

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	๗
สารบัญภาพ	๘
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ถ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 พลังงาน และพลังงานทดแทน	2
1.2.1 พลังงานสิ้นเปลือง	2
1.2.2 พลังงานหมุนเวียน	2
1.3 ชีวมวล	
1.3.1 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล	5
1.3.2 องค์ประกอบของชีวมวลที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า	7
1.3.3 ชูคาลิปตัส	7
1.4 ไฮโดรเจน	9
1.5 แก๊สสังเคราะห์	10
1.5.1 การปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยไอน้ำ	11
1.5.2 การออกซิไดส์บางส่วน	12
1.6 แก๊สฟิเคชัน	13
1.6.1 ทฤษฎีแก๊สฟิเคชัน	13
1.6.2 ปฏิกริยาเผาไหม้พื้นฐาน	15
1.6.3 ประเภทของกระบวนการแก๊สฟิเคชัน	17
1.7 ชนิดของเตาปฏิกรณ์	18
1.7.1 เตาแบบแก๊สไหลขึ้น	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.7.2 เตาแบบแก๊สไหลลง	20
1.7.3 เตาแบบแก๊สไหลขวาง	22
1.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี	23
1.8.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา	23
1.8.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ	24
1.8.3 ถ่านกัมมันต์	25
1.9 การกำจัดทาร์	26
1.9.1 การกำจัดทาร์ระหว่างปฏิกิริยา	27
1.9.2 การกำจัดทาร์หลังปฏิกิริยา	28
1.10 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
1.11 วัตถุประสงค์ของโครงการ	32
1.12 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการศึกษา	32
เชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	
1.14 ขอบเขตงานวิจัย	32
 บทที่ 2 การทดลอง	
2.1 วัสดุ สารเคมีและอุปกรณ์	34
2.1.1 ตัวอย่าง	34
2.1.2 สารเคมี	34
2.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์	35
2.1.4 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	36
2.1.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	37
2.2 วิธีการทดลอง	38
2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ	38
2.2.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ	39
2.2.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน	39
2.2.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ โดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน	40
2.2.6 การวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยา	41
2.2.7 การหา Heating zone ของท่อปฏิกรณ์แบบเบคนิง	42
2.2.8 การทดสอบอุณหภูมิของเครื่องระเหย	43
2.2.9 การทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบคนิง	44
2.2.10 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากยูคาลิปตัสโดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำ แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา	44
2.2.11 การหาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เหมาะสมในการแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำ แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา	45
2.2.12 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ	45
2.2.13 สรุปวิธีการทดลองในงานวิจัย	45
บทที่ 3 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	52
3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของยูคาลิปตัสและขี้เลื่อย	52
3.2 การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์	53
3.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์	55
3.3.1 ผลการหา Heating zone ในท่อปฏิกรณ์ แบบเบคนิงของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	55
3.3.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องไถ่สารระเหย	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	58
3.4 ผลการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแกสซิเฟเคชัน ด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	59
3.4.1 ผลการทดลองการแกสซิเฟเคชันของยูคาลิปตัสโดยใช้ และไม่ใช้ไอน้ำแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล บนถ่านหินลิกไนต์	59
3.4.2 ผลการทดลองการแกสซิเฟเคชันของยูคาลิปตัสโดยใช้ และไม่ใช้ไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหิน ลิกไนต์ และผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหิน ลิกไนต์โดยไม่มียูคาลิปตัส	60
3.5 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากยูคาลิปตัสโดยแกสซิเฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา	63
3.5.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส แต่ละชนิด	63
3.5.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของ ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	65
3.5.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมล ของ H_2/CO และ ผลรวมของ H_2+CO	66
3.5.4 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป ของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อน ที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	67
3.6 ผลการศึกษาการหาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัส โดยแกสซิเฟเคชัน ด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.1 ผลการศึกษาอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ที่มีต่อ องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์	70
3.6.2 ผลของอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์	72
3.6.3 ผลการศึกษาอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่ง ปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ที่มีผลต่ออัตราส่วน ร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	73
3.6.4 ผลของอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ ต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยา ไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อน ที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	74
3.7 ผลการศึกษาอัตราสารป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน จากยูคาลิปตัสโดยแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	75
3.7.1 ผลการศึกษาอัตราสารป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของ ผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด	76
3.7.2 ผลการศึกษาอัตราสารป้อนไอน้ำต่อร้อยละการกระจายตัว ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	77
3.7.3 ผลการศึกษาอัตราสารป้อนไอน้ำที่มีผลต่ออัตราส่วน ร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	78
3.7.4 ผลของอัตราสารป้อนไอน้ำของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป ของผลิตภัณฑ์แก๊ส	79

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลในการผลิตไฮโดรเจน โดยแก๊สฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล บนถ่านหินลิกไนต์	81
3.8.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผล ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส	81
3.8.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผล ต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	84
3.8.3 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผล ต่ออัตราส่วนร้อยละ โดยโมล ของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	85
3.8.4 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวล ต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป และร้อยละผลิตภัณฑ์ ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	87
3.9 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มาใช้ซ้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา	88
3.9.1 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหิน ลิกไนต์มาใช้ซ้ำที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส	88
3.9.2 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่มีผลต่อ ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์	89
3.9.3 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่มีผลต่อ อัตราส่วนร้อยละโดยมวลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	90
3.9.4 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่มีผลต่อ ร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป และร้อยละผลิตภัณฑ์ ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.10 ผลการศึกษาแนวโน้มของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยการแกสลิไฟเคชันของยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	93
3.10.1 ผลการศึกษาแนวโน้มองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	93
3.10.2 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	94
3.10.3 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	96
3.10.4 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	97
3.11 เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ	99
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	102
4.1 สรุปผลการทดลอง	102
4.2 สรุปผลการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัสโดยแกสลิไฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	104
4.3 สรุปผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัส โดยแกสลิไฟเคชัน ด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา	104
4.4 ผลการศึกษาการหาอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากยูคาลิปตัส โดยแกสลิไฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา	105

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน จากยูคาลิปตัสโดยแกสซิฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	106
4.6 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลในการผลิตไฮโดรเจนโดย แกสซิฟเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	107
4.7 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มาใช้ซ้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา	108
4.8 ผลการศึกษาแนวโน้มของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยการแกสซิฟเคชันของยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำ แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	109
4.9 ข้อเสนอแนะ	111
บรรณานุกรม	112
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของยูคาลิปตัส และขี้เลื่อย	117
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านหิน	119
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของยูคาลิปตัส ขี้เลื่อยและถ่านหิน	121
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าความร้อนและปริมาณซัลเฟอร์ของยูคาลิปตัส ขี้เลื่อย และถ่านหิน	122
ภาคผนวก จ การหาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	127
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีของผลิตภัณฑ์แก๊ส	129
ภาคผนวก ช กราฟมาตรฐานของผลิตภัณฑ์แก๊ส	133
ภาคผนวก ซ โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์แก๊ส	135
ภาคผนวก ฌ การคำนวณหาความดันย่อยของไอน้ำ	136
ภาคผนวก ญ การทำสมดุลคาร์บอน	137
ประวัติผู้เขียน	139

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ข้อดี – ข้อเสียของพลังงานสิ้นเปลืองและพลังงานหมุนเวียน	3
1.2 ปฏิบัติการเผาไหม้พื้นฐาน	16
2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	34
2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	35
3.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของยูคาลิปตัสของยูคาลิปตัส และขี้เลื่อย	52
3.2 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์	53
3.3 ผลการวิเคราะห์โลหะในถ่านหินลิกไนต์ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์โดยเทคนิคอะตอมมิก แอ็บซอร์บชันสเปกโตรโฟโตเมทรี	55
3.4 ค่าอุณหภูมิในส่วน Heating zone ในท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา	56
3.5 เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ	99
ง-1 การวิเคราะห์หาค่าความร้อนในการทดลอง	123
ง-2 ข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าความร้อนของยูคาลิปตัส	125
ซ-1 ค่า Retention time ของผลิตภัณฑ์แก๊ส และแก๊สมาตรฐาน	134

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1 โครงสร้างของเซลล์โลส	5
1.2 โครงสร้างของเฮมิเซลล์โลส	6
1.3 โครงสร้างของลิกนิน	6
1.4 กระบวนการแกสไฟเคชันของถ่านหิน	14
1.5 Moving bed gasifier	15
1.6 ลักษณะของเตาแบบแก๊สไหลขึ้น	20
1.7 ลักษณะของเตาแบบแก๊สไหลลง	21
1.8 ลักษณะของเตาแบบแก๊สไหลขวาง	23
2.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	36
2.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ	37
2.3 ตัวอย่างยูคาลิปตัสที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 – 0.45 มิลลิเมตร	38
2.4 ตัวอย่างขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 – 0.45 มิลลิเมตร	38
2.5 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb calorimeter)	40
2.6 (ก) ตัวอย่างถ่านหินก่อนเผา และ (ข) ตัวอย่างถ่านหินหลังเผา	41
2.7 ขั้นตอนการย่อยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหิน	42
2.8 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี	42
2.9 เครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา	43
2.10 เครื่องไล่สารระเหย	43
2.11 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง	46
2.12 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	47
2.13 ขั้นตอนการแกสไฟเคชันของยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	48
3.1 ท่อปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา	55
3.2 อุณหภูมิในท่อปฏิกรณ์กับระยะห่างจากตะแกรงในท่อปฏิกรณ์	56
3.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องไล่สารระเหยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 500 – 650 องศาเซลเซียส	58
3.5 ผลการทดลองการแกสฟิเคชันของยูคาลิปตัสโดยการใช้ และไม่ใช้ไอน้ำ แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	59
3.6 ผลการทดลองการแกสฟิเคชันของยูคาลิปตัสโดยการใช้ และไม่ใช้ไอน้ำ แบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์ และผลของตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์โดยไม่มียูคาลิปตัส	60
3.7 ผลการศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 500 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส	63
3.8 ผลของอุณหภูมิ 500 – 650 องศาเซลเซียส ต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ แก๊สทั้งหมดโดยใช้ไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์	65
3.9 ผลของอุณหภูมิ 500 – 650 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราส่วนของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	66
3.10 (ก) ร้อยละที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส	68
3.10 (ข) ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป ของผลิตภัณฑ์แก๊ส	69
3.11 ผลของอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบ ของผลิตภัณฑ์แก๊ส	70
3.12 ผลของอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละ การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์	72
3.13 ผลของอัตราส่วนร้อยละ โดยโมลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผล ต่ออัตราส่วนร้อยละ โดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	73
3.14 (ก) ผลของอัตราส่วน โดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล บนถ่านหินลิกไนต์ต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส	74
3.14 (ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	75
3.15 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส แต่ละชนิด	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.16 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	77
3.17 ผลการศึกษาอัตราการป้อนไอน้ำที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	78
3.18 (ก) ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไป	80
3.18 (ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	80
3.19 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส	82
3.20 การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก	83
3.21 อัตราการสูญเสียน้ำหนัก	83
3.22 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	85
3.23 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบชนิดของชีวมวลที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยโมลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	86
3.24 ผลของชีวมวลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	87
3.25 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์มาใช้ซ้ำที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส	89
3.26 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่มีผลต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์	90
3.27 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ	91
3.28 ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	93
3.29 ผลการศึกษาแนวโน้มองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.30 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	95
3.31 ผลการศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนร้อยละโดยมวลของ H_2/CO และผลรวมของ H_2+CO	96
3.32 (ก) ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสที่มีผลต่อร้อยละสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของยูคาลิปตัส	97
3.32 (ข) ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อนที่ทำปฏิกิริยาไปของผลิตภัณฑ์แก๊ส	98
ค-1 เครื่องวิเคราะห์ CHNS/O	121
ง-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาในการทดลองบอมบ์แคลอริมิเตอร์ของยูคาลิปตัส	125
จ-1 กราฟมาตรฐานนิกเกิล	127
ฉ-1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ	129
ช-1 กราฟมาตรฐานของแก๊สไฮโดรเจน	133
ช-2 กราฟมาตรฐานของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์	134
ช-3 กราฟมาตรฐานของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	134
ช-1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแก๊สเฟสยูคาลิปตัสด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีอัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1 ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส	135
ญ-1 สมดุลคาร์บอนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสที่อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1:1	138
ญ-2 สมดุลคาร์บอนที่อัตราส่วนโดยมวลของยูคาลิปตัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 1:5 อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส	138

อักษรย่อและสัญลักษณ์

ชื่อย่อ	ชื่อเต็ม
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส (Degree celcius)
%	ร้อยละ (Percentage)
%wt	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Percentage by weight)
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม (Milligram per gram)
ml/min	มิลลิลิตรต่อนาที (Milliliter per minute)
MJ/kg	เมกะจูลต่อกิโลกรัม (Megajoule per kilogram)
M	โมลาร์ (Molar)
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร (Milligram per litre)
ppm	หนึ่งในล้านส่วน (Part per million)
ml	มิลลิลิตร (Milliliter)
lb	ปอนด์ (Pound)
cal	แคลอรี (Calori)
cal/g	แคลอรีต่อกรัม (Calori per gram)
N	นิวตัน (Newton)
kPa	กิโลปาสกาล (Kilopascal)
$\bar{h}$	เอนทัลปี (Enthalpy)