บทที่ 5

วิจารณ์ สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 ผลการทดลองจากการวิเคราะห์แบบประมาณ

จากผลการทดลองหาสมบัติของถ่านหินจากแหล่งต่างๆ ในตารางที่ 4.1 พบว่าถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะ 1 มีปริมาณความชื้นมากที่สุด คือ 14.95% รองลงมาจะเป็นถ่านหินจากแหล่งกระบี่คือ 14.22% ความชื้นของถ่านหินจากแหล่งต่างๆมีค่าอยู่ในช่วง 2.7-14.95% โดยที่ถ่านหินที่มาจากแหล่งนาด้วงมีความชื้นต่ำที่สุด คือ 2.70% รองลงมาก็เป็นถ่านหินจากแหล่งหนองหญ้าปล้อง คือ 5.52% พบว่าถ่านหินที่มีความชื้นสูงเมื่อนำมาใช้งาน เมื่อถ่านหินถูกเผาไหม้จะสูญเสียความร้อนในการทำให้ความชื้นระเหยออกไปกับกาซชนิดอื่น นอกจากนั้นความชื้นยังทำให้ถ่านหินมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น สิ้นเปลืองค่าขนส่ง อย่างไรก็ตามความชื้นยังช่วยในการเผาไหม้ของถ่านหิน คือ เมื่อความชื้นระเหยออกไปทำให้ถ่านหินเกิดรูพรุนขึ้น อากาศสามารถแทรกผ่านเข้าไปได้ดีขึ้น

จากข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณเถ้าในตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าถ่านหินที่มีปริมาณเถ้ามากที่สุด คือ ถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะ 3 40.83% โดยปริมาณเถ้าจากถ่านหินแหล่งอื่นๆ จะอยู่ในช่วง 5.70-20.04% ถ่านหินจากแหล่งกระบี่มีปริมาณเถ้าน้อยที่สุด คือ 5.70% ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้ามากจะเกิดปัญหาในการใช้งาน เพราะในขณะเผาไหม้ถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับกาซออกซิเจน สารอนินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนรูปไปเป็นเถ้าซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะต่างๆ จะรวมตัวเป็นก้อน เรียกว่า กาก(slag) ทำให้เกิดปัญหาในเตาเผาได้ เถ้าจากถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 3 มีปริมาณสูงมาก อาจเนื่องมาจากมีเศษดินเศษหินปะปน

สำหรับปริมาณสารระเหยได้ จากตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าถ่านหินแหล่งนาด้วงมีปริมาณสารระเหยได้น้อยที่สุด คือ 7.36% นอกนั้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 28.66-44.03% ปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบของถ่านหินที่สลายตัวง่ายจะระเหยออกมาเมื่อได้รับความร้อน ถ่านหินที่มีปริมาณสารระเหยน้อยได้แก่แหล่งนาด้วง จัดเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด

ปริมาณคาร์บอนคงตัวนำมาใช้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของถ่านหินได้ ถ่านหินที่มีศักดิ์สูงจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงด้วย เพราะปริมาณความชื้นและสารระเหยต่ำ จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าคาร์บอนคงตัวของถ่านหินแหล่งนาด้วงมีค่าสูงสุด คือ 78.08% ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถ่านหินจากแหล่งนาด้วงเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด และรองลงมาคือถ่านหินแหล่งหนองหญ้าปล้อง

5.2 ผลการคำนวณหาศักดิ์ของถ่านหินจากผลการวิเคราะห์โดยประมาณและจากค่าความร้อน

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.2 สรุปได้ว่า ถ่านหินจากแหล่งนาด้วงมีศักดิ์สูงที่สุด จัดได้เป็นชนิดเซมิแอนทราไซต์ รองลงมาคือถ่านหินจากแหล่งหนองหญ้าปล้อง ซึ่งจัดเป็นชนิดบิทูมินัส ซี ที่มีปริมาณสารระเหยได้สูง สำหรับถ่านหินจากแหล่งอื่นๆ ได้แก่ บ้านป่าคา บ้านปูบางปูดำ กระบี่ แม่เมาะ1 แม่เมาะ2 แม่เมาะ3 และแม่เมาะSPนั้น มีศักดิ์ใกล้เคียงกัน จัดเป็นชนิดซับบิทูมินัส

5.3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณตาม ASTM D 3173-3175 เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน

การวิเคราะห์แบบประมาณ เป็นวิธีประเมินคุณสมบัติขั้นต้นของตัวอย่างถ่านหิน และสามารถใช้ประมาณศักดิ์ของถ่านหินได้ โดยการทดลองตามวิธีมาตรฐาน ASTM นั้น นอกจากจะใช้เวลานานในการทดลองแล้วยังต้องใช้ตัวอย่างถ่านหินที่มีปริมาณมาก และต้องใช้ตัวอย่างถ่านหินแยกกันสำหรับการวิเคราะห์แต่ละรายการ ซึ่งเป็นการยุ่งยาก จึงได้มีการนำเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนมาทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณขึ้น ดังที่พัชรี ชุติศิลป์และสมบูรณ์ จงดีไพศาล(28) เสนอไว้ ซึ่งได้นำสภาวะนั้นมาทำการทดลองวิเคราะห์แบบประมาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน เปรียบเทียบผลกับการวิเคราะห์แบบประมาณตามวิธี ASTM ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

เห็นได้ว่าผลเปรียบเทียบระหว่างการทดลองสองแบบยังมีความแตกต่างกันอยู่ ดังจะพิจารณาตามศักดิ์ของถ่านหินแหล่งต่างๆ ได้แก่

เซมิแอนทราไซต์ ค่าร้อยละของความแตกต่างความชื้น = 0.87
ค่าร้อยละของความแตกต่างเถ้า = 0.30
ค่าร้อยละของความแตกต่างสารระเหยได้ = 2.55

บิทูมินัส ซี สารระเหยได้สูง ค่าร้อยละของความแตกต่างความชื้น = 0.11
ค่าร้อยละของความแตกต่างเถ้า = 0.15
ค่าร้อยละของความแตกต่างสารระเหยได้ = 0.12

ซับบิทูมินัส เอ ค่าร้อยละของความแตกต่างความชื้น = 0.34
ค่าร้อยละของความแตกต่างเถ้า = 0.55
ค่าร้อยละของความแตกต่างสารระเหยได้ = 3.78

ซับบิทูมินัส บี ค่าร้อยละของความแตกต่างความชื้น อยู่ในช่วง 0.05-3.00
ค่าร้อยละของความแตกต่างเถ้า อยู่ในช่วง 0.06-0.39
ค่าร้อยละของความแตกต่างสารระเหยได้ อยู่ในช่วง 0.10-3.00

ซับบิทูมินัส ซี ค่าร้อยละของความแตกต่างความชื้น อยู่ในช่วง 0.36-0.97
ค่าร้อยละของความแตกต่างเถ้า อยู่ในช่วง 0.16-0.89
ค่าร้อยละของความแตกต่างสารระเหยได้ อยู่ในช่วง 2.57-7.02

เมื่อนำค่าความแตกต่างที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่สามารถยอมรับได้ของการทำใหม่ (Reproducibility) ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานอเมริกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่า

ตารางที่ 5.1 ช่วงที่สามารถยอมรับได้ของมาตรฐานอเมริกัน(ASTM) (36-39)

| | Repeatability (%abs) | Reproducibility (%abs) |
|---|---|---|
| Moisture | | |
| < 5% | > 0.2 | > 0.3 |
| > 5% | > 0.3 | > 0.5 |
| Ash | | |
| no carbonate present | 0.2 | 0.3 |
| carbonate present | 0.3 | 0.5 |
| >12% ash containing 0.5% carbonate and pyrytes | 0.5 | 1.0 |
| Volatile | | |
| high temp. coke | 0.2 | 0.4 |
| anthracite | 0.3 | 0.6 |
| semi-anthracite, bituminous, low temp. coke,char | 0.5 | 1.0 |
| subbituminous | 0.7 | 1.4 |
| lignite, peat | 1.0 | 2.0 |

ถ่านหินศักดิ์เซมิแอนทราไซต์ ผลการทดลองที่ยอมรับได้ คือ เถ้า
บิทูมินัส ซี สารระเหยได้สูง ผลการทดลองที่ยอมรับได้ คือ ความชื้น เถ้า และสารระเหย
ซับบิทูมินัส เอ ผลการทดลองที่ยอมรับได้ คือ ความชื้น และเถ้า
ซับบิทูมินัส บี ผลการทดลองที่ยอมรับได้ คือ ความชื้น (ยกเว้นแหล่งกระบี่) และเถ้า
ซับบิทูมินัส ซี ผลการทดลองที่ยอมรับได้ คือ เถ้า

เห็นได้ว่า คุณสมบัติที่ยอมรับได้ที่ทุกแหล่งมีเหมือนกัน คือ เถ้า ส่วนสารระเหยนั้นมีเพียงบิทูมินัส ซี สารระเหยได้สูงเท่านั้นที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นอกนั้นจะมีค่าแตกต่างกันมากเกินกว่าจะยอมรับได้ แต่ทั้งนี้ แต่ละการทดลองได้มีการทำซ้ำและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของการทำซ้ำ ดังนั้น ความแตกต่างที่ได้ อาจอธิบายได้ดังต่อไปนี้

การหาความชื้น - การทำการทดลองตามมาตรฐานอเมริกัน(ASTM) สามารถทำการทดลองได้หลายตัวอย่างภายในหนึ่งวัน ถ้ามีอุปกรณ์เพียงพอ แต่ การทดลองโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนนั้นสามารถทำได้เพียงสามครั้งในหนึ่งวันเป็นอย่างมากเพราะต้องใช้เวลาในการรอให้เตาเผาลดอุณหภูมิลงจนเท่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้น ค่าความชื้นที่ได้อาจมีความแตกต่างกันเพราะทำการทดลองต่างวัน นอกจากนั้น การใช้เวลาหลายวันในการทดลองอาจทำให้ตัวอย่างถ่านหินมีการเปลี่ยนแปลงในแง่ความชื้นและสารระเหยได้ ถึงแม้จะเก็บไว้ในเดสิเคเตอร์แล้วก็ตาม ทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้เปลี่ยนไป

การหาสารระเหยได้ - การทดลองโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนนั้น เป็นการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในสภาวะกาซเฉื่อยคือไนโตรเจนไหลผ่านตัวอย่างตลอดเวลาเป็นสภาวะที่ควบคุมได้แน่นอน ส่วนการทดลองตามมาตรฐานอเมริกันนั้น เป็นการให้ความร้อนตัวอย่างอยู่ในครูซิเบิ้ลที่ปิดผา ภายในครูซิเบิ้ลเป็นบรรยากาศของไอของสารระเหยเท่านั้น ไอสารระเหยจะหนีออกกครูซิเบิ้ลผ่านช่องว่างระหว่างฝากับตัวครูซิเบิ้ลซึ่งเป็นสภาวะที่ควบคุมได้ไม่แน่นอน แต่ต้องอาศัยการสังเกตและความชำนาญเป็นอย่างมาก ค่าที่ได้จึงแตกต่างกันได้มาก

การหาคาร์บอนคงตัว - หาได้จากการหักลบกันของค่าต่างๆที่ได้ข้างต้น ดังนั้นค่าจะแตกต่างกันไปด้วย แต่สำหรับการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนนั้นสามารถหาค่าจากกราฟได้ด้วยโดยตรง

การคำนวณหาการสูญเสียน้ำหนักจากกราฟ - ได้จากการลากเส้นจากกราฟ TG ที่มีการสูญเสียน้ำหนักคงที่ในแต่ละช่วง มาตั้งฉากกับแกนการสูญเสียน้ำหนัก โดยจุดที่มีการสูญเสียจนน้ำหนักคงที่ที่ลากเส้นมานั้นบางจุดไม่เด่นชัดพอ นอกจากนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากความ

หนาของเส้นกราฟด้วย ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนได้ประมาณ 1%

อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการทดลองของการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนนั้นเป็นข้อที่น่าสนใจ อีกทั้งยังสามารถทำการทดลองได้ง่ายขึ้น และควบคุมให้เกิดสภาวะที่ต้องการได้แน่นอน นอกจากนั้นผลที่แสดงออกมาเป็นกราฟยังเป็นส่วนดีที่จะเก็บเป็นผลการทดลองที่ถาวรและสามารถตรวจสอบได้อีกด้วย

5.4 ผลการวิเคราะห์การแตกร่วนของถ่านหิน

สำหรับเปอร์เซนต์การแตกร่วนของถ่านหิน คือ ค่าที่แสดงการลดขนาดเฉลี่ยของถ่านหินตัวอย่างระหว่างการทดลอง (การคำนวณ ภาคผนวก ค.4) ส่วนค่าดัชนีฝุ่นนั้นเป็นค่าที่ได้จากเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของถ่านหินตัวอย่างที่ผ่านรูตะแกรงร่อนอันสุดท้าย ขนาดเบอร์ 50 ซึ่งก็คือค่าที่แสดงว่าถ่านหินแต่ละแหล่งนั้นสามารถแตกเป็นผงได้มากหรือน้อยต่างกันอย่างไร

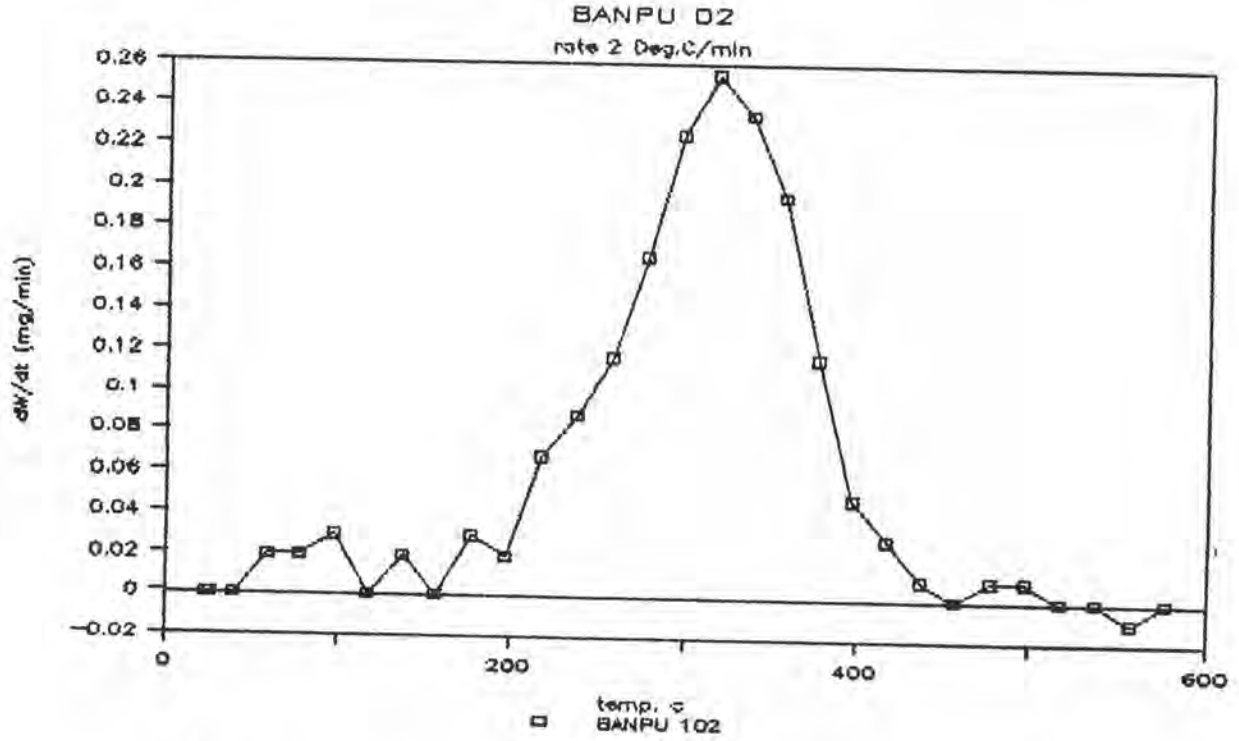
ผลการทดลองของแหล่งต่างๆที่ได้นั้น จากตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่าแหล่งแม่เมาะ SP มีเปอร์เซนต์การแตกร่วนมากที่สุด รองลงมาคือบางปูดำ บ้านป่าคา กระบี่ หนองหญ้าปล้อง และบ้านปู ตามลำดับ ส่วนค่าดัชนีฝุ่น แหล่งหนองหญ้าปล้อง บ้านป่าคา บางปูดำ และแม่เมาะ SP มีค่าใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 9.5-11.0 ส่วนแหล่งบ้านปูและกระบี่นั้นมีค่าต่ำกว่า คือ 3.5 และ 5.0 แสดงว่า แหล่งแม่เมาะ SP นั้นสามารถแตกร่วนได้ง่ายในระหว่างการขนส่ง อีกทั้งยังแตกเป็นผงได้มาก ซึ่งมีปัญหาในด้านการสูญเสียปริมาณถ่านหินและทำให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะได้เนื่องจากการฟุ้งกระจายของผงถ่านหิน ส่วนแหล่งบางปูดำ บ้านป่าคา กระบี่ หนองหญ้าปล้องทนต่อการขนส่งได้ดีกว่า แตกร่วนได้น้อยกว่า แต่ยังกลายเป็นผงได้มาก ยกเว้นแหล่งกระบี่ที่มีค่าดัชนีฝุ่นลดลงถึงครึ่งหนึ่งของแหล่งที่กล่าวข้างต้น ส่วนแหล่งบ้านปูนั้น สามารถทนต่อการกระแทกระหว่างการขนส่งได้ดีที่สุดอีกทั้งยังแตกร่วนเป็นผงได้น้อยอีกด้วย

สำหรับการเปรียบเทียบตามศักดิ์ของถ่านหินนั้น ในการทดลองใช้ถ่านหิน 4 ศักดิ์ด้วยกัน โดยศักดิ์ซับบิทูมินัสมี 3 แหล่ง คือ บ้านปู บางปูดำ และกระบี่ เห็นได้ว่าค่าที่ได้ยังเป็นช่วงที่กว้างไม่สามารถทำการสรุปได้ แต่ถ้าพิจารณาระหว่างศักดิ์ต่างๆ อาจสรุปเป็นว่าการแตกร่วนจะเพิ่มขึ้นเมื่อศักดิ์ของถ่านหินลดลง แต่พบว่า การแตกร่วนจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มศักดิ์ของถ่านหิน โดยถ่านหินลิกไนต์เกิดการแตกร่วนน้อยที่สุด ทั้งนี้ผลสรุปที่ได้เกิดจากทำการทดลอง 235 ครั้ง กับถ่านหินศักดิ์ต่างๆ และยังพบว่าถ่านหินศักดิ์เดียวกันยังมีค่าการแตกร่วนได้กว้างมาก เช่นถ่านหินบิทูมินัสที่มีสารระเหยสูง มีค่าการแตกร่วนของถ่านหิน ตั้งแต่ 17% จนสูงถึง 60% (19)

ดังนั้นผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาพิจารณาคุณสมบัติของถ่านหินแต่ละแหล่งได้ แต่ยังไม่สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์กับแหล่งถ่านหิน เนื่องจากค่าการแตกร่วนในแต่ละศักดิ์มีได้เป็นช่วงกว้าง ส่วนค่าที่ได้จากการทดลองมีเพียง 6 ค่าเท่านั้น

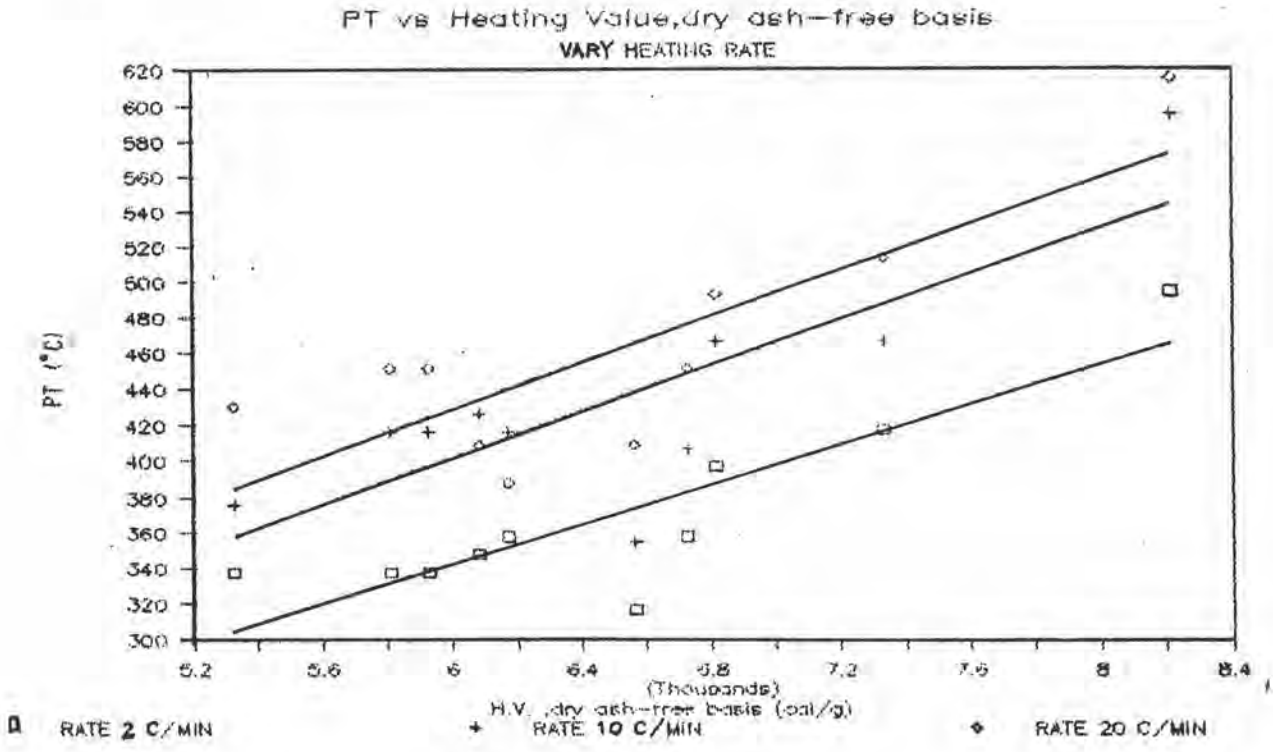
## 5.5 ผลการวิเคราะห์ Burning Profile

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ Burning Profile มีหลายประการ เช่น ค่าความร้อน ศักดิ์ของถ่านหิน อัตราการให้ความร้อนแก่ถ่านหิน เป็นต้น เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองโดยการเก็บข้อมูลน้ำหนักที่หายไปของถ่านหินและอุณหภูมิ ในช่วงเวลาต่างๆ จากนั้นจึงนำมาสร้างกราฟระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิ ดังนั้นกราฟ Burning Profile ที่ได้จึงมีแต่พีคที่เกิดจากการสูญเสียน้ำหนักเพียงอย่างเดียว พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกัน คือ เกิดพีค 2 พีค ดังตัวอย่างกราฟที่แสดงในรูปที่ 5.1 สังเกตได้ว่าพีคที่ 1 เกิดที่อุณหภูมิประมาณ 100 - 150 องศาเซลเซียส เป็นพีคที่เกิดจากการระเหยของน้ำในถ่านหิน ส่วนพีคที่ 2 เป็นพีคที่ถ่านหินมีอัตราการเผาไหม้สูงที่สุดมีค่าอยู่ในช่วง 317 - 635 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายของการเผาไหม้มีค่าอยู่ในช่วง 455 - 1031 องศาเซลเซียส




รูปที่ 5.1 Burning Profile ของแหล่งบ้านปูครั้งที่ 1
อัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

เมื่อพิจารณากราฟระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิ (Burning Profile) ของการทดลองการเผาไหม้ของถ่านหินแหล่งเดียวกัน ที่อุณหภูมิสุดท้ายเดียวกัน เมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิที่ถ่านหินมีอัตราเผาไหม้สูงสุดจะเพิ่มขึ้น และอัตราเผาไหม้สูงสุดเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสลายขององค์ประกอบของถ่านหินอย่างรวดเร็ว อัตราการเผาไหม้สูงสุดจึงเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ตัวอย่างแหล่งบ้านปูครั้งที่ 1 พบว่า ที่อัตราการให้ความร้อน 2, 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดเป็น 317, 355 และ 388 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และอัตราการเผาไหม้สูงสุดคือ 0.25, 0.78 และ 0.93 มิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างถ่ายหินทั้ง 10 แหล่ง ที่ค่าความร้อนต่าง ๆ กัน กับอุณหภูมิที่มีอัตราการเผาไหม้สูงสุดที่อัตราการให้ความร้อน 2, 10 และ 20 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.2 พบว่าที่อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น อุณหภูมิที่ถ่านหินมีอัตราการเผาไหม้สูงสุดจะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน




รูปที่ 5.2 อุณหภูมิที่ถ่านหินมีอัตราการเผาไหม้สูงสุด (PT) ของถ่านหินแต่ละแหล่งเทียบกับค่าความร้อน (ตัวอย่างแห้งไม่รวมเถ้า) ที่อัตราการให้ความร้อน 2, 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

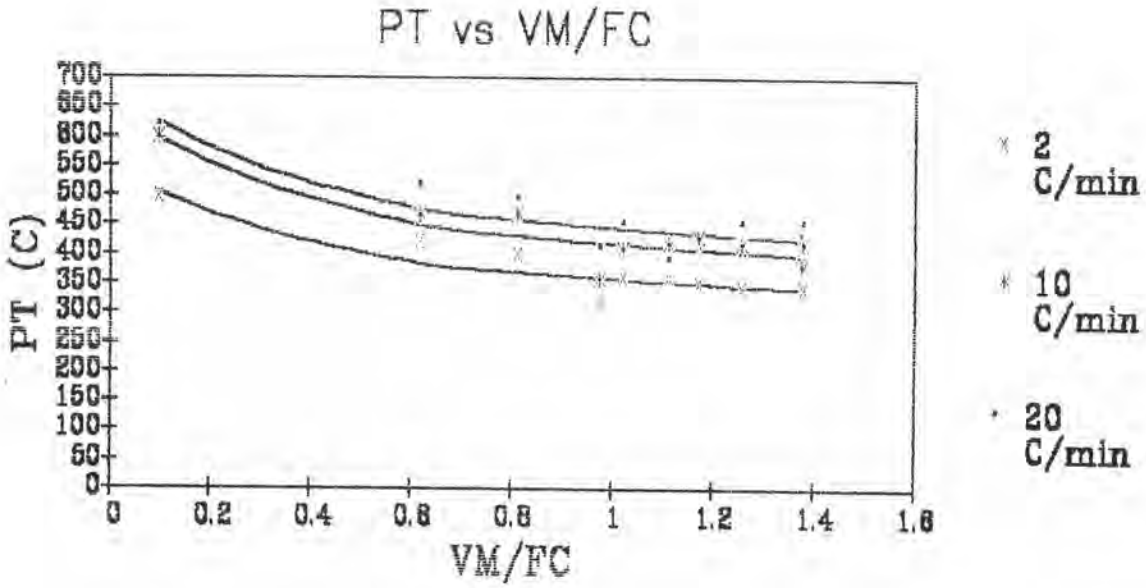
จากรูป 5.2 เช่นเดียวกันพบว่า เมื่อค่าความร้อนของถ่านหินเพิ่มขึ้นจาก 2798 แคลอรีต่อกรัม (แหล่งแม่เมาะ 3) เป็น 7018 แคลอรี/กรัม (แหล่งนาด้วง) มีผลให้ อุณหภูมิที่ถ่านหินมีอัตราการเผาไหม้สูงสุด (Peak Temperature) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับอัตราการเผาไหม้สูงสุดและอุณหภูมิสุดท้ายของการเผาไหม้ ดังนั้นแสดงว่า ถ่านหินที่มีค่าความร้อนต่ำจะมีความว่องไวในการเผาไหม้มากกว่าถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูง

ทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงศักดิ์ของถ่านหิน กับอุณหภูมิที่ถ่านหินมีอัตราการเผาไหม้สูงสุด ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการเผาไหม้ พบว่า

อุณหภูมิของถ่านหินศักดิ์เซมิแอนทราไซต์ (นาด้วง) มีค่า 494 - 635 องศาเซลเซียส
บิทูมินัส ซี สารระเหยสูง (หนองหญ้าปล้อง) มีค่า 417 - 513 องศาเซลเซียส
ซับบิทูมินัส เอ (บ้านป่าคา) มีค่า 397 - 513 องศาเซลเซียส
ซับบิทูมินัส บี (บ้านปู บางปูดำ กระบี่) มีค่าอยู่ในช่วง 317 - 472 องศาเซลเซียส
ซับบิทูมินัส ซี (แม่เมาะ 1 2 3 SP) มีค่าอยู่ในช่วง 338 - 472 องศาเซลเซียส

พบว่า เมื่อถ่านหินมีศักดิ์สูงขึ้น อุณหภูมิสูงสุดในการเผาไหม้จะสูงขึ้นด้วย เช่นเดียวกันกับ Morgan (14) และ Cumming (20) แสดงว่า ถ่านหินที่มีศักดิ์ต่ำจะสามารถเผาไหม้ได้ง่ายกว่าถ่านหินที่มีศักดิ์สูง

และเมื่อนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณ ซึ่งได้แก่ ปริมาณสารระเหยได้ต่อคาร์บอนคงตัว (VM/FC) มาสร้างความสัมพันธ์กับ Burning Profile ดังแสดงในรูปที่ 5.3



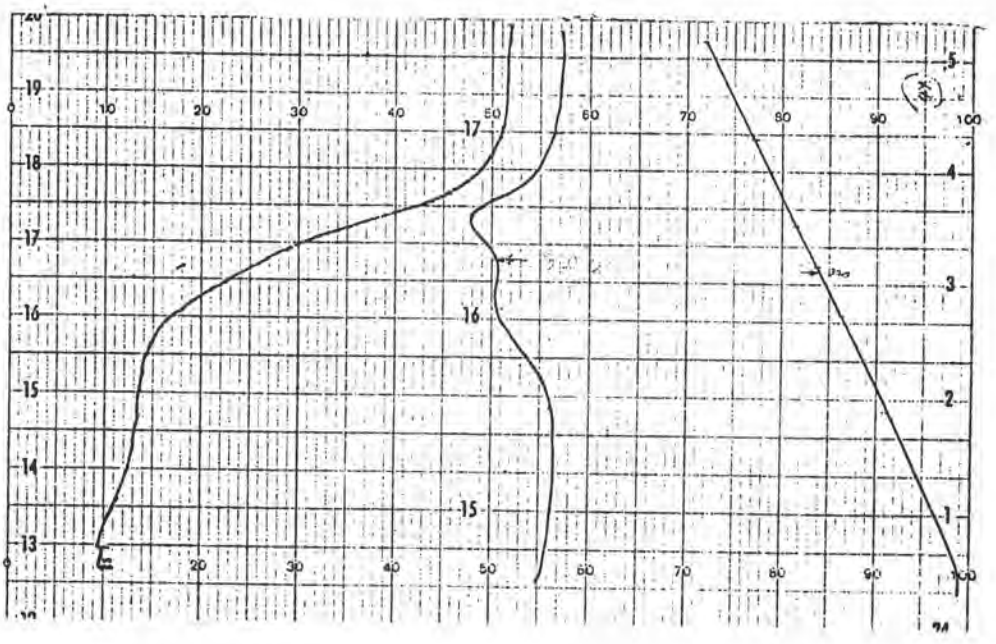

รูปที่ 5.3 PT กับ VM/FC ของถ่านหินแหล่งต่างๆ ที่อัตราการให้ความร้อนต่างกัน

พบว่า ได้ผลเช่นเดียวกับการทดลอง Ghetti (29) เมื่อ VM/FC เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ถ่านหินมีอัตราการเผาไหม้สูงสุดจะลดลง แสดงว่า ถ่านหินมีค่า VM/FC สูง (มีศักดิ์ต่ำ) จะมีความว่องไวในการเผาไหม้มากกว่าถ่านหินที่มีค่า VM/FC ต่ำ (มีศักดิ์สูง)

## 5.6 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยทางน้ำหนัก

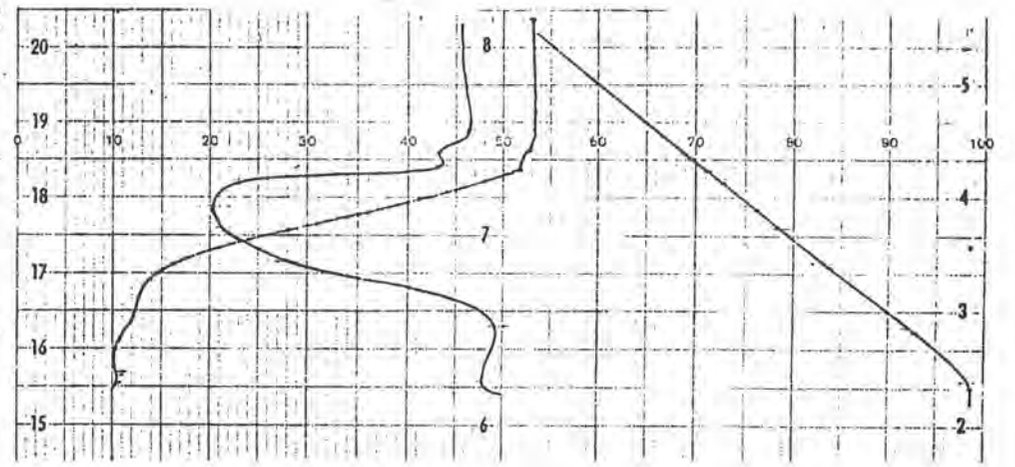
ในการเผาไหม้ของถ่านหินจะมีลักษณะการเผาไหม้แบ่งเป็น 2 ช่วงใหญ่ๆ คือ เริ่มจากการระเหยและเผาไหม้ของสารระเหยได้ จากนั้นคาร์บอนคงตัวจะเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศต่อไปจนหมด ซึ่งแต่ละช่วงของการเผาไหม้นี้จะให้ค่าพลังงานกระตุ้นต่างกัน

งานวิจัยนี้ ทำการหาค่า $E_m$ โดยสร้างกราฟระหว่าง log k กับ $1/T_{max}$ จะได้ค่าพลังงานกระตุ้นเป็นช่วง ๆ นำมาเฉลี่ยทางน้ำหนักแล้วรวมกันเป็นค่า $E_m$ โดยอาศัยการแบ่งช่วงอุณหภูมิจากการดูพีคของ DTA (อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) ที่เกิดขึ้นในโครมาโตรแกรมที่ได้จากการทดลอง(ภาคผนวก จ.) โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ คือ อุณหภูมิที่พีคตัดกัน ซึ่งก็คือ อุณหภูมิระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยา ได้แก่ปฏิกิริยาที่สารระเหยได้ออกมาทำปฏิกิริยากับอากาศ ซึ่งเกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และปฏิกิริยาที่ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับชาร์ ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.4 เห็นได้ว่าเกิดพีคขึ้น 2 พีค ซึ่งอ่านค่าอุณหภูมิในจุดที่เปลี่ยนพีคได้ 320 องศาเซลเซียส นำไปแบ่งช่วงอุณหภูมิในการหาค่าพลังงานกระตุ้นต่อไปได้เป็น 2 ค่า



รูปที่ 5.4 โครมาโตรแกรมของแหล่งกระบี่ครั้งที่ 1 อัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

แต่ในอัตราการให้ความร้อนที่เปลี่ยนไป จะมีผลต่อโตรมาโตรแกรม และค่าพลังงานกระตุ้น ดังรูปที่ 5.5




รูปที่ 5.5 โครมาโตรแกรมของแหล่งกระบี่ครั้งที่ 1 อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ซึ่งจะเห็นได้ว่า พีคที่ได้จะเห็นพีคใหญ่พีคเดียว ซึ่งก็หมายถึงว่า การเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดต่อเนื่องกันไป ไม่สามารถแยกได้ชัดเจน ดังนั้น อุณหภูมิที่จะนำมาแบ่งช่วงของค่าพลังงานกระตุ้นจึงไม่มี จะได้ค่าพลังงานกระตุ้นเพียงค่าเดียว

เห็นได้ว่า ค่าพลังงานกระตุ้นที่ทำการวิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ มีเพียวค่าเดียวหรือ 2 ค่า เท่านั้น ในแต่ละตัวอย่างถ่านหินซึ่งไม่ตรงกับที่ Smith และคณะ (13) ได้เสนอไว้คือ มี 4 ค่าด้วยกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะช่วงแรกและช่วงที่สองคือการระเหยของสารระเหยได้ออกมาอย่างต่อเนื่องกัน จึงได้เป็นช่วงเดียว ส่วนช่วงที่สามเป็นช่วงต่อของกระบวนการอาจเห็นได้ไม่ชัดเจน ส่วนช่วงที่สี่ เป็นการแพร่ของออกซิเจนในอากาศไปเผาไหม้กับชาร์ จึงเห็นเป็นช่วงที่สองในการทดลอง หรือเมื่อในการทดลองเห็นได้แค่ช่วงเดียว ก็คือการเกิดปฏิกิริยาเกิดอย่างต่อเนื่องกัน

และพบว่า ที่อัตราการให้ความร้อนเดียวกัน ถ่านหินบางตัวอย่างจะมีค่าพลังงาน-กระตุ้น 2 ช่วง บางตัวอย่างมีช่วงเดียวขึ้นกับ ปริมาณสารระเหยได้ในถ่านหินนั้น ๆ โดยอธิบายได้ดังนี้

สำหรับถ่านหินที่มีปริมาณสารระเหยได้สูง เมื่อได้รับอัตราการให้ความร้อนต่ำ ปริมาณสารระเหยได้จะค่อยๆ ระเหยออกมาและถูกเผาไหม้ไปเรื่อยๆ ระหว่างนั้นออกซิเจนจะแพร่เข้า

ไปทำปฏิกิริยากับชาร์ได้น้อย เนื่องจากมีไอของสารระเหยอยู่รอบๆอนุภาคของถ่านหินตลอดเวลา เมื่อสารระเหยได้ออกมาหมดออกซิเจนจึงสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับชาร์ได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นจึงได้ค่าพลังงานกระตุ้น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นค่าที่ได้จากการเผาไหม้ของสารระเหยได้ เมื่อสารระเหยหมดไปจึงเกิดการเผาไหม้ชาร์(Char) เป็นช่วงที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 4.21, 4.23 ถึง 4.29 ในกรณีที่ได้รับอัตราการให้ความร้อนสูงขึ้นสารระเหยจะระเหยออกมาและถูกเผาไหม้อย่างรวดเร็วมีผลให้เกิดมวลกาซที่มีความปั่นป่วนสูงที่ผิวของอนุภาคถ่านหิน นั่นคือ ออกซิเจนมีโอกาสเข้าไปสู่ผิวของถ่านหินได้มากกว่ากรณีที่ให้ความร้อนอย่างช้า ๆ ดังนั้นจึงเกิดการเผาไหม้ของสารระเหยได้ในวัฏภาคของกาซไปพร้อมๆ กับการเผาไหม้ของชาร์ ทำให้ไม่สามารถแยกช่วงกราฟออกเป็น 2 ช่วงได้อย่างชัดเจน ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้ในอัตราการให้ความร้อนสูงได้แก่ 10, 20 องศาเซลเซียสจึงมีเพียงค่าเดียว แสดงในรูปที่ 4.21, 4.23 ถึง 4.29 เช่นกัน

สำหรับถ่านหินที่มีปริมาณสารระเหยได้ต่ำ คือ แหล่งถ่านหินนาด้วง ซึ่งมีปริมาณสารระเหยได้เพียง 2.70% พบว่ากราฟ Arrhenius ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำมีเพียงช่วงเดียว แต่ที่อัตราการให้ความร้อนสูงได้กราฟ 2 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เป็นไปได้ว่า ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำอนุภาคถ่านหินได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง ทำให้สารระเหยระเหยออกมาได้ในเวลาใกล้เคียงกันและเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ จึงไม่สามารถแยกกราฟออกเป็น 2 ช่วงได้ แต่ที่อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น ถ่านหินได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงกันทำให้สารระเหยใช้เวลาระเหยนานกว่าและอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า สำหรับถ่านหินที่มีปริมาณสารระเหยสูง(28 % ขึ้นไป) ไม่มีอิทธิพลจากการได้รับความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอดังกล่าวเนื่องจากมีสารระเหยออกมาในปริมาณมากตั้งแต่เริ่มได้รับความร้อนจึงสามารถแยกกราฟออกเป็น 2 ช่วงได้

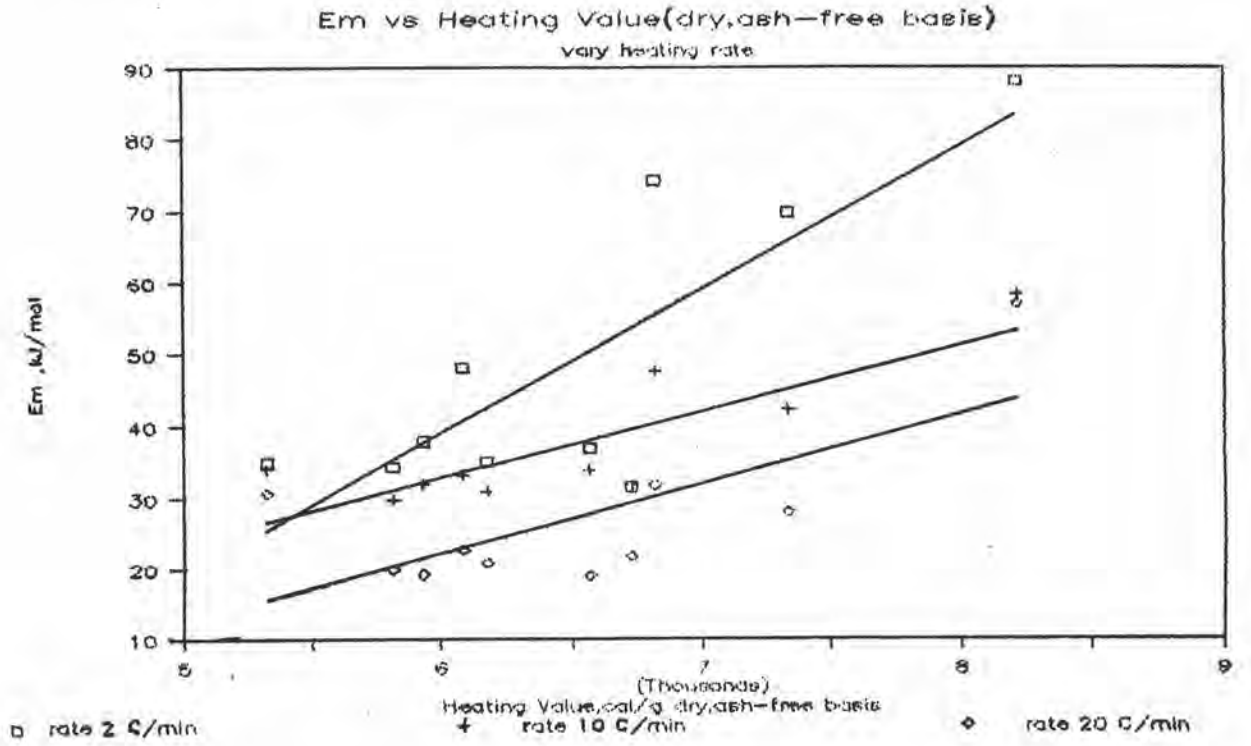
ถ่านหินแหล่งบ้านป่าคา มีลักษณะกราฟแตกต่างจากถ่านหินแหล่งอื่นๆโดยสามารถแบ่งช่วงของกราฟออกเป็น 2 ช่วงได้ทุกอัตราการให้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยยิ่งอัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น ช่วงที่แบ่งจะชัดเจนยิ่งขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นความแตกต่างระดับโครงสร้างของโมเลกุลของถ่านหินแหล่งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณา C/H, (C+H)/O และ VM/FC แล้วไม่มีค่าใดที่แตกต่างไปจากแหล่งอื่น

ลักษณะของกราฟระหว่าง log(k) กับ 1/Tabs ของถ่านหินตัวอย่าง เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากๆ ค่าของ log(k) จะลดลง ซึ่งจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน ลักษณะเช่นนี้ อาจเนื่องมาจากลักษณะของถ่านหินว่าเผาไหม้ได้ดีเพียงใด อีกทั้งครูซิเบิ้ลที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อลักษณะการเผาไหม้ เนื่องจากรูปทรงของครูซิเบิ้ลเป็นทรงกระบอก เมื่อได้รับความร้อน ส่วนชาร์ที่อยู่ส่วนบนของครูซิเบิ้ลก็จะสามารถสัมผัสกับออกซิเจนและเกิดปฏิกิริยาได้ก่อนส่วนล่าง ดังนั้น การเผาไหม้ช่วงแรกอัตราการลดลงของน้ำหนักจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อชาร์ส่วนบนถูก

เผาไหม้เกิดเป็นเถ้ามากขึ้นจะเป็นอุปสรรคทำให้ออกซิเจนแพร่เข้ามาทำปฏิกิริยากับชาร์ที่เหลือได้ยากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเกิดช้าลง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึง 4.29 ยิ่งถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าเป็นจำนวนมาก เช่น แม่เมาะ3 หรือมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมาก เช่น นาด้วง เห็นได้ว่าเส้นกราฟจะตกลงมามาก แต่ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงการเผาไหม้จะเกิดได้ดีขึ้น อัตราการลดลงของน้ำหนักที่ลดลงในตอนท้ายๆจึงมีน้อยกว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ

จากลักษณะที่กล่าวมานี้เอง ทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยทางน้ำหนักที่คำนวณได้ ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ คือ

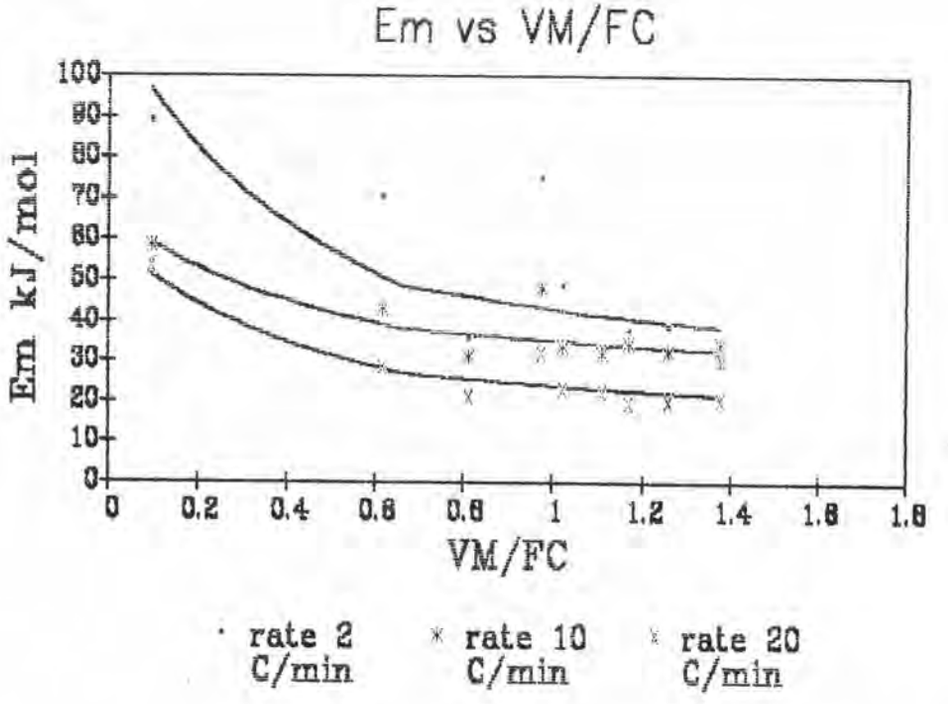
เมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 2 เป็น 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังในตารางที่ 4.6 ตัวอย่างแหล่งบ้านปู ครั้งที่ 2 พบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยทางน้ำหนักมีค่าลดลงจาก 43.31 เป็น 34.93 และ 19.40 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินทั้ง 10 แหล่ง ที่ค่าความร้อนต่าง ๆ กัน กับค่าพลังงานกระตุ้นที่อัตราการให้ความร้อน 2, 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังแสดงในรูป 5.6 พบว่าที่อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้นค่า $E_m$ จะลดลงเช่นกัน




รูปที่ 5.6 $E_m$ กับค่าความร้อน (ตัวอย่างแห้ง ไม่รวมเถ้า) ของถ่านหินแหล่งต่าง ๆ ที่อัตราการให้ความร้อน 2, 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

จากรูปที่ 5.6 พบว่าเมื่อค่าความร้อนของถ่านหินเพิ่มขึ้นจาก 2798 เป็น 7018 แคลอรีต่อกรัม ค่า $E_m$ เพิ่มขึ้น แสดงว่า ถ่านหินที่มีค่าความร้อนต่ำจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงจะมีคาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งการเผาไหม้คาร์บอนคงตัวนี้จะต้องใช้ค่าพลังงานกระตุ้นมากในการเผาไหม้

ดังนั้นได้นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ ได้แก่ VM/FC มาสร้างความสัมพันธ์กับ $E_m$ เช่นกัน ดังรูปที่ 5.7 พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับกราฟ VM/FC คือ VM/FC เพิ่ม ค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยทางน้ำหนักจะลดลง




รูปที่ 5.7 $E_m$ กับ VM/FC ของถ่านหินแหล่งต่าง ๆ ที่อัตราการให้ความร้อน 2, 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

จากความสัมพันธ์ที่ได้ เมื่อพิจารณาสารระเหยได้ พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารระเหยได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ช่วงแรกสารระเหยได้ชนิดเบาจะออกมาก่อน เมื่อถูกเผาไหม้จะให้พลังงานส่วนหนึ่งไปช่วยทำให้ปริมาณสารระเหยได้ที่ระเหยออกมาภายหลังเผาไหม้ได้ง่ายขึ้นจึงใช้พลังงานน้อยลง ทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นลดลง

พิจารณาปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่า ถ้าปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานกระตุ้นจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะ ค่า $E_m$ จะขึ้นกับอัตราการลดลงของน้ำหนักถ่านหินในขณะเผาไหม้ ดังนั้นถ้าปริมาณคาร์บอนคงตัวมาก อัตราการเผาไหม้สูง ดังนั้นอัตราการลดลงของน้ำหนักถ่านหินจะมากขึ้น ทำให้ค่า $E_m$ เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาศักดิ์ของถ่านหินกับพลังงานกระตุ้น พบว่า

ศักดิ์เซมิแอนทราไซต์ (นาด้วง) มีค่าในช่วง 53.71-91.44 กิโลจูลต่อโมล
บิทูมินัส ซี สารระเหยสูง (หนองหญ้าปล้อง) มีค่า 26.20-73.03 กิโลจูลต่อโมล
ซับบิทูมินัส เอ (บ้านป่าคา) มีค่า 30.53-82.64 กิโลจูลต่อโมล
ซับบิทูมินัส บี (บ้านปู บางปูดำ กระบี่) มีค่า 18.74-49.91 กิโลจูลต่อโมล
ซับบิทูมินัส ซี (แม่เมาะ 1 2 3 SP) มีค่า 18.71-49.91 กิโลจูลต่อโมล

พบว่าค่าที่ได้ยังอยู่ในช่วงกว้าง ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าถ่านหินศักดิ์สูงจะมีค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยทางน้ำหนักสูง ซึ่งจะเห็นได้จาก Cumming (20) ทำการทดลองกับเชื้อเพลิงแข็ง 22 แหล่ง ชนิดและศักดิ์ต่าง ๆ กัน ผลที่ได้มีค่าต่าง ๆ กันภายในศักดิ์เดียวกัน ดังตารางที่ 2.8 ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยทางน้ำหนักน่าจะเป็นค่าเฉพาะแหล่งเฉพาะตัวอย่างมากกว่า

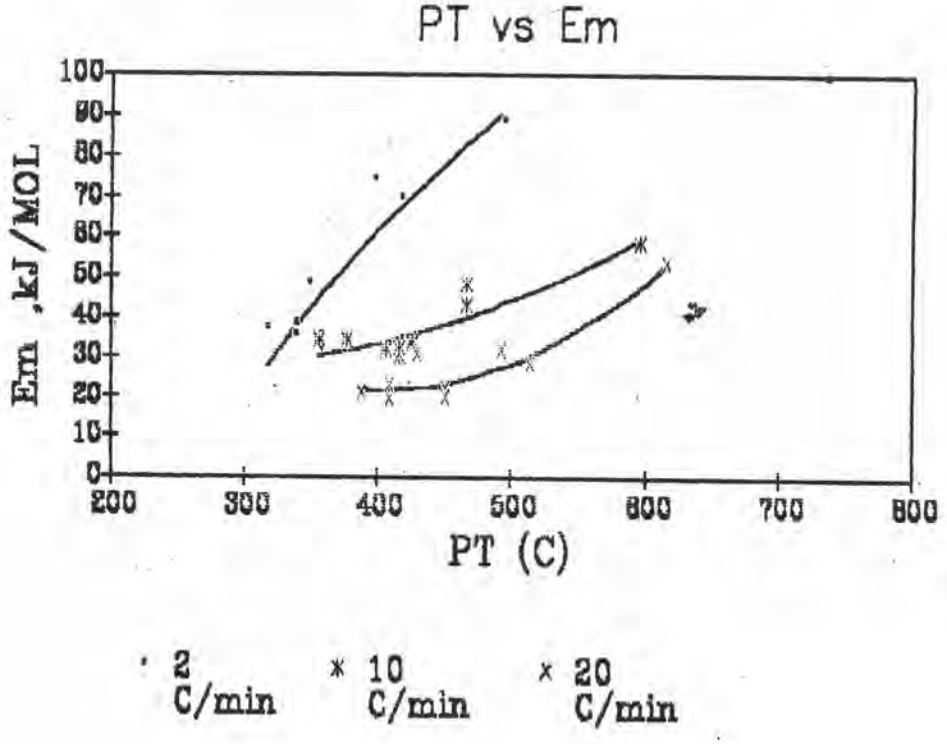
อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยทางน้ำหนักของถ่านหิน 10 ตัวอย่าง ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆกัน มาจัดแบ่งเป็นกลุ่มๆ พบว่า ที่อัตราการให้ความร้อน 2 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที สามารถจัดกลุ่มถ่านหินออกเป็น 3 กลุ่มเหมือนๆกัน ส่วนที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส จัดกลุ่มได้ต่างออกไป (ตารางที่ 4.7, 4.8, 4.9) โดยแหล่งแม่เมาะ3 จะมีความว่องไวมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะที่อัตราการให้ความร้อนสูงมากขึ้นจะมีผลต่อกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างออกไป ดังนั้นจึงให้ความสนใจที่อัตราการให้ความร้อน 2 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งจัดกลุ่มได้ดังนี้

กลุ่มที่มีความสามารถในการเผาไหม้สูง ได้แก่ แหล่งบ้านปู บางปูดำ กระบี่ แม่เมาะ 1 2 3 และ Stockpile มีค่า $E_m$ อยู่ในช่วง 29.83-48.05 กิโลจูลต่อโมล ทั้งนี้เมื่อพิจารณาอัตราการเผาไหม้สูงสุดของถ่านหินกลุ่มนี้ (ตารางที่ 4.5) พบว่ามีค่าสอดคล้องกัน คือ ในช่วง 0.19-0.98 มิลลิกรัมต่อนาที

กลุ่มที่มีความสามารถในการเผาไหม้ปานกลาง ได้แก่ แหล่งหนองหญ้าปล้องและบ้านปาคา มีค่า $E_m$ ในช่วง 42.37-74.18 กิโลจูลต่อโมล โดยมีอัตราการเผาไหม้สูงสุดอยู่ในช่วง 0.24 -1.13 มิลลิกรัมต่อนาที

กลุ่มที่มีความสามารถในการเผาไหม้ต่ำ ได้แก่ แหล่งนาด้วง มีค่า $E_m$ ในช่วง 58.31 -88.10 กิโลจูลต่อโมล โดยมีอัตราการเผาไหม้สูงสุดอยู่ในช่วง 0.42- 1.13 มิลลิกรัมต่อนาที

อย่างไรก็ดีจากการเปรียบเทียบกราฟระหว่าง $E_m$ กับ PT ที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 พบว่า สัมพันธ์กันในแนวเดียวกับที่ Cumming (20) เสนอไว้ดังรูปที่ 2.25 ดังนั้น $E_m$ กับ PT มีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์กัน สามารถใช้ค่า $E_m$ เป็นค่าที่บอกความสามารถของการเผาไหม้ของถ่านหินแทน PT แทน โดยถ้าค่า $E_m$ ต่ำ ถ่านหินจะเผาไหม้ได้ง่าย




รูปที่ 5.8 PT กับ $E_m$ ของถ่านหินแหล่งต่าง ๆ ที่อัตราการให้ความร้อน 2, 10 และ 20 °ช.

5.7 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับการหาค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน ค่าที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ตามมาตรฐานอเมริกัน ยังมีความแตกต่างกันอยู่ ดังนั้นควรจะทำการปรับปรุงการทดลองให้ได้ผลใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยทดลองใช้ช่วงอุณหภูมิ, เวลา, อัตราการให้ความร้อนแต่ละช่วง, การใช้ออกซิเจนแทนอากาศ ตามที่มีผู้ได้ทำไว้ (20,22,24,25,26,27) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องวิเคราะห์ทางอุณหภูมิและความร้อน Netzsch STA-429 และทั้งนี้เพื่อป้องกันการผิดพลาดของผลการทดลอง ควรทำการทดลองเปรียบเทียบของแต่ละตัวอย่าง ระหว่างการวิเคราะห์ทางอุณหภูมิและความร้อนกับการวิเคราะห์ตามมาตรฐานอเมริกัน ภายในวันเดียวกัน

2. การหาค่าการแตกร่วนของถ่านหิน ควรทำการทดลองกับถ่านหินศักดิ์ต่างๆ จำนวนตัวอย่างมากพอที่จะนำมาหาความสัมพันธ์กับแหล่งถ่านหินได้ และควรทดลองเพิ่มเติมเพื่อสนับสนุนข้อมูลโดยการทดสอบ Drop Shatter Test และ Grindability ของถ่านหินแหล่งต่างๆด้วย

3. การหา Burning Profile และค่าพลังงานกระตุ้นนั้น ใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนในการทดลอง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ไวต่อการสั่นสะเทือนมาก ดังนั้น ที่ตั้งของเครื่องมือควรจะเป็นที่ที่มั่นคง ไม่สั่นสะเทือนตามสภาพแวดล้อมใกล้เคียง

4. การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางความร้อน มีความสะดวกรวดเร็วในการทดลอง แต่ยังต้องใช้เวลานานภายหลังการทดลอง เพื่อรอให้อุณหภูมิของระบบกลับเข้าสู่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นควรมีวิธีการที่จะทำให้เครื่องเย็นลงอย่างรวดเร็ว เพื่อที่จะทำการทดลองได้มากครั้งขึ้นในหนึ่งวัน

5. การศึกษาด้านการเผาไหม้ของถ่านหิน ควรใช้ครูซิเบิ้ลรูปจานแบนแทนครูซิเบิ้ลรูปทรงกระบอก เพื่อที่ถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับอากาศได้อย่างสมบูรณ์และทั่วถึง

6. ในการทดลองต่อไป ควรปรับปรุงให้การเก็บข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลชัดเจนขึ้น