

บทที่ 4

การเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในสภาพการไหลของอากาศเกินพอ (Excess-flow Conditions)

ในบทที่ 3 ได้แสดงผลการศึกษาลักษณะของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในสภาพการไหลของอากาศที่จำกัด เพื่อศึกษาถึงผลของความแตกต่างในเรื่องของสภาพการไหลของอากาศที่มีต่อการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง จึงได้ทำการศึกษาลักษณะการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในสภาพที่มีการไหลของอากาศมากเกินพอ โดยทำการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่อุณหภูมิการเผาไหม้เริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส ในรูปแบบต่างๆ ทั้งแบบกะ (batch) และแบบต่อเนื่อง (continuous) ซึ่งตัวแปรที่ใช้ทำการศึกษา ขึ้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย และผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลเบื้องต้นสามารถแสดงและอธิบายได้ดังนี้

4.1 ตัวแปรที่ใช้ทำการศึกษา

1. อุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง ซึ่งทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปในระดับอุตสาหกรรม
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของถ่านหินอัดแท่ง ซึ่งมีค่าระหว่าง 5—12 เซนติเมตร

4.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

4.2.1 การทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งแบบกะ (batch)

ศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งที่เวลาต่างๆ ในเตาอั้งโล่ โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. นำถ่านหินอัดแท่งจำนวน 1 ก้อน มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบ digital ยี่ห้อ AND รุ่น HV-30K บันทึกค่า แล้วนำมาวางบนถาด stainless steel ทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ลึก 2 เซนติเมตร จากนั้น นำไปวางบนถาด stainless steel รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร ลึก 2 เซนติเมตร
2. นำเข้าเตาเผาแบบ muffle ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
3. นำถ่านหินอัดแท่งออกจากเตาเผา แล้วนำมาเผาไหม้ต่อในเตาอั้งโล่ โดยเปิดพัดลมเป่า เพื่อให้เหมือนกับสภาวะการเผาไหม้จริง จากนั้นนำฝาครอบ stainless steel ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร มาครอบถ่านหินอัดแท่งเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับถ่านหินอัดแท่งได้
4. ถ่ายภาพถ่านหินอัดแท่งที่ได้จากการเผาไหม้ ทั้งภายนอก และภายในเนื้อถ่านหินอัดแท่ง
5. ทำการทดลองข้อ 1—4 ซ้ำ ที่สภาวะเดิม แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง มาหาค่าเฉลี่ย
6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1—5 แต่เปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอั้งโล่จาก 5 นาที เป็น 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 และ 100 นาที ตามลำดับ
7. ทำการทดลองตามข้อ 1—6 ซ้ำ ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส

4.2.2 การทดสอบการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งแบบต่อเนื่อง (continuous)

1. นำถ่านหินอัดแท่งจำนวน 1 ก้อน มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบ digital ยี่ห้อ AND รุ่น HV-30K บันทึกค่า แล้วนำมาวางบนถาด stainless steel ทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ลึก 2 เซนติเมตร จากนั้น นำไปวางบนถาด stainless steel รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร ลึก 2 เซนติเมตร
2. นำเข้าเตาเผาแบบ muffle ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
3. นำถ่านหินอัดแท่งออกจากเตาเผา แล้วนำมาเผาไหม้ต่อในเตาอั้งโล่ โดยทำการเปิดพัดลมเป่า เพื่อให้เหมือนกับสภาวะการเผาไหม้จริง
4. บันทึกน้ำหนักของถ่านหินอัดแท่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบ digital ยี่ห้อ AND รุ่น HV-30K วัดความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ อันได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซยี่ห้อ Madur รุ่น GA-40T Plus ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของการวัดไม่เกินร้อยละ $\pm 3\%$ และวัดอุณหภูมิผิวของถ่านหินอัดแท่งและอุณหภูมิของ flue gas ด้วย thermocouple ยี่ห้อ Testo รุ่น 901 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของการวัดไม่เกินร้อยละ ± 1 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถ่านหินอัดแท่งหยุดเผาไหม้
5. ทำการทดลองตามข้อ 1–4 ซ้ำ ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส

4.2.3 การวิเคราะห์ถ่านหินอัดแท่งที่เผาไหม้แล้ว

1. นำถ่านหินที่ได้จากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ จากการทดลองแบบกะมาผ่านการเตรียมตัวอย่างตามข้อ 3.2.1 และนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) วิเคราะห์ค่าความร้อน (gross calorific value) และค่ากำมะถันรวม (total sulphur) ตามข้อ 3.2.2 ทั้งนี้ในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง ได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง เป็นอย่างน้อย

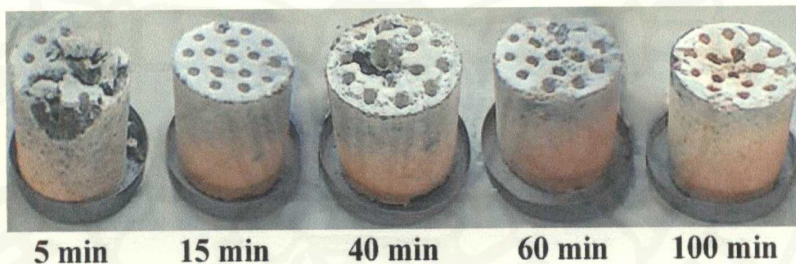
2. วิเคราะห์หาอันดับ (order) และค่าคงที่ของปฏิกิริยา (rate constant, k) ของ

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่ง

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลเบื้องต้น

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านหินอัดแท่งที่เวลาต่างๆ

ลักษณะทางกายภาพของถ่านหินอัดแท่งที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งแบบกะ (batch) เมื่อถูกเผาไหม้ในเตาอั้งโล่ด้วยเวลาการเผาไหม้ 5, 15, 40, 60, และ 100 นาที แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ทั้งนี้ ในที่นี้นำเสนอเฉพาะผลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เท่านั้น ผลการทดลองที่อุณหภูมิอื่นๆ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน



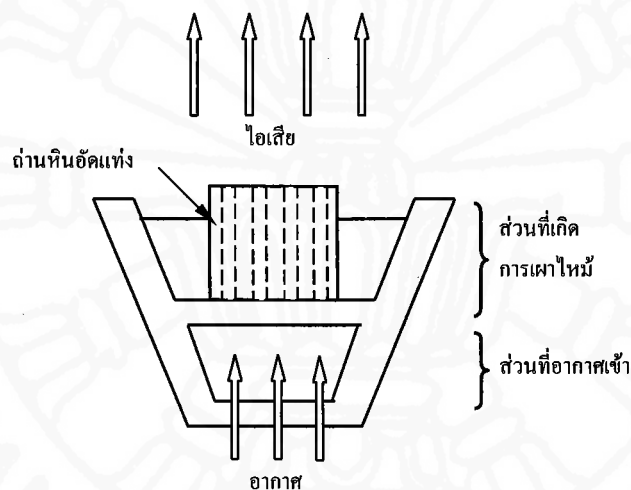
รูปที่ 4.1 ลักษณะของถ่านหินอัดแท่งที่ถูกเผาไหม้ ในเตาอั้งโล่ที่เวลาต่างๆ โดยถ่านหินอัดแท่งมีอุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียส

ที่เวลา 5 นาที ถ่านหินอัดแท่งยังคงมีส่วนที่เป็นสีดำอยู่แทบทั้งก้อน ซึ่งแสดงว่า ณ เวลานี้ น่าจะยังไม่มีการเผาไหม้เข้าไปถึงด้านในของถ่านหินอัดแท่งมากนัก เมื่อเวลาของการเผาไหม้เพิ่มเป็น 15 นาที ถ่านหินอัดแท่งเริ่มมีถ้าเกาะที่ผิวมากขึ้น แสดงว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นในเนื้อถ่านหินอัดแท่งมากขึ้น

ที่เวลา 40 และ 60 นาที ถ่านหินอัดแท่งมีสีขาวของชั้นถ้าเกิดขึ้นในปริมาณมากขึ้น เป็นลำดับ แสดงว่ามีการเผาไหม้เข้าไปในส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวหรือที่เรียกว่าถ่านชาร์มากขึ้น

เป็นเวลา 100 นาที ถ่านหินอัดแท่งมีสีขาวยของชั้นถ้ำเกิดขึ้นแทบทั้งก้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ถ่านหินอัดแท่งถูกเผาไหม้จนเหลือแต่ถ้ำ หรือเหลือส่วนที่ยังเผาไหม้ได้น้อยมาก

เมื่อพิจารณาลักษณะถ่านหินอัดแท่งที่ได้จากการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ แล้ว พบว่า ถ่านหินอัดแท่งถูกเผาไหม้ขึ้นมาจากด้านล่าง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของเตาอั้งโล่ที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยเตาอั้งโล่มีช่องให้อากาศสามารถผ่านเข้ามาทำปฏิกิริยากับตัวถ่านหินอัดแท่งจากทางด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2

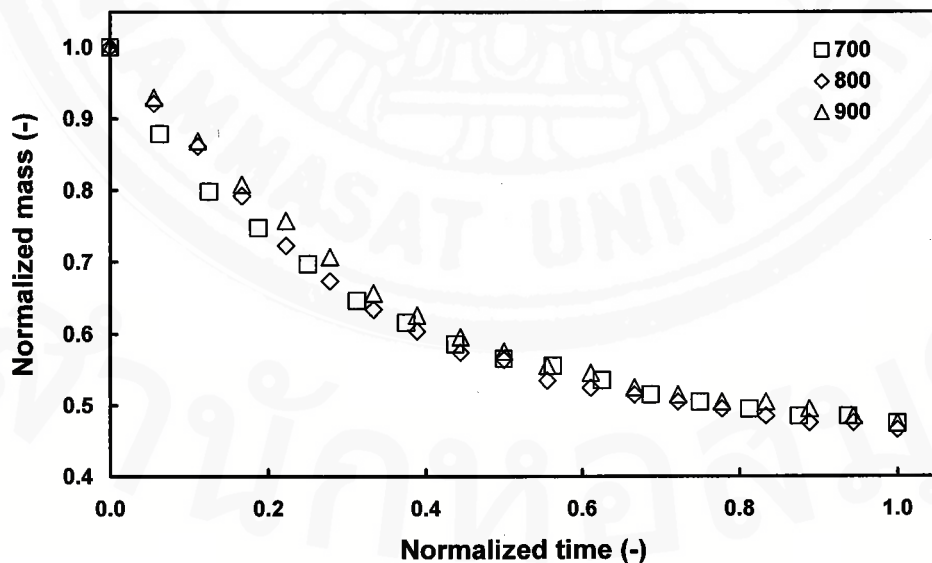


รูปที่ 4.2 ลักษณะการไหลของอากาศดีและอากาศเสียในเตาอั้งโล่

นอกจากนี้ ยังพบว่าปริมาณของถ่านหินอัดแท่งที่ถูกเผาไหม้ค่อนข้างคงที่ แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรืออาจกล่าวได้ว่า การเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบ ปริมาตรคงที่ (constant volume) โดยเมื่อถ่านหินอัดแท่งเกิดการเผาไหม้ ชั้นถ้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างเนื้อถ่านหินกับอากาศยังคงเกาะอยู่กับเนื้อถ่านหินอัดแท่งที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ แสดงว่าลักษณะ

การเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งเป็นไปตามแบบจำลองแกนหดตัว (shrinking core model) เช่นเดียวกับ
กับการเผาไหม้ในสภาพที่มีการไหลของอากาศที่จำกัด

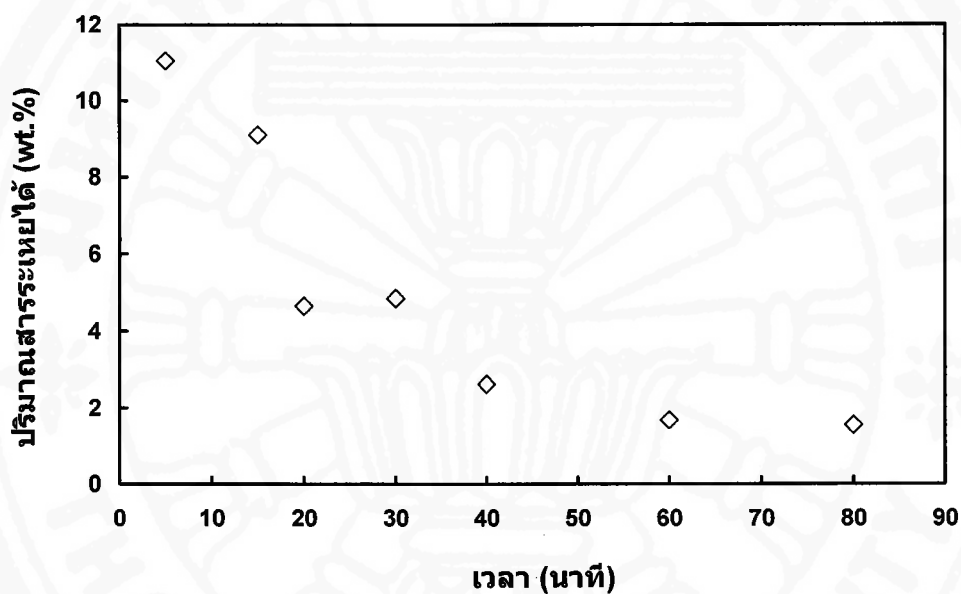
ลักษณะของมวลของถ่านหินอัดแท่งที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าการลดลงของมวลที่ทั้ง 3 อุณหภูมิ (700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส) มีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน โดยการลดลงของมวลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรก ช่วง 40 นาทีแรกของการเผาไหม้ มวลของถ่านหินอัดแท่งลดลงอย่างรวดเร็ว และในช่วงที่สอง คือหลังจากการเผาไหม้ผ่านไปมากกว่า 40 นาทีขึ้นไป มวลของถ่านหินลดลงอย่างช้าๆ จนเรียกได้ว่าค่อนข้างคงที่ ลักษณะการเผาไหม้เช่นนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Malik *et al* (1994) โดยช่วงแรกของการเผาไหม้ ที่มวลของถ่านหินอัดแท่งลดลงอย่างรวดเร็ว นั้น เป็นส่วนที่สารระเหยได้และคาร์บอนคงตัวบางส่วนถูกเผาไหม้ไป ขณะที่การเผาไหม้ในช่วงปลาย (ตั้งแต่เวลาที่ 40 ขึ้นไป) เป็นการเผาไหม้คาร์บอนคงตัวที่ยังคงเหลืออยู่



รูปที่ 4.3 มวลที่เหลืออยู่ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอั้งโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส

4.3.2 ปริมาณสารระเหยได้ที่เวลาต่างๆ

ปริมาณของสารระเหยได้ที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งด้วยเวลาต่างๆ ได้จากการทดลองแบบกะ ทั้งนี้ ในที่นี้นำเสนอเฉพาะผลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสที่เวลาต่างๆ เท่านั้น ดังรูปที่ 4.4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิอื่นๆ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน



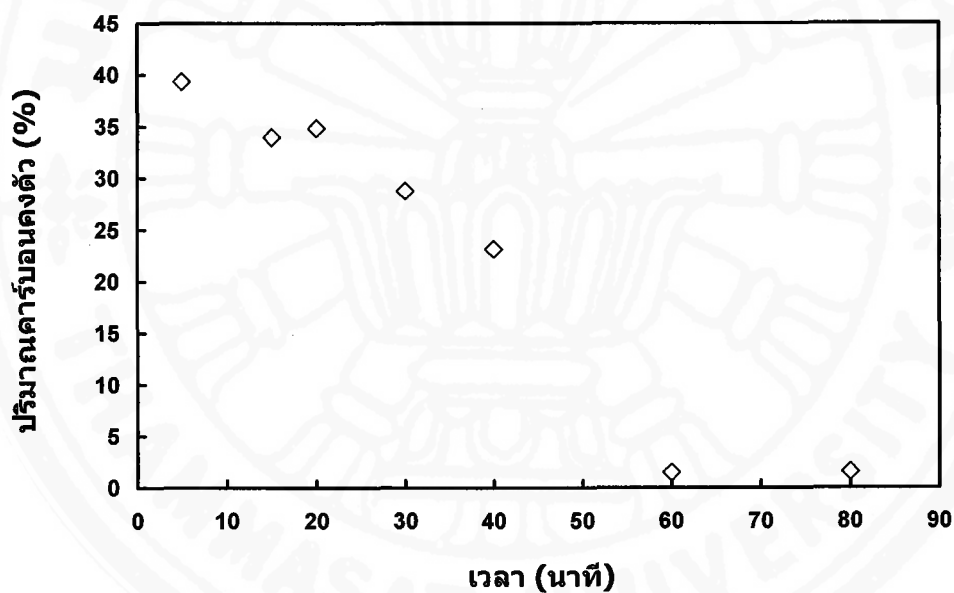
รูปที่ 4.4 ปริมาณของสารระเหยได้ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอั้งโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียส

ปริมาณของสารระเหยได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องมาจากส่วนที่เป็นสารระเหยได้นี้เป็นส่วนที่ระเหยออกจากถ่านหินอัดแท่งได้ง่ายที่สุด ดังนั้นเมื่อเวลาของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งมากขึ้น ปริมาณของสารระเหยได้ที่เหลืออยู่ในแท่งถ่านหินอัดแท่งจึงมีค่าลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.3 ซึ่งในช่วง 40 นาทีแรก ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำหนักของถ่านหินอัดแท่งลดลงอย่างรวดเร็ว ปริมาณสารระเหยได้ก็ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน และเมื่อผ่าน 40 นาทีไปแล้ว ปริมาณ

สารระเหยได้ลดลงน้อยมาก ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการเผาไหม้ส่วนที่เป็นสารระเหยได้ในถ่านหินอัดแท่ง น่าจะเกิดในช่วง 40 นาทีแรกของการเผาไหม้

4.3.3 ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เวลาต่างๆ

ปริมาณของคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งด้วยเวลาต่างๆ ได้จากการทดลองแบบกะ ทั้งนี้ ในที่นี้นำเสนอเฉพาะผลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสที่เวลาต่างๆ เท่านั้น ดังรูปที่ 4.5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิอื่นๆ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.5 ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอังโล่ ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียส

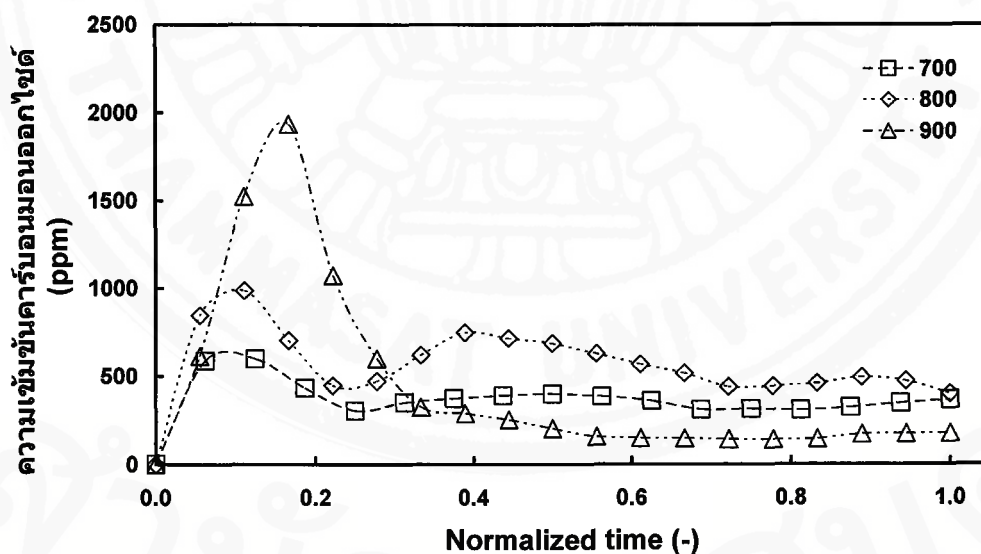
ปริมาณของคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.3 โดยในช่วง 40 นาทีแรก ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำหนักของถ่านหินอัดแท่งลดลงอย่างรวดเร็ว ปริมาณคาร์บอนคงตัวก็ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน เป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวลดลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อผ่าน 40 นาทีแรกของการเผาไหม้ไปแล้ว อาจเป็นไปได้ว่า ถ่านหินอัดแท่งถูกเผาไหม้จนหมด หรือเกือบหมด ในช่วงเวลาประมาณ 40 นาทีเท่านั้น

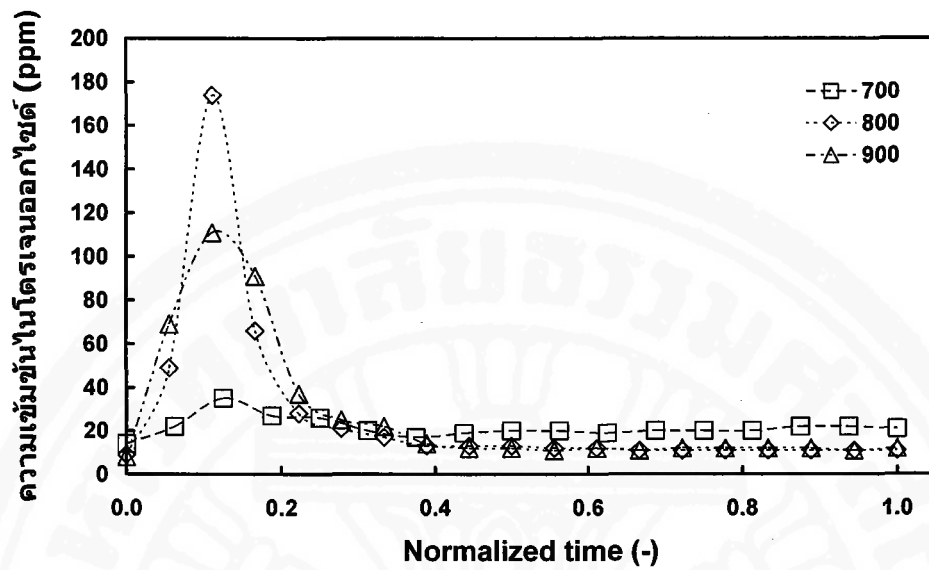
4.4 การปล่อยก๊าซมลพิษต่างๆ ระหว่างการเผาไหม้

ลักษณะการปล่อยก๊าซมลพิษ อันได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6, 4.7, และ 4.8 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องทำการ normalize เวลา เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ ได้

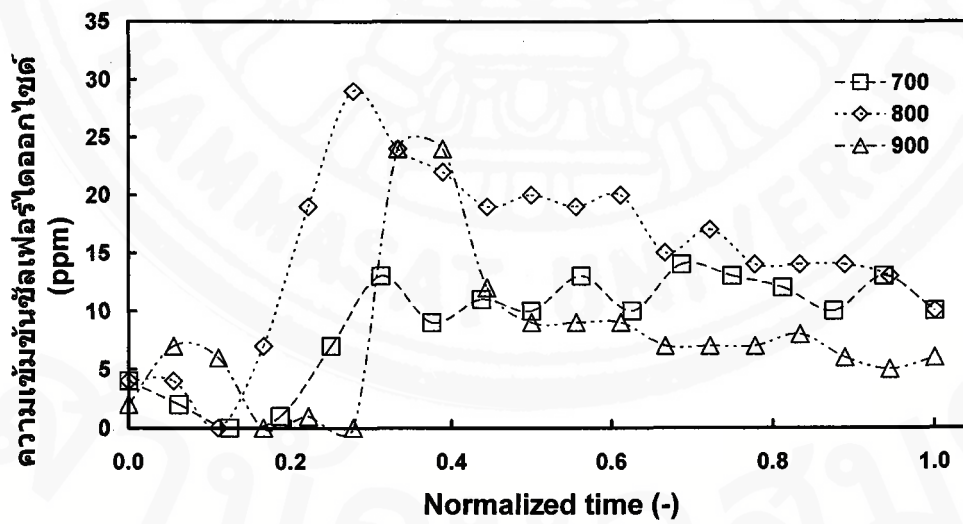
อนึ่ง การวิเคราะห์อย่างละเอียดของการปล่อยก๊าซมลพิษต่างๆ ระหว่างการเผาไหม้ ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 (หัวข้อที่ 5.5.2)



รูปที่ 4.6 การปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอั้งโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 การปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอังโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 การปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งในเตาอังโล่ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส

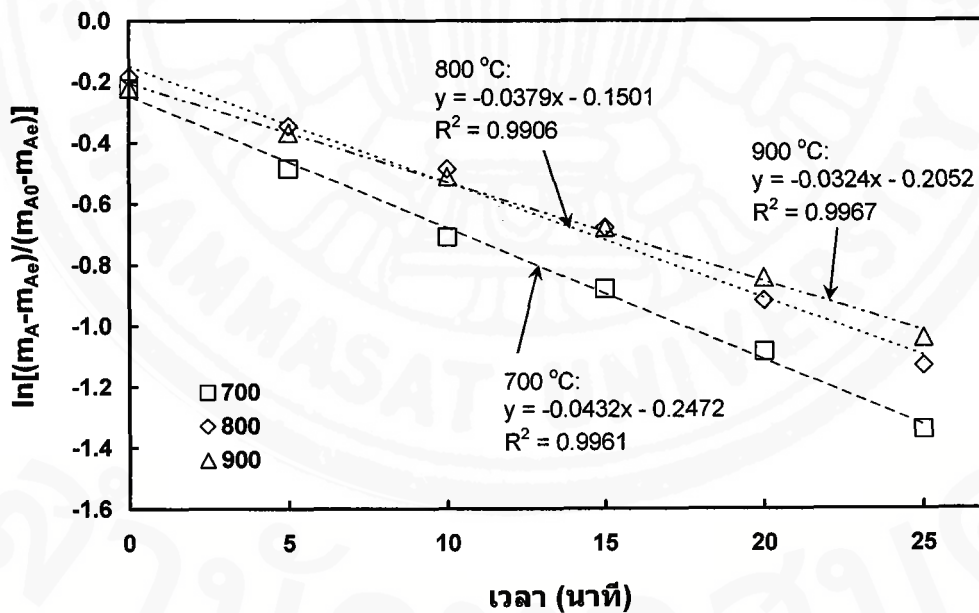
4.5 การวิเคราะห์หาอันดับ (order of reaction) และค่าคงที่อัตราเร็ว (rate constant, k)

เมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_e})}{(m_{A_0} - m_{A_e})} \right]$ กับ t ดังแสดงในรูปที่ 4.9 แล้วพิจารณา

ค่า R^2 ที่ได้ พบว่าค่า R^2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นดังนี้ ที่ 700 องศาเซลเซียส มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9961 ที่ 800 องศาเซลเซียส มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9906 และที่ 900 องศาเซลเซียส มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9967 ซึ่งค่า R^2 ที่ได้

ทั้งสามอุณหภูมิจميع่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_e})}{(m_{A_0} - m_{A_e})} \right]$ กับ t

ควรเป็นความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง ดังนั้นอันดับของปฏิกิริยาจึงควรเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order)



รูปที่ 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

ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟระหว่าง

$$\ln \left[\frac{(m_A - m_{A_c})}{(m_{A_0} - m_{A_c})} \right] \text{ กับ } t \text{ ซึ่งค่าคงที่อัตราเร็วที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ}$$

0.0432, 0.0379, และ 0.0324 นาที⁻¹ ตามลำดับ

ตามกฎของ Arrhenius ค่า k ต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลอง พบว่า ค่า k ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าค่า k ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าของค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ทั้ง 3 อุณหภูมิไม่แตกต่างกันมากนัก โดยรายละเอียดในเรื่องนี้ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 (หัวข้อที่ 5.2)

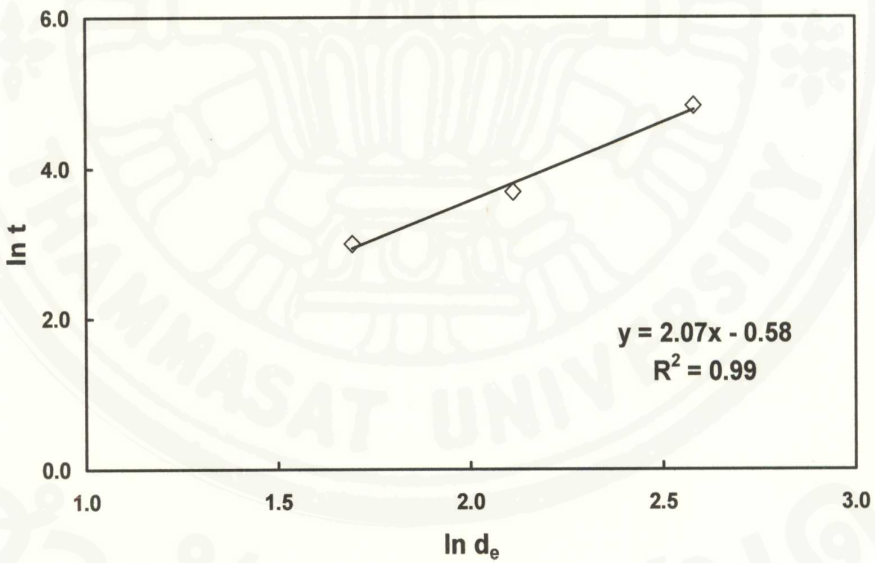
4.6 การศึกษากลไกที่ควบคุมปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่ง

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้กับขนาดของอนุภาคถ่านหิน (ตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.5.3) ซึ่งเป็นไปตาม power law ($t = kd_e^n$) เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\ln d_e$ กับ $\ln t$ (d_e คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของถ่านหินอัดแท่ง) สำหรับถ่านหินอัดแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง 12, 7.5, และ 5.5 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาเฉพาะที่อุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 2.07 (หรือประมาณ 2) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงว่า $t \propto d_e^2$ ดังนั้นสรุปได้ว่า กลไกที่ใช้ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาในที่นี้คือ การแพร่ของอากาศผ่านชั้นเถ้าเข้าไปทำปฏิกิริยากับเนื้อถ่านหินอัดแท่ง (Borman and Ragland, 1998)

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการเผาไหม้ของถ่านหินอัดแท่งเป็นไปตาม power law ($t \propto d_e^n$) โดยมีค่า n ประมาณ 2 ซึ่งแสดงว่า กลไกที่ใช้ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาในที่นี้คือ การแพร่ของอากาศผ่านชั้นเถ้าเข้าไปทำปฏิกิริยากับเนื้อถ่านหินอัดแท่ง หรือ diffusion control



รูปที่ 4.10 ถ่านหินอัดแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง 12, 7.5, และ 5.5 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln t$ กับ $\ln d_e$ ของการเผาไหม้ถ่านหินอัดแท่งที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 800 องศาเซลเซียส โดยถ่านหินอัดแท่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง 12, 7.5, และ 5.5 เซนติเมตร