

รีฟอร์มมิงของก๊าซ มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยา
...แก๊ส/อลูมินาในฟลูอิดไครซ์เบด



นางสาว ลาวัลย์ เรียรถาวร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2535

ISBN 974-581-314-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018200

i 15191953

CARBON DIOXIDE - METHANE - STEAM REFORMING ON NICKEL/ALUMINA
CATALYST IN FLUIDIZED BED

MISS LAWAN THIENDHAVORN

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1992

ISBN 974-581-314-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ รีฟอร์มมิงก๊าซ มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยา
นิกเกิล/อลูมินาในเฟลูอิดไบด

โดย นางสาวลาวัลย์ เรียรถาวร
ภาควิชา เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

W. R. R.
..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรราช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

[Signature]
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ)

[Signature]
..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

[Signature]
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

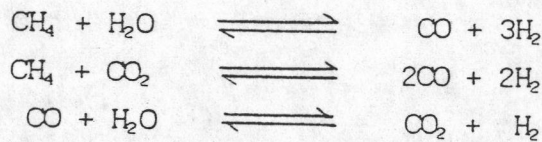
[Signature]
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)

ลาวัลย์ เรียบถาวร : รีฟอร์มมิงของก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาในฟลูอิดไรซ์เบด (CARBON DIOXIDE-METHANE-STEAM REFORMING ON NICKEL/ALUMINA CATALYST IN FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ธราพงษ์ วิฑิตคานต์, ศ.ดร.สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, 171 หน้า. ISBN 974-581-314-1

การศึกษาปฏิกิริยารีฟอร์มมิงก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาในฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้ก๊าซมีเทนจากโรงแยกก๊าซธรรมชาติของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์เบดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.7 เซนติเมตร สูง 30.0 เซนติเมตร ภายในบรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินาที่มีพื้นที่จำเพาะ 230 ตารางเมตร ต่อกรัม ความหนาแน่น 1,610 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนสารตั้งต้น อุณหภูมิ อัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาทดลอง พบว่า การใช้ไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกันเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน จะช่วยปรับอัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ให้อยู่ในช่วงที่นำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้เป็นอย่างดีที่สภาวะอุณหภูมิ 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสารตั้งต้นไอน้ำต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนตั้งแต่ 1.0:4.0:1.0 ถึง 3.0:4.0:1.0 ในการทดลองครั้งนี้ พบว่า อัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทน

ในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นดังนี้



ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2534

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C325649 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

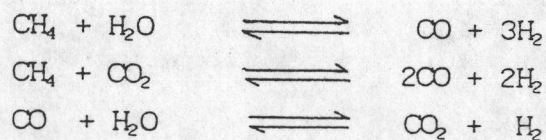
KEY WORD : CARBON DIOXIDE/METHANE/STEAM/REFORMING/FLUIDIZED BED

LAWAN THIENDHAVORN: CARBON DIOXIDE- METHANE- STEAM REFORMING ON NICKEL/ALUMINA CATALYST IN FLUIDIZED BED. THESIS ADVISORS : ASSIST. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Dr. Ing., PROF. SOMSAK DAMRONGLERD, Dr. Ing. 171 pp. ISBN 974-581-314-1

The study of carbon dioxide-methane-steam reforming on nickel/alumina catalyst in fluidized bed was made by using methane from the Separation Gas Plant of Petroleum Authority of Thailand. The number of spherical catalyst particles, 230 m²/g specific area and 1,610 kg/m³ density were fluidized in the cylindrical reactor with 10.7 cm. diameter and 30.0 cm. in height. The experimental variables were ratio of reactants, temperature, velocity of reactants and volume of catalyst.

The experimental results could be concluded that the optimum conditions to produce synthesis gas for petrochemical industries are temperature range from 650 to 800 °C and ratio of steam, carbon dioxide, methane between 1.0:4.0:1.0 and 3.0:4.0:1.0. Moreover, they explicated that the percent conversion of methane depends on the velocity of reactants and volume of catalyst.

Comparing the experimental data with thermodynamics acknowledgement finally found that three reactions occurred in the reforming methane with steam and carbon dioxide are



ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2534

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

การก่อเกิดและความสำเร็จจุล่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ด้วยวิชาความรู้ที่คณาจารย์
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ประสิทธิ์ประสาทให้โดย
ตลอดตามหลักสูตรปริญญาตรีและปริญญาโท โดยเฉพาะความรู้และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์
เล่มนี้จากท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ
ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ทางด้านการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการ และการซ่อมสร้างเครื่องมือเครื่องใช้ก็ได้รับ
ความกรุณาจากคุณสังข์ ชมชื่น และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค ตลอดจนบรรดาพี่ ๆ และ
เพื่อน ๆ นิสิตของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน รวมทั้งการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยที่ให้ความ
อนุเคราะห์ก๊าซมีเทนจากโรงแยกก๊าซธรรมชาติ ต.มาบตาพุด อ.เมือง จ.ระยอง

ทางด้านทุนการศึกษาและวิจัยก็ได้รับทุนการศึกษาจากบริษัท เอสโซ่แอสแตนดาร์ดประเทศ
ไทย จำกัด และทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์ของบัณฑิตวิทยาลัย

คุณานุศลของท่านและองค์กรที่กล่าวมานี้ จักพึงรำลึกถึงไว้เสมอ และใคร่ขอกราบ
ขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตารางประกอบ.....	ญ
สารบัญรูปประกอบ.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ฬ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาการนำก๊าซธรรมชาติไปใช้ประโยชน์.....	2
1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการวิจัย.....	4
2 วารสารปริทัศน์.....	5
2.1 ก๊าซสังเคราะห์.....	5
2.1.1 กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์.....	5
2.1.2 การนำก๊าซสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์.....	15
2.2 ทฤษฎีปฏิกิริยารีฟอร์มมิง.....	22
2.2.1 วัตถุดิบ.....	22
2.2.2 ปฏิกิริยารีฟอร์มมิง.....	22
2.2.3 การพิจารณาความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิง.....	26
2.2.4 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ก๊าซสังเคราะห์..	33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2	2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
	2.3.1 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
	2.3.2 ลักษณะพื้นฐานของกระบวนการตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	40
	2.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการรีฟอร์มมิง.....	47
	2.4 ฟลูอิโดเซชัน.....	64
	2.4.1 ลักษณะของฟลูอิโดเซชันเบด.....	64
	2.4.2 ข้อเปรียบเทียบของเบดหนึ่งกับฟลูอิโดซ์เบด.....	65
	2.4.3 การประยุกต์เทคนิคฟลูอิโดเซชันในกระบวนการรีฟอร์มมิง.....	67
	2.5 งานวิจัยในอดีต.....	68
3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	70
	3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	70
	3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซสังเคราะห์แบบฟลูอิโดซ์เบด.....	73
	3.1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	75
	3.1.3 เครื่องผลิตไอน้ำ.....	79
	3.1.4 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการป้อนก๊าซเข้าเครื่องปฏิกรณ์.....	81
	3.1.5 เครื่องแยกตัวเร่งปฏิกิริยาและไอน้ำออกจากก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้...	81
	3.1.6 ที่เก็บตัวอย่างก๊าซ.....	88
	3.1.7 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ.....	88
	3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....	93
	3.3 วิธีการทดลอง.....	93
	3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al_2O_3	93
	3.3.2 ทำการทดลองหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิโดเซชันของ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al_2O_3	94

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	95
	3.3.4 ดำเนินการทดลอง.....	96
4	ผลการทดลอง.....	99
4.1	อิทธิพลของอัตราส่วนสารตั้งต้นที่มีผลต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีเทนด้วย ไอ้และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์.....	99
4.1.1	อิทธิพลของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่มีผลต่อปฏิกิริยา.....	99
4.1.2	อิทธิพลของไอ้ที่มีผลต่อปฏิกิริยา.....	103
4.2	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีเทนด้วยไอ้และก๊าซ คาร์บอน ไดออกไซด์.....	106
4.3	อิทธิพลของอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นที่มีผลต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีเทนด้วยไอ้และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์.....	110
4.4	อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีเทนด้วยไอ้และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์.....	112
5	วิจารณ์ผลการทดลอง.....	114
5.1	แบบจำลองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีเทนด้วยไอ้และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์.....	114
5.2	อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่มีเทนด้วยไอ้และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์.....	132
5.2.1	อัตราส่วนสารตั้งต้น.....	132
5.2.2	อุณหภูมิ.....	135
5.2.3	อัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้น.....	136
5.2.4	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	136
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	137

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รายการอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	171

สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงอัตราส่วนก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากการผลิตวิธีต่าง ๆ.....	6
2.2 แสดงการนำก๊าซสังเคราะห์ไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี.....	10
2.3 แสดงต้นทุนของการผลิตก๊าซสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ	12
2.4 แสดงวิธีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่าง ๆ	19
2.5 แสดงปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจนทั่วโลกปี ค.ศ.2000.....	20
2.6 แสดงถึงการแบ่งตัวรองรับตามจุดหลอมเหลวและความเป็นกรด-เบส.....	45
2.7 แสดงตัวรองรับชนิดต่าง ๆ ตามพื้นที่ผิว.....	46
2.8 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาริฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	48
2.9 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่อพื้นที่ผิวของนิกเกิลและเปอร์เซนต์นิกเกิลที่ถูกรีดิวซ์ ระหว่างที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอ่อนไหวในเชิงปฏิกิริยา.....	52
2.10 แสดงตัวอย่างของตัวรองรับที่ใช้ในปฏิกิริยาริฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ.....	55
2.11 แสดงตัวรองรับอลูมินารูปแบบต่าง ๆ กัน.....	62
2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับต่าง ๆ	63
2.13 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเบดนี้กับฟลูอิโดซ์เบด.....	66
3.1 แสดงค่าการนำความร้อนของก๊าซชนิดต่าง ๆ.....	85
5.1 แสดงค่า $\log k_p$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	116
5.2 แสดงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	117
5.3 แสดงผลการคำนวณสัดส่วน โดย โมลของก๊าซแต่ละชนิดในผลิตภัณฑ์ตามแบบ จำลองที่ 1.....	119
5.4 แสดงผลการคำนวณสัดส่วน โดย โมลของก๊าซแต่ละชนิดในผลิตภัณฑ์ตามแบบ จำลองที่ 2.....	122

สารบัญตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.5 แสดงผลการคำนวณสัดส่วน โดย โมลของก๊าซแต่ละชนิด ในผลิตภัณฑ์ตามแบบ จำลองที่ 3.....	124
5.6 แสดงผลการคำนวณสัดส่วน โดย โมลของก๊าซแต่ละชนิด ในผลิตภัณฑ์ตามแบบ จำลองที่ 4.....	126
5.7 แสดงผลการคำนวณสัดส่วน โดย โมลของก๊าซแต่ละชนิด ในผลิตภัณฑ์ตามแบบ จำลองที่ 5.....	128
5.8 แสดงผลการคำนวณสัดส่วน โดย โมลของก๊าซแต่ละชนิด ในผลิตภัณฑ์ตามแบบ จำลองที่ 6.....	130
ก.1 แสดงข้อมูลอิทธิพลของอัตราส่วนของไอน้ำต่อก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ต่อมีเทน โดยให้ไอน้ำมีปริมาณเป็น 4 เท่าของปริมาณก๊าซมีเทน.....	146
ก.2 แสดงข้อมูลอิทธิพลของอัตราส่วนของไอน้ำต่อก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ต่อมีเทน โดยให้ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์มีปริมาณเป็น 4 เท่าของปริมาณก๊าซมีเทน.....	147
ก.3 แสดงข้อมูลอิทธิพลของอุณหภูมิ และ ไอน้ำมีปริมาณเป็น 4 เท่าของปริมาณ ก๊าซมีเทน.....	148
ก.4 แสดงข้อมูลอิทธิพลของอุณหภูมิ และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์มีปริมาณเป็น 4 เท่า ของปริมาณก๊าซมีเทน.....	149
ก.5 แสดงข้อมูลอิทธิพลของอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้น และ ไอน้ำมีปริมาณเป็น 4 เท่าของปริมาณก๊าซมีเทน.....	150
ก.6 แสดงข้อมูลอิทธิพลของอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้น และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ มีปริมาณเป็น 4 เท่าของปริมาณก๊าซมีเทน.....	151
ก.7 แสดงข้อมูลอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และ ไอน้ำมีปริมาณเป็น 4 เท่า ของปริมาณก๊าซมีเทน.....	152
ก.8 แสดงข้อมูลอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ มีปริมาณเป็น 4 เท่าของปริมาณก๊าซมีเทน.....	153
ฉ.1 แสดงสภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ.....	169

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการพาร์เซียมออกไซด์.....	8
2.2 แสดงการแกสซีฟายถ่านหิน.....	9
2.3 แสดงผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้ก๊าซสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ.....	13
2.4 แสดงการนำผลิตภัณฑ์ขั้นต้นมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ	14
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาต่าง ๆ	25
2.6 แสดงสัดส่วนของสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดคาร์บอน ณ สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ..	36
2.7 แสดงขอบเขตของการเกิดคาร์บอนและคาร์ไบด์เมื่อใช้โลหะนิกเกิลเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
2.8 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา.....	42
2.9 แสดงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยารีดักชันนิกเกิลออกไซด์.....	51
2.10 แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อพื้นที่ผิวของนิกเกิล (25 เปอร์เซ็นต์ Ni บน ตัวรองรับอลูมินา ความดัน 1 บรรยากาศ).....	54
2.11 แสดงค่าความดันย่อยไอน้ำที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา $\text{Mg(OH)}_2 \longrightarrow \text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \dots\dots\dots$	57
2.12 แสดงถึงค่าคงที่สมดุลของการรีดักชันนิกเกิลออกไซด์.....	60
3.1 แสดงขั้นตอนการทำงานและการควบคุมในการผลิตก๊าซสังเคราะห์.....	71
3.2 แสดงกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครคอมพิวเตอร์....	72
3.3 แสดงสัดส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซสังเคราะห์แบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	74
3.4 แสดง block diagram การควบคุมอุณหภูมิในเบดที่หน่วยผลิตก๊าซสังเคราะห์....	76
3.5 แสดงชุดทดลองผลิตก๊าซสังเคราะห์.....	77
3.6 แสดงไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์.....	78

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แสดงเครื่องผลิตไอน้ำ และการป้อนน้ำกลั่นด้วยปั๊มน้ำ.....	80
3.8 แสดงเครื่องควบแน่นไอน้ำ ซึ่งออกแบบเป็นท่อสองชั้นในแนวตั้ง.....	82
3.9 แสดงบริเวณที่ทำการเก็บก๊าซตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์.....	84
3.10 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ รุ่น GC 121 MB ที่ใช้วิเคราะห์ก๊าซตัวอย่าง..	85
3.11 แสดงแผนภาพของเครื่องมือแก๊สโครมาโตกราฟ.....	86
3.12 แสดงเครื่องตรวจวัดแบบ TCD.....	91
3.13 แสดงวงจรไฟฟ้าของ TCD.....	92
3.14 ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al_2O_3 ก่อนและหลังการใช้งาน.....	98
4.1 แสดงอิทธิพลของสารตั้งต้นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์.....	101
4.2 แสดงอิทธิพลของสารตั้งต้นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่มีผลต่ออัตราส่วน ก๊าซสังเคราะห์ H_2/CO	102
4.3 แสดงอิทธิพลของสารตั้งต้นไอน้ำที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์.....	104
4.4 แสดงอิทธิพลของสารตั้งต้นไอน้ำที่มีผลต่ออัตราส่วนก๊าซสังเคราะห์ H_2/CO	105
4.5 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์.....	107
4.6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนก๊าซสังเคราะห์ H_2/CO เมื่อเพิ่ม ปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์.....	108
4.7 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนก๊าซสังเคราะห์ H_2/CO เมื่อเพิ่ม ปริมาณไอน้ำ.....	109
4.8 แสดงอิทธิพลของอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นที่มีผลต่อปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์.....	111
4.9 แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์.....	113
5.1 แสดงปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับที่ได้จากการคำนวณทาง เทอร์โมไดนามิกส์.....	121
ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับขีดของโรตاميเตอร์ตัวที่ 1 (R_1) กับอัตราการไหลของก๊าซ (Q_1).....	155

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ช.๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับขีดของโรตاميเตอร์ตัวที่ ๒ (R_2) กับอัตราการไหลของก๊าซ (Q_2).....	156
ช.๓ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับขีดของโรตاميเตอร์ตัวที่ ๓ (R_3) กับอัตราการไหลของก๊าซ (Q_3).....	157
ค.๑ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซที่ไหลผ่านเบดกับความดันลวดที่เบด.....	159
ค.๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันกับอนุกรม.....	160
ฉ.๑ แสดงนิทของก๊าซแต่ละชนิดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ.....	167
ฉ.๒ แสดงแผนภาพของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้.....	169

สัญลักษณ์

- a จำนวน โมล เริ่มต้นของก๊าซมีเทน
- a แอคติวิตีของสาร
- a_B แอคติวิตีของสาร B
- a_C แอคติวิตีของสาร C
- a_R แอคติวิตีของสาร R
- a_S แอคติวิตีของสาร S
- a° แอคติวิตีของสารที่สภาวะมาตรฐาน
- a_B° แอคติวิตีของสาร B ที่สภาวะมาตรฐาน
- a_C° แอคติวิตีของสาร C ที่สภาวะมาตรฐาน
- a_R° แอคติวิตีของสาร R ที่สภาวะมาตรฐาน
- a_S° แอคติวิตีของสาร S ที่สภาวะมาตรฐาน
- A พื้นที่หน้าตัดของเบด (ตารางเซนติเมตร)
- b จำนวน โมลของสาร B ตามปริมาณสารสัมพันธ์
- b จำนวน โมล เริ่มต้นของไอน้ำ
- B สารตั้งต้น B
- c จำนวน โมลของสาร C ตามปริมาณสารสัมพันธ์
- C สารตั้งต้น C
- f พุกาธิติของสาร
- f_B พุกาธิติของสาร B
- $f_{B,T}$ พุกาธิติของสารที่ความดันรวม (T)
- \bar{G} พลังงานอิสระ โมแลลพาร์ เชียล
- \bar{G}° พลังงานอิสระ โมแลลพาร์ เชียลที่มาตรฐาน
- ΔG ผลต่างพลังงานอิสระ

- ΔG° ผลต่างพลังงานอิสระมาตรฐาน
- ΔH° ผลต่างของเอนทัลปีมาตรฐาน
- K ค่าคงที่สมดุล
- K_1 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ
- K_2 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงก๊าซมีเทนด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- K_3 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาแอมโมเนีย-ก๊าซ ไนโตร
- N สัดส่วนโดยโมลของสาร
- N_B สัดส่วนโดยโมลของสาร B
- N_C สัดส่วนโดยโมลของสาร C
- N_R สัดส่วนโดยโมลของสาร R
- N_S สัดส่วนโดยโมลของสาร S
- P ความดัน (บรรยากาศ)
- Q อัตราการไหลของก๊าซโดยปริมาตร (ลิตรต่อนาที)
- Q_1, Q_{CH4} อัตราการไหลของก๊าซมีเทนโดยปริมาตร (ลิตรต่อนาที)
- Q_2, Q_{CO2} อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยปริมาตร (ลิตรต่อนาที)
- Q_3, Q_{N2} อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนโดยปริมาตร (ลิตรต่อนาที)
- r จำนวนโมลของสาร R ตามปริมาณสารสัมพันธ์
- R สารผลิตภัณฑ์ R
- R ค่าคงที่ของก๊าซ
- R_1, R_{CH4} ระดับของโรตัมเตอร์ตัวที่ 1 ของก๊าซมีเทน
- R_2, R_{CO2} ระดับของโรตัมเตอร์ตัวที่ 2 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- R_3, R_{N2} ระดับของโรตัมเตอร์ตัวที่ 3 ของก๊าซไนโตรเจน
- s จำนวนโมลของสาร S ตามปริมาณสารสัมพันธ์
- S สารผลิตภัณฑ์ S
- ΔS° ผลต่างของเอนโทรปีมาตรฐาน
- T อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
- U อัตราเร็วในการปล่อยไอเดชัน (เซนติเมตรต่อนาที)

- Umf อัตราเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซชัน (เซนติเมตรต่อนาที)
- X จำนวน โมลที่ก๊าซมีเทนเข้าทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ
- Y จำนวน โมลที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- y_1 สัดส่วนจำนวน โมลของก๊าซมีเทน
- y_2 สัดส่วนจำนวน โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- y_3 สัดส่วนจำนวน โมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
- y_4 สัดส่วนจำนวน โมลของก๊าซไฮโดรเจน
- y_5 สัดส่วนจำนวน โมลของไอน้ำ
- Z จำนวน โมลที่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยาออกเตอร์-ก๊าซ ซิงก์
- v สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของสาร
- v_B สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของสาร B
- v_C สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของสาร C
- v_R สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของสาร R
- v_S สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของสาร S
- Π ความดันสัมบูรณ์ (บรรยากาศ)