

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งชีวมวลที่นำมาศึกษาคือ แกลบ ซึ่งเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน ในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวล ได้แก่ อุณหภูมิ และอัตราการป้อนของไอน้ำ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ คือ แกมมาอะลูมินา โพลัสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา และโพลัสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา พร้อมทั้งศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้และร้อยละของโพลัสเซียมคาร์บอเนตในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

ตาราง 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของแกลบ

(แกลบจาก ศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ จ.นครราชสีมา)

| ชนิดของเชื้อเพลิง | องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | | | |
|-------------------|-------------------------------|-------|----------|--------------|
| | ความชื้น | เถ้า | สารระเหย | คาร์บอนคงตัว |
| แกลบ | 9.02 | 23.55 | 51.57 | 15.86 |

ตาราง 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของแกลบ

| ชนิดของเชื้อเพลิง | ธาตุ (% daf) [*] | | | | |
|-------------------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | คาร์บอน | ไฮโดรเจน | ไนโตรเจน | ออกซิเจน | ซัลเฟอร์ |
| แกลบ | 41.66 | 5.93 | 0.88 | 51.53 | - |

^{*} daf = dry ash free

การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ เป็นการวิเคราะห์ในขั้นแรกเพื่อศึกษาสมบัติของตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ใช้ คือ แกลบ แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า แกลบมีสารระเหยเป็นองค์ประกอบมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกแกลบเป็นวัตถุดิบในการทดลอง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของน้ำมันทาร์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของแก๊สเพิ่มมากขึ้นในการกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าการแกซิฟายแกลบสามารถให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ

4.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

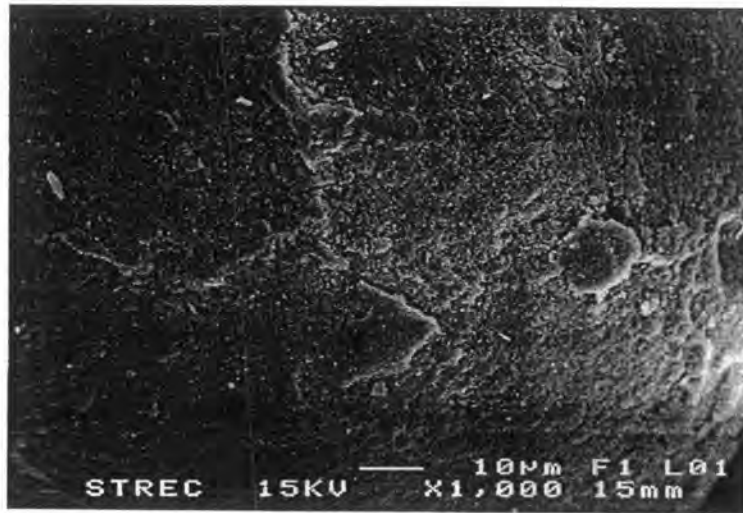
ศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET (BET Surface Area) ดังตารางที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 4.1 และแสดงผลวิเคราะห์ธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray (EDX) ดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET ก่อนใช้

| สารตัวอย่าง | พื้นที่ผิว BET (ตร.ม./กรัม) | ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม) |
|---|-----------------------------|--|
| Al ₂ O ₃ | 245.66 | 0.65 |
| K ₂ CO ₃ /Al ₂ O ₃ | 140.89 | 0.37 |
| NiO/Al ₂ O ₃ | 171.71 | 0.39 |
| K ₂ CO ₃ /Ni/Al ₂ O ₃ | 127.93 | 0.32 |

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET (BET Surface Area) ดังตารางที่ 4.3 พบว่าอะลูมินามีค่าพื้นที่ผิว BET สูง เนื่องจากอะลูมินาที่ใช้ศึกษาอยู่ในรูปของแกมมา-อะลูมินา ซึ่งเป็นรูปที่มีความเป็นรูพรุนสูงดังจะเห็นจากผลการวิเคราะห์ห่ามีพื้นที่ผิวสูง เมื่ออะลูมินาผ่านการฝังตัว (impregnation) ด้วยนิกเกิลและโพแทสเซียมแล้วพบว่า มีค่าพื้นที่ผิว BET ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากนิกเกิลและโพแทสเซียมจะไปเกาะหรือฝังตัวที่บริเวณผิวและปากของรูพรุนของอะลูมินา เมื่อปริมาณของนิกเกิลและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิว

BET ของตัวเร่งปฏิกิริยาจะยังมีค่าลดลง เนื่องจากมีปริมาณของนิกเกิลและโพแทสเซียมไปเกาะที่บริเวณปากของรูพรุนเพิ่มขึ้น



(ก)

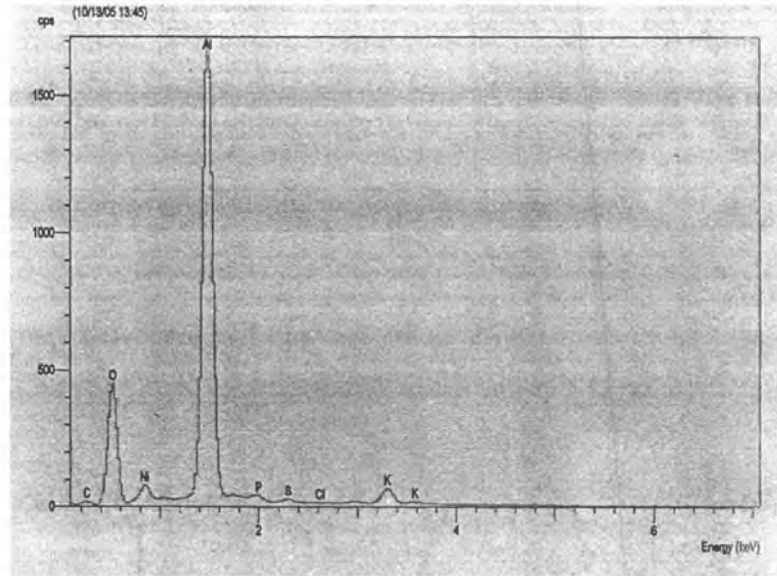


(ข)

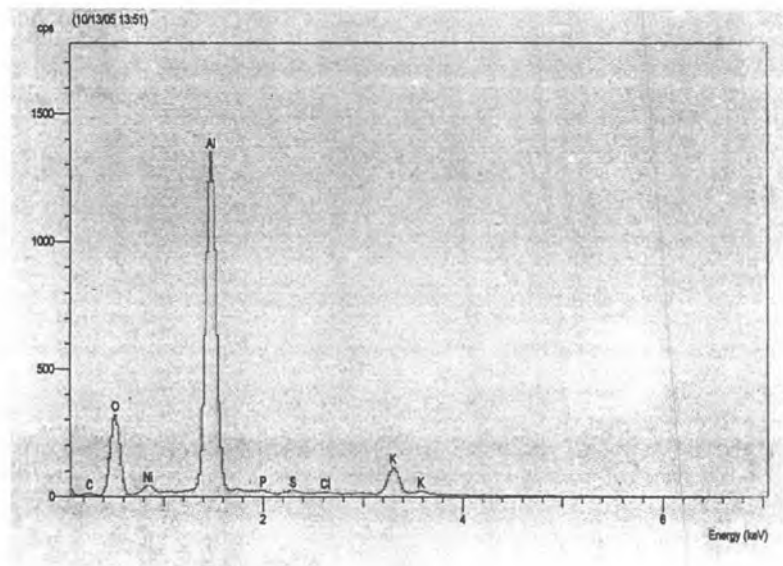
รูปที่ 4.1 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง SEM: (ก) 5% $K_2CO_3/NiO/\gamma-Al_2O_3$ (ข) 9% $K_2CO_3/NiO/\gamma-Al_2O_3$

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและเป็นรูพรุน มีการเกาะตัวของโพแทสเซียมกระจายทั่วพื้นผิว โดยเมื่อร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การ

กระจายตัวของโพแทสเซียม ในตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากโพแทสเซียมที่เกาะอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีโอกาสเกิดการกระจายตัวของโพแทสเซียมทั่วพื้นผิวสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



(ก)



(ข)

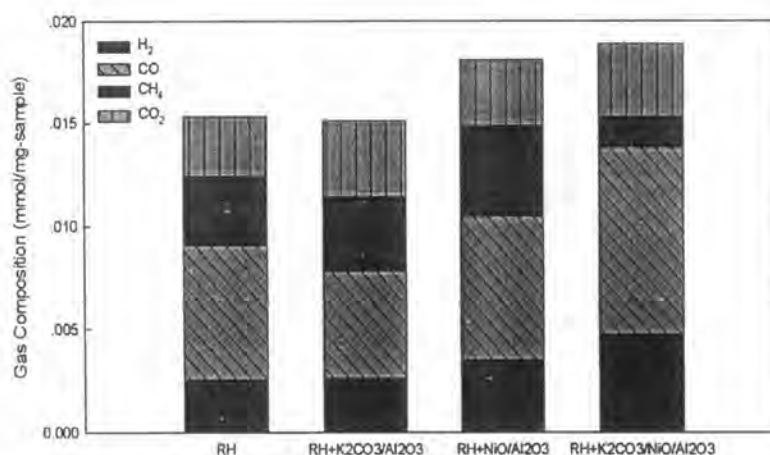
รูปที่ 4.2 วิเคราะห์ธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง EDX: (ก) 5% $K_2CO_3/NiO/\gamma-Al_2O_3$ (ข) 9% $K_2CO_3/NiO/\gamma-Al_2O_3$

การวิเคราะห์ธาตุนบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray (EDX) ดังรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมลงไปจะสังเกตเห็นพีคของโพแทสเซียมสูงขึ้น ซึ่งยืนยันปริมาณของโพแทสเซียมที่มากขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3 ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

ในกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และร้อยละของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์

4.3.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

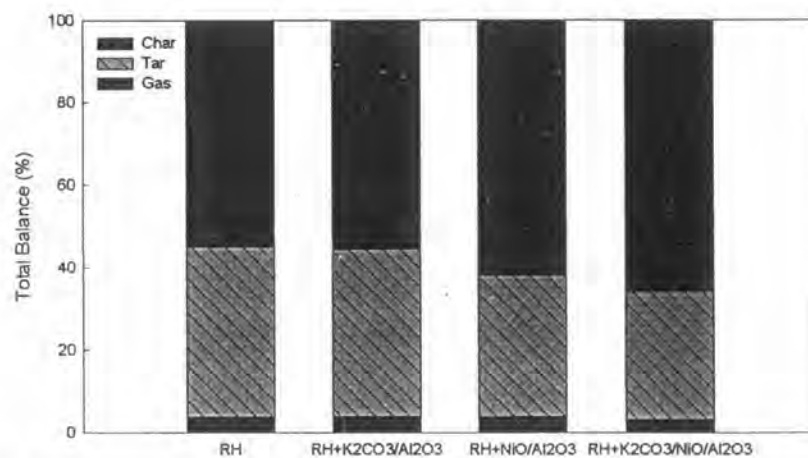


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา (K_2CO_3/Al_2O_3 , NiO/Al_2O_3 และ $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3$) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/Al_2O_3) นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (NiO/Al_2O_3) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ($K_2CO_3/NiO/Al_2O_3$) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา < นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา < โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ตามลำดับ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา ช่วยในการป้องกันการเกาะติดของคาร์บอนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Zhang et al., 2004) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวให้ผลิตภัณฑ์แก๊สค่อนข้างต่ำ และเมื่อพิจารณาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมสูง โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากการเกาะติดของคาร์บอนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงพัฒนาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-

นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น และผลิตภัณฑ์แก๊สมีเทนลดลง ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี โดยโพแทสเซียมเป็นตัวส่งเสริม (promoter) การกำจัดไค้กบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีและส่งผลให้ช่วยลดปริมาณน้ำมันทาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เมื่อพิจารณาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 16.85 เป็นร้อยละ 17.29 ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 19.49 และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25.25

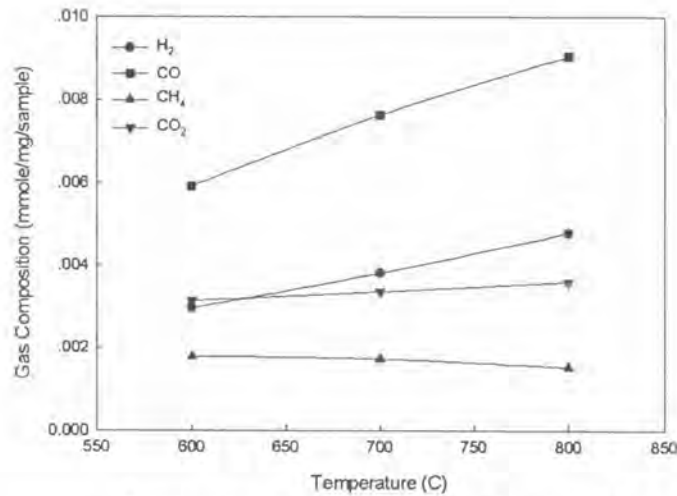


รูปที่ 4.4 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด (K_2CO_3/Al_2O_3 , NiO/Al_2O_3 และ $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3$) ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด จากกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำมันทาร์ลดลง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา < นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา < โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี โดยปริมาณไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณทาร์ที่ลดลงยังเป็นสัดส่วนที่

น้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากความสูงเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองยังไม่สูงมากทำให้เวลาในการสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาล้น ดังนั้นปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์อาจยังเกิดไม่สมบูรณ์

4.3.2 ผลของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิ (600 700 และ 800 องศาเซลเซียส) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสของแกลบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณโดยรวมของผลิตภัณฑ์แก๊ส และสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แก๊สมีเทนลดลงเล็กน้อย และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20.43 เป็นร้อยละ 25.25 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊ส H_2 เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (thermal cracking) สามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยา (4.1-4.2) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า

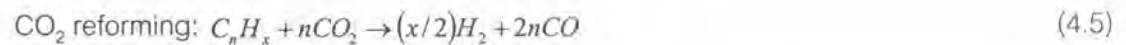


และผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

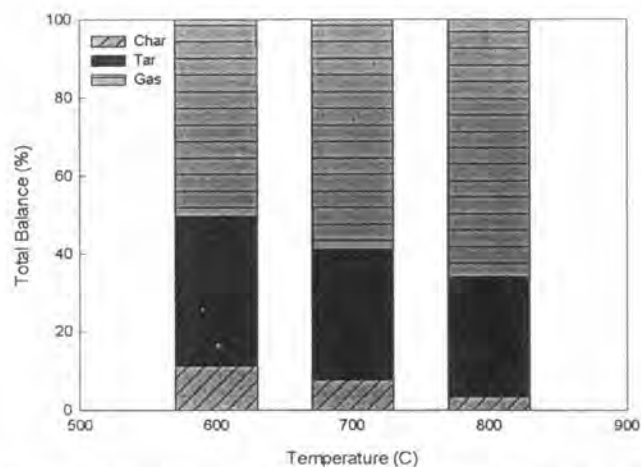


เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า ซึ่งปฏิกิริยาเบาดาด (Boudouard) เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป (excess carbon) ในอนุภาคของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

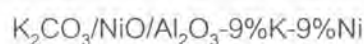
ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยสามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



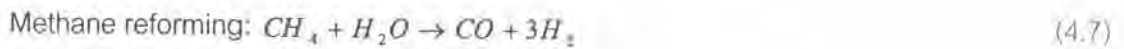
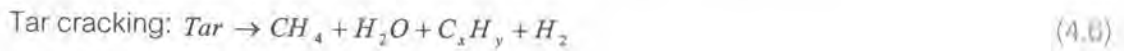
โดยปฏิกิริยา (4.4) และ (4.5) เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผลิตด้วยปฏิกิริยาที่ (4.4) แต่ถูกใช้ในปฏิกิริยาที่ (4.5)



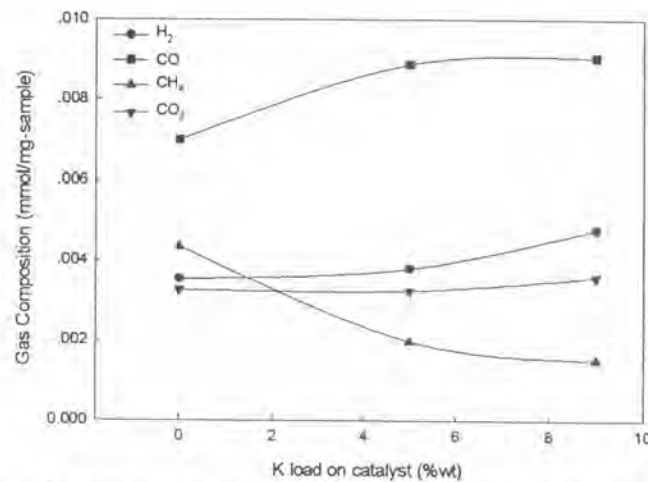
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจากกระบวนการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา



และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมดจากกระบวนการไพโรไลซิสของแกลบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณซาร์และทาร์ลดลง ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาการแตกตัวจะเกิดขึ้นได้ดีทำให้เกิดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบามากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น สารไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ดังปฏิกิริยาด้านล่างนี้ซึ่งล้วนเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน



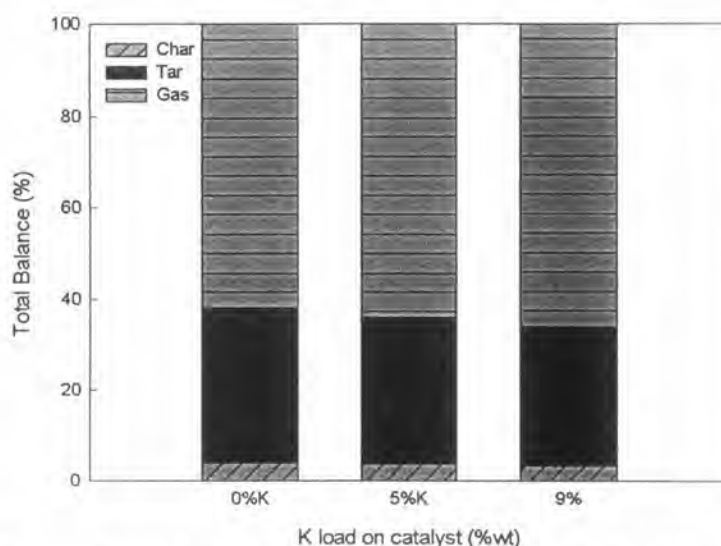
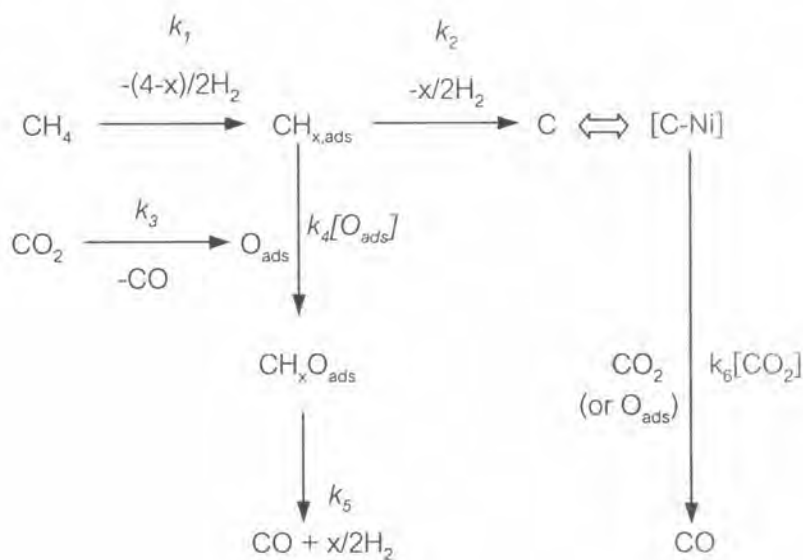
4.3.3 ผลของร้อยละโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของร้อยละโพแทสเซียม (0% 5% และ 9%โพแทสเซียม) ในตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ผลของร้อยละโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยา (0% 5% และ 9%) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าโพแทสเซียมมีผลต่อสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิด โดยร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 9 ส่งผลให้สัดส่วนของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 19.49 เป็นร้อยละ 25.25 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นโลหะว่องไวจะทำให้ตำแหน่งที่ถูกกระตุ้น (active site) เพิ่มมากขึ้น โดยตำแหน่งที่ถูกกระตุ้นนี้คือตำแหน่งที่ตัวเร่ง

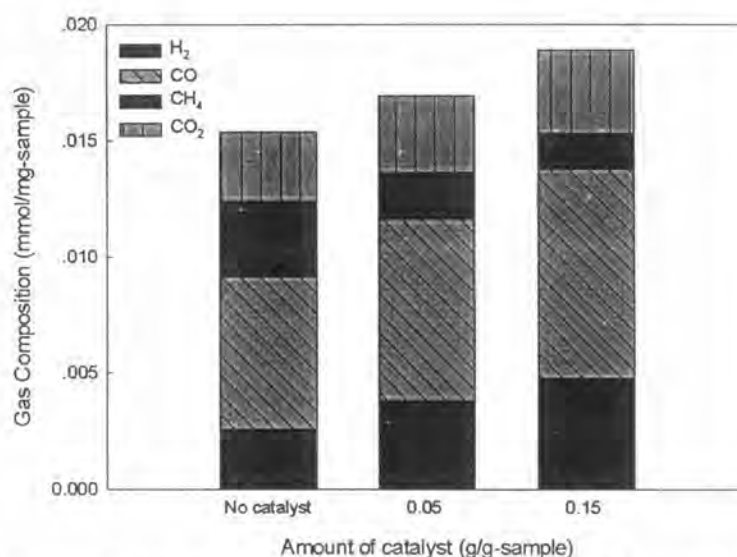
ปฏิกิริยาจับกับคาร์บอน ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (dry reforming) (ดังสมการ (4.5)) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณมีเทนที่ลดลง จากข้อมูลและสมมติฐานเบื้องต้นสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้ แก๊สมีเทนแยกตัวออก (dissociation) เป็น $CH_{x,ads}$ และ $(4-x)/2H_2$ หลังจากนั้น $CH_{x,ads}$ แยกตัวออกเป็น C และ $x/2H_2$ โดย CO_2 แยกตัวออกเป็น CO และ O_{ads} ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวระหว่าง $CH_{x,ads}$ และ O_{ads} ไปเป็น CH_xO_{ads} หลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยา $CH_xO_{ads} \rightarrow CO + x/2H_2$ และการเผาไหม้ของคาร์บอนที่เกาะบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย CO_2 (Osaki and Mori, 2001) ดังแสดงในปฏิกิริยาข้างล่างนี้



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของร้อยละโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด: 0% (NiO/ γ - Al_2O_3) 5% และ 9%K ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลของร้อยละโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยา (0% 5% และ 9%) ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า โพแทสเซียมส่งผลต่อการแตกตัวของทาร์น้อย เมื่อร้อยละโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งมีงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลช่วยในการป้องกันการเกาะติดของคาร์บอนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าเร่งการแตกตัวของน้ำมันทาร์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลเป็นตัวช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำมันทาร์ได้ดีกว่า (Osaki and Mori, 2001) สังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลช่วยปรับสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สให้ได้แก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น

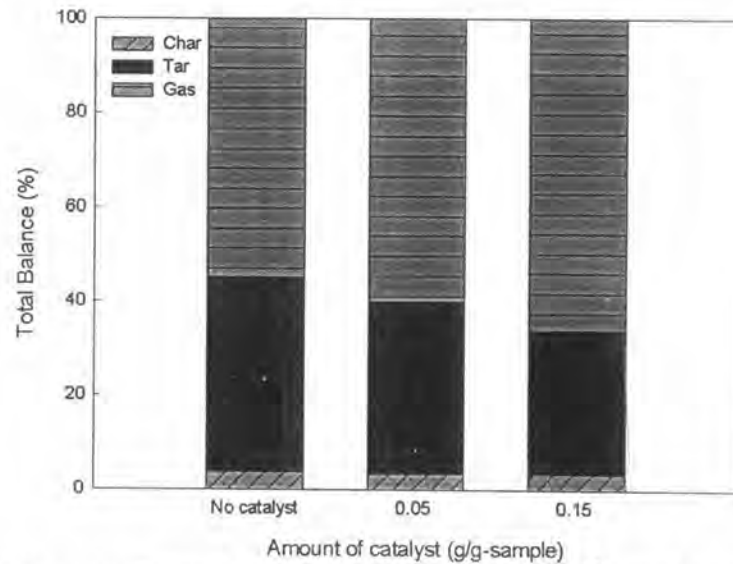
4.3.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3$ -9%K-9%Ni

ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น แก๊สมีเทนลดลง และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.15 ร้อยละของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 22.61 เป็น 25.25 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มความสูงเบดของ

ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเพิ่มเวลาการสัมผัส (contact time) ระหว่างสารระเหยง่าย (volatile matter) กับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (tar cracking) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน (methane reforming) จะเพิ่มขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น (อธิบายได้จากสมการ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ)



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ($K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$)

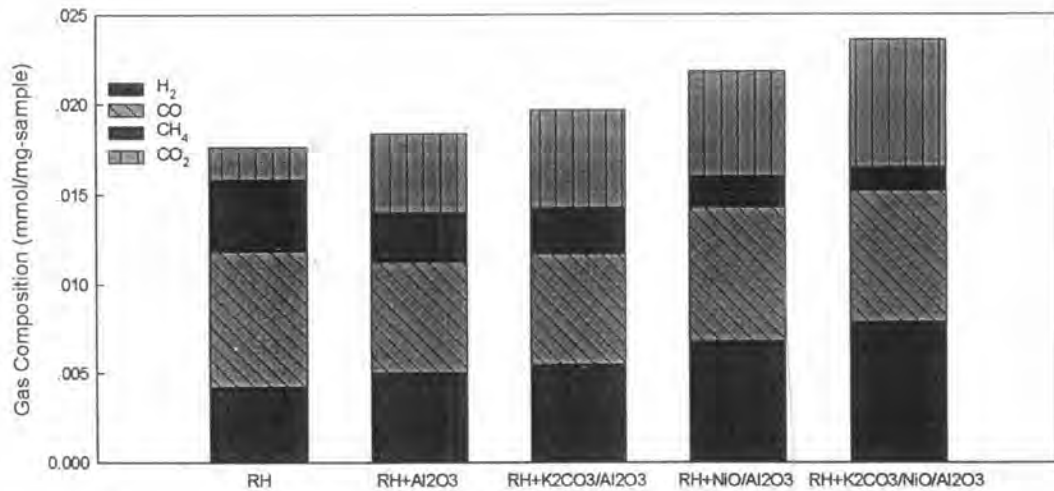
จากรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เพิ่มขึ้น ปริมาณชาร์ค่อนข้างคงที่ และปริมาณทาร์ลดลง ในขณะที่ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ได้ ซึ่งเป็นผลของนิกเกิลที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการแตกตัวของทาร์ ไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น (Pengmei Lv et al., 2003 and Asadullah et al., 2002)

4.4 แกซีฟิเคชันของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

ในกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวล ได้ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ และเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิส รวมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราการป้อนไอน้ำ ระยะเวลาสารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time)

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ และการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.4.1 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน



รูปที่ 4.11 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่ออนาที

เมื่อพิจารณาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแกมมาอะลูมินา < โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา < นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา < โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินาช่วยเร่งปฏิกิริยาชิฟท์ (water-gas shift) ได้ดี ดังแสดงในปฏิกิริยา (4.8) โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินาช่วยเร่งปฏิกิริยาอีพอร์มิงด้วยไอน้ำของมีเทน ได้ดี ดังแสดงในปฏิกิริยา (4.9) โดยแก๊สมีเทนทำปฏิกิริยากับไอน้ำเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์



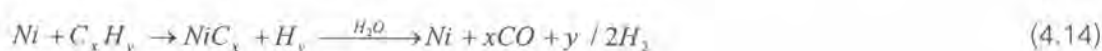
เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา พบว่าปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นกว่ากรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากนิกเกิลช่วยในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีแต่เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย จากการเกาะติดของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อมีโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดการเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (Ruiqin Zhang et al., 2003) ช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวรักษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (tar cracking) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน (methane reforming) จะเพิ่มขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น (อธิบายได้จากสมการ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ) นอกจากนี้โพแทสเซียมคาร์บอเนตยังช่วยเร่งปฏิกิริยา water-gas shift ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแกซีฟิเคชัน มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 23.13 เป็นร้อยละ 27.88 ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 31.19 และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 33.47

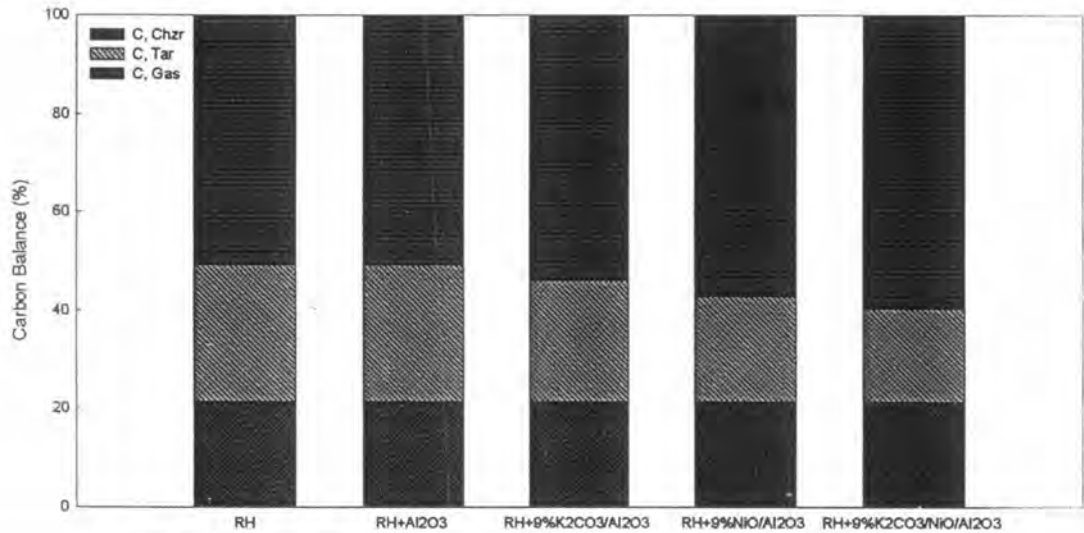
กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนตแสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.10)-(4.13) (Veraa and Bell, 1977)



และกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.14)



จากสมการ (4.14) นิกเกิลจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็นนิกเกิลคาร์ไบด์ (NiC_x) และไฮโดรเจน จากนั้นนิกเกิลคาร์ไบด์จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส



รูปที่ 4.12 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ให้ปริมาณทาร์ลดลงมากที่สุด ปริมาณชาร์ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ได้ ซึ่งอาจเนื่องจากนิกเกิลที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีผลต่อการแตกตัวของทาร์ โดยทำปฏิกิริยากับไอน้ำไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณชาร์คที่ได้คงที่ เนื่องจากปริมาณชาร์คที่ได้ไม่สัมผัสกับไอน้ำโดยตรง มีเพียงผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันทาร์ที่ได้จากขั้นตอนในกระบวนการไพโรไลซิสเท่านั้นที่สัมผัสกับไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น

4.4.2 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและแกซีฟิเคชัน

ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ คือ แกมมาอะลูมินา โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา และโพแทสเซียมคาร์บอเนต-

นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน ถูกแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

| | แกลบ | | แกลบ + K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃ | | แกลบ + NiO/γ-Al ₂ O ₃ | | แกลบ + K ₂ CO ₃ /NiO/γ-Al ₂ O ₃ | |
|-----------------|-------------------|-------------|---|-------------|---|-------------|---|-------------|
| | ไพโรไลซิส | แกซิฟิเคชัน | ไพโรไลซิส | แกซิฟิเคชัน | ไพโรไลซิส | แกซิฟิเคชัน | ไพโรไลซิส | แกซิฟิเคชัน |
| | (mmole/mg-sample) | | (mmole/mg-sample) | | (mmole/mg-sample) | | (mmole/mg-sample) | |
| H ₂ | 0.00259 | 0.00426 | 0.00262 | 0.00549 | 0.00353 | 0.00682 | 0.00477 | 0.00790 |
| CO | 0.00653 | 0.00757 | 0.00524 | 0.00622 | 0.00699 | 0.00744 | 0.00904 | 0.00729 |
| CH ₄ | 0.00335 | 0.00404 | 0.00357 | 0.00253 | 0.00434 | 0.00176 | 0.00151 | 0.00131 |
| CO ₂ | 0.00291 | 0.00178 | 0.00372 | 0.00546 | 0.00326 | 0.00583 | 0.00358 | 0.00710 |

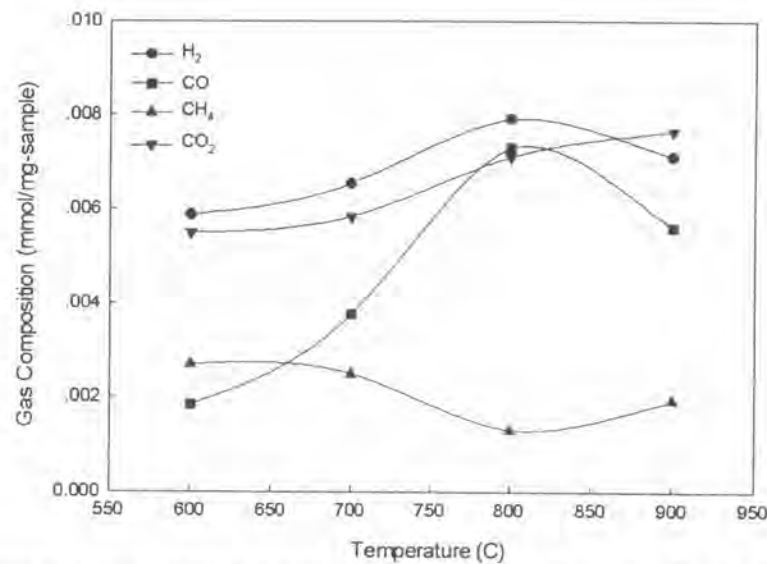
การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่ากรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชันให้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงชันกว่าในกระบวนการไพโรไลซิส โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจนสูงชันประมาณ 2 เท่า ซึ่งอาจอธิบายได้จากปฏิกิริยาสตีม-รีฟอร์มมิง (steam reforming) แสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.15) โดยไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสทำปฏิกิริยากับไอน้ำในกระบวนการแกซิฟิเคชันส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนสูงชัน



ส่วนกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชันเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส พบว่ากระบวนการแกซิฟิเคชันให้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงชันกว่าในกระบวนการไพโรไลซิส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินาให้แก๊สไฮโดรเจนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา และโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา ตามลำดับ และยังพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินาให้แก๊สไฮโดรเจนสูงชันประมาณ 3 เท่าของกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งได้อธิบายเหตุผลดังกล่าวมาก่อนหน้านี้แล้วว่านิกเกิลช่วยในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีแต่เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากการเกาะติดของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อมีโพแทสเซียมคาร์บอเนตในตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วยจะช่วย

ลดการเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาได้ดี โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเร่งปฏิกิริยาได้ดีเมื่อมีไอน้ำเข้าร่วมทำปฏิกิริยาในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (tar cracking) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน (methane reforming) จะเพิ่มขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น (อธิบายได้จากสมการ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ)

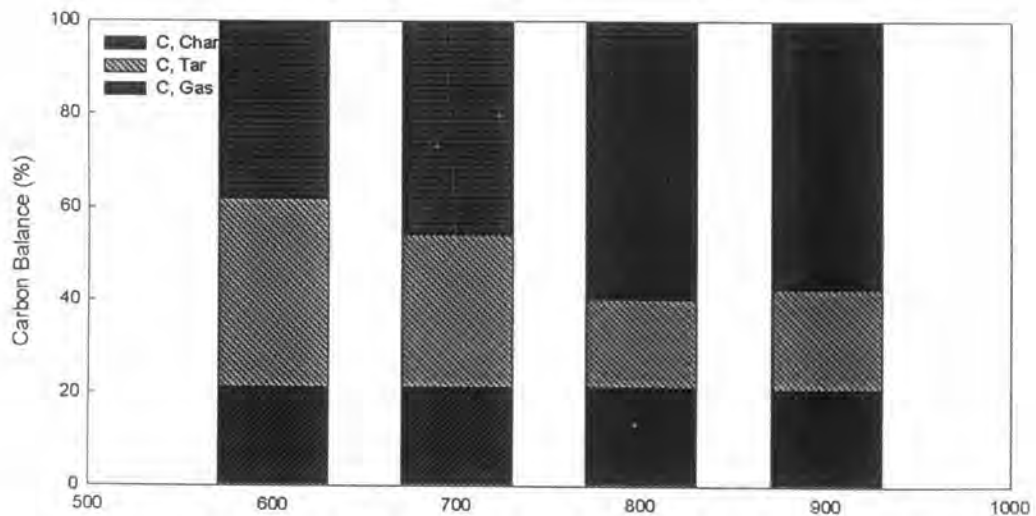
4.4.3 ผลของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิ (600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$ และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลของอุณหภูมิ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไพแทลเซียมคาร์บอนเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์ และสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น แก๊สมีเทนลดลง และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO) เท่ากับ 1.08 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 900 องศาเซลเซียสพบว่าปริมาณโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์ และสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊ส H_2 เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (thermal cracking) สามารถอธิบายได้ดังปฏิกิริยา (4.1-4.2) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า ซึ่งการเพิ่มของผลิตภัณฑ์

แก๊สลดคล่องกับการเพิ่มของอุณหภูมิสามารถอธิบายได้หลายเหตุผล เช่น (i) ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งเป็นกระบวนการแรกก่อนเข้าสู่กระบวนการแกซิฟิเคชันโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ii) ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันของซาร์ (char gasification) เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า (iii) การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์แก๊สอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง (steam reforming) และการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ (C. Franco et al., 2002) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 900 องศาเซลเซียสพบว่าปริมาณโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์และสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดลดลง อาจเนื่องมาจากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการรวมตัวกัน (sintering) ที่อุณหภูมิสูง เพราะโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีจุดหลอมตัว (melting point) ที่อุณหภูมิ 891 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวอาจเปลี่ยนโครงสร้าง และสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ และจากเหตุผลที่ว่า แกมมาอะลูมินาเป็นโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสูง แต่ถ้าได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิขึ้นไปสูงถึง 850 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นเดลต้าอะลูมินา ซึ่งโครงสร้างจะเกิดการพังตัวเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่มีรูพรุนไปเป็นโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น และมีพื้นที่ผิวลดลง (ธรรร มงคลศรี) ซึ่งพิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET หลังใช้ แสดงดังตารางที่ 4.8 และผลจากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 4.23

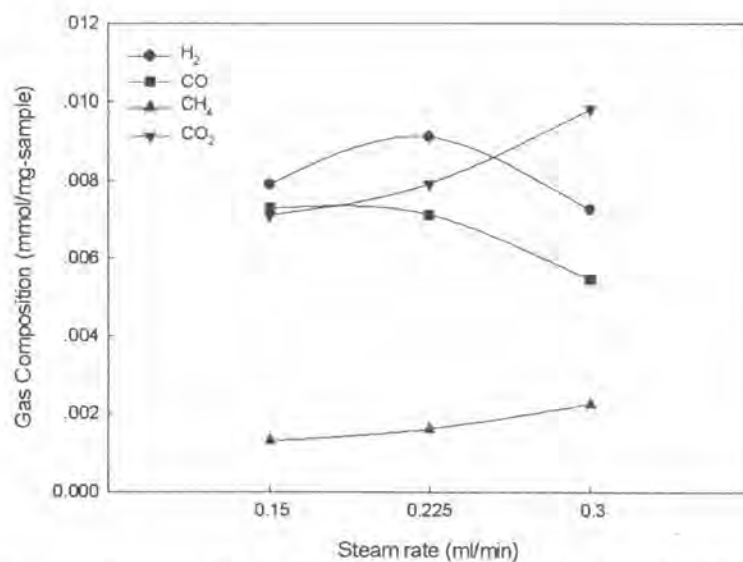


รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิ (600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส) ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยให้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$ และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำมันทาร์ลดลง ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าปริมาณไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังปฏิกิริยาที่ (4.6) และ (4.7) แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณน้ำมันทาร์เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงเกินไปส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งได้อธิบายเหตุผลไว้ก่อนหน้านี้แล้ว

4.4.4 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำ

จากการทดลอง ศึกษาผลของอัตราการป้อนไอน้ำโดยปริมาณน้ำหนักของแกลบคองที่ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด และผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ถูกแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

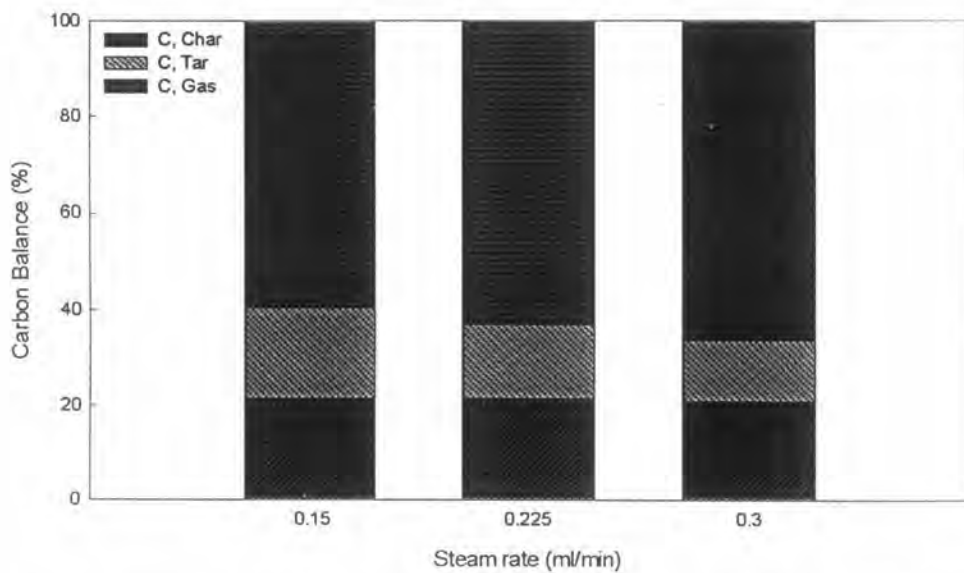
$K_2CO_3/NiO/Al_2O_3$ -9%K-9%Ni ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ผลของอัตราการป้อนไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าอัตราการป้อนไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา มีผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสโดยอัตราการ

ป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0.15 – 0.225 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง อธิบายได้ดังปฏิกิริยาที่ (4.16) แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมดของการใช้ไอน้ำที่ 0.225 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ค่าใกล้เคียงกับการใช้ไอน้ำที่ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO) เท่ากับ 1.08



แต่ถ้าไอน้ำมีมากเกินไป (อัตราการป้อนไอน้ำ 0.3 มิลลิลิตรต่อนาที) ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนตามปฏิกิริยาที่ (4.16) ทำให้ส่วนประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง แต่จากผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนลดลง อาจเป็นเพราะผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากปฏิกิริยาที่ (4.16) ไปเกิดปฏิกิริยาต่อโดยเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเมธานชัน (methanation) เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทน ดังสมการที่ (4.17)



รูปที่ 4.16 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลของอัตราการป้อนไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าอัตราการป้อนไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา มีผลต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยอัตราการป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้น ให้ปริมาณน้ำมันทาร์ลดลง และผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากปริมาณไอน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์

4.4.5 ผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (contact time) และผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time)

ผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (contact time) และผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time) สามารถศึกษาได้ 2 กรณี คือ อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (แก๊สไนโตรเจน) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการแกซีฟาย ดังนั้นจึงทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินาที่มีความสูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 1.7 กรัม) โดยการลดอัตราการไหลของแก๊สพา (ไนโตรเจน) และอัตราการป้อนไอน้ำในสัดส่วนที่เท่ากัน ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดและผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 4.17–4.18 ตามลำดับ ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 4.5 และระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์

| ตัวอย่าง | ระยะเวลาที่ใช้ (วินาที) |
|---|-------------------------|
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา สูง 1 เซนติเมตร | 0.036 |
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา สูง 1 เซนติเมตร | 0.012 |
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา สูง 2 เซนติเมตร | 0.024 |
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, Al ₂ O ₃ -ball สูง 2 เซนติเมตร | 0.023 |
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา+ Al ₂ O ₃ -ball สูง 2 เซนติเมตร | 0.023 |

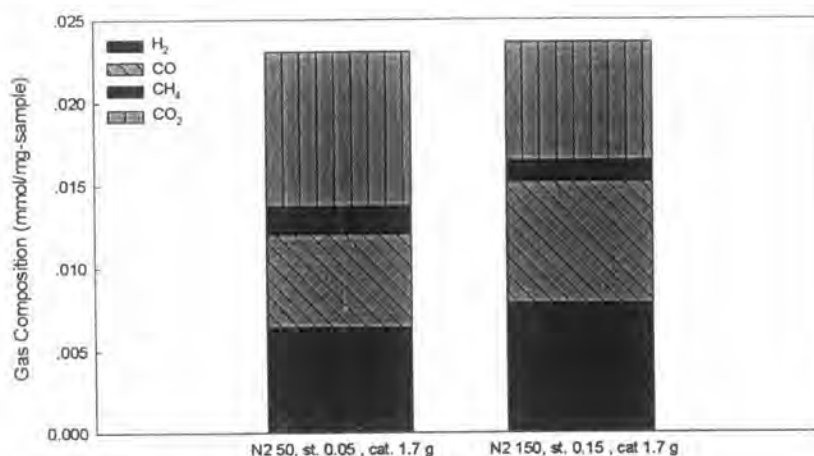
ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (contact time) แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสูงขึ้น 2 เท่า จะให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า และการลดอัตราการไหลของไนโตรเจนและไอน้ำ จะให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time) (base on: 2 cm.-height)

| ตัวอย่าง | ระยะเวลาที่ใช้ (วินาที) |
|--|-------------------------|
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ไม่มีเบด | 0.079 |
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา สูง 1 เซนติเมตร | 0.051 |
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา สูง 2 เซนติเมตร | 0.024 |
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, Al_2O_3 -ball สูง 2 เซนติเมตร | 0.023 |
| - อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา+ Al_2O_3 -ball สูง 2 เซนติเมตร | 0.023 |

ระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time) แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าการเพิ่มเบดสูงขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time) ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการมีเบดทำให้ปริมาตรช่องว่างลดลง โดยเบดจะขวางกั้นการไหลของแก๊ส ทำให้เกิดแรงดันสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดไหลผ่านเบดออกมาเร็วขึ้น

4.4.5.1 อัตราการไหลของแก๊สดัวพาและไอน้ำ



รูปที่ 4.17 ผลของการลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและไอน้ำ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

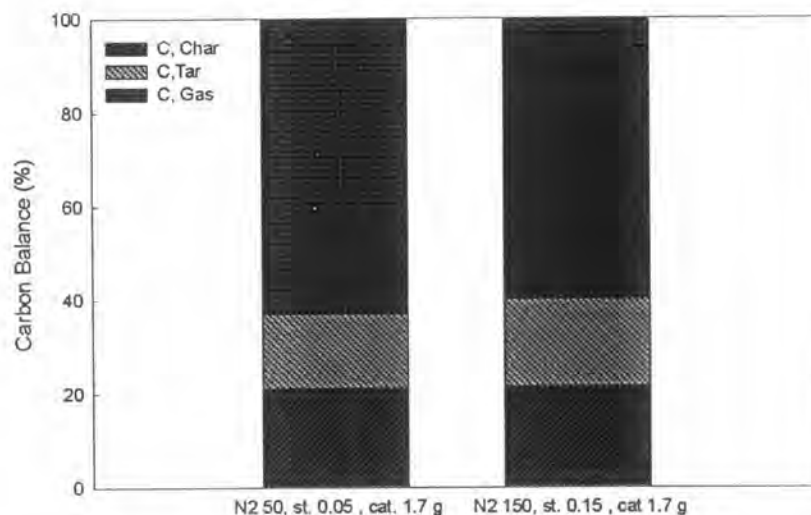
ผลของการลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โฟแทลเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าการลดอัตราการไหลของแก๊สดัวพาและไอน้ำ โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ ทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาและระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

และเมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด พบว่าอัตราการไหลของแก๊สดัวพาและไอน้ำ ลดลง ทำให้แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ส่วนแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงระยะเวลาหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาชิฟท์ (water-gas shift) ดังสมการ (4.18)



แต่เมื่อเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมทาเนชัน (methanation) โดยแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากปฏิกิริยาชิฟท์ (water-gas shift) ดังสมการ (4.18) จะเกิดปฏิกิริยาต่อไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น แสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.19)





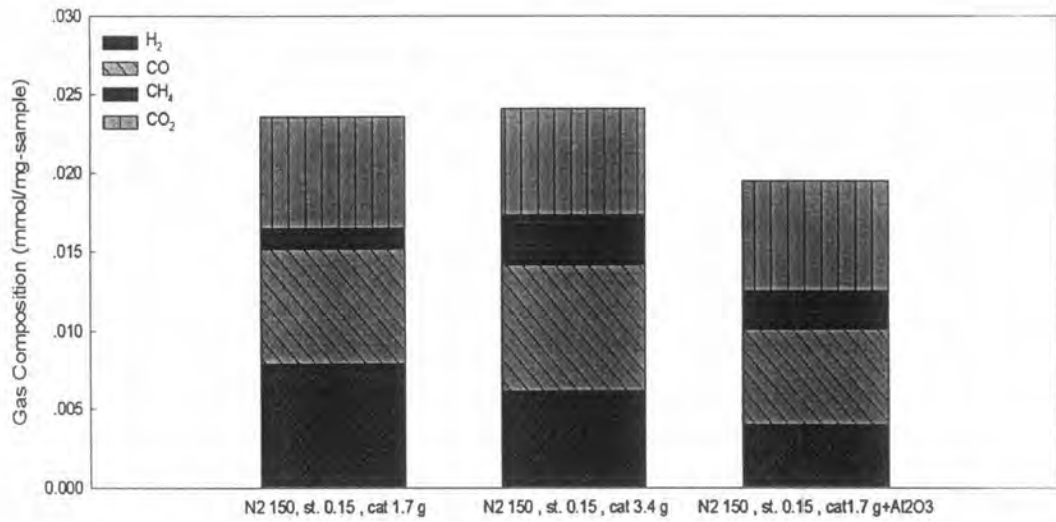
รูปที่ 4.18 ผลของการลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและไอน้ำ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3$ -9%K-9%Ni ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลของการลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและไอน้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าการลดอัตราการไหลของแก๊สตัวพาและไอน้ำ ทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.6 ส่งผลให้คาร์บอนในน้ำมันทาร์ลดลง ในขณะที่คาร์บอนในผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ได้ ซึ่งอาจเนื่องจากนิกเกิลที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการแตกตัวของทาร์ ไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น (Pengmei Lv et al., 2003 and Asadullah et al., 2002)

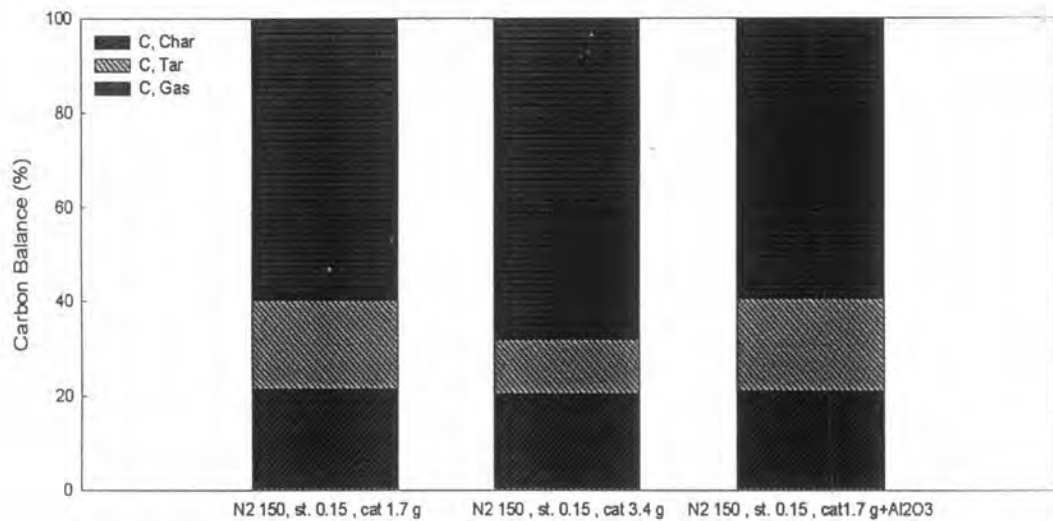
4.4.6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการแกซีฟิฟาย โดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินาที่ความสูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 1.7 กรัม), 2 เซนติเมตร (น้ำหนัก 3.4 กรัม), ใช้ Al_2O_3 -ball สูง 2 เซนติเมตร (น้ำหนัก 14.8 กรัม) และ Al_2O_3 -ball ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินาที่ความสูง 2 เซนติเมตร (น้ำหนัก 9.1 กรัม) ที่มีต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดและผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 4.19–4.20 ตามลำดับ

4.4.6.1 ปริมาณของเบตในการแกซีฟาย



รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณของเบตในการแกซีฟาย (1) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

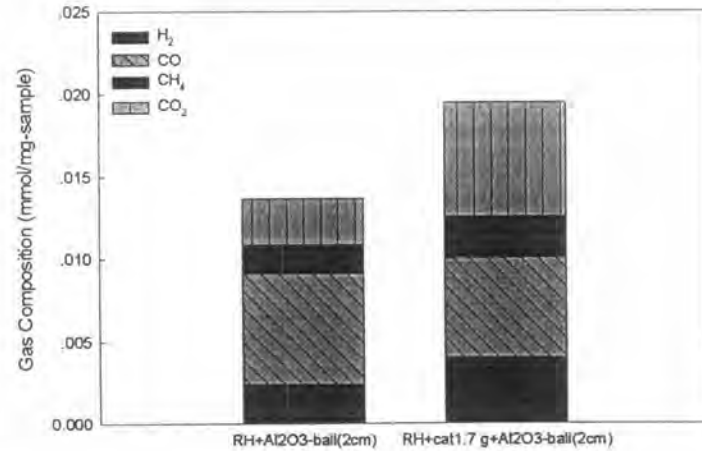


รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณของเบตในการแกซีฟาย (1) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

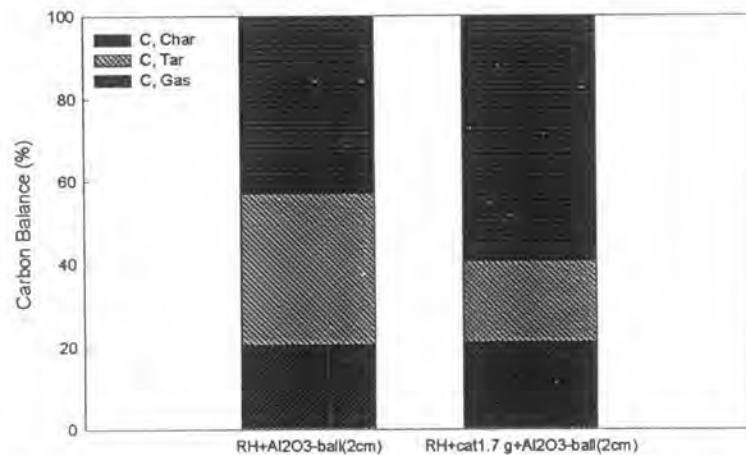
จากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนลดลง แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจอธิบายได้ว่ามีผลของตัวเร่งปฏิกิริยา และผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time) สวนทางกันอยู่ โดยการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์สูงขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มการเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่ระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time) ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการมีเบดทำให้ปริมาตรช่องว่างลดลง โดยเบดจะขวางกั้นการไหลของแก๊ส ทำให้เกิดแรงดันสูงขึ้น ส่งผลให้แก๊สไหลผ่านเบดออกมาเร็วขึ้น

และจากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 1.7 กรัม) ผสมกับ Al_2O_3 -ball ปริมาณน้ำมันทาร์ค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 1.7 กรัม) เนื่องจากผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (residence time) ลดลง ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า (น้ำหนัก 3.4 กรัม) ปริมาณน้ำมันทาร์ลดลง เมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 1.7 กรัม) ซึ่งอาจอธิบายได้ว่ามีผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยปริมาณไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น

ดังนั้นเมื่อต้องการศึกษาผลของปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องควบคุมระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากัน แสดงดังตารางที่ 4.6 โดยการเปรียบเทียบกับ การเพิ่มความสูงของเบด ซึ่งพิจารณาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 1.7 กรัม) ผสมกับ Al_2O_3 -ball สูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 7.4 กรัม) กับการใช้ Al_2O_3 -ball สูง 2 เซนติเมตร (น้ำหนัก 14.8 กรัม) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องต่อการเกิดปฏิกิริยา พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 1.7 กรัม) ผสมกับ Al_2O_3 -ball สูง 1 เซนติเมตร (น้ำหนัก 7.4 กรัม) ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวม และผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณน้ำมันทาร์ลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นผลจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.21-4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณของเบตในการแก๊สฟาย (2) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.22 ผลของปริมาณของเบตในการแก๊สฟาย (2) ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3-9\%K-9\%Ni$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

4.4.7 ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ ต่ำลง และยังช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ต้องการมากขึ้น แต่เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวอาจเกิด การหน่วงปฏิกิริยา เมื่อมีคาร์บอนมาเกาะติดที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบ ประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ โดยตรวจสอบจากผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ผลิตภัณฑ์ ทั้งหมด การวิเคราะห์การเกาะติดของคาร์บอนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง CHN วิเคราะห์พื้นที่ผิว BET (BET Surface Area) หลังใช้ วิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และการพิจารณาร้อยละโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่หายไปในกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

4.4.7.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ โดยการพิจารณาการเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้

การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ ต่ำลง และยังช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ต้องการมากขึ้น แต่เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวอาจเกิด การหน่วงปฏิกิริยา เมื่อมีคาร์บอนมาเกาะติดที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบ ประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN ซึ่งถูกแสดงดัง ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา

| ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ | การเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา* (% daf) |
|---|---|
| แกมมาอะลูมินา | 2.308 |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา (ครั้งที่ 1) | 1.821 |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา (ครั้งที่ 2) | 1.290 |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา (ใช้ Regenerate) | 1.512 |
| นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ครั้งที่ 1) | 3.737 |
| นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ครั้งที่ 2) | 3.045 |
| นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ใช้ Regenerate) | 4.263 |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ครั้งที่ 1) | 0.500 |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ครั้งที่ 2) | 0.617 |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ใช้ Regenerate) | 0.447 |

* วิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN

จากตารางที่ 4.7 พบว่าการเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเรียงจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา > โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา ≥ แกมมา

อะลูมินา > โฟแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ตามลำดับ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊ส และปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้ดังรูปที่ 4.25 – 4.30

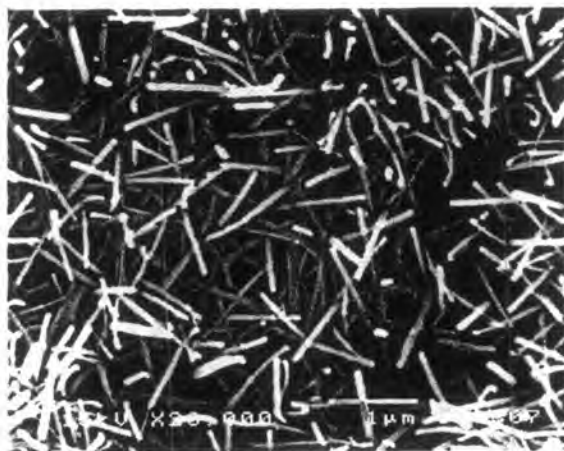
4.4.7.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ โดยการศึกษสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว

ศึกษสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว โดยเทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET (BET Surface Area) หลังใช้ดังตารางที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาดูด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 4.23

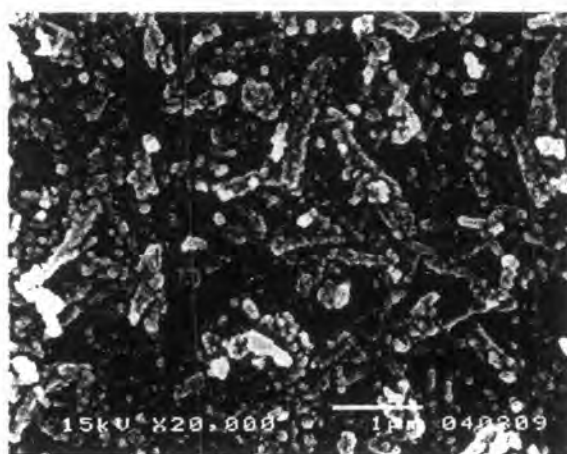
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET หลังใช้

| สารตัวอย่าง | พื้นที่ผิว BET (ตร.ม./กรัม) | ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม) |
|--|-----------------------------|--|
| Al ₂ O ₃ | 206.45 | 0.49 |
| K ₂ CO ₃ /Al ₂ O ₃ | 138.89 | 0.37 |
| NiO/Al ₂ O ₃ | 152.05 | 0.37 |
| K ₂ CO ₃ /Ni/Al ₂ O ₃ (800 °C) | 124.05 | 0.33 |
| K ₂ CO ₃ /Ni/Al ₂ O ₃ (900 °C) | 122.17 | 0.28 |

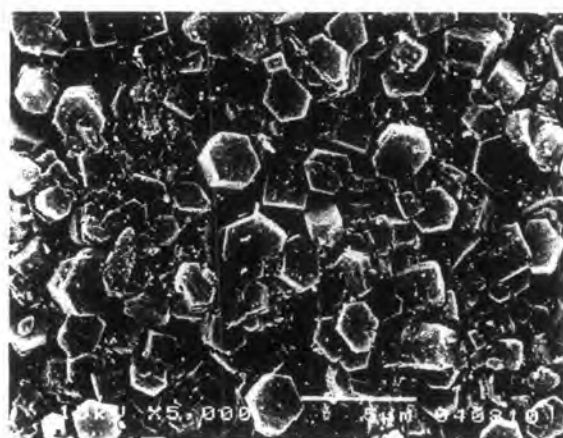
จากตารางที่ 4.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้แล้วพบว่า มีค่าพื้นที่ผิว BET ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนจะไปเกาะหรือฝังตัวที่บริเวณผิวและปากของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อปริมาณของคาร์บอนเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิว BET ของตัวเร่งปฏิกิริยาจะยิ่งมีค่าลดลง เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนไปเกาะที่บริเวณปากของรูพรุนเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสพบว่าปริมาตรรูพรุนลดลง เป็นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดการรวมตัวกัน ทำให้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการพังตัว ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาเกิดน้อยลง โดยพิจารณาลักษณะพื้นที่ผิวได้จากรูปที่ 4.23



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.23 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง SEM: (ก) 9% $K_2CO_3/NiO/\gamma-Al_2O_3$ (ข) 9% $K_2CO_3/NiO/\gamma-Al_2O_3$ ทดลองที่ 800 องศาเซลเซียส และ (ค) 9% $K_2CO_3/NiO/\gamma-Al_2O_3$ ทดลองที่ 900 องศาเซลเซียส

4.4.7.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ โดยการพิจารณาร้อยละโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่หายไปในกระบวนการแกซิฟิเคชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการแกซิฟิฟายอาจเกิดการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ในแก๊สแล้ว ยังมีการสูญเสียเนื่องจากการระเหยของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างการแกซิฟาย ดังนั้นจึงวิเคราะห์ร้อยละของโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่หายไปด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ที่หายไปในตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ซึ่งส่งผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแสดงดังรูปที่ 4.24 – 4.29

ตารางที่ 4.9 ร้อยละของโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่หายไป

| ตัวเร่งปฏิกิริยา | ร้อยละโดยน้ำหนักโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา | |
|--|---|-------|
| | K ₂ O* | NiO* |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา (ก่อนใช้) | 34.94 | - |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา (หลังใช้) | 34.16 | - |
| นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ก่อนใช้) | - | 38.61 |
| นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (หลังใช้) | - | 35.28 |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ก่อนใช้) | 15.82 | 35.14 |
| โพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (หลังใช้) | 15.60 | 31.07 |

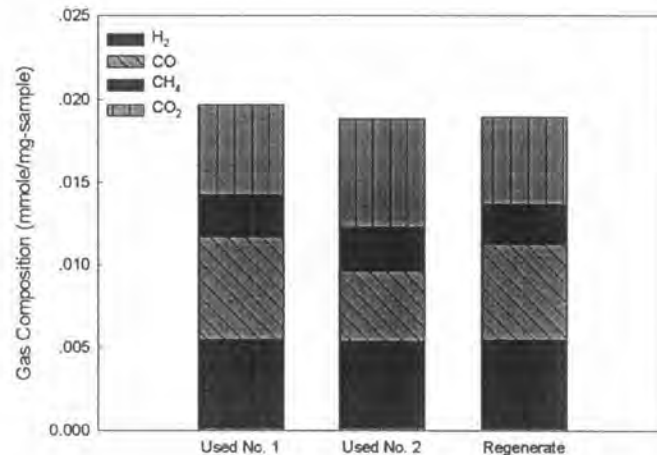
*วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

4.4.7.4 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด และผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

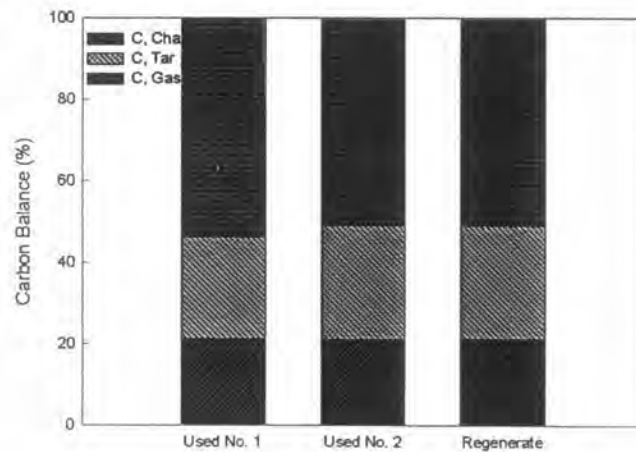
4.4.7.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา

การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่า การนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปบำบัด (regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่ติดอยู่ที่ผิว

ของตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินาเกิดการระเหย (volatilized) ในระหว่างการแก๊ซฟาย (J.F. Akyurtlu, 1994) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.9 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง



รูปที่ 4.24 ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/Al_2O_3-9\%K$ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

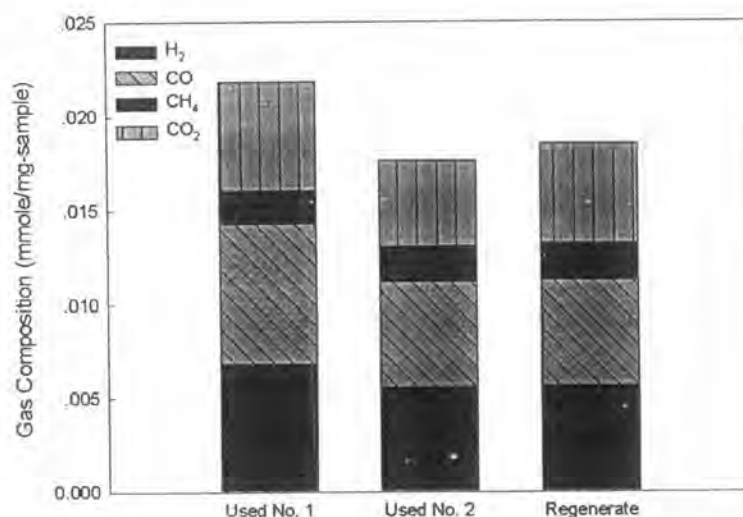


รูปที่ 4.25 ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/Al_2O_3-9\%K$ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่า การตรวจสอบประ

ประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปบำบัด (regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ให้ปริมาณน้ำมันทาร์เพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินาเกิดการระเหย (volatilized) ในระหว่างการแก๊สฟายซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.9 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง ปริมาณน้ำมันทาร์เพิ่มขึ้น ส่วนซาร์คังที่ เนื่องจากปริมาณซาร์คังที่ได้ไม่สัมพันธ์กับไอน้ำโดยตรง มีเพียงผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันทาร์ที่ได้จากขั้นตอนในกระบวนการไพโรไลซิสเท่านั้นที่สัมพันธ์กับไอน้ำ

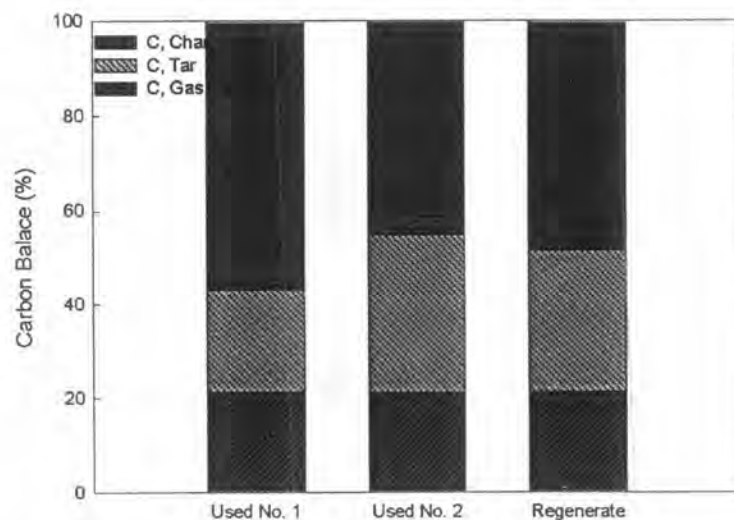
4.4.7.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา



รูปที่ 4.26 ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiO/Al₂O₃-9%Ni ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่ออนาที

ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่ออนาที แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่า การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปบำบัด (regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมลดลง เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกาะติด

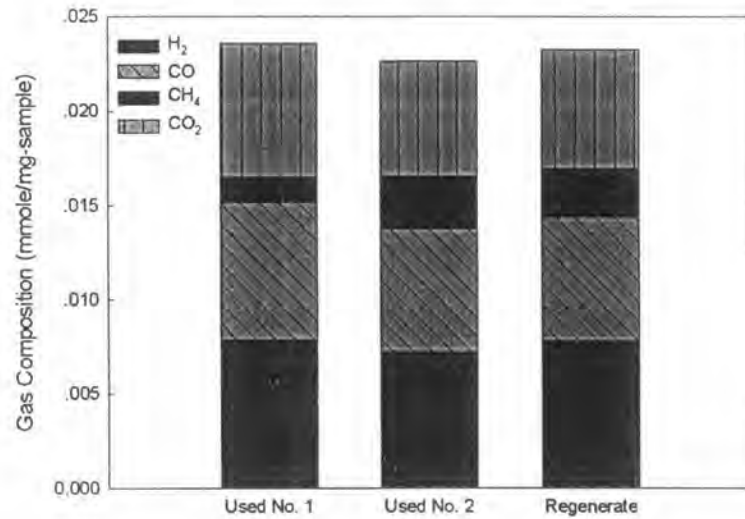
ของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 4.7 และไม่สามารถบำบัด (regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลับมาเร่งปฏิกิริยาได้เหมือนเดิม



รูปที่ 4.27 ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -9%Ni ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

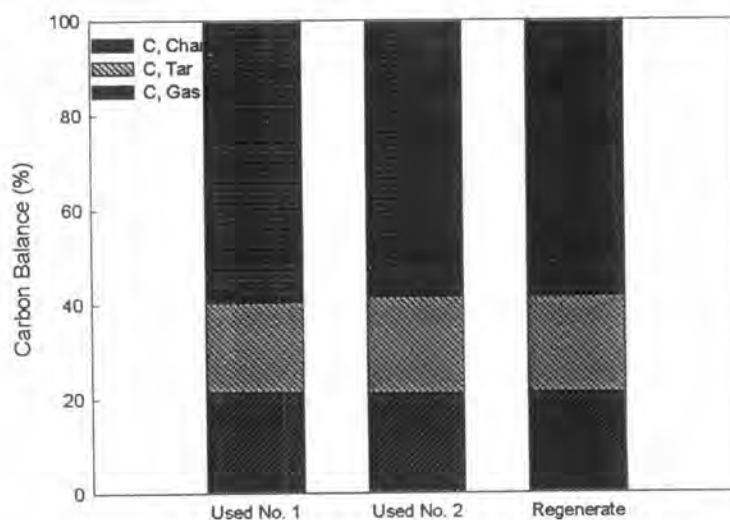
เมื่อพิจารณาผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปบำบัด (regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ให้ปริมาณน้ำมันาร์เพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกาะติดของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่สามารถบำบัด (regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลับมาเร่งปฏิกิริยาได้เหมือนเดิม

4.4.7.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา



รูปที่ 4.28 ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3$ -9%K-9%Ni ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.28 พบว่า การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปบำบัด (regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดค่อนข้างคงที่ อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีโพแทสเซียมช่วยในการป้องกันการเกาะติดของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 4.7 ส่งผลให้นำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาเร่งปฏิกิริยาได้เหมือนเดิม ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา และนิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า



รูปที่ 4.29 ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/NiO/Al_2O_3$ -9%K-9%Ni ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่า การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปบำบัด (regenerate) โดยการเผาไล่คาร์บอนที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ให้ปริมาณน้ำมันทาร์และผลิตภัณฑ์แก๊สค่อนข้างคงที่ อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีโพแทสเซียมช่วยในการป้องกันการเกาะติดของคาร์บอนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และมีนิกเกิลช่วยลดปริมาณน้ำมันทาร์ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน ส่งผลให้นำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาเร่งปฏิกิริยาได้เหมือนเดิม