

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เคาอบแบบฟลูอิดไอซ์ เบด



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLUIDIZE BED FURNACE



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

เตาอบแบบฟลูอิด ไคซ์เบด

FLUIDIZE BED FURNACE

นักศึกษา

นายกีพงษ์ อ่องดี	รหัสประจำตัว	47015626
นางสาวณิชามล โรจนประดิษฐ์	รหัสประจำตัว	46010408
นายชนศักดิ์ พงษ์แสงสุริยะ	รหัสประจำตัว	47015640

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(ดร.ศกนธ์ ก่อองบุญจิต)

(ผศ.ดร.ธรรพสิทธิ์ ลิ้มนรรรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เตาอบแบบฟลูอิดไคซ์เบด
นักศึกษา	นายกวีพงษ์ อ่องคี นางสาวณิชามล โรจนประดิษฐ์ นายชนศักดิ์ พงษ์แสงสุริยะ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.สกนธ์ ค่องบุญจิต ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ถิ่นนรินทร์

บทคัดย่อ

โครงการปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบและจัดสร้างเตาอบแบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยอาศัยหลักการของฟลูอิดไคซ์เบดและการให้ความร้อนด้วยขดลวดฮีตเตอร์ร่วมกัน เตาที่ออกแบบและจัดสร้างมี 2 ส่วนคือ เตาอบหลัก และเตาอบรอง ซึ่งเตาอบแบบฟลูอิดไคซ์เบดมีขนาดกว้าง 476 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร สูง 1000 มิลลิเมตร เบ้าเบดภายในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 179 มิลลิเมตร ซึ่งบรรจุเม็ดทรายปริมาตร 5 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดทราย 1.5 มิลลิเมตร และให้กำเนิดความร้อนด้วยขดลวดฮีตเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 เฟส ต่อดวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ แบบดิจิทัลและชุดแมคเนติกคอนแทกเตอร์ ขนาด 20 แอมแปร์ ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และส่วนการป้องกันการสูญเสียความร้อนใช้คอนกรีตทนไฟ และแผ่นเซรามิคไฟเบอร์กันความร้อนนูนด้านนอกโดยรอบของผนังเตา คุณลักษณะของเตาดังนี้คือ อุณหภูมิไม่เกิน 850 องศาเซลเซียส ใช้ไฟฟ้าที่มีแรงเคลื่อน 220 โวลต์ คิดเป็นกำลังไฟฟ้า 6 กิโลวัตต์ และจากการทดสอบอัตราการให้ความร้อนโดยจะให้ความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 6.7 องศาเซลเซียสต่ออนาที สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบอบหลายกระบวนการ เช่น การอบแห้ง การทำอสเทมเปอร์ริง และมาร์เทมเปอร์ริง

Thesis Title	Fluidize bed furnace
Student	Mr. Kaweepong Ongdee Miss Nichamont Rosjanapradit Mr. Thanasak Pongsaengsuriya
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2006
Thesis Advisor	Dr. Sakon Klongboonjit Associate Prof. Dr. Sampasit Limnararat

ABSTRACT

This thesis is to design and build the fluidized bed furnace for heat treatment base on principle of fluidized bed and the furnace is heated by a heater coil . This furnace consists of two parts, 1) primary furnace and 2) secondary furnace. fluidized bed furnace are 476 mm. in wide, 400 mm. in length, 1000 mm. in height, and is 179 mm. for the inner diameter. This furnace contains 5 liters of sand and is heated by a three-phase heater coils which is 1.5 mm. in diameter ,these coils are connected in a series circuit. The furnace is controlled by a digital temperature control, using thermocouple type K, with a magnetic contactor with a tolerance 20 A. The heat loss of furnace is protected by castable referactories and ceramic fiber. The characteristics of these fluidized bed furnace are as following, 1) the maximum temperature is up to 850 °C, 2) the usage voltage is 220 V, 3) its power is 6 kW and 4) the average heat is 6.7 °C per minute. According to these characteristics, this fluidized bed furnace can apply in many heat treatment process such as hardening, austempering and martempering.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง เตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบดฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ
อาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.สรพรพิสิทธิ์ ลิ้มบรรณรัตน์ และ ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต
ขอขอบคุณ อาจารย์พลชัย โชติปรายนกุล ในการเสนอหัวข้อทำโครงการ
ขอขอบคุณ ศศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช และ ดร.อนิรุต ที่ให้ความสะดวกการทำงานในชื่อของภาควิชา
ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาที่ให้ความรู้และคำแนะนำในช่วงการทำโครงการ
ขอบคุณ คุณจตุรงค์ บริษัท ไทยเบอนเนอร์ ในความรู้ที่ให้สำหรับสร้างเตา
ขอบคุณ พี่อ้อด (หัวหน้าแก๊ง) ที่เฝ้าพวกเราทำงานจนดึกและพี่อู๋ที่ทำงานเป็นเพื่อน
ขอบคุณ เดย์ ที่ช่วยคิดก่อนสอบ นุและต้า ที่ช่วยสอนเทคนิคในการเขียนแบบ อาท สำหรับที่นอนและสิ่งอำนวยความสะดวก
สะดวก รวมทั้งเพื่อนๆ ห้อง Z รุ่นที่ 7 และห้องZN รุ่นที่ 5 ที่เป็นกำลังใจให้
ขอบคุณ ป้าแม่บ้านภาควิชาอุตสาหกรรม ที่คอยดูแลเรื่องความสะดวกเสมอ
ขอบคุณภาควิชาอุตสาหกรรม ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำโครงการและทำให้ทุกคนในกลุ่มโครงการ มีความรู้เพื่อ
นำไปใช้ในการทำงานต่อไป
ท้ายสุดขอขอบคุณครอบครัวของพวกเราที่ทำให้พวกเราในทุกวันนี้ นั้นเป็นเพราะความรักที่พวกท่านให้มา

นายกวีพงษ์ อ่องดี
นางสาวณิชามล โรจนประดิษฐ์
นายธนศักดิ์ พงษ์แสงสุริยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ

บทที่ 1	บทนำ	
	1.1 ความเป็นมา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ.....	2
	1.3 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน.....	3
	2.1.1 ฟลูอิดไดเซชัน.....	3
	2.1.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	4
	2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของฟลูอิดไดเซชัน.....	5
	2.1.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดเซชัน.....	6
	2.1.5 แผ่นกระจายของไหล.....	11
	2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	16
	2.2.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer).....	16
	2.2.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer).....	23
	2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer).....	24
	2.3 ทฤษฎีการออกแบบเตาอบฟลูอิดไดซ์เบด.....	26
	2.3.1 อุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าที่ต้องการ.....	26
	2.3.2 กำลังไฟฟ้า.....	26
	2.3.3 การเลือกชนิดขดลวดความร้อน.....	27
	2.3.4 การกำหนดภาระที่ผิว (Surface load).....	27
	2.3.5 ภาระที่ผนังเตา (Wall load).....	29
	2.3.6 การกำหนดขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.7 การออกแบบลวดชนิดชนิดเป็นคอยล์.....	29
2.3.8 หลักการเกี่ยวกับการวัดและการควบคุม.....	30
2.3.9 ระบบควบคุม.....	32
บทที่ 3 การดำเนินงาน	
3.1 การวางแผนการดำเนินงาน.....	34
3.2 คุณสมบัติของเตาที่ต้องการ.....	34
3.3 ทำการเลือกและกำหนดวัสดุที่นำมาใช้.....	34
3.3.1 คอนกรีตทนไฟ (Castable refractories).....	35
3.3.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple).....	36
3.3.3 ลวดฮีตเตอร์ (Heater coils).....	37
3.3.4 เซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic fiber).....	37
3.3.5 มานอมิเตอร์ (Manometer).....	38
3.3.6 เหล็ก (Checkered plates).....	38
3.3.7 แผ่นกระจายของไหล (Distributor plate).....	39
3.3.8 โบลเวอร์ (Blower).....	39
3.3 การจัดสร้างเตาอบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม.....	40
3.3.1 จัดสร้างโครงเตาหลักและรอง.....	40
3.3.2 สร้างห้องอบหลักและห้องอบรอง.....	40
3.3.3 การใส่ลวดฮีตเตอร์.....	41
3.3.4 ติดตั้งแผ่นกระจายลม (Distributor plate) และชุดอุปกรณ์โบลเวอร์ (Blower).....	41
3.3.5 จัดสร้างและติดตั้งฝาครอบตัวเตาอบ.....	42
3.3.6 ติดชุดฉนวนกันความร้อนและหุ้มตัวเตา.....	42
3.3.7 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุม.....	43
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการจัดสร้างเตาอบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม.....	46
4.2 ผลการคำนวณการจัดสร้างเตาอบ.....	47
4.2.1 การคำนวณทฤษฎีฟลูอิดไดนามิกส์.....	47
4.2.2 การคำนวณทฤษฎีการจัดสร้างเตาอบ.....	48
4.2.3 การคำนวณความร้อนโดยใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเดาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	52
4.3.1 ชื่อการทดลอง.....	52
4.3.2 วัตถุประสงค์การทดลอง.....	52
4.3.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	52
4.3.4 วิธีทำการทดลอง.....	52
4.3.5 ผลการทดลอง.....	52
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพพลนวนของเดาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	63
4.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	64
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	65
5.2 วิจารณ์ผลการดำเนินงาน.....	65
5.3 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ.....	65
รายการอ้างอิง	66
ภาคผนวก	ผ1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ.....	22
ตารางที่ 2.2 ค่าตัวอย่างของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h).....	24
ตารางที่ 2.2 ค่าตัวอย่างของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) (ต่อ).....	25
ตารางที่ 2.3 ระบายห่างมากที่สุดระหว่างช่วงของลวดเบนที่แนะนำให้ใช้.....	28
ตารางที่ 3.1 มาตรฐานคอนกรีตทนไฟ.....	35
ตารางที่ 3.2 สภาพการนำความร้อน.....	38
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางเคมี (เป็นเปอร์เซ็นต์).....	38
ตารางที่ 4.1ก ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C (ครั้งที่ 1)	53
ตารางที่ 4.1ข ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C (ครั้งที่ 2)	54
ตารางที่ 4.1ค ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C (ครั้งที่ 3)	55
ตารางที่ 4.1ง ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C (เฉลี่ย)	56
ตารางที่ 4.2ก ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C (ครั้งที่ 1)	57
ตารางที่ 4.2ข ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C (ครั้งที่ 2)	58
ตารางที่ 4.2ค ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C (ครั้งที่ 3)	59
ตารางที่ 4.2ง ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C (เฉลี่ย)	60
ตารางที่ 5.1 เวลาที่แมกเนติกคอนแทคเตอร์ทำงาน ณ ช่วงเวลาต่างๆที่ อุณหภูมิ 850 °C.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงระดับของเบดในหอททดลอง.....	4
รูปที่ 2.2ก เบดสม่ำเสมอ.....	5
รูปที่ 2.2ข เบดวุ่นวาย.....	5
รูปที่ 2.3 ความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง.....	7
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด.....	9
รูปที่ 2.5 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู.....	11
รูปที่ 2.6 ลักษณะของตัวกระจายแบบตะแกรง.....	12
รูปที่ 2.7 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นอัด.....	12
รูปที่ 2.8 ลักษณะของตัวกระจายแบบแซนวิช.....	13
รูปที่ 2.9 ลักษณะของตัวกระจายแบบท่อ.....	13
รูปที่ 2.10 ลักษณะตัวกระจายแบบมีหมวก.....	14
รูปที่ 2.11 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นกรอง.....	14
รูปที่ 2.12 ลักษณะของตัวกระจายแบบผสม.....	14
รูปที่ 2.13 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์.....	15
รูปที่ 2.14 คุณภาพของฟลูอิด ไคเซชันที่เกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน.....	15
รูปที่ 2.15 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ.....	17
รูปที่ 2.16 วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม.....	20
รูปที่ 2.17 กรณีที่มีผนังหลายชั้น.....	21
รูปที่ 2.18 อิทธิพลต่อการนำความร้อนของสาร.....	21
รูปที่ 2.19 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการพาความร้อน.....	24
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตร-กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิ ของเตาที่มีฉนวนกันความร้อน.....	27
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในเตา และ การกำหนดภาระที่ผิว.....	28
รูปที่ 2.22 ระบบการวัดปริมาณต่างๆของเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม.....	31
รูปที่ 2.23 ระบบการควบคุมวงจรเปิด.....	32
รูปที่ 2.24 ระบบการควบคุมวงจรปิด.....	33
รูปที่ 3.1 คอนกรีตทนไฟแบบแห้งที่ทนความร้อนอุณหภูมิสูงสุด 1300° C.....	35
รูปที่ 3.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple).....	36
รูปที่ 3.3 ลวดฮีตเตอร์ (Heater coil).....	37
รูปที่ 3.4 เซรามิคไฟเบอร์ (Ceramic fiber).....	37
รูปที่ 3.5 แผ่นกระจายวงกลม.....	39
รูปที่ 3.6 โบลเวอร์ (Blower).....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7ก โครงภายนอกห้องอบหลัก.....	40
รูปที่ 3.7ข โครงภายนอกห้องอบรอง.....	40
รูปที่ 3.8ก ห้องอบหลัก.....	40
รูปที่ 3.8ข ห้องอบรอง.....	40
รูปที่ 3.9 แบบการแกะร่องสำหรับใส่ขดลวดฮีตเตอร์ในห้องอบหลัก.....	41
รูปที่ 3.10 ติดตั้งแผ่นกระจายลม.....	41
รูปที่ 3.11 ติดตั้งท่อลม.....	42
รูปที่ 3.12 ฝาครอบและการติดตั้งฝาครอบ.....	42
รูปที่ 3.13 ติดตั้งชุดฉนวนกันความร้อน.....	43
รูปที่ 3.14 หุ้มแผ่นเหล็กรอบตัวเตา.....	43
รูปที่ 3.15 ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล.....	44
รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	44
รูปที่ 3.17 ชุดแมคเนติกคอนแทคเตอร์.....	44
รูปที่ 3.18 แสดงวงจรการควบคุมการทำงานของเตาอบแบบฟลูอิดไคเซเบด.....	45
รูปที่ 4.1 เตาอบแบบฟลูอิดไคเซเบดและตู้ควบคุม.....	46
รูปที่ 4.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C.....	61
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C.....	62

บทที่ 1

บทนำ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและจัดสร้างเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยอาศัยหลักการของฟลูอิดไดซ์เบดและการให้ความร้อนด้วยขดลวดความต้านทานรวมกัน สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบชุบหลายกระบวนการเช่น การชุบแข็ง การทำออสเทมเปอร์ริง และมาร์เทมเปอร์ริง

โดยบทนำที่จะได้กล่าว มีเนื้อหาความเป็นมา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของปฏิญานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ระบุไว้ในหัวข้อถัดไป

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีการขยายตัวอย่างกว้างขวาง มีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาใช้ขยายงานด้านการผลิต มีการผลิตสินค้าหลายลักษณะที่นำเอาวัตถุดิบหลายชนิดเข้ามาใช้ โลหะชนิดต่างๆก็เป็นวัตถุดิบที่มีบทบาทสำคัญในงานอุตสาหกรรม การนำโลหะมาใช้งานจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติในหลายๆด้าน เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว ความเปราะ ความยืดหยุ่น เป็นต้น โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความแข็งนั้น สามารถลดหรือเพิ่มความคงทนของชิ้นงานตามความต้องการได้ กรรมวิธีในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งของโลหะ จึงนิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น การอบชุบด้วยความร้อน อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการอบชุบ คือ เตาอบ ซึ่งเตาอบโลหะที่นิยมพบมาก คือ เตาอบไฟฟ้า ซึ่งมีหลักการในการทำงานคือ ถ่ายเทความร้อนจากขดลวดไปยังชิ้นงานโดยตรง ซึ่งมีอากาศเป็นตัวกลาง แต่เนื่องจากอากาศไม่สามารถกักเก็บปริมาณความร้อนไว้ได้ ทำให้เตาอบไฟฟ้าเกิดการสูญเสียพลังงานในปริมาณมากไม่สามารถอบชิ้นงานแบบต่อเนื่องได้ อีกทั้งการโปรแกรมช่วงอุณหภูมิมีความยุ่งยาก หลักการออกแบบเตาอบฟลูอิดไดซ์เบด จึงได้ถูกจัดทำขึ้น จากเหตุผลในด้านพลังงานและการทำงาน

เตาอบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidize Bed Furnace) เป็นเตาที่ใช้กำลังทางไฟฟ้าเป็นต้นกำเนิดความร้อน โดยผ่านขดลวดความต้านทาน ภายในบรรจุเม็ดของแข็งที่เรียกว่า เบน (ในที่นี้คือเม็ดทราย) รองรับด้วยแผ่นตะแกรง จากนั้นปล่อยให้อากาศไหลผ่านจากด้านล่างของเตา ทำให้เม็ดของของแข็งลอยตัวขึ้นอย่างอิสระ กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการฟลูอิดไดเซชัน (Fluidization) กระบวนการที่เกิดขึ้นอีกอย่างหนึ่ง คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมี 3 แบบคือ 1.การนำความร้อน (Heat Conduction) 2.การพาความร้อน (Heat Convection) 3.การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) โดยเตาอบฟลูอิดไดซ์เบดนั้น มีการถ่ายเทความร้อนเพียง 2 แบบ อธิบายได้ดังนี้

- 1) การนำความร้อน (Heat Conduction) ตัวกำเนิดความร้อนหรือลวดต้านทานจะถูกฝังไว้กับผนังเตา พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังชิ้นงาน โดยการนำความร้อน ซึ่งอาศัยเบดเป็นตัวกลางในการถ่ายเท
- 2) การพาความร้อน (Heat Convection) ความร้อนจะถูกพาไปยังชิ้นงานโดยตัวกลางอันได้แก่ อากาศและเบดภายในเตา และเนื่องจากอากาศในเตามีปริมาณการถ่ายเทมาก ความร้อนที่ถูกถ่ายเทกับชิ้นงานจึงสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1) เพื่อศึกษาและออกแบบการสร้างเตาอบแบบ ฟลูอิด ไคซ์เบด
- 2) สามารถสร้างเตาอบเพื่อนำมาใช้อบชิ้นงาน ณ อุณหภูมิที่ต้องการก่อนการชุบแข็ง
- 3) จัดสร้างเตาอบ ฟลูอิด ไคซ์เบด ที่ให้อุณหภูมิในการอบไม่เกิน 850 °C
- 4) นำอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในของเตาอบแบบ ฟลูอิด ไคซ์เบด

1.3 ขอบเขตการทำโครงการ

ออกแบบและจัดสร้างเตาอบโลหะแบบฟลูอิด ไคซ์เบด โดยนำเอากระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบ ฟลูอิด ไคซ์เบดมาทำการศึกษาและประยุกต์เข้ากับรูปแบบของเตาอบ จัดสร้างเตาอบแบบฟลูอิด ไคซ์เบด ความกว้าง 476 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร สูง 1000 มิลลิเมตร ติดตั้งชุดขนวนกันความร้อนชนิดเซรามิกไฟเบอร์ ห้อยอบชิ้นรูปจาก วัสดุคอนกรีตทนความร้อน เส้นผ่านศูนย์กลางหน้า 179 มิลลิเมตร บรรจุชุดควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 24 ชุด ไฟฟ้า 3 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 6 กิโลวัตต์ อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 850 °C ควบคุม อุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ใช้อุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในของเตา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ชุดเตาอบแบบ ฟลูอิด ไคซ์เบด ช่วยในการเรียนการสอน และทำการทดลอง
- 2) สามารถนำเตาอบแบบ ฟลูอิด ไคซ์เบด มาใช้กับงานอบชิ้นงานอย่างต่อเนื่องได้
- 3) ได้รับความรู้เกี่ยวกับการทำงานและวิธีการสร้างเตาอบแบบ ฟลูอิด ไคซ์เบด
- 4) ได้รับความรู้ด้านการออกแบบวงจรควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 12 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การจะออกแบบและจัดสร้างเตาอบแบบฟลูอิด ไคเซกเบด จำเป็นจะต้องศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานอย่างถูกวิธีและตรงตามความต้องการของผู้จัดทำ นำมาซึ่งความสำเร็จในการจัดสร้างเตาอบแบบฟลูอิด ไคเซกเบด ที่พร้อมสำหรับการใช้งาน

2.1 ทฤษฎีฟลูอิดไคเซชัน

มีรายละเอียดแยกเป็นส่วนๆดังนี้

2.1.1 ฟลูอิดไคเซชัน

ฟลูอิดไคเซชันเป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เนื่องจากเม็ดหรือชิ้นของแข็งที่ถูกลอยไว้บนตะแกรง ณ ห้องทดลองทรงกระบอก โดยให้ของไหลปลิวผ่าน ของไหลมีสองประเภทคือ ก๊าซและของเหลว เคลื่อนจากด้านล่างของห้องทดลองสู่ด้านบนของห้องทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็ง ขยับตัว และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน และมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เราจึงเรียกของแข็งในสถานะนี้ว่า ฟลูอิดไคเซชัน กระบวนการฟลูอิดไคเซชันแบ่งตามลักษณะการเกิดได้สองแบบ คือ

2.1.2.1 ฟลูอิดไคเซชันสองสถานะ (Two-phase Fluidization)

ฟลูอิดไคเซชันสองสถานะหมายความว่า ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานนั้นประกอบด้วยสถานะสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไคเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท

- 1) ก๊าซฟลูอิดไคเซชัน (Gas Fluidization)
- 2) ฟลูอิดไคเซชันของเหลว (Liquid Fluidization)

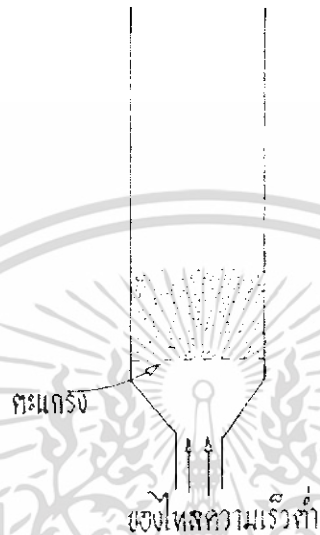
2.1.2.2 ฟลูอิดไคเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization)

ฟลูอิดไคเซชันสามสถานะหมายความว่า ภายในหอทดลองหรือเบดจะประกอบไปด้วยสถานะสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สำหรับฟลูอิดไคเซชันสามสถานะนั้นเป็นขบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไคเซชันสองสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 3 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ลักษณะของฟลูอิดไลซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลองจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอทดลองดังรูปที่ 2.1

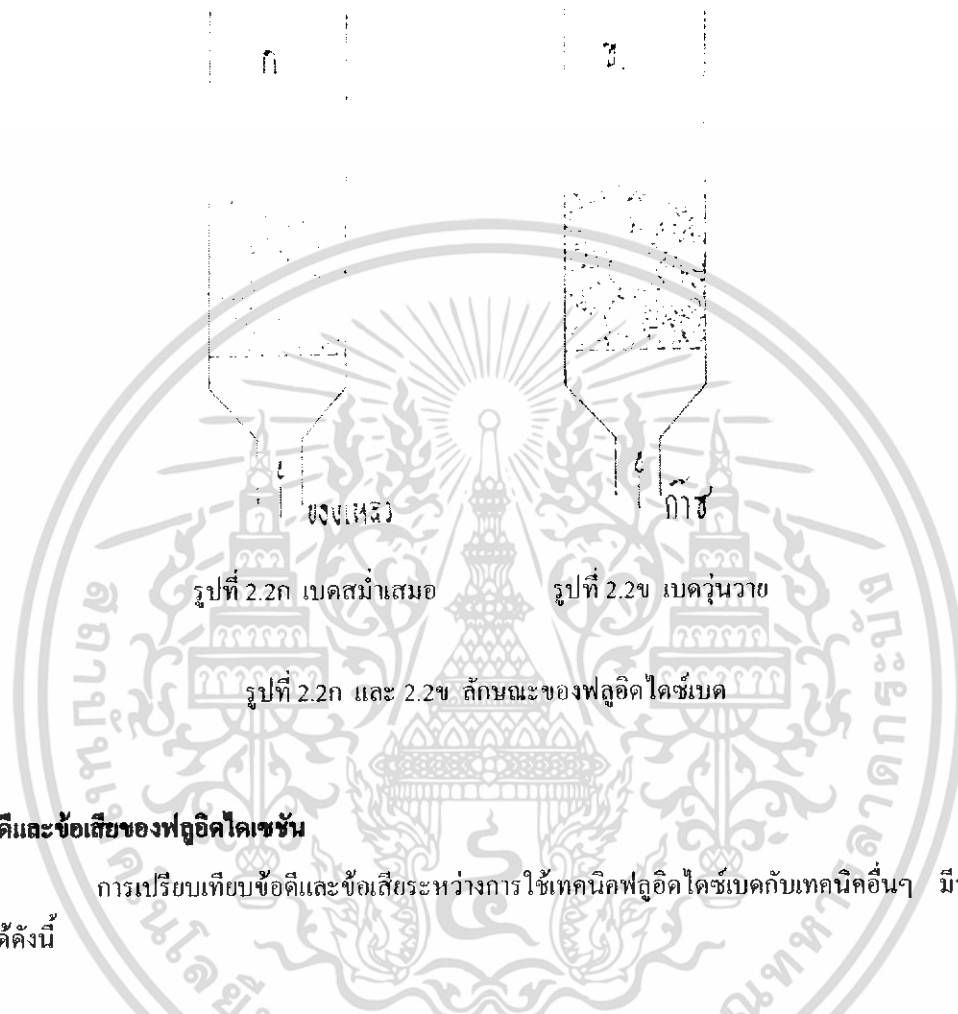


รูปที่ 2.1 แสดงระดับของเบดในหอทดลอง

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอทดลองเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้าๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เราค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไลเซชัน (Incipiently fluidized bed) หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของไหล เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไลซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอทดลองอยู่แล้ว เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไลซ์เบดเจือจาง (Diluted-phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็หลุดลอยออกจากหอทดลองไป ซึ่งในลักษณะนี้เราใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังที่หนึ่งได้ ถ้าใช้อากาศ ก็เป็นการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatics transport) ตัวอย่างเช่น การขนส่งเม็ดแร่

ฟลูอิดไลซ์เบดที่ไหลเป็นของเหลว การขยายตัวเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Particulated bed of Homogeneously bed or Smoothly fluidized bed or Liquid fluidized bed) ดังรูปที่ 2.2 ก. ฟลูอิดไลซ์เบดที่ไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีก

ส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเองขึ้นมาถึงผิวหน้าของเบคและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปด้วย ภายในเบคจะเห็นว่าการเคลื่อนของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างสุ่มวนวาย เบคชนิดนี้เรียกว่า ฟลูอิด ไคซ์เบค วนวายหรือเรียกสั้นๆ ว่า เบค วนวาย ดังรูป 2.2๗.



2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของฟลูอิด ไคซ์เบค

การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบคกับเทคนิคอื่นๆ มีรายละเอียดพอสรุปได้ดังนี้

ข้อดี

- 1) เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบคคงที่ตลอดซึ่งต่างจากเบคนิ่งหรือเบคบรรจุ อุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบค
- 2) มีการเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
- 3) จากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบค และไหลเติมเข้าไปในเบคได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
- 4) การที่เม็ดของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบค เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของไหลอันเดียวกัน ฟลูอิด ไคซ์เบคจึงเหมาะสมกับขบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 5 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบคหนึ่งที่ใช้จำพวกเม็ดของแข็งเท่ากันจึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร
- 6) การทำงานด้วยฟลูอิดไดซ์เบคจะเสียพลังงานน้อยกว่าเพราะแรงเสียดทานและความดันตกของเบคน้อยกว่าในแบบบรรจุมาก
- 7) สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่องทำงาน
- 8) สามารถใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสีย

- 1) เวลาของของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบคสูงๆ หรือเบคหลายชั้นเปลืองเงินลงทุนมาก
- 2) มักเกิดฟองก๊าซในเบคเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ได้เป็นการสูญเสียเปลือง ถ้ายังเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้วทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
- 3) เนื่องจากเกิดการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งเม็ดของของแข็งมีเวลาอยู่ในเบคสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องทำให้ผลลัพธ์เลวลง หรือเม็ดของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด
- 4) การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าความเร็วของของไหลสูงเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกจากเบคไปพร้อมกับของไหล
- 5) ในปฏิกิริยาที่ทำให้ตัวเร่งมีขนาดลดลง เราต้องปรับความเร็วของก๊าซเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปลิวไป ทำให้ได้ผลผลิตน้อยลง
- 6) เกิดการสันดาปของหอตลอดหรือเกิดการกักความร้อนเนื่องจากเม็ดของแข็งมากกระทบกับผนังของหอตลอด
- 7) ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปียกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบค

2.1.4 ทฤษฎีการคำนวณฟลูอิดไดซ์เบค

ขณะที่ของไหลไหลผ่านขึ้นมาด้านข้างผนัง ความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลยเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอตลอดที่บรรจุอนุภาคของของแข็งมีอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้น พื้นที่ในการไหลของของไหลในหอตลอดจะลดน้อยลงหรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมาก ประสิทธิภาพการทำงานจะน้อยลงด้วย

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์เบคคือ

- 1) ความเร็วของของไหล
- 2) ตัวกระจายของไหล
- 3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอตลอด
- 4) อนุภาคของแข็ง
- 5) ความหนาแน่นของของไหล
- 6) ความหนืด
- 7) ความสูงของเบค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 6 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของเบดเมื่อเริ่มฟลูอิดไลเซชันสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_0}{L_{mf}} = \frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_0} \quad (2.1)$$

การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เบดเกิดฟลูอิดไลเซชัน

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในสมดุลของแรง 2 แรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเอง กับแรงพยุงจากของไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล

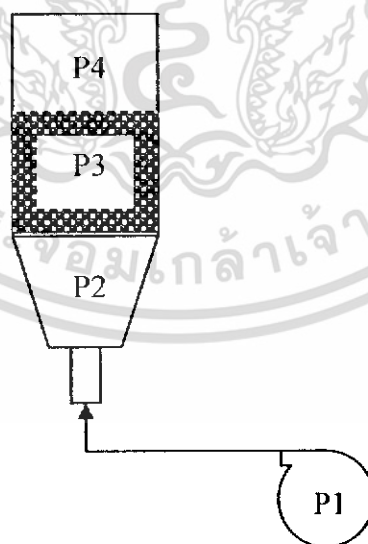
$$(\text{แรงพยุงของของไหล}) + (\text{แรงต้านทานการไหล}) = (\text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็งในเบด}) \quad (2.2)$$

$$(\text{ความดันลดในเบด})(\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์}) = (\text{ปริมาตรของเบด})(\text{แฟรคชันของของแข็ง})(\text{น้ำหนักจำเพาะของของแข็ง}) \quad (2.3)$$

$$\Delta P_b A_t = W = (A_t L_{mf})(1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g_c}{g} \quad (2.4)$$

จัดเทอมใหม่สำหรับสภาพฟลูอิดไลเซชันต่ำสุด

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g_c}{g} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.3 ความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆในชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 7 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความดันตกคร่อมที่ผ่านเบดนิ่งจะได้ว่า กลไกของความดันตกคร่อมในเบดที่ใช้นุภาคของแข็งขนาดสม่ำเสมอแล้ว พบว่าความดันตกคร่อมนี้เป็นสัดส่วนกับแฟคเตอร์ 2 แฟคเตอร์ คือ

$$\frac{\Delta P_p}{L} g_c = \frac{150(1-\epsilon_{mf})\mu U_0}{\epsilon_{mf}^3(\phi_s d_p)^2} + \frac{1.75(1-\epsilon_{mf})\rho_g U_0^2}{\epsilon_{mf}^3(\phi_s d_p)} \quad (2.6)$$

เทอมแรกทางด้านขวาของสมการ 2.6 แทนการสูญเสียความดันเนื่องจากผลของความเสียดทานเทอมที่สองเป็นผลของการสูญเสียพลังงานจลน์ที่ $Re_p < 20$ โดยที่แรงเสียดทานจะมีค่ามากกว่า ดังนั้นสมการที่ 2.6 สามารถตัดเทอมที่สองได้เป็น

$$\frac{\Delta P_b}{L} g_c = \frac{150(1-\epsilon_{mf})\mu U_0}{\epsilon_{mf}^3(\phi_s d_p)^2} \quad (2.7)$$

ที่ $Re_p > 1000$ ผลของการสูญเสียพลังงานจลน์จะมีค่ามากกว่าผลของแรงเสียดทาน สมการที่ 2.6 จัดใหม่ได้เป็นดังนี้

$$\frac{\Delta P_p}{L} g_c = \frac{1.75(1-\epsilon_{mf})\rho_g U_0^2}{\epsilon_{mf}^3(\phi_s d_p)} \quad (2.8)$$

ซึ่งสมการของ Ergun นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ 2.6 ได้ เมื่อเบดอยู่ที่จุดเริ่มเกิดฟลูอิดไลเซชัน ดังนั้นจะแทนสมการที่ 2.6 ลงในสมการที่ 2.5 ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไลเซชันได้ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})(U_{mf} d_p \rho_g)}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2 \mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g_c}{\mu^2} \quad (2.9)$$

ในเบดที่ใช้นุภาคของแข็งขนาดเล็กจะทำให้สามารถใช้ความเร็วของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันเมื่อ $Re_p < 20$ สามารถคำนวณได้จาก

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \epsilon_{mf})} \quad (2.10)$$

สำหรับอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ต้องใช้ความเร็วของไหลสูงมากจึงทำให้อนุภาคของแข็งลอยเป็นอิสระได้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของของไหลที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันเมื่อ $Re_p > 1000$ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g}} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 8 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างภายในเบด (Voidage)

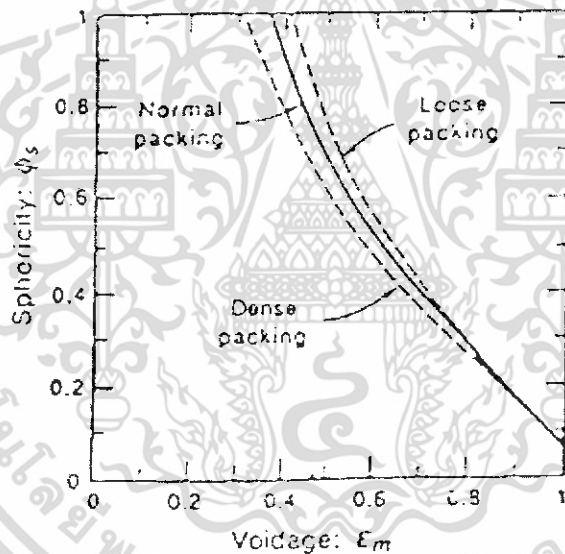
เม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ในเบดไม่ว่าจะบรรจุอย่างเป็นระเบียบหรือแบบไม่เป็นระเบียบ (Random packing) ก็ตามย่อมเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดของแข็งขึ้นเสมอ การหาช่องว่างที่แท้จริงทำได้ยากมาก เพราะช่องว่างของรูพรุนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับช่องว่างระหว่างเม็ด สัดส่วนของช่องว่างเป็นค่าที่วัดได้โดยตรง เช่น โดยการแทนที่ด้วยของเหลว หรือการชั่งน้ำหนักรวม โดยมีสมการดังนี้

$$\text{สัดส่วนช่องว่าง}(\epsilon) = \frac{\text{ปริมาตรของช่องว่าง}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดที่พิจารณา}} \quad (2.12)$$

ค่าความกลมของอนุภาค (ϕ_s) ใช้บ่งบอกถึงรูปร่างว่าอนุภาคเบี่ยงเบนจากทรงกลมมากน้อยเพียงใดนิยามว่า

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ของทรงกลมปริมาตรเท่ากัน}}{\text{พื้นที่ผิวของเม็ดของแข็ง}} \quad (2.13)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด จะเห็นได้ว่าเมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบด

ถ้ายังไม่ทราบค่าของ ϵ_{mf} และ ϕ_s Wen และ Yu (1996) แนะนำให้ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad (2.14)$$

$$\frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 9 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ 2.15 ลงในสมการที่ 2.9 แล้วค่า U_{mf} จะได้

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \sqrt{(33.7)^2 + \frac{0.0408 d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu^2}} \quad 33.7 \quad (2.16)$$

สมการที่ 2.15 นี้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34% ในช่วง $0.001 < Re_p < 4000$

ความเร็วเริ่มหลุดลอยหรือความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหล (U_T)

ในฟลูอิดไดเซชันนั้นมีความเร็วของของไหลอยู่ 2 ขอบเขต ขอบเขตอันแรกคือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน ของเขตอันที่สองคือ ความเร็วของไหลที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วต่ำสุดจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งหลุดลอยออกไป ความเร็วอันนี้จะมีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งพอดี การศึกษานั้นเกิดจากกรณีของไหลอยู่นิ่งมีค่าเท่ากับ

$$U_T = \left[\frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

โดยที่ C_d เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งหาได้จากการทดลอง และจากการทดลองพบว่าค่า C_d ขึ้นอยู่กับค่า Re_p ดังสมการ

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.18)$$

$$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.19)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \quad (2.20)$$

ค่า Reynolds มีความเร็วตกคือ $Re_p = \frac{D_p \rho_g U_T}{\mu}$ (2.21)

แทนค่าจากสมการ 2.17, 2.18 และ 2.19 ลงในสมการที่ 2.16 แล้วหาค่า U_T จะได้

$$U_T = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.22)$$

$$U_T = d_p \left[\frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g \mu} \right]^{1/3} \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.23)$$

$$U_T = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200000 \text{ หรือ } 1000 < Re_p \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 10 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อหลีกเลี่ยงมิให้อุณหภูมิของแข็งหลุดลอยออกจากเบด ความเร็วของของไหลที่ใช้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบดจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความเร็ว U_{mf} และความเร็ว U_f ในการคำนวณหาความเร็ว U_{mf} เนื่องจากอนุภาคของแข็งมีการกระจายขนาด ดังนั้นขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้จะเป็นขนาดโดยเฉลี่ยส่วนการคำนวณความเร็ว U_f จะใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เล็กที่สุดปะปนอยู่ในเบด

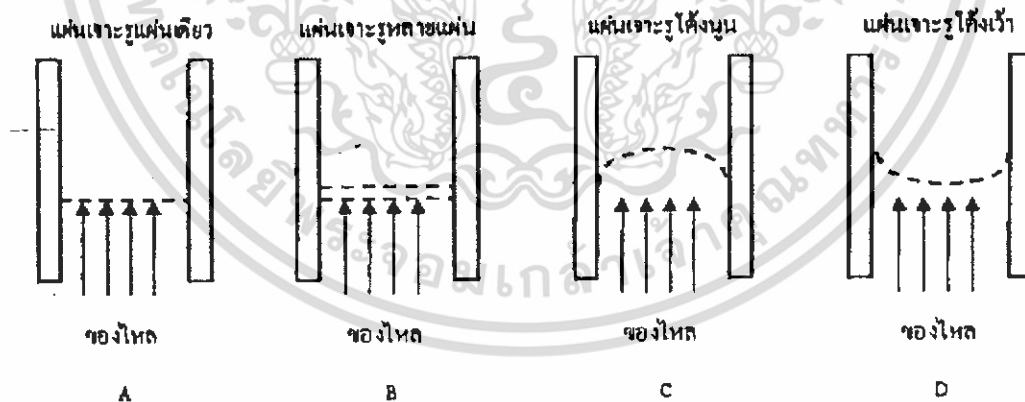
2.1.5 แผ่นกระจายของไหล

หน้าที่ของแผ่นกระจายของไหลคือ เป็นอุปกรณ์ป้องกันเพื่อมิให้อุณหภูมิหลุดลงมาด้านล่างและสามารถให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลออกได้เต็มพื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวเครื่องโดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรมีค่าเท่ากันทุกจุด และองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของกลุ่มอนุภาคอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลได้ดีหรือไม่ก็คือ ความดันตกคร่อม โดยของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล ถ้าความดันตกคร่อมน้อยเกินไปจะไม่ดี ความดันตกคร่อมโค่นทั่วไปจะต้องไม่ต่ำกว่า 10% ของความดันตกคร่อมที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านกลุ่มอนุภาคขณะลอยตัว

ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆมีดังต่อไปนี้

2.1.5.1 แบบแผ่นเจาะรู (Perforate plate)

แผ่นกระจายของไหลแบบแผ่นเจาะรูนั้น ทำได้โดยการนำแผ่นวัสดุมาเจาะรูให้มีรูปร่างและลักษณะขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปถ้าเจาะรูน้อยลักษณะของอนุภาคเหนือแผ่นกระจายในขณะลอยตัว หรืออยู่ในสภาวะเสมือนของไหลจะมีผลทำให้ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ จะมีฟองอากาศใหญ่เกิดขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเร็วสูงๆ ดังนั้นจำนวนรูและการเจาะจึงมีส่วนสำคัญ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้ใช้กันมากในห้องปฏิบัติการและเครื่องทดลองขนาดกลางเพราะทำง่าย ราคาถูก และมีคุณสมบัติพอสมควร แสดงได้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรู

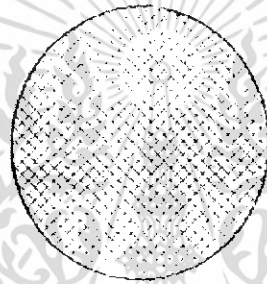
ในกรณีของขนาดตัวเครื่องใหญ่มาก ถ้าใช้แผ่นกระจายของไหลแบบดังกล่าวจะมีปัญหาเรื่องการรับน้ำหนัก หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนทำให้อ่างหรือบิตโค้ง จึงดัดแปลงทำเป็นแบบโค้งดังในรูปที่ 2.5 C และรูปที่ 2.5 D ในรูป C นั้นช่วยลดหรือแก้ปัญหาการเกิดฟอง และการผ่านไปเป็นช่องที่มักจะมีฟองขึ้นตรงกลางแผ่นเจาะรูได้ดี

สำหรับในรูป D นั้น ถ้าเจาะรูด้านข้างๆ ให้มากกว่าตรงกลางแล้วจะทำให้เกิดความสม่ำเสมอภายในกลุ่มอนุภาคเหนือแผ่นกระจายของไหลมากยิ่งขึ้น

2.1.5.2 แบบตะแกรง (Sieves)

แผ่นกระจายของไหลแบบนี้เป็นตะแกรงเหมือนมุ้งลวดเหมาะสำหรับตัวเครื่องขนาดเล็ก เพราะตะแกรงจะรับน้ำหนักมากๆ ไม่ได้ และอีกประการหนึ่งความดันของการไหลผ่านตะแกรงจะต่ำมาก ดังนั้นมักจะบรรจุกลุ่มอนุภาคไว้ด้านล่างของตะแกรงเป็นกลุ่มอยู่กับที่นอกจากจะช่วยให้ความดันลดของแผ่นกระจายเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าต่ำสุดของค่าที่ต้องการ และยังช่วยให้ลักษณะการไหลของของไหลเป็นแบบเรียบไม่เหมือนกับสภาพของไหลที่ไหลอยู่ในท่อโดยทั่วไป ซึ่งมีความเร็วบริเวณส่วนกลางท่อจะสูงกว่าข้างๆ

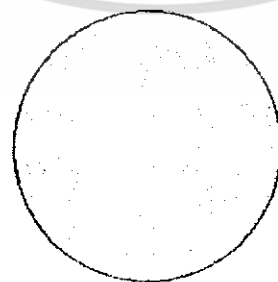
ตะแกรงนั้นถ้าใช้ในกรณีรับน้ำหนักมากๆ อาจต้องใช้ร่วมกับแผ่นเจาะรู โดยใส่ตะแกรงให้อยู่ในระหว่างแผ่นเจาะรู ซึ่งทำให้นอกจากจะแข็งแรงแล้วยังไม่จำเป็นต้องเจาะรูบนแผ่นให้เล็กมากซึ่งจะเสียเวลามากกว่า แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของตัวกระจายแบบตะแกรง

2.1.5.3 แบบแผ่นอัด (Sintered plate)

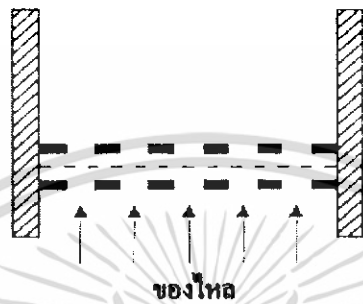
เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่ทำจากการนำเอาวัสดุที่จะนำมาทำแผ่นกระจายของไหลที่มีขนาดเล็กและอัดก้อนติดกัน โดยที่แผ่นวัสดุดังกล่าวเมื่อถูกอัดแล้วก็ยังยอมให้ของไหลไหลผ่านได้ แผ่นกระจายของไหลแบบนี้เป็นแบบที่ดีที่สุด ทำให้เกิดสภาวะเสมือนของไหลที่ตีมาก การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกลุ่มสภาวะเสมือนของไหลน้อยมาก ขนาดของท่อเล็กถึงมีการใช้งานตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงปานกลาง ข้อเสียของแผ่นกระจายของไหลแบบนี้ก็คือ เวลาของไหลไหลผ่านจะเกิดความดันลดย่างมากทำให้สูญเสียพลังงาน หรือค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นอัด

2.1.5.4 แบบแซนวิช (Sandwiched)

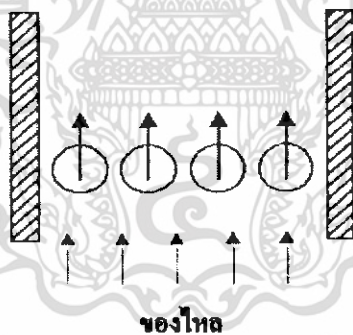
เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่ลักษณะคล้ายกับแบบที่ 1 และ 2 แต่จะมีกลุ่มอนุภาคกองอยู่ระหว่างแผ่นดังกล่าวด้วย ระบบการกระจายของไหลแบบนี้จะทำให้การกระจายของของไหลสม่ำเสมอขึ้น และในกรณีที่มีความร้อนเกิดขึ้นด้วยจะสามารถแยกส่วนล่างออกของแผ่นกระจายไหลจากความร้อนดังกล่าวได้ดี แต่ไม่เหมาะสำหรับกรณีที่เป็นของไหลมีอนุภาคที่เล็กๆปนอยู่ เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันได้เมื่อใช้งานไปสักระยะหนึ่งทำให้ของไหลไหลผ่านได้สะดวกไม่เกิดความดันตกสูงกว่าที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะของตัวกระจายแบบแซนวิช

2.1.5.5 แบบท่อหรือท่อเจาะรู

ในกรณีที่เป็นอนุภาคขนาดใหญ่อาจใช้แบบท่อวางขนานกันแล้วให้ของไหลไหลผ่านท่อหรือเจาะรูบนท่อแล้วของไหลไหลผ่านท่อ ผ่านรูดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 2.9

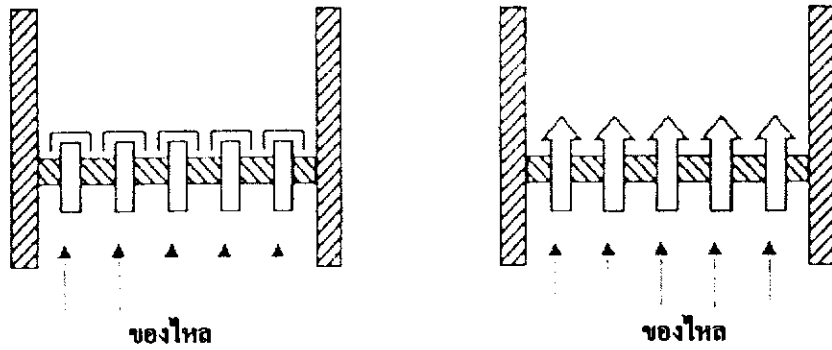


รูปที่ 2.9 ลักษณะของตัวกระจายแบบท่อ

2.1.5.6 แบบมีหมวก (Bubble cap)

เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบคล้ายกับที่ใช้ในหอกลับ (Bubble plate) เพื่อไม่ให้อนุภาคไหลผ่านแผ่นกระจายของไหลลงสู่ด้านล่าง แต่ก็ไม่ได้หลายประการด้วยกัน เช่น ทำให้เกิดกองอยู่เป็นหย่อมๆบนแผ่น อาจทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติภายในตัวเครื่องได้ การเกิดคุดก้นบนแผ่นกระจายยากต่อการสร้าง ดังแสดงในรูปที่

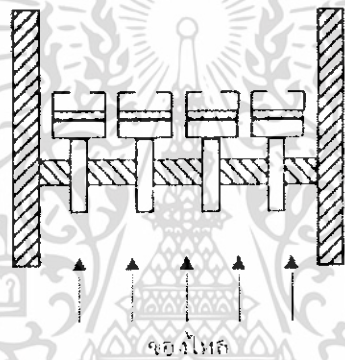
2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะตัวกระจายแบบมีหมวก

2.1.5.7 แบบแผ่นกรอง (Multiple filter plate)

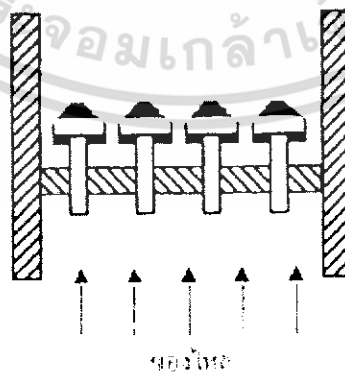
เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่เหมาะสมมากสำหรับอนุภาคขนาดเล็กๆที่ไม่ต้องการให้หล่นผ่านแผ่นกระจายของไหลลงไปข้างล่างเคมีข้อเสีย เช่น ของไหลที่ไหลผ่านจะต้องไม่มีสารที่ทำให้เกิดการอุดตัน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นกรอง

2.1.5.8 แบบระบบผสม (Mixing nozzle system)

เป็นระบบกระจายของไหลโดยให้หัวพ่นของไหลอยู่ทางด้านล่างของกลุ่มอนุภาค ทำให้เกิดการหมุนเวียนภายในกลุ่มอนุภาคดีขึ้นดังรูปที่ 2.12

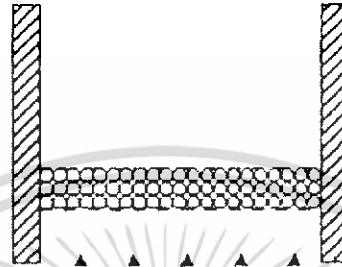


รูปที่ 2.12 ลักษณะของตัวกระจายแบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 14 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

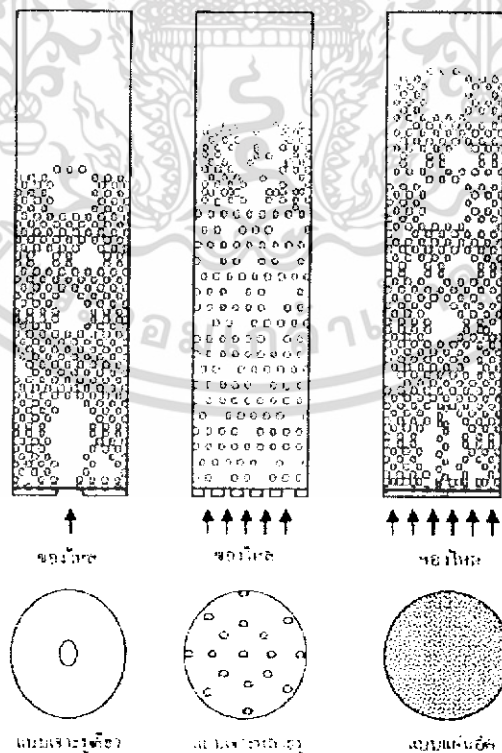
2.1.5.9 แบบแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์

แผ่นกระจายของไหลแบบนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แต่ด้านบนของแผ่นจะมีลูกถ้วยทรงกลมวางเรียงกันอยู่เป็นชั้นๆ ลูกถ้วยทรงกลมดังกล่าวจะต้องไม่อยู่ในสภาวะเสมือนของไหลเมื่อใช้งาน ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบนี้ทำให้ได้สภาพเสมือนของไหลมีลักษณะที่ดีมาก การสูญเสียความดันสามารถลดลงได้มาก ขนาดของอนุภาค จำนวนและชนิดของวัสดุที่มีส่วนต่อลักษณะของสภาวะการเสมือนของไหล และความดันลดของการไหลผ่านกระจายของไหลจะต่ำมากเมื่อเทียบกับแบบอื่นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะของตัวกระจายแบบแผ่นเจาะรูหรือตะแกรงประยุกต์

การเลือกแผ่นกระจายของไหลมีผลต่อกระบวนการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ทำให้ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน เช่น แผ่นกระจายของไหลทำจากแผ่นโลหะเจาะรู ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าแผ่นกระจายของไหลที่เป็นรูพรุน ซึ่งจำนวนการเกิดฟองก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรูเจาะบนตัวกระจายดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 คุณภาพของฟลูอิดไดเซชันที่เกิดจากแผ่นกระจายของไหลต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 15 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวกระเจายนั้นมีสิ่งที่ควรจำคือ ความดันตกของก๊าซที่ผ่านตัวกระจาย ซึ่งมีการกระจายที่ดีแล้วจะมีความดันตกมากกว่าตัวกระจายจะมีขนาดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของความดันในเบดต่ำสุดประมาณ 35 เซนติเมตรของน้ำ

$$\Delta P_{d, \min} = \text{Max}(0.1 \Delta P_b) \quad (2.25)$$

2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินการถ่ายเทของพลังงานซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างวัตถุเนื่องจากความแตกต่างของระดับอุณหภูมิซึ่งพลังงานที่ถ่ายเทนั้นคือ “ความร้อน” และการถ่ายเทความร้อนก็จะช่วยให้การวิเคราะห์พลังงานของระบบ ด้วยกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มกฎที่ได้จากการทดลองที่ใช้ในการถ่ายเทพลังงานของระบบ การถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบ คือ

2.2.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณต่ำ โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ (Kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายใน โครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่นทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทความร้อนโดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

กฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อน โดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิโธ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ นำเอาหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของความร้อนในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์ กำหนดเป็น

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad W \quad (2.26)$$

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad W/m^2 \quad (2.27)$$

จากสมการ (2.26) ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวกของ x แล้ว dT/dx เป็นลบ ดังนั้น q_x (หรือ q_x'') มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายลบติดอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการและเพื่อให้แน่ใจว่า q_x'' (หรือ q_x) เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ x ในทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ x

จุดประสงค์หลัก ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาสนามอุณหภูมิ (Temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขที่สอดคล้องกับขอบเขต นั่นคือ ต้องทราบการกระจายอุณหภูมิ (Temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาฟลักซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้น จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 16 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

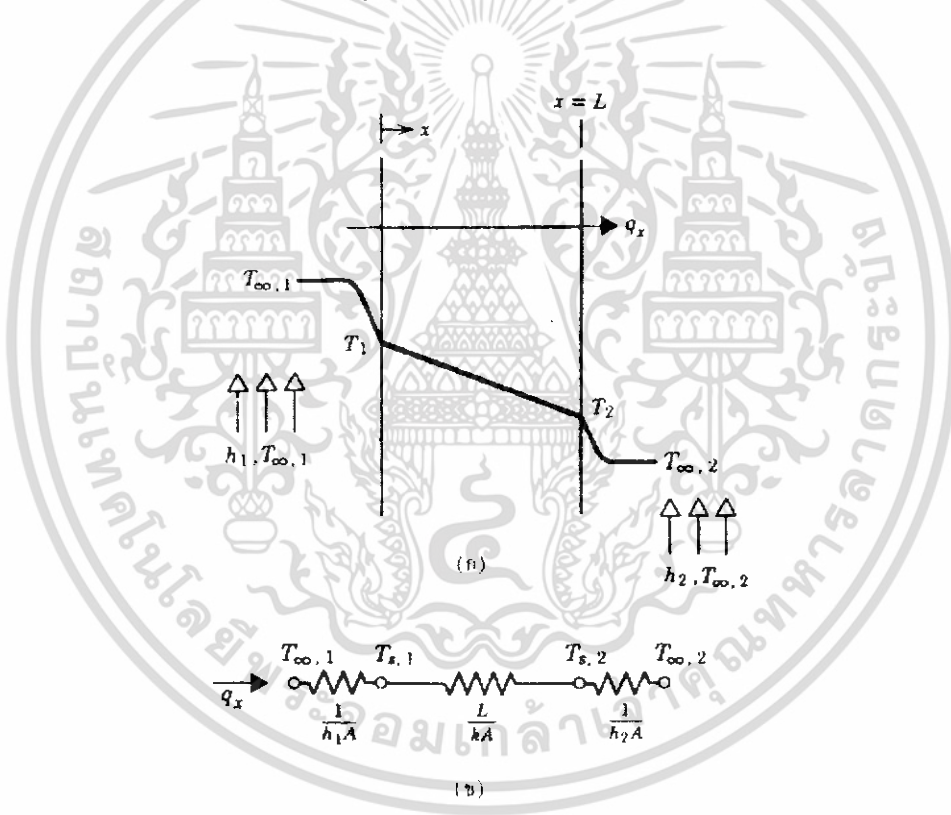
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาค่านี้ทำโดยใช้กฎของพลังงาน (Energy conservation) กับปริมาณความคุมดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสมผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งคำตอบของมันจะทำให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

การนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ (One Dimensional Steady-State Conduction) ลักษณะของการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอที่จะกล่าวถึงนี้จะมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ และการไหลของความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางเพียงทิศทางเดียว โดยมีอุณหภูมิแต่ละจุดของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

2.2.1.1 ผนังเรียบ (Plane wall)

สำหรับการนำความร้อนในหนึ่งมิติของผนังเรียบ อุณหภูมิจะเป็นฟังก์ชันของโคออร์ดิเนต x และการส่งผ่านความร้อนพิจารณาเฉพาะในทิศทางนี้ ในรูป 2.15 ของไหล 2 ชนิดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันไหลผ่านในแต่ละด้านของผนังเรียบ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการพาความร้อนจากของไหลร้อนที่ $T_{\infty,1}$ ผู้ผิวหนึ่งของผนังของผนังที่ T_1 และผ่านผนังโดยการนำไปยังอีกหน้าที่ T_2 จากนั้นความร้อนจะถูกพาออกไปโดยของไหลเย็นที่ $T_{\infty,2}$ ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ สิ่งแรกที่จะต้องรู้ก็คือ การกระจายของอุณหภูมิภายในผนังเรียบ



รูปที่ 2.15 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ

2.2.1.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution)

การกระจายของอุณหภูมิภายในผนังหาได้จากสมการที่กระจายของความร้อนแลและเงื่อนไขที่ขอบแบบต่างๆ ตามเงื่อนไขดังกล่าว และไม่มีการผลิตความร้อนภายในผนัง สมการจะลดรูปเป็น

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม 71965 เนื้อหา 17 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสมมุติค่า k คงที่ โดยการอินทิเกรต 2 ครั้ง ได้คำตอบทั่วไปเป็น

$$T(x) = C_1 X + C_2 \quad (2.29)$$

โดยเงื่อนไขที่ขอบตามรูป จะได้ว่า $T(0) = T_1$ และ $T(L) = T_2$ แทนในสมการ (2.27) จะได้

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

$$C_2 = T_{s,1}$$

ดังนั้นคำตอบทั่วไปของการกระจายของอุณหภูมิในผนัง คือ

$$T(x) = \left(T_{s,2} - T_{s,1} \right) \frac{x}{L} + T_{s,1}$$

โดยใช้กฎของฟูริเยร์ เพื่อหาคำตอบของการส่งผ่านความร้อน นั่นคือ

$$T(x) = \left(T_{s,2} - T_{s,1} \right) \frac{x}{L} + T_{s,1} \quad (2.30)$$

สังเกตว่า A เป็นพื้นที่ของผนังซึ่งคงที่จากทิศทางการถ่ายเทความร้อน และฟลักซ์ความร้อนนั้นก็คือ

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (2.31)$$

สังเกตเช่นกันว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ x ซึ่งเป็นลักษณะที่ตรงกับสมการ (2.28) ซึ่งหมายความว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนในทิศทาง x

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = \frac{k}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (2.32)$$

2.2.1.3 ความต้านทานความร้อน (Thermal resistance)

ในที่นี้เราจะนำสมการ (2.31) ซึ่งใช้แนวทางที่สำคัญมาใช้นั้นคือ ความคล้ายคลึงกันระหว่างการฟุ้งกระจายของความร้อนและประจุไฟฟ้า โดยที่ความต้านทานไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานความร้อนก็ควรมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำความร้อน จากสมการ (2.31) ความต้านทานการนำความร้อน คือ

$$R_{t,cond} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (2.33)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับการนำไฟฟ้าในระบบเดียวกัน กฎของโอห์ม ได้ให้รูปแบบความต้านทานไฟฟ้าเป็น

$$R_{l,cond} = \frac{(E_1 - E_2)}{I} = \frac{L}{\sigma A} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 18 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ความต้านทานความร้อนยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับการพาความร้อน จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q = hA(T_s - T_\alpha) \quad (2.35)$$

ความต้านทานความร้อนสำหรับการพา คือ

$$R_{1,conv} = \frac{(T_s - T_\alpha)}{q} = \frac{1}{hA} \quad (2.36)$$

วงจรความร้อนสมบูรณ์สำหรับผนังเรียบที่มีการพาความร้อนที่ผิว แสดงในรูปที่ 2.16 อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จาก การแยกพิจารณาของแต่ละช่วงในวงจร จะได้สมการคือ

$$q_x = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{s,1})}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\frac{L}{kA}} = \frac{(T_{s,2} - T_{\alpha,2})}{\frac{1}{h_2 A}} \quad (2.37)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนอาจเขียนแทนด้วยเทอมของผลต่างอุณหภูมิทั้งหมด ($T_{\infty,1} - T_{\infty,2}$) และความต้านทานความร้อนรวม R_{10}

$$q_x = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,2})}{R_{10}} \quad (2.38)$$

เนื่องจากความต้านทานการนำและการพาต่ออนุกรมกัน จึงได้

$$R_{10} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (2.39)$$

2.2.1.4 ผนังหลายชั้น (Composite wall)

วงจรความร้อนสมบูรณ์อาจใช้สำหรับระบบที่ซับซ้อนได้เหมือนกัน เช่น ผนังหลายชั้น ซึ่งจำนวนความต้านทานความร้อนที่ต่ออนุกรมและขนานกัน จะขึ้นอยู่กับชั้นของวัสดุที่แตกต่างกันพิจารณาผนังเรียบหลายชั้นที่ต่ออนุกรมกันของรูปที่ 2.16 อัตราการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติของระบบนี้ เขียนได้เป็น

$$q_x = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{\sum R_i} \quad (2.40)$$

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

$$q_x = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{\left[\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A} + \frac{1}{h_4 A} \right]} \quad (2.41)$$

หรืออาจหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากการคิดในแต่ละช่วงก็ได้

$$q_x = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\frac{L_A}{k_A A}} = \frac{(T_{s,2} - T_{s,3})}{\frac{L_B}{k_B A}} = \dots \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 19 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ โดยให้ U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient) ซึ่งกำหนดขึ้นมาจาก ความคล้ายคลึงกันกับกฎของการเย็นตัวของนิวตัน จะได้ว่า

$$q_x = UA\Delta T \quad (2.43)$$

ซึ่ง ΔT เป็นผลต่างของอุณหภูมิรวม จากสมการ (2.40) และ (2.18) จะพบว่า $UA = 1/R_{tot}$ และสำหรับผนังหลายชั้นตาม รูปที่ 2.16

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_t} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_A} \right]} \quad (2.44)$$

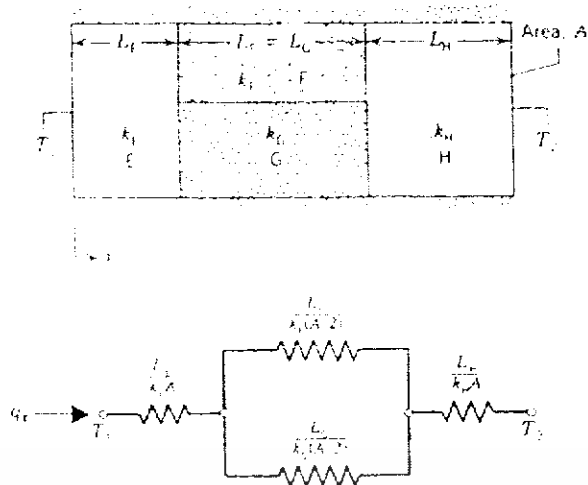


รูปที่ 2.16 วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม

โดยทั่วไปอาจเขียนได้เป็น

$$R_{tot} = \sum R_i = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA} \quad (2.45)$$

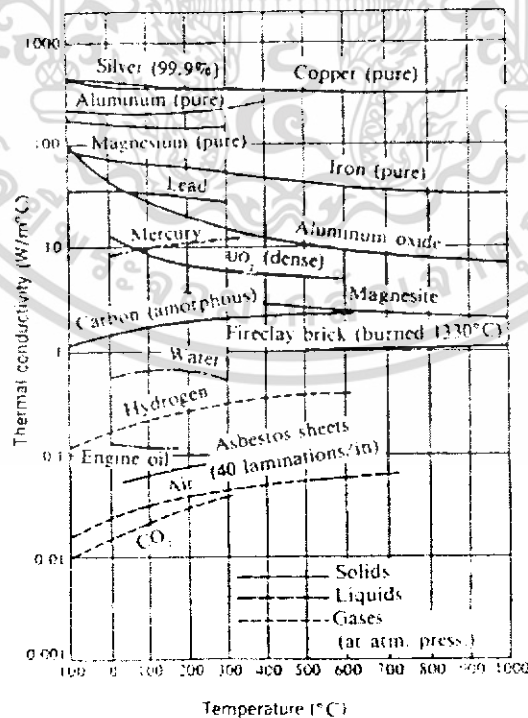
ผนังหลายชั้นอาจมีคุณลักษณะตามรูปร่างเป็นแบบอนุกรม-ขนานก็ได้ ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.17 ถึง การไหลของความร้อนจะเป็น 2 มิติ แต่อาจสมมุติเป็นเงื่อนไขหนึ่งมิติได้โดยสมมุติว่าผิวที่ตั้งฉากกับ x มีอุณหภูมิคงที่ ตลอดเวลาหรืออาจสมมุติว่าผิวซึ่งขนานกับแกน x เป็นอะเดียบาตได้อย่างใดอย่างหนึ่ง



รูปที่ 2.17 กรณีที่มีผนังหลายชั้น

2.2.1.5 คุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)

การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุตามกฎฟูริเยร์จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับค่าการนำความร้อน ซึ่งคุณสมบัตินี้จะบ่งชี้ถึงอัตราที่พลังงานถูกถ่ายเทโดยขบวนการฟุ้งกระจาย อัตราการถ่ายเทพลังงานนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางฟิสิกส์ของสารอะตอมและโมเลกุล ซึ่งเกี่ยวกับสภาวะของสาร ค่าการนำความร้อน (k) ในสมการต่างๆ ที่กล่าวมามีหน่วยเป็น w/mK หรือ $J/m.s.K$ ค่าการนำความร้อนยังแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิเช่นกัน สำหรับสารบางตัวมีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยจนอาจถือว่ามีค่า k คงที่ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วเกือบทุกกรณีสารทุกตัวแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำมากๆ k จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับอุณหภูมิ ยกตัวอย่างเช่นค่า k ของทองแดง อลูมิเนียมหรือเงินจะมีค่าจาก 50 ถึง 100 เท่าของค่า k ของมัน ที่อุณหภูมิห้องปกติรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนของสารทางวิศวกรรมบางอย่างแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิอย่างไร



รูปที่ 2.18 อิทธิพลต่อการนำความร้อนของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 21 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสามารถต่อการนำความร้อนของของแข็ง (Thermal conductivity of solids) เช่น โลหะ ซึ่งเราทราบวัสดุที่เป็นองค์ประกอบภายในเฟสที่เป็นของแข็ง สำหรับในขั้นต้นจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิเท่านั้น โดยทั่วไปค่า k ในโลหะบริสุทธิ์จะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลง แต่สำหรับวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของโลหะผสมมีแนวโน้มในทางกลับกันกับแนวโน้มในทางกลับกันกับแนวโน้มดังกล่าว

ค่าความสามารถในการนำความร้อนของโลหะ ปกติมักจะแสดงค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เป็นช่วงกว้างๆ ดังนี้

$$k = k_0 (1 + b\theta + c\theta^2) \quad (2.46)$$

ซึ่ง $\theta = T - T_{ref}$ และ k_0 เป็นค่าการนำความร้อน ที่พิจารณาจากค่าอุณหภูมิที่จุดอ้างอิง (T_{ref}) สำหรับในงานวิศวกรรมหลายสาขา ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ ส่วนใหญ่จะเป็นช่วงที่ค่อนข้างแคบ และอาจกล่าวได้ว่ามีค่าระหว่าง 100 ถึง 200 องศา และจะได้ว่า

$$k = k_0 (1 + b\theta) \quad (2.47)$$

ค่าความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non homogeneous) ตามปกติจะกำหนดให้มีค่าที่ขึ้นอยู่กับ “ค่าความหนาแน่นทั่วทั้งก้อนวัตถุ ที่ปรากฏจริง (Apparent bulk density)” ซึ่งหาได้จากการนำมวลของวัตถุ หารด้วยปริมาตรของวัตถุทั้งหมด ปริมาตรของวัตถุทั้งหมดนี้ จะรวมทั้งปริมาตรของส่วนที่เป็นช่องว่าง (Void volume) ดังเช่นช่องว่างของอากาศ (Air pockets) ภายในขอบเขตทั้งหมดของวัตถุ ดังนั้น ค่าความสามารถในการนำความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ สำหรับทุกๆ ค่าของ k ในวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยังเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นทั่วทั้งก้อนวัตถุ ที่ปรากฏจริงซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ความสามารถในการนำความร้อนของของเหลว (Thermal conductivity of liquids) การนำความร้อนของของเหลวนั้น โดยส่วนใหญ่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความดัน

ตารางที่ 2.1 การนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (k) (W/m.k)
โลหะบริสุทธิ์	35-450
โลหะผสม	20-200
โลหะเหลว	9-90
อโลหะเหลว	0.2-2.0
อโลหะแข็ง	0.02-20
ฉนวน	0.02-2.40
ก๊าซ	0.002-0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 22 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

เมื่อของไหล ไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบบังคับ”(Forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free or natural convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งในอากาศเย็นที่หยุดนิ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะเกรเดียนต์อุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้เกรเดียนต์ของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรม เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_w และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ตามรูปที่ 2.19 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ถูกกำหนดเป็น

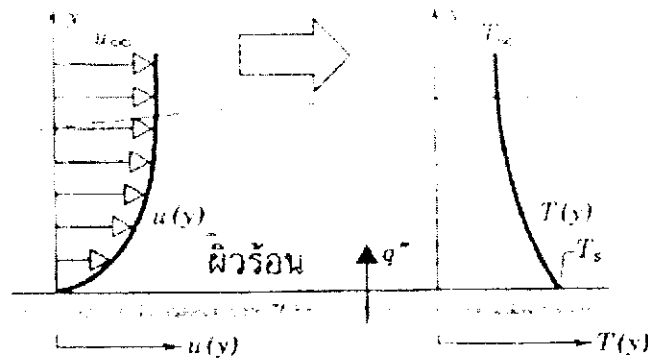
$$q'' = h(T_w - T_f) \quad (2.48)$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังความร้อนไปยังของไหลที่เย็น ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการไหลของไหลที่ร้อน ไปยังผนังเย็น จะได้ว่า

$$q'' = h(T_f - T_w) \quad (2.49)$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น สมการ (2.49) สมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) โดยที่อุณหภูมิมิหน่วย เซลเซียส หรือเคลวิน และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีหน่วยเป็น $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient or Film convection coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล (เช่น ลามินาร์ หรือ เทอร์บูเลนต์) รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ ที่ของไหลไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ (การเคลื่อนที่ของ ของ ไหลเนื่องจากแรงลอยตัว) ค่าของ h จะแปรเปลี่ยนเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่างๆตามพื้นผิววัตถุ ดังนั้นในทางวิศวกรรมแล้ว เพื่อความสะดวกจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยต่อพื้นผิว (h_m) แทนค่า h ที่ตำแหน่งนั้นๆ ในการพิจารณาการพาความร้อนตลอดทั้งพื้นผิว สมการ (2.48) และ (2.49) ค่า h จึงถูกแทนด้วยค่า h_m ดังนั้นค่า q'' จึงเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยตลอดบริเวณที่พิจารณา



รูปที่ 2.19 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการพาความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษาการไหลผ่านวัตถุซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่น แผ่นเรียบ หรือ การไหลผ่านในท่อทรงกระบอก สำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรงสลับซับซ้อน ค่า h สามารถได้จากวิธีทางการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้จะมีช่วงของความแตกต่างกัน กว้างมากตามแต่ละรูปแบบ สำหรับการประยุกต์ต่างๆ

2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน คือ พลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้เราจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นจากของเหลวและก๊าซ ดังนั้นโดยไม่คำนึงถึงรูปแบบของสาร การส่งออกของรังสีเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นไฟฟ้า (หรือเรียกอีกอย่างว่าโฟตอน) ในขณะที่ถ่ายเทพลังงาน โดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการ ในความเป็นจริงการถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสุญญากาศ

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวอย่างของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)

ชนิดของการไหล	h ($W/m^2\text{ }^\circ C$)
การพาแบบอิสระ ที่ $\Delta T = 25^\circ C$	
แผ่นเรียบแนวตั้ง 0.25 เมตร ใน :	
- อากาศบรรยากาศ	5
- น้ำมันเครื่องยนต์	37 (440)
ทรงกระบอกแนวนอน O.D. 0.02 เมตร ใน:	
- อากาศบรรยากาศ	8
- น้ำมันเครื่องยนต์	62 (741)

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวอย่างของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) (ต่อ)

ชนิดของการไหล	h, W/m ² °C
การพาแบบอิสระ ที่ $\Delta T = 25^\circ\text{C}$	
ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 เมตร ใน:	
- อากาศบรรยากาศ	9
- น้ำมันเครื่องยนต์	60 (606)
การพาความร้อนแบบบังคับ	
อากาศบรรยากาศ $25^\circ\text{C}, U_\infty$	10 m/s ผ่านแผ่นเรียบ:
L = 0.1 m	
L = 0.5 m	
การไหลที่ 5 m/s ผ่านทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm.:	
- อากาศบรรยากาศ	85
- น้ำมันเครื่องยนต์	1,800
- น้ำที่ 1 kg/s ภายในท่อ 2.5 cm.I.D.	10,500
การเดือดของน้ำที่ 1 atm	
- การเดือดในภาชนะ	3,000
- การเดือดที่ฟลักซ์ความร้อนสูงสุด	3,500
- การเดือดเป็นฟิล์ม	300
การกลั่นตัวของไอน้ำที่ 1 atm	
- การกลั่นตัวเป็นแผ่นบางๆบนท่อแนวอน	9,000 – 25,000
- การกลั่นตัวเป็นแผ่นบางๆบนท่อแนวตั้ง	4,000 – 11,000

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของ สตีเฟน โบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q = \sigma T_s^4 \quad (2.50)$$

โดยที่ T_s คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของผิว
 σ คือ ค่าคงที่ของสตีเฟน – โบลซ์แมน $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$

สมการ (2.50) ใช้หาอัตราการส่งพลังงานออกของผิว การคำนวณหาอัตราสุทธิซึ่งการแผ่รังสีถูกแลกเปลี่ยนระหว่างผิว โดยทั่วไปมีความยุ่งยากมาก อย่างไรก็ตามมีกรณีพิเศษซึ่งเกิดบ่อยในทางปฏิบัติ เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนสุทธิระหว่างพื้นผิวที่เล็กมากกับพื้นผิวที่ใหญ่มาก โดยพื้นผิวที่เล็กจะอยู่ล้อมรอบ พื้นผิวและสิ่งแวดล้อมที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 25 ะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกแยกจากกัน โดยก๊าซซึ่งไม่มีอิทธิพลเกี่ยวกับการแผ่รังสีนั้น อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนรังสีการแลกเปลี่ยนรังสี ความร้อนระหว่างผิวและสิ่งแวดล้อมของมันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวกำหนดเป็น

$$q'' = \frac{q}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.51)$$

ในสมการนี้ A เป็นพื้นที่ผิว และ ϵ เป็นสัมประสิทธิ์การส่งออก มาขณะที่ T_{sur} เป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีการ ประยุกต์สมการนี้ในรูปอื่นเพื่อให้สะดวก คือ

$$q_{red} = h_r A (T_s - T_{sur}) \quad (2.52)$$

ซึ่งจากสมการ (2.26) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (h_r) คือ

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s - T_{sur}) (T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (2.53)$$

จุดประสงค์ที่ทำเช่นนี้เพื่อให้มีรูปแบบเหมือนการหาความร้อน สังเกตว่า ค่า h_r ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ ในขณะที่ h ของการพาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามปกติ

2.3 ทฤษฎีการออกแบบเตาอบฟลูอิดโคจซ์เบด

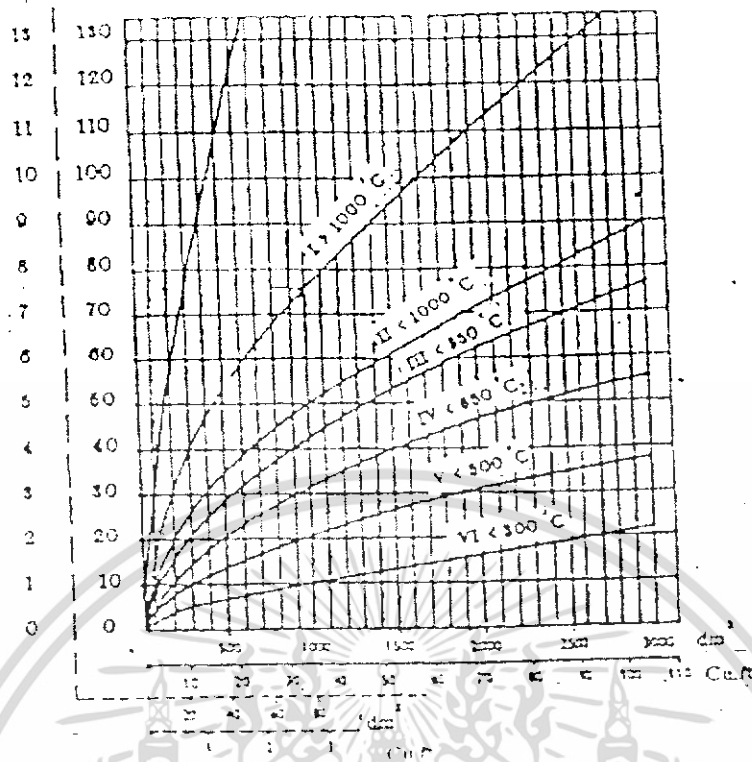
องค์ประกอบที่ใช้ในการออกแบบเตาอบฟลูอิดโคจซ์เบด มีดังนี้

2.3.1 อุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าที่ต้องการ

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน และเวลาที่จะอบ โดยทั่วไป อุณหภูมิของเตาจะสูงกว่า อุณหภูมิ ที่ต้องการอบประมาณ 10%

2.3.2 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการนั้นขึ้นอยู่กับความร้อนที่ต้องการในการทำให้ภายในเตามีอุณหภูมิถึงตาม ที่ต้องการและต้องเผื่อความร้อนที่อาจสูญเสีย (Heat loss) ซึ่งปริมาณความร้อนที่ต้องใช้นั้นสามารถกำหนดได้จาก ปริมาตรภายในเตา ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตร-กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิ ของเตาที่มีฉนวนกันความร้อน

2.3.3 การเลือกชนิดขดลวดความร้อน

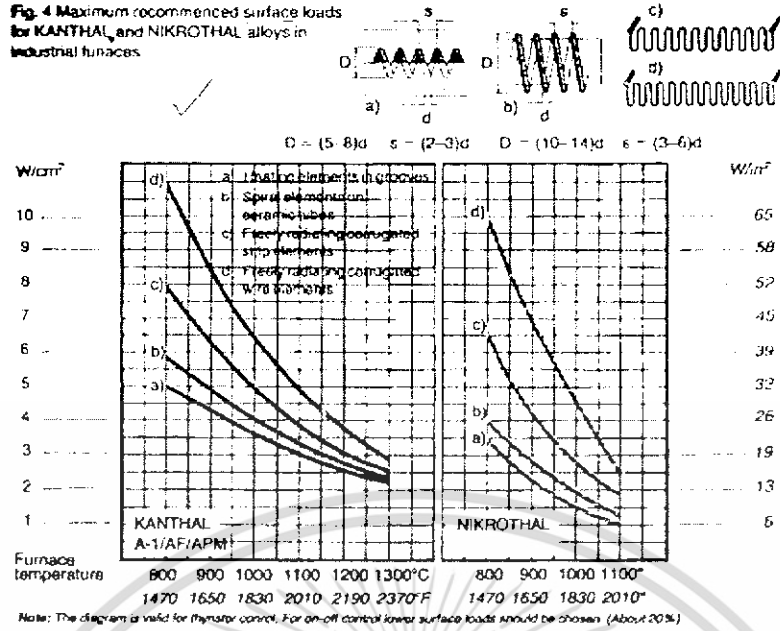
โดยทั่วไปรูปร่างของขดลวดความร้อนจะมี 2 ชนิดคือ แบบลวดกลม และลวดแบน ต้องเลือกคุณสมบัติที่เหมาะสมตามความต้องการ เช่น การนำไฟฟ้า ความต้านทาน และ ความทนความร้อน เป็นต้น

2.3.4 การกำหนดภาระที่ผิว (Surface load)

การกำหนดภาระที่ผิว เป็นการวัดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของขดลวดฮีตเตอร์ โดยเตาอบอุณหภูมิสูงจะมีภาระที่ผิวสูงกว่าเตาอบอุณหภูมิต่ำ

ปัจจัยในการพิจารณาการกำหนดภาระที่ผิว คือ อุณหภูมิที่ผิวฮีตเตอร์ รูปทรงและการวางฮีตเตอร์ ภายในเตากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

Fig. 4 Maximum recommended surface loads for KANTHAL and NIKROTHAL alloys in industrial furnaces



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในเตา และการกำหนดภาระที่ผิว

โดยมีข้อจำกัด ดังนี้

ฮีตเตอร์ชนิด a กำหนดจากฮีตเตอร์ ชนิด ลวดกลมและลวดแบน ฝังอยู่ในร่องอิฐเท่านั้น
 ฮีตเตอร์ชนิด b กำหนดจากฮีตเตอร์ ชนิด ลวดกลม ฝังอยู่บนท่อ เซรามิกเท่านั้น ความหนา 2.0 มม. เป็นอย่างน้อย
 ฮีตเตอร์ชนิด c และ d กำหนดจาก ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง อย่างน้อย 5.0 มม. และสำหรับลวดแบนมีระยะห่างระหว่างขดลวดมากที่สุด และการกำหนดภาระที่ผิวสูงสุด

ตารางที่ 2.3 แสดงระยะห่างมากที่สุดระหว่างช่วงของลวดแบนที่แนะนำให้ใช้

อุณหภูมิ	ระยะช่วงต่อช่วงของลวดแบน
	(mm)
<900°C	400
1000°C	350
1100°C	300
1200°C	200
1300°C	150

จากตารางที่ 2.3 สำหรับลวดขนาดที่เล็กกว่า และบางกว่าข้อกำหนดต่างๆข้างต้นนี้จะต้องกำหนดภาระที่ผิว ให้ต่ำลงและระยะห่างระหว่างช่วงต่อช่วง ให้สั้นลงเพื่อลดการบิดเบี้ยว หลังจากการใช้งานซึ่งจะทำให้ฮีตเตอร์ตัวนี้อายุสั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 28 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 ภาระที่ผนังเตา (Wall load)

ในการคำนวณขนาดของลวดต้านทาน จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิ และพื้นที่หน้าตัดของลวดต้านทาน และจะต้องพิจารณาถึง อายุการใช้งาน, ภาระที่ผนังเตา, คุณสมบัติของผนัง และวัสดุที่ทำตัวต้านทาน ตลอดจนสภาพการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในภาคผนวก แสดงภาระที่ผนังเตา (Wall load) กับอุณหภูมิสูงค่านี้จะถูกต้องยิ่งขึ้น เมื่อการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ และพื้นที่ผิวของผนังเตามาก

2.3.6 การกำหนดขนาดความโคเส้นผ่านศูนย์กลาง

การคำนวณทางทฤษฎี สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{V}\right)^2 \frac{\rho C_1}{p}} \quad (2.54)$$

P = กำลังวัตต์

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า

ρ = ความต้านทานจำเพาะของฮีตเตอร์

C_1 = สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ ของฮีตเตอร์

p = Surface load ของฮีตเตอร์

2.3.7 การออกแบบลวดชนิดขดเป็นคอยล์

การออกแบบลวดฮีตเตอร์หลังจากที่กำหนดความโคของลวดแล้ว ต่อไปจะต้องกำหนดความยาวของลวดที่จะพันเป็นคอยล์

$$R_1 = \frac{V^2}{P} \quad (2.55)$$

$$R_{20} = \frac{R_1}{C_1} \quad (2.56)$$

R_1 = ความต้านทานลวดฮีตเตอร์ขณะร้อน

R_{20} = ความต้านทานขณะเย็น

ความยาวลวดขณะเย็น

$$L = \frac{R_{20}}{\left(\frac{\Omega}{m}\right)} \quad (2.57)$$

L = ความยาวลวดขณะเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 29 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก Khantahl Handbook กำหนดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดภายนอก และภายใน

$$\frac{D}{d} = 6 \quad (2.58)$$

จำนวนรอบของขดลวด

$$W = \frac{1000L}{\pi(D-d)} \quad (2.59)$$

ความยาวของขดลวด(L_w)

$$L_w = W \times d \quad (2.60)$$

จาก Khantahl Handbook กำหนด relative pitch เป็น

$$\frac{S}{d} = 2 \quad (2.61)$$

ความยาวของขดลวดเมื่อยึดตามระยะพิตช์

$$L_p = L_w (2) \quad (2.62)$$

จำนวนขดลวดที่ต้องใช้

$$\text{จำนวนขดลวดที่ต้องใช้} = \frac{L_p}{L_r} \quad (2.63)$$

L_r = ความยาวของเตาที่จะร้อยลวด

2.3.8 หลักการเกี่ยวกับการวัดและการควบคุม

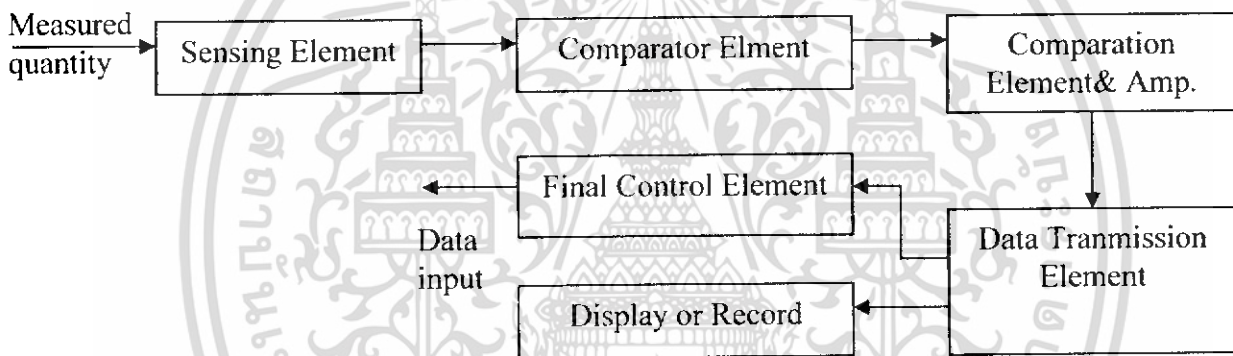
จุดประสงค์หลักของการใช้เครื่องมือและควบคุมทั่วไป คือ ต้องการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับตัวแปรมากพอที่จะใช้ตรวจสอบหรือควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ทั้งนี้เพื่อให้กระบวนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพสูง กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดด้วย บางกรณีเราไม่อาจวัดค่าตัวแปรต่างๆ ได้โดยตรง ซึ่งจำเป็นต้องใช้เทคนิคบางประการในการตรวจวัดและควบคุมตัวแปรเหล่านั้น ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อทำหน้าที่ วัดค่าตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการอย่างมากมาย นั่นคือ ทำให้กระบวนการวัดและการควบคุม สามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงนอกจากนี้การส่งค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการควบคุมก็สามารถกระทำได้ง่ายและส่งไปได้ในระยะทางไกลๆ

2.3.8.1 ระบบการวัดและการควบคุม

ส่วนประกอบของระบบการวัด และการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม อาจแบ่งออกเป็น ส่วนต่างๆตามหน้าที่การทำงานได้เป็น 4 ส่วน คือ

- 1) ส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการวัดและตรวจจับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่ต้องการจะควบคุม
- 2) ส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการวัดและเปรียบเทียบค่าตัวแปรที่วัดได้ และค่าที่กำหนดไว้
- 3) ส่วนขยายสัญญาณเพื่อการควบคุม เป็นส่วนที่จะนำเอาค่าตัวแปร ที่ได้จากส่วนเปรียบเทียบมาขยายและปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสมที่จะใช้ในการควบคุมต่อไป
- 4) ส่วนควบคุม เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับหรือเปลี่ยนขนาด ปริมาณ หรือ คุณสมบัติของตัวแปรบางประการ ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวแปรให้มีค่าตามการ

เนื่องจากระบบการทำงานของเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไป มีลักษณะการทำงานเหมือนๆ กันกล่าวคือ องค์ประกอบหรือหน่วยงานแต่ละหน่วยงานแต่ละหน่วยในเครื่องมือวัดจะทำงานคล้ายๆกัน ซึ่งอาจแสดงองค์ประกอบของหน่วยงานต่างๆ ในเครื่องมือวัด ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ระบบการวัดปริมาณต่างๆของเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 2.22 แสดงถึงระบบการวัดปริมาณต่างๆ ของเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมจะเห็นว่าประกอบด้วยหน่วยต่างๆที่สำคัญ 6 หน่วย คือ

- 1) Sensing element เป็นหน่วยตรวจจับปริมาณตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการวัดเช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ฯลฯ ที่หน่วยนี้จะส่งค่าออกมาเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ต้องการวัด ในกระบวนการเหล่านั้น
- 2) Comparator element เป็นหน่วยที่ทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากหน่วยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล และปริมาณที่ต้องการควบคุม (จากหน่วยควบคุม) ซึ่งผลต่างที่ได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการแสดงค่าควบคุมต่อไป
- 3) Conversion element and amplifier เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าที่ได้จากหน่วยแรกให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยที่อาจมีการขยายระดับของสัญญาณ หรือข้อมูลที่วัดได้ให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะชี้แสดงค่าหรือส่งข้อมูลไปยังหน่วยอื่นๆ ซึ่งการขยายปริมาณของตัวแปรที่วัดได้นี้จำเป็นต้องมีอัตราขยายที่คงที่ด้วยเพื่อที่จะให้ค่าที่อ่านได้นั้นถูกต้องแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 31 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

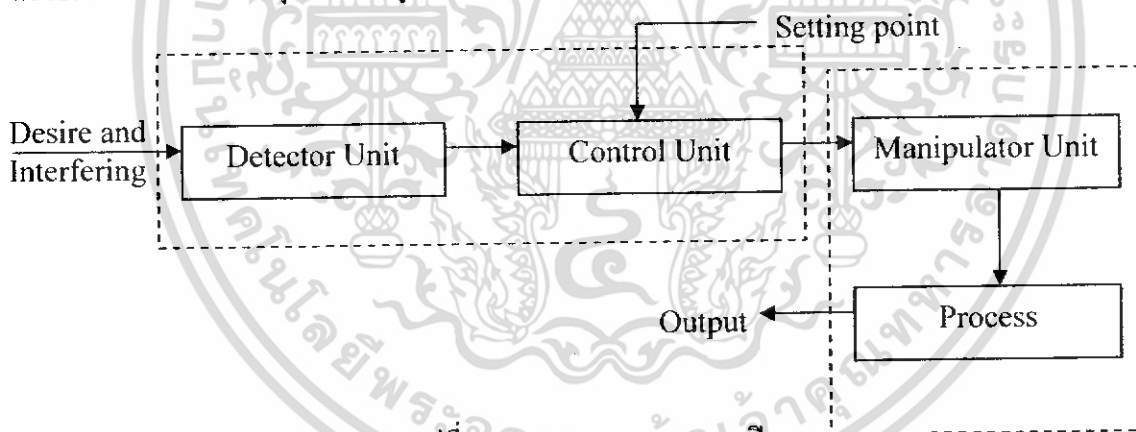
- 4) Data transmission element เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ถูกลบยให้มปริมาณที่เหมาะสมแล้วส่งไปยังหน่วยอื่น ๆ ซึ่งอาจส่งไปยังหน่วยแสดงผล หรือหน่วยควบคุมก็ได้
- 5) Display or recorder เป็นหน่วยแสดงผลข้อมูล ซึ่งอาจเป็นเครื่องมือที่ชี้บอกค่าต่างๆ ที่วัดได้ หรืออาจเป็นหน่วยที่สามารถทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่วัดได้ทุกขณะ
- 6) Final control element เป็นหน่วยควบคุมปริมาณที่ต้องการวัด และต้องการควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมตามความต้องการ สำหรับที่หน่วยนี้อาจประกอบด้วยหน่วยกำหนดค่าเป้าหมาย (Setting value) เพื่อใช้กำหนดปริมาณที่ต้องการควบคุม และนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณที่วัดได้จากหน่วยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ

2.3.9 ระบบควบคุม

ในที่นี้จะหมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยเครื่องมือวัดและอุปกรณ์การควบคุมรวมอยู่ด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่าง อัตโนมัติ ระบบควบคุมแบบวงจรมเปิด (Open loop control system)

2.3.9.1 ระบบควบคุมแบบวงจรมเปิด

เป็นระบบที่ไม่มีการติดตามผลเพื่อปรับเปลี่ยนค่าภายในวงจร กล่าวคือ หลังจากที่มีการควบคุมโดยส่งสัญญาณควบคุมไปแล้วจะไม่มีการติดตามผลที่เกิดขึ้นใหม่ เพื่อทำการปรับแต่งสัญญาณการควบคุมให้เหมาะสมต่อไปเลย แสดงระบบควบคุมแบบนี้ดังรูป 2.23



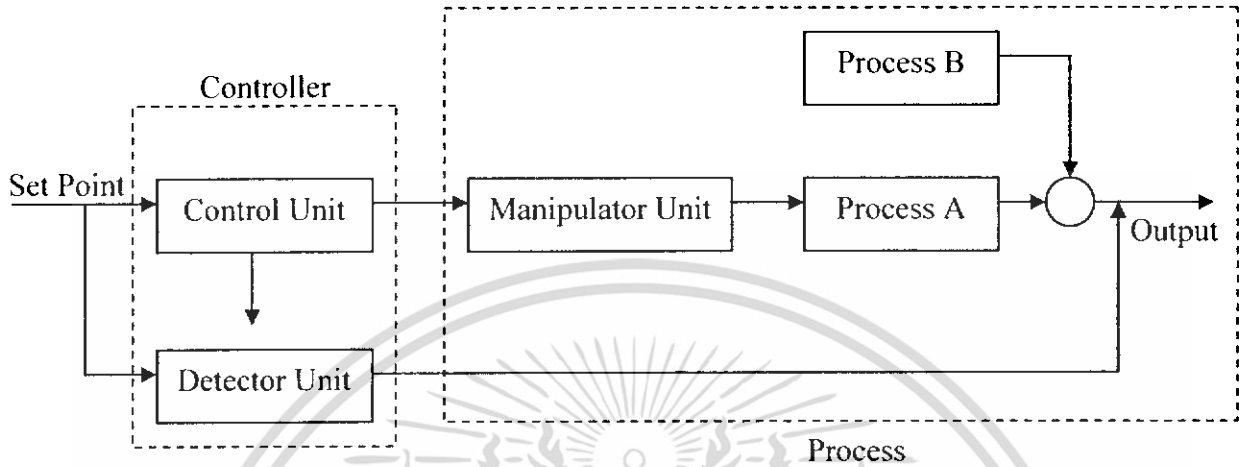
รูปที่ 2.23 ระบบการควบคุมวงจรมเปิด

จากรูป 2.23 แสดงระบบการควบคุมแบบวงจรมเปิด จะเห็นว่าค่าของตัวแปรในกระบวนการและสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากสาเหตุใดๆ ก็ตาม เป็นสัญญาณเข้าของระบบ (ถูกวัดด้วยเครื่องมือวัด) ต่อมาจะเป็นสัญญาณเข้าหน่วยควบคุมระบบ (Control unit) ซึ่งเราสามารถปรับระดับหรือปริมาณที่ต้องการควบคุมได้ จากนั้นค่าที่ปรับได้จึงเข้าสู่กระบวนการ (Process) จากรูปอาจกล่าวได้ว่าภายหลังจากที่มีการปรับค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมแล้วจะไม่มีการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงใดๆ อีกเลย ทั้งนี้ทำให้การควบคุมกระบวนการนั้นๆ อาจไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการก็ได้ ซึ่งระบบการควบคุมแบบนี้ผู้ใช้หรือผู้ควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิตจำต้องคอยตรวจสอบและปรับค่าตัวแปรที่วัดได้อยู่ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 32 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.9.2 ระบบควบคุมแบบวงจรรปิด

เป็นระบบที่มีการติดตามผลภายหลังจากการปรับแต่งภายในแล้ว โดยมีการวัดค่าตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการอยู่ตลอดเวลาว่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ต้องการหรือยัง ทั้งนี้เพื่อนำไปปรับแต่งสัญญาณควบคุมสำหรับการควบคุมต่อไป



รูปที่ 2.24 ระบบการควบคุมวงจรรปิด

จากรูป 2.24 แสดงระบบการควบคุมแบบวงจรรเปิด จะเห็นว่าคล้ายกับระบบการควบคุมแบบวงจรรเปิด แต่ที่หน่วยควบคุม (Controller) จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกภายหลังจากการปรับแต่งปริมาณที่ต้องการควบคุมแล้ว ต่อมาสัญญาณที่ตรวจจับ ได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายเพื่อทำการควบคุมระบบต่อไป หากค่าผลลัพธ์นั้นยังไม่เข้าใกล้หรือเท่ากับค่าเป้าหมายที่ต้องการระบบควบคุมสามารถจะปรับตัวเองได้อย่างอัตโนมัติจนกว่าจะถึงค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ สำหรับขั้นตอนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบวงจรรปิดนี้อาจประกอบด้วย

- 1) การตรวจวัดค่าที่ต้องการควบคุมว่าต่างจากค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเพียงใด โดยอาศัยอุปกรณ์การวัดในลักษณะต่างๆ
- 2) อุปกรณ์ควบคุมที่ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณความแตกต่างระหว่างค่าผลลัพธ์หลังจากที่ถูกควบคุมแล้วและค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ แล้วจึงส่งไปควบคุมกระบวนการต่อไป เพื่อให้ค่าตัวแปรของกระบวนการถูกต้องตามต้องการ
- 3) หากปรากฏว่ายังมีค่าต่างจากค่าเป้าหมายอีก อุปกรณ์ตรวจวัดจะทำการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการและดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ ในขั้นตอนต่างๆ ในข้อ 1 และ 2 อีก จนกระทั่งค่าตัวแปรที่วัดได้เป็นค่าที่ต้องการจึงสิ้นสุดการควบคุม

จากระบบควบคุมที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสองกรณีนี้จะเห็นว่ามีส่วนแตกต่างกันในส่วนของการควบคุม ซึ่งในระบบการควบคุมแบบวงจรรปิดนี้เป็นระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติและเป็นที่ยอมรับกันอย่างมากในปัจจุบัน

บทที่ 3

การดำเนินงาน

3.1 การวางแผนการดำเนินงาน

ในการดำเนินงาน จะแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control)

- 1) การออกแบบส่วนเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด
- 2) การคัดเลือกและกำหนดวัสดุที่นำมาใช้
- 3) การจัดสร้างเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด
- 4) การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม
- 5) การทดลองการทำงานทุกส่วนของเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด
- 6) สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง
- 7) สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินงาน

3.2 คุณสมบัติของเตาที่ต้องการ

- 1) เป็นเตาที่ทำงานโดยใช้พลังงานจากไฟฟ้า
- 2) สามารถสร้างเตาอบเพื่อนำมาใช้อบชิ้นงาน ณ อุณหภูมิที่ต้องการก่อนการชุบแข็ง
- 3) จัดสร้างเตาอบ ฟลูอิด ไดซ์ เบด ที่ให้อุณหภูมิในการอบไม่เกิน 850 °C
- 4) นำอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในของเตาอบแบบ ฟลูอิด ไดซ์ เบด

3.3 ทำการเลือกและกำหนดวัสดุที่นำมาใช้

การเลือกซื้อวัสดุและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ ควรมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมในหลายด้าน เช่น คุณสมบัติ ราคา และคุณภาพ เพื่อให้การจัดสร้างเตาอบเป็นไปตามจุดประสงค์ที่กำหนด

3.3.1 คอนกรีตทนไฟ (Castable refractories)

คอนกรีตทนไฟ เป็นวัสดุทนไฟชนิดหนึ่งที่ทำด้วยคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไป สามารถหล่อเป็นโครงสร้างเตาได้โดยไม่มีรอยต่อ มีคุณสมบัติทนไฟ หรือทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีเช่นเดียวกับอิฐทนไฟ ส่วนผสมประกอบไปด้วยซีเมนต์ทนไฟและเม็ดวัสดุทนไฟหลายชนิดที่มีสัดส่วนพอเหมาะ ซึ่งเมื่อผสมน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดแล้วจะให้ความแข็งแรง สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกรวดเร็วขจัดปัญหาเรื่องตัดอิฐให้เข้ารูปและเหมาะสำหรับใช้งานบริเวณโครงสร้างที่ไม่สามารถก่ออิฐได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานคอนกรีตทนไฟ

วัสดุ	คุณภาพ	อุณหภูมิที่ใช้งานสูงสุด°C
คอนกรีตทนไฟ [CASTABLE]	CAST 17 CG	1,700
คอนกรีตทนไฟ [CASTABLE]	CAST 15	1,500
คอนกรีตทนไฟ [CASTABLE]	CAST 13	1,300
คอนกรีตทนไฟ [CASTABLE]	CAST 11 LW	1,100

รูปที่ 3.1 คอนกรีตทนไฟแบบแห้งที่ทนความร้อนอุณหภูมิสูงสุด 1300° C

3.3.1.1 เทคนิคการเลือกใช้คอนกรีตทนไฟ

ในการเลือกคอนกรีตทนไฟไปใช้งานจะต้องเลือกชั้นคุณภาพของคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน โดยสิ่งที่ควรนำมาพิจารณาเบื้องต้น ได้แก่

- 1) อุณหภูมิการใช้งาน
- 2) ปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพของตะกรันที่เกิดขึ้น รวมทั้งสภาพของอัลคาไลด้วย
- 3) การรับน้ำหนัก
- 4) การเสียดสีจากของแข็งและของไหล
- 5) การดกกระทบของเปลวไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 35 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 การเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดแห้ง

การเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดแห้งที่สามารถนำมาใช้งานได้ จะต้องทำให้กลายเป็นคอนกรีตแบบเหลวเสียก่อน โดยขั้นตอนในการเตรียมคอนกรีตทนไฟมีดังนี้

- 1) ตวงน้ำสะอาดที่ใช้ผสมคอนกรีตทนไฟตามเปอร์เซ็นต์ที่กำหนดไว้ที่ถูกต้อง
- 2) โรยผงคอนกรีตทนไฟลงในถุงผสมทีละน้อยจนหมด ขณะเดียวกันให้ทำการกวนด้วยใบพัดหรือไม้กวนมือตลอดเวลา
- 3) ทำการกวนจนกว่าคอนกรีตทนไฟจะเป็นเนื้อเดียวกันและเหนียวพอเหมาะกับการใช้งาน
- 4) ถ้าเป็นชนิดแห้งแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องควรหมักทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และต้องกวนอีกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

3.3.1.3 การเก็บรักษาคอนกรีตทนไฟ

ควรเก็บไว้ในที่แห้งและไม่ชื้นและอย่าให้ถูกน้ำ จัดเก็บแยกประเภทและคุณภาพเพื่อให้ง่ายต่อการนำมาใช้งาน ไม่ควรกองเก็บโดยวางซ้อนกันเกิน 2 กระบะ เพราะจะทำให้คอนกรีตทนไฟอัดกันแข็งเป็นก้อน ควรใช้คอนกรีตทนไฟให้หมด หากเหลือควรรดน้ำหรือปิดฝาถังคอนกรีตให้สนิท เพื่อไม่ให้คอนกรีตทนไฟแข็งตัวและไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้

3.3.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลมีหลายรูปแบบอย่างเช่น เทอร์โมคัปเปิลแบบ J,K,T,E,N,R และ S ซึ่งแต่ละแบบก็จะมี ลักษณะ คุณสมบัติและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน เทอร์โมคัปเปิลชนิด แบบ เค (Type K) เป็นแบบที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -270 ถึง 1372 องศาเซลเซียสและเหมาะกับคุณสมบัติของเตาอบที่จะสร้าง ดังนั้นจึงเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ เค (Type K) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 36 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.1 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิล

- 1) เป็นเทอร์โมคัปเปิล แบบเค (Type K)
- 2) สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -270° c ถึง 1370° c
- 3) ใช้หลอดป้องกัน (Protection tube) แบบเซรามิก ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ถึง 1600° c
- 4) เอลลิเมนต์ (Element) ภายในที่ใช้เป็นแบบ single 2 เส้น
- 5) การเชื่อมปลายเทอร์โมคัปเปิลแบบ Ungrounded ซึ่งมีผลคือไฟไม่ช็อตและไฟไม่ย้อนกลับ
- 6) สายสัญญาณใช้แบบ Shield และ Glass braided ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 200° c นอกจากนี้ยังสามารถกันสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี

3.3.3 ลวดฮีตเตอร์ (Heater coils)

เป็นโลหะผสมของ Kanthal และ Nikrothal มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงมาก แต่เมื่อนำไปยึดที่อุณหภูมิสูงแล้วความสามารถในการทนแรงดึง และความยืดหยุ่นจะลดลง โลหะบางจะยังคงมีความเหนียวดีหลังใช้งานหลายๆปี สภาพการยึดตัว (Plasticity) ของโลหะ Kanthal จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1100° c การยึดตัวเป็นไปอย่างช้าๆ โดยน้ำหนักของมันเอง ลวดความต้านทานไม่ควรนำไปสัมผัสกับวัสดุพวก Non-ferrous ในระหว่างการผลิต การตัดด้วยเครื่องมือที่เป็นเหล็กอาจใช้ได้ในกรณีที่เป็น วัสดุที่จะนำมาผ่านกระบวนการผลิตจะต้องสะอาดปราศจากรอยสกปรก



รูปที่ 3.3 ลวดฮีตเตอร์ (Heater coil)

3.3.4 เซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic fiber)



รูปที่ 3.4 เซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic fiber)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 37 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเซรามิกไฟเบอร์ชนิด ST BLOWN มีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายแผ่นสั๊กหลอด ลักษณะเป็นขดใช้แทนแผ่นผ้าใยสังเคราะห์ มีคุณสมบัติสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260 ° c มีความหนาแน่น 96 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ถึง 128 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยมีขนาด 25x600x7200 มิลลิเมตร มีเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์แต่ที่ 1000 ° c กำลังต้านทานการดึงเท่ากับ 0.08-0.12 เมกะปาสคาล มีสีขาว มีสภาพนำความร้อนเป็นดังตาราง ที่ความหนาแน่นที่128 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ตารางที่ 3.2 สภาพการนำความร้อน

อุณหภูมิ (° c)	สภาพการนำความร้อน (w/m ² k)
400	0.10
800	0.22
1000	0.27

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางเคมี (เป็นเปอร์เซ็นต์)

สารประกอบ	คุณสมบัติทางเคมี (เปอร์เซ็นต์)
Al ₂ O ₃	45-46
SiO ₂	51-52
Fe ₂ O ₃	1.0

3.3.5 มานอมิเตอร์ (Manometer)

มานอมิเตอร์นี้ใช้วัดความแตกต่างของความดันภายในท่อระหว่าง 2 จุด ซึ่งปกติแล้วมานอมิเตอร์จะมีลักษณะเป็นแท่งแก้ว หรือพลาสติกงอโค้งโดยปลายข้างหนึ่งเสียบอยู่ที่ใต้แผ่นกระจายและปลายอีกข้างเสียบอยู่บนผิวเบด หลอดมานอมิเตอร์ประกอบไปด้วยของเหลวซึ่งเป็นที่ทั้งน้ำและปรอท โดยการวัดจะเปรียบเทียบความสูงของระดับของเหลวทั้งสองข้างเพื่อนำมาคำนวณตามสมการ

$$\Delta P = \rho gh \quad (3.1)$$

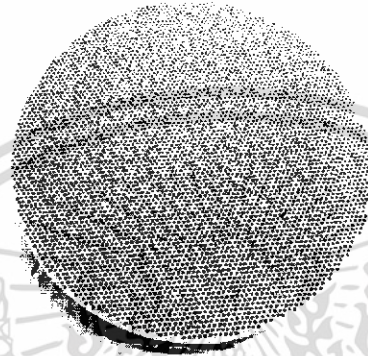
3.3.6 เหล็ก (Checked plates)

เหล็กที่ใช้ขึ้นโครงเตาอบเป็นเหล็กแผ่นลายตีนเป็ดความหนา 6 มิลลิเมตร ขนาด 1.2 x 2.4 เมตร มีคุณสมบัติในการเสีรูปยากและเชื่อมต่อกันได้ง่าย ในส่วนขาตั้งเตาใช้เหล็กท่อ API 5L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ทนอุณหภูมิ 1800 ° c ขึ้นโครงโดยเชื่อมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 38 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 แผ่นกระจายของไหล (Distributer plate)

แผ่นกระจายของไหลที่ใช้เป็นแบบแผ่นอัด (Sintered plate) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคหล่นลงสู่ด้านล่าง และอนุญาตให้ของไหลไหลผ่านได้ โดยสามารถกระจายของไหลที่เข้าสู่ห้องอบในปริมาณที่สม่ำเสมอทุกพื้นที่ ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลจะมีค่าเท่ากันทุกจุด แผ่นกระจายลมทำจากเซรามิก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 170 มิลลิเมตร ความหนา 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกระจาย 1.3 มิลลิเมตร สามารถทนอุณหภูมิสูงสุด 1300 °c ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แผ่นกระจายวงกลม

3.3.8 โบลเวอร์ (Blower)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป่าลมเข้าสู่เตาอบ ประกอบด้วย มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า และพัดลมที่สามารถทำงานได้ทั้งแบบ Forward และแบบ Backward ดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 โบลเวอร์ (Blower)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 39 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจัดสร้างเตาอบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

กระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือการจัดสร้างเตาอบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมให้เป็นไปตามการออกแบบ ซึ่งมีกระบวนการตามลำดับดังนี้

3.3.1 จัดสร้างโครงเตาหลักและรอง

ใช้เหล็กแผ่นลายตีเปิดเป็นโครงภายนอก โดยใช้การเชื่อมไฟฟ้าติดกันเป็นทรงกระบอกแปดเหลี่ยมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 279 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนคือ โครงภายนอกห้องอบหลักและโครงภายนอกห้องอบรองดังรูป

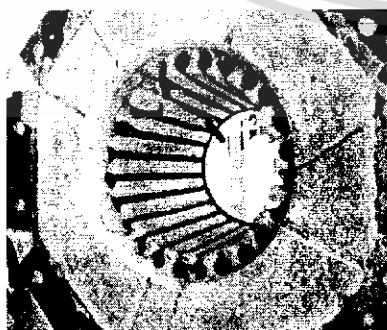


รูปที่ 3.7ก โครงภายนอกห้องอบหลัก

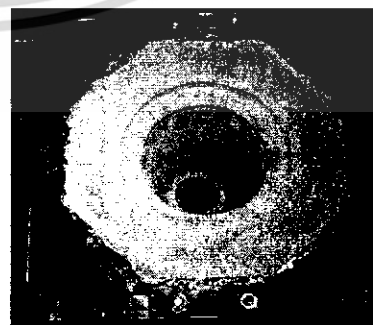
รูปที่ 3.7ข โครงภายนอกห้องอบรอง

3.3.2 สร้างห้องอบหลักและห้องอบรอง

ทำการขึ้นรูปห้องอบโดยเทคอนกรีตเปียกลงในโครงเตาที่จัดเตรียมไว้แล้ว พร้อมกลับใส่แบบโฟมที่เคล้าขึ้นรูปไว้ด้านใน เมื่อคอนกรีตแห้ง จึงทำการถอดแบบออก จะได้ห้องอบหลักและห้องอบรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 179 มิลลิเมตร โดยภายในห้องอบหลักจะมีร่องสำหรับใส่ลวดฮีตเตอร์ 24 ร่อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางร่อง 13 มิลลิเมตร และภายในห้องอบรองมีลักษณะทรงกรวยผิวเรียบเรียบ ดังรูปที่ 3.8ก และ 3.8ข



รูปที่ 3.8ก ห้องอบหลัก

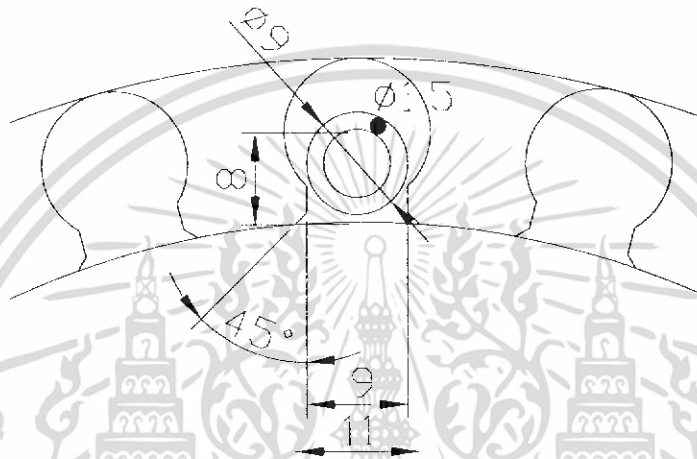


รูปที่ 3.8ข ห้องอบรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 40 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การใส่ขดลวดฮีตเตอร์

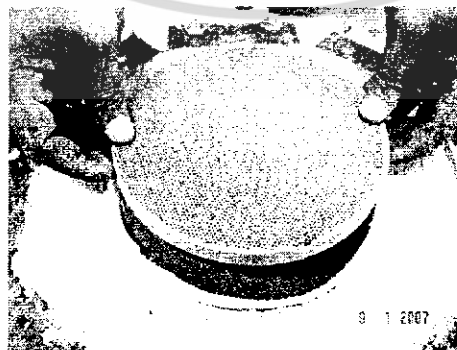
ลักษณะการวางขดลวดฮีตเตอร์ จะเป็นไปตามแบบห้องอบหลักที่ขึ้นรูปไว้ และมีลักษณะยื่นออกมาทางด้านข้างของร่องสำหรับใส่ลวดดังรูปที่ 3.8 ขดลวดฮีตเตอร์เป็นแบบ 3 เฟส มีจำนวนขดลวด 24 ขด ซึ่งเชื่อมต่อกันเป็นเส้นเดียว เมื่อใส่ลงในร่องสำหรับใส่ลวดภายในเตาจะเหลือปลายขดลวดอยู่ 2 นิ้ว ใช้สำหรับต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ที่จะมาป้อนเข้าขดลวด ขดลวดทั้ง 24 ขดจะอยู่ภายในเตา มีเพียงปลายขั้วทั้งสองเท่านั้นที่ยื่นออกมาภายนอกของเตา



รูปที่ 3.9 แบบการแกะร่องสำหรับใส่ขดลวดฮีตเตอร์ในห้องอบหลัก

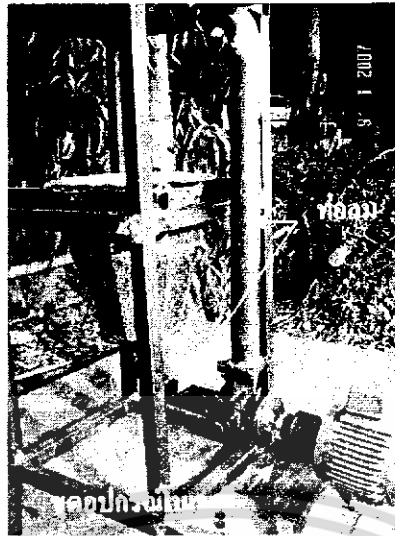
3.3.4 ติดตั้งแผ่นกระจายลม (Distributer plate) และชุดอุปกรณ์โบเวอร์ (Blower)

นำแผ่นกระจายลมวางในเบ้าที่อยู่ระหว่างห้องอบหลักและห้องอบรอง ดังรูปที่ 3.10 ทำการต่อชุดอุปกรณ์โบเวอร์โดยทำการเชื่อมต่อลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรไว้ด้านข้างของเตาอบ ปลายอีกข้างของท่อลมต่อเข้ากับด้านบนของชุดอุปกรณ์โบเวอร์ เพื่อทำหน้าที่นำลมออกจากห้องอบ และเชื่อมต่อลมอีกท่อที่ด้านล่างของเตาอบ ปลายอีกข้างต่อเข้ากับด้านหน้าของชุดอุปกรณ์โบเวอร์ เพื่อทำหน้าที่เป่าลมเข้าสู่ห้องอบ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ติดตั้งแผ่นกระจายลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 41 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ติดตั้งท่อลม

3.3.5 จัดสร้างและติดตั้งฝากรอบตัวเตาอบ

ใช้เหล็กคืนเปิดเชื่อมเป็น โครงด้านนอกขนาดกว้าง 370 มิลลิเมตร ยาว 370 มิลลิเมตร ภายใบบรรจุด้วยเซรามิกไฟเบอร์ 3 ชั้น ฝากรอบมีความหนารวมทั้งสิ้น 30 มิลลิเมตร ติดตั้งฝากรอบด้วยบานพับ 2 ตัวเข้ากับตัวเตา ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ฝากรอบและการติดตั้งฝากรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา⁴² ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 ติดชุดฉนวนกันความร้อนและหุ้มตัวเตา

ประกอบห้องอบหลักกับห้องอบรองเป็นชั้นเดียวกัน ซัดด้วยน็อต M10 ความยาว 1.5 นิ้ว รองนัตด้วยแหวนสปริง ด้านนอกหุ้มด้วยเซรามิคไฟเบอร์ 2 ชั้น ดังรูป 3.13 และหุ้มเหล็กแผ่นรอบเตา มีขนาด กว้าง 476 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร สูง 1000 มิลลิเมตร ดังรูป 3.14



รูปที่ 3.13 ติดตั้งชุดฉนวนกันความร้อน

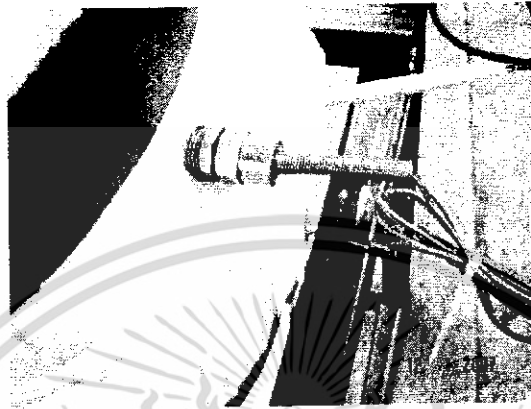


รูปที่ 3.14 หุ้มแผ่นเหล็กรอบตัวเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา⁴³ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุม

ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปในเตาอบ ให้ปลายของเทอร์โมคัปเปิลอยู่ภายในเบด ที่ความสูง 7 เซนติเมตรเหนือแผ่นกระจายลม ซึ่งเป็นจุดเดียวกันกับที่วางชิ้นงาน ดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

ติดตั้งชุดแมกเนติกคอนแทคเตอร์เข้ากับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และขดลวดฮีตเตอร์ โดยกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการ ณ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ตัวควบคุมอุณหภูมิจะส่งสัญญาณให้แก่ขดลวดฮีตเตอร์ เพื่อทำให้เกิดความร้อนภายในเตาขึ้น เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ชุดแมกเนติกคอนแทคเตอร์จะทำการตัดสัญญาณเพื่อให้ขดลวดฮีตเตอร์หยุดการทำงาน รูปที่ 3.16 และ 3.17 แสดงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและชุดแมกเนติกคอนแทคเตอร์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.17 ชุดแมกเนติกคอนแทคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 44 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการจัดสร้างเตาอบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

ได้เตาอบแบบฟลูอิดไดซเบด มีความกว้าง 47.6 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร ตัวเตาอบต่อเข้ากับตู้อุปกรณ์ควบคุมขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร และสูง 45 เซนติเมตร



รูปที่ 4.1 เตาอบแบบฟลูอิดไดซเบดและตู้ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 46 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการคำนวณการจัดสร้างเตาอบ

ในการออกแบบเตาอบแบบฟลูอิดไคซ์เบดจะใช้คู่มือของ Kanthal เป็นหลักและจะใช้ทฤษฎีทาง Thermodynamics มาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่มีความถูกต้องมากที่สุด

4.2.1 การคำนวณทฤษฎีฟลูอิดไคซ์เซชัน

4.2.1.1 การหาความสูงที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน

จากสมการ 2.1

$$\frac{L_0}{L_{mf}} = \frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_0}$$

คำนวณ

$$\frac{24}{L_{mf}} = \frac{1 - 0.062}{1 - 0.048}$$

$$L_{mf} = 24.36 \text{ เซนติเมตร}$$

เมื่อ

L_0 คือความสูงของเบด ณ เวลาเริ่มต้น ($t=0$)

L_{mf} คือความสูงของเบดเมื่อเกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน

ϵ_{mf} คือสัดส่วนช่องว่างขณะเกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน

ϵ_0 คือสัดส่วนช่องว่างขณะเบดนิ่ง

4.2.1.2 การหาความดันตกค่อมในเบด

จากสมการ 2.5

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \left(\frac{g}{g_c} \right)$$

$$\Delta P_b = P_3 - P_4 = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \left(\frac{g}{g_c} \right)$$

คำนวณ

$$\Delta P_b = 24.36 (1 - 0.062) (1.7 \times 10^3 - 1.29) (9.81 / 9.81) \\ = 38773.6 \text{ ปาสกาล}$$

เมื่อ

ΔP_b คือค่าความดันตกค่อมในเบด (กิโลปาสกาล)

ρ_s คือค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัม/ลบ.ม.)

ρ_g คือค่าความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/ลบ.ม.)

g คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที²)

g_c คือค่าแปลงหน่วยของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 47 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.3 ความเร็วที่เริ่มทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน

คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 30°C

$$\rho_g = 1.29 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 186.016 \times 10^{-7} \text{ N-s/m}^2$$

จากสมการ 2.10

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g (\epsilon_{mf})^3}{150 \mu (1 - \epsilon_{mf})}$$

$$= \frac{(1 \times 1.5 \times 10^3)^2 (1.7 \times 10^3 - 1.29) \times 1.98 \times 0.062^3}{150 \times 186.016 \times 10^{-7} \times (1 - 0.062)}$$

คำนวณ

$$= 2.276 \text{ ลบ.ม.ต่อวินาที}$$

เมื่อ

ϕ_s คือความกลมเทียบเท่าอนุภาคของของแข็ง
 μ คือความหนืดสมบูรณ์
 d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่า

4.2.1.4 ความดันลดบนแผ่นกระจาย

จากสมการ 2.25

$$\Delta P_{d,min} = \text{Max}(0.1 \Delta P_p)$$

$$= 0.1(38773.6) \text{ ปาสคาล}$$

$$= 3877.36 \text{ ปาสคาล}$$

4.2.2 การคำนวณทฤษฎีการจัดรางเตาอบ

4.2.2.1 กำลังไฟฟ้า (Power)

$$\text{กำหนดปริมาตรภายในเตา} = \pi \times \frac{179^2}{4} \times 385 \text{ mm}$$

$$= 9.7 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$= 9.7 \text{ dm}^3$$

จากรูปที่ 2.20 หน้า 27 เมื่อเทียบปริมาตรภายในเตากับอุณหภูมิจะได้กำลังไฟฟ้าของเตา = 2.5 kw และจากรูปที่ 2.21 หน้า 28 กำหนดภาระที่ผิวของสวดความต้านทานเมื่อกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ = 2.5 W/cm²

4.2.2.2 ขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด

อุณหภูมิของผิวขดลวดความร้อน = 850°C

จากสมการ 2.54

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt{\left(\frac{P}{v}\right)^2 \frac{\rho C_t}{p}}$$

คำนวณ

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt{\left(\frac{6 \times 10^3}{220 \times 3}\right)^2 \frac{1.39 \times 1.05}{2.5}} = 1.251 \text{ mm.}$$

เมื่อ

- P คือกำลังไฟฟ้า (วัตต์)
- v คือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)
- ρ คือความต้านทานจำเพาะของฮีตเตอร์
- C_t คือสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของฮีตเตอร์
- p คือ Surface Load ของฮีตเตอร์ (วัตต์/ตร.ซ.ม.)

4.2.2.3 การออกแบบลวดชนิดขดเป็นกอลย์

จากสมการ 2.55

$$R_1 = \frac{v^2}{P}$$

คำนวณ

$$R_1 = \frac{(220)^2}{\left(\frac{6000}{3}\right)} = 24.2 \text{ โอห์ม}$$

เมื่อ

- R_1 คือความต้านทานลวดฮีตเตอร์ขณะร้อน (โอห์ม)

จากสมการ 2.56

$$R_{20} = \frac{R_1}{C_t}$$

คำนวณ

$$R_{20} = \frac{24.2}{1.05} = 23.05 \text{ โอห์ม}$$

เมื่อ

- R_{20} คือความต้านทานขณะเย็น (โอห์ม)

เมื่อพิจารณาความต้านทานต่อความยาวลวด 1.5 ม.ม. คือ 0.787 โอห์ม/เมตร

จากสมการ 2.57 ความยาวของขดลวดที่ต้องตัด = 23.05/0.787

$$= 29 \text{ เมตร/เฟส}$$

จาก Khanthal Handbook กำหนดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดภายนอกและภายใน

จากสมการ 2.58

$$\frac{D}{d} = 6$$

คำนวณ

$$D = 6 \times 1.5 = 9 \text{ mm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 49จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.4 จำนวนรอบของขดลวด

จากสมการ 2.58

$$W = \frac{1000L}{\pi(D-d)}$$

คำนวณ

$$W = \frac{(1000 \times 29)}{\pi(9-1.5)}$$

$$W = 1230.8 \text{ รอบ}$$

4.2.2.5 ความยาวของขดลวด(L_w)

จากสมการ 2.60

$$L_w = W \times d$$

คำนวณ

$$L_w = 1230.8 \times 1.5 = 1846.2 \text{ mm.}$$

4.2.2.6 ความยาวของขดลวดเมื่อยึดตามระยะพิตช์

จากสมการ 2.62

$$\begin{aligned} L_p &= L_w \times 2 \\ &= 1846.2 \times 2 = 3692.4 \text{ mm.} \end{aligned}$$

ความยาวของเตาที่จะร้อยลวด

จากสมการ 2.63

$$L_r = \pi \times 179 \text{ mm.} = 562.35 \text{ mm.}$$

จำนวนขดลวดที่ต้องใช้

$$= 3692.4 / 562.35 \text{ mm.} = 6.57 \text{ mm.}$$

เลือกใช้ 8 ขด/เฟส ใช้ทั้งหมด 3 เฟส รวมเป็น 24 ขด

4.2.3 การคำนวณความร้อนโดยใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์

จากสมการ 2.33

$$R_{l,cond} = \frac{L}{kA}$$

ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตทนไฟ = 0.157 W/m.k

$$\text{ค่าความต้านทานของคอนกรีตทนไฟ} = \frac{101 \times 10^{-3}}{0.157 \times 559.2 \times 385 \times 10^{-6}} = 2.99 \text{ k/W}$$

ค่าการนำความร้อนของเหล็กดินเป็ด = 48 W/m.k

$$\text{ค่าความต้านทานของเหล็กดินเป็ด} = \frac{3 \times 10^{-3}}{48 \times 116 \times 385 \times 8 \times 10^{-6}} = 1.7 \times 10^{-4} \text{ k/W}$$

ค่าการนำความร้อนเซรามิกไฟเบอร์ = 0.27 W/m.k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 50% ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ค่าความต้านทานเซรามิกไฟเบอร์} = \frac{20 \times 10^{-3}}{0.27 \times 885.93 \times 385 \times 10^{-6}} = 0.22 \text{ k/W}$$

$$\text{ค่าการนำความร้อนของเหล็กหุ้มเตา} = 50 \text{ W/m.k}$$

$$\text{ค่าความต้านทานเหล็กหุ้มเตา} = \frac{2 \times 10^{-3}}{50 \times 674520 \times 10^{-6}} = 5.93 \times 10^{-5} \text{ k/W}$$

ค่าความต้านทานรอบเตาอบหลัก

$$\text{ค่าความต้านทานรวม} = 2.99 + 1.4 \times 10^{-3} + 0.22 + 5.93 \times 10^{-5} = 3.21 \text{ k/W}$$

ความร้อนสูญเสียรอบเตาอบหลัก

จากสมการ 2.40

$$q_x = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{\sum R_i}$$

$$q_x = \frac{(850 - 37)}{3.21} = 0.253 \text{ kW}$$

ค่าความต้านทานที่ฝาครอบเตา

$$\text{ค่าความต้านทานเซรามิกไฟเบอร์} = \frac{30 \times 10^{-3}}{0.27 \times 25164.94 \times 10^{-6}} = 4.42 \text{ k/W}$$

$$\text{ค่าความต้านทานของเหล็กดินเผา} = \frac{3 \times 10^{-3}}{48 \times 25164.94 \times 10^{-6}} = 2.48 \times 10^{-3} \text{ k/W}$$

$$\text{ค่าความต้านทานรวม} = 4.42 + 2.48 \times 10^{-3} = 4.42 \text{ k/W}$$

ความร้อนสูญเสียที่ฝาครอบเตา

$$q_x = \frac{(850 - 37)}{4.42} = 0.184 \text{ kW}$$

$$\text{การสูญเสียความร้อนทั่วทั้งเตา} = 0.184 + 0.253 = 0.437 \text{ kW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 51 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเตาอบแบบฟลูอิดไคซ์เบค

4.3.1 ชื่อการทดลอง

การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเตาอบแบบฟลูอิดไคซ์เบคที่อุณหภูมิ 800 °C และ 850 °C

4.3.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. ทดสอบการให้ความร้อนของเตาอบแบบฟลูอิดไคซ์เบค
2. ทดสอบการทำงานของวงจรถวลคุม
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

4.3.3 อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาอบแบบฟลูอิดไคซ์เบค
2. ตู้ควบคุม
3. ทรายซิลิกา 5 กิโลกรัม

4.3.4 วิธีทำการทดลอง

1. เปิดสวิทช์อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเตาอบ
2. ตั้งค่าตัวควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง 37 °C
3. เมื่ออุณหภูมิภายในเตาอบที่ทำการปรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการไปที่ 800 °C
4. เก็บค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนไป จากเทอร์โมคัปเปิล
5. เมื่อเตาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ทำการหยุดการทำงานของเตา
6. ทำการทดลองซ้ำ โดยปรับอุณหภูมิที่ต้องการไปที่ 850 °C แล้วทำการเก็บค่า เพื่อนำมาสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.3.5 ผลการทดลอง

การทดลองส่งผ่านความร้อนโดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดและจับเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1ก ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C (ครั้งที่ 1)

เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)
0	37	27	217	54	402	81	587	108	769
1	44	28	223	55	409	82	594	109	776
2	50	29	230	56	416	83	601	110	783
3	57	30	244	57	423	84	608	111	790
4	63	31	251	58	429	85	614	112	797
5	70	32	258	59	436	86	621	113	802
6	77	33	265	60	443	87	628	114	810
7	85	34	272	61	450	88	635	115	817
8	91	35	279	62	457	89	642	116	823
9	98	36	283	63	464	90	649	117	831
10	105	37	289	64	471	91	656	118	838
11	114	38	296	65	477	92	662	119	845
12	118	39	303	66	484	93	669	120	852
13	124	40	308	67	491	94	676	121	847
14	132	41	315	68	498	95	682	122	843
15	137	42	322	69	505	96	689	123	839
16	144	43	329	70	512	97	696	124	832
17	150	44	335	71	518	98	702	125	827
18	157	45	342	72	525	99	709	126	824
19	163	46	347	73	532	100	716	127	820
20	170	47	354	74	539	101	723	128	815
21	178	48	361	75	546	102	730	129	808
22	185	49	368	76	553	103	737	130	802
23	191	50	375	77	560	104	743	131	800
24	198	51	381	78	566	105	748	132	798
25	204	52	389	79	573	106	755	133	801
26	209	53	395	80	580	107	762		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 53 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1๗ ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C (ครั้งที่ 2)

เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)
0	37	27	219	54	403	81	586	108	769
1	43	28	226	55	409	82	592	109	775
2	49	29	231	56	416	83	599	110	782
3	56	30	241	57	423	84	606	111	789
4	65	31	252	58	430	85	613	112	796
5	70	32	258	59	437	86	620	113	802
6	78	33	267	60	443	87	626	114	809
7	85	34	272	61	450	88	633	115	816
8	92	35	276	62	457	89	640	116	823
9	98	36	282	63	464	90	647	117	830
10	107	37	287	64	470	91	653	118	836
11	113	38	296	65	477	92	660	119	843
12	119	39	301	66	484	93	667	120	850
13	125	40	306	67	491	94	674	121	844
14	132	41	312	68	498	95	681	122	839
15	139	42	319	69	504	96	687	123	833
16	146	43	325	70	511	97	694	124	825
17	153	44	334	71	518	98	701	125	821
18	160	45	341	72	525	99	708	126	813
19	167	46	347	73	531	100	714	127	809
20	173	47	355	74	538	101	721	128	801
21	179	48	362	75	545	102	728	129	800
22	186	49	369	76	552	103	735	130	802
23	193	50	375	77	559	104	741	131	801
24	199	51	382	78	565	105	748	132	800
25	205	52	389	79	572	106	755	133	800
26	212	53	396	80	579	107	762		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 54 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1ค ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C (ครั้งที่ 3)

เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)
0	37	27	218	54	394	81	573	108	751
1	44	28	223	55	400	82	579	109	758
2	50	29	229	56	407	83	586	110	764
3	57	30	235	57	414	84	592	111	771
4	62	31	242	58	420	85	599	112	778
5	72	32	249	59	427	86	606	113	784
6	78	33	255	60	434	87	612	114	791
7	85	34	262	61	440	88	619	115	798
8	91	35	268	62	447	89	625	116	804
9	96	36	275	63	453	90	632	117	811
10	104	37	282	64	460	91	639	118	817
11	110	38	288	65	467	92	645	119	824
12	116	39	295	66	473	93	652	120	831
13	121	40	302	67	480	94	659	121	837
14	128	41	308	68	487	95	665	122	844
15	134	42	315	69	493	96	672	123	850
16	141	43	322	70	500	97	678	124	845
17	148	44	328	71	506	98	685	125	841
18	156	45	334	72	513	99	692	126	836
19	163	46	342	73	520	100	698	127	828
20	169	47	348	74	526	101	705	128	824
21	178	48	354	75	533	102	712	129	818
22	184	49	361	76	539	103	718	130	814
23	189	50	369	77	546	104	725	131	808
24	196	51	374	78	553	105	731	132	802
25	203	52	381	79	559	106	738	133	800
26	210	53	387	80	566	107	745		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ 55 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1ง ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C (เฉลี่ย)

เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)
0	37.00	27	218.00	54	399.67	81	582.00	108	763.00
1	43.67	28	224.00	55	406.00	82	588.33	109	769.67
2	49.67	29	230.00	56	413.00	83	595.33	110	776.33
3	56.67	30	240.00	57	420.00	84	602.00	111	783.33
4	63.33	31	248.33	58	426.33	85	608.67	112	790.33
5	70.67	32	255.00	59	433.33	86	615.67	113	796.00
6	77.67	33	262.33	60	440.00	87	622.00	114	803.33
7	85.00	34	268.67	61	446.67	88	629.00	115	810.33
8	91.33	35	274.33	62	453.67	89	635.67	116	816.67
9	97.33	36	280.00	63	460.33	90	642.67	117	824.00
10	105.33	37	286.00	64	467.00	91	649.33	118	830.33
11	112.33	38	293.33	65	473.67	92	655.67	119	837.33
12	117.67	39	299.67	66	480.33	93	662.67	120	844.33
13	123.33	40	305.33	67	487.33	94	669.67	121	842.67
14	130.67	41	311.67	68	494.33	95	676.00	122	842.00
15	136.67	42	318.67	69	500.67	96	682.67	123	840.67
16	143.67	43	325.33	70	507.67	97	689.33	124	834.00
17	150.33	44	332.33	71	514.00	98	696.00	125	829.67
18	157.67	45	339.00	72	521.00	99	703.00	126	824.33
19	164.33	46	345.33	73	527.67	100	709.33	127	819.00
20	170.67	47	352.33	74	534.33	101	716.33	128	813.33
21	178.33	48	359.00	75	541.33	102	723.33	129	808.67
22	185.00	49	366.00	76	548.00	103	730.00	130	806.00
23	191.00	50	373.00	77	555.00	104	736.33	131	803.00
24	197.67	51	379.00	78	561.33	105	742.33	132	800.00
25	204.00	52	386.33	79	568.00	106	749.33	133	800.33
26	210.33	53	392.67	80	575.00	107	756.33		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 56 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2ก ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C (ครั้งที่ 1)

เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)
0	37	29	227	58	416	87	605	116	796
1	43	30	233	59	422	88	611	117	803
2	50	31	240	60	429	89	618	118	809
3	57	32	246	61	436	90	625	119	816
4	63	33	253	62	442	91	631	120	822
5	68	34	260	63	449	92	638	121	829
6	75	35	266	64	455	93	644	122	835
7	81	36	273	65	463	94	651	123	842
8	86	37	280	66	469	95	657	124	849
9	94	38	287	67	476	96	664	125	856
10	102	39	293	68	481	97	670	126	863
11	109	40	300	69	488	98	677	127	869
12	116	41	305	70	495	99	684	128	876
13	123	42	312	71	501	100	690	129	882
14	128	43	319	72	508	101	697	130	889
15	134	44	325	73	514	102	703	131	895
16	141	45	332	74	521	103	710	132	902
17	147	46	338	75	527	104	718	133	900
18	154	47	345	76	533	105	725	134	895
19	160	48	350	77	539	106	731	135	889
20	167	49	357	78	546	107	738	136	883
21	173	50	363	79	553	108	745	137	879
22	180	51	370	80	559	109	751	138	873
23	186	52	377	81	566	110	758	139	870
24	193	53	383	82	572	111	764	140	864
25	201	54	390	83	579	112	771	141	858
26	207	55	396	84	585	113	777	142	854
27	214	56	403	85	592	114	783	143	850
28	220	57	409	86	598	115	789		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 57 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2x ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C (ครั้งที่ 2)

เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)
0	37	29	235	58	432	87	631	116	831
1	44	30	242	59	439	88	638	117	838
2	51	31	249	60	446	89	645	118	844
3	58	32	255	61	452	90	652	119	851
4	64	33	262	62	459	91	659	120	858
5	72	34	269	63	466	92	666	121	865
6	79	35	275	64	473	93	672	122	872
7	86	36	282	65	481	94	679	123	879
8	93	37	289	66	488	95	686	124	887
9	99	38	296	67	494	96	693	125	893
10	105	39	303	68	501	97	700	126	900
11	113	40	310	69	508	98	707	127	898
12	119	41	316	70	515	99	713	128	895
13	126	42	323	71	522	100	720	129	891
14	133	43	330	72	529	101	727	130	887
15	140	44	337	73	535	102	734	131	883
16	146	45	344	74	542	103	741	132	879
17	153	46	351	75	549	104	750	133	875
18	160	47	358	76	556	105	756	134	871
19	167	48	363	77	563	106	763	135	867
20	174	49	370	78	570	107	770	136	863
21	181	50	377	79	577	108	777	137	859
22	187	51	384	80	583	109	784	138	855
23	194	52	391	81	590	110	791	139	851
24	201	53	398	82	597	111	798	140	850
25	208	54	404	83	604	112	804	141	851
26	215	55	411	84	611	113	811	142	850
27	222	56	418	85	618	114	817	143	849
28	229	57	425	86	624	115	824		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 58 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2ค ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C (ครั้งที่ 3)

เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)
0	37	29	234	58	430	87	629	116	829
1	44	30	241	59	437	88	636	117	835
2	50	31	248	60	443	89	643	118	842
3	56	32	255	61	450	90	650	119	849
4	63	33	261	62	457	91	657	120	856
5	71	34	268	63	464	92	663	121	863
6	77	35	274	64	471	93	670	122	870
7	85	36	281	65	479	94	677	123	876
8	91	37	288	66	486	95	684	124	884
9	98	38	295	67	492	96	691	125	891
10	105	39	302	68	499	97	698	126	898
11	112	40	309	69	506	98	704	127	905
12	119	41	315	70	513	99	711	128	900
13	125	42	322	71	520	100	718	129	897
14	132	43	329	72	527	101	725	130	894
15	139	44	336	73	533	102	732	131	891
16	145	45	343	74	540	103	739	132	888
17	152	46	350	75	547	104	748	133	885
18	159	47	357	76	554	105	754	134	882
19	166	48	363	77	561	106	761	135	879
20	173	49	370	78	568	107	768	136	876
21	180	50	376	79	574	108	775	137	873
22	186	51	384	80	581	109	782	138	870
23	193	52	390	81	588	110	789	139	867
24	200	53	396	82	595	111	795	140	864
25	207	54	402	83	602	112	802	141	851
26	214	55	409	84	609	113	809	142	851
27	221	56	416	85	616	114	815	143	850
28	228	57	423	86	622	115	822		

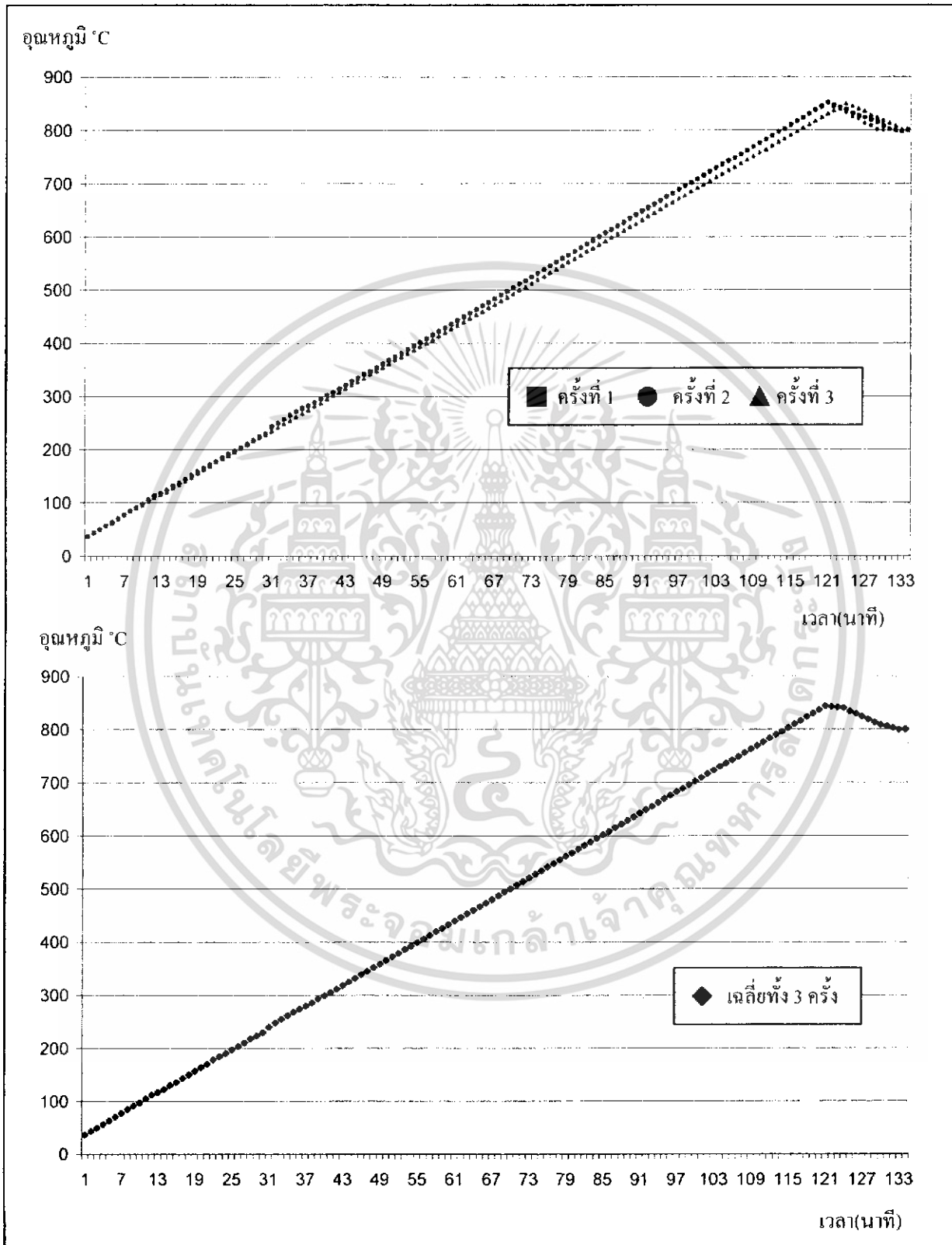
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 59 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C (เฉลี่ย)

เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)	เวลา (นาที)	T(°C)
0	37.00	29	232.00	58	426.00	87	621.67	116	818.67
1	43.67	30	238.67	59	432.67	88	628.33	117	825.33
2	50.33	31	245.67	60	439.33	89	635.33	118	831.67
3	57.00	32	252.00	61	446.00	90	642.33	119	838.67
4	63.33	33	258.67	62	452.67	91	649.00	120	845.33
5	70.33	34	265.67	63	459.67	92	655.67	121	852.33
6	77.00	35	271.67	64	466.33	93	662.00	122	859.00
7	84.00	36	278.67	65	474.33	94	669.00	123	865.67
8	90.00	37	285.67	66	481.00	95	675.67	124	873.33
9	97.00	38	292.67	67	487.33	96	682.67	125	880.00
10	104.00	39	299.33	68	493.67	97	689.33	126	887.00
11	111.33	40	306.33	69	500.67	98	696.00	127	890.67
12	118.00	41	312.00	70	507.67	99	702.67	128	890.33
13	124.67	42	319.00	71	514.33	100	709.33	129	890.00
14	131.00	43	326.00	72	521.33	101	716.33	130	890.00
15	137.67	44	332.67	73	527.33	102	723.00	131	889.67
16	144.00	45	339.67	74	534.33	103	730.00	132	889.67
17	150.67	46	346.33	75	541.00	104	738.67	133	886.67
18	157.67	47	353.33	76	547.67	105	745.00	134	882.67
19	164.33	48	358.67	77	554.33	106	751.67	135	878.33
20	171.33	49	365.67	78	561.33	107	758.67	136	874.00
21	178.00	50	372.00	79	568.00	108	765.67	137	870.33
22	184.33	51	379.33	80	574.33	109	772.33	138	866.00
23	191.00	52	386.00	81	581.33	110	779.33	139	862.67
24	198.00	53	392.33	82	588.00	111	785.67	140	859.33
25	205.33	54	398.67	83	595.00	112	792.33	141	853.33
26	212.00	55	405.33	84	601.67	113	799.00	142	851.67
27	219.00	56	412.33	85	608.67	114	805.00	143	849.67
28	225.67	57	419.00	86	614.67	115	811.67		

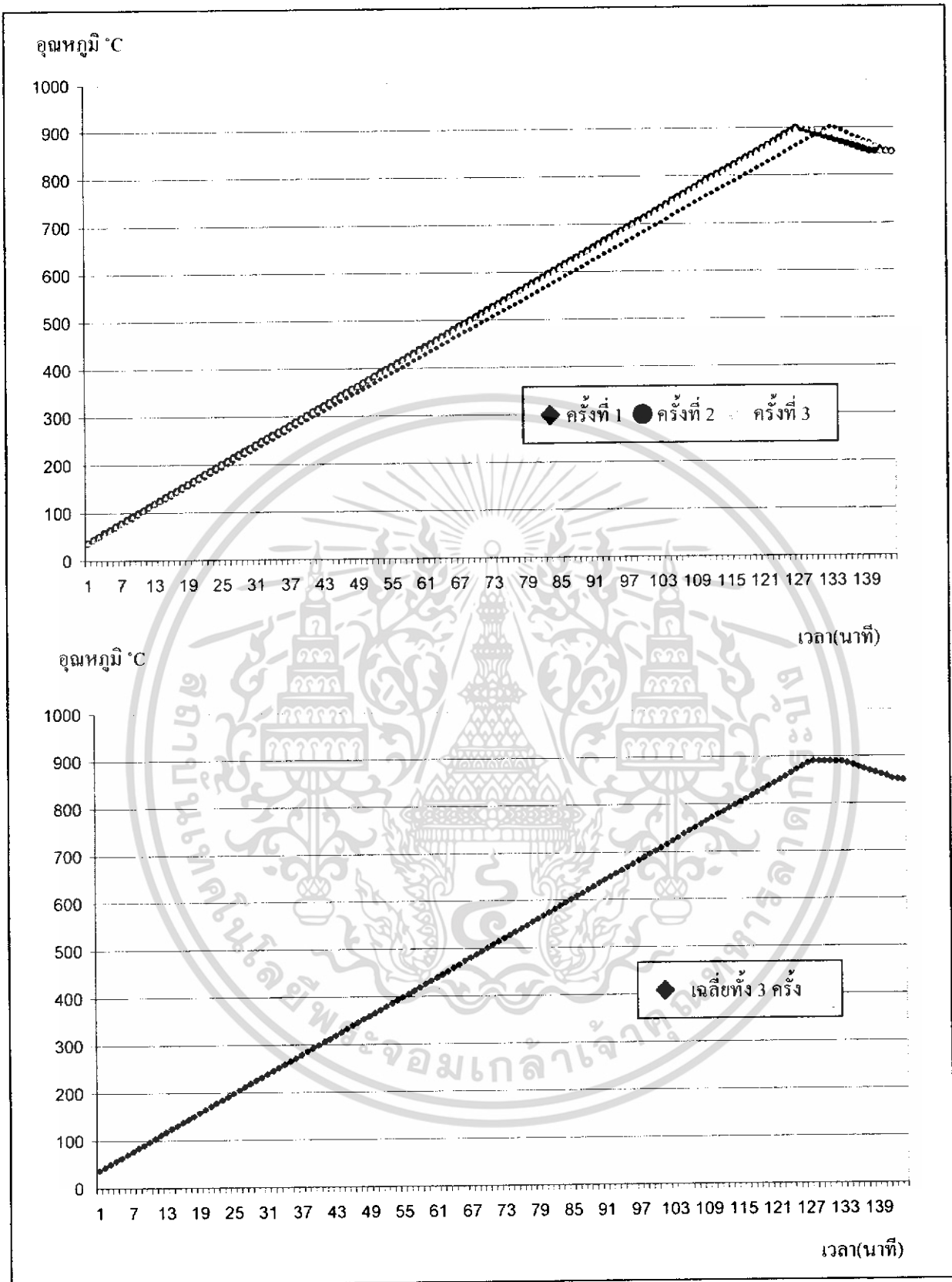
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 60% ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเก็บค่าของอุณหภูมิในห้องอบเรียบร้อยแล้ว จึงนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลา เมื่อตั้งค่าไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการ คือ 800 °C และ 850 °C



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 800 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 61 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 850 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 62 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพพจนานุกรมของเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด

การหาประสิทธิภาพพจนานุกรมของเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบดนั้น หาได้จากการปล่อยให้อุณหภูมิคงที่เมื่อถึงค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ในช่วงนั้นเองจะมีการขึ้นลงของอุณหภูมิภายในของเตา เป็นการถ่ายเทความร้อนทำให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ทำงานแล้วจึงจับเวลาที่แมกเนติกคอนแทคเตอร์ทำงาน ในที่นี้ปล่อยอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเริ่มจับเวลาที่นาฬิกาที่ 36 จนถึงนาฬิกาที่ 95

ตารางที่ 5.1 เวลาที่แมกเนติกคอนแทคเตอร์ทำงาน ณ ช่วงเวลาต่างๆที่ อุณหภูมิ 850 °C

ช่วงเวลา (นาฬิกา)	ช่วงเวลาที่แมกเนติกคอนแทคเตอร์ทำงาน (วินาที)
36-40	45
41-45	50
46-50	55
51-55	52
56-60	43
61-65	45
66-70	56
71-75	47
76-80	38
81-85	52
86-90	45
91-95	35
รวมเวลา	563

ประสิทธิภาพพจนานุกรมของเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ได้คำนวณได้จาก

ใน 1 ชั่วโมงแมกเนติกคอนแทคเตอร์ ทำงานทั้งหมด = 563 วินาที

ประสิทธิภาพพจนานุกรมของเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด = $(1-563/3600) \times 100$

= 84.361%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 63 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1 การทดสอบการทำงานของเตาอบที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 133 นาที ให้ค่าความร้อนเฉลี่ยของ เตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบดเท่ากับ 6.67 องศาเซลเซียสต่ออนาที โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5.98 และกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.2 การทดสอบการทำงานของเตาอบที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 143 นาที ทำให้ทราบค่าความร้อนเฉลี่ยของ เตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบดเท่ากับ 6.7 องศาเซลเซียสต่ออนาที โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10.19

จากการหาค่าประสิทธิภาพจะได้ว่าประสิทธิภาพพจนวนของเตาอบแบบฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าเท่ากับ 84.361% ทำให้ทราบว่าเตาอบเป็นแบบฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งหุ้มด้วยเซรามิกไฟเบอร์ 2 ชั้น ทำให้ความร้อนที่สะสมในตัวเบดมีค่ามาก ประสิทธิภาพพจนวนของเตาอบจึงสูง สามารถใช้ในการอบแบบต่อเนื่องได้โดยสูญเสียความร้อนในปริมาณน้อย



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

เตาอบแบบฟลูอิด ไคซ์เบดเป็นโครงการต้นแบบ ซึ่งได้ทำการออกแบบและจัดสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและทดลอง โดยใช้หลักการฟลูอิด ไคซ์เบด ได้ผลดังนี้คือ เตาอบแบบฟลูอิด ไคซ์เบดให้ความร้อนสูงสุด 850°C ด้วยเวลา 143 นาที ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 6 กิโลวัตต์ ควบคุมอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ภายในประกอบไปด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ 3 เฟส จำนวน 24 ชุด ฉนวนกันความร้อนทำจาก คอนกรีตทนความร้อน และ เซรามิกไฟเบอร์ ตัวเตาเชื่อมเข้ากับชุดอุปกรณ์โบลเวอร์ และตู้ควบคุม

5.2 วิจารณ์ผลการดำเนินงาน

ในกระบวนการดำเนินงาน การขึ้นรูปห้องอบหลักมีความซับซ้อนมาก ทำให้การถอดแบบเป็นไปได้ยากและทำให้เกิดรอยแตกที่ช่องบรรจุชุดควบคุมเล็กน้อย ซึ่งไม่มีผลต่อการให้ความร้อนของเตา อีกทั้งการนำวัสดุดิบที่เหลืออยู่กลับมาใช้อีกเช่น เซรามิกไฟเบอร์ และเหล็กตีเปิด ทำให้ประหยัดต้นทุนในการจัดสร้างเตา

ในการทดลองให้ความร้อนของเตาอบแบบฟลูอิด ไคซ์เบด ความร้อนที่ได้มีอุณหภูมิสูงถึง 900°C เนื่องจากชุดควบคุมอุณหภูมิยังเก็บความร้อนไว้ในตัวมันเองอยู่และจะลดลงที่อุณหภูมิที่กำหนด คือ 850°C โดยอุณหภูมิที่สูงเกินกว่าที่กำหนดนั้น ไม่ส่งผลให้เตาอบเกิดความเสียหายเนื่องจากวัสดุดิบและอุปกรณ์ที่เลือกใช้สามารถทนอุณหภูมิได้มากกว่า 1000°C และในการทดลองอุปกรณ์ทั้งสองส่วน ได้แก่ 1) เตาอบ และ 2) อุปกรณ์ควบคุม สามารถทำงานร่วมกันได้ตามที่ออกแบบไว้

5.3 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ

เพื่อเป็นข้อมูลในการจัดสร้างเตาอบแบบฟลูอิด ไคซ์เบดที่มีประสิทธิภาพต่อไป จึงควรใช้อุปกรณ์ที่ให้กระแสไฟฟ้าออกมาเป็นเฟ้าว นั่นคือ โซลิตัสเตชรีเรีย จะช่วยให้อุณหภูมิที่สูงสุดของเตาไม่เกินอุณหภูมิที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 65 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการอ้างอิง

- สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. สถานที่พิมพ์ : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- อาจารย์ มนตรี อึ้งเจริญ. การนำความร้อน (HEAT CONDUCTION), 2531
- บริษัท ออมรอน อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด. แคตตาล็อกออมรอนอุปกรณ์ควบคุมที่ดีที่สุดเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2546
- บริษัท ออมรอน อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด. คู่มือการใช้งานตัวควบคุมอุณหภูมิเบื้องต้น E5CN/E5CN-U.
- สุรัชย์ สนิทใจ. คู่มือการประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม. สถานที่พิมพ์ : ฝ่ายสำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2548
- ผศ. บรรณลง ศรีนิล และ ผศ. ประเสริฐ ก้วยสมบูรณ์. ตารางงานโลหะ. สถานที่พิมพ์ : สำนักพิมพ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2524
- KANTHAL. Heater Designs Manual. 1982
- ไพโรจน์ ฐานวิเศษ รุ่งวสันต์ ไกรกลาง. เดอบซูปความร้อนฟลูอิดไดซ์เบด. วารสารวิจัยและฝึกอบรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 เล่มที่ 1 (ม.ค.-มิ.ย. 47) : 61-70.
- นางสาวกุลลดา จันทระกุล. นายธนศ กิตติธาดาชัยกุล. นายอนุศาสตร์ เทบตาคม. เดอบไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- นายกิตติพงษ์ สุขศรีเมือง. นายจิรภัฏ ป่าไสม. นายถาวร บุญจำเนียร. นายนิสิต ทองประกอบ. เดอบเชื่อมแบบฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- นายมานนท์ เซ็นตินะนนท์. นายอิสระ ไชยสะอาด. เดอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545

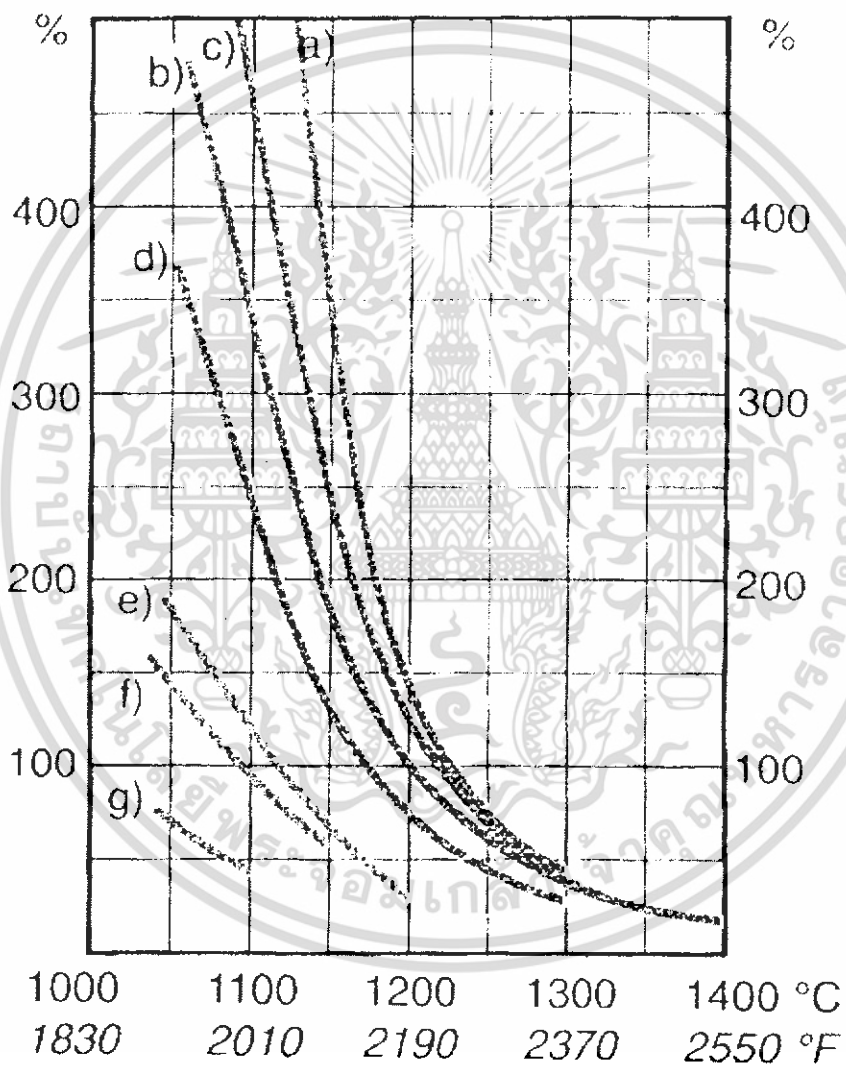
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 66 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 67 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 5 Comparative life (KANTHAL A-1 at 1200°C.
2190°F = 100%)

- a) KANTHAL APM
- b) KANTHAL A-1
- c) KANTHAL AF
- d) KANTHAL D
- e) NIKROTHAL 80 Plus
- f) NIKROTHAL 60 Plus
- g) NIKROTHAL 40 Plus



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา⁶⁹จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	KANTHAL APM	KANTHAL A-T	KANTHAL AF	KANTHAL D	NIKROTHAL 80
Max continuous operating temp. °C	1425	1400	1400	1300	1200
F	2600	2550	2370	2370	2190
Nominal composition, %					
Cr	22	22	22	22	20
Al	5.8	5.8	5.3	4.8	-
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	-
Ni	-	-	-	-	60
Resistivity at 20°C, Ωmm ² m ⁻¹	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09
at 68°F, Ω/cmt	872	872	836	812	655
Density, g/cm ³	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10
lb/in ³	0.256	0.256	0.259	0.262	0.300
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹					
20-750 °C, 68-1380 °F	14.10'	14.10'	14.10'	14.10'	17.10'
20-1000 °C, 68-1838 °F	15.10'	15.10'	15.10'	15.10'	18.10'
Thermal conduct 20 °C					
W m ⁻¹ K ⁻¹	13	13	13	13	13
68 °F, Btu/ft-2h-1-F-1	90	90	90	90	90
Specific heat capacity					
KJ kg ⁻¹ K ⁻¹ , 20 °C	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
Btu/lb-1 °F-1, 68 °F	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110
Melting point, °C	1500	1500	1500	1500	1400
°F	2730	2730	2730	2730	2550
Mechanical properties (approx.)*					
Tensile strength, N mm ⁻²	680	680	680	680	750
psi	99000	99000	99000	99000	109000
Yield point, N mm ⁻²	445	445	445	445	450
psi	65000	65000	65000	65000	65000
Hardness, Hv	230	230	230	230	180
Elongation at rupture, %	19	19	19	19	30
Tensile Strength at 900 °C, N mm ⁻²	40	34	37	34	100
1650 °F, psi	5800	5000	5400	5000	14500
Creep strength at 800 °C, N mm ⁻²	14	6	8	6	15
1000 °C, N mm ⁻²	1.8	1	1.5	1	4
1470 °F, psi	2000	870	1160	870	2160
1830 °F, psi	260	145	215	145	580
Magnetic properties	Magnetic (Curie point 600 °C 1100 °F)				Non
Emissivity full oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 70 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 Maximum Permissible Temperatures in various Atmospheres

	KANTHAL		KANTHAL		KANTHAL		KANTHAL		KANTHAL		KANTHAL	
	A-1 and APM		AF		D		80 and 70		60		40	
	C	F	C	F	C	F	C	F	C	F	C	F
Oxidizing :												
Air, dry	1400*	2550	1300	2350	1399	2370	1200****	2190	1150	2100	1100	2010
Air, moist	1200	2190	1200	2190	1200	2190	1150	2100	1100	2010	1050	1920
Neutral :												
N ₂ , Nitrogen **	1200/	2190/	1250/	2280/	1150/	2100/	1250	2280	1200		1150	2100
	1050	1920	1100	2010	1000	1830						
Ar, Argon	1400*	2550	1300	2350	1300	2370	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Exothermic:												
10 CO, 15 H ₂												
5 CO ₂ , 70 N ₂	1150	2100	1150	2100	1100	2010	1100***	2010	1100	2010	1100	2010
Reducing :												
Endothermic:												
20 CO, 40 H ₂												
40 N ₂	1050	1920	1050	1920	1000	1830	1100***	2010	1100	2010	1100	2010
H ₂ , Hydrogen	1400*	2550	1400	2550	1300	2370	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Cracked ammonia												
75 H ₂ , 25 N ₂	1200	2190	1200	2190	1100	2010	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Vacuum:												
10 ⁻³ torr	1150	2100	1200	2190	1100	2010	1000	1830	900	1650	900	1650

*) Max 1425 c, 2600 F for APM

**) The higher values apply for pre-oxidized material

***) Please note risk of "green rot" formation in carburizing atmospheres. Use KANTHAL or NIKROTHAL 70

****) 1250 c, 2280 F, for NIKROTHAL 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 71 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4 Key Data for Kanthal Elements

Wire Elements				
Suspension systems	Tubes	Grooves	Porcupine	Rod over Bend
Supports	Ceramic tubes	Bricks	Ceramic tubes	Metallic rods
Material	Sillimanite	Chamotte or Grade 28	Sillimanite	Kanthal APM
Max. furnace temperature, C	1300	1250	800	1300
F	2370	2280	1470	2370
Max. wall loading at 1000 C				
1830F furnace temperature	40	35		50
W/cm ²				
kW/ft ²	3.7	3.3		4.6
Max. surface load at 1000 c 1830				
F				
furnace temperature W/cm ²	3-4	3-4		5-6
W/in ²	19-26	19-26		32-39
Wire diameter (d), mm	2.0-6.5	2.0-5.0	1.0-6.5	>5.0
in	0.08-0.26	0.08-0.2	0.04-0.26	>0.2
Strip thickness (t), mm				
in				
Strip width (w)				
Outer coil diameter (D)	(12-14)d	(5-6)d		350
Max. loop length at 1000 c 1830 F				13.8
furnace temperature, mm				
in				
Min. pitch at max				
loop length, mm	3d	2d	3d	40
				1.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา⁷² และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL AF

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity $1.39 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$. Density 7.15 g cm^{-3} . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.

$^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_t	1	1	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06	1.07

Wire dia mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20 $^{\circ}\text{C}$	Strip WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20 $^{\circ}\text{C}$
1	1.77	5.62	17.8	10.0x1.0	0.319	71.5	1582
1.1	1.46	6.79	23.6	15.0x1.0	0.0927	167	3453
1.2	1.23	8.09	30.7	20.0x1.0	0.0695	143	6043
1.3	1.05	9.49	39	10.0x1.2	0.1158	86	1934
1.4	0.903	11	48.7	12.0x1.2	0.0965	103	2735
1.5	0.787	12.6	59.9	15.0x1.2	0.0772	129	4196
1.6	0.691	14.4	72.7	15.0x1.5	0.0618	161	5342
1.7	0.612	16.2	87.2	20.0x1.5	0.0463	215	9281
1.8	0.546	18.2	104	25.0x1.5	0.0371	268	14302
2	0.442	22.5	142	15.0x2.0	0.0463	215	7339
2.2	0.366	27.2	189	20.0x2.0	0.0348	266	12664
2.3	0.335	29.7	216	25.0x2.0	0.0278	358	19424
2.4	0.307	32.3	245	30.0x2.0	0.0232	429	27623
2.5	0.283	35.1	277	15.0x2.5	0.0371	268	27623
2.6	0.262	38	312	20.0x2.5	0.0278	358	16190
2.8	0.226	44	390	25.0x2.5	0.0222	447	24733
2.9	0.21	47.2	439	30.0x2.5	0.0185	536	35071
3	0.197	50.5	479	20.0x3.0	0.0232	429	19828
3.25	0.168	59.3	609	25.0x3.0	0.0185	536	27331
3.5	0.144	68.8	761	30.0x3.0	0.0154	644	39223

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **73** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฝาครอบเตา

ห้องอบหลัก

โครงเตาอบ

แผ่นกระจายลม

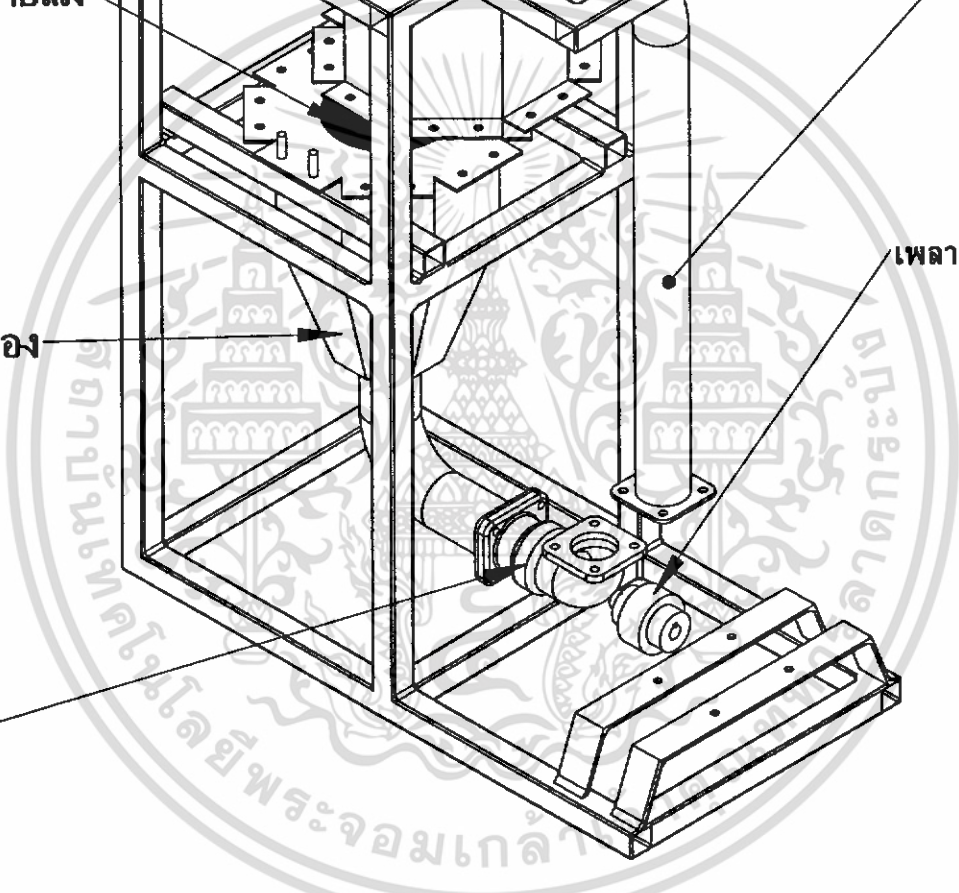
ห้องอบรอง

เทอร์โบ

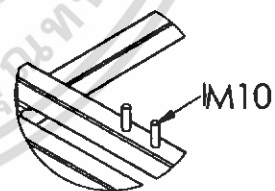
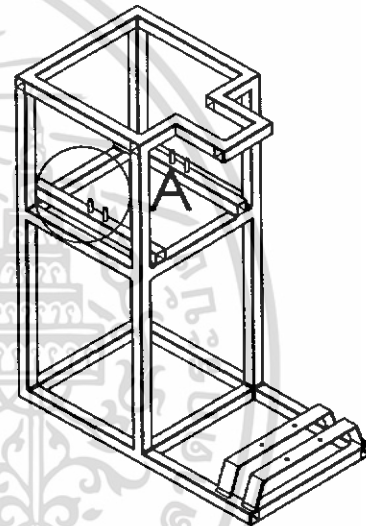
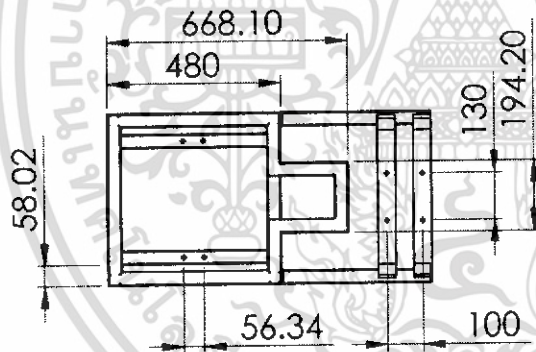
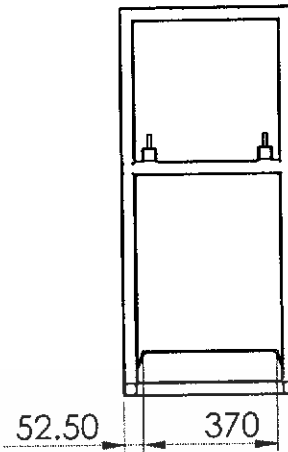
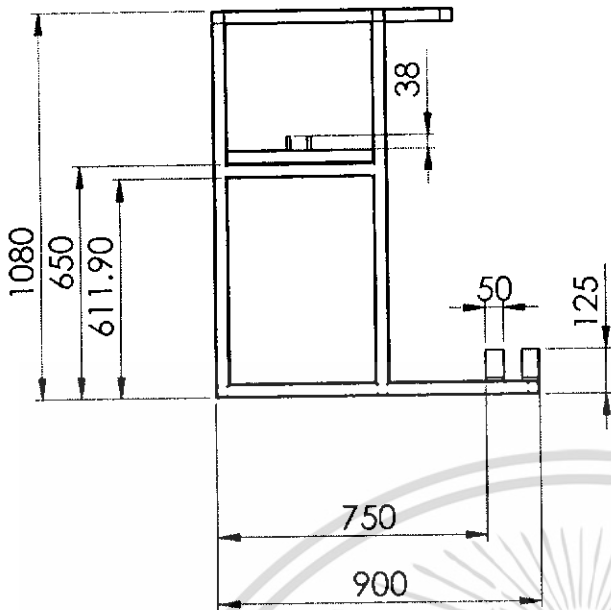
ท่อลมดูด

เพลากันกระแทก

A
B
C
D
E



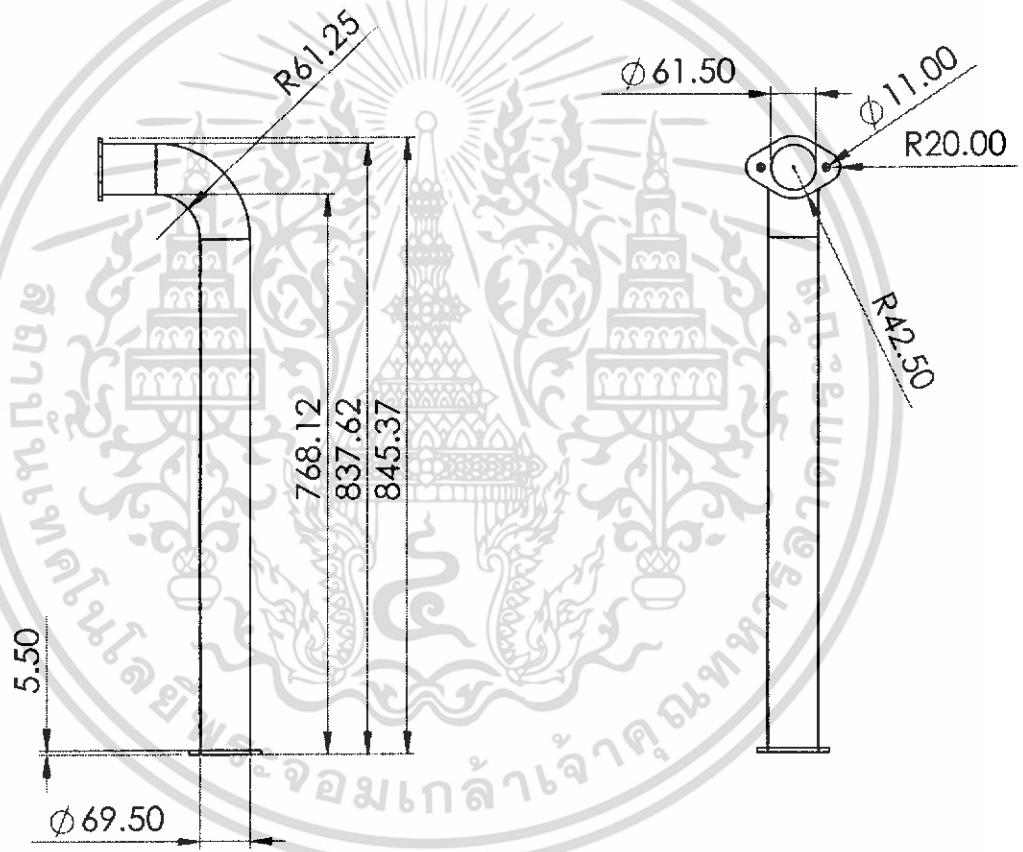
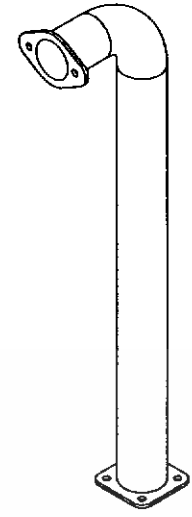
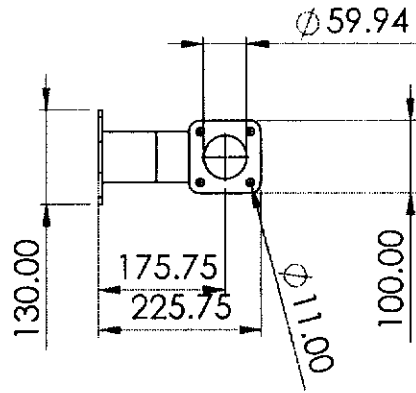
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN kawepong		SIGNATURE		DATE		TITLE:		KMITL	
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO. Asse_IE	
								A4	
						WEIGHT: คัดแปลงเนื้อหา และตัดแปลงชื่อชิ้นงานถึงเจ้าของเอกสาร		SCALE: 1:20	
								SHEET 1 OF 1	



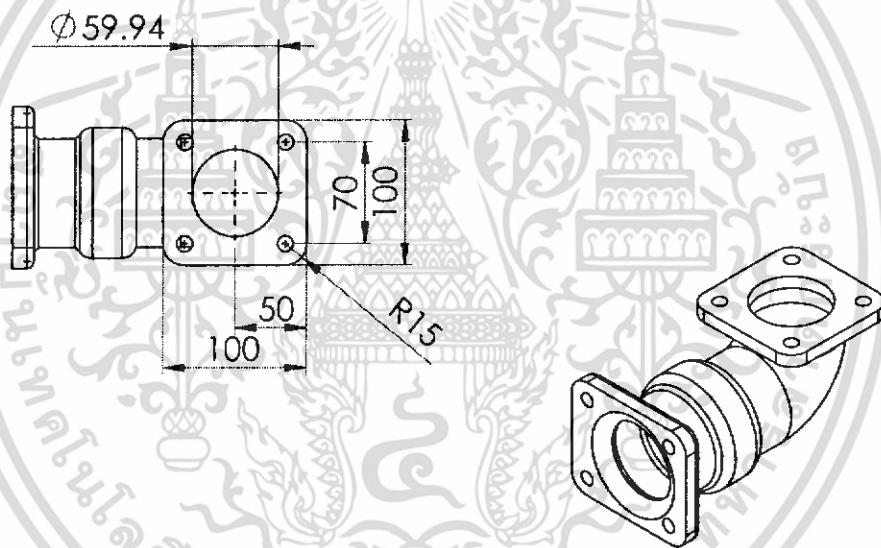
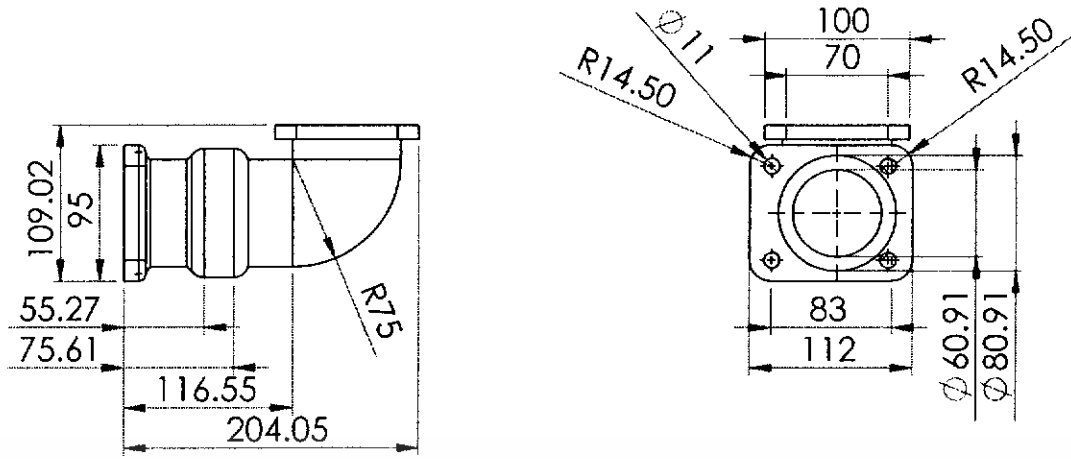
DETAIL A
SCALE 1 : 10

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN		CHK'D		APP'VD		DWG NO. โครงเตาอบ A4			
MFG		QA		MATERIAL:					
WEIGHT:		SCALE: 1:20		SHEET 1 OF 1		75			

A
B
C
D
E

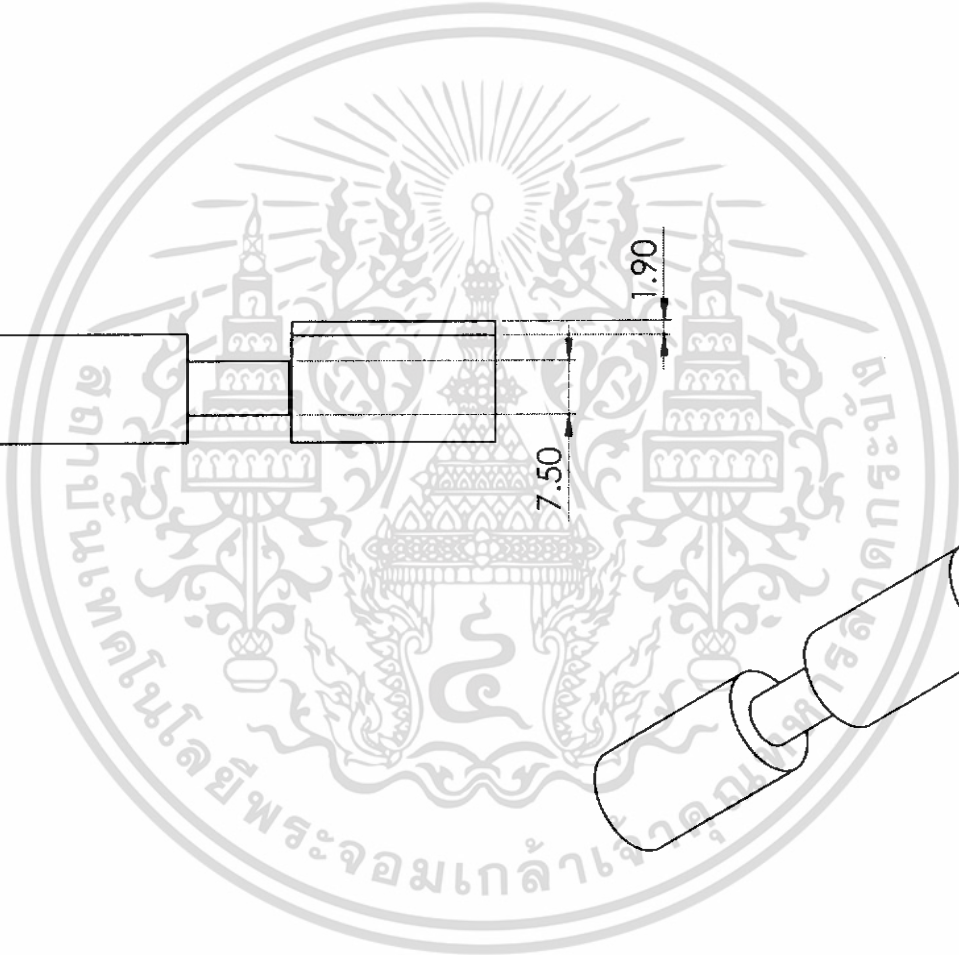
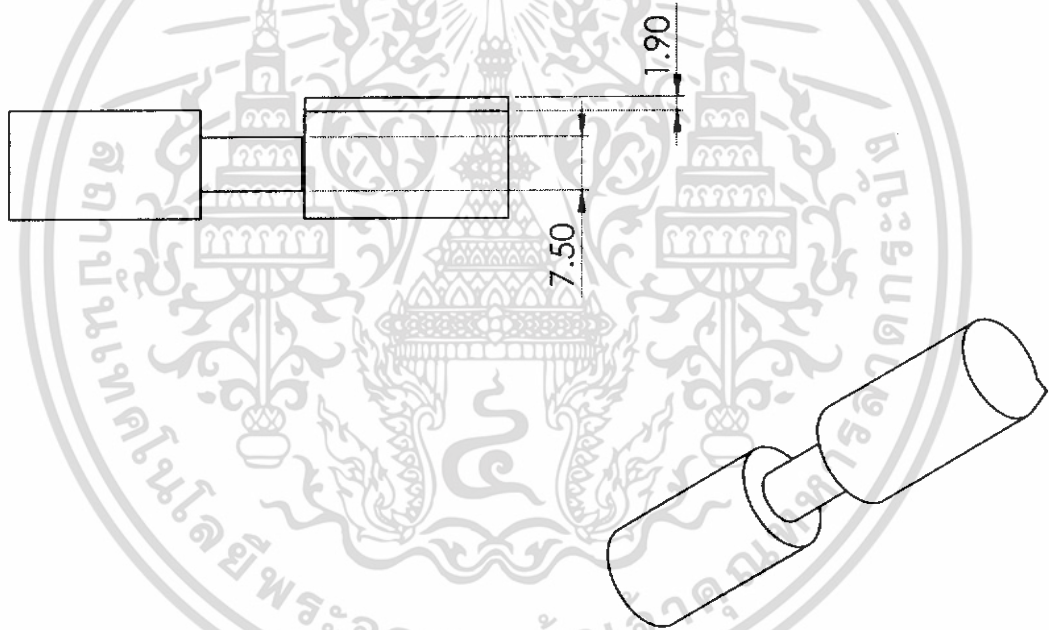
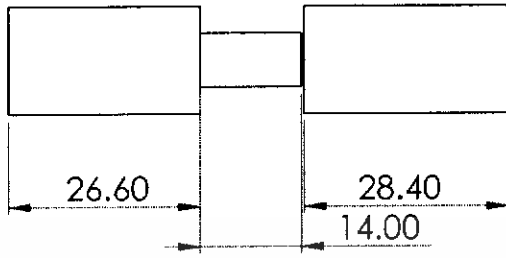


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:			DEBUR AND BREAK SHARP EDGES			DO NOT SCALE DRAWING			REVISION		
DRAWN kawepong			SIGNATURE			DATE			TITLE:			KMITL		
CHKD														
APPVD														
MFG														
Q.A									MATERIAL:			DWG NO. ท่อลมดูด		
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่									WEIGHT: ตัดแบบลงเนื้อหา และตัด			SCALE: 1:10 ถึงเจ้าของเอกสาร		
ไม่มีการแก้ไข ทั้งสิ้น ยกเว้นที่												SHEET 1 OF การนำไปใช้		



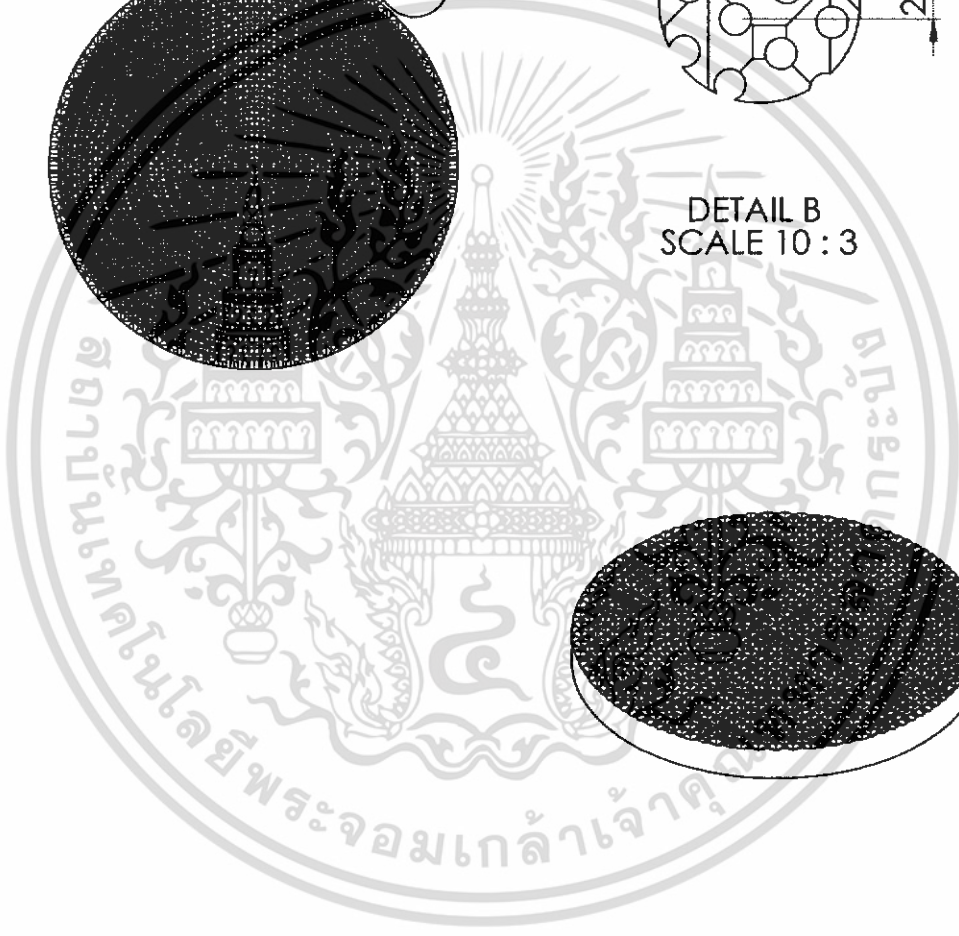
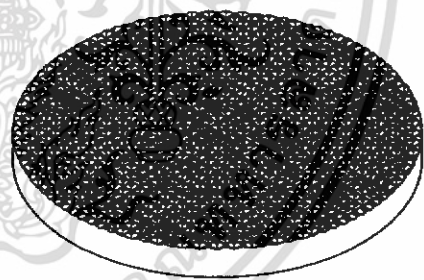
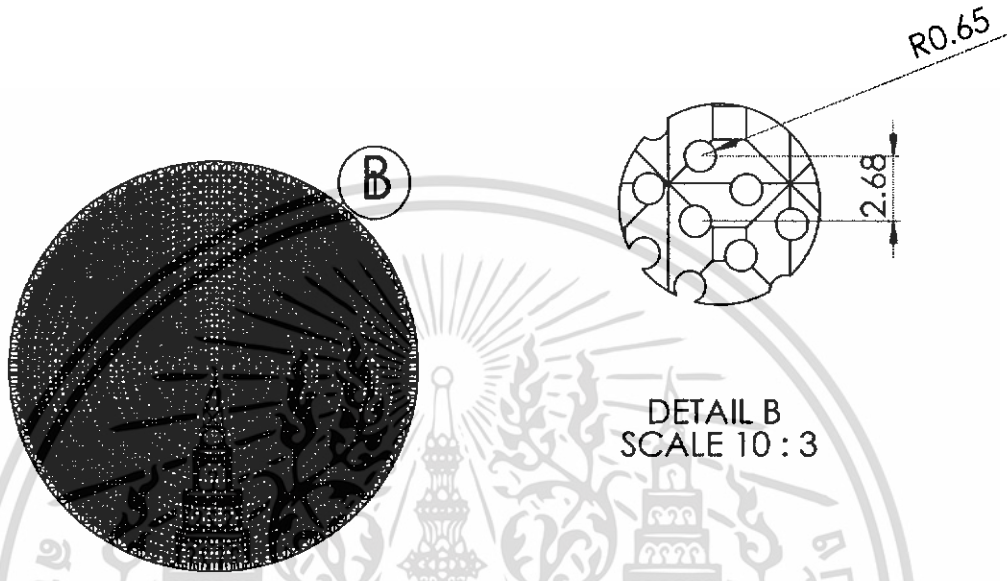
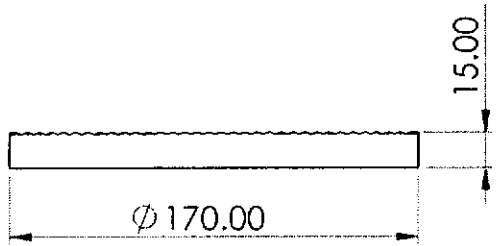
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN kawepong		SIGNATURE		DATE		TITLE:		KMITL	
CHKD									
APPVD									
MFG									
QA				MATERIAL:		DWG NO.		เทอร์โบ	
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่						SCALE:1:5		SHEET 1 OF 1	
ไม่ทำการแก้ไข ทั้งสิ้น จากทั้งหมด				WEIGHT:ตัดแปลงเนื้อหา และชุด		องคเจาของเอกสารทุก		การนำไปใช้	

A
B
C
D
E



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN kawepong		SIGNATURE		DATE		TITLE: KMITL			
CHKD									
APPRVD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO. บานพับ		A4	
WEIGHT:		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1					

A
B
C
D
E



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN	kawepong					
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A						

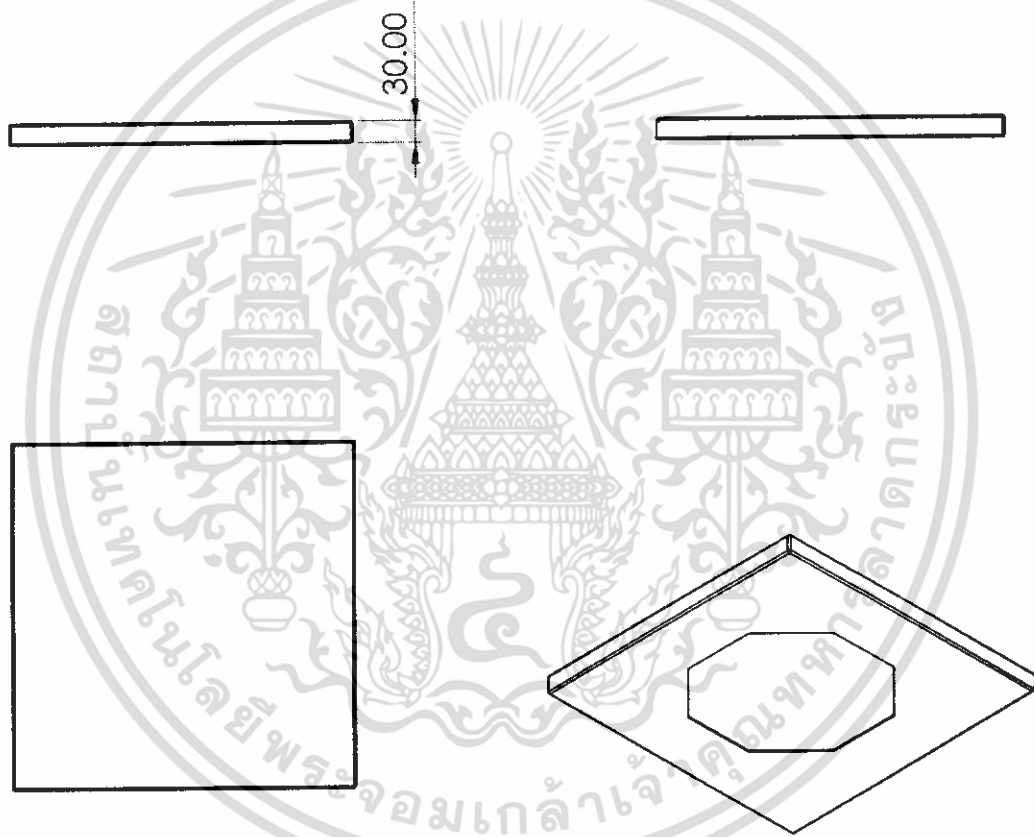
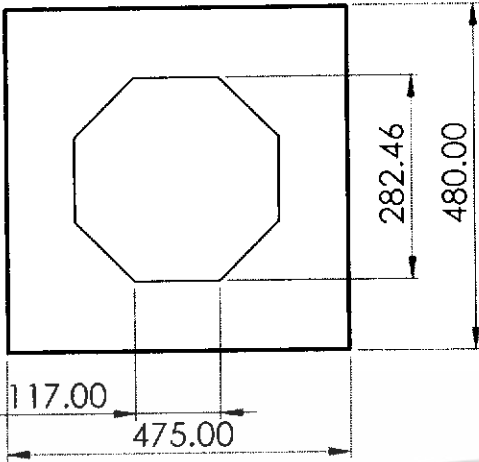
TITLE:
KMITL

MATERIAL:

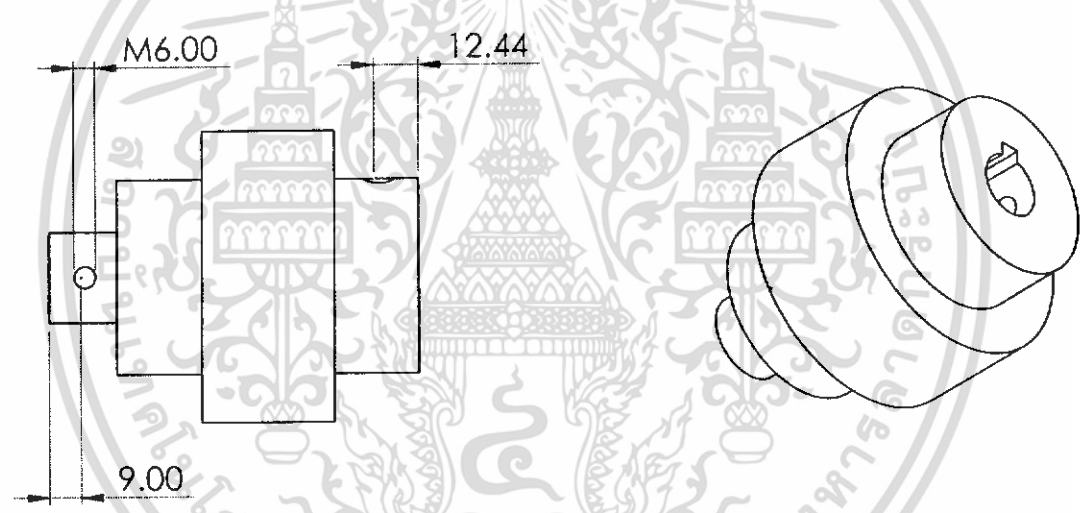
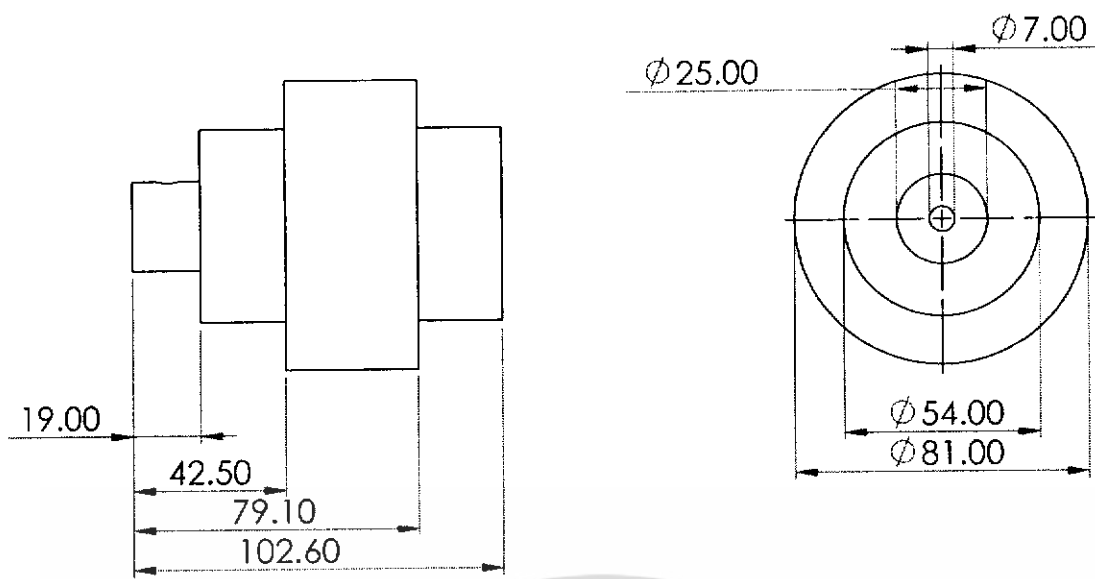
DWG NO. **แผ่นกระจายลม** A4

WEIGHT:

SCALE: 1:1 SHEET 1 OF 1

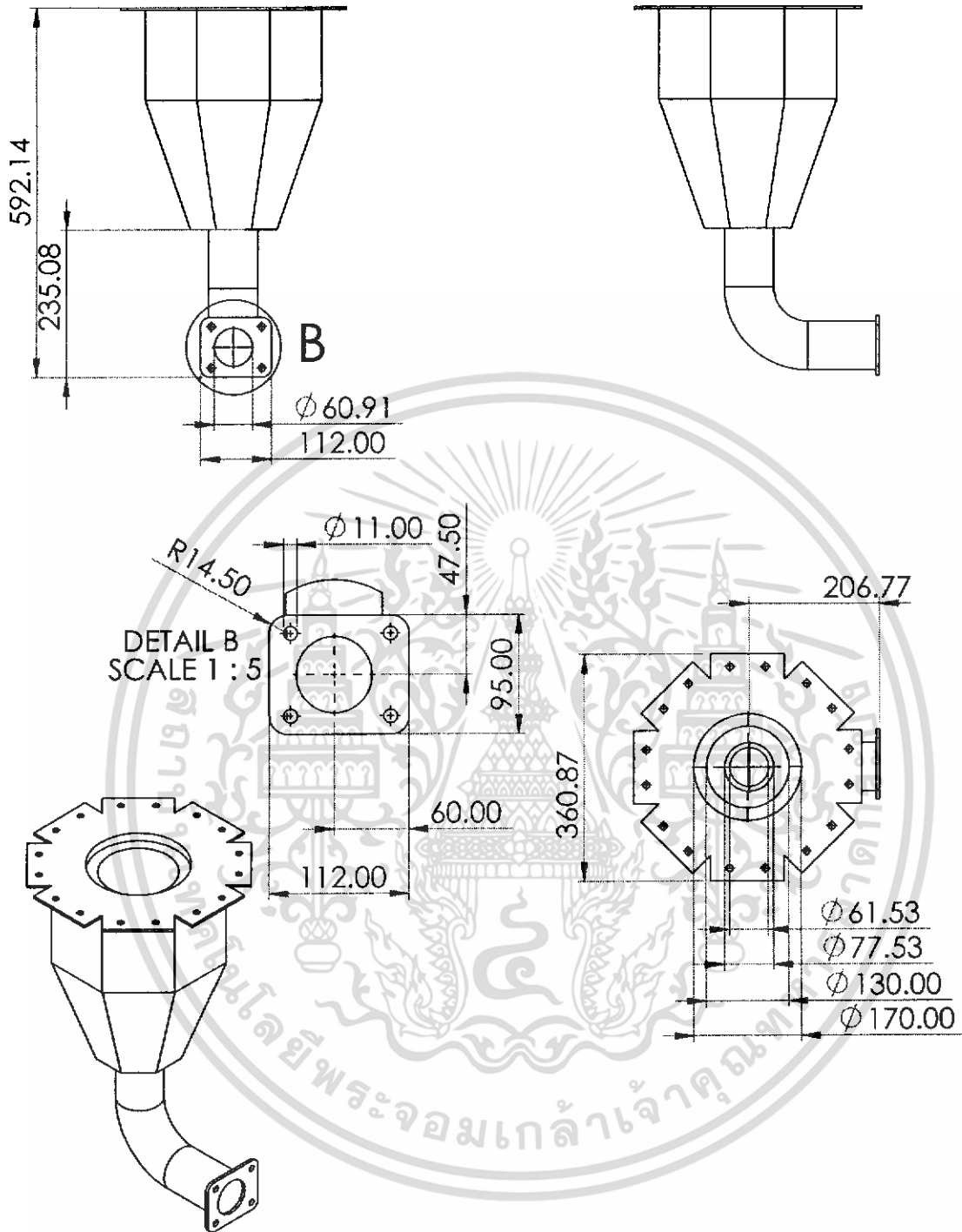


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN kawepong		SIGNATURE		DATE		TITLE: KMITL			
CHKD						DWG NO. ฝาครอบเตา		A4	
APPVD						SCALE: 1:10		SHEET 1 OF 1	
MFG						MATERIAL:			
Q.A						WEIGHT:			

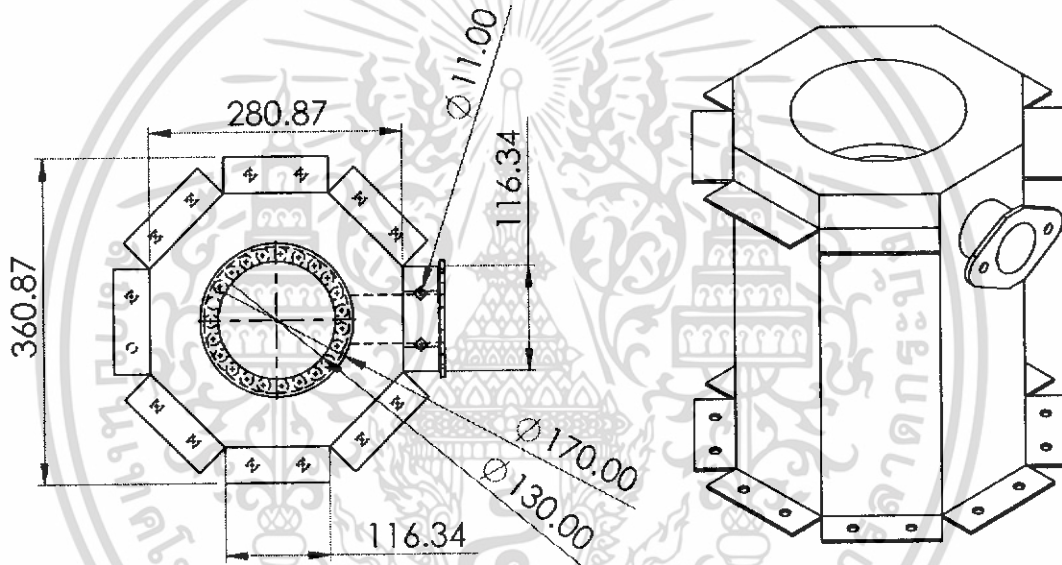
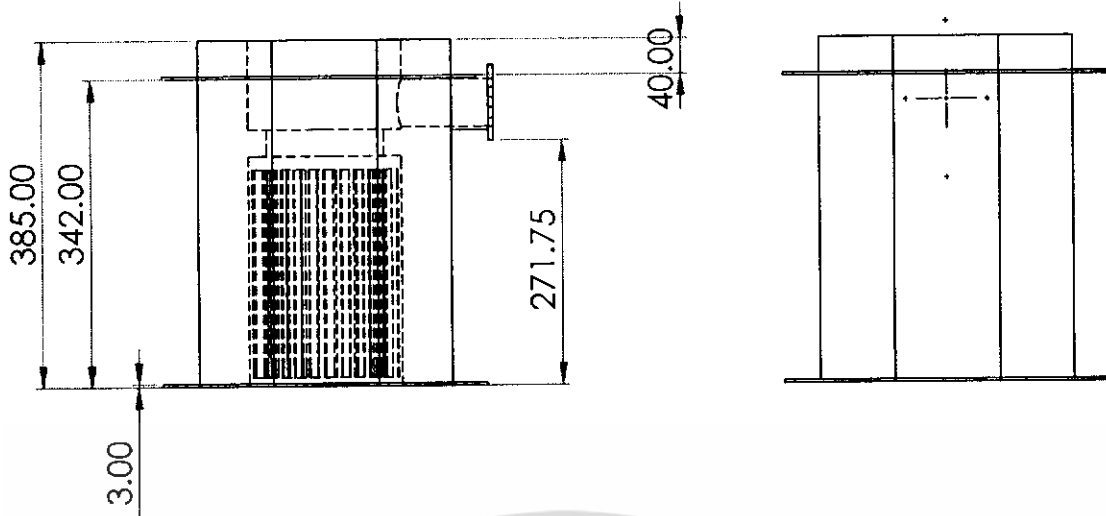


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN kawepong		SIGNATURE		DATE		TITLE:		KMITL	
CHKD						DWG NO.		A4	
APPRVD						SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	
MFG						MATERIAL:		เพลากันกระแทก	
QA						WEIGHT:		ไม่จำกัด	

A
B
C
D
E



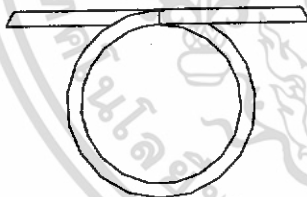
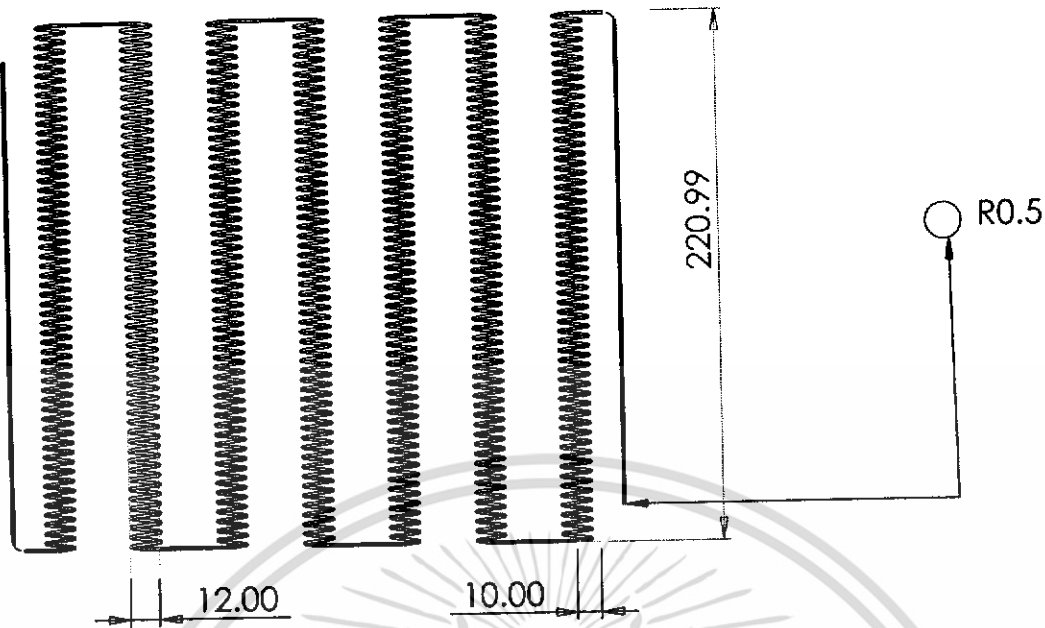
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHKD									
APPVD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
WEIGHT:		ตัดแปลงเนื้อหา และ		SCALE: 1:10		ห้องอบรอง		SHEET 1 OF 2	



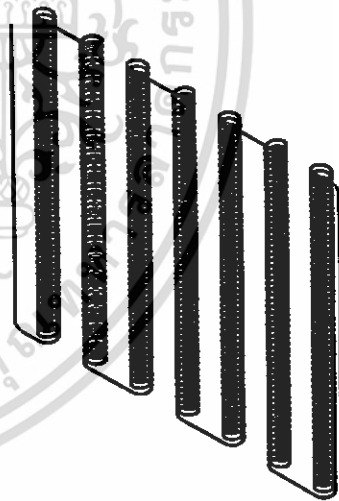
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
G.A.				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE: 1:10		SHEET 1 OF 1	

ห้องอบหลัก

A
B
C
D
E



DETAIL B
SCALE 2 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN: kawepong		SIGNATURE:		DATE:		TITLE: KMITL			
CHK'D:									
APPV'D:									
MFG:						DWG NO. อีทเตอร์		A4	
QA:				MATERIAL:		SCALE: 1:5		SHEET 1 OF 1	
เอื้ออำนวยเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ขึ้นด้านการค้า		วิศวกรเนติฯ ทั้งสิ้น ยกเว้นทำ		WEIGHT: ตบแต่งเนื้อหา และต่อ		ถึงเจ้าของเอกสารทุก		ซึ่งไม่ให้นำไปใช้	