

## บทที่ 8

### ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์

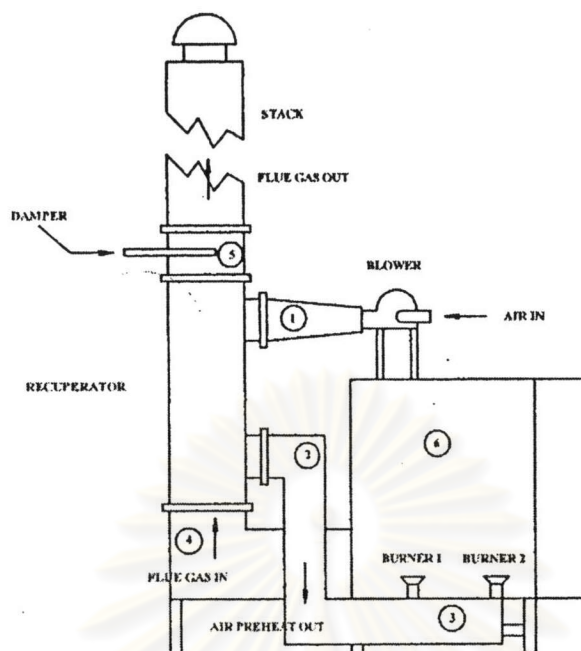
ในบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการทดลอง ผลการทดลอง การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator การวิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาเผาเซรามิคและประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิคหลังจากติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator รวมถึงการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ความคุ้มค่าในการลงทุน

#### 8.1 วิธีการทดลอง

การเก็บข้อมูลที่ได้จากเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator แล้ว จะต้องเป็นในลักษณะที่เตาอยู่ในสภาวะที่ทำงานตามปกติในแต่ละรอบการเผา และจากนั้นทำการเก็บข้อมูลที่ต้องการทราบจากเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่า ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 8.1.1 ข้อมูลที่ต้องการทราบค่ามีดังนี้

1. อุณหภูมิบริเวณจุดที่ 1,2,3,4,5 และ 6 ดังในรูปที่ 8.1
2. อุณหภูมิผิวด้านนอก Recuperator เพื่อหาค่า Heat loss
3. Flow rate บริเวณจุดที่ 1, 4 ดังในรูปที่ 8.1
4. องค์ประกอบของก๊าซเสียตรงจุดที่ 4 และ จุดที่ 5 (ค่า% CO, %O<sub>2</sub> , ค่า CO)
5. ปริมาณความร้อนที่สูญเสียบริเวณรอบๆผิว Recuperator
6. อุณหภูมิและน้ำหนักของวัสดุที่ออกจากเตาเผาแต่ละรอบการเผา
7. ค่าความดันสูญเสียในระบบของ Recuperator และท่อส่งอากาศเข้าหัวฉีด โดยทำการวัดที่จุด 1, 2, 3, 4 และ 5
8. น้ำหนักก๊าซ LPG ที่ใช้ไปในการเผา 1 รอบการทำงาน
9. การกินกระแสไฟของ Blower ในแต่ละรอบการเผา
10. อุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของบรรยากาศ
11. อุณหภูมิผิวด้านนอกและที่พื้นของเตาเผาเซรามิคหลังติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator



รูปที่ 8.1 แสดงจุดต่างๆ ของเตาเผาเซรามิกที่ทำการตรวจวัดค่าข้อมูล

#### 8.1.2 เครื่องมือและวิธีการใช้วัดค่าในการเก็บข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ทำการวัดค่าข้อมูลมีรายละเอียดและรูปภาพอยู่ในหัวข้อที่ 4.1.3 ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวทบทวนถึงหน้าที่ของเครื่องมือวัดอย่างคร่าวๆ อีกครั้ง

1. Velocity meter ใช้วัดค่าความเร็วของอากาศ
2. Flue Gas Analyzer ใช้วัดค่าความดันสูญเสียในระบบระบบของ Recuperator และท่อส่งอากาศเข้าหัวฉีดโดยวัดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิบรรยากาศ
3. Thermometer ใช้วัดค่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผา และ อุณหภูมิบริเวณจุดต่างๆ ดังรูปที่ 8.1
4. Thermocouple ใช้วัดอุณหภูมิภายในเตาเผา Recuperator และปล่องควัน
5. Flue Gas Analyzer ใช้วัดอุณหภูมิก๊าซเสีย และองค์ประกอบของก๊าซเสีย ( ค่า CO, %CO<sub>2</sub>, %O<sub>2</sub>)
6. Data logger ตัวเก็บข้อมูลของอุณหภูมิตามจุดต่างๆ มา plot ลงกราฟ
7. ตาซึ่งสำหรับชั่งน้ำหนักถังก๊าซ LPG และผลิตภัณฑ์เซรามิก
8. Clamp on วัดการกินกระแสไฟของ Blower

### 8.1.3 วิธีการทดลอง

1. หลังจากติดตั้ง Recuperator แล้วทำการวัดค่าที่ต้องการทราบทั้งหมดในหัวข้อ 8.1.1 เพื่อเป็นข้อมูล โดยทำการวัดค่าที่ต้องการทราบในสภาวะดังต่อไปนี้
  - 1.1 วัดค่าต่างๆ ในขณะที่ไม่มีมีผลผลิตก๊าซภายในเตา ณ อุณหภูมิในช่วงใดช่วงหนึ่งและทำการเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อเป็นการทดลอง
  - 1.2 วัดค่าต่างๆในขณะที่มีปรับค่าอุณหภูมิเสมือนในสภาวะการทำงานตามปกติ แต่ไม่มีผลผลิตก๊าซภายในเตา
2. เมื่อวัดค่าที่ได้จากการทดลองกับเตาที่ทำการเผาแล้วลำดับต่อมา ก็ทำการทดลองซ้ำแบบเดิม และปรับค่าอากาศที่เข้าสู่เตาโดยผ่าน Damper ให้ความเหมาะสมกับงานและจำนวนอากาศที่ต้องการใช้ในขณะนั้น ปรับแต่งจนมีความเหมาะสมพร้อมที่จะเผาผลิติก๊าซจริง
3. ทำการทดลองเผาผลิติก๊าซจริงจากนั้นทำการบันทึกข้อมูลทั้งหมดที่ต้องการทราบในข้อ 8.1.1 ของการเผาแต่ละรอบเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล
4. ทำการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้ง จากนั้นนำค่าต่างๆ ที่วัดได้มาทำการเฉลี่ยเพื่อหาค่าประสิทธิผลและประสิทธิภาพข้อที่ 1 และข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ของ Recuperator และการใช้พลังงานของเตาเผาเซรามิคหลังติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator

## 8.2 ผลการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นแรกทดลองเผาเตาที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่ได้หุ้มฉนวนโดยทดลองเผาดิบและเผาเคลือบจากนั้นทำการหุ้มฉนวนและทำการทดลองขั้นตอนที่สองคือทดลองเผาเตาที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้หุ้มฉนวนแล้วโดยทดลองทั้งแบบเผาดิบและเผาเคลือบ

### 8.2.1 ผลการทดลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่หุ้มฉนวน

#### 1 การเผาดิบ ( Biscuit )

จะใช้การเผาแบบ Oxidation Flame มีอุณหภูมิในการเผาประมาณ  $800^{\circ}\text{C}$  โดยตอนแรกอุณหภูมิภายในเตาจะเริ่มที่ประมาณ  $45^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $700-800^{\circ}\text{C}$  ซึ่งใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง และทำการบันทึกค่าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง โดยการทดลองนี้ทำการเผาดิบหลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์

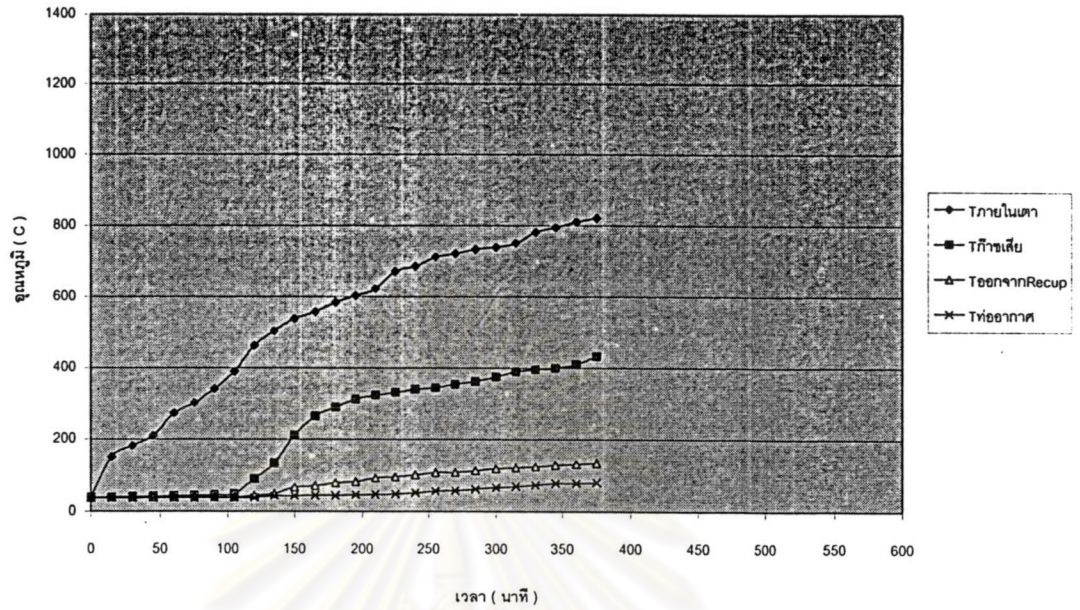
แลกเปลี่ยนความร้อนกับเผาเตาเซรามิคแต่ยังไม่ได้หุ้มฉนวนทั้งหมด 4 ครั้ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. วันที่ 21 มีนาคม 2545 เวลา 10.30 – 16.45
2. วันที่ 22 มีนาคม 2545 เวลา 09.00 – 15.00
3. วันที่ 24 มีนาคม 2545 เวลา 10.00 – 16.00
4. วันที่ 26 มีนาคม 2545 เวลา 12.00 – 17.45

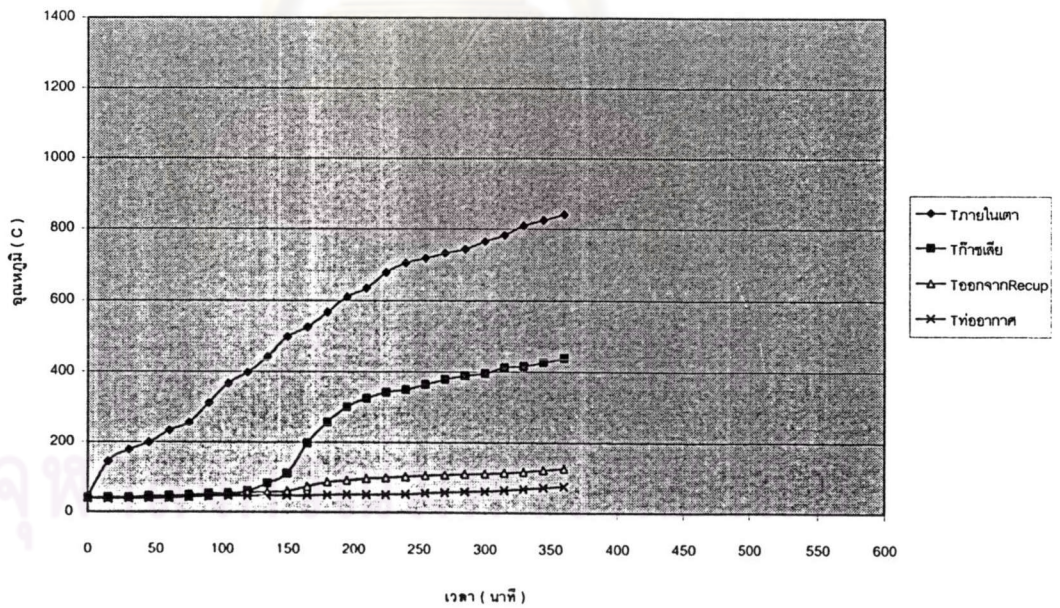
ซึ่งรายละเอียดของอุณหภูมิที่จุดต่างๆในการทดลอง ค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 8.1 , ตารางที่ 8.2 และตารางในภาคผนวก ค สำหรับตารางที่ 8.1 และตารางที่ 8.2 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 8.1 สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดต่างๆของการทดลองเผาติดกับเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน

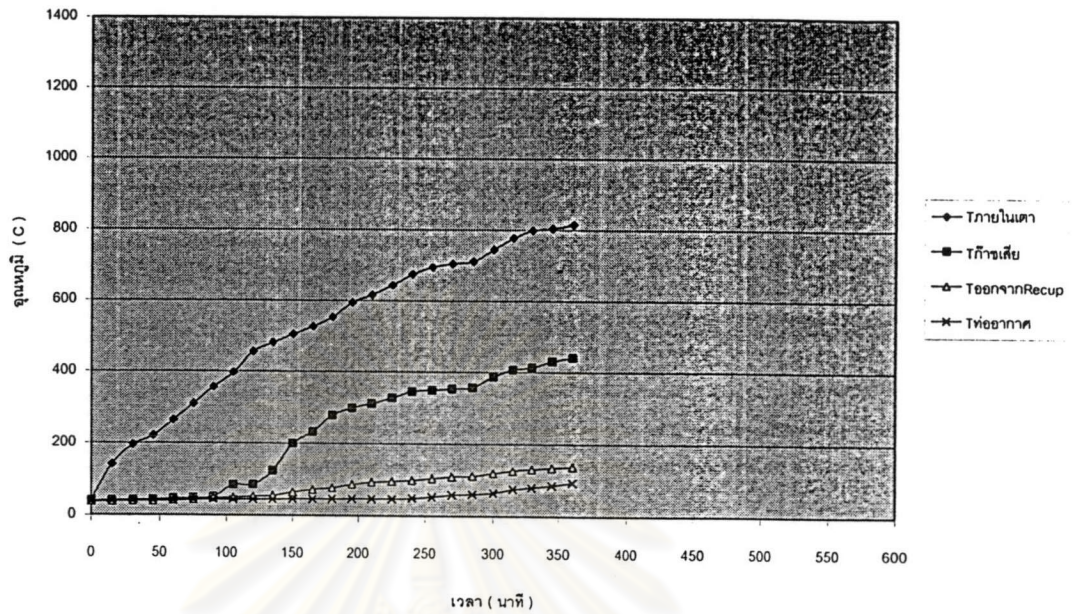
ลำดับการทดลอง	เวลาทดลอง (นาที)	$T_{amb,dry}$ (°C)	$T_{amb,wet}$ (°C)	$T_{จุดในเตา}$ (°C)	$T_{ก๊าซเสีย}$ (°C)	$T_{อบน Recup}$ (°C)	$T_{ท่ออากาศ}$ (°C)	$T_{ปล่อง}$ (°C)	$T_{เข้า Recup}$ (°C)	$T_{ออก Recup}$ (°C)
1	375	35.23	30.5	821	432	135	87	147	47	59.4
2	360	33.7	30.2	841	438	128	82	159	48	58.8
3	360	35.8	30.58	815	441	138.2	93.7	156.3	50	60.6
4	345	34.31	30.19	819	431.5	128.5	81.4	152.6	48	59.4
เฉลี่ย	360	34.76	30.37	824	435.6	132.4	86	153.7	48.25	59.55



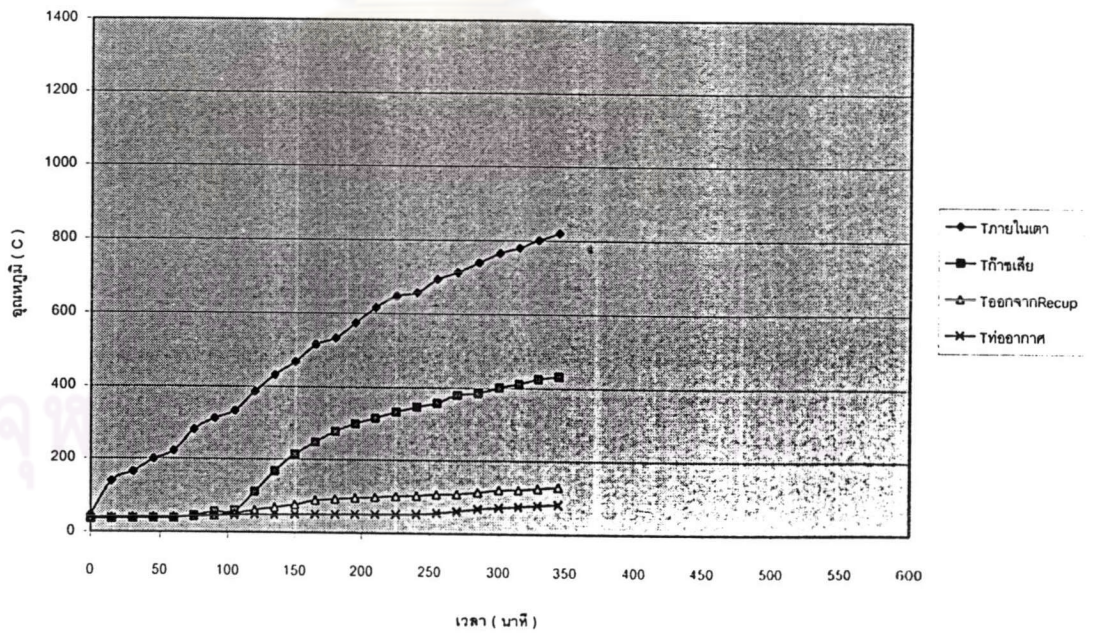
รูปที่ 8.2 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนแต่ยังไม่หุ้มฉนวนในการเผาครั้งที่ 1



รูปที่ 8.3 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนแต่ยังไม่หุ้มฉนวนในการเผาครั้งที่ 2



รูปที่ 8.4 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนแต่ยังไม่หุ้มฉนวนในการเผาครั้งที่ 3



รูปที่ 8.5 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนแต่ยังไม่หุ้มฉนวนในการเผาครั้งที่ 4

ตารางที่ 8.2 สรุปผลข้อมูลการทดลองเผาติดกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน

ลำดับการทดลอง	น้ำหนัก LPG ที่ใช้ (kg)	น้ำหนักวัสดุที่เสียในการเผา (kg)	T <sub>ฉนวนเตา</sub> (°c)	T <sub>พื้นเตา</sub> (°c)	% O <sub>2</sub>	% CO <sub>2</sub>	ค่า CO ppm	ความเร็วของอากาศเข้าเตา (m/s)
1	4.3	0.7	51.2	80.1	5.33	10.29	158.82	0.12
2	4.1	0.6	52.8	79.5	7.16	9.11	87.27	0.083
3	4	0.7	54.3	82.4	5.66	10.44	68	0.09
4	4.1	0.8	52.7	79.1	6.69	12.46	97.6	0.095
เฉลี่ย	4.13	0.7	52.75	80.27	6.21	10.08	102.92	0.097

## 2 การเผาเคลือบ

หลังจากที่ทำการเผาติดหรือ biscuit แล้ว ผลิตภัณฑ์จะถูกลงสี และน้ำยาเคมี เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสีตามต้องการและเกิดความเงางาม โดยตอนแรกอุณหภูมิภายในเตาจะเริ่มที่ประมาณ 45°C และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 1,100-1,300°C ใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง โดยทดลองเผาเคลือบหลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับเตาเผาเซรามิกแต่ยังไม่ได้หุ้มฉนวนทั้งหมด 4 ครั้ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5. วันที่ 23 มีนาคม 2545 เวลา 09.00 – 19.00
6. วันที่ 25 มีนาคม 2545 เวลา 09.30 – 19.30
7. วันที่ 27 มีนาคม 2545 เวลา 12.00 – 22.00
8. วันที่ 28 มีนาคม 2545 เวลา 10.30 – 20.30

ซึ่งรายละเอียดของอุณหภูมิที่จุดต่างๆในการทดลองค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 8.3 , ตารางที่ 8.4 และตารางในภาคผนวก ค สำหรับตารางที่ 8.3 และตารางที่ 8.4 มีรายละเอียดดังนี้

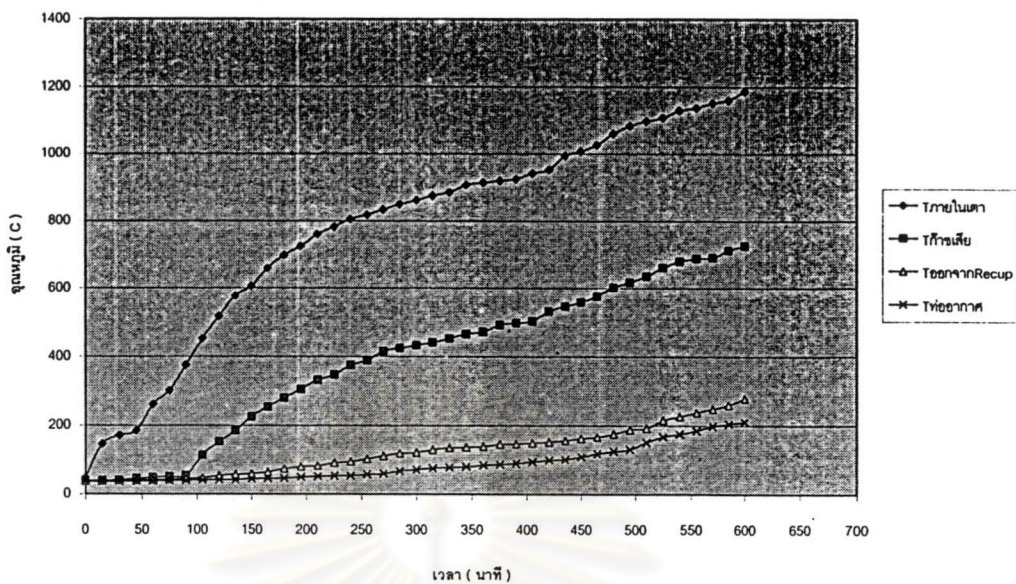
ตารางที่ 8.3 สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดต่างๆของการทดลองเผาเคลือบกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน

ลำดับ การ ทดลอง	เวลา ทดลอง (นาที)	T <sub>amb.dry</sub> (°c)	T <sub>amb.wet</sub> (°c)	T <sub>จุดในเตา</sub> (°c)	T <sub>ก๊าซเสีย</sub> (°c)	T <sub>een Recup</sub> (°c)	T <sub>ที่อากาศ</sub> (°c)	T <sub>ปล่อง</sub> (°c)	T <sub>เข้า Recup</sub> (°c)	T <sub>ออก Recup</sub> (°c)
5	600	34.48	29.98	1187	726	278	210	381	45	77.8
6	600	34.95	30.27	1199	730	281	209	384.5	46.5	78
7	600	32.33	28.88	1210	750	289.7	215	389	48	77.8
8	600	34.21	29.8	1220	779	297	221	403	48	78.6
เฉลี่ย	600	34	29.73	1204	747	286.2	213.7	389.4	46.9	78.05

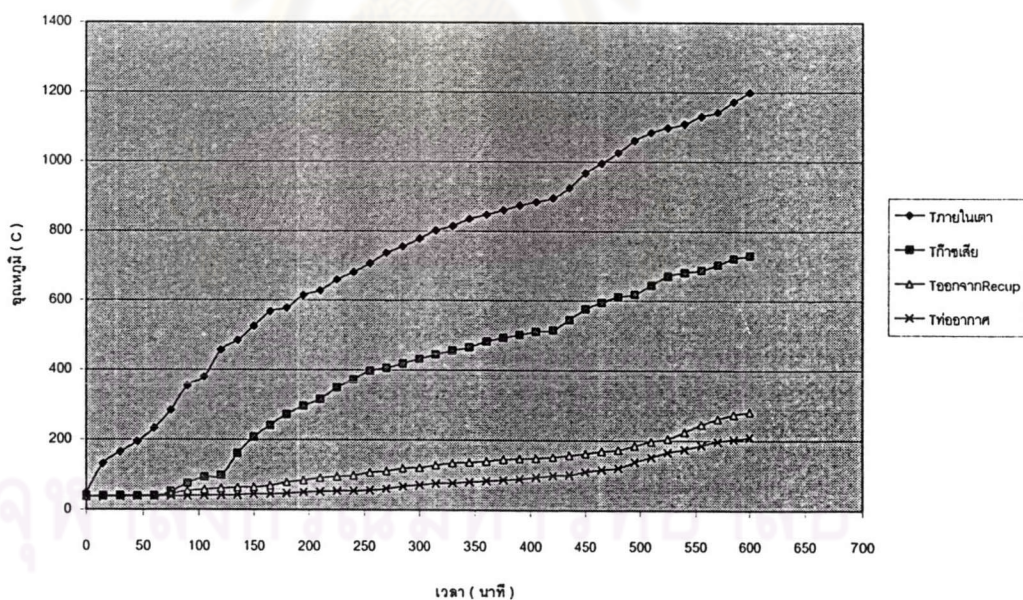
ตารางที่ 8.4 สรุปผลข้อมูลการทดลองเผาเคลือบกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน

ลำดับการ ทดลอง	น้ำหนัก LPG ที่ใช้ (kg)	น้ำหนัก วัสดุที่เสีย ในการเผา (kg)	T <sub>มีนออกเตา</sub> (°c)	T <sub>พื้นเตา</sub> (°c)	% O <sub>2</sub>	% CO <sub>2</sub>	ค่า CO ppm	ความเร็ว ของอากาศ เข้าเตา (m/s)
5	11.1	0.6	84.7	121.1	4.93	10.32	110.53	0.11
6	11.2	0.7	85.7	125.6	3.97	11.38	81.21	0.09
7	11.1	0.8	85	122	4.19	10.96	89.42	0.09
8	11.3	0.3	86	123.4	4.39	11.15	91.95	0.081
เฉลี่ย	11.17	0.6	85.35	123.03	4.37	10.95	93.28	0.09

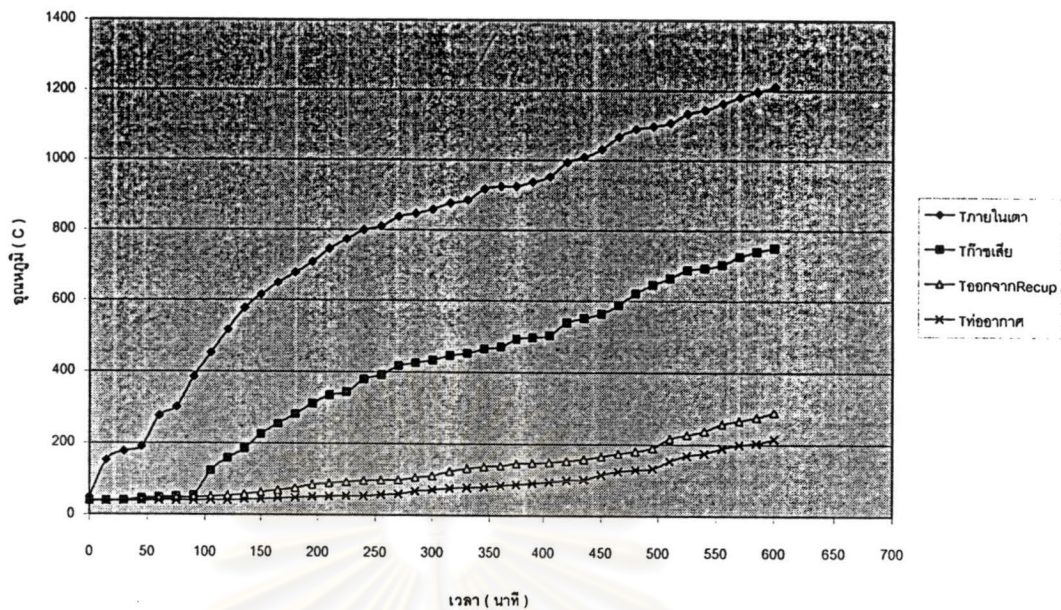




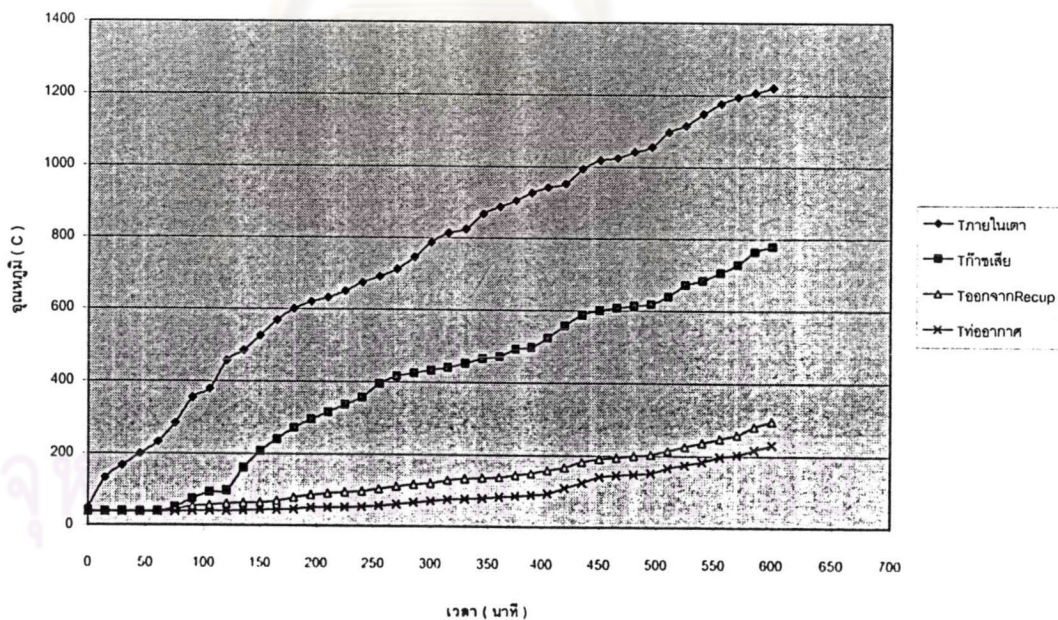
รูปที่ 8.6 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 1



รูปที่ 8.7 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 2



รูปที่ 8.8 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 3



รูปที่ 8.9 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ยังไม่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 4

## 8.2.2 ผลการทดลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน

### 1 การเผาดิบ ( Biscuit )

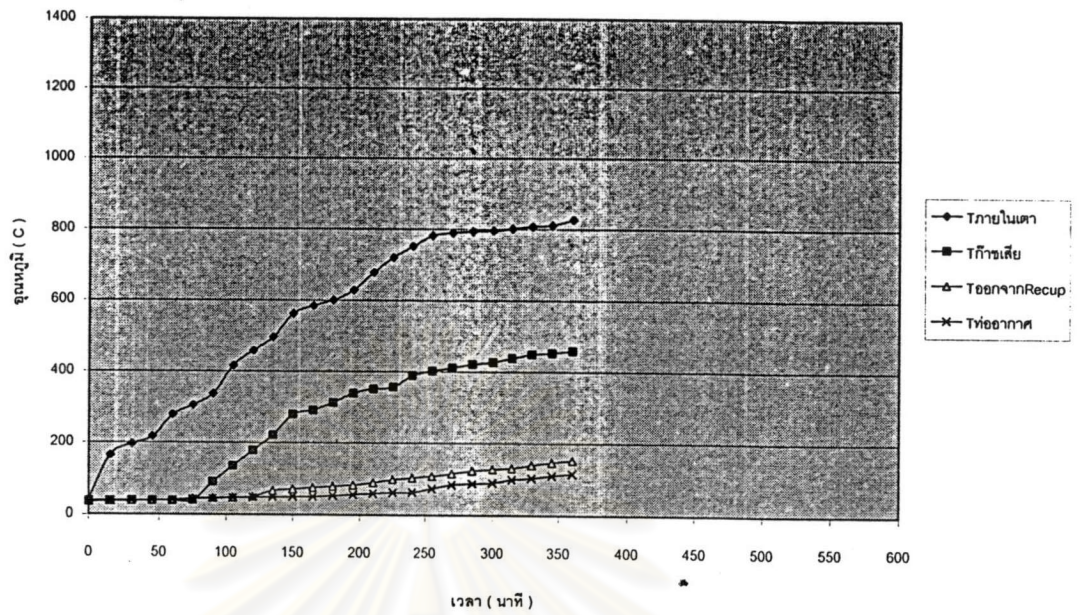
จะใช้การเผาแบบ Oxidation Flame มีอุณหภูมิในการเผาประมาณ 800°C โดยตอนแรกอุณหภูมิภายในเตาจะเริ่มที่ประมาณ 45°C และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 700-800°C ซึ่งใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง และทำการบันทึกค่าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง โดยการทดลองนี้ทำการเผาดิบหลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนกับเตาเผาเซรามิค ทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

9. วันที่ 29 มีนาคม 2545 เวลา 9.30 – 15.30
10. วันที่ 30 มีนาคม 2545 เวลา 10.45 – 16.45
11. วันที่ 31 มีนาคม 2545 เวลา 10.00 – 16.00
12. วันที่ 2 เมษายน 2545 เวลา 13.30 – 19.30

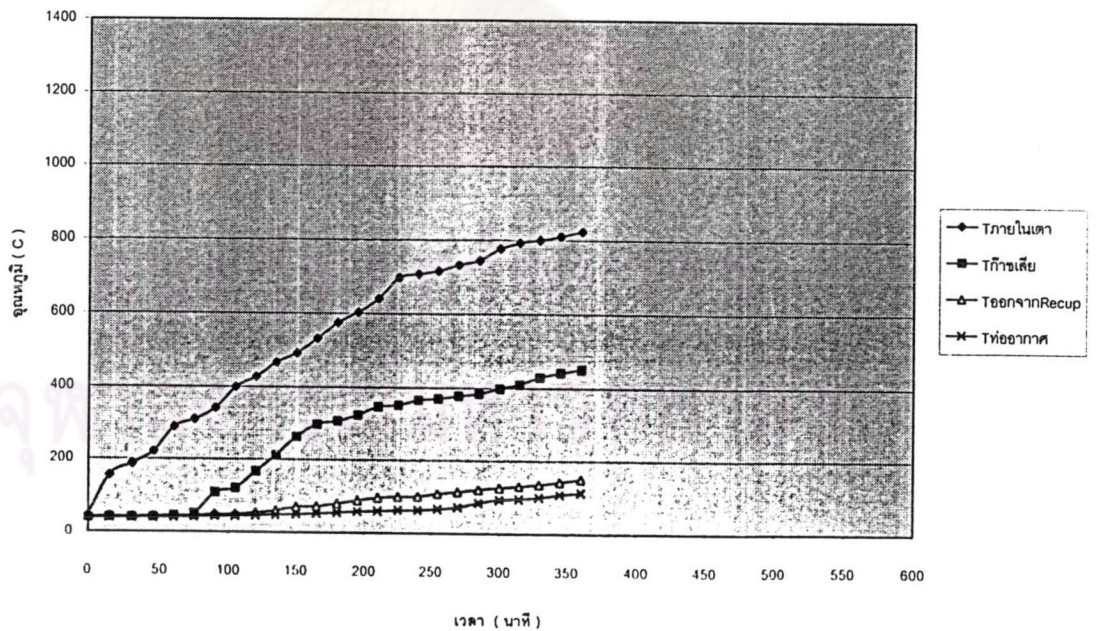
ซึ่งรายละเอียดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 8.5 , 8.6 และตารางในภาคผนวก ค โดยตารางที่ 8.5 ตารางที่ 8.6 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 8.5 สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดต่างๆของการทดลองเผาดิบกับเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและหุ้มฉนวน

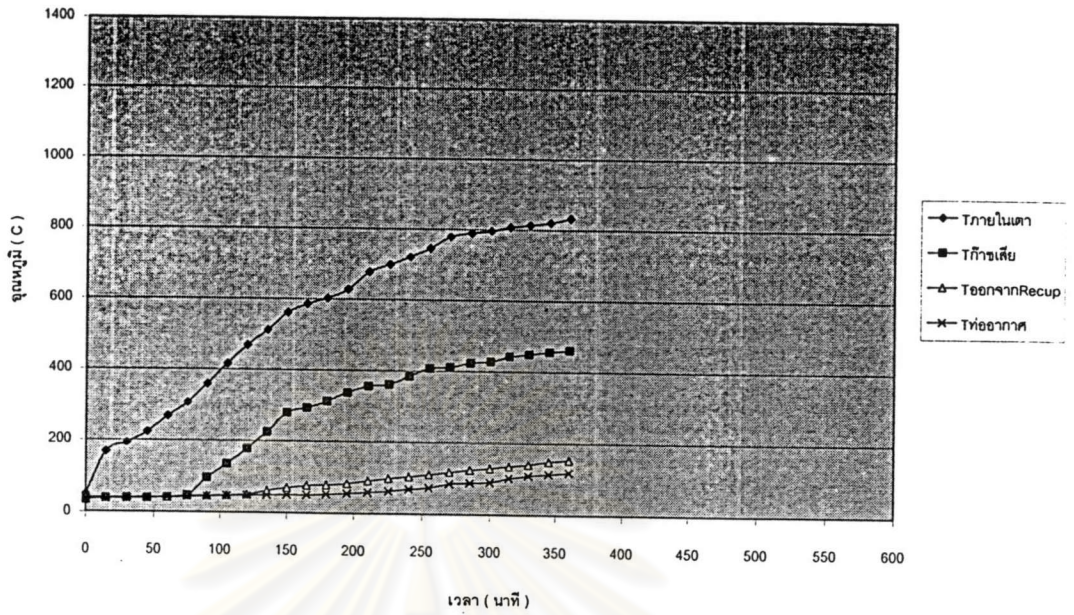
ลำดับ การ ทดลอง	เวลา ทดลอง (นาที)	T <sub>amb,dry</sub> (°c)	T <sub>amb,wet</sub> (°c)	T <sub>สูงสุดในเตา</sub> (°c)	T <sub>การเผา</sub> (°c)	T <sub>อบบ Recup</sub> (°c)	T <sub>ที่อากาศ</sub> (°c)	T <sub>ปล่อง</sub> (°c)	T <sub>เข้า Recup</sub> (°c)	T <sub>ออก Recup</sub> (°c)
9	360	35.3	29.64	828	459	152.6	116	141	45	41.6
10	360	35.44	29.7	823	451	149.8	113	145	47.5	42.1
11	360	34.7	29.52	833	461	153.1	119	155	48	42
12	360	31.94	30.24	837	458	151	110	153.2	50	42.5
เฉลี่ย	360	34.35	29.78	830.3	457.3	151.6	114.5	148.5	47.6	42.05



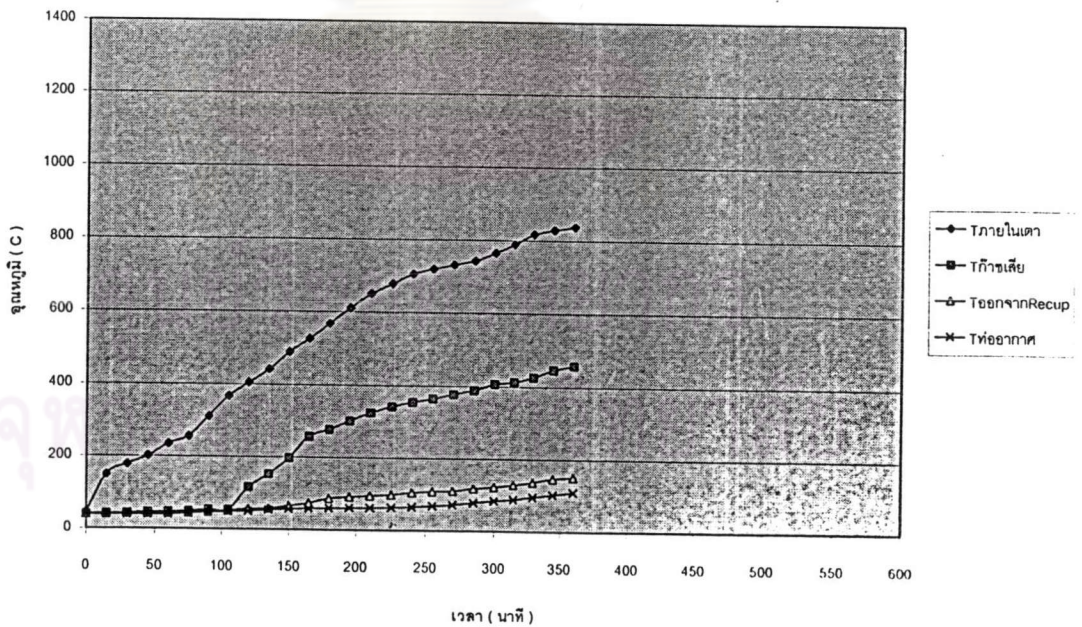
รูปที่ 8.10 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาติดครั้งที่ 1



รูปที่ 8.11 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาติดครั้งที่ 2



รูปที่ 8.12 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาครั้งที่ 3



รูปที่ 8.13 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาครั้งที่ 4



ตารางที่ 8.6 สรุปผลข้อมูลการทดลองเผาติดกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและหุ้มฉนวน

ลำดับการทดลอง	น้ำหนัก LPG ที่ใช้ (kg)	น้ำหนักวัสดุที่เสียในการเผา (kg)	T <sub>บริเวณเตา</sub> (°c)	T <sub>พื้นเตา</sub> (°c)	% O <sub>2</sub>	% CO <sub>2</sub>	ค่า CO ppm	ความเร็วของอากาศเข้าเตา (m/s)
9	4	0.7	52.6	81.2	7.79	8.74	72.1	0.078
10	4	0.6	53.4	79.6	5.99	10.37	68.18	0.073
11	4.1	0.6	53	82.1	5.51	11	60.18	0.075
12	3.9	0.6	53.7	81.5	5.25	11.38	63.64	0.077
เฉลี่ย	4	0.625	53.17	81.1	6.135	10.37	66	0.0757

## 2 การเผาเคลือบ

หลังจากที่ทำการเผาติดหรือ biscuit แล้ว ดำเนินการเผาเคลือบโดยตอนแรกเริ่มเผาที่อุณหภูมิภายในเตาประมาณ 45°C และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 1,100-1,300°C ใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง โดยทดลองเผาเคลือบหลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนแล้วกับเตาเผาเซรามิกทั้งหมด 4 ครั้ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. วันที่ 1 เมษายน 2545 เวลา 09.45 – 19.45
2. วันที่ 3 เมษายน 2545 เวลา 10.30 – 20.30
3. วันที่ 4 เมษายน 2545 เวลา 11.00 – 21.00
4. วันที่ 5 เมษายน 2545 เวลา 10.30 – 20.30

ซึ่งรายละเอียดของอุณหภูมิที่จุดต่างๆในการทดลองค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 8.7 , ตารางที่ 8.8 และตารางในภาคผนวก ค สำหรับตารางที่ 8.7 และตารางที่ 8.8 มีรายละเอียดดังนี้

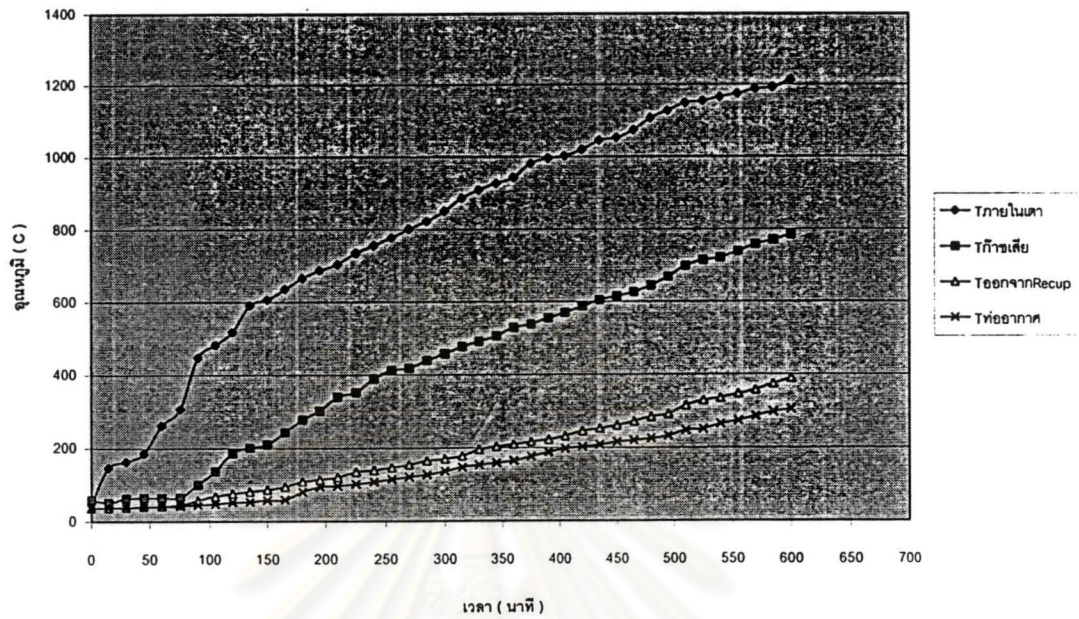
ตารางที่ 8.7 สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดต่างๆของการทดลองเผาเคลือบกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและหุ้มฉนวน

ลำดับ การ ทดลอง	เวลา ทดลอง (นาที)	T <sub>amb,dry</sub> (°c)	T <sub>amb,wet</sub> (°c)	T <sub>สูงสุดในเตา</sub> (°c)	T <sub>ก๊าซเชื้อ</sub> (°c)	T <sub>อบก Recup</sub> (°c)	T <sub>ห้องอากาศ</sub> (°c)	T <sub>ปล่อง</sub> (°c)	T <sub>เข้า Recup</sub> (°c)	T <sub>ออก Recup</sub> (°c)
13	600	33.21	29.6	1212	785	389	304.5	392.5	51.1	63.7
14	600	33.01	29.57	1215	791	391	309	427.8	48.5	61.4
15	600	34.95	30.27	1250	802	402	321	423	48	64.1
16	600	32.95	29.29	1220	800	394	310.5	431	49	61
<b>เฉลี่ย</b>	600	33.53	29.68	1224	794.5	394	311.3	418.5	49.4	62.5

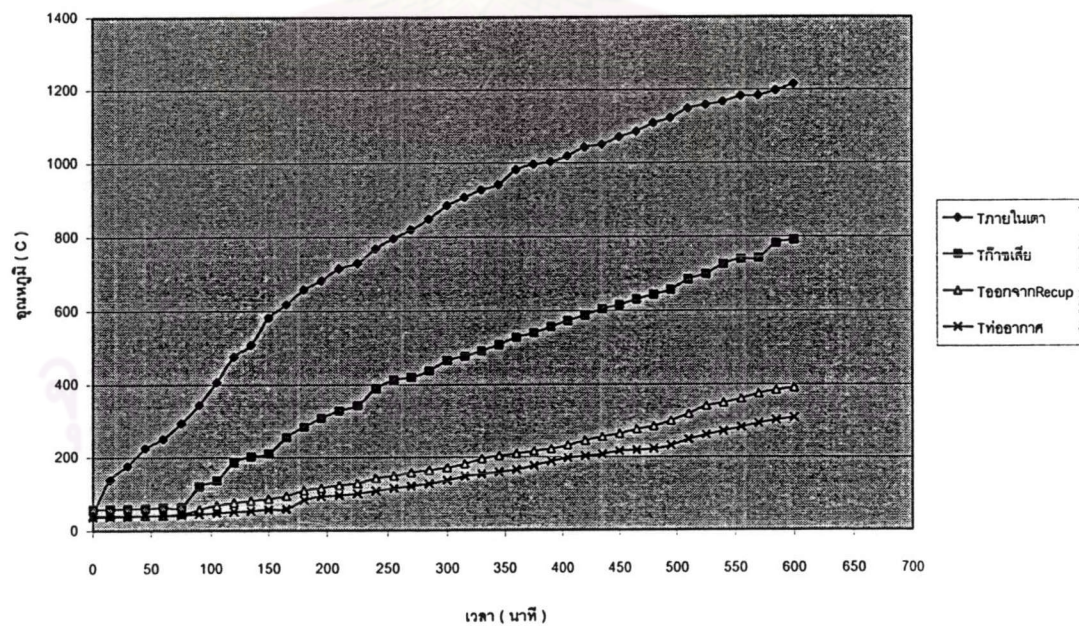
ตารางที่ 8.8 สรุปผลข้อมูลการทดลองเผาติดกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและหุ้มฉนวน

ลำดับการ ทดลอง	น้ำหนัก LPG ที่ใช้ (kg)	น้ำหนัก วัสดุที่เสีย ในการเผา (kg)	T <sub>ผิวนอกเตา</sub> (°c)	T <sub>พื้นเตา</sub> (°c)	% O <sub>2</sub>	% CO <sub>2</sub>	ค่า CO ppm	ความเร็ว ของอากาศ เข้าเตา (m/s)
1	10.6	0.5	102.5	125	5.126	10.53	51.74	0.075
2	10.7	0.7	103.4	126.1	4.87	11.05	52.53	0.072
3	10.5	0.7	105.4	125.6	3.97	11.38	81.21	0.069
4	10.4	0.6	104	126.5	5.46	10.49	51.63	0.076
<b>เฉลี่ย</b>	10.55	0.625	103.8	125.8	4.86	10.86	59.27	0.073

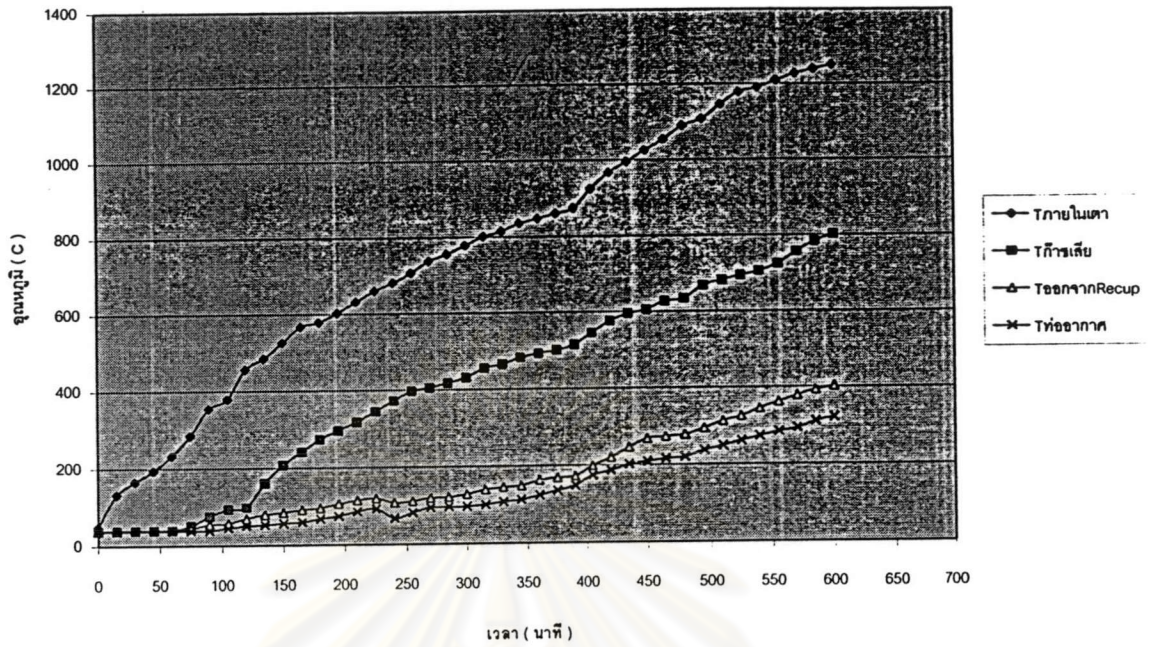




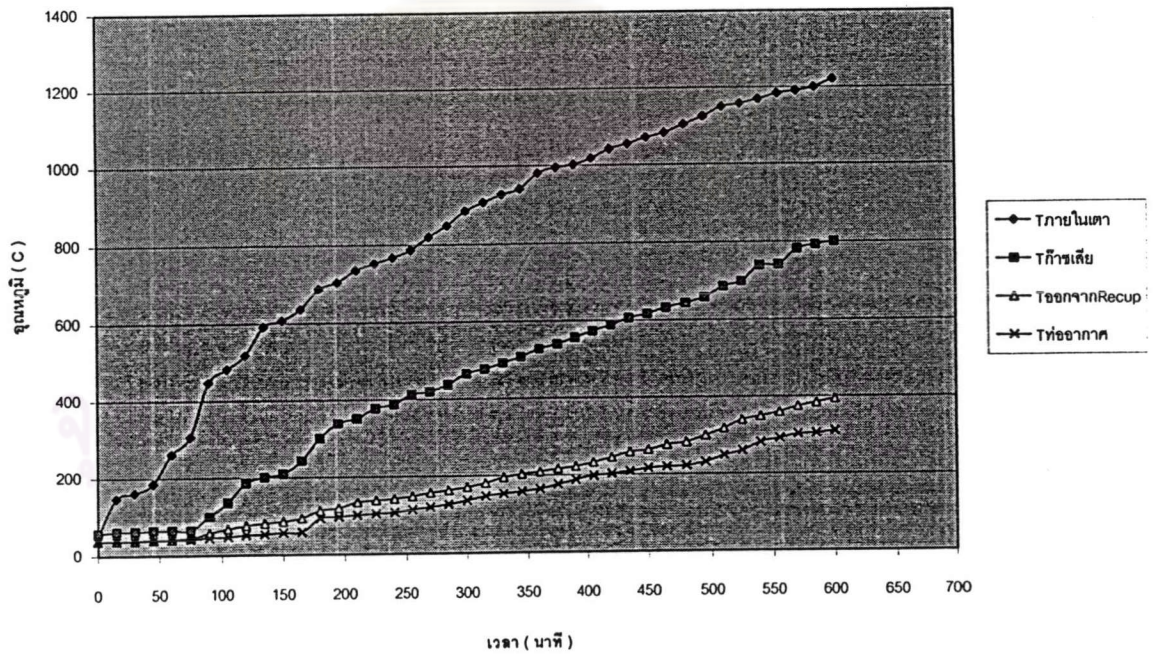
รูปที่ 8.14 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 1



รูปที่ 8.15 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 2



รูปที่ 8.16 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 3



รูปที่ 8.17 กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 4

### 8.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การวิเคราะห์พลังงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator ต้องทำการพิจารณาให้ทำงานในสภาวะคงตัว ( steady state ) และกำหนดให้ Recuperator เป็นระบบควบคุมปริมาตรที่ติดตั้งกับเตาเผาเซรามิคที่ทำงานในสภาวะปรกติ โดยการพิจารณาประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator จะทำการพิจารณาในกรณีของการเผาเคลือบที่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวนเนื่องจากการเผาเคลือบเป็นการเผาที่เตาเผาเซรามิคใช้พลังงานอย่างเต็มที่ในการเผา ซึ่งจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator ที่ได้ทำการติดตั้งกับเตาเผาเซรามิค

#### 8.3.1 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่หุ้มฉนวน

##### 1. สมดุลมวล ( Mass balance )

มวลเข้าสู่ระบบ = มวลออกจากระบบ

$$m_{g,i} + m_{a,i} = m_{g,o} + m_{a,o}$$

เนื่องจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator ถูกออกแบบให้มวลที่เข้าและออกจากระบบไม่มีการผสมกัน ดังนั้นจะได้

$$m_{g,i} = m_{g,o} \quad \text{หรือ} \quad m_{a,i} = m_{a,o}$$

จากตารางที่ 8.4 จะได้องค์ประกอบของไอเสียดังในตารางที่ 8.9

ตารางที่ 8.9 สัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียในการเผาเคลือบกับเตาเผาเซรามิค  
ที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่หุ้มฉนวน

ชนิดของไอเสีย	%by Volume	Molecular Weight	mass	%by mass
O <sub>2</sub>	4.37	32	139.84	4.7
CO <sub>2</sub>	10.95	44	481.8	16.1
CO	0.0093	28	0.26	8 x 10 <sup>-3</sup>
N <sub>2</sub>	84.67	28	2373.28	79.2
<b>รวม</b>			<b>2995.18</b>	

ในไอเสียแห้ง 1 kg ประกอบด้วย

$$\text{O}_2 = 0.047 \text{ kg}$$

$$\text{CO}_2 = 0.161 \text{ kg}$$

$$\text{CO} = 8 \times 10^{-5} \text{ kg (มีค่าน้อยมากจึงไม่นำไปพิจารณา)}$$

$$\text{N}_2 = 0.792 \text{ kg}$$

#### มวลเข้าสู่ระบบ

1.1 มวลก๊าซเสียเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน  $m_{g,i}$

จากสมการทางเคมีพิจารณาที่ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) เพราะไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) จะไม่เกิด  
การทำปฏิกิริยาทางเคมีในการเผาไหม้ ซึ่งก๊าซ LPG 11.17 kg จะใช้ N<sub>2</sub> ในการเผาไหม้

$$\text{N}_2 = 91.35 + 79.94 = 171.29 \text{ kg}$$

พิจารณาที่ก๊าซ LPG 11.17 kg

พิจารณา O<sub>2</sub> N<sub>2</sub> 0.792 kg จะมี O<sub>2</sub> หนัก 0.047 kg

ถ้า N<sub>2</sub> 171.29 kg จะมี O<sub>2</sub> หนัก 10.165 kg

พิจารณา CO<sub>2</sub> N<sub>2</sub> 0.792 kg จะมี CO<sub>2</sub> หนัก 0.16 kg

ถ้า N<sub>2</sub> 171.29 kg จะมี CO<sub>2</sub> หนัก 34.6 kg

ดังนั้นก๊าซเสียที่เข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีมวล

$$\begin{aligned} m_{g,i} &= m(\text{O}_2) + m(\text{CO}_2) + m(\text{N}_2) \\ &= 10.165 + 34.6 + 171.29 \\ &= 216.05 \text{ kg} \end{aligned}$$

**มวลออกจากระบบ**

1.2 มวลอากาศเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน  $m_{a,i}$

จากตารางที่ 8.4 ความเร็วของอากาศที่เข้าเตาเผาเท่ากับ 0.09 m/s

จาก  $Q = VA$

จะได้  $Q = 0.007 \text{ m}^3/\text{s}$

หรือคิดเป็นมวลอากาศทั้งหมดตลอดการเผาเท่ากับ 278 kg

ตารางที่ 8.10 ตารางสมดุลมวลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่หุ้มฉนวน

Input	Output
$M_{g,i} = 216.05 \text{ kg}$	$M_{g,o} = 216.05 \text{ kg}$
$M_{a,i} = 278 \text{ kg}$	$M_{a,o} = 278 \text{ kg}$
<b>รวม 494.05 kg</b>	<b>รวม 494.05 kg</b>

**2. ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน**

$$\varepsilon = \frac{m_a C_{p,a} (T_{a,o} - T_{a,i})}{m C_{p,\min} (T_{f,i} - T_{a,i})} \quad (8.6)$$

$$\varepsilon = \frac{7.76(286.2 - 46.9)}{7.06(747 - 46.9)}$$

$$\varepsilon = 38\%$$

### 8.3.2 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน

#### 1. สมดุลมวล ( Mass balance )

มวลเข้าสู่ระบบ = มวลออกจากระบบ

$$m_{g,i} + m_{a,i} = m_{g,o} + m_{a,o}$$

เนื่องจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator ถูกออกแบบให้มวลที่เข้าและออกจากระบบไม่มีการผสมกัน ดังนั้นจะได้

$$m_{g,i} = m_{g,o} \quad \text{หรือ} \quad m_{a,i} = m_{a,o}$$

จากตารางที่ 8.8 จะได้องค์ประกอบของไอเสียดังในตารางที่ 8.10

ตารางที่ 8.11 สัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียในการเผาเคลือบกับเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน

ชนิดของไอเสีย	%by Volume	Molecular Weight	mass	%by mass
O <sub>2</sub>	4.86	32	155.52	5.2
CO <sub>2</sub>	10.86	44	477.84	15.96
CO	0.006	28	0.168	0.005
N <sub>2</sub>	84.274	28	2359.672	78.83
<b>รวม</b>			<b>2993.2</b>	

ในไอเสียแห้ง 1 kg ประกอบด้วย

$$\text{O}_2 = 0.052 \text{ kg}$$

$$\text{CO}_2 = 0.1596 \text{ kg}$$

$$\text{CO} = 5 \times 10^{-5} \text{ kg (มีค่าน้อยมากจึงไม่นำไปพิจารณา)}$$

$$\text{N}_2 = 0.7883 \text{ kg}$$

### มวลเข้าสู่ระบบ

1.1  $m_{g,i}$  มวลก๊าซเสียเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากสมการทางเคมีพิจารณาที่ไนโตรเจน ( $N_2$ ) เพราะไนโตรเจน ( $N_2$ ) จะไม่เกิดการทำปฏิกิริยาทางเคมีในการเผาไหม้ ซึ่งก๊าซ LPG 10.55 kg จะใช้  $N_2$  ในการเผาไหม้

$$N_2 = 86.94 + 76.11 = 163.05 \text{ kg}$$

พิจารณาที่ก๊าซ LPG 10.55 kg

พิจารณา  $O_2$       $N_2$  0.7883 kg     จะมี  $O_2$      หนัก 0.052     kg

ถ้า  $N_2$  163.05 kg     จะมี  $O_2$      หนัก 10.75     kg

พิจารณา  $CO_2$       $N_2$  0.7883     kg     จะมี  $CO_2$      หนัก 0.1596     kg

ถ้า  $N_2$  163.05 kg     จะมี  $CO_2$      หนัก 33.011     kg

ดังนั้นก๊าซเสียที่เข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีมวล

$$\begin{aligned} m_{g,i} &= m(O_2) + m(CO_2) + m(N_2) \\ &= 10.75 + 33.011 + 163.05 \\ &= 206.811 \text{ kg} \end{aligned}$$

### มวลออกจากระบบ

1.2  $m_{a,i}$  มวลอากาศเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากตารางที่ 8.8 ความเร็วของอากาศที่เข้าเตาเผาเท่ากับ 0.073 m/s

$$\text{จาก } Q = VA$$

$$\text{จะได้ } Q = 0.0057 \text{ m}^3/\text{s}$$

หรือคิดเป็นมวลอากาศทั้งหมดตลอดการเผาเท่ากับ 226 kg

ตารางที่ 8.12 ตารางสมดุลมวลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน

Input	Output
$M_{g,i} = 206.811 \text{ kg}$	$M_{g,o} = 206.811 \text{ kg}$
$M_{a,i} = 226 \text{ kg}$	$M_{a,o} = 226 \text{ kg}$
<b>รวม 412.811 kg</b>	<b>รวม 412.811 kg</b>

## 2. ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\varepsilon = \frac{m_a c_{p,a} (T_{a,o} - T_{a,i})}{m c_{p,\min} (T_{f,j} - T_{a,i})}$$

$$\varepsilon = \frac{6.37(394 - 49.4)}{6.37(794.5 - 49.4)}$$

$$\varepsilon = 47\%$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

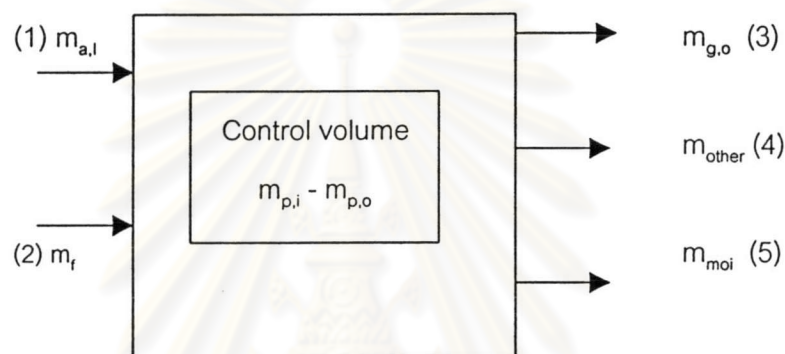


## 8.4 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในการเผาเคลือบ

### 8.4.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน

#### 1. สมดุลมวล Mass balance ของการเผาเคลือบ

มวลเข้าสู่ระบบ = มวลออกจากระบบ



รูปที่ 8.18 แสดงมวลเข้าสู่ระบบและมวลออกจากระบบในการเผาเคลือบของเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน

#### มวลเข้าสู่ระบบ ( Mass In )

1.  $m_f$  มวลเชื้อเพลิงเข้า

ในการเผาเคลือบ 4 ครั้ง ใช้ก๊าซ LPG เฉลี่ยครั้งละ 11.17 กิโลกรัม/ครั้ง

2.  $m_{p,i}$  มวลวัสดุที่เข้าเตา

ผลิตภัณฑ์ที่เข้าเตาเผาเคลือบ 4 ครั้ง มีน้ำหนักเฉลี่ยครั้งละ 8.15 กิโลกรัม

3.  $m_{a,i}$  มวลอากาศเข้าเตา

จากหัวข้อ 8.3 พบว่ามีมวลอากาศที่เข้าเตาเผาเฉลี่ย 278 กิโลกรัม/ครั้ง

### มวลออกจากระบบ ( Mass out )

4.  $m_{\text{moi}}$  มวลของความชื้นจากผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผาเคลือบในการเผาเคลือบทั้ง 4 ครั้ง ( $m_{\text{moi}}$ ) มีน้ำหนักโดยเฉลี่ยเท่ากับ 7.55 kg ต่อครั้ง ดังนั้นมวลของความชื้นจากผลิตภัณฑ์ 0.6 kg

5.  $m_{\text{g,o}}$  มวลก๊าซเสียออก

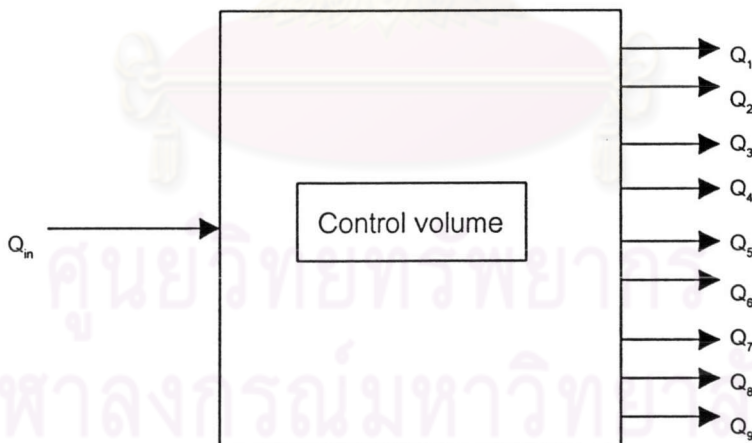
จากหัวข้อ 8.3 พบว่ามีมวลก๊าซเสียที่ออกจากเตาเผาเฉลี่ย 216.05 กิโลกรัม/ครั้ง

6.  $m_{\text{other}}$  มวลของเชื้อเพลิงและอากาศที่สูญเสียตามช่องเปิดต่างๆ

$$\begin{aligned} m_{\text{other}} &= m_{\text{input}} - (m_{\text{p,o}} + m_{\text{g,o}}) \\ &= 72.52 \text{ kg} \end{aligned}$$

### 2. สมดุลพลังงาน Energy balance ของการเผาเคลือบ

พลังงานเข้าสู่ระบบ = พลังงานออกจากระบบ



รูปที่ 8.19 แสดงพลังงานเข้าสู่ระบบและพลังงานออกจากระบบในการเผาเคลือบของเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน

### พลังงานเข้าสู่ระบบ ( Energy Input )

#### 1. พลังงานจากเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

$$\begin{aligned}
 Q_{in} \text{ (LPG)} &= \text{พลังงานที่ใช้ไปทั้งหมด} \\
 &= \text{น้ำหนักก๊าซที่ใช้} \times \text{ค่าความร้อนของ LPG} \\
 &= 11.17 \times 49,629 \\
 Q_{in} \text{ (LPG)} &= 554,356 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

#### 2. พลังงานที่ใช้อุ่นอากาศก่อนเข้าเตาเผา

$$\begin{aligned}
 Q_{re} &= m_a \times C_{p_a} \times (T_{re} - T_a) \\
 &= 278 \times 1.0116 \times (213.7 - 46.9) \\
 Q_{re} &= 46,908 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

### พลังงานออกจากระบบ ( Energy Output )

#### 1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา

$$Q_1(\text{hull}) = \text{พลังงานที่สะสมในไฟเบอร์} (Q_{11}) + \text{พลังงานที่สะสมในโครงเตา} (Q_{12})$$

$$Q_{11}(\text{Fiber}) = \text{พลังงานที่สะสมในไฟเบอร์}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{11}(\text{Fiber}) &= W_{\text{Fiber}} \times C_{p_{\text{Fiber}}} \times \Delta T_{11} \\
 &= 230 \times (0.26 \times 4.187) \times \left[ \left( \frac{1204 + 85.35}{2} \right) - 34 \right] \\
 &= 162,902 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$Q_{12}(\text{body flame}) = \text{พลังงานที่สะสมในโครงเตา}$$

$$\begin{aligned}
 &= W_{\text{body}} \times C_{p_{\text{body}}} \times \Delta T_{12} \\
 &= 400 \times 0.5 \times (85.35 - 34) \\
 &= 10,270 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } Q_1(\text{hull}) &= Q_{11} + Q_{12} \\
 &= 162,902 + 10,270 \\
 &= 173,172 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

## 2. พลังงานที่สะสมในพื้นเตา

$$\begin{aligned} Q_2(\text{Brick}) &= W_{\text{brick}} \times C_{p\text{brick}} \times Dt_2 \\ &= 275 \times 0.96 \times (123.03 - 34) \\ &= 23,504 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยค่า  $C_p$  ของอิฐทนไฟเท่ากับ 0.96 kJ/kg

## 3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์

$$\begin{aligned} Q_3(\text{Furniture}) &= W_{\text{Fur}} \times C_{p\text{Fur}} \times Dt_3 \\ &= 12.5 \times 0.67 \times (1204 - 34) \\ &= 9,798.75 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่เฟอร์นิเจอร์คือแผ่นสำหรับวางวัตถุที่ทำการเผาเป็นแผ่น Silicon Carbide มีค่า  $C_p$  เท่ากับ 0.67 kJ/kg

## 4. พลังงานที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} Q_4(\text{Product}) &= m_p \times C_p \times Dt_4 \\ &= 8.15 \times (0.33 \times 4.187) \times (1204 - 34) \\ &= 13,175.3 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่ผลิตภัณฑ์ คือ ดินขาวจากจังหวัดลำปาง มีค่า  $C_p$  เท่ากับ 0.33 kcal / kg หรือ  $0.33 \times 4.187 = 1.38 \text{ kJ/kg}$

## 5. พลังงานที่สูญเสียไปจากการแผ่รังสี

$$Q_5 = Q_{5_1}(\text{radiation loss of hull}) + Q_{5_2}(\text{radiation loss of kiln})$$

$$Q_{5_1}(\text{radiation loss of hull})$$

$$\begin{aligned} Q_{5_1} &= A_1 \times e_1 \times 5.67 \left[ \left( \frac{T_s(\text{ave})_1 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= \{3.94 + (0.85 \times 1.12)\} \times 0.85 \times 5.67 \\ &\quad \left[ \left( \frac{59.67 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{34 + 273}{100} \right)^4 \right] \times 10 \times 3.6 \\ &= 28,560 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$Q_{52}$ (radiation loss of kiln)

$$\begin{aligned} Q_{52} &= A_2 \times e_2 \times 5.67 \times \left[ \left( \frac{T_s(\text{ave})_2 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= (0.85 \times 1.12) \times 0.85 \times 5.67 \left[ \left( \frac{78.51 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{34 + 273}{100} \right)^4 \right] \\ &\quad \times 10 \times 3.6 \\ &= 20,544.7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ดังนั้น  $Q_5 = Q_{51} + Q_{52}$

$$\begin{aligned} &= 28,560 + 20,544.7 \text{ kJ} \\ &= 49,104.7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

6. พลังงานที่สูญเสียไปจากการพาความร้อน

$$Q_6 = Q_{61}(\text{convection loss of hull}) + Q_{62}(\text{convection loss of kiln floor})$$

$Q_{61}$ (convection loss of hull)

$$\begin{aligned} Q_{61} &= A_1 \times hc_1 \times (T_s(\text{ave})_1 - T_a) \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= \{3.94 + (0.85 \times 1.12)\} \times 5.82 \times (59.67 - 34) \times 10 \times 3.6 \\ &= 26,311 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$Q_{62}$ (convection loss of kiln floor)

$$\begin{aligned} Q_{62} &= A_2 \times hc_2 \times (T_s(\text{ave})_2 - T_a) \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= (0.85 \times 1.12) \times 7.9 \times (78.51 - 34) \times 10 \times 3.6 \\ &= 12,051 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ดังนั้น  $Q_6 = Q_{61} + Q_{62}$

$$\begin{aligned} &= 26,311 + 12,051 \\ &= 38,362 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} h_{c1} &= \frac{6 \times [T_s(\text{ave})_1 - T_a]^{0.25}}{(TaL)^{0.25}} \\ &= \frac{6 \times [59.67 - 34]^{0.25}}{(34 \times 0.85)^{0.25}} \\ &= 5.82 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{c2} &= \frac{6 \times [T_s(\text{ave})_2 - T_a]^{0.25}}{(TaL)^{0.25}} \\ &= \frac{6 \times [123.03 - 34]^{0.25}}{(34 \times 0.85)^{0.25}} \\ &= 7.9 \end{aligned}$$

7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ

$$\begin{aligned} Q_7 &= m_a \times W \times C_{p_{st}} \times (T_g - T_a) \\ &= 278 \times 0.0271 \times 2.076 \times (747 - 34) \\ &= 11,152 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} C_{p_{st}} &= \frac{h(747) - h(34)}{(747 - 34)} \\ &= \frac{(4044 - 2563.5)}{713} \\ &= 2.076 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$W(\text{Specific humidity}) = \frac{C_p(T_{wet} - T_{dry}) + W_2 h_{f_2}}{h_{g_1} - h_{f_2}}$$

$$\begin{aligned} W_2 &= \frac{0.622 P_{g2}}{p_2 - p_{g2}} \\ &= \frac{0.622 \times 4.24}{101.325 - 4.24} \\ &= 0.0271 \end{aligned}$$

$$W = \frac{(1.005 \times (29.7 - 34)) + (0.0271 \times 2430.5)}{(2563.8 - 125.12)}$$

$$= 0.025 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg dry air}$$

### 8. พลังงานที่สะสมอยู่ในก๊าซเสีย

$$Q_8 = m_g \times C_{pg} \times (T_g - T_a)$$

$$Q_8 = Q(\text{CO}_2) + Q(\text{O}_2) + Q(\text{CO}) + Q(\text{N}_2)$$

เนื่องจากมวลของ CO มีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณาดังนั้นจะได้

$$Q_8 = Q(\text{CO}_2) + Q(\text{O}_2) + Q(\text{N}_2)$$

โดยที่

$$Q(\text{CO}_2) = m(\text{CO}_2) \times C_p(\text{CO}_2) \times (T_g - T_a)$$

$$= 34.6 \times 1.2359 \times (747 - 34)$$

$$= 30,489.4 \text{ kJ}$$

$$Q(\text{O}_2) = m(\text{O}_2) \times C_p(\text{O}_2) \times (T_g - T_a)$$

$$= 10.165 \times 1.087 \times (747 - 34)$$

$$= 7,878.2 \text{ kJ}$$

$$Q(\text{N}_2) = m(\text{N}_2) \times C_p(\text{N}_2) \times (T_g - T_a)$$

$$= 171.29 \times 1.170 \times (747 - 34)$$

$$= 142,892 \text{ kJ}$$

$$\text{ดังนั้น } Q_8 = 30,489.4 + 7,878.2 + 142,892$$

$$= 181,259.6 \text{ kJ}$$

### 9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิด

การสูญเสียพลังงานชนิดนี้เป็นการสูญเสียพลังงานที่ไม่สามารถวัดค่าได้ซึ่งจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$Q_9 = Q_{in} - [Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8]$$

$$= 101,735 \text{ kJ}$$

### 3. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเซรามิก

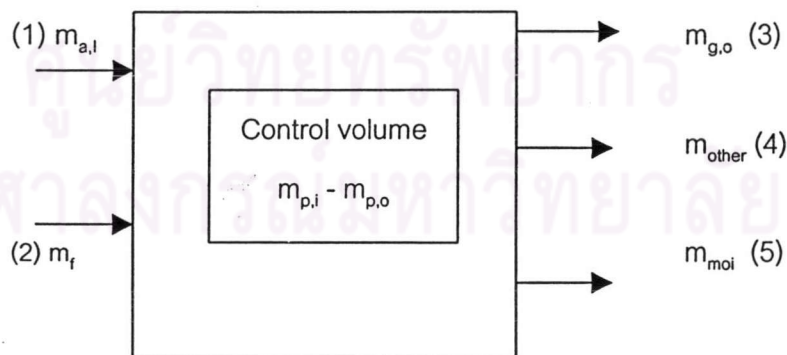
$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\text{ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา}} \\
 &= \frac{\text{พลังงานที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์}}{\text{พลังงานที่เข้าสู่ระบบ}} \\
 &= \frac{Q_4}{Q_{in}} \times 100\% \\
 &= \frac{13175.3}{601264} \times 100\% \\
 \eta &= 2.2 \%
 \end{aligned}$$

การที่ประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกมีค่าน้อยเนื่องจากในการทดลองนี้ได้นำผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผาเป็นจำนวนน้อยมากถ้าเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าเตาเผาเซรามิกที่ใช้กันอยู่จริงในอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิก

#### 8.4.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนแล้ว

##### 1. สมดุลมวล Mass balance ของการเผาเคลือบ

มวลเข้าสู่ระบบ = มวลออกจากระบบ



รูปที่ 8.20 แสดงมวลเข้าสู่ระบบและมวลออกจากระบบในการเผาเคลือบของเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน



### มวลเข้าสู่ระบบ ( Mass In )

1.  $m_f$  มวลเชื้อเพลิงเข้า

ในการเผาเคือบ 4 ครั้งใช้ก๊าซ LPG เฉลี่ยครั้งละ 10.55 กิโลกรัม/ครั้ง

2.  $m_{p,i}$  มวลวัสดุที่เข้าเตา

ผลิตภัณฑ์ที่เข้าเตาเผาเคือบ 4 ครั้ง มีน้ำหนักเฉลี่ยครั้งละ 8.125 กิโลกรัม

3.  $m_{a,i}$  มวลอากาศเข้าเตา

จากหัวข้อ 8.3 พบว่ามีมวลอากาศที่เข้าเตาเผาเฉลี่ย 226 กิโลกรัม/ครั้ง

### มวลออกจากระบบ ( Mass out )

4.  $m_{moi}$  มวลของความชื้นจากผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผาเคือบในการเผาเคือบทั้ง 4 ครั้ง ( $m_{p,o}$ ) มีน้ำหนักโดยเฉลี่ยเท่ากับ 7.5 kg ต่อครั้ง ดังนั้นมวลของความชื้นจากผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.625 kg

5.  $m_{g,o}$  มวลก๊าซเสียออก

จากหัวข้อ 8.3 พบว่ามีมวลก๊าซเสียที่ออกจากเตาเผาเฉลี่ย 206.811 กิโลกรัม/ครั้ง

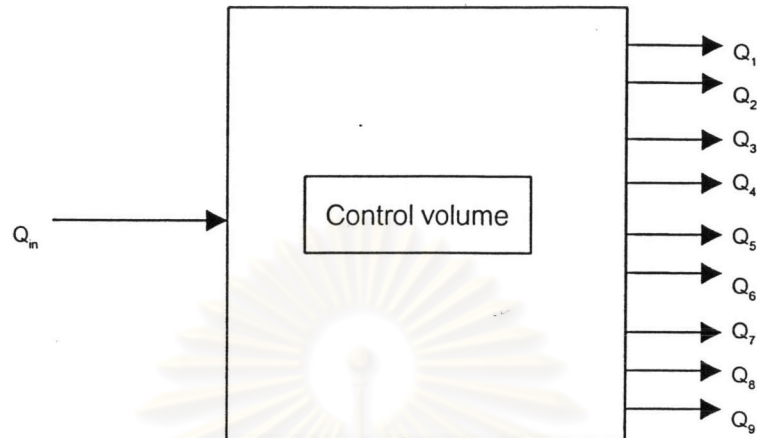
6.  $m_{other}$  มวลของเชื้อเพลิงและอากาศที่สูญเสียตามช่องเปิดต่างๆ

$$\begin{aligned} m_{other} &= m_{input} - (m_{p,o} + m_{g,o}) \\ &= 29.114 \text{ kg} \end{aligned}$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. สมดุลพลังงาน Energy balance ของการเผาเค็ลือบ

พลังงานเข้าสู่ระบบ = พลังงานออกจากระบบ



รูปที่ 8.21 แสดงพลังงานเข้าสู่ระบบและพลังงานออกจากระบบในการเผาเค็ลือบของเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน

พลังงานเข้าสู่ระบบ ( Energy Input )

1. พลังงานจากเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

$$\begin{aligned} Q_{in} \text{ (LPG)} &= \text{พลังงานที่ใช้ไปทั้งหมด} \\ &= \text{น้ำหนักก๊าซที่ใช้} \times \text{ค่าความร้อนของ LPG} \\ &= 10.55 \times 49,629 \end{aligned}$$

$$Q_{in} \text{ (LPG)} = 523,586 \text{ kJ}$$

2. พลังงานที่ใช้อุ่นอากาศก่อนเข้าเตาเผา

$$\begin{aligned} Q_{re} &= m_a \times C_{p_a} \times (T_{re} - T_a) \\ &= 226 \times 1.016 \times (311.3 - 49.4) \end{aligned}$$

$$Q_{re} = 60,136 \text{ kJ}$$

พลังงานออกจากระบบ ( Energy Output )

1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา

$$Q_1 \text{ (hull)} = \text{พลังงานที่สะสมในไฟเบอร์} (Q_{11}) + \text{พลังงานที่สะสมในโครงเตา} (Q_{12})$$

$Q_{11}(\text{Fiber}) =$  พลังงานที่สะสมในไฟเบอร์

$$\begin{aligned} Q_{11}(\text{Fiber}) &= W_{\text{Fiber}} \times C_{p_{\text{Fiber}}} \times Dt_{11} \\ &= 230 \times (0.26 \times 4.187) \times \left[ \left( \frac{1224 + 103.8}{2} \right) - 33.53 \right] \\ &= 157,834 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$Q_{12}(\text{body flame}) =$  พลังงานที่สะสมในโครงเตา

$$\begin{aligned} &= W_{\text{body}} \times C_{p_{\text{body}}} \times Dt_{12} \\ &= 400 \times 0.5 \times (103.8 - 33.53) \\ &= 14,054 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q_1(\text{hull}) &= Q_{11} + Q_{12} \\ &= 157,834 + 14,054 \\ &= 171,888 \text{ kJ} \end{aligned}$$

2. พลังงานที่สะสมในพื้นเตา

$$\begin{aligned} Q_2(\text{Brick}) &= W_{\text{brick}} \times C_{p_{\text{brick}}} \times Dt_2 \\ &= 275 \times 0.96 \times (125.8 - 33.53) \\ &= 24,359 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยค่า  $C_p$  ของอิฐทนไฟเท่ากับ 0.96 kJ/kg

3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์

$$\begin{aligned} Q_3(\text{Furniture}) &= W_{\text{Fur}} \times C_{p_{\text{Fur}}} \times Dt_3 \\ &= 12.5 \times 0.67 \times (1224 - 33.53) \\ &= 9,970 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่เฟอร์นิเจอร์คือแผ่นสำหรับวางวัตถุที่ทำการเผาเป็นแผ่น Silicon Carbide มีค่า

$C_p$  เท่ากับ 0.67 kJ/kg

## 4. พลังงานที่ใช้ในการเผาผลิติดัชนี

$$\begin{aligned}
 Q_4(\text{Product}) &= m_p \times C_p \times Dt_4 \\
 &= 8.125 \times (0.33 \times 4.187) \times (1224 - 33.53) \\
 &= 13,364.7 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

โดยที่ผลิติดัชนี คือ ดินขาวจากจังหวัดลำปาง มีค่า  $C_p$  เท่ากับ  $0.33 \text{ kcal / kg}$  หรือ  $0.33 \times 4.187 = 1.38 \text{ kJ/kg}$

## 5. พลังงานที่สูญเสียไปจากการแผ่รังสี

$$Q_5 = Q_{51}(\text{radiation loss of hull}) + Q_{52}(\text{radiation loss of kiln})$$

$$Q_{51}(\text{radiation loss of hull})$$

$$\begin{aligned}
 Q_{51} &= A_1 \times e_1 \times 5.67 \left[ \left( \frac{T_s(\text{ave})_1 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \times \text{hr} \times 3.6 \\
 &= \{3.94 + (0.85 \times 1.12)\} \times 0.4 \times 5.67 \\
 &\quad \left[ \left( \frac{68.6 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{33.53 + 273}{100} \right)^4 \right] \times 10 \times 3.6 \\
 &= 19,125 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$Q_{52}(\text{radiation loss of kiln})$$

$$\begin{aligned}
 Q_{52} &= A_2 \times e_2 \times 5.67 \times \left[ \left( \frac{T_s(\text{ave})_2 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \times \text{hr} \times 3.6 \\
 &= (0.85 \times 1.12) \times 0.85 \times 5.67 \left[ \left( \frac{79.6 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{33.53 + 273}{100} \right)^4 \right] \\
 &\quad \times 10 \times 3.6 \\
 &= 10,949 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } Q_5 &= Q_{51} + Q_{52} \\
 &= 19125 + 10,949 \text{ kJ} \\
 &= 30,074 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

## 6. พลังงานที่สูญเสียไปจากการพาความร้อน

$$Q_6 = Q_{61}(\text{convection loss of hull}) + Q_{62}(\text{convection loss of kiln floor})$$

$Q_{61}$ (convection loss of hull)

$$\begin{aligned} Q_{61} &= A_1 \times hc_1 \times (T_s(\text{ave})_1 - T_a) \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= \{3.94 + (0.85 \times 1.12)\} \times 6.32 \times (68.6 - 33.53) \times 10 \times 3.6 \\ &= 39,034 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$Q_{62}$ (convection loss of kiln floor)

$$\begin{aligned} Q_{62} &= A_2 \times hc_2 \times (T_s(\text{ave})_2 - T_a) \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= (0.85 \times 1.12) \times 6.76 \times (79.6 - 33.53) \times 10 \times 3.6 \\ &= 10,637 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ดังนั้น  $Q_6 = Q_{61} + Q_{62}$

$$\begin{aligned} &= 39,034 + 10,637 \\ &= 49,671 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} h_{c1} &= \frac{6 \times [T_s(\text{ave})_1 - T_a]^{0.25}}{(TaL)^{0.25}} \\ &= \frac{6 \times [68.6 - 33.53]^{0.25}}{(33.53 \times 0.85)^{0.25}} \end{aligned}$$

$$h_{c1} = 6.32$$

$$\begin{aligned} h_{c2} &= \frac{6 \times [T_s(\text{ave})_2 - T_a]^{0.25}}{(TaL)^{0.25}} \\ &= \frac{6 \times [79.6 - 33.5]^{0.25}}{(33.5 \times 0.85)^{0.25}} \\ &= 6.76 \end{aligned}$$

7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ

$$\begin{aligned} Q_7 &= m_a \times W \times Cp_{st} \times (Tg - Ta) \\ &= 226 \times 0.0247 \times 2.2 \times (794.5 - 33.5) \\ &= 9,346 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} C_{p_{st}} &= \frac{h(794.5) - h(33.5)}{(749.5 - 33.5)} \\ &= \frac{(4159 - 2563)}{788.5} \\ &= 2.2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$W(\text{Specific humidity}) = \frac{C_p(T_{wet} - T_{dry}) + W_2 h_{f_2}}{h_{g_1} - h_{f_2}}$$

$$\begin{aligned} W_2 &= \frac{0.622 P_{g2}}{p_2 - p_{g2}} \\ &= \frac{0.622 \times 4.159}{101.325 - 4.159} \\ &= 0.026 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{(1.005 \times (29.6 - 32.5)) + (0.026 \times 2431.4)}{(2560.8 - 124.12)} \\ &= 0.02474 \text{ kg H}_2\text{O / kg dry air} \end{aligned}$$

8. พลังงานที่สะสมอยู่ในก๊าซเสีย

$$Q_8 = m_g \times C_{pg} \times (T_g - T_a)$$

$$Q_8 = Q(\text{CO}_2) + Q(\text{O}_2) + Q(\text{CO}) + Q(\text{N}_2)$$

เนื่องจากมวลของ CO มีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณาดังนั้นจะได้

$$Q_8 = Q(\text{CO}_2) + Q(\text{O}_2) + Q(\text{N}_2)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} Q(\text{CO}_2) &= m(\text{CO}_2) \times C_p(\text{CO}_2) \times (T_g - T_a) \\ &= 33.011 \times 1.2451 \times (794.5 - 33.53) \\ &= 31,277 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q(\text{O}_2) &= m(\text{O}_2) \times C_p(\text{O}_2) \times (T_g - T_a) \\ &= 10.75 \times 1.0924 \times (794.5 - 33.53) \\ &= 8,936.3 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q(N_2) &= m(N_2) \times C_p(N_2) \times (T_g - T_a) \\
 &= 163.05 \times 1.1774 \times (794.5 - 33.53) \\
 &= 146,087 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } Q_8 &= 31,277 + 8,936.3 + 146,087 \\
 &= 186,300.3 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

### 9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิด

การสูญเสียพลังงานชนิดนี้เป็นการสูญเสียพลังงาน ที่ไม่สามารถวัดค่าได้ซึ่งจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 Q_9 &= Q_{in} - [Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8] \\
 &= 67,234 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

### 3. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเซรามิค

$$\eta = \frac{\text{ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา}}$$

$$= \frac{\text{พลังงานที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์}}{\text{พลังงานที่เข้าสู่ระบบ}}$$

$$= \frac{Q_4}{Q_{in}} \times 100\%$$

$$= \frac{13364.7}{583722} \times 100\%$$

$$\eta = 2.3 \%$$

ตารางที่ 8.15 ตารางสมดุลมวลเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและ  
ไม่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบต่อ 1 รอบการเผา

input	output
1. มวลเชื้อเพลิง( LPG ) เข้าเตา 11.17 kg	1. มวลของความชื้นจากผลิตภัณฑ์ 0.6 kg
2. มวลอากาศเข้าเตา 278 kg	2. มวลก๊าซเสีย Mo <sub>2</sub> 10.165 kg Mco <sub>2</sub> 34.60 kg Mn <sub>2</sub> 171.29 kg
	3. มวลที่สูญเสียจากช่องเปิดต่างๆ 72.52 kg และที่ไม่สามารถวัดค่าได้
รวม 289.17 kg	รวม 289.17 kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 8.16 ตารางสมดุลมวลเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและหุ้มฉนวน  
ในการเผาเคลือบต่อ 1 รอบการเผา

input	output
1. มวลเชื้อเพลิง( LPG ) เข้าเตา 10.55 kg	1. มวลความชื้นจากผลิตภัณฑ์ 0.625 kg
2. มวลอากาศเข้าเตา 226 kg	2. มวลก๊าซเสีย Mo2 10.175 kg Mco2 33.011 kg MN2 206.81 kg
	3. มวลที่สูญเสียดังกล่าวจากช่องเปิดต่างๆ และที่ไม่สามารถวัดค่าได้ 29.114 kg
รวม 236.55 kg	รวม 236.55 kg

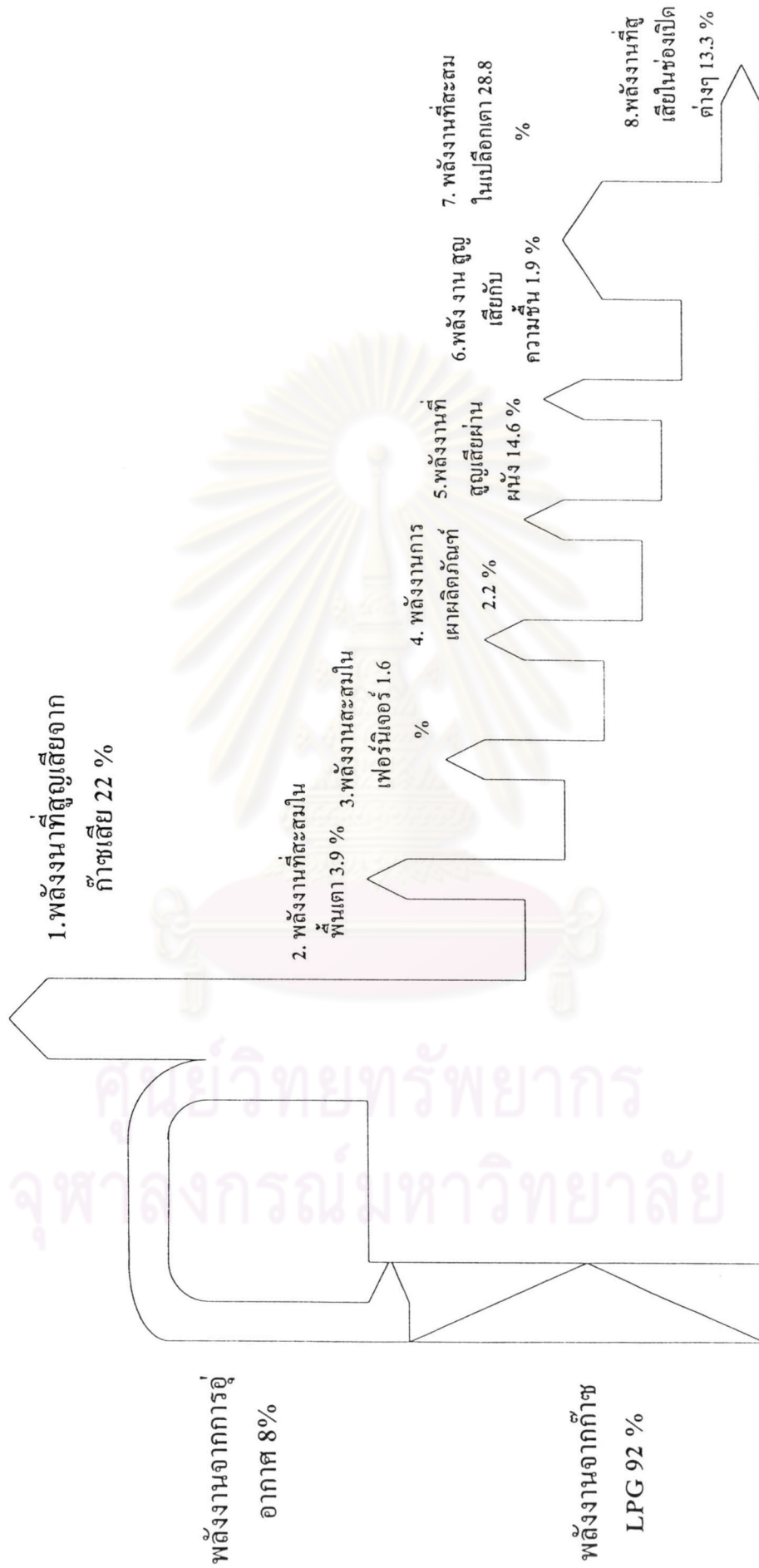
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.17 ตารางสมดุลพลังงานเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และไม่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบต่อ 1 รอบการเผา

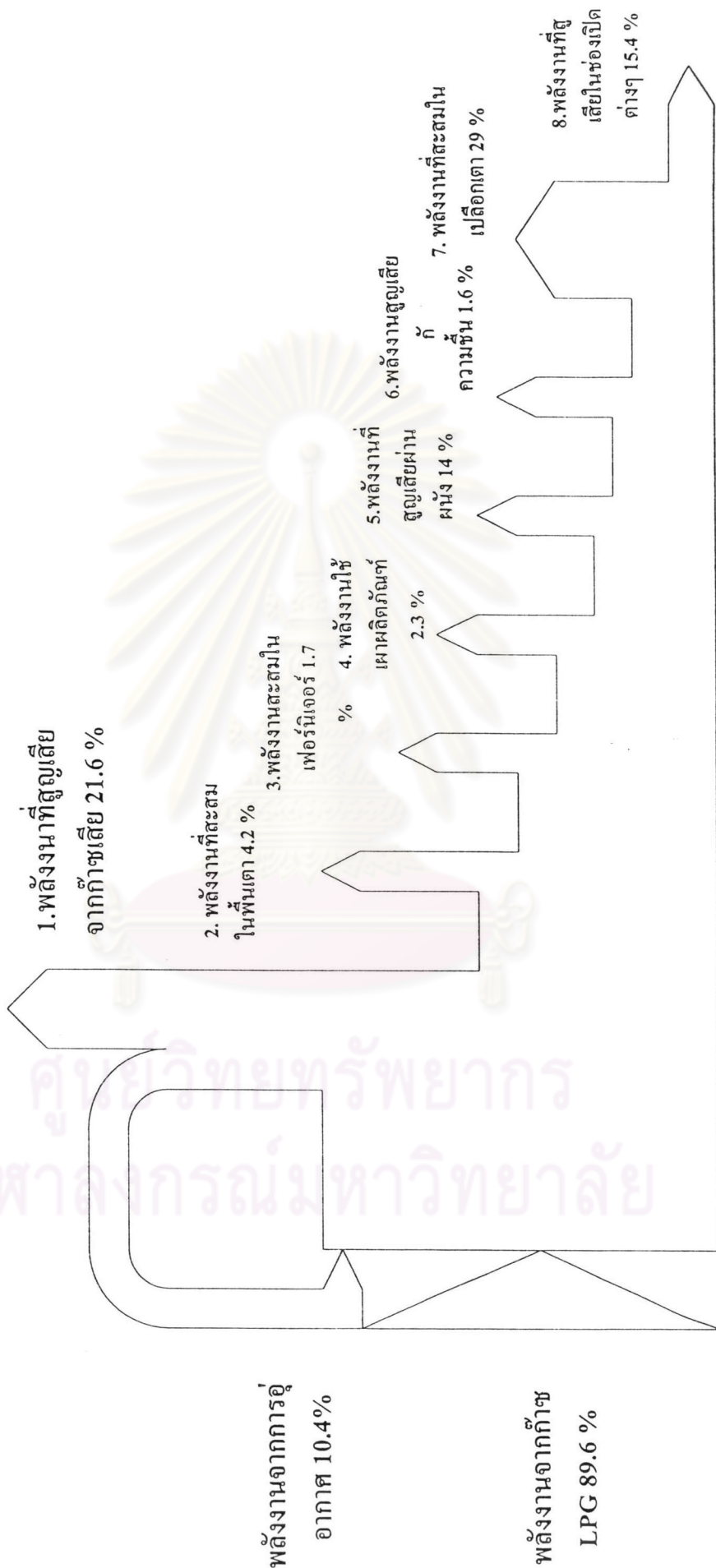
input	%	output	%
1. พลังงานจากเชื้อเพลิง( LPG )		1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา	
554,356 KJ	92	173,172 KJ	28.8
2. พลังงานจากการอุ่นอากาศ		2. พลังงานที่สะสมในพื้นที่เตา	
46,908 KJ	8	23,504 KJ	3.9
		3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์	
		9,799 KJ	1.6
		4. พลังงานที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์	
		13,175 KJ	2.2
		5. พลังงานที่สูญเสียจากการแผ่รังสี	
		49,105 KJ	8.2
		6. พลังงานที่สูญเสียจากการพาความร้อน	
		38,362 KJ	6.4
		7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ	
		11,152 KJ	1.9
		8. พลังงานที่สะสมในก๊าซเสีย	
		181,259 KJ	30
		9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิดและที่ไม่สามารถวัดค่าได้	
		101,735 KJ	13.3
<b>รวม 601,264 KJ</b>	<b>100</b>	<b>รวม 601,264 KJ</b>	<b>100</b>

ตารางที่ 8.18 ตารางสมดุลพลังงานเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และหุ้มฉนวนในการเผาเคลือบต่อ 1 รอบการเผา

input	%	output	%
1. พลังงานจากเชื้อเพลิง( LPG ) 523,586 KJ	89.6	1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา 171,888 KJ	29
2. พลังงานจากการอุ่นอากาศ 60,136 KJ	10.4	2. พลังงานที่สะสมในพื้นที่ 24,359 KJ	4.2
		3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์ 9,970 KJ	1.7
		4. พลังงานที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์ 13,365 KJ	2.3
		5. พลังงานที่สูญเสียจากการแผ่รังสี 30,074 KJ	5.1
		6. พลังงานที่สูญเสียจากการพา ความร้อน 49,671 KJ	8.9
		7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้น ในอากาศ 9,346 KJ	1.6
		8. พลังงานที่สะสมในก๊าซเสีย 186,300 KJ	32
		9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิด และที่ไม่สามารถวัดค่าได้ 138,420 KJ	15.2
<b>รวม 583,722 KJ</b>	<b>100</b>	<b>รวม 583,722 KJ</b>	<b>100</b>



รูปที่ 8.24 แสดง Sankey diagram พลังงานของเตาเผา  
หลังติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่หมุนวน



รูปที่ 8.25 แสดง Sankey diagram พลังงานของเตาเผา หลังติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน

## 8.5 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินศักยภาพในการปรับปรุงระบบ จะใช้วิธีวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เป็นการประเมินว่ามีศักยภาพมากน้อยเพียงใด ซึ่งวิธีวิเคราะห์ที่ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุน (Pay-back - period) และผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return) โดยจะทำการพิจารณาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งกับเตาเผาเซรามิกที่หุ้มฉนวนแล้วซึ่งมีข้อพิจารณาดังต่อไปนี้

1. เวลาทำงานของเตาวันละ 10 ชั่วโมง เผาทุกวันเว้นวันอาทิตย์จะได้วันงานประมาณ 330 วันต่อปี
2. การเผาเคลือบก่อนติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใช้เชื้อเพลิง LPG 13.7 kg หลังติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใช้เชื้อเพลิง LPG 10.55 kg ประหยัดลง 3.15 kg ต่อการเผา 1 ครั้ง ดังนั้น 1 ปีจะประหยัดเชื้อเพลิง LPG ได้ 976.5 kg หรือ 14,553 บาท ในปัจจุบันก๊าซ LPG ราคา 14 บาทต่อ 1 kg
3. ราคาค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 25,000 บาท

### 8.5.1 ระยะเวลาคืนทุน (Pay-back period, n)

คือเวลาที่ต้องการเพื่อให้การลงทุนเริ่มต้นได้รับการคืนทุนสามารถคำนวณได้จากการแทนค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} A_s &= TIC \times CRF \\ 14553 &= 25000 \times CRF \\ CRF &= 0.58 \end{aligned}$$

จากสมการ  $CRF = [i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1)]$

$$i = 15\%$$

ระยะเวลาคืนทุน  $n = 2.14$  ปี หรือ 2 ปี 2 เดือน

### 8.5.2 อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal rate of return, IRR)

หมายถึงการคำนวณหาอัตราคิดลด(Discount rate) ที่มีผลทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดที่ได้รับในอนาคต เท่ากับเงินลงทุนที่จ่ายในปัจจุบัน นั่นคือมูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของเงินสดจ่าย โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$TIC = A_s \left[ \frac{1}{1+IRR} + \frac{1}{(1+IRR)^{m-1}} + \dots + \frac{1}{(1+IRR)^m} \right]$$

เมื่อ  $m$  คือ อายุการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกำหนดให้มีอายุการใช้งาน 10 ปี และทุกๆ 2 ปีจะต้องดำเนินการทำความสะอาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยคิดค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดครั้งละ 4,000 บาท

จะได้

$$25000 = 12553 \left[ \frac{1}{1+IRR} + \frac{1}{(1+IRR)^2} + \dots + \frac{1}{(1+IRR)^{10}} \right]$$

$$1.99 = \left[ \frac{1}{1+IRR} + \frac{1}{(1+IRR)^2} + \dots + \frac{1}{(1+IRR)^{10}} \right]$$

$$IRR = 49.5 \%$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย