

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ชีวมวลที่นำมาศึกษา คือ แกลบ ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน โดยการทดลองได้ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวล ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการสัมผัส นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ คือ โดโลไมต์ (dolomite) นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (NiO/dolomite) โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับโดโลไมต์ (K_2CO_3 /dolomite) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์ (K_2CO_3 -NiO/dolomite) พร้อมทั้งศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้และร้อยละของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์

โดยผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วนด้วยกัน ส่วนที่ 1 คือผลการวิเคราะห์สมบัติของแกลบ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ ส่วนที่ 2 คือผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้ ได้แก่ dolomite, NiO/dolomite, K_2CO_3 /dolomite และ K_2CO_3 -NiO/dolomite ส่วนที่ 3 คือผลการศึกษาการแกซีฟิเคชันของชีวมวลด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ได้แก่ การวิเคราะห์ร้อยละขององค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ และส่วนที่ 4 คือผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ของแกลบ

(แกลบจาก ศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ จ.นครราชสีมา)

ชนิดของเชื้อเพลิง	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
แกลบ	5.81	19.48	55.57	19.15

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของแกลบ

ชนิดของเชื้อเพลิง	ธาตุ (% daf)*				
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน	ซัลเฟอร์
แกลบ	50.39	6.61	0.54	42.46	-

*daf = dry ash free

ตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ เพื่อศึกษาสมบัติของตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ใช้ คือ แกลบ พบว่าแกลบมีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนรูปชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของแก๊สเชื้อเพลิงโดยกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ และเนื่องจากแกลบมีน้ำมันทาร์ในปริมาณสูงสังเกตได้จากปริมาณสารระเหยที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยในการทำให้ไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

4.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้

สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)
Calcined dolomite	20.75	0.126
9%NiO/dolomite	14.11	0.066
9%K ₂ CO ₃ /dolomite	9.39	0.041
9%K ₂ CO ₃ -9%NiO/dolomite	13.49	0.051

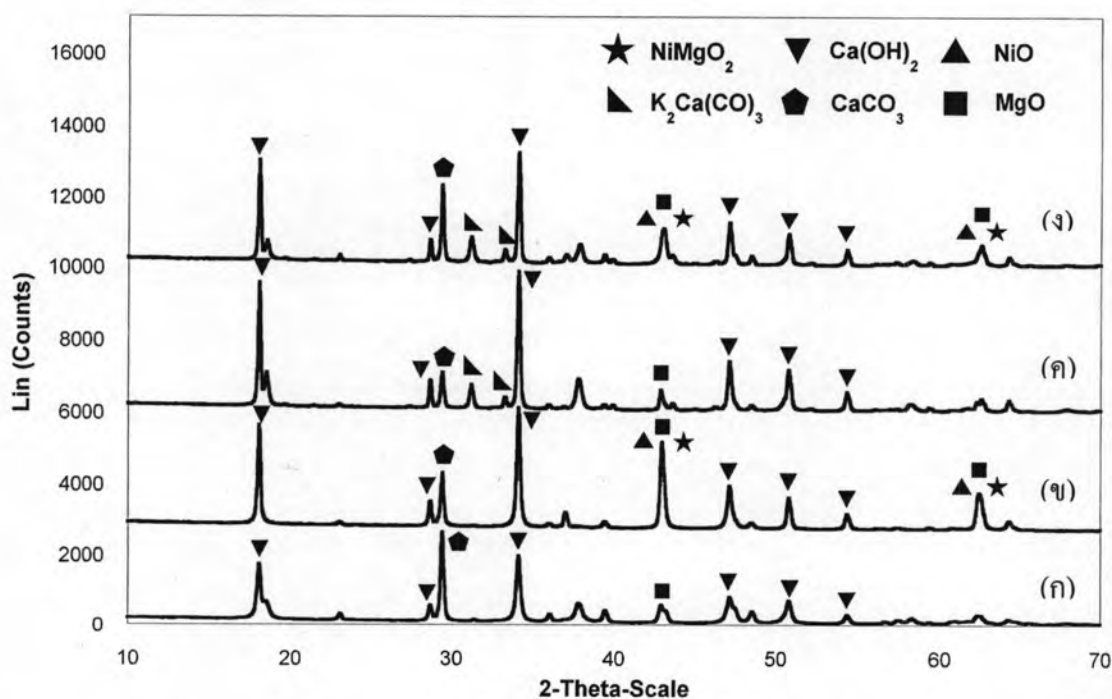
จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังตารางที่ 4.3 พบว่าโดโลไมต์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงมากนักถ้าเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เช่น แกมมาอะลูมินา (γ -Al₂O₃) แต่ในงานวิจัยนี้เลือกโดโลไมต์มาใช้ในการทดลอง เนื่องจากมีงานวิจัยพบว่าโดโลไมต์มีคุณสมบัติในการช่วยให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวได้ดี (Sutton et al., 2001) อีกทั้งโดโลไมต์ยังมีราคาถูกและหาได้ง่าย และเมื่อโดโลไมต์ผ่านการเคลือบฝังด้วยนิกเกิลและโพแทสเซียมแล้วพบว่า มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ทั้งนี้

เนื่องจากนิกเกิลและโพแทสเซียมจะไปเกาะหรือเคลือบฝังที่บริเวณผิวและปากของรูพรุนของโดโลไมต์

การวิเคราะห์ร้อยละของโลหะบนตัวเร่งปฏิริยาก่อนใช้ ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยนำ Calcined dolomite ไปทำการเคลือบฝังด้วยนิกเกิลและโพแทสเซียมแล้วนำไปวิเคราะห์ พบว่าร้อยละของโลหะนิกเกิลและโพแทสเซียมที่คำนวณทางเคมีไม่เท่ากับที่วิเคราะห์ได้

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ร้อยละของโลหะบนตัวเร่งปฏิริยาก่อนใช้

ตัวเร่งปฏิริยา	ร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะบนตัวเร่งปฏิริยา (wt%)	
	Ni	K
Calcined dolomite	-	-
9%NiO/dolomite	5.38	-
9%K ₂ CO ₃ /dolomite	-	4.16
9%K ₂ CO ₃ -9%NiO/dolomite	5.57	5.34



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิริยาก่อนใช้ ด้วยเครื่อง XRD: (ก) dolomite (ข) 9%NiO/dolomite (ค) 9%K₂CO₃/dolomite (ง) 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite

การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้ ด้วยเครื่อง x-ray diffraction (XRD) แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา dolomite จะพบเฟสของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบใน dolomite ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และนอกจากนี้ยังพบเฟสของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) และนิกเกิลแมกนีเซียมออกไซด์ (NiMgO_4) บนตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) ส่วนรูปที่ 4.1 (ค) แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา 9% K_2CO_3 /dolomite ซึ่งพบเฟสของโพแทสเซียม ในรูปของโพแทสเซียมแคลเซียมคาร์บอเนต ($\text{KCa}(\text{CO}_3)_2$) และในรูปที่ 4.1 (ง) แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา 9% K_2CO_3 -9%NiO/dolomite ซึ่งพบทั้งเฟสของ NiO, NiMgO_4 และ $\text{KCa}(\text{CO}_3)_2$ ที่เพิ่มขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

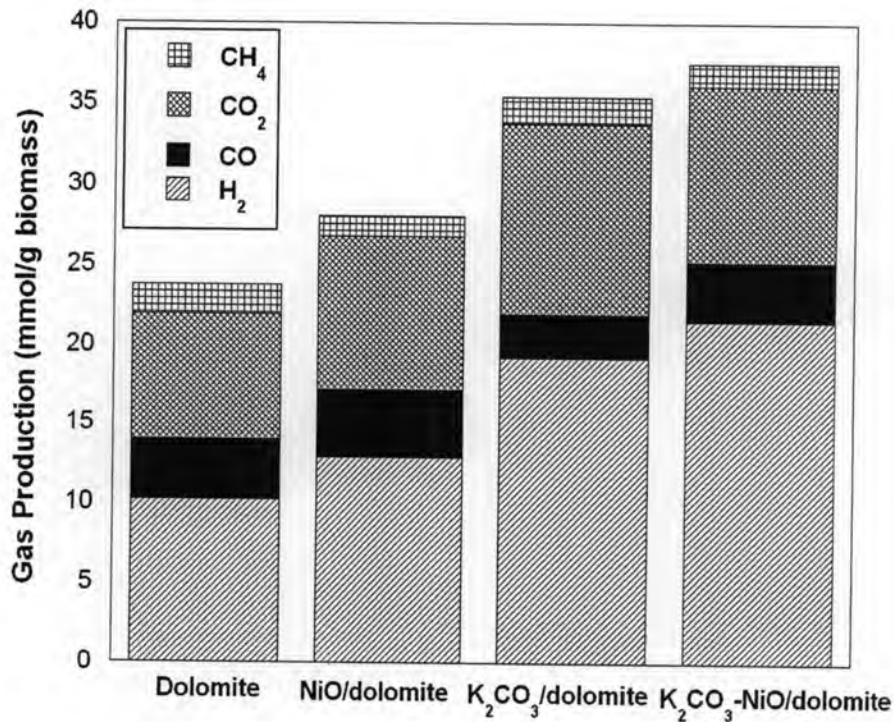
4.3 แก๊สฟิเคชันของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

ในกระบวนการแก๊สฟิเคชันของชีวมวล ได้ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ รวมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิ ร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ (contact time) และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (stability)

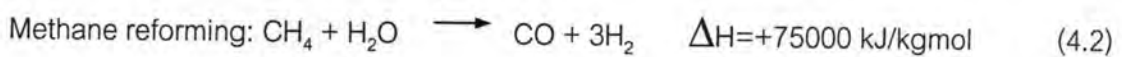
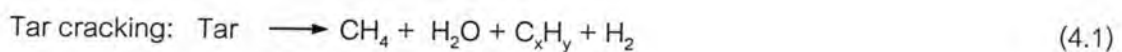
4.3.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา dolomite, 9%NiO/dolomite, 9% K_2CO_3 /dolomite และ 9% K_2CO_3 -9%NiO/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแก๊สฟิเคชันของชีวมวล จะได้ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์สูงขึ้น โดยผลของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแก๊สผลิตภัณฑ์เป็นลำดับดังนี้ dolomite < 9%NiO/dolomite < 9% K_2CO_3 /dolomite < 9% K_2CO_3 -9%NiO/dolomite ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite จะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้นกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา dolomite โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ (tar cracking) (Wang et al., 2005) ให้เปลี่ยนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดี ทำให้ไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์แตกตัวเป็นแก๊สได้เพิ่มขึ้น แสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.1) อีกทั้งยังช่วยในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน (methane reforming) โดย

แก๊สมีเทนทำปฏิกิริยากับไอน้ำเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.2)



รูปที่ 4.2 ผลของการแก๊สฟิเคชันชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (dolomite, 9%NiO/dolomite, 9%K₂CO₃/dolomite และ 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร



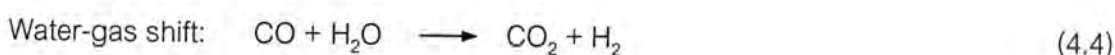
กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.3)



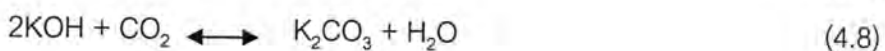
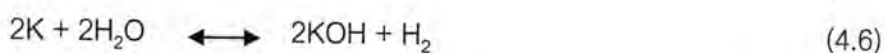
จากสมการ (4.3) นิกเกิลจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็นนิกเกิลคาร์ไบด์ (NiC_x) และไฮโดรเจน จากนั้นนิกเกิลคาร์ไบด์จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ (บุปผา พุทธสวัสดิ์, 2549) และยังพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจน

สูงขึ้นไปประมาณ 6 เท่าเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้อธิบายเหตุผลดังกล่าวมาก่อนหน้านี้แล้วว่านิเกิลจะช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ได้ดี อีกทั้งยังช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนอีกด้วย ดังนั้นเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ (9%NiO) ลงบนตัวรองรับโดโลไมต์จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น เมื่อมีไอน้ำเข้าร่วมทำปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชัน ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนจะเพิ่มขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น

ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite จะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้นไปกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา dolomite โดยเฉพาะแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโพแทสเซียมคาร์บอเนตช่วยเร่งปฏิกิริยาชิฟท์ (water-gas shift) ได้ดี (Chin et al., 1987) แสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.4) โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์อีกด้วย (Abu El-Rub et al., 2004) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น

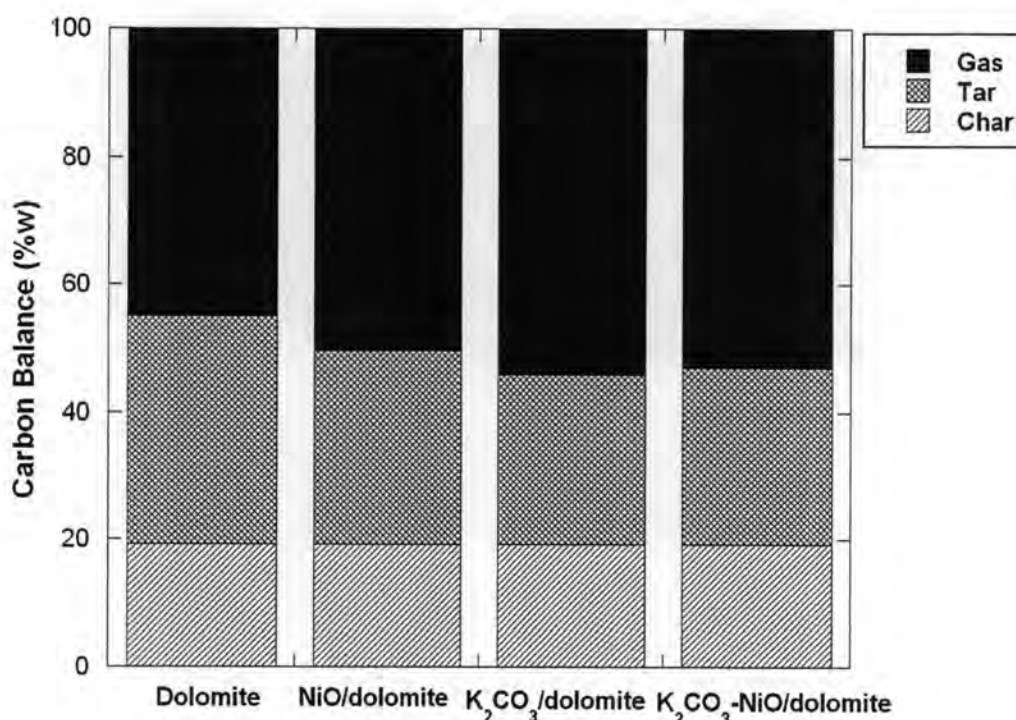


กลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนตแสดงดังปฏิกิริยาที่ (4.5)-(4.8) (Veraa and Bell, 1978)



เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite พบว่าจะให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สสูงไปกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากนิเกิล ซึ่งได้อธิบายเหตุผลมาก่อนหน้านี้แล้วว่า จะช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ได้ดี อีกทั้งยังช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนอีกด้วย ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น อธิบายได้จากสมการ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ นอกจากนี้โพแทสเซียมคาร์บอเนตยังช่วยเร่งปฏิกิริยาชิฟท์ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite เปรียบเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแกซิฟิเคชัน มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.88 เป็นร้อยละ 45.75 ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 54.11 และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.37



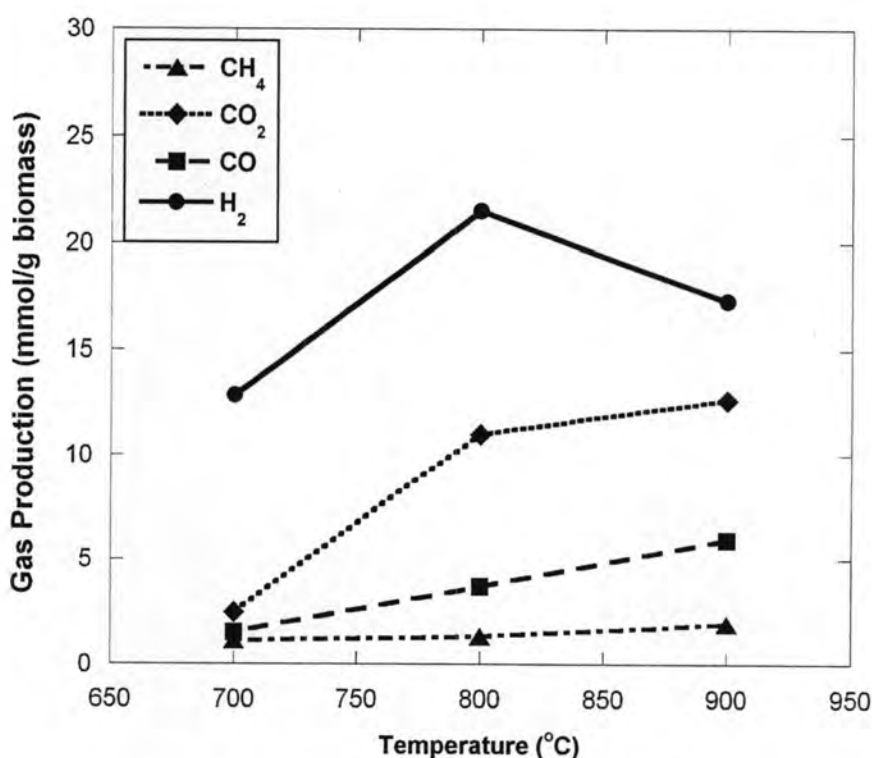
รูปที่ 4.3 ผลของการแกซิฟิเคชันชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (dolomite, 9%NiO/dolomite, 9%K₂CO₃/dolomite และ 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

เมื่อพิจารณาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น และน้ำมันทาร์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา dolomite และ 9%Ni/dolomite ซึ่งอธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้ สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ได้ ซึ่งอาจเนื่องจากนิกเกิลและโพแทสเซียมที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันทาร์ โดยทำปฏิกิริยากับไอน้ำเปลี่ยนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณส่วนที่เหลือที่ได้คงที่ เนื่องจากไม่ได้สัมผัสกับไอน้ำโดยตรงในการศึกษานี้ มีเพียงแก๊สผลิตภัณฑ์และน้ำมันทาร์ที่ได้จากขั้นตอน

ในกระบวนการไพโรไลซิสเท่านั้นที่สัมพันธ์กับไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite กับตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite พบว่า ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์และน้ำมันทาร์ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของนิกเกิลลดลง โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเติมโพแทสเซียมลงไปบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีนิกเกิลนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการเกาะติดของคาร์บอนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของนิกเกิลลดต่ำลง (Juan-Juan et al., 2006) ดังนั้นจึงมีผลทำให้การแตกตัวของน้ำมันทาร์ลดลง

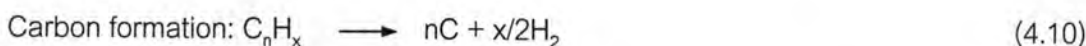
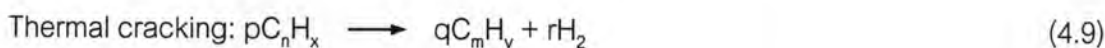
4.3.2 ผลของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิ (700 800 และ 900 องศาเซลเซียส) ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อปริมาณโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์และสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก

700 เป็น 800 องศาเซลเซียส ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (thermal cracking) สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยา (4.9) และ (4.10) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้ามากขึ้น



ผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยา boudouard ดังสมการ



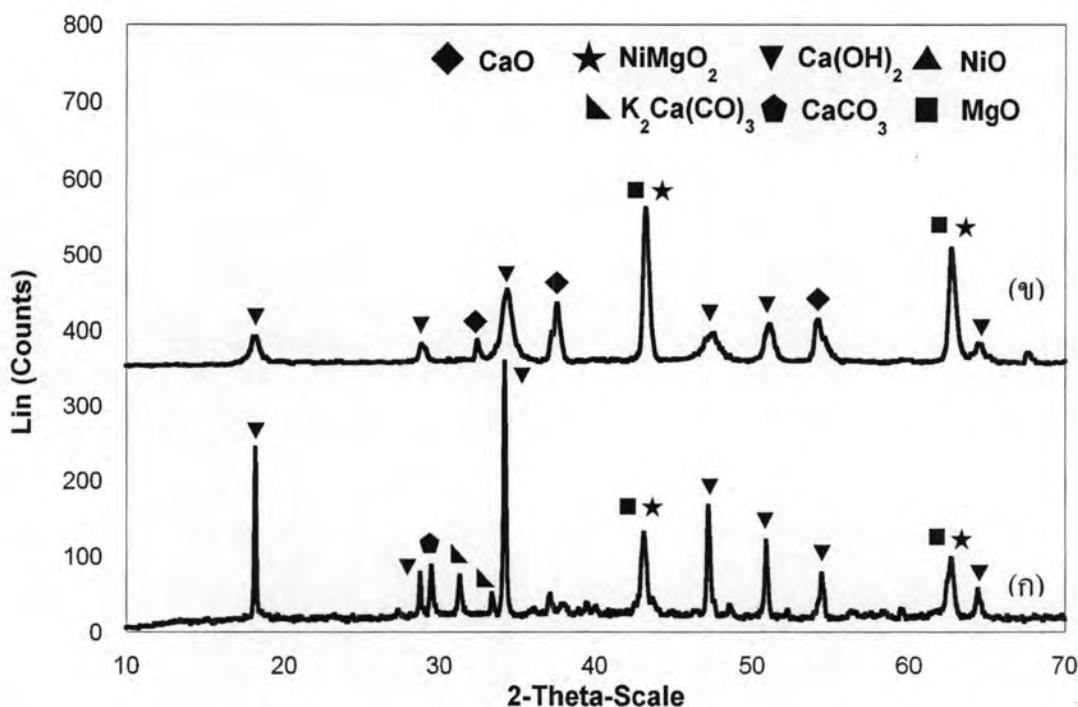
ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า ซึ่งปฏิกิริยา boudouard เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป ในอุณหภูมิของแข็งเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

และผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ว่า แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาที่ (4.11) จะถูกใช้ในปฏิกิริยาที่ (4.4)

การเพิ่มของผลิตภัณฑ์แก๊สสอดคล้องกับการเพิ่มของอุณหภูมิสามารถอธิบายได้หลายเหตุผล เช่น (i) ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งเป็นกระบวนการแรกก่อนเข้าสู่กระบวนการแกซิฟิเคชันโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ii) ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันของส่วนที่เหลือ (char gasification) เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า (iii) การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์แก๊สอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) และการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ (Franco et al., 2003)

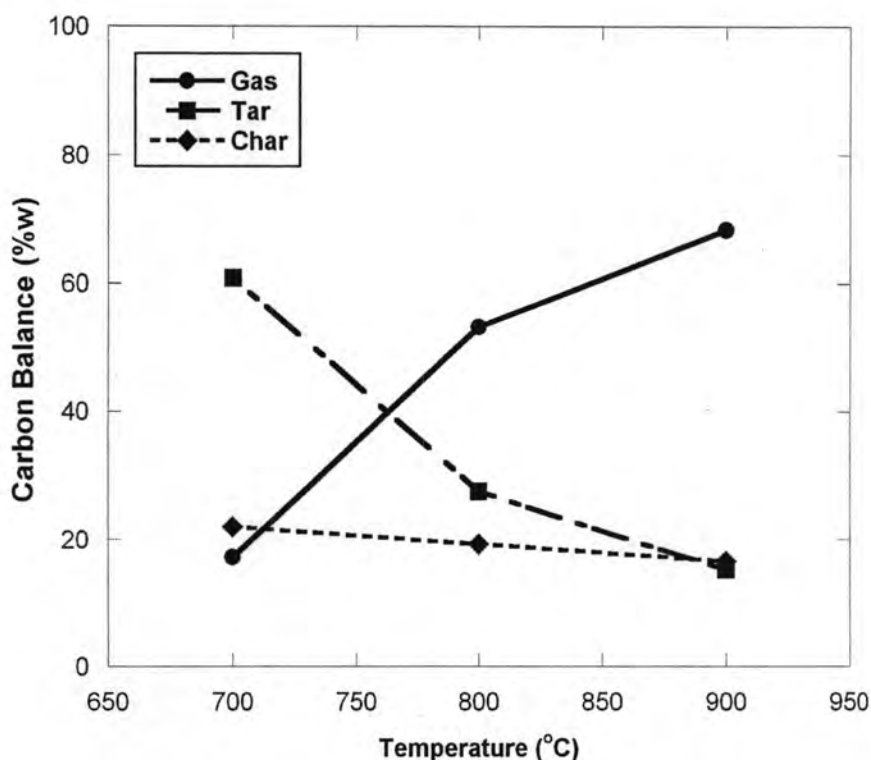
แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 900 องศาเซลเซียสพบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนลดลง อาจเนื่องมาจากโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลุดออกไป ทำให้สมบัติในการเร่งปฏิกิริยาลดลง และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา $9\%\text{K}_2\text{CO}_3$ -

9%NiO/dolomite หลังใช้ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD แสดงไว้ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ไม่พบเฟสของโพแทสเซียมบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ด้วยเครื่อง XRD: (ก) ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ก่อนใช้ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite หลังใช้ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

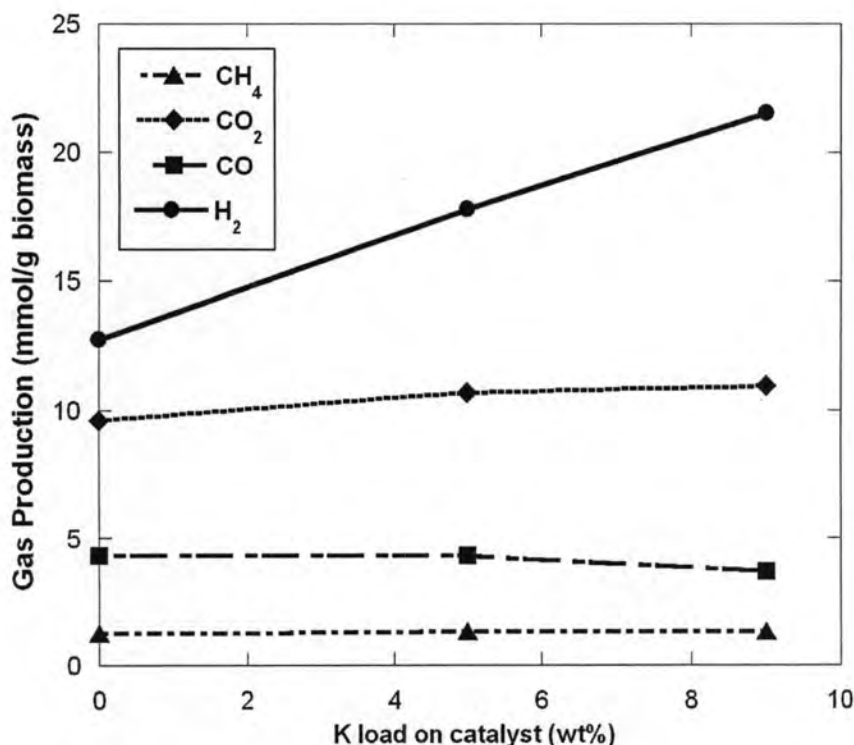
และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700 เป็น 900 องศาเซลเซียส ปริมาณส่วนที่เหลือและน้ำมันทาร์ลดลง ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาการแตกตัวจะเกิดได้ดี ทำให้เกิดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบามากขึ้น เช่น สารไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น อธิบายได้จากสมการ (4.1) และ (4.2) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิ (700 800 และ 900 องศาเซลเซียส) ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

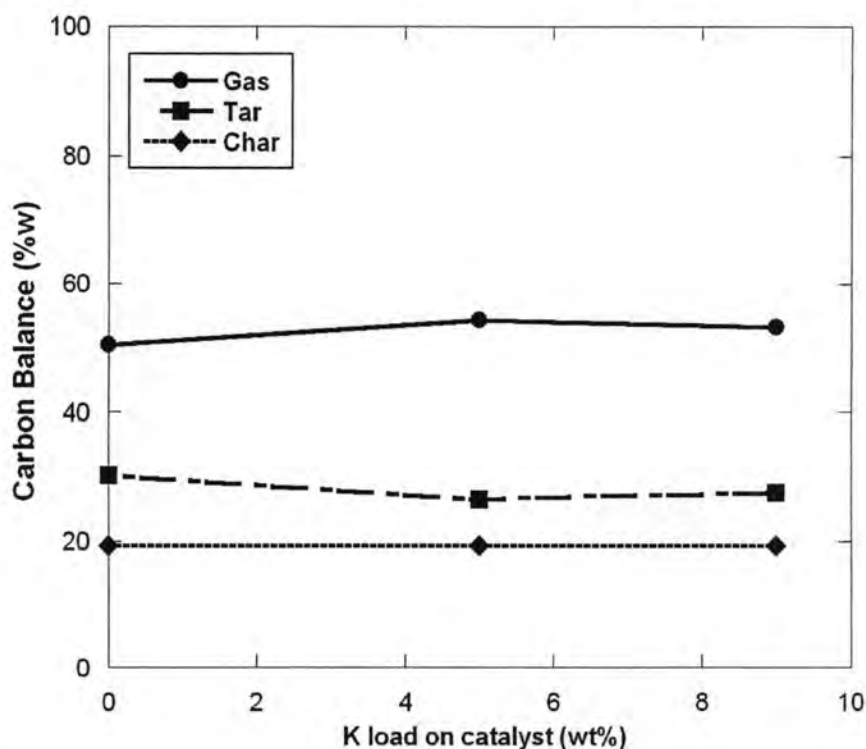
4.3.3 ผลของร้อยละของโพแทสเซียมบนตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของร้อยละของโพแทสเซียม (0% 5% และ 9% K₂CO₃) บนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าโพแทสเซียมมีผลต่อสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิด โดยร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 9 ส่งผลให้สัดส่วนของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 45.75 เป็นร้อยละ 57.37 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยา จะเร่งปฏิกิริยาซิฟต์ ดังสมการ (4.4) ให้เพิ่มมากขึ้น ทำให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น (Kim et al., 1989)



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของร้อยละของโพแทสเซียม (0% 5% และ 9% K_2CO_3) บนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

เมื่อพิจารณาผลของร้อยละของโพแทสเซียม (0% 5% และ 9% K_2CO_3) บนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อร้อยละของโพแทสเซียมในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้สูงขึ้นเล็กน้อย ส่วนน้ำมันทาร์มีปริมาณลดลงเล็กน้อย จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่านิกเกิลและโพแทสเซียมช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ แต่เมื่อเติมโพแทสเซียมลงไปบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลจะทำให้ความสามารถของนิกเกิลในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ลดลง (Juan-Juan et al., 2006) อย่างไรก็ตามการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมจะช่วยปรับสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สให้ได้แก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของร้อยละของโพแทสเซียม (0% 5% และ 9% K_2CO_3) บนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

4.3.4 ผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์

การศึกษาผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์สามารถศึกษาได้ 2 กรณี คือ กรณีแรก การเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สดั่วพา (แก๊สไนโตรเจน) แล้วกำหนดให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความสูงของเบดคงที่ สำหรับกรณีที่สองทำได้โดย การเปลี่ยนความสูงของเบดที่ใช้ในการแก๊สฟาย แล้วกำหนดให้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของแก๊สดั่วพาคงที่ ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนความสูงของเบดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9% K_2CO_3 -9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 1.7 กรัม) ที่ความสูง 1.0 เซนติเมตร, 9% K_2CO_3 -9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 1.7 กรัม) ผสมกับ Al_2O_3 -ball (น้ำหนัก 4.8 กรัม) ที่ความสูง 2.0 เซนติเมตร และ 9% K_2CO_3 -9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 1.7 กรัม) ผสมกับ Al_2O_3 -ball (น้ำหนัก 9.6 กรัม) ที่ความสูง 3.0 เซนติเมตร อัตราการไหลของแก๊สดั่วพา 150 มิลลิลิตรต่ออนาที เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดและผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.9-4.10 ตามลำดับ ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 4.5

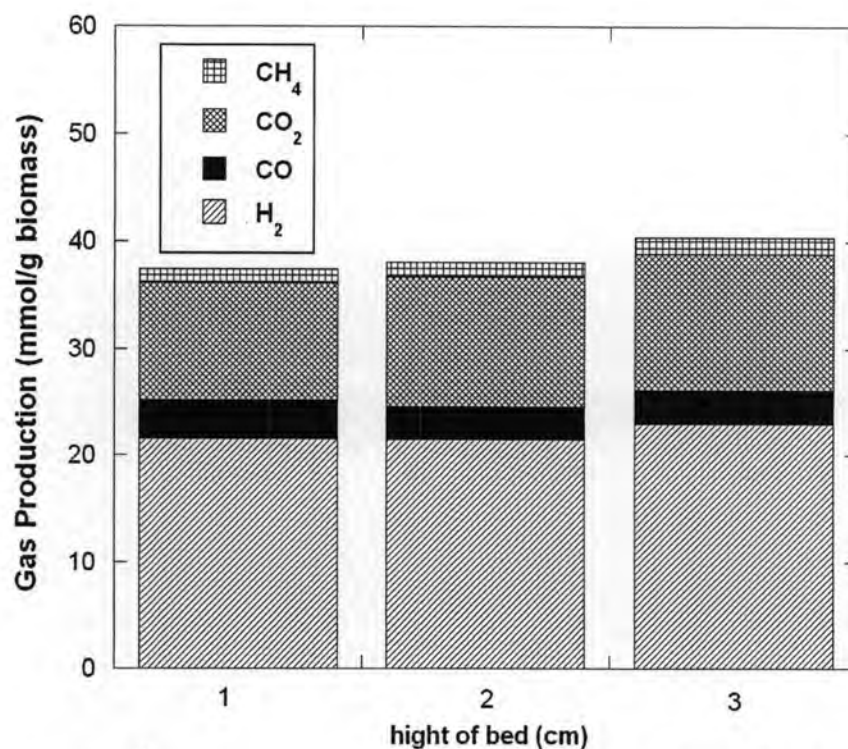
ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าความสูงของเบดที่ใช้ในการแกซีฟายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และการลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน จะทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์

ตัวอย่าง	ระยะเวลา (วินาที)
อัตราการไหลของไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1.0 เซนติเมตร	0.053
อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1.0 เซนติเมตร	0.037
อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา + Al ₂ O ₃ -ball สูง 2.0 เซนติเมตร	0.049
อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา+ Al ₂ O ₃ -ball สูง 3.0 เซนติเมตร	0.080

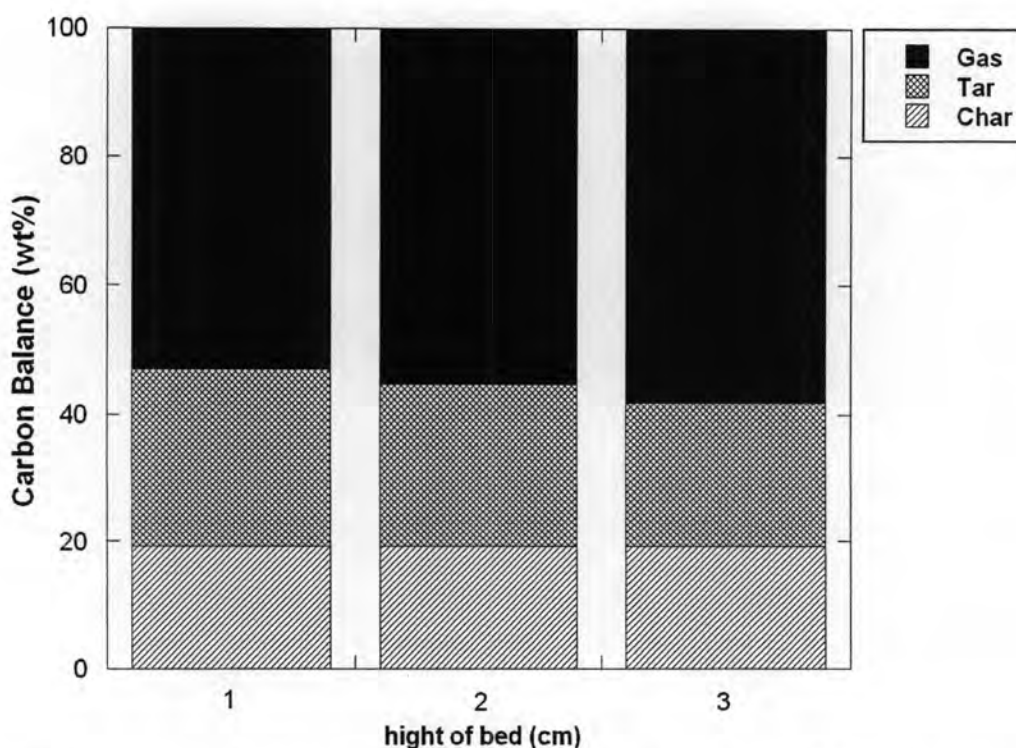
4.3.4.1 ความสูงของเบดที่ใช้ในการแกซีฟาย

การศึกษาผลของการเพิ่มความสูงของเบดในการแกซีฟาย ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า การเพิ่มความสูงของเบดในการแกซีฟาย โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ ทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด พบว่าเมื่อความสูงของเบดในการแกซีฟายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย พบว่าปริมาณโดยรวมของแก๊สผลิตภัณฑ์ และสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.9 ผลของการเพิ่มความสูงของเบดในการแกซีฟาย ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มความสูงของเบดในการแกซีฟาย ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าการเพิ่มความสูงของเบดในการแกซีฟาย ทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.6 ส่งผลให้คาร์บอนในน้ำมันทาร์ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่คาร์บอนในผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ได้



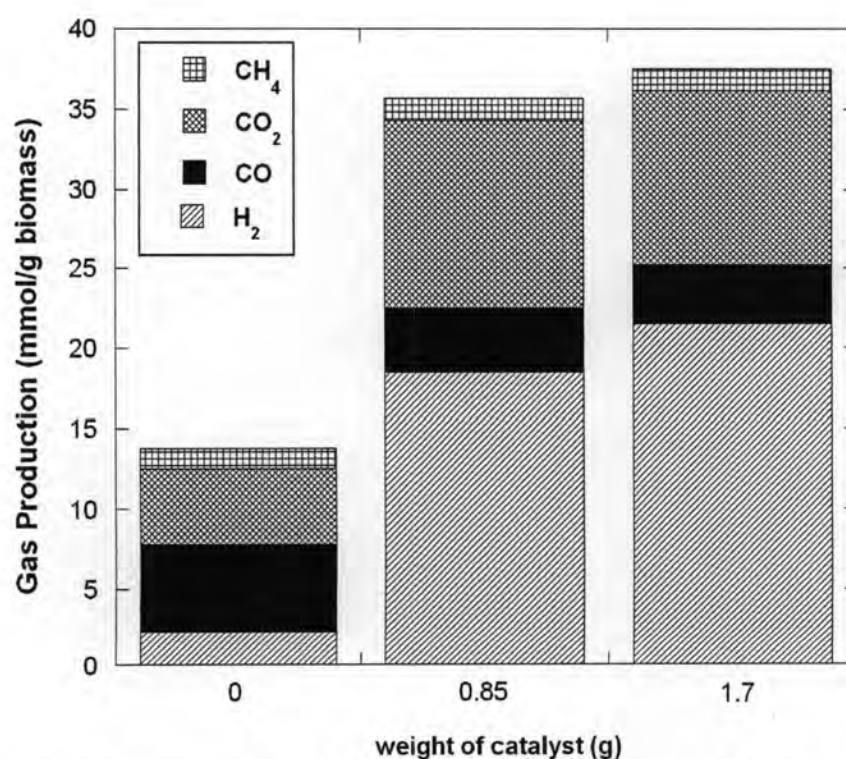
รูปที่ 4.10 ผลของการเพิ่มความสูงของเบดในการแกซีฟาย ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

4.3.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้

การศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการแกซีฟาย ต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.11–4.12 ตามลำดับ โดยทำการควบคุมระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ให้เท่ากัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษา คือ Al₂O₃-ball (น้ำหนัก 6.90 กรัม) ที่ความสูง 1.4 เซนติเมตร, 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 0.85 กรัม) ผสมกับ Al₂O₃-ball (น้ำหนัก 3.67 กรัม) ที่ความสูง 1.3 เซนติเมตร และ 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 1.70 กรัม) ที่ความสูง 1.0 เซนติเมตร จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะสังเกตเห็นว่าความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาจะมีความสูงแตกต่างกันเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากว่า ต้องการปรับสัดส่วนของว่างของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เท่ากัน แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์

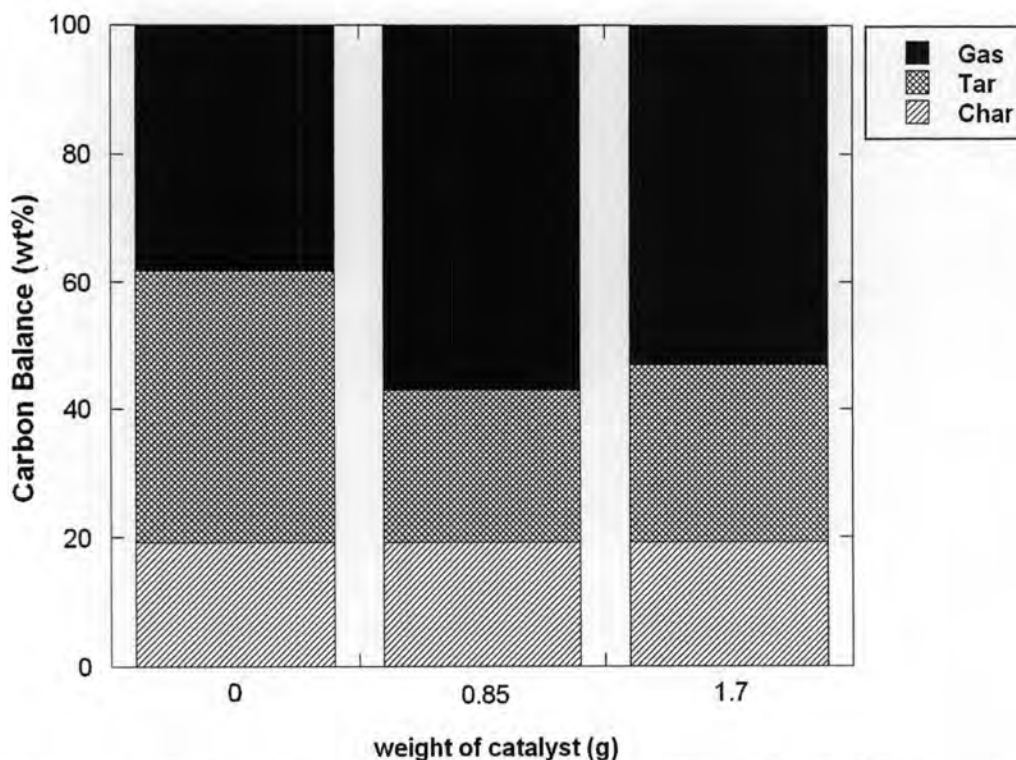
ตัวอย่าง	ระยะเวลา (วินาที)
อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1.0 เซนติเมตร	0.037
อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, Al ₂ O ₃ -ball สูง 1.4 เซนติเมตร	0.037
อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที, ตัวเร่งปฏิกิริยา + Al ₂ O ₃ -ball สูง 1.3 เซนติเมตร	0.037



รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในการแก๊สฟายแกลบต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร และระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.037 วินาที

การศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด โดยใช้ Al₂O₃-ball (น้ำหนัก 6.90 กรัม) ที่ความสูง 1.4 เซนติเมตร, 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 0.85 กรัม) ผสมกับ Al₂O₃-ball (น้ำหนัก 3.67 กรัม) ที่ความสูง 1.3 เซนติเมตร และ 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 1.70 กรัม) ที่ความสูง 1.0 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร และระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 0.037 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้สามารถเพิ่มการเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น



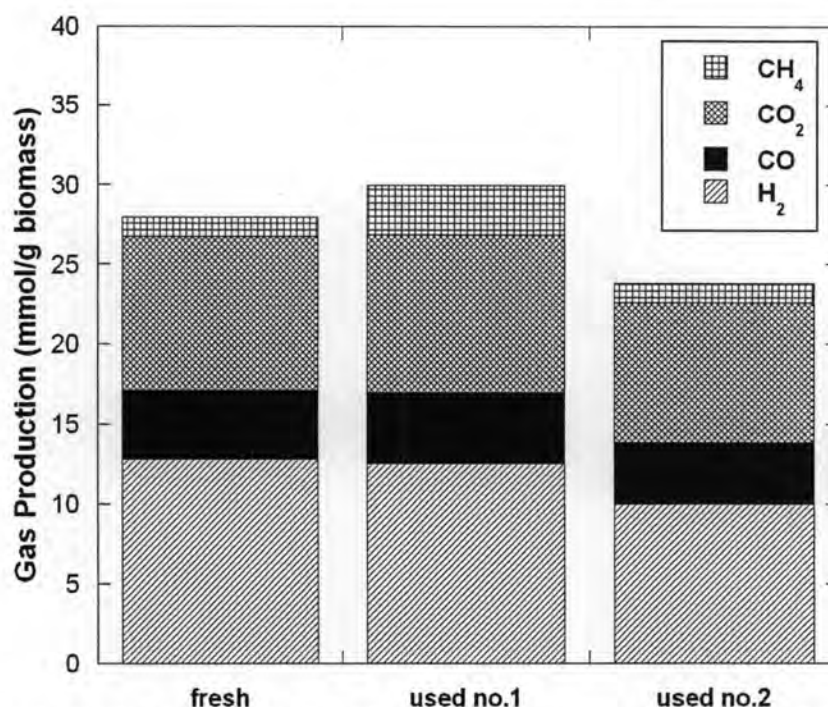
รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในการแยกฟลายแอสคอปผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร ระยะเวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 0.037 วินาที

จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 1.70 กรัม) ที่ความสูง 1.0 เซนติเมตร ปริมาณส่วนที่เหลือค่อนข้างคงที่ ปริมาณน้ำมันทาร์ที่ได้มีปริมาณลดลง ในขณะที่ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al₂O₃-ball (น้ำหนัก 6.90 กรัม) ที่ความสูง 1.4 เซนติเมตร และ 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 0.85 กรัม) ผสมกับ Al₂O₃-ball (น้ำหนัก 3.67 กรัม) ที่ความสูง 1.3 เซนติเมตร ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นผลจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากมีตำแหน่งที่ว่างไว้เพิ่มขึ้น (active site) จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้แก่ 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 0.85 กรัม) ผสมกับ Al₂O₃-ball (น้ำหนัก 3.67 กรัม)

ที่ความสูง 1.3 เซนติเมตร เนื่องจากว่าสามารถให้แก๊สผลิตภัณฑ์ และลดน้ำมันทาน์ได้ใกล้เคียงกับการใช้ 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite (น้ำหนัก 1.70 กรัม) ที่ความสูง 1.0 เซนติเมตร ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากกว่า ทำให้ช่วยลดความสิ้นเปลืองในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้

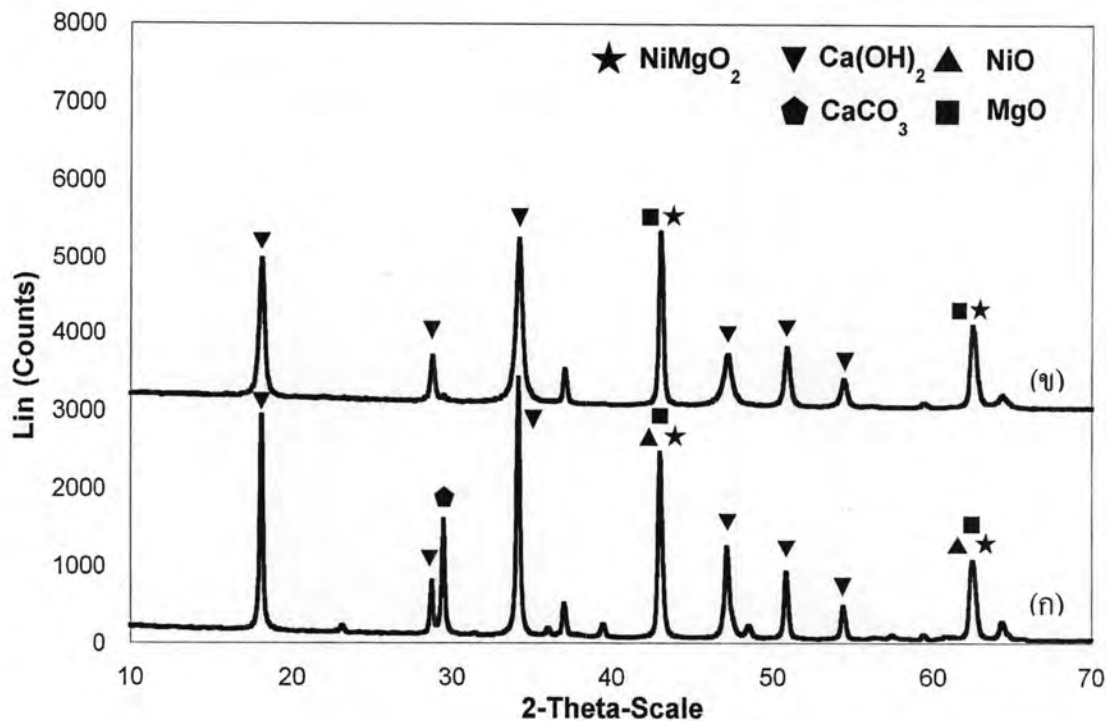
4.3.6 ผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์

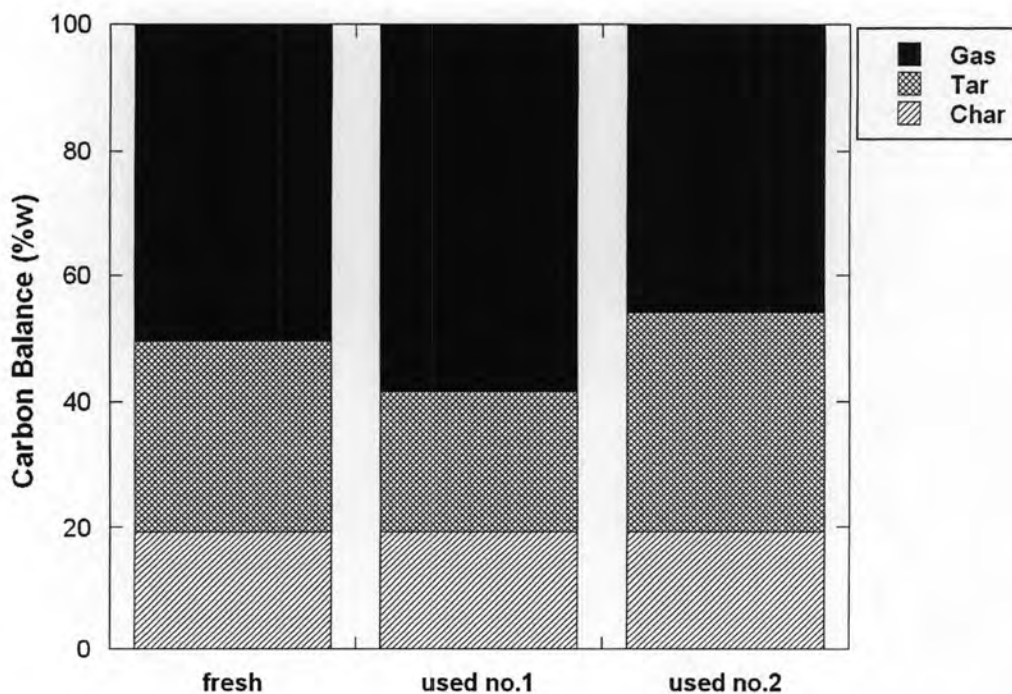


รูปที่ 4.13 ผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า การนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมลดลง และเมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite หลังใช้ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD แสดงไว้ดังรูปที่ 4.14 พบว่าจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา หลังทำการทดลองจะไม่พบเฟสของ NiO คาดว่าอาจเกิดจากนิกเกิลออกไซด์เกิดการเปลี่ยนรูป ไปอยู่ในรูปของเฟส NiMgO₄ ดังนั้นจึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ เร่งปฏิกิริยาได้ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง



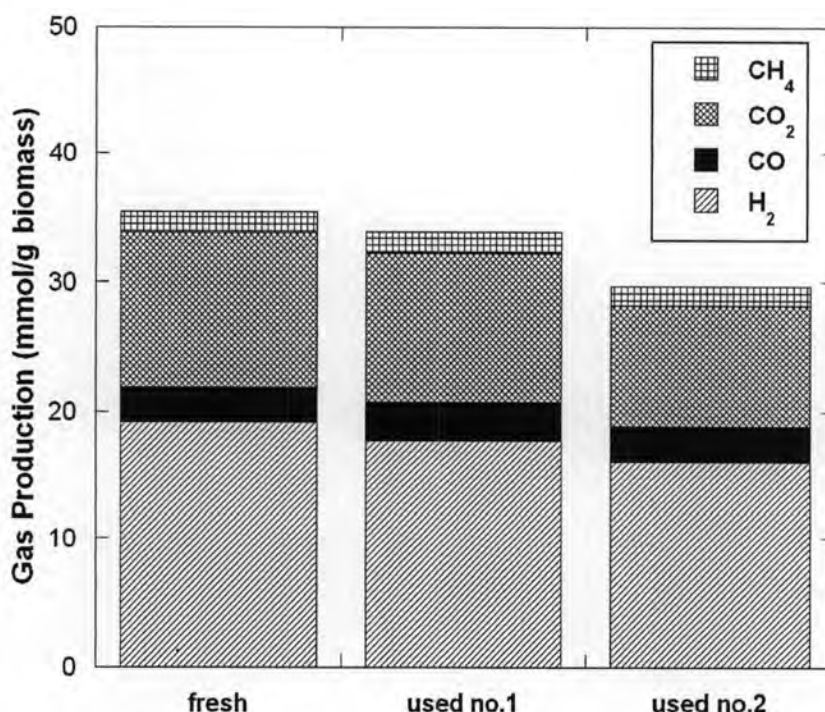
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite ด้วยเครื่อง XRD: (ก) ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite ก่อนใช้ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite หลังใช้ ครั้งที่ 1 ที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 ผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

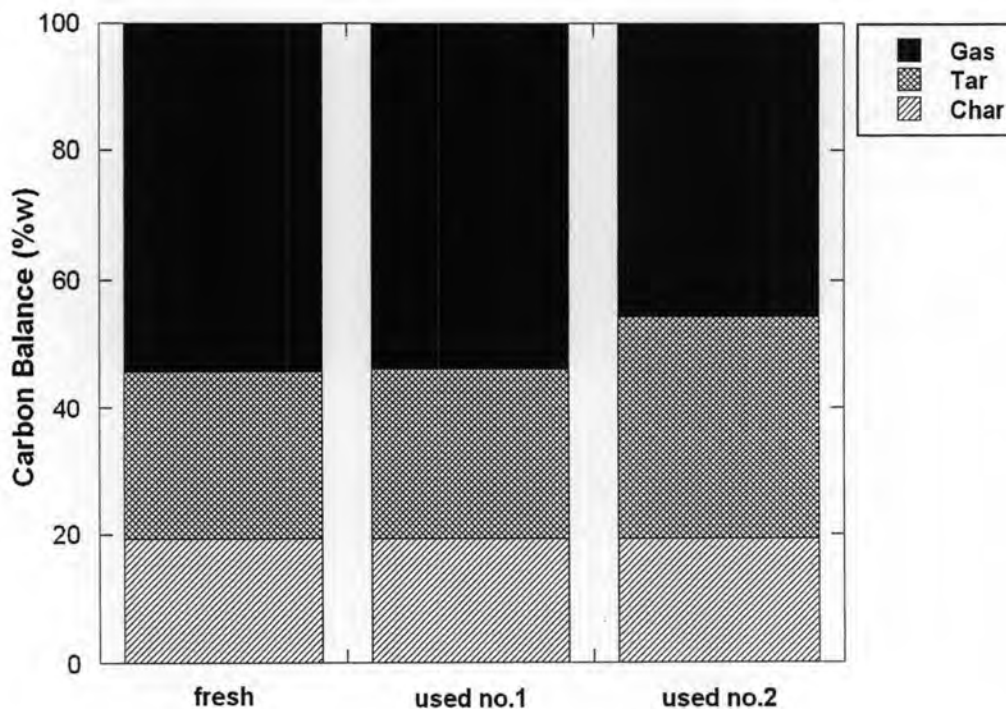
เมื่อพิจารณาผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%NiO/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเร่งปฏิกิริยาได้ลดลงดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง

4.3.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับโดโลไมต์



รูปที่ 4.16 ผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่า การนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมลดลง อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite หลังใช้หนึ่งครั้ง แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาน้อยลง



รูปที่ 4.17 ผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

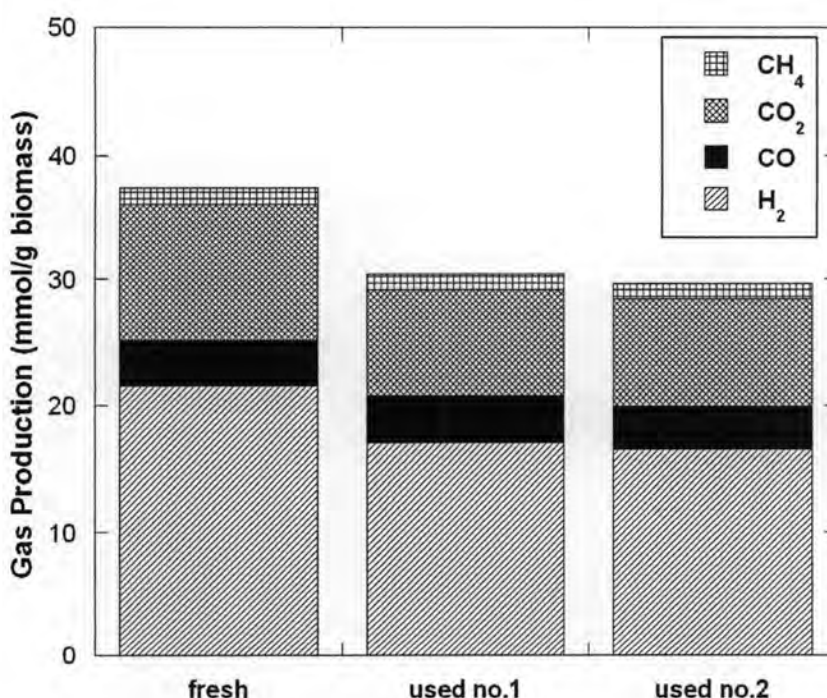
เมื่อพิจารณาผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าจะทำให้ปริมาณน้ำมันทาร์เพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเร่งปฏิกิริยาได้ลดลงดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง ปริมาณน้ำมันทาร์เพิ่มขึ้น ส่วนส่วนที่เหลือคงที่ เนื่องจากปริมาณส่วนที่เหลือที่ได้ไม่สัมผัสกับไอน้ำโดยตรง มีเพียงผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันทาร์ที่ได้จากขั้นตอนในกระบวนการไพโรไลซิสเท่านั้นที่สัมผัสกับไอน้ำ

4.3.6.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับโดโลไมต์

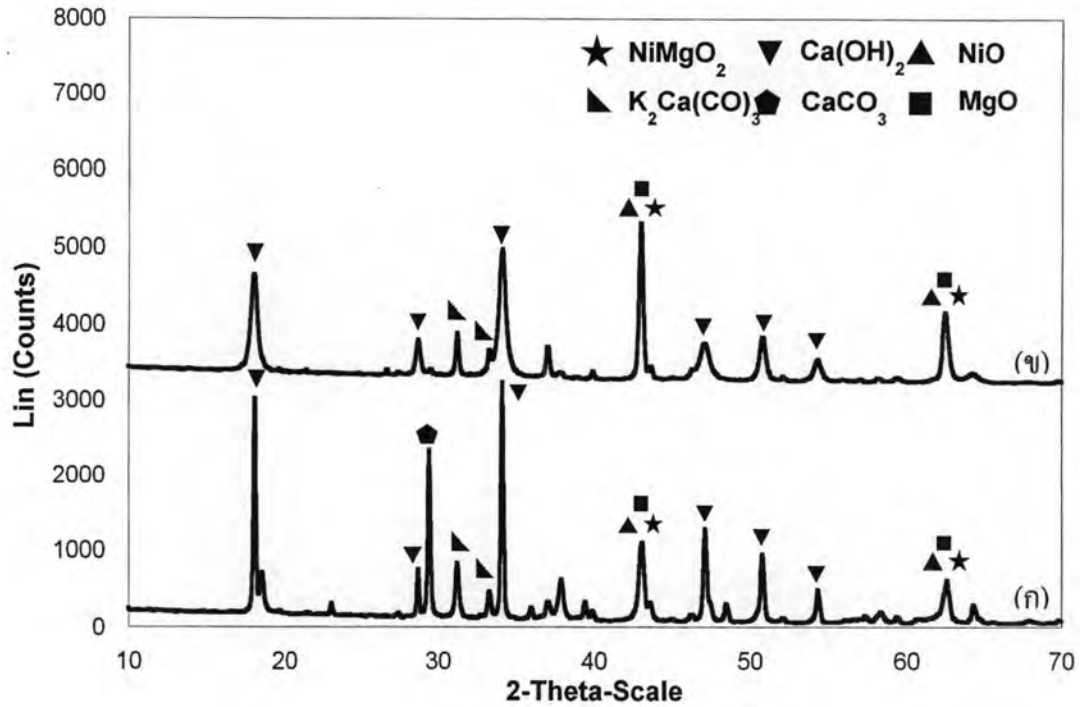
การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-NiO/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่า การนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยรวมลดลง อาจเนื่องมาจาก ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว

จำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา $9\%K_2CO_3-9\%NiO/dolomite$ หลังใช้หนึ่งครั้ง แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาเกิดน้อยลง และนอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา $9\%K_2CO_3-9\%NiO/dolomite$ หลังใช้หนึ่งครั้ง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD แสดงไว้ดังรูปที่ 4.19 พบว่าจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำการทดลองจะไม่พบเฟสของ NiO คาดว่าอาจเกิดจากนิกเกิลออกไซด์เกิดการเปลี่ยนรูป ดังนั้นจึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งปฏิกิริยาได้ลดลงทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง

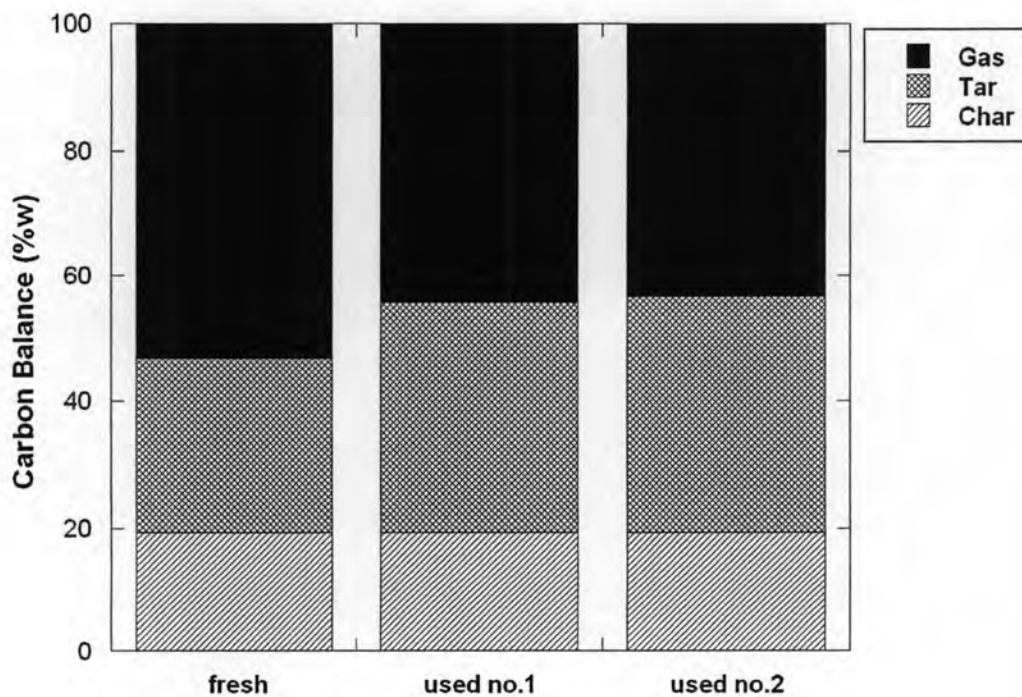
และเมื่อพิจารณาผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $9\%K_2CO_3-NiO/dolomite$ ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าจะทำให้ปริมาณน้ำมันทาร์เพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง อาจเนื่องมาจาก ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเร่งปฏิกิริยาได้ลดลงดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง ปริมาณน้ำมันทาร์เพิ่มขึ้น ส่วนส่วนที่เหลือคงที่ เนื่องจากปริมาณส่วนที่เหลือที่ได้ไม่สัมพันธ์กับไอน้ำโดยตรง มีเพียงผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันทาร์ที่ได้จากขั้นตอนในกระบวนการไพโรไลซิสเท่านั้นที่สัมพันธ์กับไอน้ำ



รูปที่ 4.18 ผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $9\%K_2CO_3-9\%NiO/dolomite$ ต่อผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ด้วยเครื่อง XRD: (ก) ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ก่อนใช้ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite หลังใช้ ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 ผลของเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของไอน้ำ 58 โดยปริมาตร

4.3.7 ผลของการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาลดลง อีกทั้งยังช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาที่ต้องการมากขึ้น แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้ว อาจเกิดการหน่วงปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ โดยตรวจสอบจากผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดและผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมด ตารางที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้ และผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้ ด้วยเครื่อง x-ray diffraction แสดงดังรูปที่ 4.8

4.3.7.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว

ศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว โดยเทคนิคการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้หนึ่งครั้ง

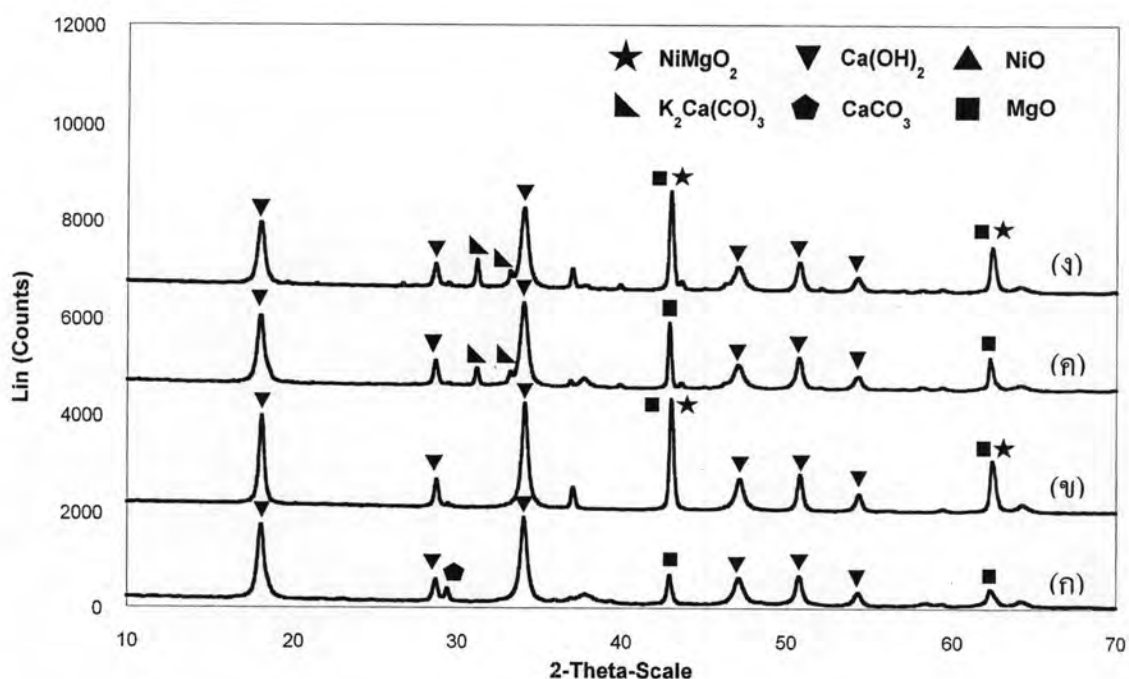
สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)
Calcined dolomite (ก่อนใช้)	20.75	0.126
Calcined dolomite (หลังใช้)	22.24	0.106
9%NiO/dolomite (ก่อนใช้)	14.11	0.066
9%NiO/dolomite (หลังใช้)	15.20	0.067
9%K ₂ CO ₃ /dolomite (ก่อนใช้)	9.39	0.041
9%K ₂ CO ₃ /dolomite (หลังใช้)	5.48	0.013
9%K ₂ CO ₃ -9%NiO/dolomite(ก่อนใช้)	13.49	0.051
9%K ₂ CO ₃ -9%NiO/dolomite (หลังใช้)	4.39	0.013
9%K ₂ CO ₃ -9%NiO/dolomite (900°C)	3.54	0.010

จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้หนึ่งครั้ง พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา 9%K₂CO₃/dolomite, 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite และ

9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ลดลง ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง

4.3.7.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ โดยการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้ ด้วยเครื่อง x-ray diffraction

การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้ ด้วยเครื่อง x-ray diffraction แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำการทดลองจะไม่พบเฟสของ NiO คาดว่าอาจเกิดจากนิกเกิลออกไซด์เกิดการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของเฟส NiMgO₄ และไม่พบเฟสของ CaCO₃ คาดว่าอาจเปลี่ยนรูปไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แต่จากผลการทดลองก็ไม่พบเฟสของแคลเซียมออกไซด์เช่นเดียวกันอาจเป็นเพราะแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำเปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้ ด้วยเครื่อง XRD: (ก) dolomite (ข) 9%NiO/dolomite (ค) 9%K₂CO₃/dolomite (ง) 9%K₂CO₃-9%NiO/dolomite