

การวิเคราะห์พลังงานสำหรับเตาเผาเซรามิก

4.1 การตรวจวัดประสิทธิภาพและจัดเก็บข้อมูล

4.1.1 รายการข้อมูลที่ดำเนินการตรวจวัด

การจัดเก็บข้อมูลในขั้นนี้เป็นการจัดเก็บเพื่อทำการ วิเคราะห์พลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกประสิทธิภาพสูงขนาดความจุ 0.5 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งประกอบด้วยพลังงานที่เข้าออกของระบบและประสิทธิภาพต่างๆ ของกระบวนการเผาของเตาชนิดนี้

ขั้นตอนในการหาค่าต่างที่ต้องการทราบตามสมการในทฤษฎีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกมีรายละเอียดและวิธีการหาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 รายการข้อมูลที่ต้องการทราบ

รายการข้อมูลที่ต้องการทราบ	หน่วย
1. น้ำหนักของเชื้อเพลิง(ก๊าซ LPG) ที่ใช้ในการเผาต่อ 1 รอบการเผา	kg
2. น้ำหนักของอากาศที่เข้าสู่เตาเผาต่อ 1 รอบการเผา	kg
3. น้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่เตาเผาใน 1 รอบการเผา	kg
4. น้ำหนักของแก๊สเสียที่ออกจากเตาเผาใน 1 รอบการเผา	kg
5. น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผาใน 1 รอบการเผา	kg
6. น้ำหนักของฉนวนไฟเบอร์ภายในเตาเผาเซรามิก	kg
7. น้ำหนักของโครงสร้างตัวเตาเผาเซรามิก	kg
8. น้ำหนักของอิฐพื้นเตาเผาเซรามิก	kg
9. น้ำหนักเฟอร์นิเจอร์ภายในเตาเผาเซรามิก	kg
10. ค่าความร้อนจำเพาะของไฟเบอร์	kJ/kg
11. ค่าความร้อนจำเพาะของอิฐพื้นเตา	kJ/kg
12. ค่าความร้อนจำเพาะของฉนวนเฟอร์นิเจอร์	kJ/kg
13. ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์	kJ/kg
14. ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก	kJ/kg

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) รายการข้อมูลที่ต้องการทราบ

รายการข้อมูลที่ต้องการทราบ	หน่วย
15. อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิค	°C
16. อุณหภูมิผิวเปลือกของเตาเผาเซรามิค	°C
17. อุณหภูมิผิวใต้พื้นเตาเผาเซรามิค	°C
18. อุณหภูมิกระเปราะแห่งของบรรยากาศ	°C
19. อุณหภูมิกระเปราะเปียกของบรรยากาศ	°C
20. อุณหภูมิเฉลี่ยของเปลือกเตาเผาเซรามิค	°C
21. อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นเตาเผาเซรามิค	°C
22. พื้นที่เปลือกเตาเผาเซรามิค	m ²
23. พื้นที่ใต้เตาเผาเซรามิค	m ²
24. ความยาวของเตาเผาเซรามิค	m
25. จำนวนชั่วโมงการเผา	hr
26. อุณหภูมิก๊าซเสียที่ออกจากเตาเผาเซรามิค	°C
27. จำนวน CO ₂ ที่มีในก๊าซเสีย	%
28. จำนวน O ₂ ที่มีในก๊าซเสีย	%
29. จำนวน CO ที่มีในก๊าซเสีย	%

4.1.2 วิธีการตรวจวัดค่าข้อมูลจากรายการข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด

1. ชั่งน้ำหนักของก๊าซ LPG ก่อนทำการเผาและหลังจากทำการเผาแล้วใน 1 รอบ การเผา
2. ทำการสมดุลสมการทางเคมี (Stoichiometric) จากนั้นนำมวลของก๊าซเสียที่คำนวณได้จากการวัดค่า % ของ CO₂, O₂ และ CO มาคำนวณหาอากาศที่เข้าสู่เตาเผาต่อ 1 รอบการเผา ดังตัวอย่างในหัวข้อ 4.3 การสมดุลมวล
3. ทำการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ก่อนเข้าเผา
4. ทำการสมดุลสมการทางเคมี (stoichiometric) แล้วนำค่าที่วัดได้จาก fuel gas analysis ที่เป็น % ของ CO₂, O₂ และ CO มาคำนวณหาน้ำหนักของก๊าซเสีย ดังตัว

ภายในหัวข้อ 4.3 การสมมูลมวล

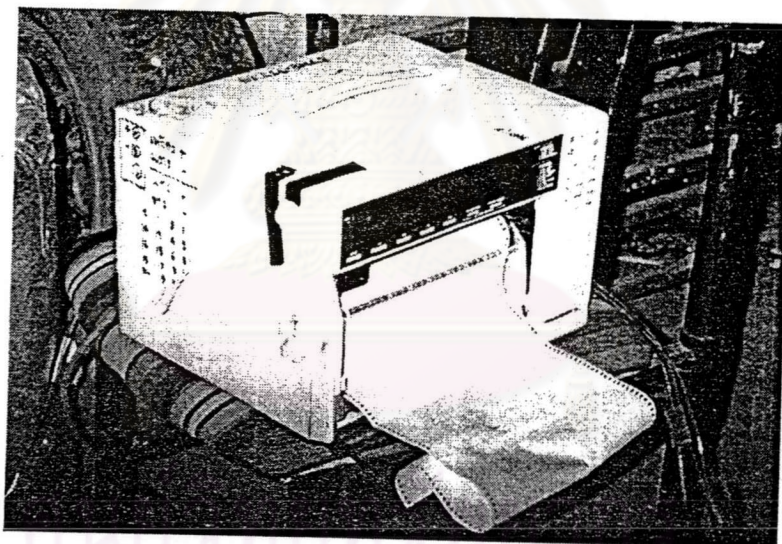
5. ทำการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์หลังการเผาเสร็จใน 1 รอบการเผา
6. สอบถามจากข้อมูลของผู้ผลิตเตาเผา (บริษัท อินเตอร์คิลิน จำกัด)
7. สอบถามจากข้อมูลของผู้ผลิตเตาเผา (บริษัท อินเตอร์คิลิน จำกัด)
8. สอบถามจากข้อมูลของผู้ผลิตเตาเผา (บริษัท อินเตอร์คิลิน จำกัด)
9. สอบถามจากข้อมูลของผู้ผลิตเตาเผา (บริษัท อินเตอร์คิลิน จำกัด)
10. สอบถามจากข้อมูลของผู้ผลิตเตาเผาและผู้นำเข้าฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ที่ใช้ในการทำเตาเผาเซรามิก (บริษัท อินเตอร์คิลิน จำกัด)
11. สอบถามจากข้อมูลของผู้ผลิตเตาเผา (บริษัท อินเตอร์คิลิน จำกัด)
12. เฟอร์นิเจอร์ที่ใช้เป็น silicon cabine จึงเปิดหาจากตารางคุณสมบัติของวัสดุได้
13. สอบถามข้อมูลจากศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมเซรามิก จังหวัด ลำปาง
14. เปิดหาจากตารางคุณสมบัติของวัสดุ โดยสอบถามจากผู้ผลิตถึงชนิดของเหล็กที่นำมาผลิตโครงสร้างของเตาเผา
15. ทำการวัดค่าจาก Thermocouple ภายในเตา 3 จุด (ด้านหน้า, ด้านบน และ ด้านท้ายเตา) จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในเตา
16. วัดจากการเก็บข้อมูลโดยเครื่องเก็บข้อมูลแบบ data logger ซึ่งเก็บข้อมูลจากเปลือกเตา 10 จุด (ด้านประตูเตา 2 จุด, เปลือกด้านบน 2 จุด, เปลือกด้านซ้าย 2 จุด, เปลือกด้านขวา 2 จุด และเปลือกด้านหลัง 2 จุด) แล้วนำค่าทั้ง 10 จุด มาหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปลือกเตา
17. วัดจากการเก็บข้อมูลโดยเครื่องเก็บข้อมูลแบบ data logger ซึ่งเก็บข้อมูลจากผิวใต้พื้นเตา 4 จุด แล้วนำค่า 4 จุด มาหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิใต้พื้นเตาเผา
18. วัดค่าได้จาก thermometer แบบกระเปาะแห้ง
19. วัดค่าได้จาก thermometer แบบกระเปาะเปียก
20. วัดได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากเครื่อง data logger
21. วัดได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากเครื่อง data logger
22. ทำการวัดโดยตลับเมตร
23. ทำการวัดโดยตลับเมตร
24. ทำการวัดโดยตลับเมตร
25. ทำการวัดโดยการจับเวลาตั้งแต่เริ่มจุดไฟภายในเตาจนถึงการดับไฟ
26. วัดค่าจากเครื่อง fuel gas analysis ...

27. วัดค่าจากเครื่อง fuel gas analysis
28. วัดค่าจากเครื่อง fuel gas analysis
29. วัดค่าจากเครื่อง fuel gas analysis

4.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ทำการวัดค่าในการทดลอง

1. Data logger

เป็นอุปกรณ์เก็บรวบรวมข้อมูลของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ และแสดงผลออกทางจอภาพและโดยพิมพ์ออกทางกระดาษ สามารถตั้งเวลาสำหรับค่าการแสดงผลได้ตามต้องการโดยในการทดลองนี้ได้ตั้งค่าให้แสดงผลการวัดโดยการพิมพ์ออกทางกระดาษทุก 15 นาที เครื่อง Data logger ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นยี่ห้อ Yokogawa รุ่น HR 1300 ดังแสดงในรูปที่ 4.1



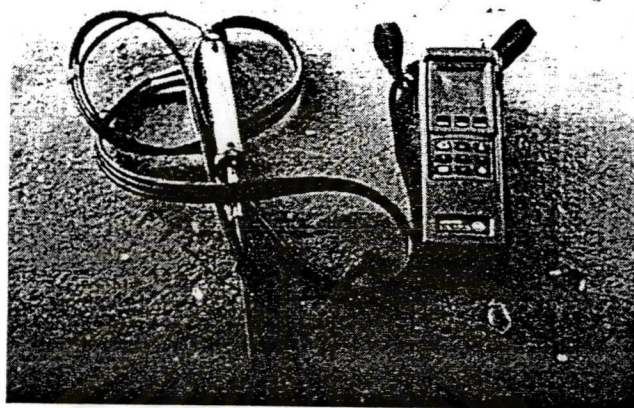
รูปที่ 4.1 Data logger Yokogawa รุ่น HR 1300

2. Fuel gas analysis

เป็นอุปกรณ์ที่ทำการวัดค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสามารถเลือกเชื้อเพลิงได้หลายชนิด ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงออกทางจอ LCD ค่าที่แสดงนั้นจะมีลักษณะเป็น %O₂ , %CO₂ ค่าของ CO มีหน่วยเป็น ppm นอกจากนั้นยังสามารถวัดอุณหภูมิของก๊าซเสียที่มีช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 0 – 1000 °c , วัดอุณหภูมิของบรรยากาศรอบข้าง และยังสามารถ

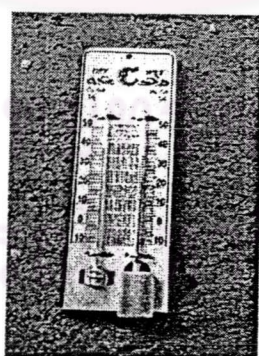
วัดค่าความดันโดยเทียบกับความดันบรรยากาศได้อีกด้วย โดยเครื่อง Fuel gas analysis ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นยี่ห้อ Testo 300 I ดังแสดงในรูปที่ 4.2

รูปที่ 4.2 Fuel gas analysis เป็นยี่ห้อ Testo 300 I

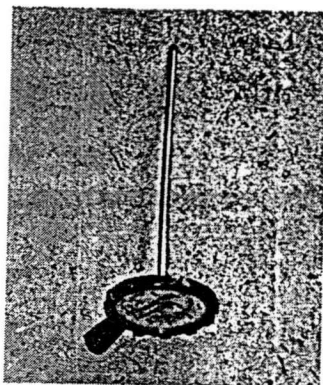


3. Thermometer

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิซึ่งในการทดลองนี้มี Thermometer ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ 2 แบบ แบบแรกเป็น Thermometer แบบปรอทที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิของอากาศซึ่งสามารถวัดได้ทั้งอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แบบที่สองเป็น Thermometer แบบมีหัววัดค่าสามารถจุ่มวัดค่าอุณหภูมิที่พื้นผิวและสามารถวัดอุณหภูมิของอากาศร้อนได้ด้วย ดังแสดงได้รูปที่ 4.3 ก และ รูปที่ 4.3 ข



รูปที่ 4.3 ก Thermometer แบบปรอท



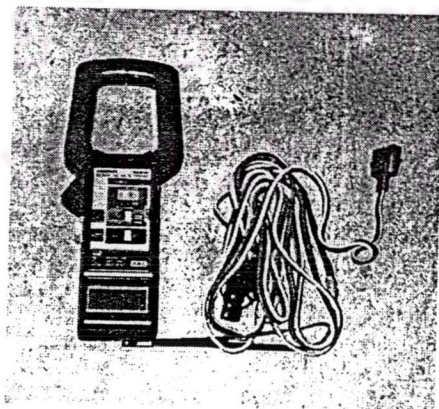
รูปที่ 4.3 ข Thermometer แบบมีหัววัดค่า

4. เครื่องชั่ง

ใช้ในการวัดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการเผาและชั่งน้ำหนักก๊าซที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์ ตาชั่งมีลักษณะเป็นเข็มชี้บอกน้ำหนักมีหน่วยเป็นกิโลกรัมสามารถวัดน้ำหนักได้สูงสุด 60 กิโลกรัม

5. Clamp on P.F.Hi Tester

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ โดยที่สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้ทั้งระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ ระบบ 3 เฟส สำหรับค่าที่สามารถวัดได้ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage) ค่ากระแสไฟฟ้า (ampre) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (power factor) สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นยี่ห้อ Hioki รุ่น 3266 ค่าแรงดันไฟฟ้าใช้งาน 0 – 1000 A ค่ากระแสไฟฟ้าใช้งาน 0 – 600 V ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 Clamp on P.F.Hi Tester

6. Velocity and temperature meter

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความเร็วลมและอุณหภูมิของอากาศ เครื่องที่ใช้ยี่ห้อ Testo รุ่น 415 มีช่วงความเร็วใช้งานที่ 0 – 10 m/s ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 Velocity and temperature meter ใช้ยี่ห้อ Testo รุ่น 415

4.2 ผลการตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเซรามิค

การตรวจวัดการใช้พลังงานของเตาเผาเซรามิคที่ทำการเผากับผลิตภัณฑ์จริงได้แบ่งวิธีการดำเนินการจัดเก็บข้อมูลตามลักษณะของการเผาเซรามิค โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ การเผา ดังนี้

4.2.1 การเผาดิบ Biscuit

จะใช้การเผาแบบ Oxidation Flame มีอุณหภูมิในการเผาประมาณ 800°C โดยตอนแรกอุณหภูมิภายในเตาจะเริ่มที่ประมาณ $35-45^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ $700-800^{\circ}\text{C}$ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง จากนั้นผลผลิตจะถูกทิ้งไว้ในเตาให้เย็นตัวลง ซึ่งเป็นช่วงลดความร้อนใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง หรือนานกว่านั้น ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันเสร็จขั้นตอนการเผา Biscuit หรือเผาดิบ โดยการทดลองนี้ทำการเผาดิบทั้งหมด 5 ครั้ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. วันที่ 26 กันยายน 2544 เวลา 11.00 – 17.30
2. วันที่ 2 ตุลาคม 2544 เวลา 09.00 – 14.15

3. วันที่ 3 ตุลาคม 2544 เวลา 10.00 – 16.15
4. วันที่ 4 ตุลาคม 2544 เวลา 12.00 – 18.15
5. วันที่ 11 ตุลาคม 2544 เวลา 09.00 – 15.00

ซึ่งรายละเอียดของอุณหภูมิที่จุดต่างๆในการทดลอง ค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 , ตารางที่ 4.3 และตารางในภาคผนวก ก สำหรับตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองเผาไหม้ biscuit ทั้ง 5 ครั้ง

ลำดับ การ ทดลอง	เวลา ทดลอง (นาที)	$T_{amb,dry}$ (°c)	$T_{amb,wet}$ (°c)	น้ำหนัก LPG (kg)	น้ำหนัก วัสดุที่สูญเสีย (kg)	$T_{ภายในเตา}$ (°c)	$T_{ก๊าซเสีย}$ (°c)	% O ₂	% CO ₂	ค่า CO ppm
1	390	29.5	28	4.7	0.45	864	510	15.7	1.4	29
2	315	33	30	4.7	0.85	813	509	10.68	6.7	33.8
3	360	29.5	28	4.5	0.65	808	455	8.65	8.3	59
4	360	32.5	29	4.6	0.3	809	451	7.6	8.8	11.5
5	360	33.5	30	4.9	0.5	810	509	13.72	4.7	15.05
เฉลี่ย	357	31.6	29	4.68	0.55	821	479	11.27	5.98	29.7

ตารางที่ 4.3 สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยการเผาไหม้ 5 ครั้งในจุดต่างๆของการทดลองทุก 60 นาที

เวลาในการทดลอง (นาที)	T_{ave} รอบผนังเตา (°c)	T_{ave} ที่พื้นเตา (°c)	T_{ave} ภายในเตา (°c)	T_{ave} ของก๊าซเสีย (°c)
0	31.67	32.8	39.2	29.32
60	33.17	39.6	216.4	36.56
120	33.78	48.92	387	128.8
180	34.56	57	590	281.36
240	35.26	65.88	686.6	355.6
300	36.38	74.46	780.4	433
357	38.15	82.25	821	479

4.2.2 การเผาเคลือบ

หลังจากที่ทำการเผาดิบ biscuit แล้ว ผลิตภัณฑ์จะถูกลงสี และนำยาเคมี เพื่อใช้ผลิตภัณฑ์มีสีตามต้องการและเกิดความเงางาม โดยตอนแรกอุณหภูมิภายในเตาจะเริ่มที่ประมาณ 35-45°C และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 1,100-1,300°C ใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง จากนั้นจะทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 12 ชั่วโมง หรือนานกว่านั้น ขึ้นอยู่กับผลผลิตชนิดนั้นต้องการความแกร่งแค่ไหน เป็นอันเสร็จขั้นตอนการเผาเซรามิกโดยใช้เตาเผาโดยการทดลองนี้ทำการเผาเคลือบทั้งหมด 5 ครั้ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. วันที่ 7 ตุลาคม 2544 เวลา 09.00 – 18.00
2. วันที่ 8 ตุลาคม 2544 เวลา 09.00 – 19.00
3. วันที่ 10 ตุลาคม 2544 เวลา 10.00 – 20.00
4. วันที่ 15 ตุลาคม 2544 เวลา 08.00 – 19.00
5. วันที่ 19 ตุลาคม 2544 เวลา 10.00 – 21.00

ซึ่งรายละเอียดของอุณหภูมิที่จุดต่างๆในการทดลอง ค่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 , ตารางที่ 4.5 และตารางในภาคผนวก ก สำหรับตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดลองเผาเคลือบ ทั้ง 5 ครั้ง

ลำดับ การ ทดลอง	เวลา ทดลอง (นาที)	T _{amb,dry} (°c)	T _{amb,wet} (°c)	น้ำหนัก LPG (kg)	น้ำหนัก วัสดุที่สูญ เสีย (kg)	T _{ภายในเตา} (°c)	T _{การเผา} (°c)	% O ₂	% CO ₂	ค่า CO ppm
1	540	32	30	12.8	0.15	1211	802	11.46	5.11	9.28
2	600	34	30	13.7	0.2	1201	805	11.14	5.66	6.62
3	600	31.5	29	13.5	0.4	1189	817	11.16	6.38	5.34
4	630	32.5	29	13.9	0.5	1215	832	11.41	6.1	12
5	660	33	30	14.6	0.3	1220	819	10.88	5.21	9.72
เฉลี่ย	606	32.5	29.6	13.7	0.31	1207	815	11.21	5.69	8.59

ตารางที่ 4.5 สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยการเผาเคลือบ 5 ครั้งในจุดต่างๆของการทดลองทุก 60 นาที

เวลาในการทดลอง (นาที)	T _{ave} รอบผนังเตา (°c)	T _{ave} ที่พื้นเตา (°c)	T _{ave} ภายในเตา (°c)	T _{ave} ของก๊าซเสีย (°c)
0	34.48	37.04	43.2	39.4
60	35.57	49.1	267.2	60.2
120	36.3	58.48	417.2	192.4
180	36.4	67.64	554.2	319.8
240	40.2	75.74	691.8	441.8
300	44.9	85.9	812.4	550.2
360	49.6	95.22	914.8	627.8
420	55.8	107.2	1021.8	698.6
480	63.2	107.4	1045.5	728.25
540	71.5	114.22	1106.25	779
606	82.74	117.15	1207	815

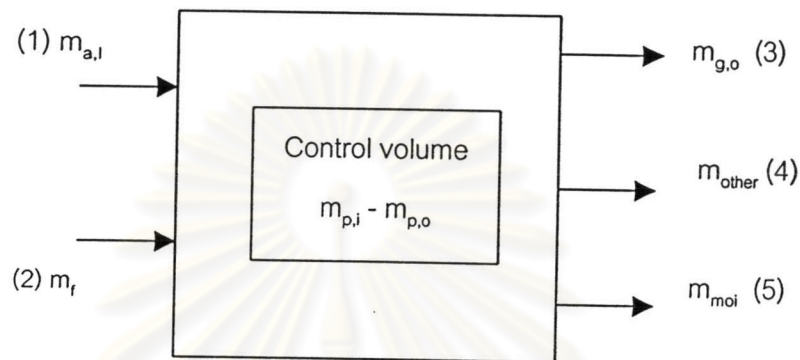
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิค

4.3.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิคในการเผา biscuit หรือ เผาดิบ

1. สมดุลมวล Mass balance ของการเผา biscuit

มวลเข้าสู่ระบบ = มวลออกจากระบบ



รูปที่ 4.6 แสดงมวลเข้าสู่ระบบและมวลออกจากระบบเตาเผาในการเผาดิบ

มวลเข้าสู่ระบบ (Mass In)

1. m_f มวลเชื้อเพลิงเข้า

ในการเผา biscuit ทั้งหมด 5 ครั้ง ใช้แก๊ส โดยรวม 4.68 กิโลกรัมต่อครั้ง

2. $m_{p,i}$ มวลวัสดุที่เข้าเตา

ผลิตภัณฑ์ที่เข้าเตาเผา biscuit 5 ครั้ง โดยเฉลี่ยมีน้ำหนัก 7.76 กิโลกรัมต่อครั้ง

3. $m_{a,i}$ มวลของอากาศเข้า

จาก % O_2 ที่วัดได้โดย Flue gas analysis ในการเผา biscuit ทั้งหมด 5 ครั้ง มีค่า

เฉลี่ย % ของ O_2 คือ 11.27%

ปริมาณอากาศส่วนเกินหรือ excess air สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{excess air} = \frac{21}{21 - \%O_2}$$

นำค่าที่วัดได้ลงไปแทนจะได้ excess air คือ

$$\text{excess air} = \frac{21}{21 - 11.27}$$

$$= 2.15$$

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์คือ $2.15 \times 100 = 215\%$ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 215%

ทำการสร้างสมการเคมี (stoichiometric) ของก๊าซ LPG เพื่อหาปริมาณอากาศเข้าโดยพิจารณาจากก๊าซ LPG และปริมาณอากาศส่วนเกิน ก๊าซ LPG 1 Volume ประกอบด้วย Propane (C_3H_8) 60% และ butane (C_4H_{10}) 40%

พิจารณา Propane



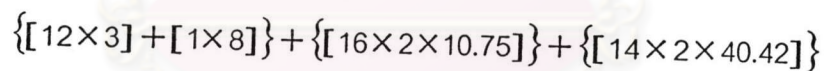
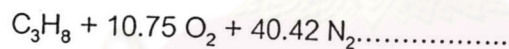
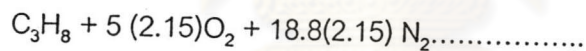
$$\text{Excess air} = 2.15$$

พิจารณา N ในอากาศมี N = 79% และ $O_2 = 21\%$ by volume

air 1 volume มี O_2 0.21 volume จะมีอะตอม 5 อะตอม

air 1 volume มี N_2 0.79 volume จะมีอะตอม 18.80 อะตอม

excess air = 2.15 จะได้สมการเคมีเฉพาะที่ใช้ในการเผาไหม้ดังนี้



$$44 + 344 + 1131.76 \quad \text{อะตอม}$$

ถ้า C_3H_8 หนัก 0.53 kg O_2 และ N_2 จะหนัก

$$\begin{aligned} \text{พิจารณาน้ำหนัก } O_2 \quad o_2 &= 0.53 \times \frac{344}{44} \\ &= 4.14 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พิจารณาน้ำหนัก } N_2 \quad N_2 &= 0.53 \times \frac{1131.76}{44} \\ &= 13.63 \text{ kg} \end{aligned}$$

แสดงว่า C_3H_8 หนัก 0.53 kg ใช้ air ($O_2 + N_2$) หนัก $4.14 + 13.63 = 17.77$ kg

LPG 1 kg ประกอบด้วย $C_3H_8 = 0.543$ kg

ถ้า LPG 4.68 kg ประกอบด้วย $C_3H_8 = 2.48$ kg

C_3H_8 หนัก 0.53 kg ใช้อากาศ = 17.77 kg

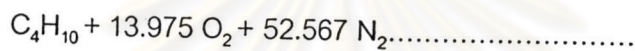
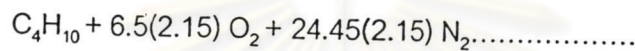
$\therefore C_3H_8$ หนัก 2.48 kg ใช้อากาศ = 83.16 kg

พิจารณา butane



excess air = 2.15 และใช้วิธีคิดเหมือนกับที่ใช้พิจารณา Propane จะได้

สมการเคมีเฉพาะที่ใช้ในการเผาไหม้ดังนี้



$$\{[58]\} + \{[16 \times 2 \times 13.975]\} + \{[14 \times 2 \times 52.567]\}$$

$$58 + 447.2 + 1,471.876 \quad \text{อะตอม}$$

ถ้า C_4H_{10} หนัก 0.47 kg O_2 และ N_2 จะหนัก

$$\begin{aligned} \text{พิจารณาน้ำหนัก } O_2 \quad O_2 &= 0.47 \times \frac{447.2}{58} \\ &= 3.624 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พิจารณาน้ำหนัก } N_2 \quad N_2 &= 0.47 \times \frac{1,471.876}{58} \\ &= 11.927 \text{ kg} \end{aligned}$$

แสดงว่า C_4H_{10} หนัก 0.47 kg ใช้ air ($O_2 + N_2$) หนัก $3.624 + 11.927 = 15.551$ kg

LPG 1 kg ประกอบด้วย $C_4H_{10} = 0.47$ kg

LPG 4.68 kg ประกอบด้วย $C_4H_{10} = 2.2$ kg

C_4H_{10} หนัก 0.47 kg ใช้ อากาศ = 15.551 kg

$\therefore C_3H_8$ หนัก 2.48 kg ใช้ อากาศ = 72.79 kg

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า LPG 4.68 kg ต้องใช้อากาศในการเผาไหม้ หรือ $m_{a,i}$ มวลของอากาศเข้า

$$83.16 + 72.79 = 155.95 \text{ k}$$

มวลออกจากระบบ (Mass Out)

4. $m_{m,oi}$ มวลของความชื้นในผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผา biscuit 5 ครั้ง ($m_{p,o}$) โดยเฉลี่ยมีน้ำหนัก 7.21 kg

ดังนั้นมวลของความชื้นในผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 0.55 kg

5. $m_{g,o}$ มวลก๊าซเสียออก

การวัดค่า Stack gas analysis by flue gas analysis

$$O_2 = 11.27\%$$

$$CO_2 = 5.98\%$$

$$CO = 0.003\%$$

$$N_2 = 82.747\%$$

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดง สัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียในการเผาไหม้

ชนิดของไอเสีย	%by Volume	Molecular Weight	mass	%by mass
O ₂	11.27	32	360.64	12.03
CO ₂	5.98	44	263.12	8.78
CO	0.003	28	0.084	0.0028
N ₂	82.747	28	2,372.916	79.18
รวม			2,996.76	

ในไอเสียแห้ง 1 kg ประกอบด้วย

$$O_2 = 0.1203 \text{ kg}$$

$$CO_2 = 0.0878 \text{ kg}$$

$$CO = 0.000028 \text{ kg}$$

$$N_2 = 0.7918 \text{ kg}$$

พิจารณาที่ ไนโตรเจน เพราะไนโตรเจนจะไม่เกิดการทำปฏิกิริยาในการเผาไหม้

∴ จากสมการเคมี จะได้ ไนโตรเจน

$$N_2 = 11.927 + 13.63 = 25.557 \text{ kg ที่ LPG 1 kg}$$

หา O ₂	N ₂ 0.7918 kg จะมี	O ₂ 0.1203 kg
ถ้า	N ₂ 25.557 kg จะมี	O ₂ 3.88 kg
หา CO ₂	N ₂ 0.7918 kg จะมี	CO ₂ 0.0878 kg
ถ้า	N ₂ 25.557 kg จะมี	CO ₂ 2.83 kg
หา CO	N ₂ 0.7918 kg จะมี	CO 0.000028 kg
ถ้า	N ₂ 25.557 kg จะมี	CO 0.0009 kg

ในการทดลองใช้ก๊าซ LPGหนัก 4.68 kg ก๊าซเสียทั้งหมดจะหนัก

$$O_2 = 3.88 \times 4.68 = 18.16 \text{ kg}$$

$$CO_2 = 2.83 \times 4.68 = 13.24 \text{ kg}$$

$$CO = 0.0009 \times 4.68 = 0.004 \text{ kg}$$

$$N_2 = 25.557 \times 4.68 = 119.61 \text{ kg}$$

$$\text{รวมก๊าซเสียทั้งหมดที่ปล่อยออก } (m(O_2) + m(CO_2) + m(CO) + m(N_2)) = 151.01 \text{ kg}$$

6. m_{other} มวลของเชื้อเพลิงและอากาศที่สูญเสียตามช่องเปิดต่างๆ

$$m_{\text{other}} = (m_f + m_{a,i}) - (m_{g,o})$$

$$= (4.68 + 155.95) - (151.01 + 0.55)$$

$$= 9.07 \text{ kg}$$

น้ำหนักของเตาเผาเซรามิคทั้งหมดที่สร้างโดย บริษัท อินเตอร์คลิน จำกัด สำหรับเตาเผาเซรามิคที่ใช้ทำการทดลองขนาดความจุ 0.5 ลูกบาศก์เมตร มีน้ำหนัก

1,350 kg ซึ่งประกอบด้วย

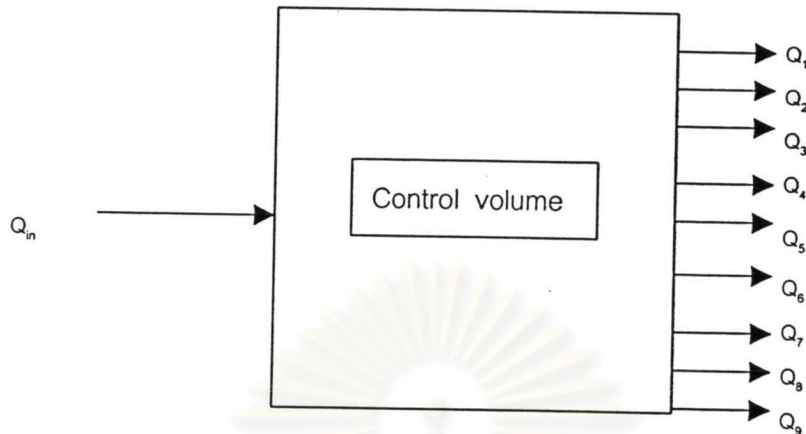
$$\text{ไฟเบอร์} \quad 17\% = 230 \text{ kg}$$

$$\text{โครงสร้าง} \quad 50\% = 675 \text{ kg}$$

$$\text{อุปกรณ์} \quad 33\% = 445 \text{ kg}$$

2. สมดุลพลังงาน Energy balance ของการเผา biscuit

พลังงานเข้าสู่ระบบ = พลังงานออกจากระบบ



รูปที่ 4.7 แสดงพลังงานเข้าสู่ระบบและพลังงานออกจากระบบเตาเผาในการเผาเคลือบ

พลังงานเข้าสู่ระบบ (Energy input)

1. พลังงานจากเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

$$\begin{aligned}
 Q_{in} \text{ (LPG)} &= \text{น้ำหนักแก๊สที่ใช้} \times \text{ค่าความร้อนของแก๊ส LPG} \\
 &= W_g \times \text{LHV} \\
 &= 4.68 \times (21,300 \text{ Btu/lb} \times 2.33) \\
 &= 4.68 \times 49,629
 \end{aligned}$$

$$Q_{in} \text{ (LPG)} = 232,264 \text{ kJ}$$

พลังงานออกจากระบบ (Energy Output)

1. พลังงานสะสมในเปลือกเตา

$$Q_1(\text{hull}) = \text{พ.ที่สะสมในไฟเบอร์} (Q_{1,1}) + \text{พ.ที่สะสมในโครงเตา} (Q_{1,2})$$

$$Q_{1,1}(\text{Fiber}) = \text{พลังงานที่สะสมในไฟเบอร์}$$

$$\begin{aligned}
 &= W_{\text{Fiber}} \times C_{p_{\text{fiber}}} \times \Delta t_{11} \\
 &= 230 \times (0.26 \times 4.187) \times \left[\left(\frac{821 + 31.6}{2} \right) - 31.6 \right] \\
 &= 230 \times 1.088 \times (426.3 - 31.6) \\
 &= 98,770 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{12}(\text{body frame}) &= \text{พลังงานที่สะสมในโครงเตา} \\
 &= W_{\text{body}} \times C_{p_{\text{body}}} \times \Delta T_{12} \\
 &= 400 \times 0.5 \times (38.15 - 31.6) \\
 &= 1,310 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

โดยที่ค่า C_p ของ Carbon Steel ประมาณ 0.5 kJ/kg

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } Q_1(\text{hull}) &= 98,770 + 1,310 \\
 &= 100,080 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

2. พลังงานที่สะสมในพื้นที่

$$\begin{aligned}
 Q_2(\text{Brick}) &= W_{\text{brick}} \times C_{p_{\text{brick}}} \times \Delta T_2 \\
 &= 275 \times 0.96 \times (82.25 - 31.6) \\
 &= 13,372 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

โดยที่ค่า C_p ของอิฐทนไฟ เท่ากับ 0.96 kJ/kg

3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์

$$\begin{aligned}
 Q_3(\text{Furniture}) &= W_{\text{Fur}} \times C_{p_{\text{Fur}}} \times \Delta T_3 \\
 &= 12.5 \times 0.67 \times (821 - 31.6) \\
 &= 6,611 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

โดยที่เฟอร์นิเจอร์ก็คือแผ่นสำหรับวางวัตถุที่จะทำการเผาเป็นแผ่น Silicon Carbide มีค่า C_p เท่ากับ 0.67 kJ/kg

4. พลังงานที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned}
 Q_4(\text{Product}) &= m_p \times C_p \times \Delta T_4 \\
 &= 7.76 \times (0.33 \times 4.187) \times (821 - 31.6) \\
 &= 7,657 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

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

5. พลังงานที่สูญเสียไปจากการแผ่รังสี

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

Q_{51} (radiation loss of hull)

$$\begin{aligned} Q_{51} &= A_1 \times e_1 \times 5.67 \left[\left(\frac{T_s(\text{ave})_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= \{ (0.85 \times 1 \times 2) + (1.12 \times 1 \times 2) \} \times 0.4 \times 5.67 \\ &\quad \times \left[\left(\frac{34.87 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{31.6 + 273}{100} \right)^4 \right] \times 5.95 \times 3.6 \\ &= 894 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Q_{52} (radiation loss of kiln)

$$\begin{aligned} Q_{52} &= A_2 \times e_2 \times 5.67 \times \left[\left(\frac{T_s(\text{ave})_2 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= (0.85 \times 1.12) \times 0.85 \times 5.67 \left[\left(\frac{57.22 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{31.6 + 273}{100} \right)^4 \right] \\ &\quad \times 5.95 \times 3.6 \\ &= 3,226 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ดังนั้น $Q_5 = Q_{51} + Q_{52}$

$$= 894 + 3,226$$

$$= 4,120 \text{ kJ}$$

โดยที่ $T_s(\text{ave})_1 = \frac{38.15 + 31.6}{2} = 34.87^\circ\text{C}$

$$T_s(\text{ave})_2 = \frac{82.85 + 31.6}{2} = 57.22^\circ\text{C}$$

6. พลังงานที่สูญเสียไปจากการพาความร้อน

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

Q_{61} (convection loss of hull)

$$\begin{aligned} Q_{61} &= A_1 \times hc_1 \times (T_s(\text{ave})_1 - T_a) \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= \{3.94 + (0.85 \times 1.12)\} \times 3.4 \times (34.87 - 31.6) \times 5.95 \times 3.6 \\ &= 1,166.8 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Q_{62} (convection loss of kiln floor)

$$\begin{aligned} Q_{62} &= A_2 \times hc_2 \times (T_s(\text{ave})_2 - T_a) \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= (0.85 \times 1.12) \times 5.93 \times (57.22 - 31.6) \times 5.95 \times 3.6 \\ &= 3,114 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q_6 &= Q_{61} + Q_{62} \\ &= 1,167 + 3,114 \end{aligned}$$

$$Q_6 = 4,281 \text{ kJ}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} h_{c1} &= \frac{6 \times [T_s(\text{ave})_1 - T_a]^{0.25}}{(TaL)^{0.25}} \\ &= \frac{6 \times [34.87 - 31.6]^{0.25}}{(31.6 \times 0.85)^{0.25}} \\ &= 3.4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{c2} &= \frac{6 \times [T_s(\text{ave})_2 - T_a]^{0.25}}{(TaL)^{0.25}} \\ &= \frac{6 \times [37.22 - 31.6]^{0.25}}{(31.6 \times 0.85)^{0.25}} \\ &= 5.93 \end{aligned}$$

7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ

$$\begin{aligned}
 Q_7 &= m_a \times W \times C_{p_{st}} \times (T_g - T_a) \\
 &= 155.95 \times 0.0238 \times 1.98 \times (479 - 31.6) \\
 &= 3,288 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 C_{p_{st}} &= \frac{h(479) - h(31.6)}{(479 - 31.6)} \\
 &= \frac{(3445.145 - 2559.2)}{447.4} \\
 &= 1.98 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$W \text{ (Specific humidity)} = \frac{C_p(T_{wet} - T_{dry}) + W_2 h_{f_g 2}}{h_{g_1} - h_{f_2}}$$

$$\begin{aligned}
 W_2 &= \frac{0.622 P_{g2}}{p_2 - p_{g2}} \\
 &= \frac{0.622 \times 4.0306}{101.325 - 4.0306} \\
 &= 0.026
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{(1.005 \times (29 - 31.6)) + (0.026 \times 2432.89)}{(2559.18 - 121.61)} \\
 &= 0.0238 \text{ kg H}_2\text{O / kg dry air}
 \end{aligned}$$

8. พลังงานที่สะสมอยู่ในก๊าซเสีย

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

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

$$\begin{aligned}
 Q(\text{CO}_2) &= m(\text{CO}_2) \times C_p(\text{CO}_2) \times (T_g - T_a) \\
 &= 13.24 \times 1.145 \times (479 - 31.6) \\
 &= 6,782.5 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q(\text{CO}) &= m(\text{CO}) \times C_p(\text{CO}) \times (T_g - T_a) \\
 &= 0.004 \times 1.096 \times (479 - 31.6)
 \end{aligned}$$

$$= 1.96 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} Q(\text{O}_2) &= m(\text{O}_2) \times C_p(\text{O}_2) \times (T_g - T_a) \\ &= 18.16 \times 1.038 \times (479 - 31.6) \\ &= 8,433.5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q(\text{N}_2) &= m(\text{N}_2) \times C_p(\text{N}_2) \times (T_g - T_a) \\ &= 119.61 \times 1.11 \times (479 - 31.6) \\ &= 59,001.6 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q_8 &= 6,782.5 + 1.96 + 8,433.5 + 59,001.6 \\ &= 74,220 \text{ kJ} \end{aligned}$$

9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิด

การสูญเสียพลังงานชนิดนี้เป็นการสูญเสียพลังงาน ตามช่องเปิดต่างๆและที่ไม่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Q_9 &= Q_{in} - [Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8] \\ &= 18,635 \text{ kJ} \end{aligned}$$

3. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเซรามิค

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา}} \\ &= \frac{\text{พลังงานที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์}}{\text{พลังงานที่เข้าสู่ระบบ}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_3}{Q_{in}} \times 100\% \\ &= \frac{7657}{232264} \times 100\%\end{aligned}$$

$$\eta = 3.3 \%$$

การที่ประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกมีค่าน้อยเนื่องจากในการทดลองนี้ได้นำผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผาเป็นจำนวนน้อยมากถ้าเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าเตาเผาเซรามิกที่ใช้กันอยู่จริงในอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิก

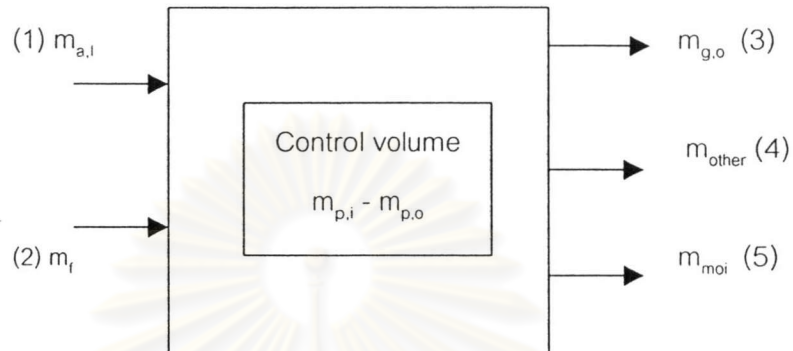


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิคในการเผาเคลือบ

1. สมดุลมวล Mass balance ของการเผาเคลือบ

มวลเข้าสู่ระบบ = มวลออกจากระบบ



รูปที่ 4.8 แสดงมวลเข้าสู่ระบบและมวลออกจากระบบเตาเผาในการเผาเคลือบ

มวลเข้าสู่ระบบ (Mass In)

1. m_f มวลเชื้อเพลิงเข้า

ในการเผาเคลือบ 5 ครั้ง ใช้ก๊าซ LPG เฉลี่ยครั้งละ 13.7 กิโลกรัม/ครั้ง

2. $m_{p,i}$ มวลวัสดุที่เข้าเตา

ผลิตภัณฑ์ที่เข้าเตาเผาเคลือบ 5 ครั้ง มีน้ำหนักเฉลี่ยครั้งละ 7.33 กิโลกรัม

3. $m_{a,i}$ มวลอากาศเข้าเตา

จาก % ของ O_2 ที่วัดได้โดย Flue gas analysis ในการเผาเคลือบ 5 ครั้ง มีค่าเฉลี่ย % ของ O_2 เท่ากับ 11.21%

ปริมาณอากาศส่วนเกินหรือ excess air สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{excess air} = \frac{21}{21 - \%O_2}$$

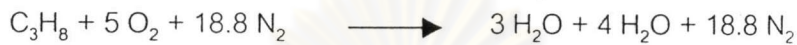
นำค่าที่วัดได้ลงไปแทนจะได้ excess air คือ

$$\begin{aligned} &= \frac{21}{21 - 11.21} \\ &= 2.145 \end{aligned}$$

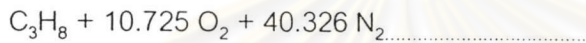
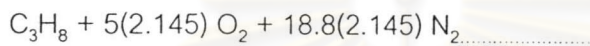
คิดเป็นเปอร์เซ็นต์คือ $2.145 \times 100 = 214.5\%$ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 214.5%

ทำการสร้างสมการทางเคมี (stoichiometric) ของก๊าซ LPG เพื่อหาปริมาณอากาศเข้าเตาเผา ก๊าซ LPG 1 Volume ประกอบด้วย Propane (C_3H_8) 60% และ Butane (C_4H_{10}) 40%

พิจารณา Propane



อากาศส่วนเกิน 2.145 ดังนั้นจะได้สมการทางเคมีเท่ากับ



จำนวนอะตอม $44 + 343.2 + 1129.128$ อะตอม

ก๊าซ LPG 1 kg ประกอบด้วย Propane (C_3H_8) 0.53 kg ถ้าก๊าซ LPG 13.7 kg จะประกอบด้วย Propane (C_3H_8) เท่ากับ 7.26 kg ซึ่ง C_3H_8 7.26 kg จะใช้อากาศในการเผาไหม้ ($O_2 + N_2$) หนัก

$$\begin{aligned} \text{พิจารณาน้ำหนัก } O_2 \quad O_2 &= 7.26 \times \frac{343.2}{44} \\ &= 56.628 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พิจารณาน้ำหนัก } N_2 \quad N_2 &= 7.26 \times \frac{1,129.128}{44} \\ &= 186.306 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้น Propane (C_3H_8) หนัก 7.26 kg จะใช้อากาศ ($O_2 + N_2$) เท่ากับ

$$56.268 + 186.306 = 242.934 \text{ kg}$$

พิจารณา Butane



อากาศส่วนเกิน 2.145 ดังนั้นจะได้สมการทางเคมีเท่ากับ



จำนวนอะตอม $58 + 446.16 + 1468.46$ อะตอม

ก๊าซ LPG 1 kg ประกอบด้วย Butane (C_4H_{10}) 0.47 kg ถ้าก๊าซ LPG 13.7 kg จะประกอบด้วย Butane (C_4H_{10}) เท่ากับ 6.44 kg ซึ่ง C_4H_{10} 6.44 kg จะต้องใช้อากาศในการเผาไหม้ ($O_2 + N_2$) หนัก

$$\begin{aligned} \text{พิจารณาน้ำหนัก } O_2 \quad O_2 &= 6.44 \times \frac{446.16}{58} \\ &= 49.539 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พิจารณาน้ำหนัก } N_2 \quad N_2 &= 6.44 \times \frac{1,468.46}{58} \\ &= 163.05 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้น Butane (C_4H_{10}) หนัก 6.44 kg จะใช้อากาศในการเผาไหม้ ($O_2 + N_2$) หนักทั้งหมดเท่ากับ $49.539 + 163.05 = 212.539 \text{ kg}$

สรุปว่าในการเผาไหม้ที่ใช้ก๊าซ LPG 13.7 kg จะต้องใช้อากาศในการเผาไหม้ทั้งหมด $242.934 + 212.589 = 455.523 \text{ kg}$

มวลออกจากระบบ (Mass out)

4. m_{moi} มวลของความชื้นในผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผาเคลือบ จากการเผาเคลือบทั้ง 5 ครั้ง ($m_{\text{p.o}}$) มีน้ำหนักโดยเฉลี่ยเท่ากับ 7.02 kg ต่อครั้ง ดังนั้นมวลของความชื้นในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.31 kg

5. $m_{\text{g.o}}$ มวลก๊าซเสียออก

การวัดค่า stack gas analysis by flue gas analysis

$$O_2 = 11.21\%$$

$$CO_2 = 5.69\%$$

$$CO = 0.0009\%$$

$$N_2 = 83.099\%$$

ตารางที่ 4.7 สัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียในการเผาเคลีอบ

ชนิดของไอเสีย	%by Volume	Molecular Weight	mass	%by mass
O ₂	11.21	32	358.72	12.21
CO ₂	5.69	44	250.38	8.53
CO	0.0009	28	0.025	0.0008
N ₂	83.099	28	2,326.7	79.25
รวม			2,935.88	

ในไอเสียแห้ง 1 kg ประกอบด้วย

$$\text{O}_2 = 0.1221 \text{ kg}$$

$$\text{CO}_2 = 0.0853 \text{ kg}$$

$$\text{CO} = 8.4 \times 10^{-6} \text{ kg (มีค่าน้อยมากจึงไม่นำไปพิจารณา)}$$

$$\text{N}_2 = 0.7925 \text{ kg}$$

จากสมการทางเคมีพิจารณาที่ไนโตรเจน (N₂) เพราะไนโตรเจน (N₂) จะไม่เกิดการทำปฏิกิริยาทางเคมีในการเผาไหม้ ซึ่งก๊าซ LPG 1 kg จะใช้ N₂ ในการเผาไหม้

$$\text{N}_2 = 186.306 + 163.05 = 349.356 \text{ kg}$$

พิจารณาที่ก๊าซ LPG 13.7 kg

$$\text{พิจารณา } \text{O}_2 \quad \text{N}_2 \text{ 0.7925 kg} \quad \text{จะมี } \text{O}_2 \text{ หนัก } 0.1221 \text{ kg}$$

$$\text{ถ้า } \text{N}_2 \text{ 349.356 kg} \quad \text{จะมี } \text{O}_2 \text{ หนัก } 53.825 \text{ kg}$$

$$\text{พิจารณา } \text{CO}_2 \quad \text{N}_2 \text{ 0.7925 kg} \quad \text{จะมี } \text{O}_2 \text{ หนัก } 0.0853 \text{ kg}$$

$$\text{ถ้า } \text{N}_2 \text{ 25.557 kg} \quad \text{จะมี } \text{O}_2 \text{ หนัก } 37.603 \text{ kg}$$

ในการทดลองใช้ก๊าซ LPG หนัก 13.7 kg ซึ่งจะมีก๊าซเสียทั้งหมด

$$m_{g,o} = m(\text{O}_2) + m(\text{CO}_2) + m(\text{N}_2)$$

$$= 53.825 + 37.603 + 349.356$$

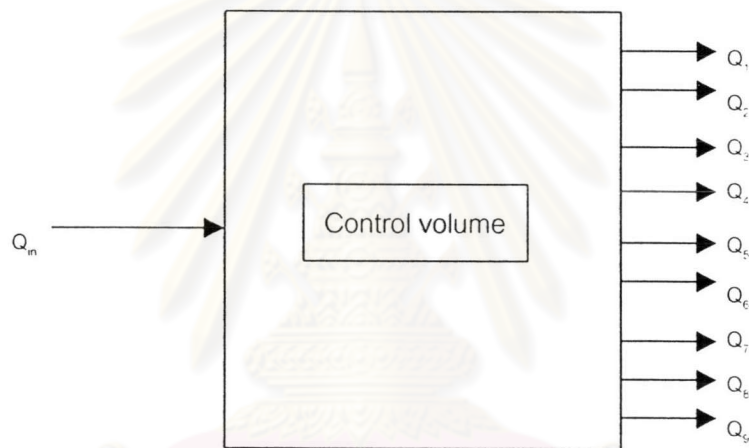
$$= 440.784 \text{ kg}$$

6. m_{other} มวลของเชื้อเพลิงและอากาศที่สูญเสียตามช่องเปิดต่างๆ

$$\begin{aligned} m_{\text{other}} &= m_{\text{input}} - (m_{p,o} + m_{g,o}) \\ &= 469.22 - (440.78 + 0.31) \\ &= 28.12 \text{ kg} \end{aligned}$$

2. สมดุลพลังงาน Energy balance ของการเผาเค็ลือบ

พลังงานเข้าสู่ระบบ = พลังงานออกจากระบบ



รูปที่ 4.9 แสดงพลังงานเข้าสู่ระบบและพลังงานออกจากระบบในการเผาเค็ลือบ

พลังงานเข้าสู่ระบบ (Energy Input)

1. พลังงานจากเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

$$\begin{aligned} Q_{\text{in}} (\text{LPG}) &= \text{พลังงานที่ใช้ไปทั้งหมด} \\ &= \text{น้ำหนักก๊าซที่ใช้} \times \text{ค่าความร้อนของ LPG} \\ &= 13.7 \times 49,629 \end{aligned}$$

$$Q_{\text{in}} (\text{LPG}) = 679,917.3 \text{ kJ}$$

พลังงานออกจากระบบ (Energy Output)

1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา

$$Q_1(\text{hull}) = \text{พลังงานที่สะสมในไฟเบอร์} (Q_{1,1}) + \text{พลังงานที่สะสมในโครงเตา} (Q_{1,2})$$

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

$$\begin{aligned} Q_{11}(\text{Fiber}) &= W_{\text{Fiber}} \times C_{p_{\text{Fiber}}} \times Dt_{11} \\ &= 230 \times (0.26 \times 4.187) \times \left[\left(\frac{1177.75 + 59.4}{2} \right) 32.5 \right] \\ &= 146,702 \text{ kJ} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} &= W_{\text{body}} \times C_{p_{\text{body}}} \times Dt_{12} \\ &= 400 \times 0.5 \times (59.74 - 32.4) \\ &= 5,468 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q_1(\text{hull}) &= Q_{11} + Q_{12} \\ &= 146,702 + 5,468 \\ &= 151,091 \text{ kJ} \end{aligned}$$

2. พลังงานที่สะสมในพื้นที่เตา

$$\begin{aligned} Q_2(\text{Brick}) &= W_{\text{brick}} \times C_{p_{\text{brick}}} \times Dt_2 \\ &= 275 \times 0.96 \times (117.15 - 32.5) \\ &= 22,348 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยค่า C_p ของอิฐทนไฟเท่ากับ 0.96 kJ/kg

3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์

$$\begin{aligned} Q_3(\text{Furniture}) &= W_{\text{Fur}} \times C_{p_{\text{Fur}}} \times Dt_3 \\ &= 12.5 \times 0.67 \times (1177.15 - 32.5) \\ &= 9,592 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่เฟอร์นิเจอร์คือแผ่นสำหรับวางวัตถุที่ทำการเผาเป็นแผ่น Silicon Carbide มีค่า C_p เท่ากับ 0.67 kJ/kg

4. พลังงานที่ใช้ในการเผาผลิติดัณฑ์

$$\begin{aligned}
 Q_4(\text{Product}) &= m_p \times C_p \times Dt_4 \\
 &= 7.76 \times (0.33 \times 4.187) \times (1177.75 - 32.5) \\
 &= 11,599 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

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

5. พลังงานที่สูญเสียไปจากการแผ่รังสี

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

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

$$\begin{aligned}
 Q_{51} &= A_1 \times e_1 \times 5.67 \left[\left(\frac{T_s(\text{ave})_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \times \text{hr} \times 3.6 \\
 &= \{3.94 + (0.85 \times 1.12)\} \times 0.4 \times 5.67 \\
 &\quad \left[\left(\frac{57.62 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{32.5 + 273}{100} \right)^4 \right] \times 10.1 \times 3.6 \\
 &= 13,062 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 Q_{52} &= A_2 \times e_2 \times 5.67 \times \left[\left(\frac{T_s(\text{ave})_2 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \times \text{hr} \times 3.6 \\
 &= (0.85 \times 1.12) \times 0.85 \times 5.67 \left[\left(\frac{74.825 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{32.5 + 273}{100} \right)^4 \right] \\
 &\quad \times 10.1 \times 3.6 \\
 &= 9,887.75 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } Q_5 = Q_{51} + Q_{52}$$

$$= 13,062 + 9,887.75 \text{ kJ}$$

$$= 22,949.75 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } T_s(\text{ave})_1 &= \frac{82.74 + 32.5}{2} = 57.62 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_s(\text{ave})_2 &= \frac{117.15 + 32.5}{2} = 74.825 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

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)

$$\begin{aligned} Q_{61} &= A_1 \times hc_1 \times (T_s(\text{ave})_1 - T_a) \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= \{3.94 + (0.85 \times 1.12)\} \times 5.86 \times (57.62 - 32.5) \times 10.1 \times 3.6 \\ &= 26,183.5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Q_{62} (convection loss of kiln floor)

$$\begin{aligned} Q_{62} &= A_2 \times hc_2 \times (T_s(\text{ave})_2 - T_a) \times \text{hr} \times 3.6 \\ &= (0.85 \times 1.12) \times 7.93 \times (74.825 - 32.5) \times 10.1 \times 3.6 \\ &= 11,617.99 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q_6 &= Q_{61} + Q_{62} \\ &= 26,183.5 + 11,617.99 \\ &= 37,801.4 \text{ kJ} \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} h_{c1} &= \frac{6 \times [T_s(\text{ave})_1 - T_a]^{0.25}}{(TaL)^{0.25}} \\ &= \frac{6 \times [57.62 - 32.5]^{0.25}}{(32.5 \times 0.85)^{0.25}} \\ &= 5.86 \end{aligned}$$

$$h_{c2} = \frac{6 \times [T_s(\text{ave})_2 - T_a]^{0.25}}{(TaL)^{0.25}}$$

$$= \frac{6 \times [117.15 - 32.5]^{0.25}}{(32.5 \times 0.85)^{0.25}}$$

$$h_{c2} = 7.93$$

7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ

$$Q_7 = m_a \times W \times C_{p_{st}} \times (T_g - T_a)$$

$$= 455.52 \times 0.0247 \times 2.08 \times (815 - 32.5)$$

$$= 20,455.10 \text{ kJ}$$

โดยที่

$$C_{p_{st}} = \frac{h(815) - h(32.5)}{(815 - 32.5)}$$

$$= \frac{(4204.7 - 2560.8)}{788.5}$$

$$= 2.085 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

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

$$W_2 = \frac{0.622 P_{g2}}{p_2 - p_{g2}}$$

$$= \frac{0.622 \times 4.159}{101.325 - 4.159}$$

$$= 0.026$$

$$W = \frac{(1.005 \times (29.6 - 32.5)) + (0.026 \times 2431.4)}{(2560.8 - 124.12)}$$

$$= 0.02474 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg dry air}$$

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

$$\begin{aligned}
 Q(\text{CO}_2) &= m(\text{CO}_2) \times C_p(\text{CO}_2) \times (T_g - T_a) \\
 &= 37.603 \times 1.248 \times (815 - 32.5) \\
 &= 36,698.121 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q(\text{O}_2) &= m(\text{O}_2) \times C_p(\text{O}_2) \times (T_g - T_a) \\
 &= 53.825 \times 1.094 \times (815 - 32.5) \\
 &= 46,047.718 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q(\text{N}_2) &= m(\text{N}_2) \times C_p(\text{N}_2) \times (T_g - T_a) \\
 &= 349.356 \times 1.080 \times (815 - 32.5) \\
 &= 295,195 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } Q_8 &= 36,698.121 + 46,047.718 + 295,195 \\
 &= 377,939 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิด

การสูญเสียพลังงานชนิดนี้เป็นการสูญเสียพลังงานที่ไม่สามารถวัดค่าได้ซึ่งจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 Q_9 &= Q_{in} - [Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8] \\
 &= 26,143 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

3. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเซรามิค

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\text{ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา}} \\
 &= \frac{\text{พลังงานที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์}}{\text{พลังงานที่เข้าสู่ระบบ}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{Q_4}{Q_{in}} \times 100\% \\
 &= \frac{11599}{679918} \times 100\%
 \end{aligned}$$

$$\eta = 1.7 \%$$

การที่ประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกมีค่าน้อยเนื่องจากการทดลอง
 นี้ได้นำผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผาเป็นจำนวนน้อยมากถ้าเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่
 นำเข้าเตาเผาเซรามิกที่ใช้กันอยู่จริงในอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิก



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4. 8 ตารางสมดุลมวลในการเผาไหม้ biscuit ต่อ 1 รอบการเผา

input	output
1. มวลเชื้อเพลิง(LPG) เข้าเตา 4.68 kg	1. มวลความชื้นจากผลิตภัณฑ์ 0.55 kg
3. มวลอากาศเข้าเตา 155.95 kg	2. มวลก๊าซเสีย
	Mo ₂ 18.16 kg
	Mco ₂ 13.24 kg
	Mco 0.004 kg
	Mn ₂ 119.61 kg
	3. มวลที่สูญเสียจากช่องเปิดต่างๆ และที่ไม่สามารถวัดค่าได้ 9.07 kg
รวม 160.63 kg	รวม 160.63 kg

ตารางที่ 4.9 ตารางสมดุลมวลในการเผาเค็ลือบต่อ 1 รอบการเผา

input		output	
1. มวลเชื้อเพลิง (LPG) เข้าเตา	13.7 kg	1. มวลของควมร้อนจากผลิตภัณฑ์	0.31 kg
3. มวลอากาศเข้าเตา	455.52 kg	2. มวลก๊าซเสีย	
		Mo ₂	53.83 kg
		Mco ₂	37.60 kg
		MN ₂	349.36 kg
		3. มวลที่สูญเสียจากช่องเปิดต่างๆ และที่ไม่สามารถวัดค่าได้	28.12 kg
รวม	469.22 kg	รวม	469.22 kg

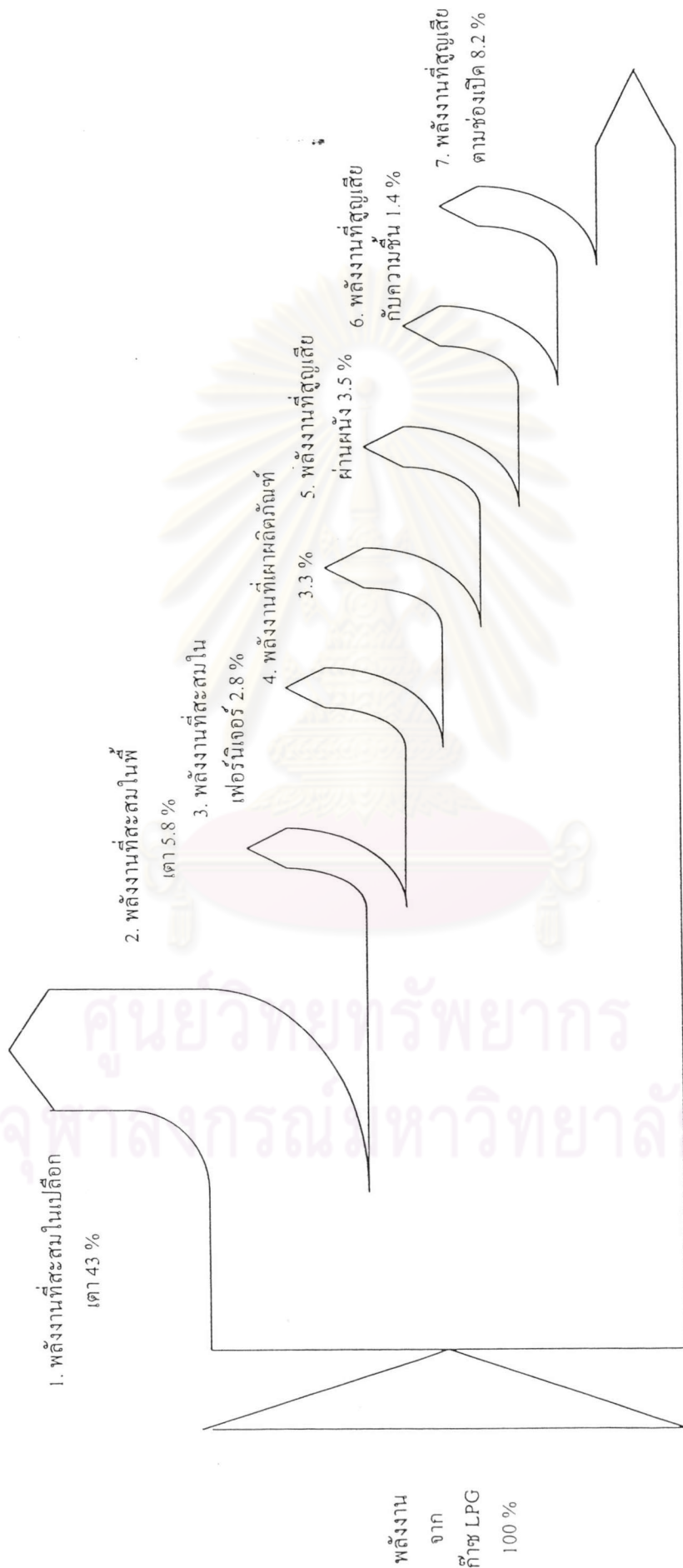
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ตารางสมดุลพลังงานในการเผาตบ biscuit ต่อ 1 รอบการเผา

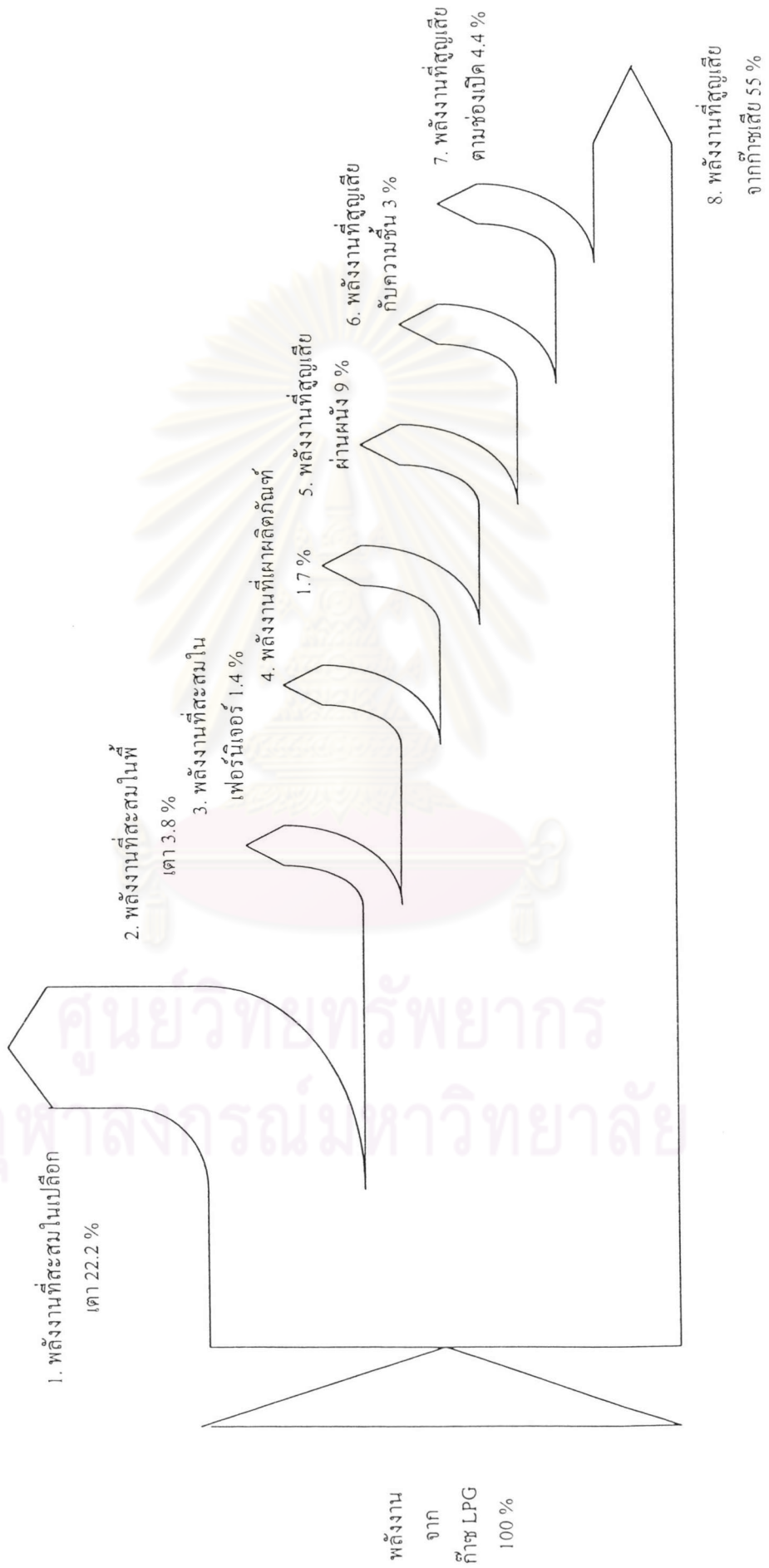
input	%	output	%
1. พลังงานจากเชื้อเพลิง (LPG)		1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา	
232,264 KJ	100	100,080 KJ	43
		2. พลังงานที่สะสมในพื้นที่	
		13,372 KJ	5.8
		3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์	
		6,611 KJ	2.8
		4. พลังงานที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์	
		7,657 KJ	3.3
		5. พลังงานที่สูญเสียจากการแผ่รังสี	
		4,120 KJ	1.7
		6. พลังงานที่สูญเสียจากการพาความร้อน	
		4,281 KJ	1.8
		7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ	
		3,288 KJ	1.4
		8. พลังงานที่สะสมในก๊าซเสีย	
		74,220 KJ	32
		9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิดและที่ไม่สามารถวัดค่าได้	
		18,635 KJ	8.2
รวม 232,264 KJ	100	รวม 232,264 KJ	100

ตารางที่ 4.11 ตารางสมดุลพลังงานในการเผาเคลีอบต่อ 1 รอบการเผา

input	%	output	%
1. พลังงานจากเชื้อเพลิง (LPG)		1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา	
679,918 KJ	100	151,091 KJ	22.2
		2. พลังงานที่สะสมในพื้นที่เตา	
		22,348 KJ	3.3
		3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์	
		9,592 KJ	1.4
		4. พลังงานที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์	
		11,599 KJ	1.7
		5. พลังงานที่สูญเสียจากการแผ่รังสี	
		22,950 KJ	3.4
		6. พลังงานที่สูญเสียจากการพาความร้อน	
		37,801 KJ	5.6
		7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ	
		20,455 KJ	3
		8. พลังงานที่สะสมในก๊าซเสีย	
		377,939 KJ	55
		9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิดและที่ไม่สามารถวัดค่าได้	
		26,143 KJ	4.4
รวม 679,918 KJ	100	รวม 679,918 KJ	100



รูปที่ 4.10 แสดง Sankey diagram ของพลังงานในการเผาไหม้



รูปที่ 4.11 แสดง Sankey diagram ของพลังงานในการเผาเชื้อเพลิง