การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ใช้ในกระบวนการสตีมรีฟอร์มมิง

นายศิริพล คุณาธิปพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2529

ISBN 974-566-573-8

013222

I 17471CC

PREPARATION OF NICKEL CATALYST USED IN STEAM REFORMING PROCESS

Mr. Siripoln Kunatippapong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1986

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ใช้ในกระบวนการสตีมรีฟอร์มมิง
โดย	นายศิริพล คุณาธิปพงษ์
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม
	ดร.จรัญญา พิชิตกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

---------- คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรชัย พิศาลบุตร)

รักษาการในตำแหน่งรองคณบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนรักษาการในตำแหน่งคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---------- ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยวประเสริฐ)

---------- กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ สิทธิสุนทร)

---------- กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

---------- กรรมการ

(ดร.จรัญญา พิชิตกุล)

---------- กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ใช้ในกระบวนการสตีมรีฟอร์มมิง

ชื่อนิสิต นายศิริพล คุณาธิปพงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม

ดร.จรัญญา พิชิตกุล

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2528

พลสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ในการศึกษาปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการชับชนิดแห้ง 5 ชุด และตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือ C11-9-02 ของบริษัท ยูไนเต็ดคาตาลิส สหรัฐอเมริกา จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชุดที่ประกอบด้วยนิเกิลร้อยละ 12 ที่ใช้อะลูมินา SA-3232 ของบริษัท นอตัน สหรัฐอเมริกา เป็นตัวรองรับ ที่สภาวะอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ความดัน 5 บรรยากาศสัมบูรณ์ และอัตราส่วนของไอน้ำต่อก๊าซมีเธน 3:1 ให้ร้อยละของการเปลี่ยนรูปสูงสุดของมีเธน คือ 91.83 สำหรับการหาสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาแบบยกกำลังของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเตรียมขึ้นเองที่มีความว่องไวเชิงปฏิกิริยาสูงสุด สมการที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ $1.83\ P_{CH_4}^{1.27} P_{H_2O}^{1.24}$

Thesis Title Preparation of Nickel Catalyst Used in Steam Reforming Process

Name Siripoln Kunatippapong

Thesis Advisor Associated Professor Piyasan Praserthdam, Dr.Ing.
Charunya Phichitkul, Ph.D.

Department Chemical Engineering

Academic Year 1985

Abstract

In experimental studies of methane steam reforming reaction, five series of nickel catalysts prepared in laboratory by dry impregnation method and another industrial catalyst No.C11-9-02 of United Catalyst Inc.,U.S.A. were used. The experiments showed that at 760°C, 5 atm(abs), and 3:1 of steam to methane ratio, 12 percent nickel on alumina support No.SA-3232 of Norton Inc., U.S.A. gave the maximum conversion of methane upto 91.83 percent. To evaluate the power law rate expression of the maximum activity of the prepared catalyst gave $1.83\ P_{CH_4}^{1.27} P_{H_2O}^{1.24}$.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม และ ดร. จรัญญา นิชิตกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ ประธานกรรมการ ศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ สิทธิสุนทร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ซึ่งเป็นกรรมการ

สำหรับทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้รับจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงใคร่ขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ศิริพล คุณาธิปพงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2529

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

รายการตารางประกอบ ..... ฌ

รายการรูปประกอบ ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง 1

1.2 ประวัติความเป็นมาและความคาดหวังในอนาคต 2

1.3 กระบวนการสตีมรีฟอร์มมิงในประเทศไทย 5

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 5

2. ทฤษฎีสตีมรีฟอร์มมิง 6

2.1 วัตถุดิบ 6

2.2 เทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง 6

2.3 จลนพลศาสตร์และกลไกปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง 20

2.4 กระบวนการสตีมรีฟอร์มมิงในอุตสาหกรรม 29

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ 31

3.1 การนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในอุตสาหกรรม 31

3.2 ลักษณะพื้นฐานของกระบวนการตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ 32

3.3 กระบวนการการดูดซับ 36

3.4 สมการอัตราเร็วของปฏิกิริยา 41

3.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ 47

3.6 ตัวรองรับ 56

3.7 โพรโมเตอร์ 57

หน้า

3.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะเกาะบนตัวรองรับ 59
3.9 ระนาบของผลึก 61
4. ตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ใช้ในกระบวนการสตีมรีฟอร์มมิง 64
4.1 พื้นที่ผิวของนิเกิล 64
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของพื้นที่ของนิเกิล 69
4.3 ตัวรองรับ 73
5. เครื่องมือทดลองและหลักการ 77
5.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลโดยวิธีชับ 77
5.2 เครื่องมือสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง 78
5.3 เครื่องมือทดลองสำหรับทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นและ
สมการอัตราเร็วแบบยกกำลังของปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิง 79
5.4 เครื่องวิเคราะห์ 87
5.5 แผนการทดลองเพื่อทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่เตรียมขึ้น
และหาสมการอัตราเร็วแบบยกกำลัง 87
5.6 การหาค่าการเข้าใกล้สมดุลของปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิง
และปฏิกิริยาวอเตอร์ก๊าซชิฟ 90
6. วิธีการทดลองและผลการทดลอง 97
6.1 วิธีการทดลอง 97
6.2 ผลการทดลอง 106
7. สรุปผลการทดลองและอภิปราย 129
7.1 สรุปผลการทดลอง 129
7.2 อภิปราย 129
เอกสารอ้างอิง 138
ภาคผนวก 142
สัญญลักษณ์ 187
ศัพท์ทางวิชาการ 193
ประวัติ 196

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
1.1	ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง	2
2.1	ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิงที่ความดันและอุณหภูมิต่างกันเมื่ออัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน 2:1	9
2.2	แสดงค่าของเอนทาลปีที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสภาวะของปฏิกิริยาเปลี่ยนไป	18
2.3	ชนิดของคาร์บอนที่สะสมบนตัวเร่งปฏิกิริยา	19
2.4	จลนพลศาสตร์เคมีและกลไกปฏิกิริยาของปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง	21
3.1	ความแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งวิวิธพันธ์	32
3.2	กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม	34
3.3	แสดงความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี	38
3.4	เทอมต่างๆของอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยใช้ไอโซเทอมแลงเมียร์	46
3.5	ความดันคาพิลารีของตัวรองรับต่างชนิดกัน	50
3.6	ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซับและแบบตกตะกอน	52
3.7	คุณสมบัติของตัวรองรับ	56
3.8	ตัวรองรับแบ่งตามคุณสมบัติที่เป็นเบส กรด กลาง ครึ่งกรด ครึ่งเบส และจุดหลอมเหลว (°ซ)	58
3.9	ตังรองรับแบ่งตามพื้นที่ผิว	58
4.1	องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิงที่ใช้ในอุตสาหกรรม	65
4.2	การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลโดยวิธีต่างๆ	68
4.3	อิทธิพลของตัวแปรต่อพื้นที่ผิวของนิเกิลและ%นิเกิลที่ถูกรีดิวระหว่างการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาว่องไวในเชิงปฏิกิริยา	72
4.4	ตัวอย่างของตัวรองรับที่ใช้ในปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง	74
5.1	คุณสมบัติของตัวรองรับ SA-5232 ของบริษัทนอตัน	91
5.2	คุณสมบัติของตัวรองรับ,ตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัทยูไนเต็ดคาตาลิส	92

ตารางที่ หน้า

6.1 การหาปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับอะลูมินา 106

6.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของนิเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอบชัน 116

6.3 ผลการวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ ดิฟแฟรคชัน 117

6.4 ผลการทดลองเพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด 119

6.5 ข้อมูลสำหรับการหาสมการอัตราเร็วแบบยกกำลังของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 สภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 760°ซ ความดัน 5 บรรยากาศ อัตราส่วนไอน้ำต่อก๊าซมีเธน 3.07 ± 0.08 น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0003 กรัม 120

6.6 ค่าคงที่และค่าทางสถิติในสมการที่ (6.1) หลังจากการทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบถดถอยในตารางที่ 6.4 122

6.7 ข้อมูลสำหรับหาค่า k, α, β ของตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่เตรียมขึ้นเอง (12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232) 123

6.8 ผลการวิเคราะห์จากการวิเคราะห์แบบถดถอยเพื่อหาค่า k, α, β ของตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่เตรียมขึ้นเอง (12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232) 124

6.9 ข้อมูลทางการเข้าใกล้สมดุลของปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิงและปฏิกิริยาวอเตอร์ก๊าซชีพของชุดการทดลองเพื่อหาชุดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด 125

6.10 ข้อมูลทางการเข้าใกล้สมดุลของปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิงและปฏิกิริยาวอเตอร์ก๊าซชีพของชุดการทดลองเพื่อหาสมการอัตราเร็วแบบยกกำลังของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง (12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232) 126

7.1 แสดงจำนวนครั้งของการซับของตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการโดยวิธีการซับชนิดแห้ง 132

7.2 การทดสอบสถิติ F (ด้วย % ความเชื่อมั่น 99%) 135

7.3 การทดสอบบรรทัดฐานของการถ่ายเทมวลและความร้อนในเตาปฏิกรณ์เคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้อง 136

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	ความเข้มข้นของมีเธนเมื่อเป็นฟังชันกับอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนของมีเธน	10
2.2	ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์เมื่อเป็นฟังชันกับอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนของมีเธน	11
2.3	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเป็นฟังชันกับอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนของมีเธน	12
2.4	ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์เมื่อเป็นฟังชันกับอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนของแนพธา	13
2.5	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเป็นฟังชันกับอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนของแนพธา	14
2.6	ความเข้มข้นของมีเธนเมื่อเป็นฟังชันกับอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนของแนพธา	15
2.7	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเมื่อเป็นฟังชันกับอุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนของแนพธา	16
2.8	อันตรกิริยาระหว่างไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะที่คงที่ตามสมการ (2.25) สำหรับ K_{VI}	28
2.9	ขั้นตอนการผลิตก๊าซสังเคราะห์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป	30
3.1	ลำดับขั้นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในเชิงอุตสาหกรรม	33
3.2	ชนิดของไอโซเทอร์มการดูดซับ	38
3.3	แสดงปรากฏการณ์ฮิสเทอริซิส	39
3.4	แสดงพฤติกรรมการดูดซับเกลือโลหะที่แพร่กระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา	49
3.5	อิทธิพลของตัวรองรับที่มีผลต่อการรีดักชันเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงที่ 538°ซ มาก่อน	55

รูปที่ หน้า

3.6 อิทธิพลของตัวรองรับที่มีผลต่อการรีดักชันเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงที่ 737°ซ มาก่อน 55

3.7 แสดงลักษณะการเกิดการรวมตัวเนื่องจากความร้อน 60

3.8 แสดงถึงวิธีการหาดัชนีมิลเลอ 63

3.9 ระนาบ (100), (110), (111) ซึ่งสมมติว่าเป็นระนาบของผลึกโลหะเหล็กของปฏิกิริยาการสังเคราะห์แอมโมเนีย 63

4.1 ตัวรองรับเซรามิกสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาสตีมรีฟอร์มมิง 65

4.2 การกระจายของอิเลคตรอนของตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลบนตัวรองรับเซรามิก ($Ni/MgAl_2O_4$) ที่มีพื้นที่ผิว S_{BET}~ 1 m^2/gm 66

4.3 อิทธิพลของปริมาณของนิเกิลบนตัวรองรับต่างๆที่มีต่อพื้นที่ผิวและความว่องไวเชิงปฏิกิริยาของปฏิกิริยาอีเธนสตีมรีฟอร์มมิง 70

4.4 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา $NiO + H_2 = Ni + H_2O$ 70

4.5 การรีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิล โดยดูอิทธิพลของสภาวะต่างๆที่มีต่อพื้นที่ผิวของนิเกิล (25% Ni บนตัวรองรับอะลูมินาที่ความดัน 1 บรรยากาศ) 71

4.6 การรวมตัวกันของผลึกนิเกิลเนื่องจากความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา 73

4.7 ค่าความดันย่อยของไอน้ำที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา $Mg(OH)_2 = MgO+H_2O$ .. 76

4.8 ค่าคงที่สมดุลของการรีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยา 76

5.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลโดยวิธีชับ 77

5.2 เครื่องมือสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง(Calcinator) 78

5.3 เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ 80

5.4 เครื่องมือทดลองสำหรับปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิง 81

5.5 เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ 82

5.6 ระบบตัวทำให้ก๊าซอิ่มตัวและตัวควบแน่น 83

5.7 แสดงเส้นโค้งอิ่มตัวของไอน้ำ 85

5.8 เตาปฏิกรณ์เคมีที่ใช้ในการวิจัย 86

5.9 ลักษณะของจุดเก็บตัวอย่าง 87

รูปที่ หน้า

5.10 ตัวอย่างการหาค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยา (ค่าความชัน) เมื่อค่าการเปลี่ยนรูป (X) และตัวประกอบเวลา(T.F.) เปลี่ยนไป 89

5.11 แสดงลักษณะของตัวรองรับ SA-3232 ของบริษัทนอตัน 95

5.12 แสดงลักษณะของตัวรองรับ CS303 ของบริษัทยูไนเต็ดคาตาลิส 95

5.13 แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา C11-9-02 ที่ใช้ในกระบวนการสตีมรีฟอร์มมิง 96

6.1 ชุดเครื่องมือสำหรับเตรียมตัวรองรับขนาด 40/60 เมช 98

6.2 ตัวรองรับอะลูมินาขนาด40/60 เมช หลังจากผ่านเครื่องแล่ง 99

6.3 ตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิล C11-9-02 ที่ใช้ในปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิงขนาด 40/60 เมช หลังจากผ่านเครื่องแล่ง 99

6.4 เครื่องมือเช็คหาปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับ 100

6.5 เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีชับชนิดแห้ง 101

6.6 เครื่องมือสำหรับเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง 102

6.7 แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่เตรียมขึ้นเองหลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง 500°ซ ซึ่งลักษณะของเม็ดที่ได้ออกสีเทา 103

6.8 แผนภาพเครื่องมือแสดงการคาลิเบรตก๊าซมีเธน 104

6.9 แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่เตรียมขึ้นเองหลังจากการรีดักชันซึ่งลักษณะของเม็ดที่ได้ออกสีดำ 104

6.10 เครื่องมือที่ใช้ทดลองสำหรับการศึกษาปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิง 107

6.11 แสดงลักษณะของการเผาที่อุณหภูมิสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง ของชุด 12% Ni บนตัวรองรับ CS303 โดยวิธีการชับชนิดแห้งหลายครั้ง (ครั้งที่ 1 จาก 0% เป็น 4%) ด้วยอัตราเร่ง 3°ซต่อนาที จนกระทั่งถึง 500°ซ แล้วปล่อยให้คงที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 108

6.12 แสดงลักษณะของการเผาที่อุณหภูมิสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง ของชุด 12% Ni บนตัวรองรับ CS303 โดยวิธีการชับชนิดแห้งหลายครั้ง (ครั้งที่ 2 จาก 4% เป็น 8%) ด้วยอัตราเร่ง 3°ซต่อนาที จนกระทั่งถึง

รูปที่ หน้า

500°ซ แล้วปล่อยให้คงที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 109

6.13 แสดงลักษณะการเผาที่อุณหภูมิสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง ของชุด 12% Ni บนตัวรองรับ CS303 โดยวิธีการชับชนิดแห้งหลายครั้ง (ครั้งที่ 3 จาก 8% เป็น 12%) ด้วยอัตราเร่ง 3°ซต่อนาที จนกระทั่งถึง 500°ซ แล้วปล่อยให้คงที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 110

6.14 แสดงลักษณะของการเผาที่อุณหภูมิสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง ของชุด 8% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 โดยวิธีการชับชนิดแห้งครั้งเดียว และชุดของ 16% Ni โดยวิธีการชับชนิดแห้งหลายครั้ง (ครั้งที่ 1 จาก 0% เป็น 8%)ด้วยอัตราเร่ง 3°ซต่อนาที จนกระทั่งถึง 500°ซ แล้วปล่อย ให้คงที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 111

6.15 แสดงลักษณะของการเผาที่อุณหภูมิสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง ของชุด 16% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 โดยวิธีการชับชนิดแห้ง หลายครั้ง (ครั้งที่ 2 จาก 8% เป็น 16%) ด้วยอัตราเร่ง 3°ซต่อนาที จนกระทั่งถึง 500°ซ แล้วปล่อยให้คงที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 112

6.16 แสดงลักษณะของการเผาที่อุณหภูมิสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง ของชุด 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 โดยวิธีการชับชนิดแห้งครั้ง เดียว และของชุด 24% Ni โดยวิธีการชับชนิดแห้งหลายครั้ง (ครั้งที่ 1 จาก 0% เป็น 12%) ด้วยอัตราเร่ง 3°ซต่อนาที จนกระทั่งถึง 500°ซ แล้วปล่อยให้คงที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 113

6.17 แสดงลักษณะของการเผาที่อุณหภูมิสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง ของชุด 24% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 โดยวิธีการชับชนิดแห้งหลายครั้ง (ครั้งที่ 2 จาก 12% เป็น 24%) ด้วยอัตราเร่ง 3°ซต่อนาที จนกระทั่งถึง 500°ซ แล้วปล่อยให้คงที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 114

6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซมีเธนกับความแตกต่าง ของความสูงของปรอทในช่วงการทดลอง 115

รูปที่ หน้า

6.19 ข้อมูลการเปลี่ยนรูปสำหรับการวิเคราะห์แบบถดถอยของตัวเร่งปฏิกิริยา
นิเกิลที่เตรียมขึ้นเอง (12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232) 121
6.20 การเข้าใกล้สมดุลของปฏิกิริยามีเธนสตีมรีฟอร์มมิงเมื่อตัวประกอบเวลา
เปลี่ยนไป (ตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมขึ้นเอง 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232). 127
6.21 การเข้าใกล้สมดุลของปฏิกิริยาวอเตอร์ก๊าซชีพเมื่อตัวประกอบเวลาเปลี่ยน
ไป(ตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมขึ้นเอง 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232) 128