

บทที่ 3

การเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในสภาพอากาศจำกัด (Low-flow Conditions)

เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการเผาไหม้และลักษณะทางจลนพลศาสตร์ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในสภาพที่มีอากาศจำกัด จึงได้ทำการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาเผาแบบ muffle (muffle furnace) ซึ่งตัวแปรที่ใช้ทำการศึกษาค้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย และผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลเบื้องต้น สามารถแสดงและอธิบายได้ดังนี้

3.1 ตัวแปรที่ใช้ทำการศึกษา

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง ซึ่งทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปในระดับอุตสาหกรรม
2. เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง ซึ่งอยู่ในช่วง 5—120 นาที

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหินดิบหรือถ่านหินอัดแท่งเพื่อนำไปวิเคราะห์แบบประมาณและวิเคราะห์หาค่าความร้อน

1. นำถ่านหินดิบหรือถ่านหินอัดแท่งมาทุบด้วยค้อนให้มีขนาดเล็กลงและนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบโบริมิดีหรือ Janke & Kunkel GmbH รุ่น M20
2. นำถ่านหินที่บดแล้วตากทิ้งไว้ในอากาศ เพื่อให้ความชื้นเข้าสู่สมดุลกับความชื้นในอากาศ
3. นำถ่านหินไปวิเคราะห์ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.2

3.2.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินและถ่านหินอัดแท่ง

1. วิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172

(ASTM Standards, 1997) ซึ่งประกอบด้วย

- วิเคราะห์ความชื้น (moisture) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 (ASTM

Standards, 1997)

- วิเคราะห์สารระเหยได้ (volatile matter) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3175

(ASTM Standards, 1997)

- วิเคราะห์เถ้า (ash) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174 (ASTM Standards, 1997)

2. วิเคราะห์ค่าความร้อน (gross calorific value) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3286

(ASTM Standards, 1997) และวิเคราะห์หาค่ากำมะถันรวม (total sulphur) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3177 (ASTM Standards, 1997)

3.2.3 การทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่ง

ศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่ง ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส ในเตาเผาแบบ muffle ซึ่งมีการไหลของอากาศภายในเตาเผาที่จำกัด โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. นำถ่านหินอัดแท่งจำนวน 2 ก้อน มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบ digital ยี่ห้อ

AND รุ่น HV-30K ซึ่งสามารถชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 30 kg และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 10 g

บันทึกค่า แล้วนำมาวางบนถาด stainless steel ทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ลึก 2

เซนติเมตร จากนั้น นำไปวางบนถาด stainless steel รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 25 เซนติ-

เมตร ยาว 40 เซนติเมตร ลึก 2 เซนติเมตร

2. นำเข้าเตาเผาเป็นเวลา 5 นาที ที่ 700 องศาเซลเซียส

3. นำถ่านหินอัดแท่งทั้ง 2 ก้อน ออกจากเตาเผา แล้วนำฝาครอบ stainless steel

ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร มาครอบถ่านหินอัดแท่งทันที เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับถ่านหินอัดแท่ง จากนั้นนำถ่านหินอัดแท่งไปใส่ใน desiccator รอให้เย็น ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบ digital ยี่ห้อ AND รุ่น HV-30K และบันทึกค่า แล้วนำมวลของถ่านหินอัดแท่งทั้ง 2 ก้อน มาหาค่าเฉลี่ย

4. ทำการทดลองตามข้อ 1—3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง

จาก 5 นาที เป็น 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 70, 90, และ 120 นาที

5. ทำการทดลองตามข้อ 1—4 ซ้ำ ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส

3.2.4 การวิเคราะห์ถ่านหินอัดแท่งที่เผาไหม้แล้ว

1. นำถ่านหินที่ได้จากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในหัวข้อ 3.2.3 มาผ่าน

การเตรียมตัวอย่างตามข้อ 3.2.1 และนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) วิเคราะห์ค่าความร้อน (gross calorific value) และค่ากำมะถันรวม (total sulphur) ตามข้อ 3.2.2

2. วิเคราะห์หาอันดับ (order) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (rate constant, k) ของปฏิกิริยา

การเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่ง

3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลเบื้องต้น

3.3.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านดิบและถ่านหินอัดแท่งเบื้องต้น

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) และค่ากำมะถันรวม (total sulphur) ของถ่านหินดิบและถ่านหินอัดแท่ง แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยพบว่าปริมาณของส่วนซึ่งเป็นเถ้าในถ่านหินอัดแท่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่า 4 เท่า เมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นเถ้าของถ่านหินดิบ ซึ่งสาเหตุหลักของการเพิ่มขึ้นของปริมาณของเถ้า น่าจะ

เนื่องมาจากการอัดก้อนถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต้องการเติมตัวประสานเพื่อให้ถ่านหินสามารถอัดเป็นก้อนได้ ดังนั้น ปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้นมานี้จึงน่าจะเป็นดินเหนียวซึ่งใช้เป็นตัวประสานนั่นเอง

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) และปริมาณกำมะถันรวม (total sulphur) ของถ่านหินดิบและถ่านหินอัดแท่ง

รายการวิเคราะห์	ตัวอย่างถ่านหิน	
	ถ่านหินดิบ	ถ่านหินอัดแท่ง
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละ) (air-dried basis)		
- ความชื้น	15.12	5.78
- เถ้า	8.95	41.28
- สารระเหยได้	34.57	13.56
- คาร์บอนคงตัว (โดยผลต่าง)	41.36	39.39
กำมะถันรวม (ร้อยละ)	1.07	0.23
ค่าความร้อน		
(MJ/kg)	19.26	14.42
(cal/g)	4,602.86	3,445.60
ศัลไฟ	ซัลฟิวรีนีส ซี	—

3.3.2 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินอัดแท่งที่ได้จากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส

3.3.2.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านหินอัดแท่งและมวลที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านหินอัดแท่งที่ได้เผาไหม้แล้วเป็นเวลาต่างๆ พบว่า ที่เวลา 5 นาที ถ่านหินอัดแท่งยังมีสีดำอยู่ เนื่องจาก ณ เวลาดังกล่าวน่าจะยังไม่มี

การเผาไหม้เกิดขึ้น (สังเกตได้จากคาร์ที่ยังไม่มีเปลวไฟเกิดขึ้น) เป็นเพียงแต่การระเหยของส่วนที่ระเหยได้ (เช่น ความชื้นและสารระเหยได้ที่มีโมเลกุลเล็กๆ เป็นต้น) ออกไปเท่านั้น

เมื่อเผาถ่านหินอัดแท่งเป็นเวลา 35 นาที ถ่านหินอัดแท่งมีสีขาวยงของถ่านเกิดขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นถ่านที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านชาร์ที่อยู่บริเวณผิวด้านนอกของถ่านหินอัดแท่ง

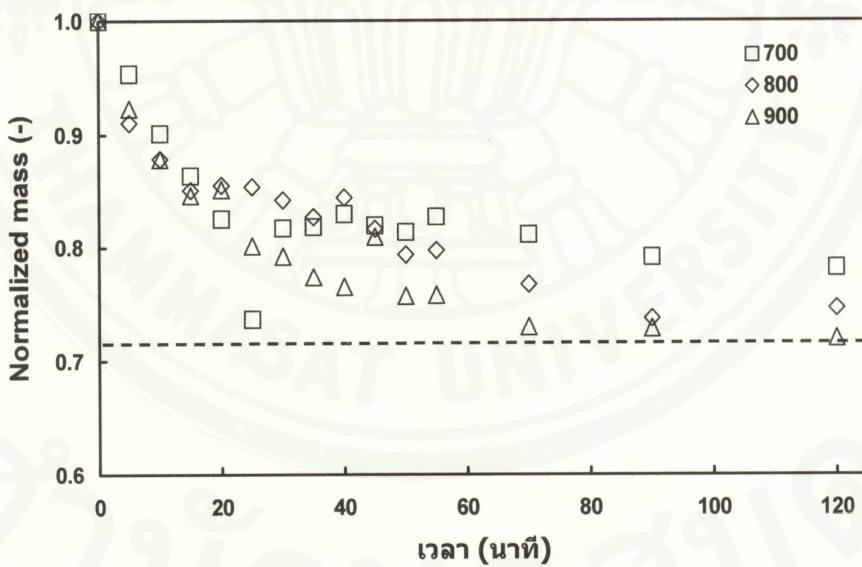
และเมื่อเผาถ่านหินอัดแท่งเป็นเวลา 120 นาที ถ่านหินอัดแท่งมีสีขาวยงของถ่านเกิดมากขึ้น ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากถ่านชาร์ถูกเผาไหม้เข้าไปด้านในมากขึ้น

นอกจากนี้ ยังพบว่าปริมาตรของถ่านหินอัดแท่งที่ถูกเผาไหม้แทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง หรือกล่าวได้ว่า การเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบปริมาตรคงที่ (constant volume) เมื่อพิจารณาถึงลักษณะภายในของถ่านหินอัดแท่ง เมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 พบว่าเนื้อภายในของถ่านหินอัดแท่งยังคงเป็นสีดำอยู่ ขณะที่ขอบนอกมีส่วนที่เป็นถ่านอยู่ แสดงว่าลักษณะการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งเป็นไปตามแบบจำลองแกนหดตัว (shrinking core model)

มวลของถ่านหินอัดแท่งที่ถูกเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ในช่วง 0—120 นาที ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 พบว่า ในช่วงแรกมวลของถ่านหินอัดแท่งลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกนั้น ส่วนที่ระเหยได้ง่าย ซึ่งได้แก่ ความชื้นและสารระเหยได้ ถูกขับออกจากถ่านหินอัดแท่งด้วยความร้อน หลังจากนั้น เมื่อเข้าสู่ช่วงของการเผาไหม้ส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัว (หรือ “ถ่านชาร์”) มวลของถ่านหินอัดแท่งลดลงค่อนข้างน้อย จนเกือบเรียกได้ว่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าส่วนที่เป็นถ่านชาร์ถูกเผาไหม้ไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 3.1 ลักษณะภายนอกและภายในเนื้อถ่านหินอัดแท่ง ที่ผ่านการเผาไหม้ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 6 ชั่วโมง



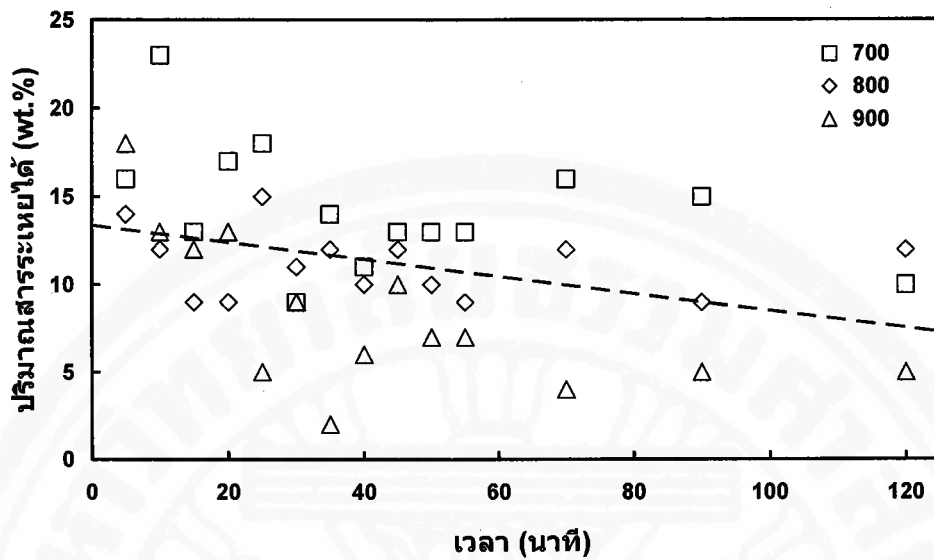
รูปที่ 3.2 มวลที่เหลืออยู่ ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส (เส้นประแสดงมวลที่เหลืออยู่เมื่อเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง)

เมื่อพิจารณามวลที่เหลืออยู่ภายหลังการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.75 kg และมวลที่เหลืออยู่ภายหลังการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.72 กิโลกรัม ทำให้เห็นได้ว่าการเผาไหม้ได้เริ่มยุติเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 120 นาที และเมื่อพิจารณารูปที่ 3.1 พบว่าเนื้อในของถ่านหินอัดแท่งยังคงมีส่วนที่ยังไม่ได้เผาไหม้ไปเหลืออยู่ แสดงว่าการหยุดการเผาไหม้นั้นไม่ได้เกิดจากการที่ส่วนที่ถูกเผาไหม้ได้ถูกใช้หมดไป แต่น่าจะเกิดจากการที่ก๊าซออกซิเจนไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นเถ้าเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับส่วนที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ได้ ซึ่งสาเหตุที่ก๊าซออกซิเจนไม่สามารถแพร่เข้าไปได้นั้น น่าจะมีสาเหตุหลักมาจากการที่การเผาไหม้เกิดขึ้นในสภาพที่มีอากาศจำกัด เมื่อการเผาไหม้เกิดไประยะหนึ่งแล้ว อากาศหรือก๊าซออกซิเจนอาจถูกใช้หมดไปไม่เหลือพอสำหรับการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่เหลือ โดยเฉพาะส่วนที่เป็นถ่านชาร์ซึ่งเป็นของแข็ง

3.3.2.2 ปริมาณสารระเหยได้ที่เวลาต่างๆ

ปริมาณของสารระเหยได้ที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง ที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3

ปริมาณของสารระเหยได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องมาจากส่วนที่เป็นสารระเหยได้นี้เป็นส่วนที่ระเหยออกจากถ่านหินได้ง่ายที่สุด ดังนั้นเมื่อเวลาของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งมากขึ้น ปริมาณของสารระเหยได้ที่เหลืออยู่ในแท่งถ่านหินอัดแท่งจึงมีค่าลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับช่วงแรกของรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำหนักของถ่านหินอัดแท่งลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารระเหยได้ไม่ลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ ทั้งนี้น่าจะเนื่องมาจากการที่ปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้สิ้นสุดลงก่อนที่สารระเหยได้ที่อยู่ภายในเนื้อถ่านหินอัดแท่งจะระเหยออกมาและถูกเผาไหม้ (ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา)

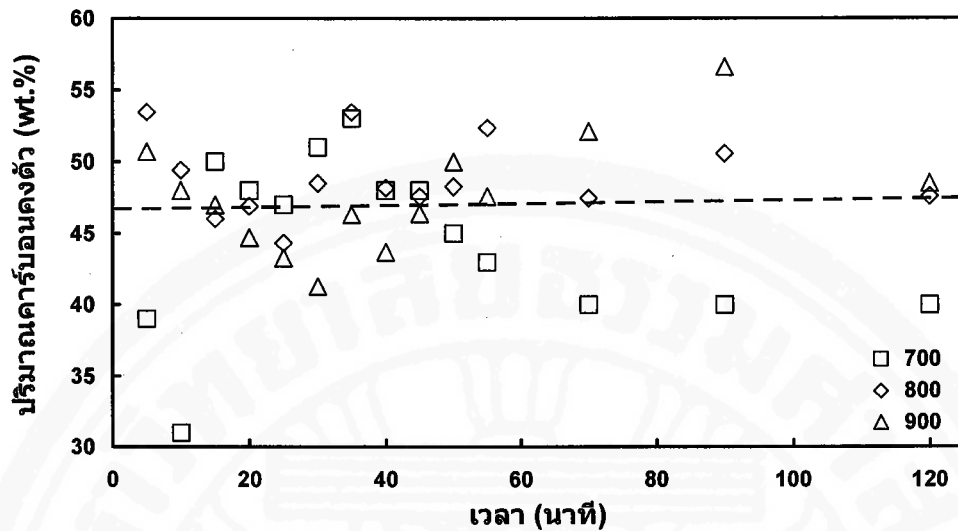


รูปที่ 3.3 ปริมาณของสารระเหยได้ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส (เส้นประแสดงแนวโน้มปริมาณสารระเหยได้ที่เหลืออยู่ ที่เวลาต่างๆ)

3.3.2.3 ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เวลาต่างๆ

ปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.4

คาร์บอนคงตัวที่เหลืออยู่มีค่าคงที่ที่ประมาณร้อยละ 47 ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับมวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่ประมาณร้อยละ 80 (เมื่อความชื้นและสารระเหยได้ถูกขับออกจากถ่านหินอัดแท่งจนหมดหรือเกือบหมดแล้ว) พบว่ามีคาร์บอนคงตัวเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 38 เมื่อเทียบกับมวลของถ่านหินอัดแท่งตอนเริ่มต้น ขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านหินอัดแท่งที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมามีค่าประมาณร้อยละ 39 แสดงว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้หยุดลงก่อนที่จะมีการเผาไหม้ในส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัว หรือหยุดลงเมื่อมีการเผาไหม้ส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 3.4 ปริมาณของคาร์บอนคงตัวที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส (เส้นประแสดงแนวโน้มของคาร์บอนคงตัวที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆ)

3.3.3 ผลการวิเคราะห์ทางด้านจลนพลศาสตร์ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง

3.3.3.1 การวิเคราะห์หาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (rate constant, k)

เมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_e})}{(m_{A_0} - m_{A_e})} \right]$ กับ t ดังแสดงในรูปที่ 3.5

แล้วพิจารณาค่า R^2 ที่ได้ พบว่า ค่า R^2 ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นดังนี้ ที่ 700 องศาเซลเซียส มีค่า R^2 เท่ากับ 0.8654 ที่ 800 องศาเซลเซียส มีค่า R^2 เท่ากับ 0.7105 และที่ 900 องศาเซลเซียส มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9241 ซึ่งค่า R^2 ที่ได้ทั้งสามอุณหภูมินี้มีค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง

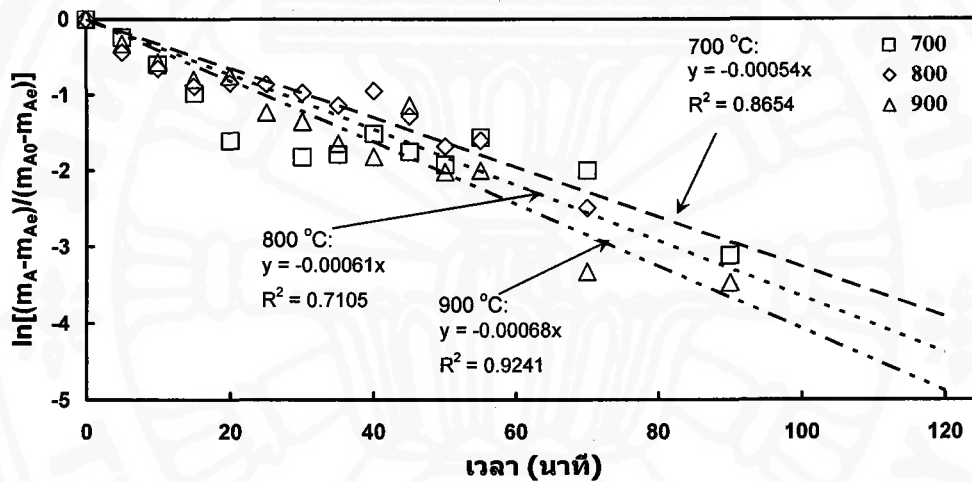
$\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_e})}{(m_{A_0} - m_{A_e})} \right]$ กับ t ควรเป็นความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง ดังนั้นอันดับของปฏิกิริยาจึงควร

เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order)

ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จากความชันของ

กราฟระหว่าง $\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_e})}{(m_{A_0} - m_{A_e})} \right]$ กับ t ซึ่งค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.00054, 0.00061, 0.00068 นาที⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า k กับการ

เพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้เป็นไปตามกฎของ Arrhenius ซึ่งได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.5.1

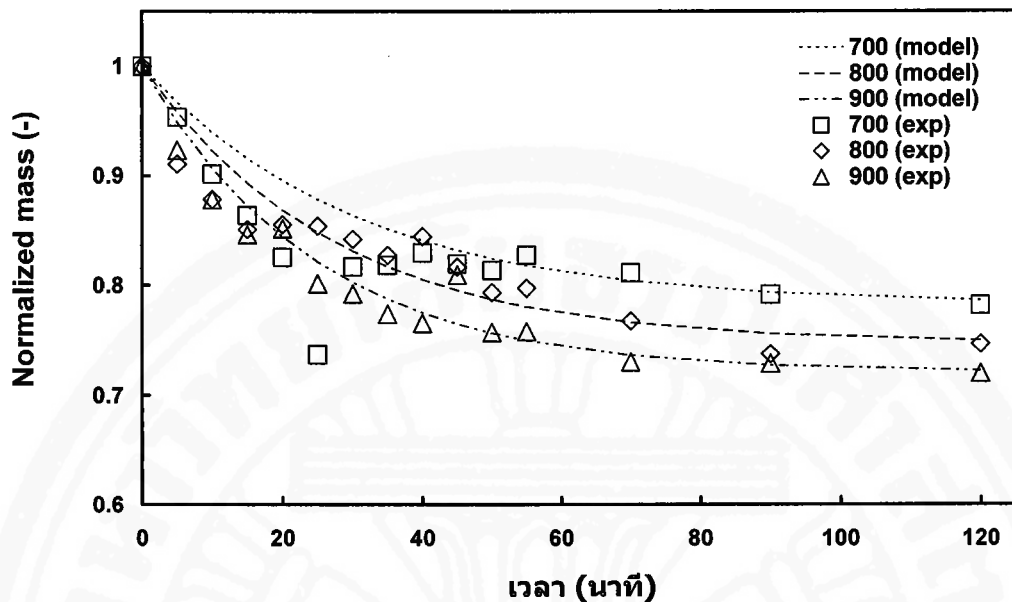


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_e})}{(m_{A_0} - m_{A_e})} \right]$ กับเวลา (t) ของปฏิกิริยาการเผาไหม้

ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส

3.3.3.2 การคำนวณค่ามวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ

เมื่อทราบค่าคงที่อัตราเร็วที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส แล้ว นำค่าคงที่อัตราเร็วที่ได้ไปแทนค่าในสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เพื่อคำนวณมวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ ได้ และเมื่อสร้างกราฟระหว่างมวลที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับมวลที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง จะเป็นไปตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบมวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณกับมวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากการทดลองของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 3.6 พบว่ามวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณกับมวลที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในช่วงแรก (ในช่วง 0—30 นาที) มีค่าแตกต่างกันพอสมควร ขณะที่ช่วงหลัง (ตั้งแต่นาทีที่ 30 เป็นต้นไป) ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่า k ที่ใช้ในการคำนวณ ได้จากข้อมูลการเผาไหม้ทั้งช่วงของการระเหยและเผาไหม้ของสารระเหยได้และช่วงการเผาไหม้ถ่านชาร์ แต่ช่วงการเผาไหม้ถ่านชาร์ใช้เวลานานกว่า จึงเป็นช่วงที่ควบคุมการเผาไหม้ทั้งหมด ค่า k ที่ได้จึงเป็นค่า k ที่น่าจะใกล้เคียงกับค่า k ของการเผาไหม้ถ่านชาร์ จึงทำให้ผลการทำนายค่ามวลที่เหลืออยู่ในช่วงหลัง (ซึ่งเป็นช่วงการเผาไหม้ถ่านชาร์) มีค่าใกล้เคียงกับมวลที่เหลืออยู่ที่ได้จากการทดลองมากกว่า อย่างไรก็ตาม โดยรวมแล้ว สามารถกล่าวได้ว่า ผลการทำนายมวลที่เหลืออยู่โดยใช้สมการมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้เป็นอย่างดี