.5	192.3	191.5	184.2	187	186	185.6	181.7	188.5
	190.5	192.4	194.7	183.4	185.4	183.9	176.4	178	189.5
	189.3	192.3	197.2	180.7	187.8	179.2	176.1	175.9	184
14 min	186.2	192.7	191.5	184.3	188	184.7	185.6	182	188.1
	188.5	191.4	193.3	184.1	187.2	182.8	177.6	177	189.7
	189.2	191.4	194.5	182.2	190.1	178.6	175.2	176	184.3
15 min	185.6	190.3	191.2	182.4	185.7	184.3	182.9	181.3	186.6
	188.1	190.2	192.9	181.8	183.4	181.3	174.6	176	187.9
	186.4	189.6	192.6	180.2	184.9	178	174.6	173.8	182.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาอบ (Thermal efficiency test)

5.1 เตาอบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปลง

การทดลองครั้งที่ 1

รายการ	ผลการทดสอบ		
อุณหภูมิห้อง	25	°C	
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.817	kg	
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	24	°C	
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	154	°C	
เวลา	1 hr	7 Min	37 s
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	1177.71	Wh	
Efficiency (η)	11.24	%	

การทดลองครั้งที่ 2

รายการ	ผลการทดสอบ		
อุณหภูมิห้อง	25	°C	
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.808	kg	
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	24	°C	
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	154	°C	
เวลา	1 hr	6 Min	45 s
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	1153.18	Wh	
Efficiency (η)	11.45	%	

การทดลองครั้งที่ 3

รายการ	ผลการทดสอบ		
อุณหภูมิห้อง	25	°C	
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.808	kg	
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	24	°C	
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	154	°C	
เวลา	1 hr	7 Min	40 s
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	1175.35	Wh	
Efficiency (η)	11.23	%	

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

เวลาเฉลี่ย	1 hr 7 min 20 sec
พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย	1168.75 Wh
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	11.31 %

5.2 เตาอบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่บวมลูมิเนียมฟอยล์ภายในผนังเตาอบด้านใน

การทดลองครั้งที่ 1

รายการ	ผลการทดสอบ
อุณหภูมิห้อง	26 °C
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.817 kg
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	27.8 °C
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	157.8 °C
เวลา	57 Min 55 s
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	1008.65 Wh
Efficiency (η)	13.12 %

การทดลองครั้งที่ 2

รายการ	ผลการทดสอบ
อุณหภูมิห้อง	23.8 °C
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.808 kg
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	23.5 °C
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	153.5 °C
เวลา	54 Min 33 s
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	967.43 Wh
Efficiency (η)	13.64 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 3

รายการ	ผลการทดสอบ	
อุณหภูมิห้อง	25.5	° C
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.817	kg
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	26.5	° C
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	156.5	° C
เวลา	57 Min 14 s	
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	989.21	Wh
Efficiency (η)	13.38	%

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

เวลาเฉลี่ย	56 min 34 sec
พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย	988.43 Wh
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	13.38 %

5.3 เตาอบไฟฟ้าที่ขยับอยู่ในผนังเตาอบด้านในโดยเพิ่มความหนาของฉนวนเป็น 50 มิลลิเมตร

การทดลองครั้งที่ 1

รายการ	ผลการทดสอบ	
อุณหภูมิห้อง	24.9	° C
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.817	kg
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	23.9	° C
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	153.9	° C
เวลา	50 Min 46 s	
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	954.06	Wh
Efficiency (η)	13.87	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 2

รายการ	ผลการทดสอบ	
อุณหภูมิห้อง	24.3	°C
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.808	kg
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	27.1	°C
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	157.1	°C
เวลา	51 Min 17	s
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	966.82	Wh
Efficiency (η)	13.65	%

การทดลองครั้งที่ 3

รายการ	ผลการทดสอบ	
อุณหภูมิห้อง	23.7	°C
น้ำหนักอลูมิเนียมเริ่มต้น (w_1)	3.817	kg
อุณหภูมิของอลูมิเนียมเริ่มต้น (T_1)	27.0	°C
อุณหภูมิของอลูมิเนียมสุดท้าย ($T_2 = T_1 + 130$)	157.0	°C
เวลา	51 Min 1	s
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	967.56	Wh
Efficiency (η)	13.68	%

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

เวลาเฉลี่ย 51 min 1 sec

พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 962.81 Wh

ประสิทธิภาพเฉลี่ย 13.73 %