

### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

##### 3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุและค่าความร้อนสูงของจีเลื้อยและถ่านหิน

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนสูงของจีเลื้อยและถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร แสดงในตาราง 3.1 สำหรับวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแบบกลุ่มสารของจีเลื้อยและถ่านหินแสดงในภาคผนวก ก และ ข ตามลำดับ ส่วนวิธีการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและตัวอย่างการคำนวณหาค่าความร้อนสูงทั้งจีเลื้อยและถ่านหินแสดงในภาคผนวก ค และ ง ตามลำดับ

ตาราง 3.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนสูงของจีเลื้อยและถ่านหิน

| การวิเคราะห์                             | องค์ประกอบ<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก) | จีเลื้อย | ถ่านหิน |
|------------------------------------------|----------------------------------|----------|---------|
| การวิเคราะห์แบบประมาณ                    | ความชื้น                         | 7.56     | 8.15    |
|                                          | เถ้า                             | 0.77     | 20.88   |
|                                          | สารระเหย                         | 70.96    | 46.20   |
|                                          | คาร์บอนคงตัว                     | 20.71    | 24.77   |
| การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ                   | คาร์บอน                          | 49.83    | 49.61   |
|                                          | ไฮโดรเจน                         | 3.80     | 2.55    |
|                                          | ไนโตรเจน                         | 1.80     | 1.50    |
|                                          | ออกซิเจน (ผลต่าง)                | 44.57    | 46.34   |
| ร้อยละซัลเฟอร์ (จาก Bomb washing method) |                                  | 0.01     | 0.74    |
| ค่าความร้อนสูง (แคลอรีต่อกรัม)           |                                  | 4,458    | 4,320   |

หมายเหตุ: ฐานการวิเคราะห์เป็นแบบ as received

จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของจีเลื่อยพบว่าค่าคาร์บอนคงตัวร้อยละ 20.71 โดยน้ำหนัก และสารระเหยได้ร้อยละ 70.96 โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมีคาร์บอนร้อยละ 49.83 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 3.80 และ 44.56 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดงถึงศักยภาพของจีเลื่อยสามารถให้ผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่มีไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นองค์ประกอบ

จากการวิเคราะห์แบบประมาณและค่าความร้อนสูงของถ่านหิน พบว่าถ่านหินมีปริมาณเถ้าสูงและสารระเหยได้ปานกลาง ส่วนปริมาณความชื้นและคาร์บอนคงตัวมีค่าต่ำ ซึ่งเถ้าเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่เจือปนในถ่านหิน ส่วนสารระเหยและคาร์บอนคงตัวเป็นสารอินทรีย์หรือส่วนที่เผาไหม้ได้ในถ่านหิน ดังนั้นความร้อนทั้งหมดจึงมาจากสองส่วนนี้ จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่า ถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณคาร์บอนไม่สูงมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านหินต่ำ และจากการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของถ่านหินลิกไนต์พบว่า ถ่านหินลิกไนต์มีค่าความร้อนสูงเท่ากับ 4,320 แคลอรีต่อกรัม

### 3.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ จากถ่านหินที่ผ่านและไม่ผ่านการชะละลายเถ้า

งานวิจัยนี้ได้นำถ่านหินลิกไนต์มาใช้เตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนนิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ และจากผลการวิเคราะห์ปริมาณแบบกลุ่มสารในหัวข้อ 3.1 พบว่าถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณเถ้าสูงถึงร้อยละ 20.88 โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้จึงได้ตั้งสมมุติฐานว่า เถ้าอาจจะมีส่วนหรือไม่มีส่วนต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากจีเลื่อยไม้สักโดยแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา จึงได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเถ้าและถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเถ้าเปรียบเทียบกัน โดยทำการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ จากถ่านหินที่ผ่านและไม่ผ่านการชะละลายเถ้า ดังต่อไปนี้

#### 3.2.1 ผลการชะละลายเถ้าของถ่านหิน

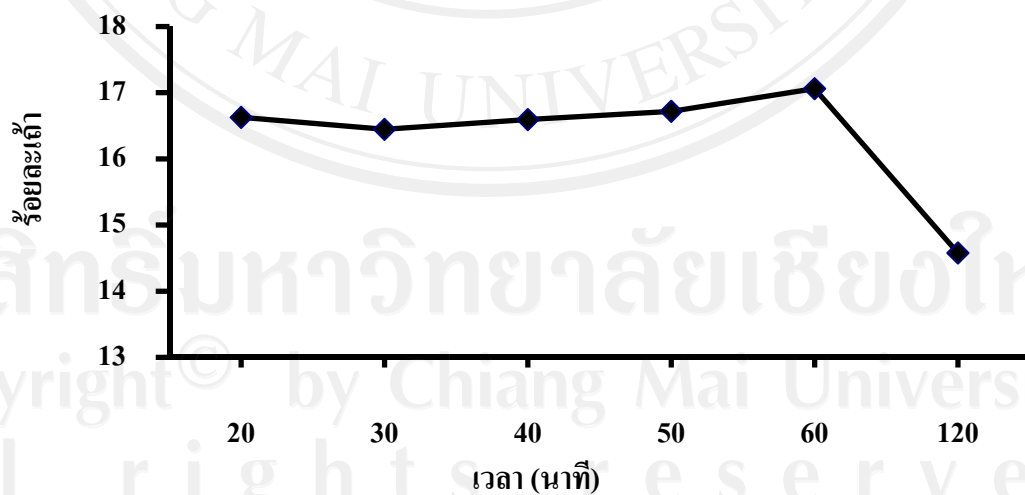
ผลการชะละลายเถ้าของถ่านหินโดยใช้ตัวทำละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และตัวทำละลายกรดไฮโดรคลอริก ทำการชะละลายที่เวลาต่างๆ แสดงในตาราง 3.2 และรูป 3.1

จากตาราง 3.2 และรูป 3.1 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการชะละลายเถ้าเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ปริมาณเถ้าที่ออกจากถ่านหินมีการเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกันเท่าไร แต่พอผ่าน 60 นาที จะเห็นเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน นั่นคือ เหลือเถ้าในถ่านหินน้อยที่สุดที่เวลา 120 นาที เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าแล้ว พบว่าที่เวลาในการชะละลายคือ 60 นาที จะมีปริมาณเถ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ

17.06 โดยน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละของการลดลงเท่ากับ 18.30 และที่เวลา 120 นาที จะมีปริมาณแก่น้อยสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.58 โดยน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละของการลดลงเท่ากับ 30.19 ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกเวลาในการชะละลาย 60 และ 120 นาที ในการชะละลายแก่นของถ่านหินเพื่อเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตาราง 3.2 ปริมาณแก่นของถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแก่นที่เวลาต่างๆ

| เวลาการชะละลาย (นาที) | ร้อยละแก่น | ร้อยละการลดลง |
|-----------------------|------------|---------------|
| ถ่านหินเริ่มต้น       | 20.88      | -             |
| 20                    | 16.63      | 20.37         |
| 30                    | 16.44      | 21.24         |
| 40                    | 16.59      | 20.53         |
| 50                    | 16.72      | 19.94         |
| 60                    | 17.06      | 18.30         |
| 120                   | 14.58      | 30.19         |



รูป 3.1 แนวโน้มปริมาณแก่นของถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแก่นที่เวลาต่างๆ

### 3.2.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุในถ่านหินและตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษารายงานหลายงานวิจัยที่พบว่า ธาตุโลหะหลายชนิดที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแก๊สลิฟเทชัน<sup>(36-41)</sup> เช่น Al, Ce, Cu, Fe, Mg, Na, Ni, Pb, Pt, Rh, Zn และ Si ดังนั้นงานวิจัยจึงทำการศึกษาโลหะ 11 ธาตุ คือ Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn และ Si

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะของถ่านหิน 3 ชนิด คือ ถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลาย ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 60 นาที และถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 120 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลาย ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 60 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 120 นาที โดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี แสดงในตาราง 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ตาราง 3.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะของถ่านหิน

| ธาตุโลหะ | ปริมาณโลหะ (ppm)  |                           |                            |
|----------|-------------------|---------------------------|----------------------------|
|          | ไม่ผ่านการชะละลาย | ผ่านการชะละลาย<br>60 นาที | ผ่านการชะละลาย<br>120 นาที |
| Al       | 112.270           | 116.200                   | 101.667                    |
| Cd       | 0.017             | 0.004                     | 0.001                      |
| Co       | 0.051             | 0.079                     | 0.039                      |
| Cr       | 0.297             | 0.160                     | 0.144                      |
| Cu       | 0.383             | 0.137                     | 0.129                      |
| Fe       | 97.090            | 80.870                    | 77.670                     |
| Mn       | 0.749             | 0.348                     | 0.335                      |
| Ni       | 2.360             | 0.460                     | 1.200                      |
| Pb       | 0.094             | 0.023                     | 0.072                      |
| Zn       | 0.219             | 0.181                     | 0.151                      |
| Si       | 766.830           | 524.270                   | 424.030                    |
| Total    | 980.360           | 722.725                   | 605.441                    |

ตาราง 3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา

| ธาตุโลหะ | ปริมาณโลหะ (ppm)                            |                                                  |                                                   |
|----------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|          | ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินไม่ผ่านการชะละลาย | ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินผ่านการชะละลาย 60 นาที | ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินผ่านการชะละลาย 120 นาที |
| Al       | 118.857                                     | 119.950                                          | 104.177                                           |
| Cd       | 0.008                                       | 0.009                                            | 0.003                                             |
| Co       | 0.076                                       | 0.074                                            | 0.053                                             |
| Cr       | 0.033                                       | 0.032                                            | 0.059                                             |
| Cu       | 0.083                                       | 0.076                                            | 0.085                                             |
| Fe       | 95.830                                      | 84.930                                           | 76.870                                            |
| Mn       | 0.282                                       | 0.102                                            | 0.217                                             |
| Ni       | 458.000                                     | 476.000                                          | 434.000                                           |
| Pb       | 0.114                                       | 0.160                                            | 0.266                                             |
| Zn       | 0.186                                       | 0.122                                            | 0.129                                             |
| Si       | 755.230                                     | 513.800                                          | 419.530                                           |
| Total    | 1,428.705                                   | 1,195.258                                        | 1,035.055                                         |

จากตาราง 3.3 พบว่าธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักในถ่านหินคือ Al, Fe และ Si โดยที่ Al มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อทำการชะละลายถ่านหินที่เวลา 60 นาที เทียบกับถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายโดยค่าอยู่ในช่วง 112-116 ppm และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อทำการชะละลายถ่านหินที่เวลา 120 นาที จาก 112.270 ppm ลดลงเหลือ 101.667 ppm เนื่องจาก Al เป็นส่วนประกอบแทรกอยู่ตามพื้นผิวหรืออยู่ในรากแห ซึ่งจะมีโครงสร้างที่แข็งแรง จึงทำให้การชะละลายธาตุโลหะได้น้อย และค่าไม่คงที่จึงมีการลดลงหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

สำหรับ Fe มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการชะละลายถ่านหิน โดยที่ค่าจาก 97.090 ppm ลดลงเหลือ 80.870 และ 77.670 ppm ที่เวลาการชะละลายถ่านหิน 60 และ 120 นาที ตามลำดับ ส่วน Si มีค่า

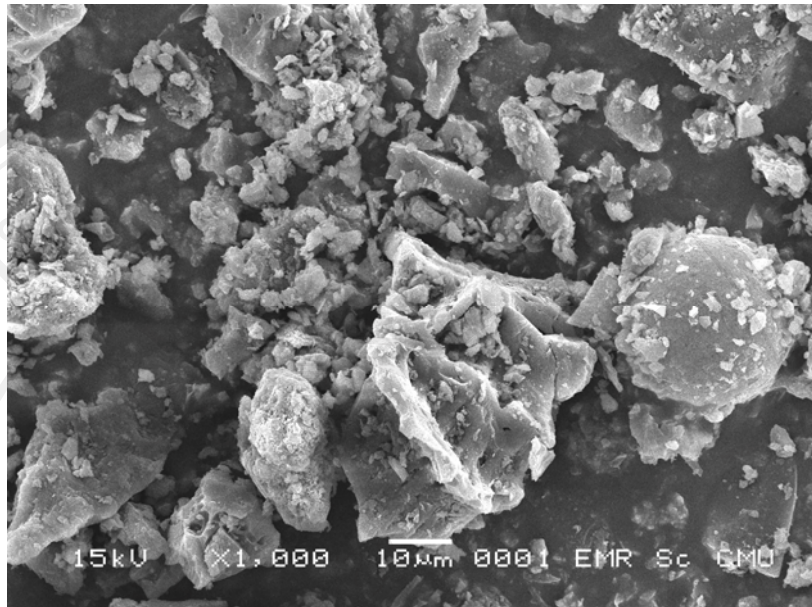
ลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการชะละลายได้ โดยที่ค่าจาก 766.830 ppm ลดลงเหลือ 524.270 และ 424.030 ppm ที่เวลาการชะละลายได้ 60 และ 120 นาที ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลรวมของปริมาณธาตุทั้งหมด พบว่ามีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการชะละลายได้ โดยที่ค่าจาก 980.360 ppm ลดลงเหลือ 722.725 และ 605.441 ppm ที่เวลาการชะละลายได้ 60 และ 120 นาที ตามลำดับ

จากผลของการลดและเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุโลหะในถ่านหิน เกิดจากการใช้ตัวทำละลายในการชะละลายได้คือ โพลีเอทิลีนไกลคอลและกรดไฮโดรคลอริก ไม่สามารถชะละลายเอาสารอนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหินออกมา เมื่อเพิ่มเวลาในการชะละลายจาก 60 เป็น 120 นาที จึงทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณธาตุลดลง เนื่องจากธาตุโลหะที่อยู่ในถ่านหินมักจะอยู่ในรูปสารอนินทรีย์โดยจะแทรกหรืออยู่ในโครงสร้างของถ่านหิน โดยทั่วไปส่วนประกอบของถ่านหินหลักในถ่านหินจะมีโลหะ Al และ Si เป็นส่วนประกอบหลัก จึงทำให้ Al และ Si มีผลต่อปริมาณธาตุในถ่านหินหลักในถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้

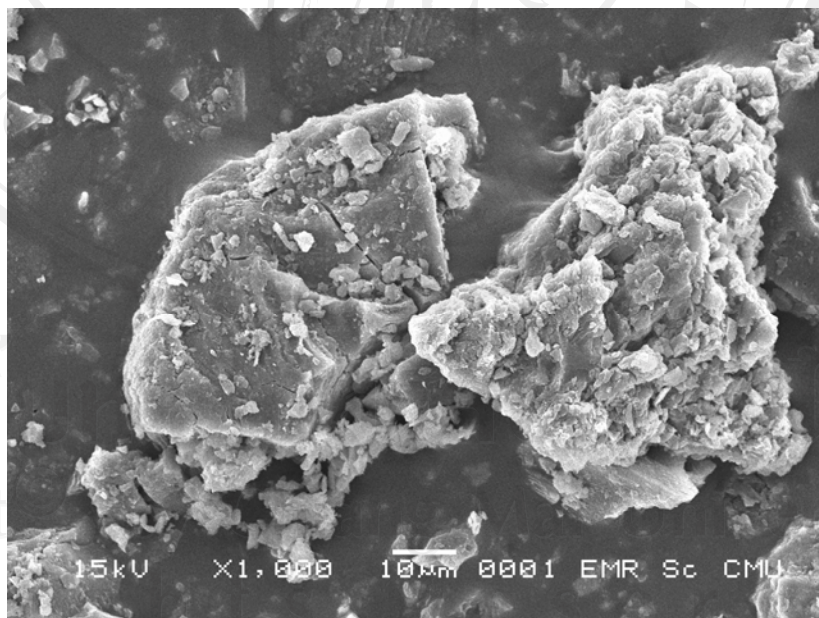
จากตาราง 3.4 พบว่าธาตุโลหะที่พิจารณาในตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกับในถ่านหินที่นำมาเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (เทียบกับตาราง 3.3) ยกเว้นปริมาณของนิกเกิลที่มีค่ามากกว่า เนื่องจากผ่านการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหิน ส่วนพฤติกรรมของธาตุโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกับถ่านหิน

### 3.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านหินก่อนและหลังการเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินหลักในถ่านหิน

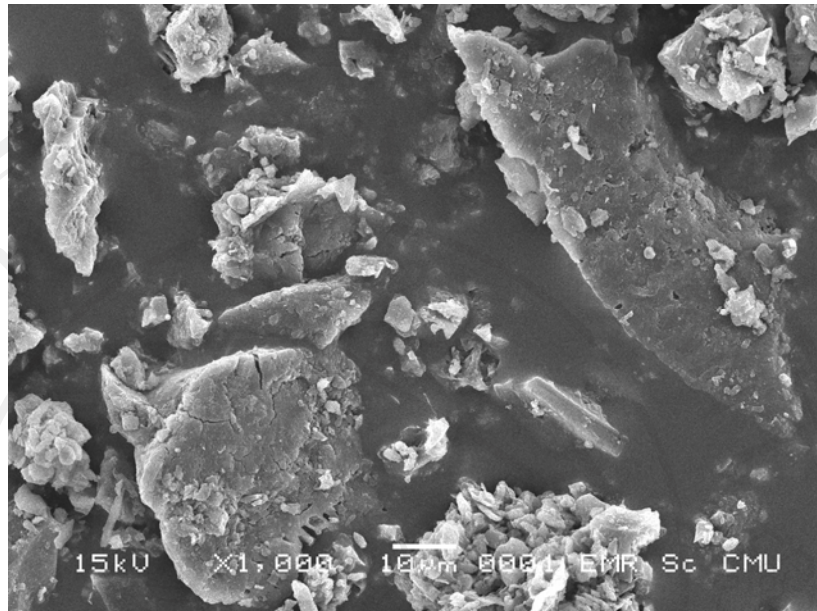
ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านหินและตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายได้แสดงในรูป 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ส่วนถ่านหินและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการชะละลายได้ 60 นาที แสดงในรูป 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ และถ่านหินและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการชะละลายได้ 120 นาที แสดงในรูป 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



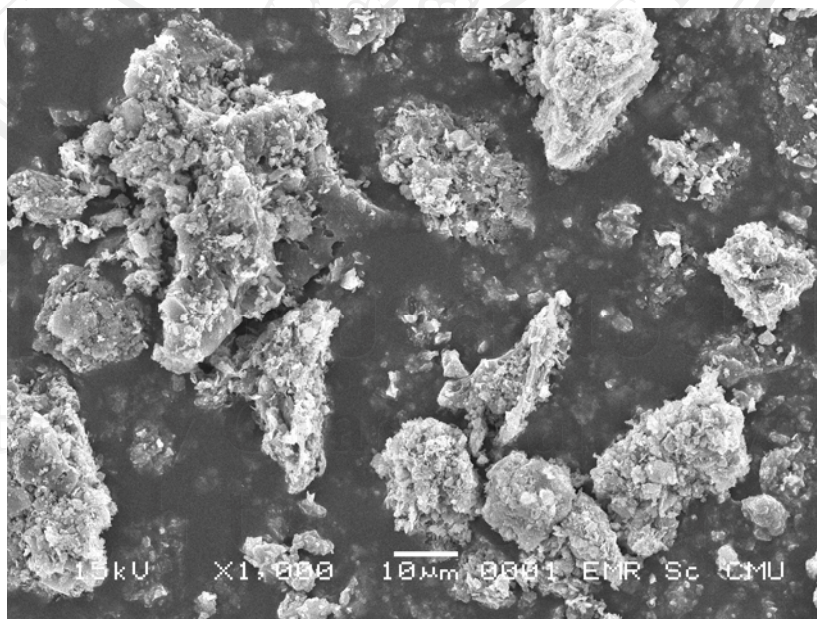
รูป 3.2 ลักษณะพื้นผิวของถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเถ้า



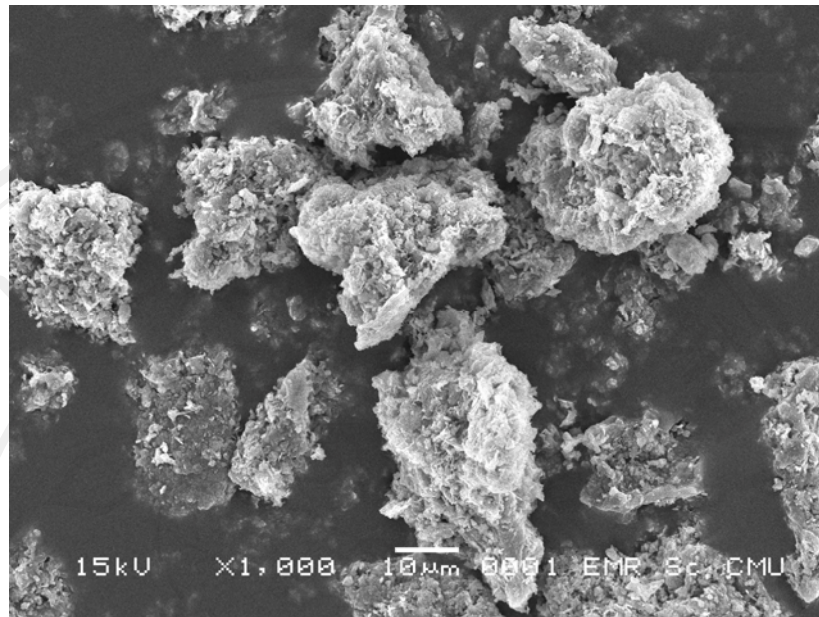
รูป 3.3 ลักษณะพื้นผิวของถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเถ้าที่เวลา 60 นาที



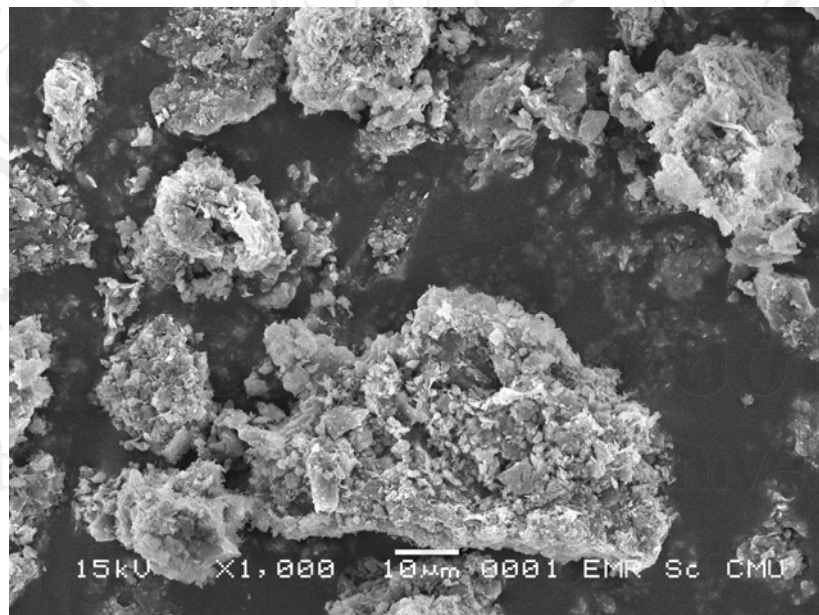
รูป 3.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเถ้าเป็นเวลา 120 นาที



รูป 3.5 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเถ้า



รูป 3.6 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาของถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเถ้าเป็นเวลา 60 นาที



รูป 3.7 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาของถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเถ้าเป็นเวลา 120 นาที

จากรูป 3.2, 3.3 และ 3.4 แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านหิน 3 ชนิด คือ ถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้ว ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 60 นาที และถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 120 นาที ตามลำดับ พบว่า ลักษณะพื้นผิวของถ่านหิน 3 ชนิด มีลักษณะผิวเรียบ ไม่มีรอยขรุขระเกาะติดที่ผิว เมื่อนำถ่านหินทั้ง 3 ชนิด มาเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิคไนต์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ทั้ง 3 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 60 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 120 นาที แสดงดังรูป 3.5, 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ พบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะขรุขระคล้ายเกร็ด เกิดเป็นร่องอยู่ที่ผิว ซึ่งเกิดจากการเกิดผลึกของนิกเกิลที่เกาะติดหรือสร้างพันธะกับถ่านหินที่บริเวณผิวของถ่านหิน

#### 3.2.4 ปริมาณร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิคไนต์

ผลการหาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิคไนต์ที่เตรียมโดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน โดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี แสดงดังตาราง 3.5

ตาราง 3.5 ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิคไนต์

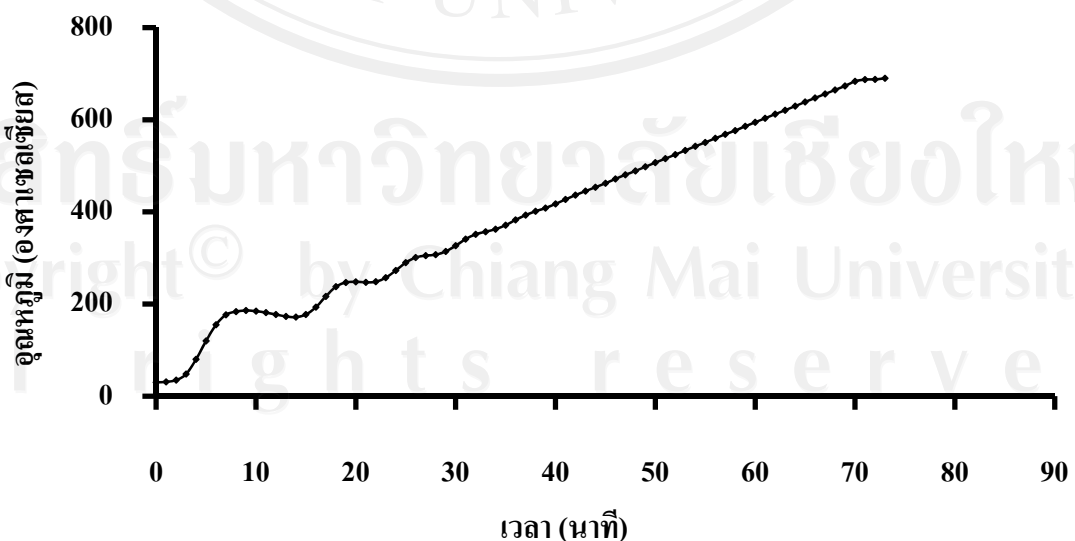
| ตัวเร่งปฏิกิริยา                                         | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|----------------------------------------------------------|------------------|
| ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้ว       | 22.90            |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 60 นาที  | 23.80            |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 120 นาที | 21.70            |

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 60 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 120 นาที มีปริมาณนิกเกิลร้อยละ 22.90, 23.80 และ 21.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งปริมาณนิกเกิลที่วัดได้ในตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นผลรวมระหว่างนิกเกิลในถ่านหินก่อนทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากับนิกเกิลที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนบนถ่านหินโดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากถ่านหินทั้ง 3 ชนิด คือ ถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้ว

ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 60 นาที และถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 120 นาที มีปริมาณนิกเกิลที่อยู่ในถ่านหินก่อนทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยมากดังแสดงในตาราง 3.3 จึงถือว่าไม่มีผลต่อปริมาณนิกเกิลที่วัดจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ โดยปริมาณนิกเกิลที่เตรียมได้ในตัวเร่งปฏิกิริยาได้จากสารละลายนิกเกิลเมื่อเกิดการแตกตัวจะให้  $\text{Ni}^{2+}$  ดังนั้นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง  $\text{Ni}^{2+}$  กับหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) ของถ่านหินก็จะเป็นการแลกเปลี่ยนแบบไอออนบวก (Cation exchange) และเนื่องจากถ่านหินประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนและเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก ( $\text{R-COOH}$ ) และไฮดรอกซิล ( $\text{R-OH}$ ) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแตกตัวให้ประจุเพื่อมาทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Ni}^{2+}$  ได้ จึงทำให้  $\text{Ni}^{2+}$  สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบนถ่านหินได้ดี ปริมาณนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำการแลกเปลี่ยนไอออนบนถ่านหินเล็กน้อยจึงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นที่บริเวณผิวของถ่านหิน ดังแสดงในรูป 3.5, 3.6 และ 3.7 งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ปริมาณนิกเกิลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันคือ มีค่านิกเกิลร้อยละ 22.90, 23.80 และ 21.70 โดยน้ำหนัก จึงถือว่าเป็นปริมาณที่สามารถเปรียบเทียบกันได้ในด้านบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สและช่วยลดปริมาณน้ำมันทาร์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นปัญหาสำคัญในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันชีวมวล ส่วนการคำนวณปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังภาคผนวก จ

### 3.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องระเหย

ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 3.8



รูป 3.8 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องระเหยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ผลการทดสอบอุณหภูมิเครื่องระเหยแสดงดังรูป 3.8 โดยทำการตั้งอุณหภูมิของเครื่องระเหยที่ 700 องศาเซลเซียสโดยให้อัตราการให้ความร้อนเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K ในการวัดค่าพบว่าใช้เวลาประมาณ 70 นาที ที่อุณหภูมิของเครื่องระเหยจึงจะถึงค่าที่ตั้งไว้โดยอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งในการแกสลิฟเฟชันของจีเลื่อยด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิเครื่องระเหยมีผลกระทบต่ออัตราการได้สารระเหยออกจากจีเลื่อย ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ให้ได้มากที่สุดในการทำการทดลองในแต่ละครั้ง

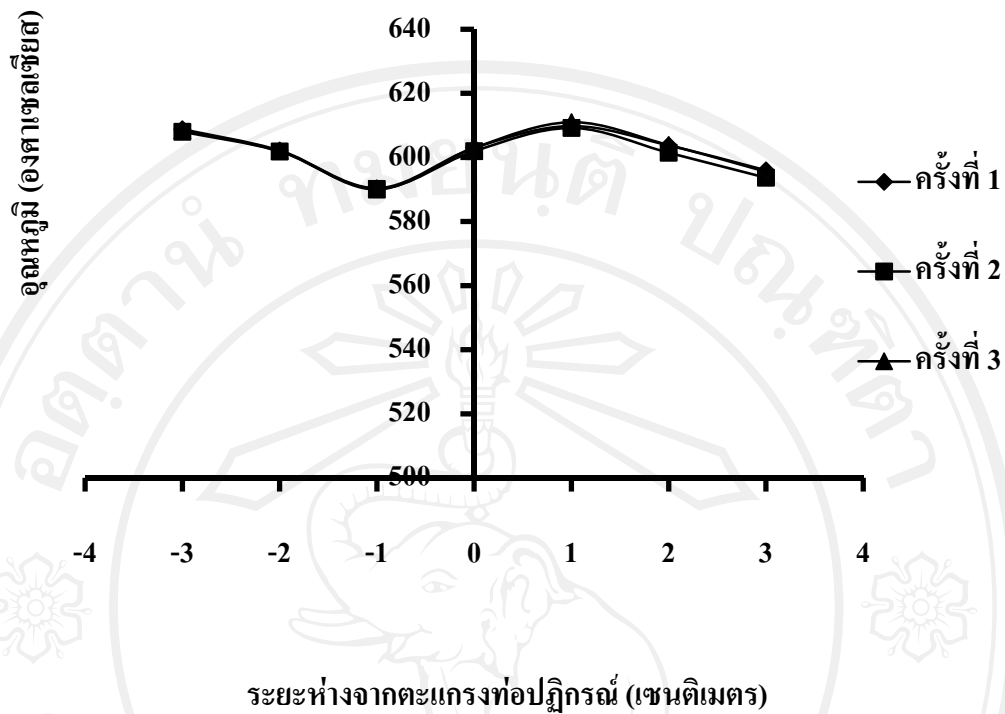
### 3.4 ผลการทำ Heating zone ของท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

ผลการทำ Heating zone ของท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงดังตาราง 3.6 และรูป 3.9

ตาราง 3.6 อุณหภูมิในส่วน Heating zone ของท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

| ระยะห่างจากตะแกรง<br>(เซนติเมตร) | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |            |            |        |
|----------------------------------|-------------------------|------------|------------|--------|
|                                  | ครั้งที่ 1              | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| -3.00                            | 608.8                   | 608.0      | 608.4      | 608.4  |
| -2.00                            | 602.2                   | 601.9      | 602.0      | 602.0  |
| -1.00                            | 590.4                   | 590.2      | 590.0      | 590.2  |
| 0.00                             | 603.0                   | 602.0      | 603.0      | 602.7  |
| 1.00                             | 609.8                   | 609.2      | 611.0      | 610.0  |
| 2.00                             | 603.8                   | 601.5      | 603.9      | 603.1  |
| 3.00                             | 596.0                   | 593.7      | 595.6      | 595.1  |

หมายเหตุ : เครื่องหมายลบหน้าตัวเลขหมายถึงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิซึ่งอยู่ต่ำกว่าตะแกรงในท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งลงไปเป็นเซนติเมตร

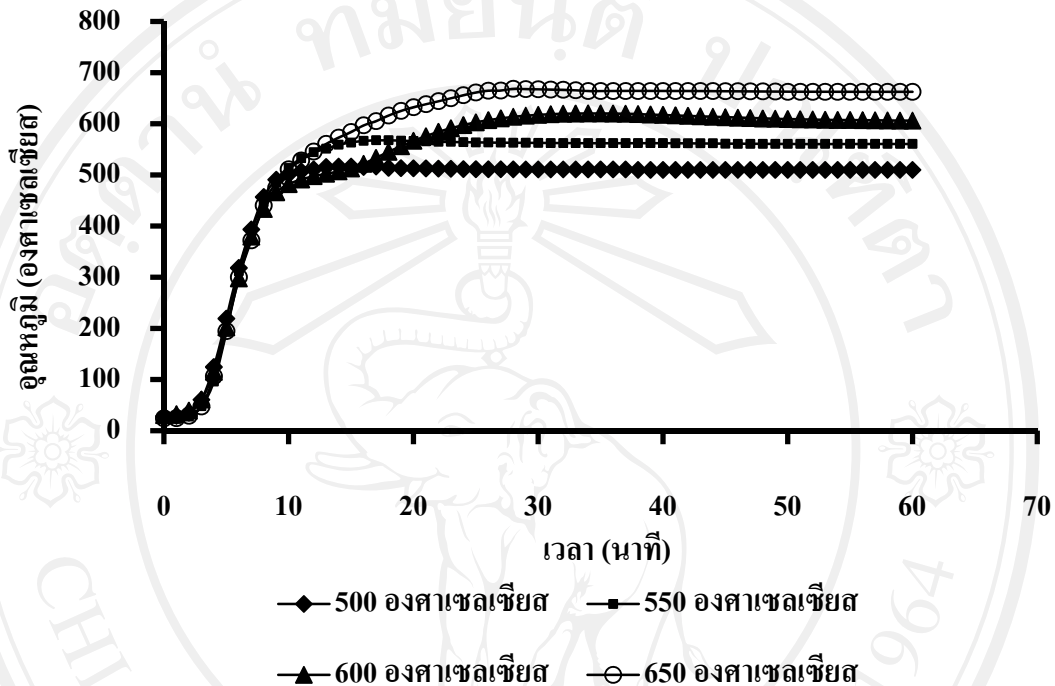


รูป 3.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะห่างจากตะแกรงในท่อปฏิกรณ์

ตาราง 3.6 และรูป 3.9 พบว่า จุดที่ห่างจากตะแกรงในท่อปฏิกรณ์เป็นระยะประมาณ 2 เซนติเมตร อุณหภูมิมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมาก คือ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าการทดลองสามารถใช้ความสูงของเบ็ดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความได้สูงประมาณ 2-3 เซนติเมตร จากแผ่นตะแกรงในท่อปฏิกรณ์

### 3.5 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 3.10



รูป 3.10 อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูป 3.10 พบว่า ผลการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลาแตกต่างกัน เพื่อให้ได้อุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้ คือ ที่อุณหภูมิ 500, 550, 600 และ 650 องศาเซลเซียสใช้เวลาประมาณ 10, 13, 24 และ 24 นาที ตามลำดับ โดยอุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งในการแกสซิฟิเคชันอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ปฏิกิริยารีดอกซ์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) และปฏิกิริยา Water gas shift เป็นต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ให้มากที่สุดเพื่อให้การทดสอบในแต่ละครั้งมีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 3.6 ผลการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชี้เลี้ยงไม้สักโดยแกสิฟิเคชันไอน้ำ โดยใช้ถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชี้เลี้ยงโดยแกสิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ โดยใช้ถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ทำการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์

#### 3.6.1 ผลการทดลองการแกสิฟิเคชันชี้เลี้ยงโดยใช้ไอน้ำและไม่ใช้ไอน้ำโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการศึกษาผลของการใช้ไอน้ำที่ความดันไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล และไม่ใช้ไอน้ำในการแกสิฟิเคชันของชี้เลี้ยงแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ใช้ชี้เลี้ยงประมาณ 1 กรัม ผลการทดลองแสดงดังรูป 3.11

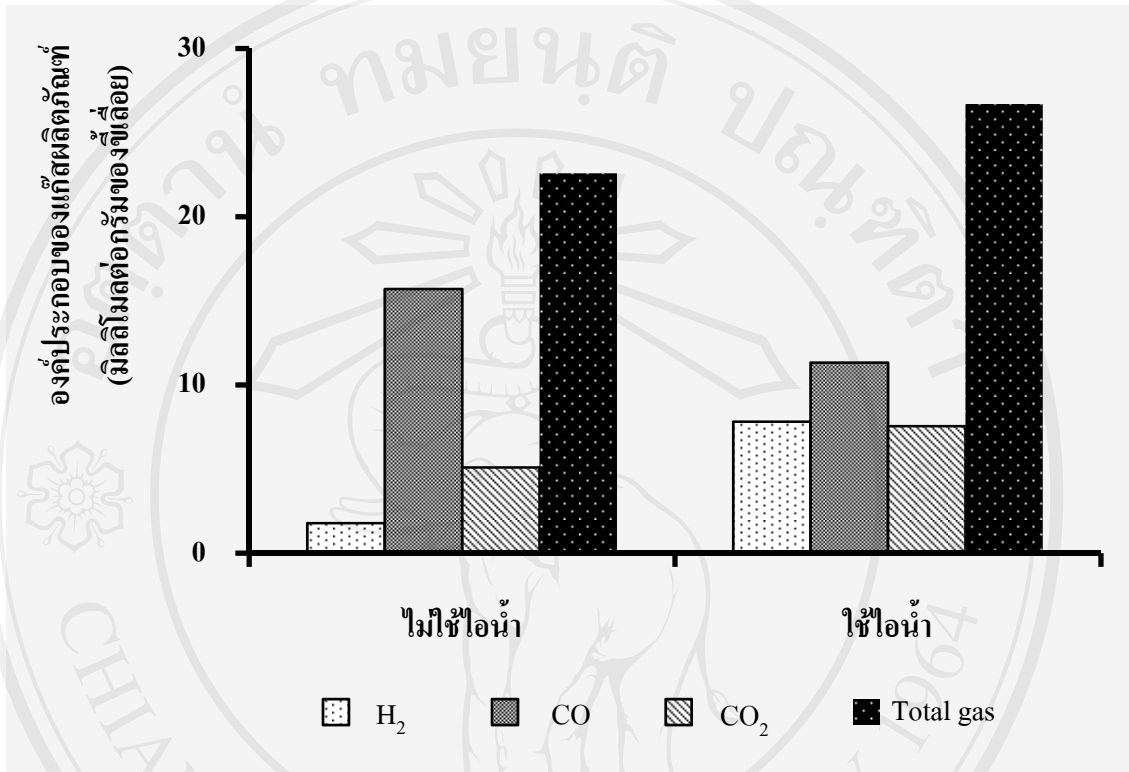
จากรูป 3.11 จะเห็นว่าในกรณีที่ใช้ไอน้ำร่วมในกระบวนการแกสิฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดมีการเปลี่ยนแปลง คือ คาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง ส่วนแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และผลรวมทั้งหมดของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากไอน้ำเป็นแหล่งผลิตแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการ Steam-gasification ดังนั้นการใช้ไอน้ำในการแกสิฟิเคชันทำให้เกิดปฏิกิริยา Primary water gas, Secondary water gas, Water gas shift และ Steam reforming ดังสมการ 3.1, 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



ทุกปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีการเกิดไฮโดรเจนเกิดขึ้น เมื่อป้อนไอน้ำร่วมในกระบวนการแกสิฟิเคชันจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น

ร้อยละของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ลดลงเกิดจากปฏิกิริยา Water-gas shift ดังสมการ 3.3 ซึ่งปฏิกิริยานี้จะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ส่วนร้อยละของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเกิดจากปฏิกิริยา Secondary water gas และ Water-gas shift ดังสมการ 3.2 และ 3.3

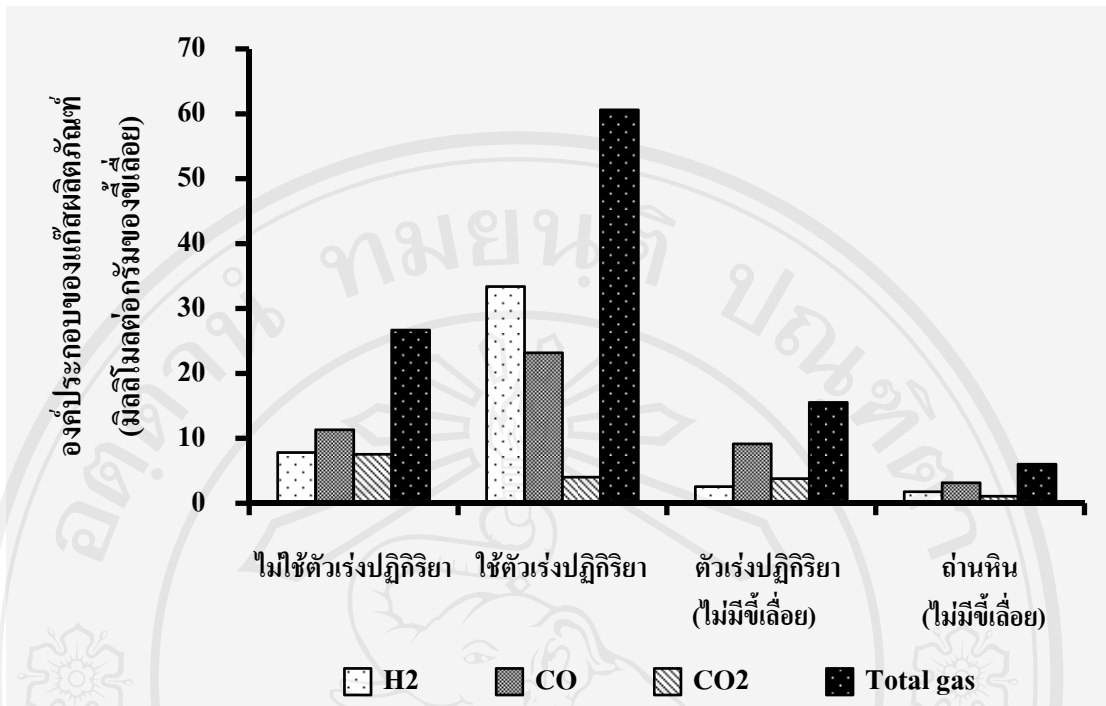
ตามลำดับ ดังนั้นการป้อนไอน้ำร่วมในกระบวนการแกสซิฟเคชันจึงทำให้มีปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สรวมมีค่าเพิ่มมากขึ้น



รูป 3.11 ผลการใช้ไอน้ำและไม่ใช้ไอน้ำในการแกสซิฟเคชันของชี้เลี้ยงโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

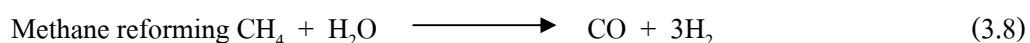
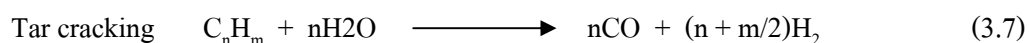
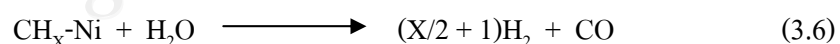
### 3.6.2 ผลการทดลองการแกสซิฟเคชันชี้เลี้ยงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนต์ที่ไม่ผ่านการชะละลายเถ้าซึ่งมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของนิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เท่ากับ 22.90 และผลของการแกสซิฟายตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำในขณะที่ไม่ม่ชี้เลี้ยง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 30 กิโล-ปาสกาล ปริมาณชี้เลี้ยง 1 กรัม และอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เป็น 1:1 แสดงในรูป 3.12



รูป 3.12 ผลการทดลองการแกสซิฟิเคชันซีล้อยด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและผลของการแกสซิฟิเคชันตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำในขณะที่ไม่ซีล้อย

จากรูป 3.12 จะเห็นว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแกสซิฟิเคชันของซีล้อยทำให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงคือ คาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงจาก 7.55 เป็น 4.03 มิลลิโมลต่อกรัมของซีล้อย ส่วนค่าของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และผลิตภัณฑ์แก๊สรวมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.82 เป็น 33.39 จาก 11.33 เป็น 23.20 และจาก 26.70 เป็น 60.62 มิลลิโมลต่อกรัมของซีล้อย ตามลำดับ จากผลดังกล่าวเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกันต์จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็น  $\text{CH}_x\text{-Ni}$  และไฮโดรเจน จากนั้น  $\text{CH}_x\text{-Ni}$  จะไปทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์แสดงดังสมการ 3.5 และ 3.6 นอกจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกันต์ยังไปเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาของชาร์กับทาร์และการแตกตัวของทาร์และรีฟอร์มแก๊สมีเทนดังสมการ 3.7 และ 3.8



เมื่อพิจารณาการแกสฟิเคชันตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ด้วยไอน้ำและการแกสฟิเคชันตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไม่มีนิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ด้วยไอน้ำ พบว่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดมีค่าน้อย แสดงให้เห็นว่า ถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการผ่านไพโรไลซิสให้มีสถานะที่เหมาะสมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วมีผลกระทบต่อการแกสฟิเคชันของชีลื้อยน้อยมากดังผลข้างต้น

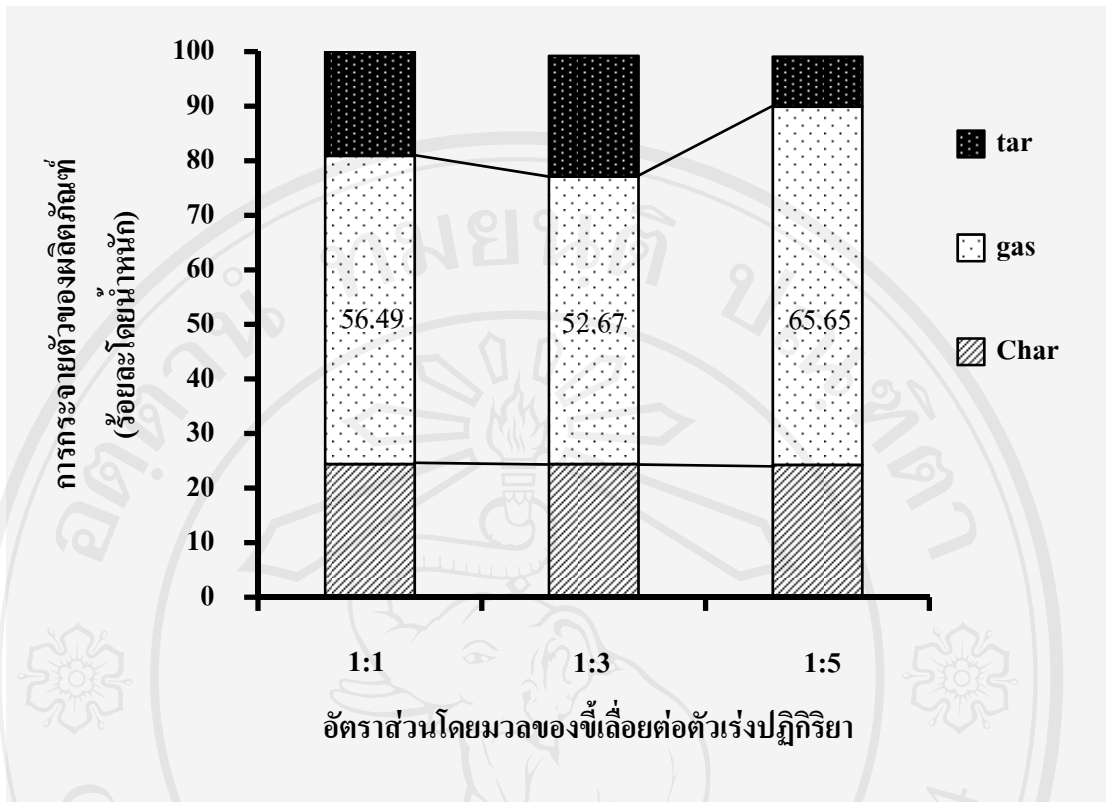
จากผลการทดลองทั้งหมดข้างต้น พบว่าการใช้ไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ทำให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดและผลรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่ใช้ทั้งไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเห็นได้ชัด จึงได้ทำการศึกษาต่อโดยทำการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชีลื้อยโดยแกสฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่อัตราส่วนโดยมวลของชีลื้อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในกรณีตัวรองรับเป็นถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ในแต่ละสถานะที่ทำการศึกษาทำการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำการลบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกสฟิเคชันตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ไอน้ำแบบไม่มีชีลื้อย

### 3.6.3 ผลการศึกษาการหาอัตราส่วนโดยมวลของชีลื้อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชีลื้อยโดยแกสฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลของชีลื้อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 1:1, 1:3 และ 1:5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้ว ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 30 กิโลปาสกาลและปริมาณชีลื้อยประมาณ 1 กรัม

#### 3.6.3.1 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของชีลื้อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

ผลของอัตราส่วนโดยมวลของชีลื้อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้วต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูป 3.13



รูป 3.13 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

จากรูป 3.13 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:1 เป็น 1:5 ปริมาณชาร์ชี้เลี้ยงมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ปริมาณทาร์มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ปริมาณแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากเป็นการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังเป็นการเพิ่มความสูงของเบดในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งและเพิ่มผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (Resident time) ซึ่ง Resident time ของอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1, 1:3 และ 1:5 มีค่าเท่ากับ 14.47, 15.05 และ 15.63 วินาที ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ฅ และยังช่วยเพิ่มค่าสัดส่วนช่องว่างเบดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Void fraction) และระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารระเหยได้ (Volatile matter) พบว่าค่าสัดส่วนช่องว่างเบดของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.6145, 0.6185 และ 0.6215 ตามลำดับ และระยะเวลาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับสารระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 2.874, 3.012 และ 3.192 วินาที ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ฅ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (Tar cracking) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของมีเทน (Methane reforming) จะเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน ประกอบกับผลของนิกลีที่อุณหภูม

ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊ส อธิบายได้ดังปฏิกิริยา 3.5 และ 3.6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศิริมิตร (42) ที่ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชีเลื่อยโดยแกสไฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา และงานวิจัยของบุพผา (43) ที่ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเข้มข้นจากแกสไฟเคชันของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Ni/K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  ในเตापฏิกิริยาแบบเบดนิ่ง ซึ่งผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูป 3.13 เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์แก๊สรวมที่อัตราส่วนโดยมวลของชีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1:3 พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สรวมมีค่าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์แก๊สรวมของอัตราส่วนโดยมวลของชีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:1 และ 1:5 อาจเนื่องจากถ่านหินที่ใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มีโอกาสที่จะเกิดทาร์ขึ้นได้ ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะค่อนข้างเสถียรมากจากผลของหัวข้อ 3.6.2 เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของชีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปริมาณทาร์เพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้อัตราการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ในส่วนของทาร์เพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราส่วนโดยมวลของชีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1:5 ปริมาณทาร์ลดลงและผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์เพิ่มมากขึ้น ดังสมการ 3.5 และ 3.6 จึงทำให้ที่อัตราส่วนโดยมวลของชีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีปริมาณทาร์ลดลงและผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการแกสไฟเคชันชีเลื่อยด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) ดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นหลัก ซึ่งพิจารณาได้จากร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปดังจะกล่าวต่อไป

### 3.6.3.2 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของชีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหิน

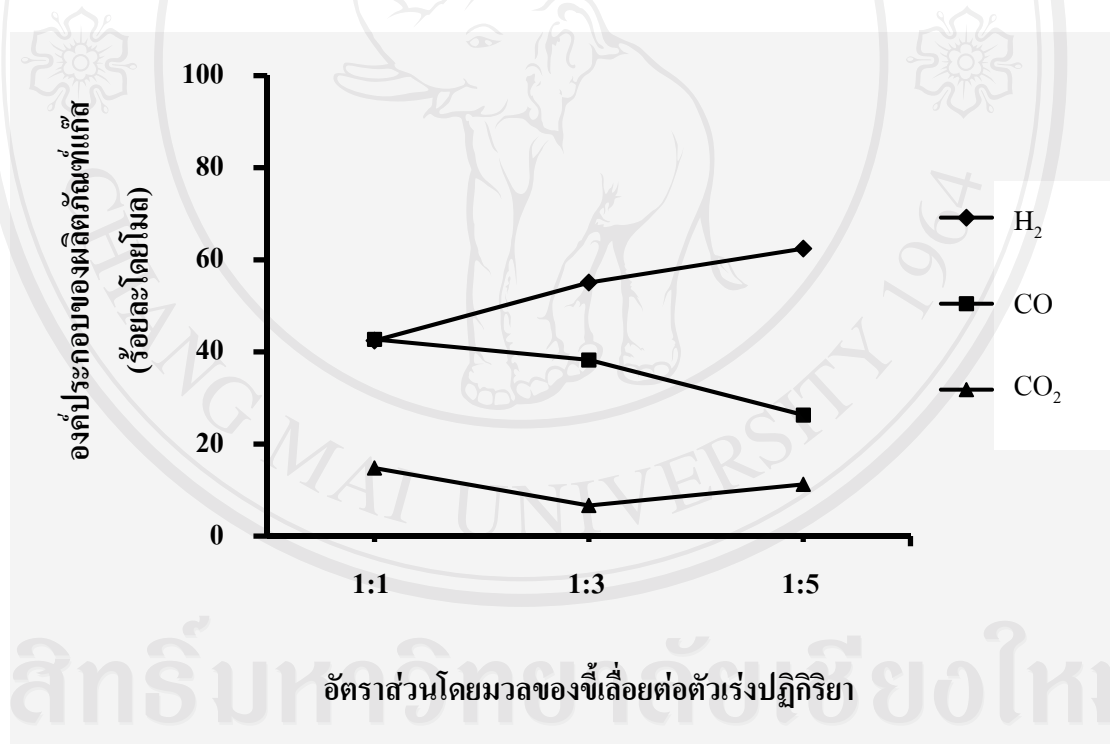
#### ลิกไนต์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลของอัตราส่วนโดยมวลของชีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด แสดงดังรูป 3.14 เนื่องจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่า มีแก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน, แอลเคน น้อยมากและไม่มีเลย ดังนั้นจึงพิจารณาโดยสมมติให้ผลิตภัณฑ์แก๊สประกอบไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลรวมของแก๊สทั้ง 3 ชนิดเท่ากับ 100 คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์

จากการทดลอง พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของชีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจาก 1:1 เป็น 1:3 และ 1:5 มีผลทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42.46 เป็น 55.09 และ 62.44

โดยโมล ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ทำให้นิกเกิลมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งนิกเกิลเป็นโลหะที่มีความว่องไวจะทำให้ตำแหน่งที่ถูกกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นโดยตำแหน่งที่ถูกกระตุ้นคือ ตำแหน่งที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจับกับคาร์บอนซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนได้มากขึ้นดังสมการ 3.5 และ 3.6 และนิกเกิลยังเป็นตัวช่วยการแตกตัวของน้ำมันทาร์และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงได้ดี จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอธิบายได้ดังสมการ 3.7 และ 3.8

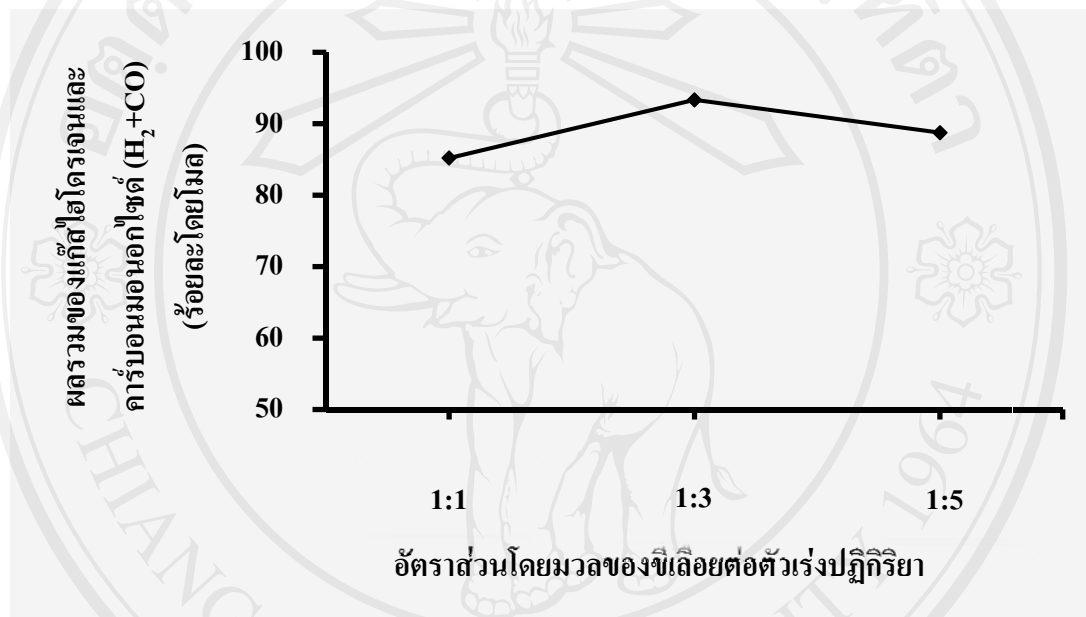
ส่วนค่าของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของซีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1:5 พบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้น ตามลำดับ เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยา Secondary water gas และ Water-gas shift ดังสมการ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูป 3.14 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของซีเลื่อยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

3.6.3.3 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของซีเลียมต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหิน  
 ลิกไนต์ต่อผลรวมของไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2+CO$ ) และไฮโดรเจนต่อ  
 คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$ ) และอัตราส่วนร้อยละโดยโมล ของคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อ  
 คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO/CO_2$ )

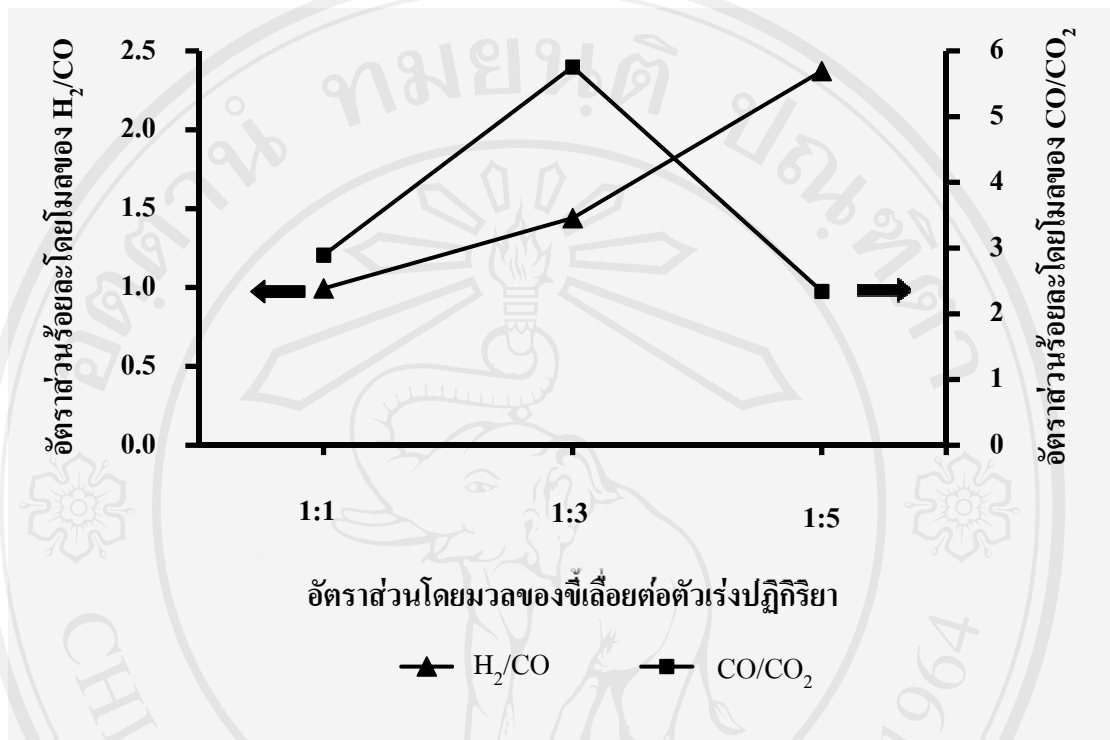
ผลของอัตราส่วนโดยมวลของซีเลียมต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลรวมของไฮโดรเจนกับ  
 คาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงดังรูป 3.15



รูป 3.15 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของซีเลียมต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลรวมของไฮโดรเจนกับ  
 คาร์บอนมอนอกไซด์

จากรูป 3.15 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของซีเลียมต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:1 เป็น 1:3 พบว่าค่าของ  $H_2+CO$  มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าของ  $H_2+CO$  เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของซีเลียมต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:3 เป็น 1:5 พบว่าค่าของ  $H_2+CO$  มีค่าลดลง จากผลดังกล่าวเกิดจากการเกิดปฏิกิริยา Secondary water gas และ Water-gas shift ดังสมการ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นแต่ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณลดลงซึ่งการลดลงมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของแก๊สไฮโดรเจน จึงทำให้ค่าของ  $H_2+CO$  มีค่าลดลง

ผลของอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  และ  $CO/CO_2$  แสดงดังรูป 3.16



รูป 3.16 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  และ  $CO/CO_2$

จากรูป 3.16 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:1 เป็น 1:3 และ 1:5 อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.99 เป็น 1.44 และ 2.37 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1:5 จากผลดังกล่าวเกิดจากปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากกระบวนการแกสซิฟิเคชัน จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการแกสซิฟิเคชันเกือบทุกปฏิกิริยาจะมีแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นมากกว่าการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในทุกสภาวะเป็นผลทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  เพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $CO/CO_2$  จากรูป 3.16 พบว่าค่าของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $CO/CO_2$  มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:1 เป็น 1:3 เกิดจากอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยง

ต่อตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าของ  $\text{CO}/\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของซีลีเย่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าค่าของอัตราส่วนร้อยละ โดยโมลของ  $\text{CO}/\text{CO}_2$  มีค่าลดลง ผลดังกล่าวอาจเกิดจากอิทธิพลของการเกิดปฏิกิริยา Water-gas shift เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในกระบวนการแกสซิฟิเคชันของซีลีเย่มีการใช้ไอน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยและไอน้ำยังเป็นปัจจัยหลักในการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยา Water-gas shift จะทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้อัตราส่วนร้อยละ โดยโมลของ  $\text{CO}/\text{CO}_2$  มีค่าลดลง

**3.6.3.4 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของซีลีเย่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของซีลีเย่และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส**

ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของซีลีเย่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ 1:1, 1:3 และ 1:5 ต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของซีลีเย่และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงดังรูป 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ โดยที่

ร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป (% Conversion)

$$= \left( \frac{\text{น้ำหนักซีลีเย่ตั้งต้น} - \text{น้ำหนักของซีลีเย่ที่เหลือ}}{\text{น้ำหนักซีลีเย่ตั้งต้น}} \right) \times 100$$

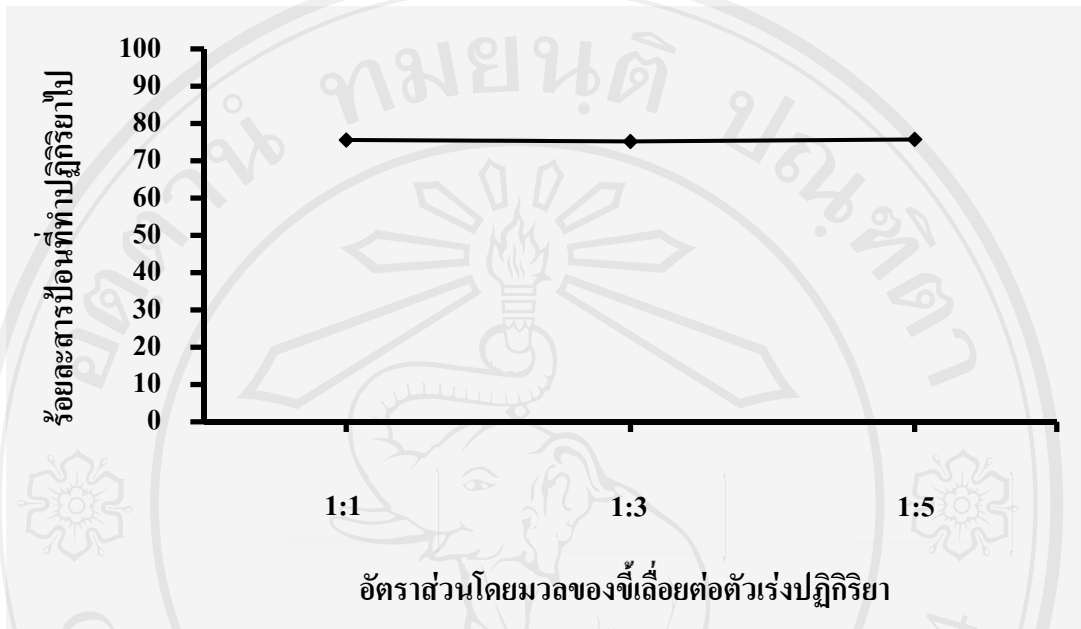
ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ (% Yield)

$$= \frac{\text{ผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด} \times 100}{\text{ผลรวมของแก๊สทั้งหมด}}$$

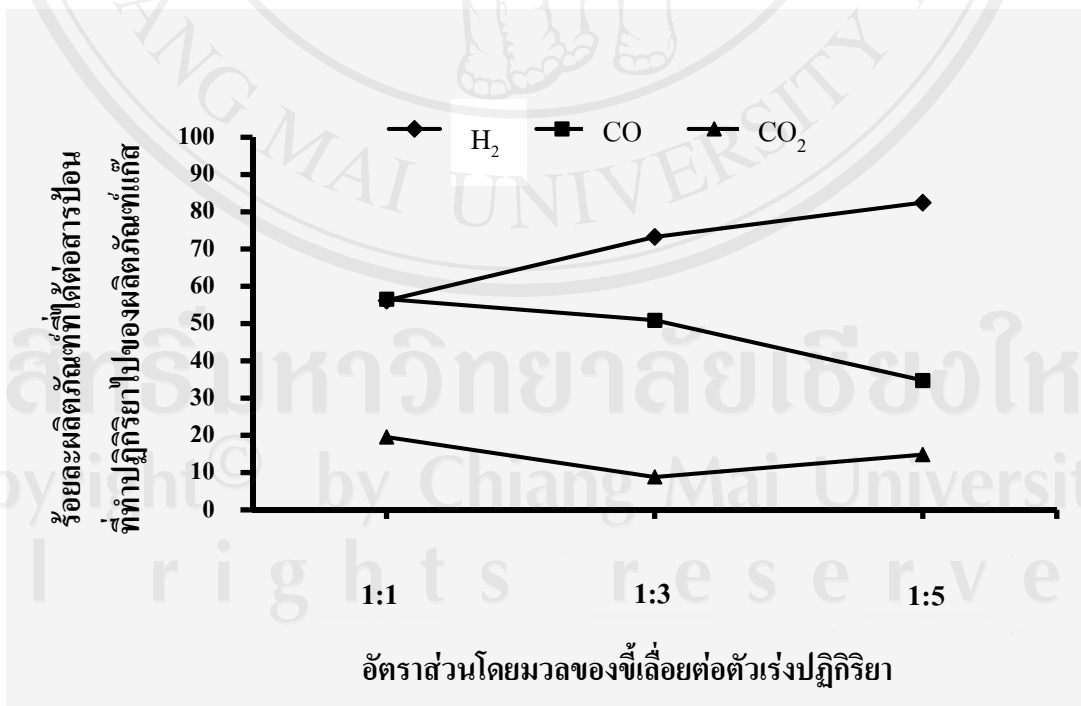
ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป (% Selectivity)

$$= \frac{\text{ผลิตภัณฑ์ที่ได้} \times 100}{\text{สารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป}}$$

และผลรวมของแก๊สทั้งหมดคิดจากผลรวมของแก๊ส ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และ คาร์บอนไดออกไซด์



รูป 3.17 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของแก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของแก๊ส



รูป 3.18 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของแก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลผลิตที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากรูป 3.17 พบว่าร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของชี้อยู่ที่อัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1:1, 1:3 และ 1:5 มีปริมาณค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่าชี้อยู่มีการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สและทาร์ในสัดส่วนคงที่และมีปริมาณที่สูง

จากรูป 3.18 เมื่อพิจารณาร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1:1 เป็น 1:3 และ 1:5 ทำให้ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 56.19 เป็น 73.26 และ 82.46 ตามลำดับ ส่วนปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณลดลง เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1:1 เป็น 1:3 และ 1:5 โดยปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจาก 56.56 เป็น 50.90 และ 34.76 ตามลำดับ และคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณลดลงจาก 19.56 เป็น 8.84 และ 14.84 ตามลำดับ

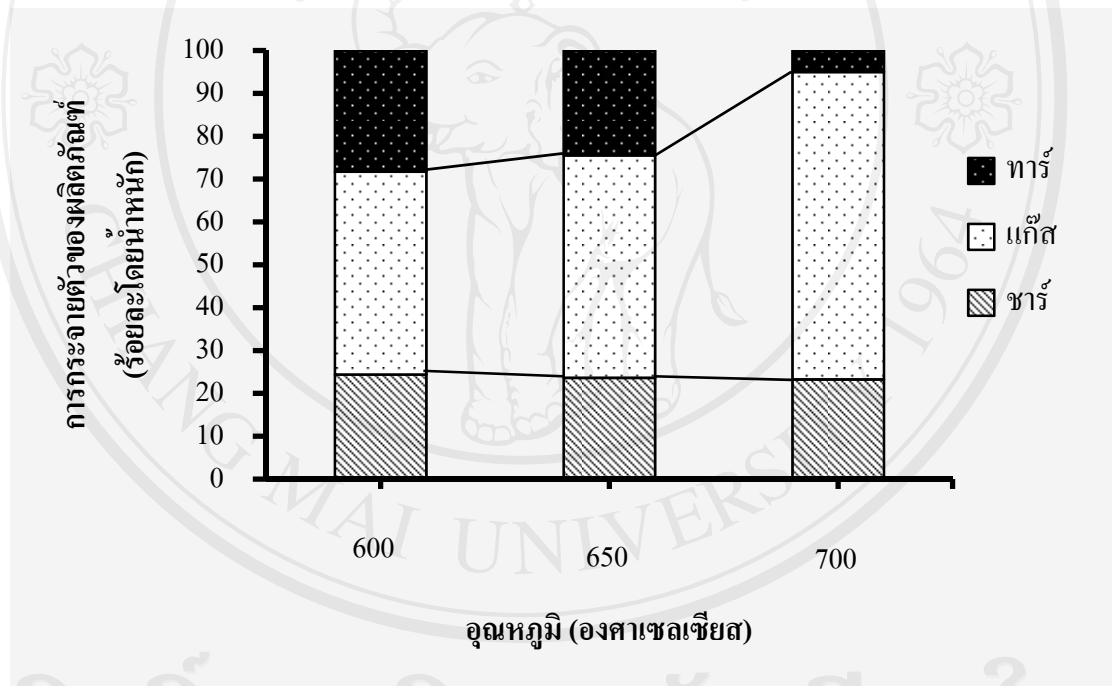
### 3.6.4 ผลการศึกษาการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชี้อยู่โดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.6.3 พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:3 มีความเหมาะสมสำหรับใช้ศึกษาในหัวข้อต่อไป เนื่องจากที่อัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถผลิตร้อยละแก๊สไฮโดรเจนและอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  เท่ากับ 55.09 และ 1.44 ตามลำดับ ส่วนที่อัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1:5 ผลิตร้อยละแก๊สไฮโดรเจนและอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  เท่ากับ 62.44 และ 2.37 ตามลำดับ ถึงแม้ว่า ที่อัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1:5 จะได้ร้อยละแก๊สไฮโดรเจนและอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  มากกว่า แต่จะเห็นได้ว่า ผลรวมร้อยละโดยโมลของ  $H_2+CO$  และอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $CO/CO_2$  มีค่าต่ำ (ดังแสดงในรูป 3.15 และ 3.16) ประกอบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากจะทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:3 มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์และมีแนวโน้มในการเพิ่มแก๊สผลิตภัณฑ์ให้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $CO/CO_2$  มีค่ามากจึงสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยา Water gas shift ได้อีก เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการแก๊สฟิเคชัน ดังนั้นงานวิจัยจึงได้เลือกอัตราส่วนโดยมวลของชี้อยู่ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:3 สำหรับศึกษาในหัวข้ออิทธิพลของอุณหภูมิต่อไป

### 3.6.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

ผลการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชี้เลี้ยงโดยแกสิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล ปริมาณชี้เลี้ยงประมาณ 1 กรัม และอัตราส่วนโดยมวลของชี้เลี้ยงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1:3

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ในการแกสิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิที่ 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 3.19



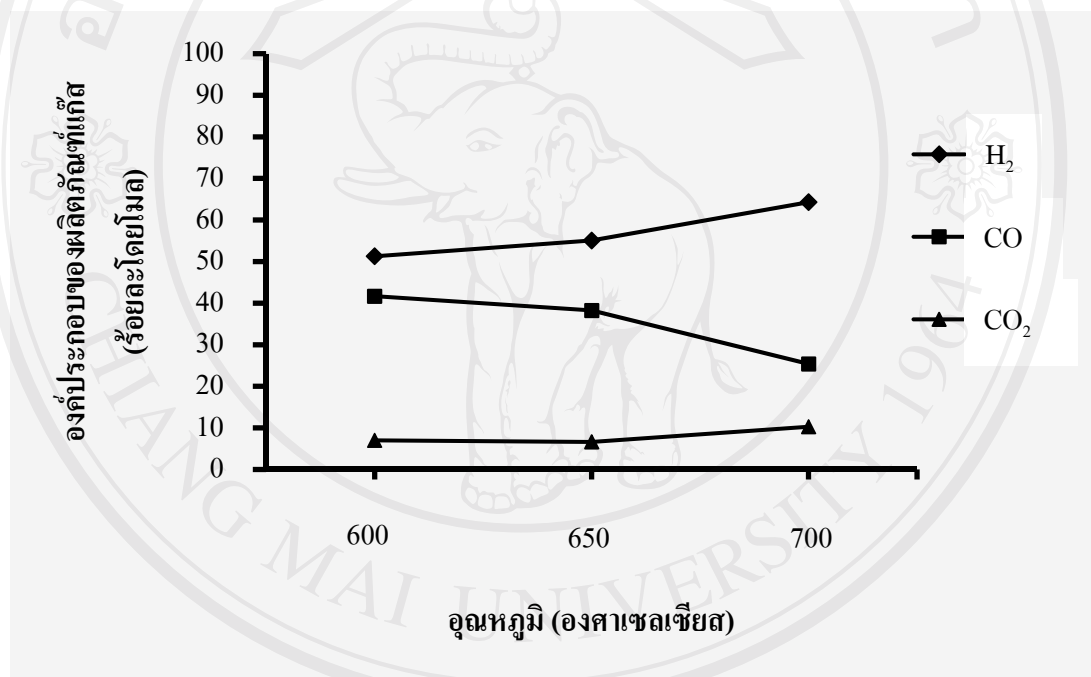
รูป 3.19 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมดในการแกสิฟิเคชันจากชี้เลี้ยงด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

จากรูป 3.19 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการแกสิฟิเคชันจากชี้เลี้ยงด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ปริมาณผลิตภัณฑ์ชาร์ที่ได้ค่อนข้างคงที่ ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สและทาร์มีปริมาณเพิ่มขึ้นและลดลง ตามลำดับ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาของ Tar cracking และ Methane reforming ดังสมการ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนทั้งสองปฏิกิริยา ทำให้เกิดการแตกสลายตัวของทาร์ ดังนั้นปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น

และปริมาณทาร์ลดลง เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการแกสซิฟิเคชันจากขี้เลื่อยด้วยไอน้ำ แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

### 3.6.4.2 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดคือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ในการแกสซิฟิเคชันของขี้เลื่อยด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ แสดงดังรูป 3.20



รูป 3.20 ผลของอุณหภูมิที่ 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส ต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดโดยใช้ไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูป 3.20 พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณโดยรวมของผลิตภัณฑ์แก๊สและองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 เป็น 650 และ 700 องศาเซลเซียส ปริมาณร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 51.28 เป็น 55.09 และ 64.30 โดยโมล ตามลำดับ สำหรับคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงจากร้อยละ 41.69 เป็น 38.27 และ 25.42 โดยโมล ตามลำดับ และคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.02 เป็น 6.65 และ 10.29 โดยโมล ตามลำดับ

จากผลการทดลองอธิบายได้ว่า ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นมีผลมาจากปฏิกิริยา Primary water gas ดังสมการ 3.1 Secondary water gas ดังสมการ 3.2 Water gas shift ดังสมการ 3.3 และ Steam reforming ดังสมการ 3.4 รวมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยา Methane reforming ดังสมการ 3.8 เนื่องจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบปริมาณแก๊สมีเทนน้อยมากดังตัวอย่างโครมาโทแกรมแสดงในภาคผนวก ข สำหรับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Secondary water gas และ Water gas shift ดังสมการ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

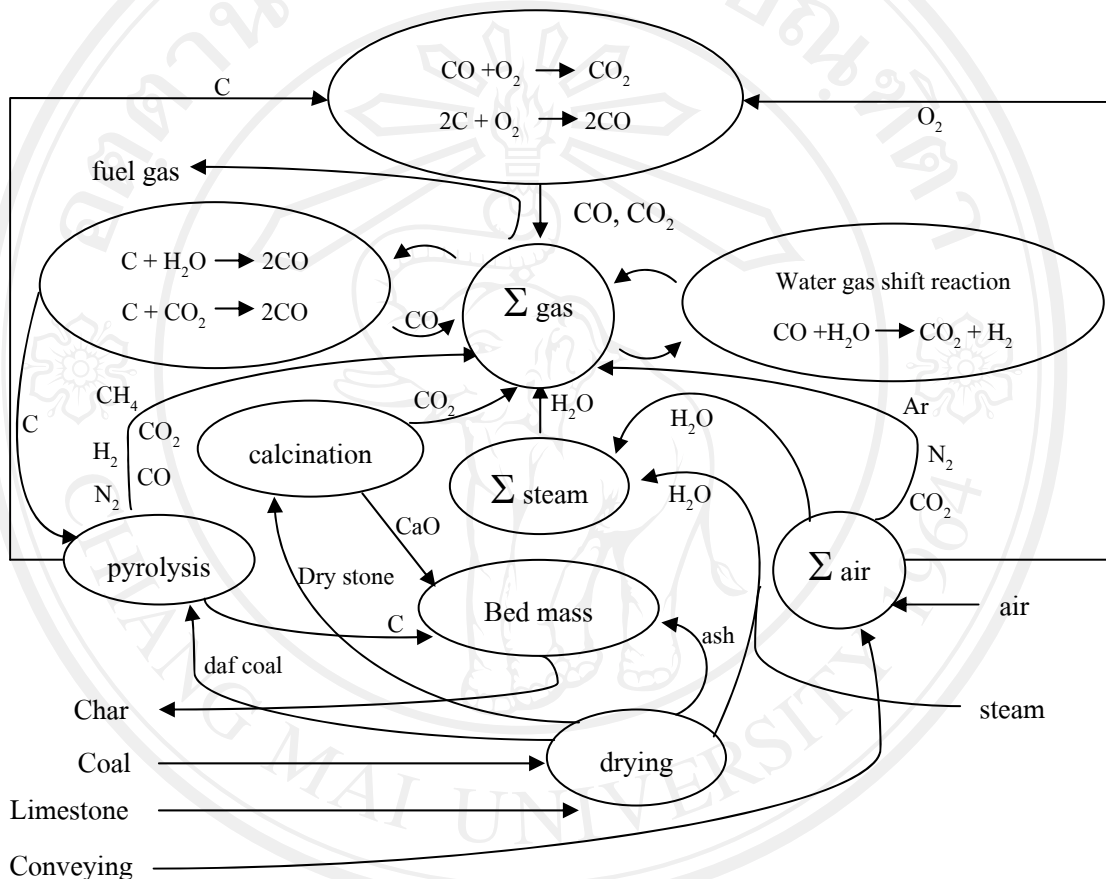
แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Water gas shift ดังสมการ 3.3 เนื่องจากระบวนการแกสลิฟเคชันของชีลื้อยมีการใช้ไอน้ำ ซึ่งไอน้ำเป็นปัจจัยหลักในการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยา Water-gas shift จะทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง

ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มค่าเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเกิดจากหลายปฏิกิริยาในกระบวนการแกสลิฟเคชันดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการ 3.9 และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Boudouard ดังสมการ 3.10 และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาไปเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดังสมการ 3.11



ดังนั้นอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพัตรา<sup>(9)</sup>

ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการแกสลิฟเคชันมีความซับซ้อนมากและสามารถเกิดได้หลายปฏิกิริยา ซึ่งจะเห็นได้จากรูป 3.21 ซึ่งเป็นแนวทางการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกระบวนการแกสลิฟเคชันของถ่านหิน ผลรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงขึ้นอยู่กับอิทธิพลหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไอน้ำ เป็นต้น



3.6.4.3 ผลของอุณหภูมิต่อผลรวมของไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2+CO$ ) และอัตราส่วนร้อยละโดยมวลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO/CO_2$ )

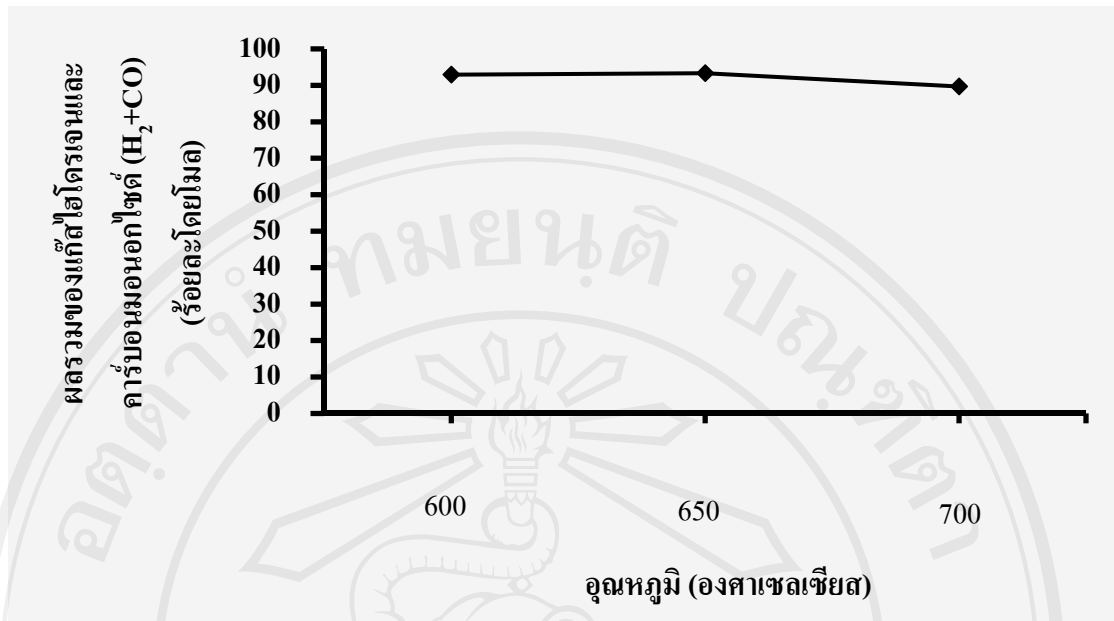
อิทธิพลของอุณหภูมิต่อผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2+CO$ ) แสดงในรูป 3.22 และผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  และ  $CO/CO_2$  ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ แสดงดังรูป 3.23

จากรูป 3.22 พบว่าค่า  $H_2+CO$  มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 92.97, 93.36 และ 89.72 โดยโมล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชีล้อยโดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เกิดปฏิกิริยา Water gas shift ดังสมการ 3.3 ทำให้ผลผลิตที่เป็นแก๊สสังเคราะห์คือไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 600-700 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การผลิตว่าต้องการไฮโดรเจนหรือคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์หลัก สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ฉะนั้นที่ 700 องศาเซลเซียส จึงเป็นอุณหภูมิที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากที่สุด ดังกล่าวมาในหัวข้อ 3.6.4.2

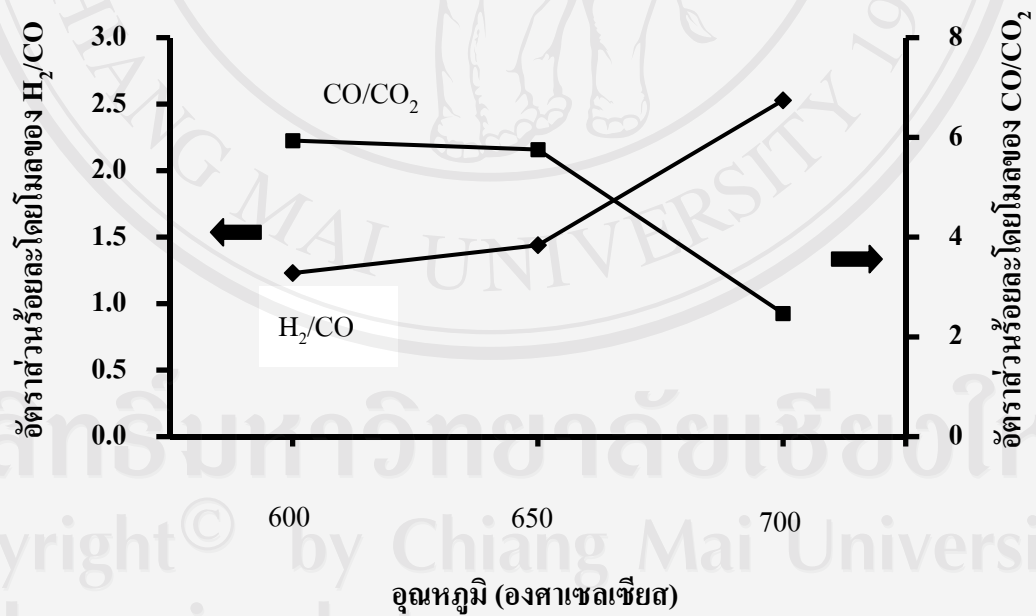
จากรูป 3.23 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 เป็น 650 และ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.23 เป็น 1.44 และ 2.53 ตามลำดับ และมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 2.53 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 600 เป็น 700 องศาเซลเซียส ปริมาณของไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Primary water gas, Secondary water gas, Water gas shift และ Steam reforming ดังที่อธิบายก่อนหน้านี้แล้ว ซึ่งทุกปฏิกิริยาที่กล่าวถึงจะมีการเกิดไฮโดรเจนขึ้น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ได้เพิ่มมากขึ้นและเพิ่มมากกว่าการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นผลให้อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

สำหรับอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $CO/CO_2$  มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 เป็น 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากอิทธิพลของหลายปฏิกิริยาในกระบวนการแก๊สฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงส่งผลให้อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $CO/CO_2$  มีแนวโน้มลดลง

จากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  มีแนวโน้มเพิ่มและอัตราส่วนร้อยละโดยโมล  $CO/CO_2$  มีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Haryanto<sup>(20)</sup>



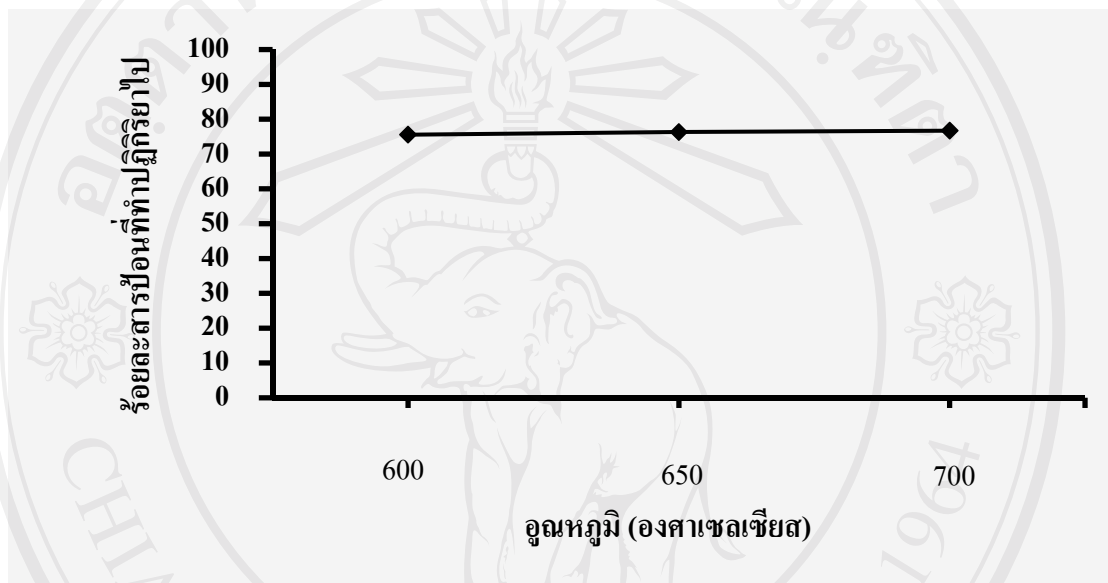
รูป 3.22 ผลของอุณหภูมิต่อผลรวมของไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์



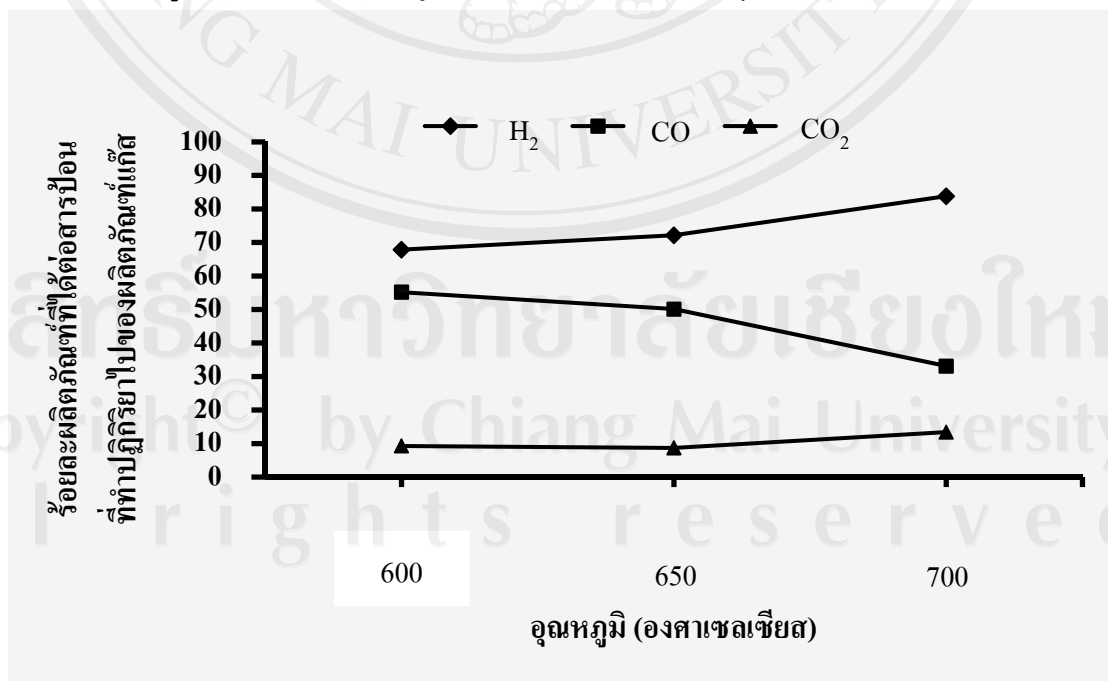
รูป 3.23 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  และ  $CO/CO_2$

### 3.6.4.4 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของขี้เลื่อยและร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของขี้เลื่อยและร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด แสดงดังรูป 3.24 และ 3.25 ตามลำดับ



รูป 3.24 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของขี้เลื่อย



รูป 3.25 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากรูป 3.24 พบว่าร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของจีเลียมมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเนื่องจากจีเลียมมีการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ คือ แก๊สและทาร์ในขั้นตอน devolatilization เพื่อทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยาที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถยืนยันได้จากปริมาณของถ่านชาร์ที่เหลือมีปริมาณค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูป 3.19 ในขณะที่ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูป 3.25 ซึ่งพบว่าที่ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณมากที่สุดคือ 83.81 และมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยที่สุด อธิบายได้จากปฏิกิริยาแกสซิฟิเคชันดังกล่าวมาแล้ว

แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการที่จะผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้ได้ปริมาณมากที่สุดในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากจีเลียมด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ คือ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมินี้ เพื่อการศึกษาผลต่อตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้วต่อไป เพื่อเป็นข้อมูลในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้ได้ปริมาณมากที่สุดต่อไป

### 3.7 ผลการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว

จากผลการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากจีเลียมไม้สักโดยแกสซิฟิเคชันไอน้ำ โดยใช้ถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในหัวข้อ 3.6 ได้สภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนโดยมวลของจีเลียมต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1:3 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล และปริมาณจีเลียมประมาณ 1 กรัม เพื่อใช้ในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้วเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

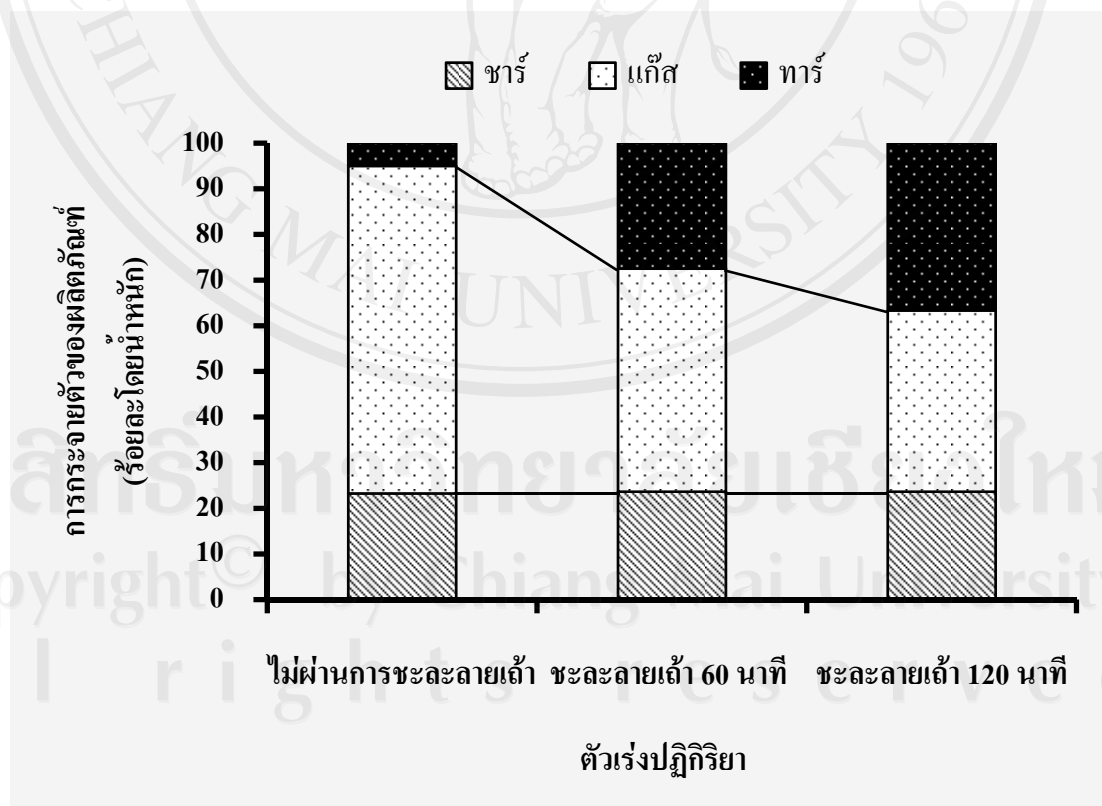
ผลการทดลองหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากจีเลียมโดยแกสซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งในการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 60 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายแล้ว 120 นาที โดยถ่านหินที่ใช้เตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณถ่าน แสดงดังตาราง 3.7 สภาวะที่ใช้ทำการทดลองคือ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล จีเลียมประมาณ 1 กรัม และอัตราส่วนโดยมวลของจีเลียมต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1:3 และผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ในแต่ละสภาวะที่ทำการศึกษาทำการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำการลบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแกสซิฟิเคชันตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ไอน้ำแบบไม่มีตัวเร่ง

ตาราง 3.7 ปริมาณเถ้าของถ่านหินที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

| ถ่านหิน                     | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|-----------------------------|------------------|
| ไม่ผ่านการชะละลายเถ้า       | 20.88            |
| ผ่านการชะละลายเถ้า 60 นาที  | 17.06            |
| ผ่านการชะละลายเถ้า 120 นาที | 14.58            |

### 3.7.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

เมื่อพิจารณาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ในกระบวนการแกสลิฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเถ้า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเถ้า 60 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเถ้า 120 นาที แสดงดังรูป 3.26



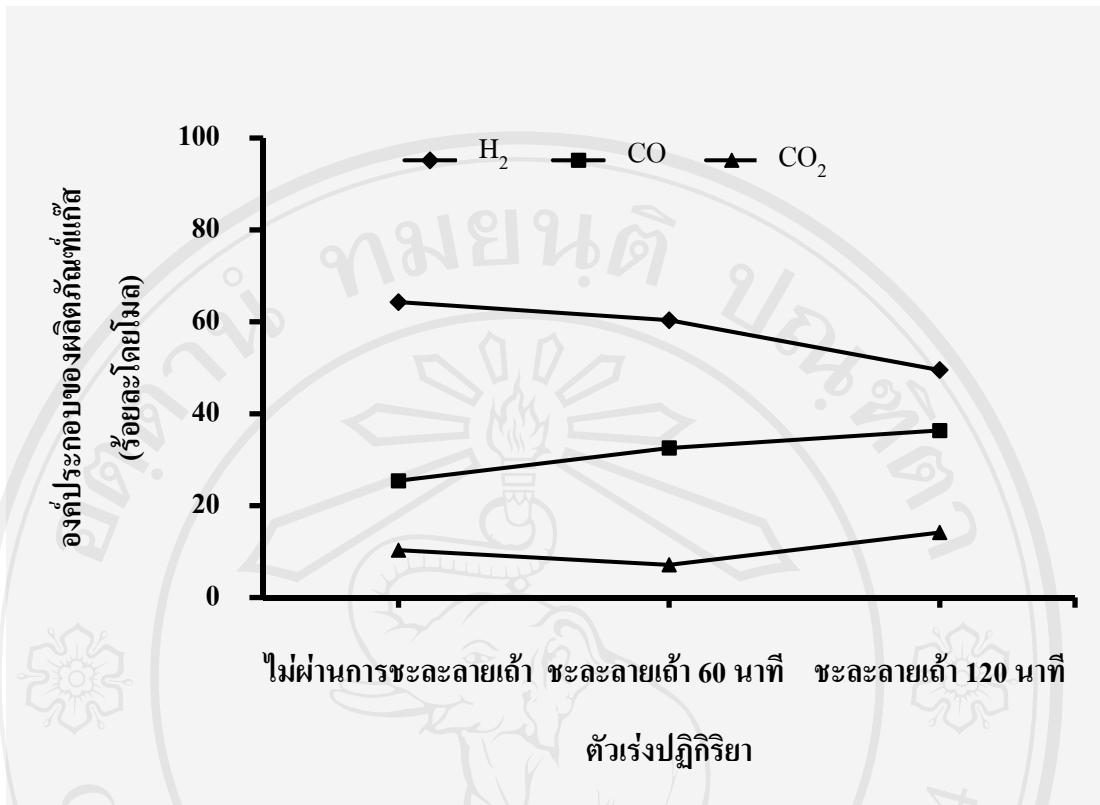
รูป 3.26 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมดในการแกสลิฟเคชันจากขี้เลื่อยด้วยไอน้ำ โดยใช้ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

จากรูป 3.26 พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ชาร์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สและทาร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สและทาร์มีปริมาณลดลงและเพิ่มขึ้น ตามลำดับ เกิดจากการลดลงของปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้ปริมาณทาร์มีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาณแก๊สลดลง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณต่ำลดลง จากผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในถ่านของถ่านหิน ดังแสดงในตาราง 3.3 จากผลงานวิจัยหลายกลุ่มวิจัย พบว่ามีธาตุโลหะบางตัวที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการแตกตัวของทาร์กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น โดยธาตุโลหะที่มีการใช้ในการทดลอง ซึ่งจะอยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ ได้แก่  $V_2O_5$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CoO$ ,  $NiO$ ,  $CuO$  และ  $MoO_3$  เป็นต้น<sup>(2, 36-41)</sup> ซึ่งในงานวิจัยนี้ปริมาณโลหะที่อยู่ในถ่านหินมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัดหลังจากผ่านการชะละลายถ่านและมีปริมาณลดลงเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการชะละลาย ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าจากอิทธิพลของธาตุโลหะลดลง ทำให้การกระตุ้นที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนสารระเหยได้เป็นแก๊สผลผลิตลดลง ดังนั้นสารระเหยได้ที่มีโมเลกุลใหญ่ที่เหลือไม่สามารถแตกตัวได้จึงควบแน่นกลายเป็นทาร์ ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง

### 3.7.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

เมื่อพิจารณาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดคือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ในการแก๊สซิเคชันของชีด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ แสดงดังรูป 3.20

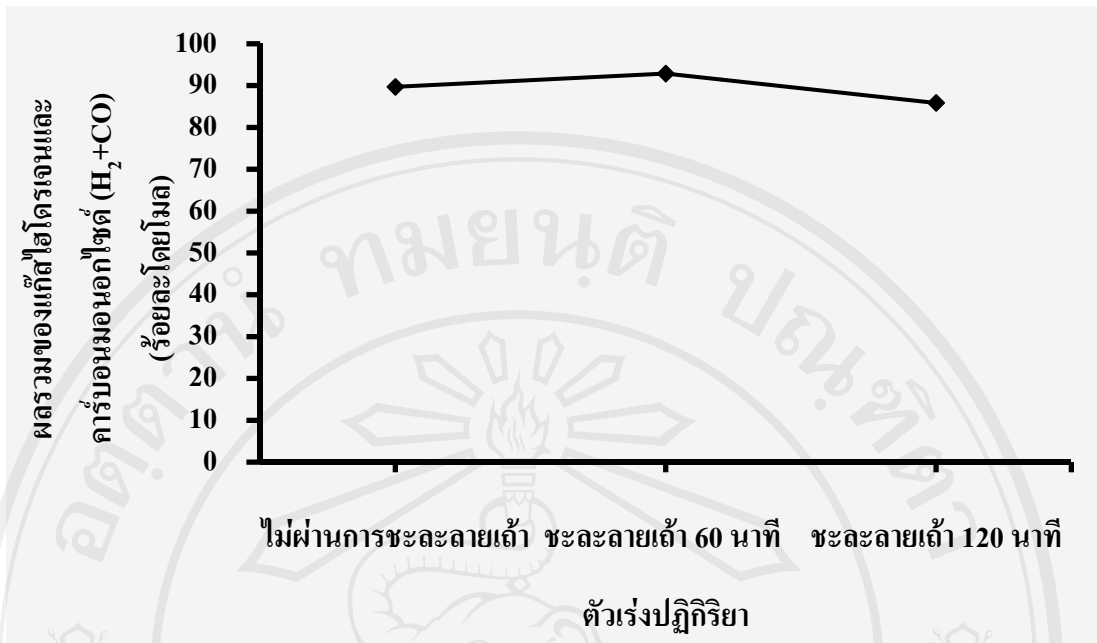
จากรูป 3.27 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณโดยรวมของผลิตภัณฑ์แก๊สและองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณต่ำลดลง จะทำให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลง ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณลดลงจากร้อยละ 64.30 เป็น 49.50 โดยโมล และมีปริมาณต่ำสุดที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านที่ผ่านการชะละลายถ่าน 120 นาที ซึ่งมีปริมาณถ่านเหลืออยู่ร้อยละ 14.58 โดยน้ำหนัก ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25.42 เป็น 36.36 และจากร้อยละ 10.29 เป็น 14.15 โดยโมล ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าเกิดจากอิทธิพลของธาตุโลหะลดลง จากผลการทดลองมีความแตกต่างจากงานวิจัยของ Sharma<sup>(19)</sup> โดยเป็นการศึกษาผลของการใช้ Hypercoal ในการแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Uddin<sup>(40)</sup> ซึ่งเป็นการศึกษาผลของเหล็กออกไซด์ในการแตกสลายตัวทาร์ในกระบวนการแก๊สซิเคชันแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา



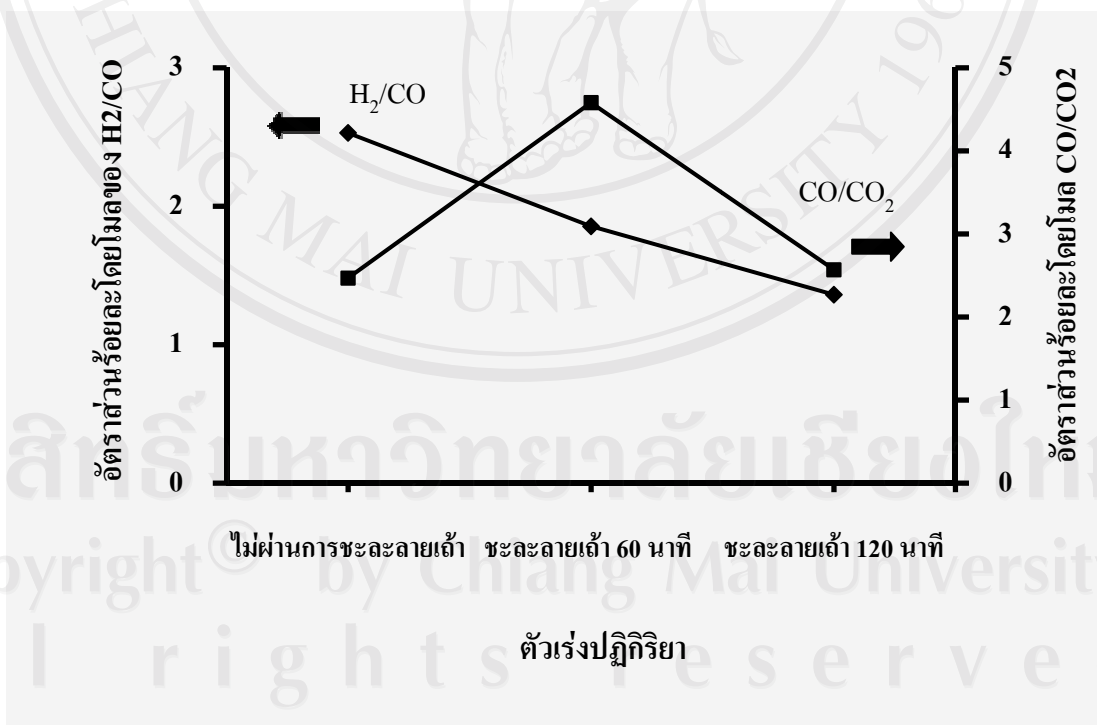
รูป 3.27 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละในการแกสซิฟิเคชันจากชีเลื่อยด้วยไอน้ำ โดยใช้ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

### 3.7.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลรวมของไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2+CO$ ) และอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO/CO_2$ )

ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลรวมของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2+CO$ ) แสดงในรูป 3.28 และการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  และ  $CO/CO_2$  ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ แสดงดังรูป 3.29



รูป 3.28 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลรวมของไฮโดรเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในการแกสลิฟเคชันจากขี้เลื่อยด้วยไอน้ำ โดยใช้ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์



รูป 3.29 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊สในการแกสลิฟเคชันจากขี้เลื่อยด้วยไอน้ำ โดยใช้ถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์

จากรูป 3.28 พบว่าค่า  $H_2+CO$  มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 89.72 เป็น 85.86 โดยโมล เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณต่ำลง แสดงให้เห็นว่าในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชีเอ็ลล์โดยแกสิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ลดการเกิดปฏิกิริยา Tar cracking ดังสมการ 3.7 ทำให้ผลผลิตที่เป็นแก๊สสังเคราะห์คือไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากขาดตัวส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ที่อยู่ในถ่านหิน

จากรูป 3.29 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  คือ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณต่ำลง อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  ลดลงจากร้อยละ 2.53 เป็น 1.36 และมีค่าต่ำสุดที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเข้า 120 นาที

สำหรับอัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $CO/CO_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเข้า 60 นาที และมีค่าลดลงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ผ่านการชะละลายเข้า 120 นาที เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณของธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในถ่านหินที่มีผลต่อปฏิกิริยาในกระบวนการแกสิฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงส่งผลให้อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $CO/CO_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในถ่านหิน

#### 3.7.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของชีเอ็ลล์และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

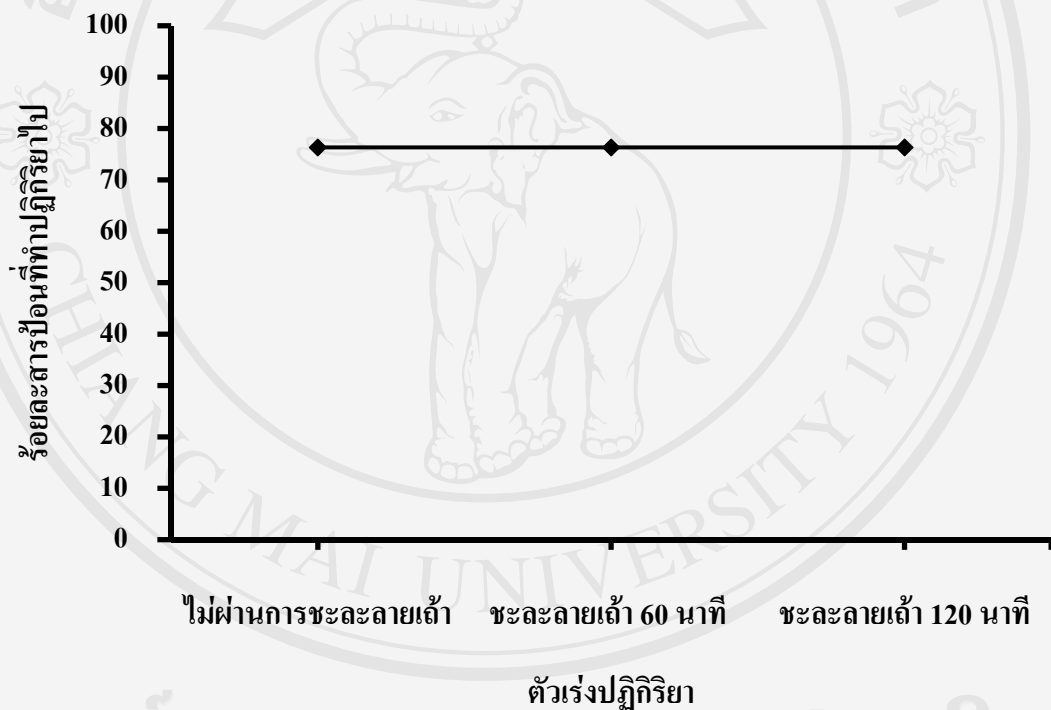
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของชีเอ็ลล์และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด แสดงดังรูป 3.30 และ 3.31 ตามลำดับ

จากรูป 3.30 พบว่าร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของชีเอ็ลล์มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบ 2 ขั้นตอน โดยที่ชีเอ็ลล์จะอยู่ในส่วนของขั้นตอนแรกคือ Devolatilizer ดังแสดงในรูป 2.1 (ในบทที่ 2) ส่วนขั้นตอนสองเป็น Fixed bed reactor ซึ่งจะเป็นส่วนที่เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ ดังนั้นร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของชีเอ็ลล์จึงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูป 3.31 ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเข้าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณมากที่สุดคือ 83.81 และมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยที่สุด

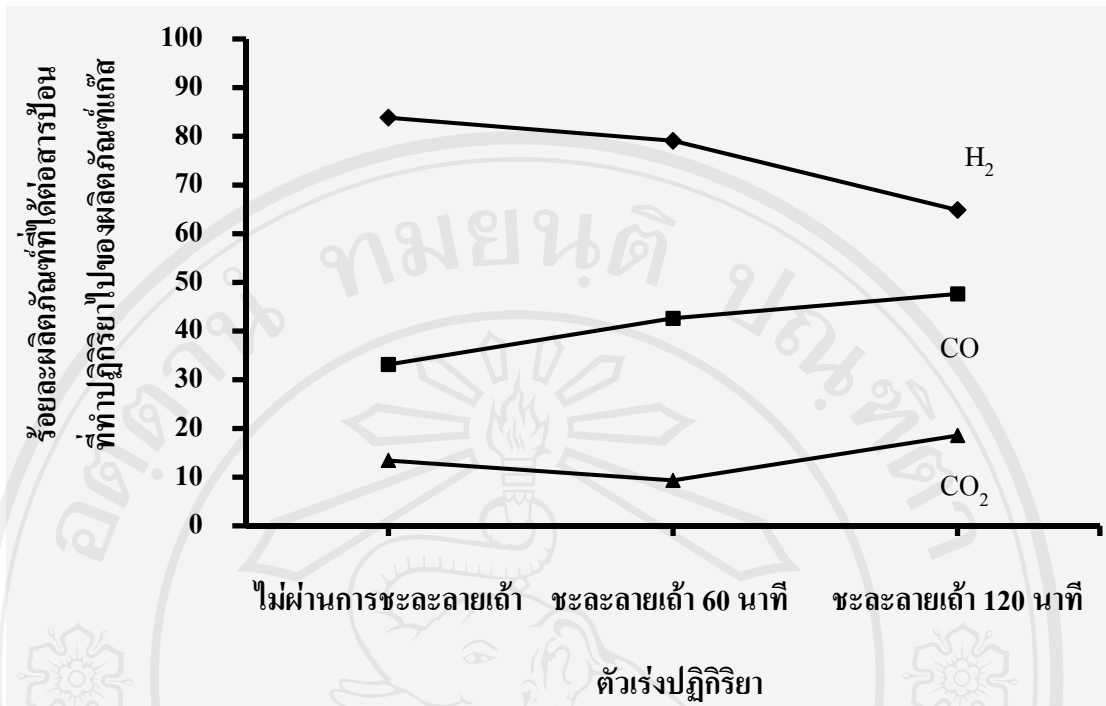
ดังนั้นสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเข้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนได้มากที่สุดในการผลิตแก๊ส

ไฮโดรเจนจากชี้เลื้อยโดยแกสฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ  $H_2/CO$  และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป

ผลงานวิจัยนี้พบว่ามีความถูกต้องและแม่นยำเพียงพอที่จะใช้เป็นข้อมูลและต้นแบบ ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชีวมวลด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ อีกทั้งยังสามารถเป็นแนวทางในการปรับปรุงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบต่อไป ดังจะเห็นได้จากผลของการทำสมดุลคาร์บอน ซึ่งในการทำสมดุลคาร์บอนแสดงในภาคผนวก ญ



รูป 3.30 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของชี้เลื้อย



รูป 3.31 ผลตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส

### 3.8 การเปรียบเทียบผลงานวิจัยกับผลงานวิจัยต่างประเทศ

จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้เท่ากับ 700 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 30 กิโลปาสกาล ปริมาณขี้เถ้าประมาณ 1 กรัม อัตราส่วนโดยมวลของขี้เถ้าต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1:3 และใช้ถ่านหินที่ไม่ผ่านการชะละลายเถ้าเตรียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น แสดงดังตาราง 3.8

นอกจากนี้ผลงานวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า ในกรณีของถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นตัวรองรับในงานวิจัยนี้ไม่ควรทำการชะละลายเถ้าทำการชะละลายเถ้า เพราะมีความเป็นไปได้ที่โลหะในองค์ประกอบของถ่านหิน อาจเป็นตัวเปลี่ยนหรือเร่งให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สฟิเคชันมากขึ้น

ตาราง 3.8 การเปรียบเทียบงานวิจัยกับงานวิจัยอื่น

| งานวิจัย                      | เครื่องปฏิกรณ์                     | ชีวมวล         | สภาวะการทดลอง          | ตัวเร่งปฏิกิริยา   | ผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยโมล) |       |                 |                        | H <sub>2</sub> /CO |
|-------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------|--------------------|------------------------------|-------|-----------------|------------------------|--------------------|
|                               |                                    |                |                        |                    | H <sub>2</sub>               | CO    | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> +อื่นๆ |                    |
| Chanchal Loha <sup>(45)</sup> | Fluidized bed gasifier             | Rice husk      | T = 750 °C, S/B = 1.00 | Steam gasification | 49.50                        | 23.70 | 21.20           | 5.60                   | 2.09               |
| M.K. Karmakar <sup>(46)</sup> | Fluidized bed gasifier             | Rice husk      | T = 650 °C, S/B = 1.32 | Steam gasification | 47.25                        | 11.25 | 31.90           | 9.60                   | 4.20               |
|                               |                                    |                | T = 750 °C, S/B = 1.00 |                    | 48.88                        | 22.70 | 22.20           | 6.22                   | 2.15               |
| Xianbin Xiao <sup>(47)</sup>  | Fluidized bed gasifier             | Manure compost | T=600 °C               | Ni/Alumina         | 55.22                        | 10.44 | 29.63           | 4.71                   | 5.29               |
| M. Detournay <sup>(48)</sup>  | Fluidized bed gasifier             | Wood sawdust   | T=700 °C               | Ni/Alumina         | 58.00                        | 21.00 | 17.00           | 4.00                   | 2.76               |
| Shou-Yu Zhang <sup>(49)</sup> | Two stage fixed-bed quartz reactor | Pig compost    | T=650 °C               | Ni/Alumina         | 59.72                        | 28.37 | 9.94            | 1.97                   | 2.11               |

ตาราง 3.8 การเปรียบเทียบงานวิจัยกับงานวิจัยอื่น (ต่อ)

| งานวิจัย                         | เครื่องปฏิกรณ์              | ชีวมวล                 | สภาวะการทดลอง | ตัวเร่งปฏิกิริยา                             | ผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยโมล) |       |                 |                         | H <sub>2</sub> /CO |
|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------|----------------------------------------------|------------------------------|-------|-----------------|-------------------------|--------------------|
|                                  |                             |                        |               |                                              | H <sub>2</sub>               | CO    | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> + อื่นๆ |                    |
| Jianfen Li <sup>(50)</sup>       | Fixed bed reactor           | Palmoil wastes         | T=800 °C      | Calcined dolomite                            | 40.60                        | 12.70 | 26.60           | 20.10                   | 3.20               |
|                                  |                             |                        |               | nano-NiLaFe/g-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 53.60                        | 20.50 | 20.90           | 5.00                    | 2.61               |
| P. Azadi <sup>(51)</sup>         | Batch microreactor          | Glucose                | T=370 °C      | Raney-Ni 4200                                | 29.70                        | 0.00  | 45.54           | 24.75                   |                    |
| Toshiaki Hanaoka <sup>(52)</sup> | Downdraft fixed-bed         | Cellulose              | T=900 °C      | Air-steam gasification                       | 28.70                        | 35.50 | 27.00           | 8.80                    | 0.81               |
|                                  |                             | Xylan                  |               |                                              | 32.40                        | 24.80 | 35.60           | 7.20                    | 1.31               |
|                                  |                             | Lignin                 |               |                                              | 32.10                        | 25.80 | 35.70           | 6.30                    | 1.24               |
|                                  |                             | Japanese oak           |               |                                              | 22.00                        | 39.90 | 23.40           | 14.70                   | 0.55               |
|                                  |                             | Japanese red Pine bark |               |                                              | 31.00                        | 25.60 | 34.70           | 8.70                    | 1.21               |
| งานวิจัยนี้                      | Two-stage fixed-bed reactor | ชี้เลื่อยไม้สัก        | T= 700 °C     | Ni brown coal                                | 64.30                        | 25.42 | 10.29           | traces                  | 2.53               |