

รายงานวิจัยเสริมหลักสูตร
ฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้
ของถ่านหินอัดแท่งทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นรูปร่างผึ้ง

**Analysis of Combustion Characteristics of Cylindrical, Honey-comb
Cross-section Coal Briquettes using an Experimental Design Technique**

โดย

นายโปรดปราน สิริธีรศาสตร์

ข้าราชการพลเรือนในสถาบันอุดมศึกษา ระดับ 8

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยตามโครงการวิจัยเสริมหลักสูตร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2547

การใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของ
ถ่านหินอัดแท่งทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นรูปร่างสี่

โปรดปราน สิริธีรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลอง (experimental design) มาใช้ในการศึกษาการเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านหินอัดแท่งทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นรูปร่างสี่ ทั้งในสภาวะที่มีปริมาณอากาศจำกัดและเกินพอ ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาในทั้ง 2 สภาวะ ประกอบด้วย มวลที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ มวลที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้สิ้นสุด และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) สำหรับการทดลองในสภาวะปริมาณอากาศเกินพอนั้น ได้ทำการศึกษาลักษณะการปล่อยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x), และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เพิ่มเติมด้วย นอกจากนี้ ยังได้มีการสร้าง empirical model จากข้อมูลการทดลอง และทำการทดสอบ model ที่ได้สร้างขึ้น โดยใช้เทคนิคทางสถิติต่างๆ อันได้แก่ residual analysis, coefficient of determination (R^2), และ F test

จากข้อมูลของมวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ พบว่าการลดลงของมวลในช่วงร้อยละ 20 แรกของเวลาการเผาไหม้ทั้งหมด มีลักษณะคล้ายคลึงกันในทุกอุณหภูมิ ทั้งในสภาวะการเผาไหม้ที่มีปริมาณอากาศจำกัดและเกินพอ อย่างไรก็ตาม หลังจากผ่านร้อยละ 20 แรกของเวลาการเผาไหม้ไปแล้ว อัตราการลดลงของมวลของถ่านหินอัดแท่งในสภาวะการเผาไหม้ที่มีอากาศเกินพอ มีค่าสูงกว่าในกรณีที่มีอากาศจำกัดอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณามวลที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้ในสภาวะการเผาไหม้ที่มีอากาศจำกัด พบว่ามีค่าสูงกว่าในสภาวะอากาศเกินพอประมาณร้อยละ 25—30 ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ในสภาวะการเผาไหม้ที่มีอากาศเกินพอมีค่าสูงกว่ากรณีที่มีปริมาณอากาศจำกัดประมาณ 50—80 เท่า เมื่อพิจารณาลักษณะการปล่อยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เวลาต่างๆ พบว่าการปล่อยของก๊าซทั้งสองมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงร้อยละ 20 ของเวลาการเผาไหม้ โดยในช่วงนี้ ความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) นั้น พบว่าในช่วงร้อยละ 20 แรกของเวลาการเผาไหม้ มีการปล่อยออกมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าสูงสุดในช่วงร้อยละ 20—40 ของเวลาการเผาไหม้ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (x_1) และปริมาณของอากาศ (x_2) กับมวลที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้สิ้นสุด (y) สามารถเขียนเป็น empirical model ได้เป็น $y = 61.3 - 1.55x_1 - 13.8x_2$ และเมื่อทำการทดสอบทางสถิติ พบว่า model นี้ให้ residual plot ที่มีความสมมาตรและไม่แสดงแนวโน้มใดๆ ค่า R^2 ของ model นี้เท่ากับ 0.988 และค่า F ที่ได้จาก model มีค่าเท่ากับ 160.53 ซึ่งสูงกว่าค่า F จากตาราง F -distribution อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทดสอบด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Analysis of Combustion Characteristics of Cylindrical, Honey-comb Cross-section Coal Briquettes using an Experimental Design Technique

Prodpran Siritheerasas

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

ABSTRACT

In this study, an experimental design technique was employed to investigate the combustion characteristics of cylindrical, honey-comb cross-sectional coal briquettes at the temperatures of 700, 800, and 900 °C. The consideration was divided into the low-flow and excess-flow of air conditions. For both conditions, the studied variables included time-resolved mass, the remaining mass at the end of the combustion, and the rate constant (k) of the combustion reaction. For the excess-flow condition, the emission characteristics of CO, NO_x, and SO₂ were also examined. Additionally, the statistical analysis, including residual analysis, coefficient of determination (R^2), and an F -test, was used to evaluate empirical models developed from experimental data.

Time-resolved mass data indicated that the decreasing trend of mass within the first 20% of the total combustion time behaved similarly for all temperatures, both for the low-flow and excess-flow conditions. After that, however, the mass decrease rate in the excess-flow condition was higher than that in the low-flow condition. The remaining mass at the end of the combustion in the low-flow condition was found to be higher than that in the excess-flow condition by ~25—30%, compared with the initial mass. It was also found that the rate constant (k) obtained from the excess-flow condition was higher than that from the low-flow condition by ~50—80 folds. The emissions of CO and NO_x within the first 20% of the combustion time, in which the peaks of the pollutant emissions took place, were found to increase with temperature. It was found, however, that the concentration of SO₂ in the first 20% of the combustion time was relatively low. The peak of the SO₂ emission occurred during the period of 20—40% of the combustion time. From the statistical analysis, it was found that the coded empirical model indicating the relationship between the temperature (x_1) and the flow of air (x_2), and the remaining mass at the end of the combustion (y) was as follows: $y = 61.3 - 1.55x_1 - 13.8x_2$. The residual plot of this model was symmetrical and showed no obvious trend; the R^2 of this model was 0.988; and the F value was 160.53, which was significantly higher than the $f_{\alpha, p-1, n-p}$ value from the F -distribution table with the confidence level of 95% (*i.e.* $\alpha = 0.05$).

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่มอบทุนวิจัยเสริมหลักสูตรเพื่อสนับสนุนงานวิจัยนี้ (ในขณะที่ผู้วิจัยขอทุนวิจัยนี้ งานด้านทุนวิจัยเสริมหลักสูตร อยู่ในความดูแลของฝ่ายวิชาการ) และขอขอบพระคุณฝ่ายวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ซึ่งเป็นผู้กำกับดูแลงานด้านนี้ในปัจจุบัน) และฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวกับทุนวิจัยนี้ โดยเฉพาะการอนุมัติให้ผู้วิจัยขยายระยะเวลาการส่งรายงานฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ถ่านหินดิบและถ่านหินอัดแท่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณชรรชนก ประภาสวัตดี คุณศนิชา โตศิริ คุณศิริวรรณ ต้นอายุวรรณ และคุณรัชยาพันธ์ จิรศักดิ์ธนา นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ทำการทดลองและเก็บข้อมูลดิบต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคุณณัฐชรีรา กิตติธเนศวร และคุณภัทรกร รังษีวงศ์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งช่วยผู้วิจัยจัดทำรูปเล่มรายงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ โดยเฉพาะคุณจิตตรา ดอกบัว คุณสากร ม่วงเขียว คุณกิตติ เมธาวงศ์ คุณสมศักดิ์ หริรัักษ์ดำรง และคุณไพรัตน์ รักพีช ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองต่างๆ

ขอขอบกราบพระคุณคณาจารย์ของผู้วิจัยทุกท่าน ทั้งที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่ Queen's University (ประเทศแคนาดา) ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาต่างๆ ให้กับผู้วิจัย โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย อันได้แก่ รองศาสตราจารย์กัญญา บุญเกียรติ และศาสตราจารย์ ดร. สมชาย โอสุวรรณ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ Dr. David Lawrence และ Dr. Edward W. Grandmaison แห่ง Queen's University ที่ได้มีส่วนร่วมกันเสริมสร้างความเป็นนักวิจัยที่ดีให้แก่ผู้วิจัย

และท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณพ่อ (ผู้ล่วงลับไปแล้ว) และแม่ของผู้วิจัย สำหรับความเมตตา กรุณา และความห่วงใยที่มีต่อผู้วิจัยเสมอมา รวมทั้งการสนับสนุนในทุกวิถีทางให้ผู้วิจัยได้รับการศึกษาที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ผู้วิจัยคงมีอายุมาถึงวันนี้ได้ หากปราศจากความรัก ความห่วงใย และความเมตตาจากท่านทั้งสอง

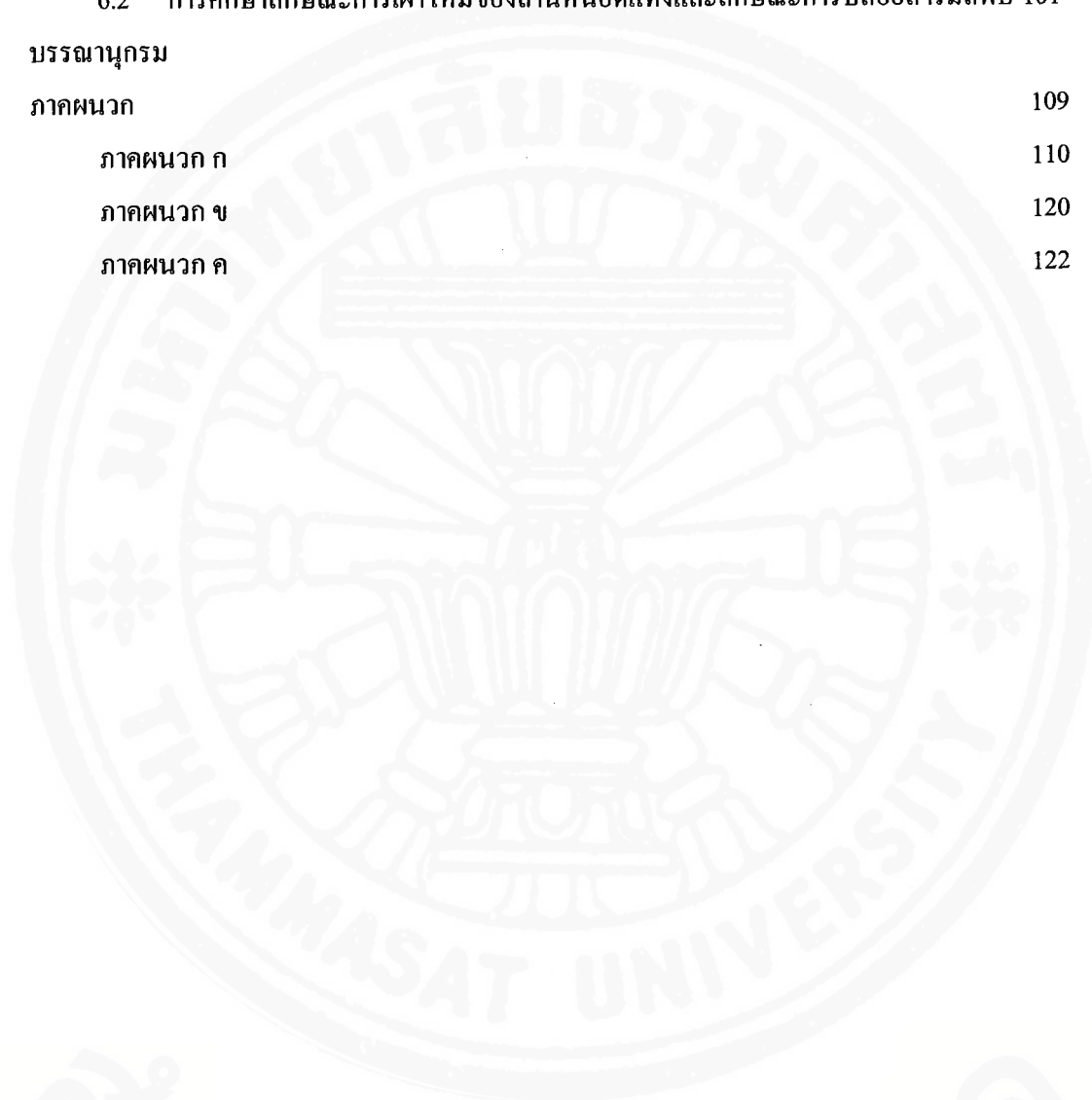
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	i
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูป	viii
สารบัญตาราง	xii
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้	6
1.4 โครงสร้างของงานวิจัย	6
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ถ่านหิน	7
2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านหิน	9
2.3 การอัดก้อนถ่านหิน	13
2.4 การวิเคราะห์ถ่านหิน	16
2.4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ	16
2.4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	18
2.4.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน	18

2.5	การเผาไหม้ถ่านหิน	19
2.5.1	สมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาการเผาไหม้	19
2.5.2	การศึกษากลไกที่ใช้ในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา	20
2.5.3	แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยา	23
2.5.4	แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยา	24
2.6	การศึกษาการปลดปล่อยแก๊สพิษของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง	26
2.6.1	การเกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน	29
2.6.2	การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน	30
2.6.3	การเกิดไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้และคาร์บอนมอนอกไซด์ระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน	32
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
2.8	ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง	35
2.9	การวิเคราะห์ทางสถิติ	37
2.9.1	Residual Analysis	38
2.9.2	Coefficient of Determination (R^2)	40
2.9.3	Analysis of Variance (ANOVA test)	42
3	การเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในสภาพอากาศจำกัด	45
3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษา	45
3.2	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	45
3.2.1	การเตรียมตัวอย่างถ่านหินดิบหรือถ่านหินอัดแท่งเพื่อนำไปวิเคราะห์แบบประมาณและวิเคราะห์หาค่าความร้อน	45
3.2.2	การวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินและถ่านหินอัดแท่ง	46
3.2.3	การทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่ง	46
3.2.4	การวิเคราะห์ถ่านหินอัดแท่งที่เผาไหม้แล้ว	47
3.3	ผลการทดลองและการวิเคราะห์	47
3.3.1	ผลการวิเคราะห์ถ่านหินดิบและถ่านหินอัดแท่งเบื้องต้น	47
3.3.2	ผลการวิเคราะห์ถ่านหินอัดแท่งที่ได้จากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	48
3.3.3	ผลการวิเคราะห์ทางค่านจลนพลศาสตร์ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง	53

4	การเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในสภาพอากาศเกินพอ	56
4.1	ตัวแปรที่ใช้ทำการศึกษา	56
4.2	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	57
4.2.1	การทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งแบบกะ	57
4.2.2	การทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งแบบต่อเนื่อง	58
4.2.3	การวิเคราะห์ถ่านหินอัดแท่งที่เผาไหม้แล้ว	58
4.3	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลเบื้องต้น	59
4.3.1	ลักษณะทางกายภาพของถ่านหินอัดแท่งที่เวลาต่างๆ	59
4.3.2	ปริมาณสารระเหยได้ที่เวลาต่างๆ	62
4.3.3	ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เวลาต่างๆ	63
4.4	การปล่อยก๊าซมลพิษต่างๆ ระหว่างการเผาไหม้	64
4.5	การวิเคราะห์หาอันดับและค่าคงที่อัตราเร็ว	66
4.6	การศึกษาหากลไกที่ควบคุมปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง	67
5	การวิเคราะห์ลักษณะการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งและการปล่อยก๊าซมลพิษในสภาวะต่างๆ	69
5.1	ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้ (x_1) และปริมาณอากาศ (x_2) ที่มีต่อมวลที่เหลืออยู่ (y_1)	69
5.2	ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้ (x_1) และปริมาณของอากาศ (x_2) ที่มีต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) (y_2)	73
5.3	การสร้าง Empirical Model จากผลการทดลอง	75
5.4	การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Analysis) สำหรับ Empirical Model ที่ได้สร้างขึ้น	77
5.4.1	Residual Analysis	78
5.4.2	Coefficient of determination (R^2)	81
5.4.3	ANOVA test (F test)	82
5.5	การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งและลักษณะการปล่อยสารมลพิษ	83
5.5.1	ลักษณะการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิต่างๆ	83
5.5.2	ลักษณะการปล่อยสารมลพิษ	93

6	สรุปผลการทดลอง	100
6.1	การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและปริมาณอากาศที่มีต่อมวลที่เหลืออยู่ และค่าคงที่ของปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง	100
6.2	การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งและลักษณะการปล่อยสารมลพิษ	101
บรรณานุกรม		
ภาคผนวก		109
	ภาคผนวก ก	110
	ภาคผนวก ข	120
	ภาคผนวก ค	122



สำนักหอสมุด

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ในถ่านหิน	12
2.2 รูปแบบปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ขนาดของอนุภาคไม่เปลี่ยน	25
2.3 รูปแบบของการกระจายตัวของความเบี่ยงเบนแบบต่างๆ	39
3.1 ลักษณะภายนอกและภายในเนื้อถ่านหินของถ่านหินอัดแท่ง ที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 6 ชั่วโมง	50
3.2 มวลที่เหลืออยู่ ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส (เส้นประแสดงมวลที่เหลืออยู่เมื่อเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง)	50
3.3 ปริมาณของสารระเหยได้ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส (เส้นประแสดงแนวโน้มปริมาณสารระเหยได้ที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ)	52
3.4 ปริมาณของคาร์บอนคงตัวที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส (เส้นประแสดงแนวโน้มของคาร์บอนคงตัวที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ)	53
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_e})}{(m_{A_0} - m_{A_e})} \right]$ กับเวลา (t) ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	54
3.6 การเปรียบเทียบมวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณกับมวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ ที่ได้จากการทดลองของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	55
4.1 ลักษณะของถ่านหินอัดแท่งที่ถูกเผาไหม้ ในเตาอั้งโล่ที่เวลาต่างๆ โดยถ่านหินอัดแท่งมีอุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียสการทดสอบความแข็งแรงของถ่านหินอัดแท่งและลักษณะของถ่านหินอัดแท่ง	59
4.2 ลักษณะการไหลของอากาศดีและอากาศเสียในเตาอั้งโล่	60
4.3 มวลที่เหลืออยู่ ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอั้งโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	61

4.4	ปริมาณของสารระเหยได้ ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอั้งโล่ ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียส	62
4.5	ปริมาณของคาร์บอนคงตัว ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอั้งโล่ ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียส	63
4.6	การปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง ในเตาอั้งโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	64
4.7	การปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอั้งโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	65
4.8	การปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง ในเตาอั้งโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	65
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_e})}{(m_{A_0} - m_{A_e})} \right]$ กับเวลา (t) ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	66
4.10	ถ่านหินอัดแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง 12, 7.5, และ 5.5 เซนติเมตร	68
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln t$ กับ $\ln d_c$ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียส โดยถ่านหินอัดแท่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง 12, 7.5, และ 5.5 เซนติเมตร	68
5.1	Normalized mass ของถ่านหินอัดแท่ง ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้ต่างๆ ในสภาพการเผาไหม้ที่มีปริมาณอากาศจำกัด (เส้นประแสดงแนวโน้ม)	70
5.2	Normalized mass ของถ่านหินอัดแท่ง ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้ต่างๆ ในสภาพการเผาไหม้ที่มีปริมาณอากาศเกินพอ	71
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่เหลืออยู่ของถ่านหินอัดแท่งกับปริมาณอากาศ ณ อุณหภูมิต่างๆ	72
5.4	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้ต่างๆ ในสภาพการเผาไหม้ที่มีปริมาณอากาศจำกัด	73
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยากับปริมาณอากาศ ณ อุณหภูมิต่างๆ	75
5.6	Residual plot ระหว่างค่าความแตกต่างของค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก model ที่ 1 กับค่า y ที่ได้จาก model ที่ 1	78

5.7	Residual plot ระหว่างค่าความแตกต่างของค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก model ที่ 2 กับค่า y ที่ได้จาก model ที่ 2	79
5.8	Residual plot ระหว่างค่าความแตกต่างของค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก model ที่ 3 กับค่า y ที่ได้จาก model ที่ 3	80
5.9	Residual plot ระหว่างค่าความแตกต่างของค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก model ที่ 4 กับค่า y ที่ได้จาก model ที่ 4	81
5.10	Normalized mass ของถ่านหินอัดแท่งที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียสในสภาวะที่มีปริมาณอากาศเกินพอ (จุดแบบทึบ) และสภาวะที่มีปริมาณอากาศจำกัด (จุดแบบโปร่ง)	84
5.11	Normalized mass ของถ่านหินอัดแท่งที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีปริมาณอากาศมากเกินพอ (จุดแบบทึบ) และสภาวะที่มีปริมาณอากาศจำกัด (จุดแบบโปร่ง)	85
5.12	Normalized mass ของถ่านหินอัดแท่งที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีปริมาณอากาศมากเกินพอ (จุดแบบทึบ) และสภาวะที่มีปริมาณอากาศจำกัด (จุดแบบโปร่ง)	86
5.13	Normalized mass ของถ่านหินอัดแท่งที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีปริมาณอากาศมากเกินพอ (จุดแบบทึบ) และสภาวะที่มีปริมาณอากาศจำกัด (จุดแบบโปร่ง)	86
5.14	ปริมาณของสารระเหยได้ที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ของการเผาไหม้ ถ่านหินอัดแท่ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาพที่มีปริมาณอากาศจำกัด (จุดแบบโปร่ง) และปริมาณอากาศเกินพอ (จุดแบบทึบ) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	88
5.15	ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ของการเผาไหม้ ถ่านหินอัดแท่ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาพที่มีปริมาณอากาศจำกัด (จุดแบบโปร่ง) และปริมาณอากาศเกินพอ (จุดแบบทึบ) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	90
5.16	ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	91
5.17	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	92

5.18	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	94
5.19	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ถูกปล่อยออกมาที่ อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยขณะที่ ช่วงการปล่อยมีค่าสูงสุด (avg peak), ค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการเผาไหม้ (avg all), และค่าสูงสุด (max)	95
5.20	ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x) ที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	96
5.21	ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาที่ อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยขณะที่ ช่วงการปล่อยมีค่าสูงสุด (avg peak), ค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการเผาไหม้ (avg all), และค่าสูงสุด (max)	97
5.22	ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลา (normalized time) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส	98
5.23	ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมา อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยขณะที่ ช่วงการปล่อยมีค่าสูงสุด (avg peak), ค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการเผาไหม้ (avg all), และค่าสูงสุด (max)	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	การจำแนกถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM D388	10
2.2	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมของธาตุในถ่านหินสัคคีต่างๆ	12
2.3	มาตรฐานการปล่อยสารมลพิษจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ของประเทศไทย	27
2.4	มาตรฐานคุณภาพอากาศ (air quality standards) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนตริกออกไซด์ของประเทศต่าง	28
2.5	มาตรฐานการปล่อย (emission standards) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ของประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย	29
2.6	การวิเคราะห์ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลจริงจากค่าที่ได้จาก model	38
2.7	ตาราง ANOVA test	44
3.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (eating value) และปริมาณกำมะถันรวม (total sulphur) ของถ่านหินดิบและถ่านหินอัดแท่ง	48
5.1	ค่าของอุณหภูมิ (x_1) และปริมาณของอากาศ (x_2) ที่ยังไม่ผ่านการ coding และผ่านการ coding แล้ว	77
5.2	ตาราง ANOVA test สำหรับ model ที่ 2	83