

หน่วยสาธิตป้อนความร้อนชนิดพลังงานเคมีโดยใช้ระบบไอโซโทปรพพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน



นายอิทธิกร กลิ่นโชดา

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ภาควิชา เคมีเทคนิค

คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1743-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHEMICAL HEAT PUMP DEMONSTRATION UNIT USING
ISOPROPANOL/ACETONE/HYDROGEN SYSTEM



Mr. Ittikorn Klinsoda

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1743-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ หน่วยสาธิตป้อนความร้อนชนิดพลังงานเคมีโดยใช้ระบบไอโซโพรพานอล
/ อะซีโตน/ไฮโดรเจน
โดย นายอิทธิกร กลิ่นโชดา
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... รักษาการแทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์)
รองคณบดีฝ่ายบริหาร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ)

อิทธิกร กลิ่นโชดา : หน่วยสาธิตปั๊มความร้อนชนิดพลังงานเคมีโดยใช้ระบบไอโซ
โพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน (CHEMICAL HEAT PUMP DEMONSTRATION
UNIT USING ISOPROPANOL/ACETONE/HYDROGEN SYSTEM)

อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 103 หน้า. ISBN 974-53-1743-8

ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยการนำความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิต่ำ ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาดูดความร้อนเปลี่ยนพลังงานความร้อนกลายเป็นพลังงานเคมี และปล่อยความร้อนอุณหภูมิต่ำออกมาโดยอาศัยปฏิกิริยาคายความร้อนเป็นการเพิ่มคุณค่าให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการหรือกิจกรรมที่ต้องการพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ในงานวิจัยนี้ได้สร้างกระบวนการสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน เพื่อศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยศึกษาถึง ปฏิกิริยาผันกลับได้ของกระบวนการ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Raney-Ni เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการวิจัยพบว่า อุณหภูมิ, น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล และแก๊สใน โดรเจน มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 9.05 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนและอะซีโตน และอัตราการไหลของแก๊สใน โดรเจน มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาที่ได้มีค่าเท่ากับ 13.02 เปอร์เซ็นต์ สำหรับประสิทธิภาพทางความร้อน, สัมประสิทธิ์สมรรถนะของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.38 และ 1.79 ตามลำดับ และประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอจี เท่ากับ 0.44

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

4572435823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : CHEMICAL HEAT UMP/ ISOPROPANOL/ ACETONE/ HYDROGEN/

ITTIKORN KLINSODA : CHEMICAL HEAT PUMP DEMONSTRATION UNIT

USING ISOPROPANOL/ACETONE/HYDROGEN SYSTEM. THESIS ADVISOR :

ASSOC.PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 103 pp. ISBN 974-53-1743-8.

Chemical heat pump is another alternative to improve energy utilization by recovering waste heat or low-temperature heat by endothermic reaction, converting the heat into chemical energy and liberating as high-temperature heat by exothermic reaction. In this research, the isopropanol/acetone/hydrogen chemical heat pump process was set up to study the parametric effect on the performance of this process. The reversible reactions of an isopropanol/acetone/hydrogen chemical heat pump were studied by using Raney-Ni as a catalyst. The parameters such as reactant flowrate, temperature reaction and catalyst quantities were investigated. It was found that temperature, catalyst weight, isopropanol and nitrogen flow rates had affected on endothermic reaction conversion. The conversion of forward reaction was 9.05%. While the catalyst weight, hydrogen and acetone ratio and nitrogen flow rates were the important factors for the backward reaction, the conversion of acetone hydrogenation was 13.02%. For thermal efficiency, COP of this process were 0.38 and 1.79 respectively and exergy efficiency was 0.44 .

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology

Student's signature.....

Field of study Chemical Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณชาวไซเบอร์เนติกส์ และเพื่อน ๆ ในกลุ่มงานวิจัยทางธรรมชาติ ทุกท่านสำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี, บัณฑิตวิทยาลัย, กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. ที่สนับสนุนเงินทุนในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และญาติพี่น้อง ที่ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	2
2 ปรีทัศน์วรรณกรรม	4
2.1 ปุ่มความร้อน	4
2.2 ประเภทของปุ่มความร้อน	9
2.3 ปุ่มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน	17
2.4 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการทำงานของปุ่มความร้อนพลังงานเคมี	21
2.5 วิธีการเลือกปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในปุ่มความร้อนพลังงานเคมี	31
2.6 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ.....	36
2.7 แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง	38
2.8 ข้อดีของปุ่มความร้อนพลังงานเคมี	38
2.9 หน่วยทดลองปุ่มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ ไฮโดรเจน	38
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	43
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	43

บทที่	หน้า
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	48
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	49
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	54
4.1 ผลของตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล.....	54
4.2 ผลของตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน.....	62
4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของหอกลิ้น.....	70
4.4 หน่วยสาริตป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ ไฮโดรเจน.....	71
4.5 ประสิทธิภาพทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของหน่วยสาริตป้อน ความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน.....	81
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
5.2 ประสิทธิภาพของหน่วยสาริตป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพา นอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน.....	84
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	90
ภาคผนวก ค.....	93
ภาคผนวก ง.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณหลักของผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล.....	19
2.2 ภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....	20
2.3 ค่าความว่องไวและการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	20
2.4 ปริมาณผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ni-Cu (1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)/Al ₂ O ₃	21
2.5 ลักษณะสำคัญในการทดลองที่ภาวะต่าง ๆ	22
2.6 รายละเอียดของหน่วยทดลองป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน.....	39
4.1 ระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล.....	55
4.2 ค่าผลตอบของการทดลองปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	56
4.3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรสำหรับ ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล.....	57
4.4 ระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน	63
4.5 ค่าผลตอบของการทดลองปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน.....	64
4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรสำหรับ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน	65
4.7 สภาวะที่ใช้ในการทดลองหน่วยสาธิตป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน	72
4.8 ภาวะการดำเนินการที่สถานะคงตัวของหน่วยสาธิตป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน.....	74
4.9 ผลของการจำลองกระบวนการในงานวิจัยที่ผ่านมา Kim et.al.(1997).....	80
4.10 พลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ.....	81
4.11 เอ็กซ์เซอจีของอุปกรณ์ในหน่วยสาธิต.....	82
ก1 ภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการทดลอง.....	87
ค4 ขาเข้า เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน อุณหภูมิเฉลี่ย 110 องศาเซลเซียส.....	93
ค4.1 ขาออกเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 145 องศาเซลเซียส.....	94

ตารางที่	ญ หน้า
ง1	องค์ประกอบของสารยอดหอกลิ้น..... 95
ง2	องค์ประกอบของสารบนยอดหอกลิ้นที่ได้จากการจำลองกระบวนการ โดย โปรแกรม HYSYS 2.1.4..... 95
ง3	องค์ประกอบของสารยอดหอกลิ้นเมื่อทำการกลั่นจำนวน 2 ครั้ง..... 95
ง4	อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของอะซีโตนที่เวลาต่าง ๆ 96
ง5	อุณหภูมิของน้ำจากคอนเดนเซอร์ที่เวลาต่าง ๆ 97
ง6	ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาคีไฮโดรจิเนชันของไอโซโพรพานอลที่เวลา ต่าง ๆ 98
ง7	ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของอะซีโตนที่เวลาต่าง ๆ 98
ง8	องค์ประกอบของสารบนยอดหอกลิ้นที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส..... 98
ง9	อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของอะซีโตนที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน..... 99

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า	
2.1	หลักการของปั๊มความร้อน,เครื่องจักรกลความร้อนและเครื่องทำความเย็น.....	5
2.2	วัฏจักรเปรียบเทียบสำหรับปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ.....	6
2.3	รายละเอียดของวัฏจักรต่าง ๆ	6
2.4	รายละเอียดของปั๊มความร้อนชนิดต่าง ๆ	7
2.5	ประเภทของปั๊มความร้อนแบบต่าง ๆ	8
2.6	(ก) ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ (ข) แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของวัฏจักรจริง แบบผันกลับไม่ได้.....	9
2.7	ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน.....	13
2.8	แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนเชิงอุดมคติ.....	13
2.9	แผนภาพปั๊มความร้อนพลังงานเคมี.....	15
2.10	แผนภาพการดำเนินการของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดของแข็ง/แก๊ส.....	16
2.11	แผนภาพการดำเนินงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโทรพานอล/อะซี โตน/ไฮโดรเจน.....	18
2.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ ความว่องไวและค่าการเลือกเกิด ต่อค่าการเปลี่ยนของไอโซโทรพานอล.....	19
2.13	กราฟแสดงอิทธิพลของอะซีโตนในเฟสของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ดีไฮโดรจีเนชัน ต่ออัตราการเกิดไฮโดรเจน.....	23
2.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิของปฏิกิริยาและอัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ปริมาณของไอโซโทรพานอลต่าง ๆ	24
2.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบของการกวนกับค่า heat utilization.....	24
2.16	เครื่องปฏิกรณ์ (ก) แบบปกติ (ข) แบบที่พัฒนาขึ้นใหม่.....	25

รูปที่	ฉ หน้า
2.17 เครื่องปฏิกรณ์ชนิด Falling Liquid Film.....	26
2.18 อุปกรณ์การทดลองสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน.....	27
2.19 อิทธิพลของอัตราเศษส่วนโมลของ อะซีโตนต่อไฮโดรเจนและปริมาณของตัวเร่ง ปฏิกิริยาต่อค่าการเปลี่ยน.....	28
2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนกับค่าอัตรา ส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	29
2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไฮโดรจีเนชันของปฏิกิริยาต่อค่าการ เปลี่ยน.....	29
2.22 การกระจายตัวของอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันในเครื่องปฏิกรณ์.....	30
2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลจำเพาะต่อค่าอัตราการเกิดผล พลอยได้.....	31
2.24 แผนภาพการเลือกสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี.....	35
2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิบส์กับอุณหภูมิของสารทำงาน...	36
2.26 แผนภาพของหน่วยทดลองปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/ อะซีโตน/ไฮโดรเจน.....	39
3.1 เครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน.....	44
3.2 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน.....	44
3.3 คอลัมน์หอกกลับ และแพคกิง.....	45
3.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	45
3.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิในส่วน ฟรีสตีต.....	46
3.5 แผนภาพกระบวนการ ดีไฮโดรจีเนชัน.....	49
3.7 แผนภาพกระบวนการ ไฮโดรจีเนชัน.....	51
3.8 แผนภาพกระบวนการกลั่น.....	52

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟ normal probability plot กับค่า effect estimate.....	57
4.2 normal probability plot ของค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอล.....	59
4.3 กราฟแสดงผลตอบสนองที่มาจาก การคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จาก การทดลอง.....	59
4.4 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอัตราการใช้ของไอโซโพรพานอลใน ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	60
4.5 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนใน ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	61
4.6 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอุณหภูมิของปฏิกิริยาในปฏิกิริยา ดีไฮโดรจีเนชัน.....	61
4.7 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา ดีไฮโดรจีเนชัน.....	62
4.8 normal probability plot ของค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตน.....	66
4.9 กราฟแสดงผลตอบสนองที่มาจาก การคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จาก การทดลอง.....	67
4.10 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอัตราส่วนป้อนระหว่างอะซีโตนและ ไฮโดรเจนในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	68
4.11 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนใน ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	68
4.12 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอุณหภูมิของปฏิกิริยาในปฏิกิริยาดีไฮโดร จีเนชัน.....	69
4.13 กราฟพื้นที่ผิวผลตอบของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน.....	69
4.14 กราฟผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบในส่วนของการกลั่น.....	70
4.15 กราฟผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบในส่วนของการกลั่นในการกลั่น 2 ครั้ง.....	71
4.16 อุณหภูมิของกระบวนการในแต่ละสายของหน่วยสารที่เพิ่มความร้อนพลังงานเคมี ชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน.....	73

รูปที่	หน้า
4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลที่เวลาต่าง ๆ.....	76
4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนที่เวลาต่าง ๆ	77
4.19 ค่าเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบบนยอดหอกลับันที่เวลาต่าง ๆ	77
4.20 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน.....	78
4.21 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกจากคอนเดนเซอร์.....	79
4.22 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ.....	79

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในประเทศที่พัฒนาแล้วการบริโภคพลังงานขั้นปฐมภูมิในอุตสาหกรรมมีประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ ของการบริโภคพลังงานทั้งหมด ประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ของการบริโภคพลังงานขั้นปฐมภูมิในอุตสาหกรรมถูกใช้ในกระบวนการให้ความร้อน และประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานขั้นปฐมภูมิถูกลดคุณภาพความร้อน (อุณหภูมิ) ลงในกระบวนการเปลี่ยนแปลงในอุตสาหกรรม และถูกปล่อยออกสู่ธรรมชาติในรูปแบบของความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat) อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้คุณภาพความร้อน(อุณหภูมิ) ที่นำกลับมาใช้ใหม่ไม่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงหรือเพิ่มคุณภาพความร้อน ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม นับตั้งแต่การปฏิวัติอุตสาหกรรมเป็นต้นมา อัตราการใช้พลังงานจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไปโดยเฉพาะพลังงานจากซากดึกดำบรรพ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วคิดเป็น 95 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานทั้งหมดที่มนุษย์ใช้ อีก 2 เปอร์เซ็นต์มาจากพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนที่เหลืออีก 3 เปอร์เซ็นต์ มาจากพลังงานหมุนเวียน เช่น ชีวมวล น้ำ แสงอาทิตย์ ลม ความร้อนใต้พิภพ(วราพร, 2002:1) จากการบริโภคพลังงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานของโลกลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมนุษย์ไม่สามารถสร้างหรือ สังเคราะห์ปิโตรเลียมได้ และปิโตรเลียมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงชีวิตมนุษย์ เพราะต้องใช้เวลาอันนับล้านปีกว่าที่ตะกอนอินทรีย์วัตถุจะสะสมตัวกลายเป็นแหล่งปิโตรเลียม นอกจากนี้การผลิต การขุดค้น และการแปรรูปพลังงานมาใช้ยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยก่อให้เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด รวมทั้งพัฒนาวิธีการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพียงพอที่จะทดแทนพลังงานที่สิ้นเปลือง และมลพิษ เป็นที่รู้กันโดยทั่วไปว่าพลังงานความร้อนจำนวนมากถูกปล่อยออกสู่ธรรมชาติ ในรูปของความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิต่ำ ป้อนความร้อนเชิงกลถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในการนำความร้อนเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมมาเพิ่มระดับอุณหภูมิและนำกลับมาใช้ใหม่ แม้ว่าในทางเทคนิคจะมีการพัฒนาประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนเชิงกล แต่ก็สามารถส่งผ่านพลังงานความร้อนได้สูงสุดเพียงที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เท่านั้น ซึ่งใช้ประโยชน์ได้น้อยมากในอุตสาหกรรม และปั๊มความร้อนชนิดนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูงและประสิทธิภาพต่ำ ปั๊มความร้อนพลังงานเคมี (chemical heat pump) เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานซึ่งอาศัยปฏิกิริยาผันกลับได้ ในการนำความร้อนเหลือทิ้งมาเพิ่มคุณค่าให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการ หรือกิจกรรมที่

ต้องการพลังงานความร้อนที่มีคุณภาพสูงทำให้สามารถประหยัดพลังงานจากเชื้อเพลิงประเภทใช้แล้วหมดไปได้

1.2 วัตถุประสงค์

สร้างและสาธิตกระบวนการบีบความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจนเพื่อให้ได้พลังงานที่มีปริมาณและคุณภาพตามต้องการ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างหน่วยสาธิตบีบพลังงานความร้อนเคมีชนิดระบบ ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน
2. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการสาธิตบีบพลังงานความร้อนเคมีชนิดระบบ ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ และภาวะที่เหมาะสมในการเดินกระบวนการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้หน่วยสาธิตบีบพลังงานความร้อนเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตนไฮโดรเจน
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสาธิตบีบพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจนรวมถึงเป็นกระบวนการศึกษาต่อไปในอนาคต

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับการทดลอง
3. วางแผนการทดลอง ทำการทดลองที่ ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 80 และ 140 องศาเซลเซียสในแต่ละเครื่องปฏิกรณ์ ตามลำดับ

4. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ แก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography)
5. ประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ารวมกันเป็นกระบวนการป้อนความร้อนพลังงานเคมีไอโซโทปพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน วิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการ และสรุปผลที่ได้
6. วิเคราะห์สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

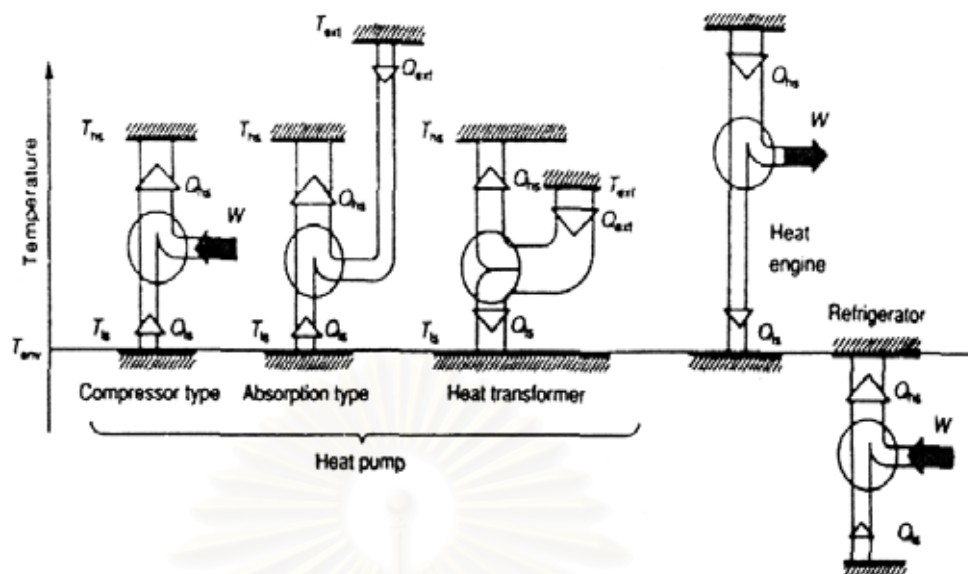
ปรีทัศน์วรรณกรรม

2.1. ป้อนความร้อน

ทอมสัน (W.Thomson) เป็นผู้ริเริ่มแนวคิดป้อนความร้อนขึ้นเป็นครั้งแรกใน ค.ศ. 1852 (Brodowicz and Dyakowski, 1993:1) แต่ยังไม่มีการใช้ในทางปฏิบัติจนกระทั่งในทศวรรษที่ 1880 เป็นช่วงเริ่มต้นการพัฒนาวัฏจักรทำความเย็นซึ่งมีแอมโมเนียเป็นของไหลทำงาน ฮาดเน (T.G. Hadane) ได้ทำการติดตั้งป้อนความร้อนขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1928 ซึ่งมีองค์ประกอบเหมือนกับระบบทำความเย็นโดยใช้ทำความร้อนภายในบ้าน หลังจากนั้นได้มีการปรับปรุงเทคโนโลยีจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการติดตั้งป้อนความร้อนขนาด 1050 กิโลวัตต์ขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา ทศวรรษ 1940 การแพร่หลายของของไหลทำงานอินทรีย์ทำให้ป้อนความร้อนขนาดเล็กสำหรับใช้ภายในบ้านได้รับความนิยมอย่างมาก และมีการใช้งานเป็นครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาสำหรับทำความร้อนในฤดูหนาวและทำความเย็นในฤดูร้อน และต่อมาได้แพร่หลายเข้าสู่ประเทศแถบยุโรปได้แก่ นอร์เวย์, สวีเดน, เยอรมัน, ฝรั่งเศส, อิตาลี และโปแลนด์ ช่วงทศวรรษ 1980 ป้อนความร้อนชนิดอัดไอ (Compression Heat Pump) ได้รับความนิยมอย่างมาก จนกระทั่งสิ้นปี ค.ศ. 1986 ได้มีการติดตั้งป้อนความร้อนขนาดใหญ่ 600 เมกะวัตต์ถึง 40 เครื่อง ป้อนความร้อนเหมาะที่จะนำมาใช้ในหลายกรณีดังนี้

1. นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยความร้อนอุณหภูมิต่ำเป็นจำนวนมาก เช่น จากเครื่องปรับอากาศ, เครื่องทำแห้ง, เครื่องระเหย, หอกลับ
2. นำมาใช้ในบริเวณที่ต้องการทำความเย็นและการทำความร้อน
3. ใช้ส่งผ่านความร้อนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งไม่มาก
4. ภาคอุตสาหกรรมที่มีระบบผลิตความร้อน (Heat Generation) การติดตั้งป้อนความร้อนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตความร้อน

ป้อนความร้อนเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่สิ่งที่เราต้องการอุ่นในขณะที่สิ่งแวดล้อมอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า หน้าที่ของป้อนความร้อนจึงขับเคลื่อนให้ไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Heat Source) ไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (High Temperature Heat Source) โดยอาศัยงานหรือความร้อนเป็นแรงขับเคลื่อน รูปที่ 2.1 แสดงหลักการของป้อนความร้อนเชิงกลทำความร้อนและเครื่องทำความเย็น

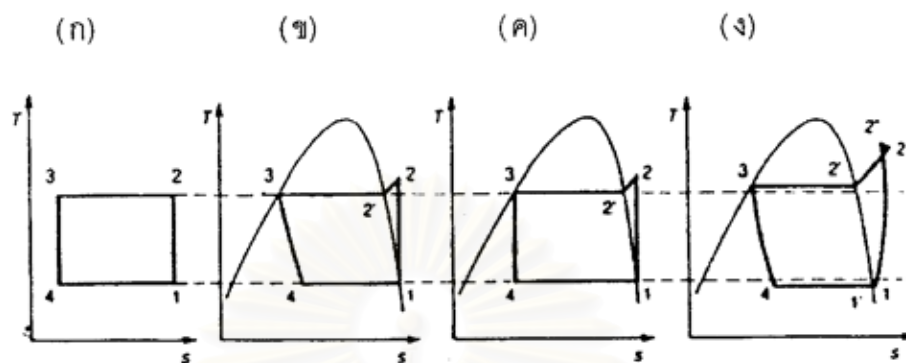


รูปที่ 2.1 หลักการของปั๊มความร้อน, เครื่องจักรความร้อนและเครื่องทำความเย็น (Brodowicz and Dyakowski, 1993 : 6)

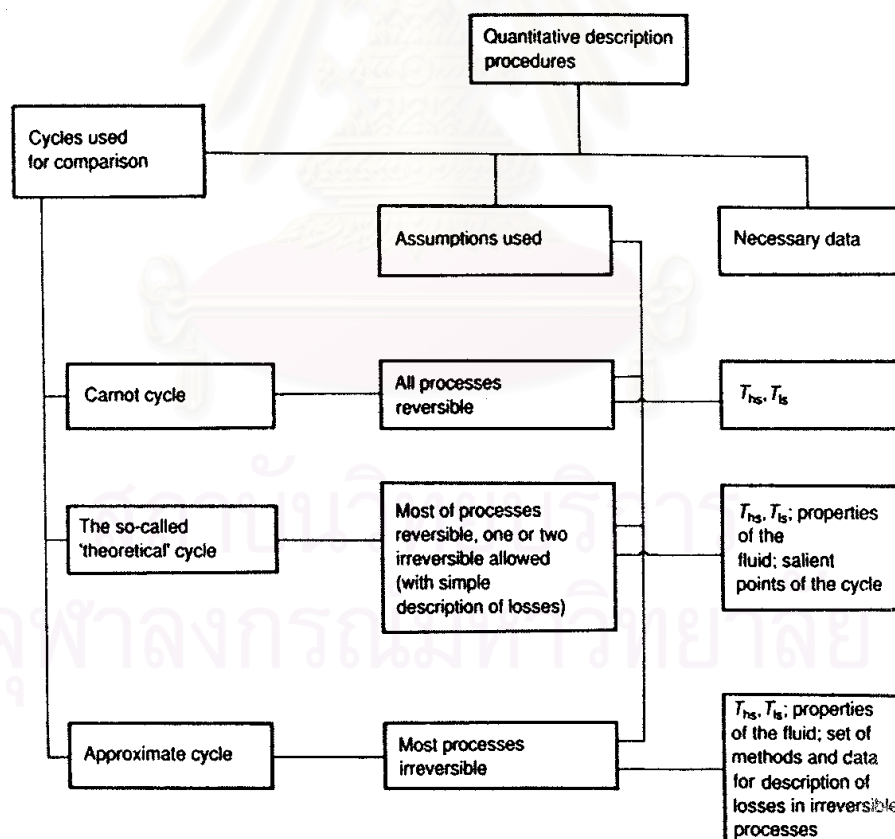
ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอเป็นวัฏจักรเดียวกับเครื่องทำความเย็น โดยอาศัยแรงขับจากงาน เพื่อขับความร้อนให้ไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง และให้ความร้อนไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้ ในกรณีของเครื่องทำความเย็น ส่วนเครื่องจักรความร้อนมีหน้าที่เปลี่ยนความร้อนให้เป็นงาน ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนและชนิดฮีตทรานฟอร์มเมอร์อาศัยความร้อนเป็นแรงขับ โดยความร้อนที่เข้าสู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนเป็นงานก่อน เปรียบได้ว่ามี 2 วัฏจักรร่วมกันคือ เครื่องจักรความร้อนและปั๊มความร้อน

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ของปั๊มความร้อน สามารถทำโดยวัฏจักรเปรียบเทียบ (Comparative Cycle) ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 วัฏจักรอย่างง่ายที่สุด คือ วัฏจักรคาร์โนต์ เป็นวัฏจักรอุดมคติ ทุกกระบวนการทำงานแบบผันกลับได้ ไม่มีพลังงานสูญเสีย สามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยไม่ขึ้นกับชนิดของของไหลทำงาน (Working Fluid) สำหรับวัฏจักรทางทฤษฎี (Theoretical Cycle) จะมี 1 หรือ 2 กระบวนการที่ทำงานแบบผันกลับไม่ได้มีการคิดพลังงานสูญเสียอย่างง่ายเพิ่มเข้ามา เช่น วัฏจักรจริงแบบผันกลับได้ของแรงกิน (Non-Ideal Reverse Rankine) หรือวัฏจักรลินเด (Linde Cycle) ประกอบด้วยกระบวนการผันกลับได้ ยกเว้น กระบวนการขยายตัวแบบเอนโทรปีคงที่ (Isentropic Expansion) ของวาล์วทรอตติง ดังนั้นลักษณะเฉพาะของวัฏจักรจะขึ้นกับชนิดของของไหลทำงานที่ใช้ด้วย โดยวัฏจักรลินเดนิยมที่จะใช้อธิบายงานทั่ว ๆ ไปทางวิศวกรรม

สำหรับวัฏจักรแบบประมาณ (Approximate Cycle) นั้นกระบวนการเกือบทั้งหมดทำงานแบบผันกลับไม่ได้ และมีการคิดพลังงานสูญเสียอย่างละเอียด

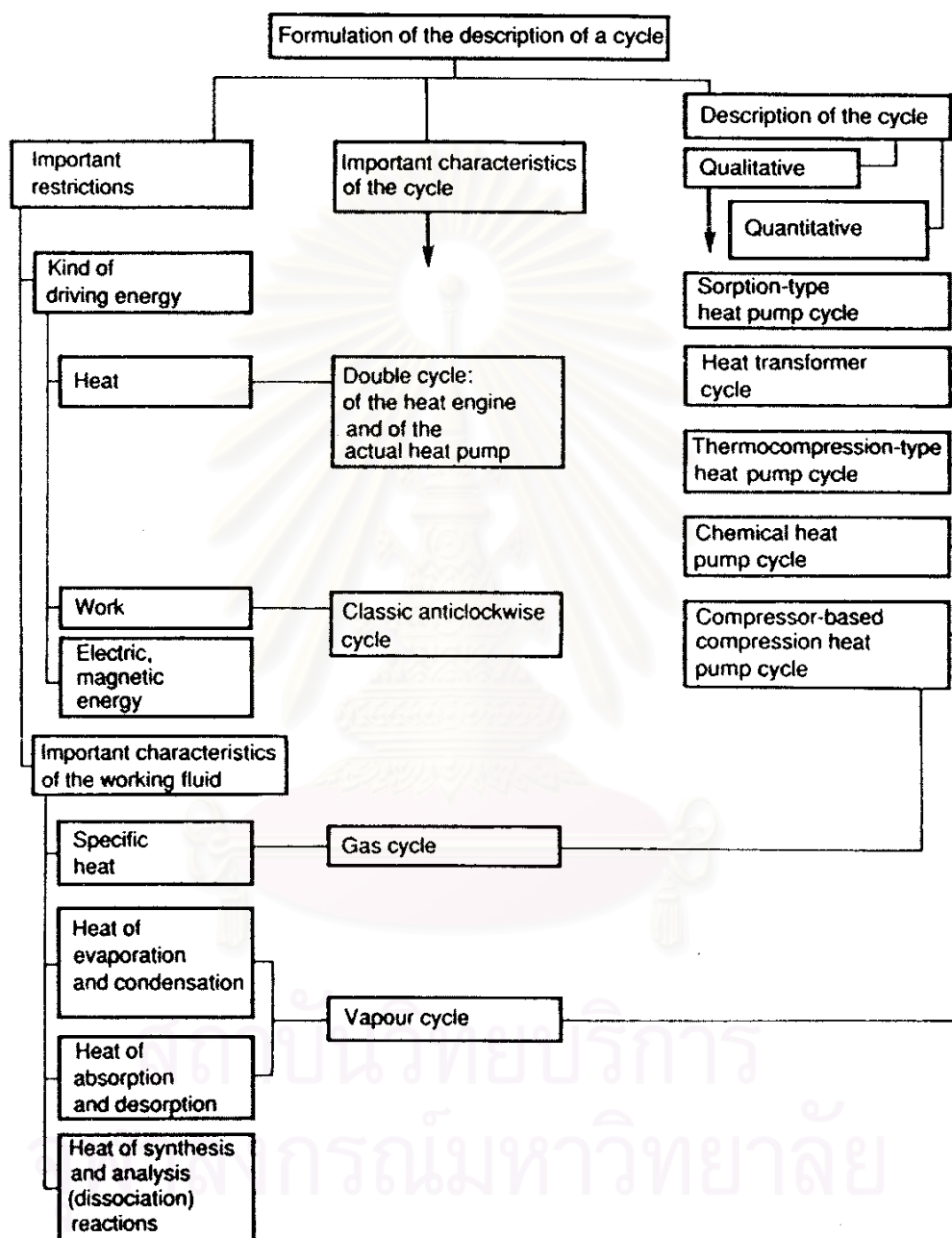


รูปที่ 2.2 วัฏจักรเปรียบเทียบสำหรับปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ (ก) วัฏจักรคาร์โนต์ (ข) วัฏจักรจริงแบบผันกลับได้ของแรงคิน (ค) วัฏจักรอุดมคติแบบผันกลับได้ของแรงคิน (ง) วัฏจักรประมาณ (Brodowicz and Dyakowski, 1993:85)

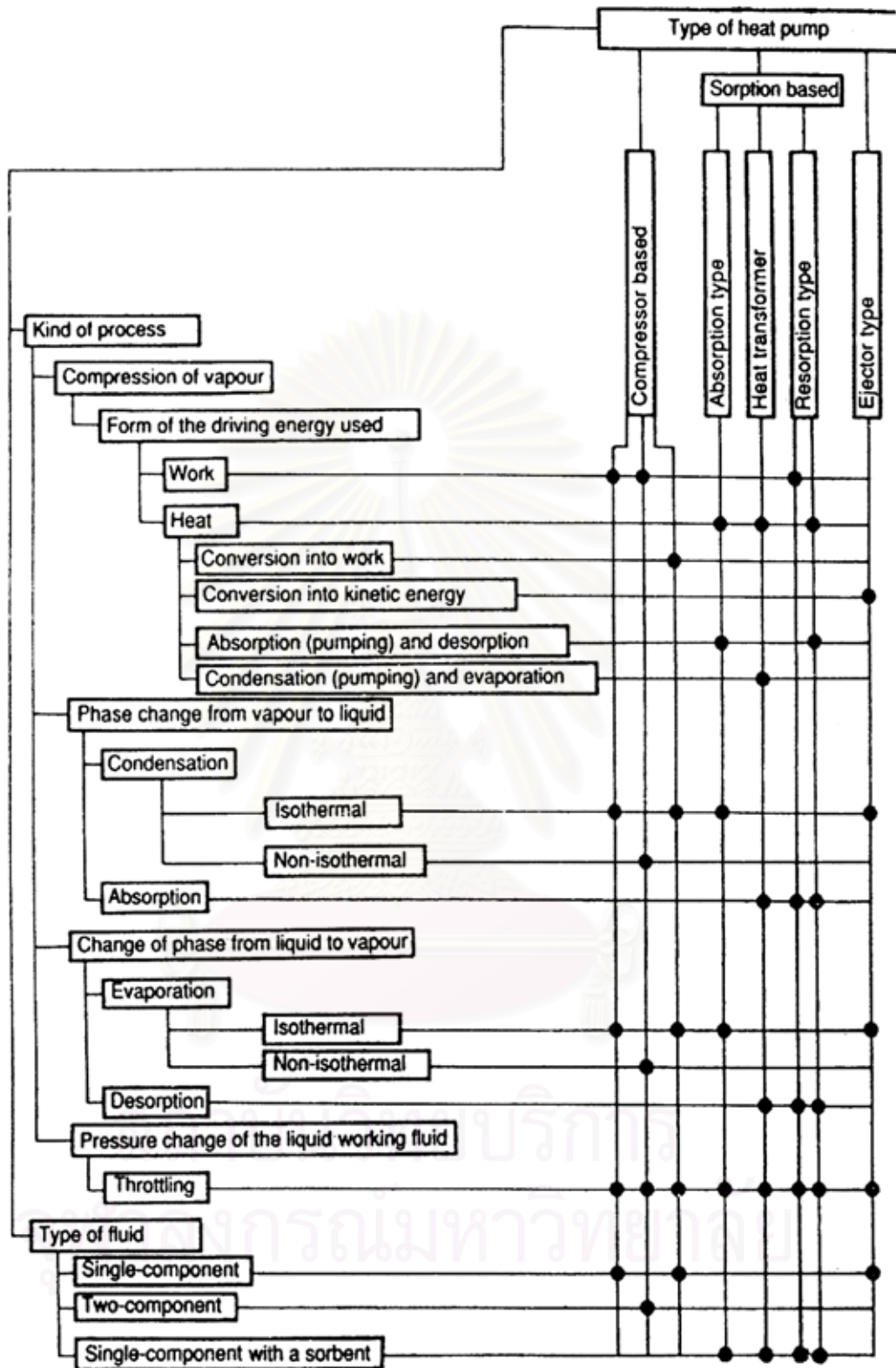


รูปที่ 2.3 รายละเอียดของวัฏจักรต่าง ๆ (Brodowicz and Dyakowski, 1993:34)

ปั๊มความร้อนหลายชนิดจำแนกได้ตามลักษณะการทำงานของของไหลทำงานหนึ่งชนิด, ของไหลทำงาน 2 ชนิด และปฏิกิริยาเคมี ชนิดของกระบวนการปั๊มความร้อนแสดงในรูป ที่ 2.4 และ 2.5 อาจกล่าวถึงประเภทหลัก ๆ ของปั๊มความร้อนได้ดังนี้



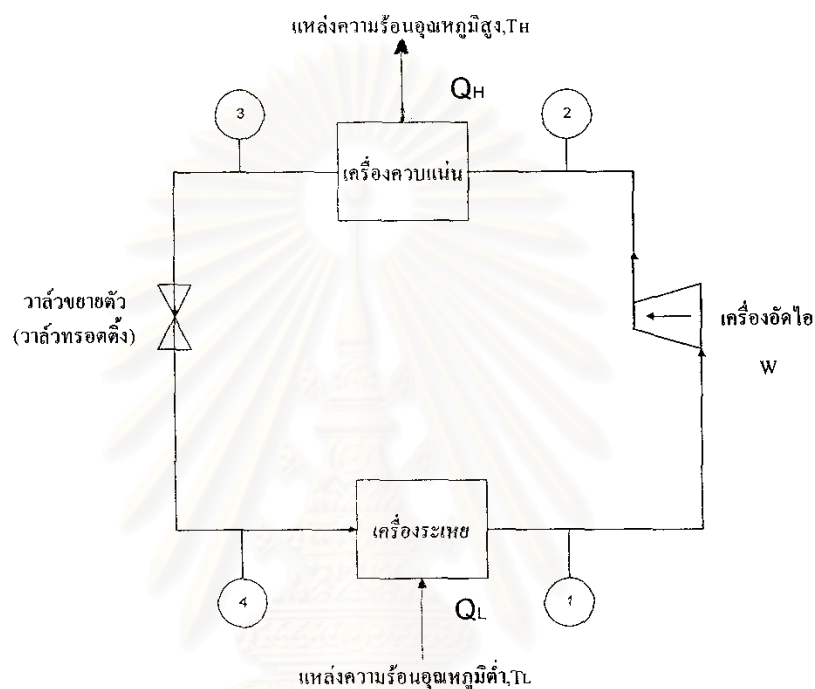
รูปที่ 2.4 รายละเอียดของปั๊มความร้อนชนิดต่าง ๆ (Brodowicz and Dyakowski, 1993:33)



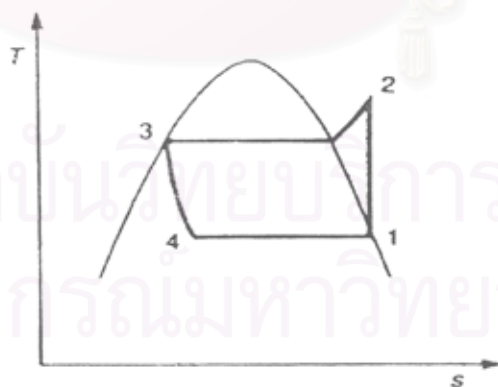
รูปที่ 2.5 ประเภทของปั๊มความร้อนแบบต่าง ๆ (Brodowicz and Dyakowski, 1993:8)

2.2. ประเภทของปั๊มความร้อน

2.2.1. ปั๊มความร้อนชนิดวัฏจักรอัดไอ (Vapor Compression Cycle Heat Pump) ใช้วิธีการส่งผ่านความร้อนจากการเปลี่ยนวิฤภาคของของไหลทำงาน ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการพื้นฐาน 4 หน่วยดังรูปที่ 2.6



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 (ก) ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ (ข) แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของวัฏจักรจริงแบบผันกลับ
ไม่ได้ของแรงกิน (วราพร, 2002 :8)

- 1 → 2 เครื่องอัดเชิงกลอัดไอแบบเอนโทรปีคงที่ให้ความดันและอุณหภูมิสูง
 2 → 3 ของเหลวอิ่มตัวออกจากเครื่องควบแน่นหลังจากคายความร้อนที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง
 3 → 4 ของเหลวอิ่มตัวขยายตัวผ่านวาล์วแบบเอนทาลปีคงที่กลายเป็นของเหลวผสมไอ
 4 → 1 ของผสมระหว่างของเหลวและไอดูดความร้อนที่อุณหภูมิต่ำและความดันต่ำจากเครื่องระเหยกลายเป็นไออิ่มตัว

สำหรับปั๊มความร้อนทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนในปริมาณที่ต้องการให้กับกระบวนการที่ต้องการความร้อน ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance) และประสิทธิภาพความร้อน (Thermal Efficiency) ดังสมการ

$$COP = \frac{Q_H}{W} \quad (2.1)$$

$$\eta = \frac{Q_H}{Q_L} \quad (2.2)$$

COP = สัมประสิทธิ์สมรรถนะ

Q_H = พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิสูง (กิโลวัตต์)

W = งานที่ใส่เข้าไปในระบบ

η = ประสิทธิภาพความร้อน

Q_L = พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (กิโลวัตต์)

ประสิทธิภาพสูงสุดของวัฏจักรใด ๆ ก็ได้จาก ประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ ซึ่งมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำและแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเท่านั้น

$$COP_{ideal} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (2.3)$$

COP_{ideal} = สัมประสิทธิ์สมรรถนะของวัฏจักรคาร์โนต์

T_H = อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนอุณหภูมิสูง (เคลวิน)

T_L = อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนอุณหภูมิต่ำ (เคลวิน)

พารามิเตอร์ที่กล่าวมาในสมการ (2.1) และ (2.2) เป็นการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการในการเปลี่ยนความร้อนคุณภาพต่ำและงานให้เป็นความร้อนคุณภาพสูง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่

สำคัญสำหรับวัดคุณภาพของกระบวนการจริงว่าใกล้เคียงกับกระบวนการอุดมคติมากน้อยเพียงไร คือ ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอจี (Exergetic Efficiency หรือ Second law Efficiency) เป็นการวัดระดับการผันกลับได้ และการสูญเสียเอ็กซ์เซอจี (Degree of Irreversibility และ Exergy Losses) ของกระบวนการ ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้เปรียบเทียบกระบวนการที่ใช้แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำและของไหลทำงานต่างชนิดกัน ดังสมการ

$$\varepsilon_{\text{COP}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{ideal}}} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{\eta} = \frac{\eta}{\eta_{\text{ideal}}} \quad (2.5)$$

ε_{η} = ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอจี

พาทวาฮาน (Patwardhan, V.R. และ Patwardhan, V.S.,1987) ทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับวัฏจักรจริงแบบผันกลับได้ของแรงกิ้นเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กับสมบัติของของไหลทำงาน

$$\frac{\text{COP}_{\text{niR}}}{\text{COP}_{\text{niR}} - 1} = \frac{T_H}{T_L} \left\{ \frac{1 - \ln(T_H/T_L)(T_H C_{\text{WL}}/r)}{1 - [(T_H/T_L) - 1](T_H C_{\text{WL}}/r)} \right\} \quad (2.6)$$

r = ความร้อนของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)

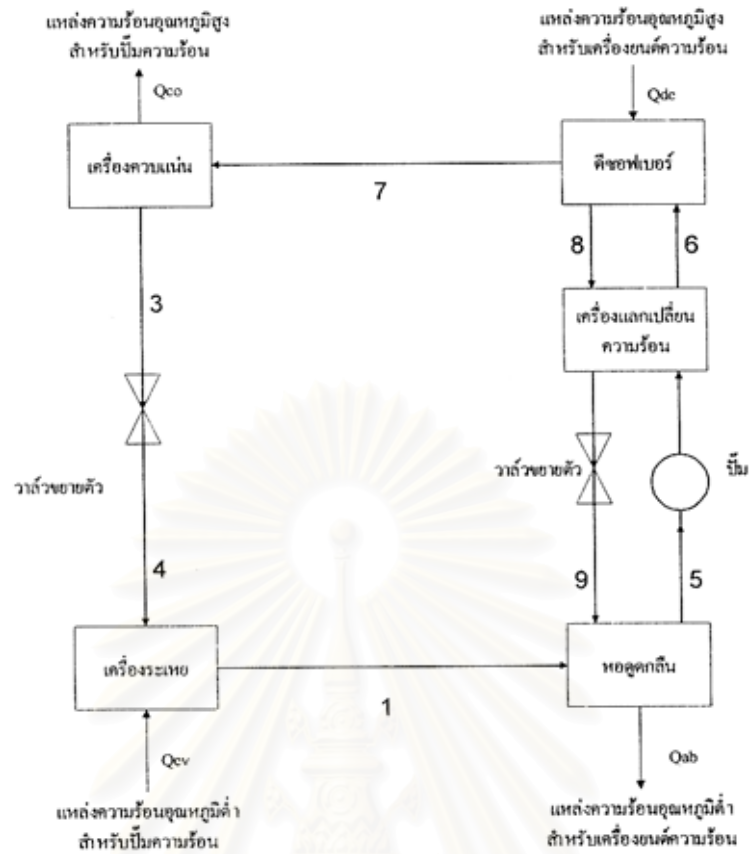
C_{WL} = ความร้อนจำเพาะของของไหลทำงานในวัฏภาคแก๊สที่ความดันคงที่ (kJ/kg*K)

COP_{niR} = สัมประสิทธิ์สมรรถนะของวัฏจักรจริงแบบผันกลับได้ของแรงกิ้น

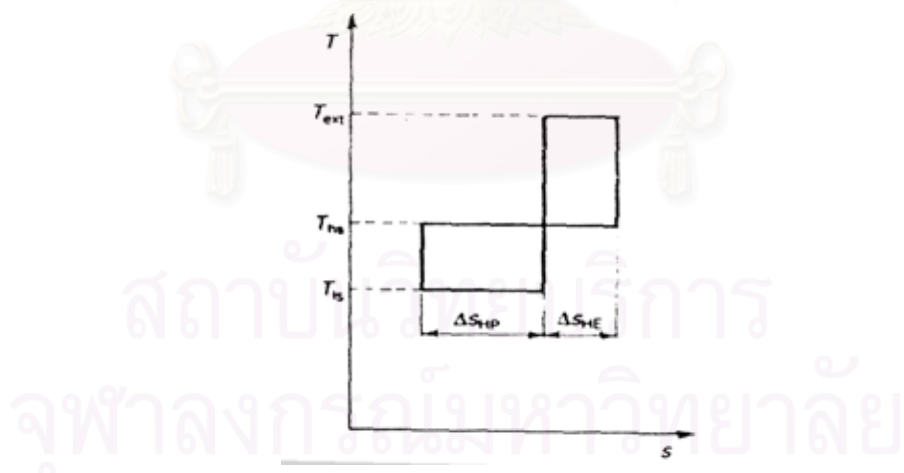
2.2.2. ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน (Sorption-Type Heat Pump) ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอต้องให้งานกับเครื่องอัด เพื่ออัดไอของของไหลทำงานให้มีความดันสูงซึ่งปริมาณงานสามารถลดลงได้โดยเปลี่ยนไปอัดของเหลวแทน ทั้งนี้เพราะของเหลวมีความหนาแน่นสูงกว่าไอมาก จึงต้องการงานน้อยกว่า ในทางปฏิบัติหลักการลดงานดังกล่าวสามารถทำได้โดยการแทนเครื่องอัดด้วยหอดูดกลืน (Absorber หรือ Resorber) และหอดีซอร์เบอร์ (Desorber หรือ Generator หรือ Stripper) กระบวนการใหม่นี้ต้องอาศัยของเหลวเพิ่มขึ้นอีก 1 ชนิด เรียกว่า ของไหลดูดกลืน (Absorbent) ของไหลดูดกลืนจะทำหน้าที่ดูดไอของของไหลทำงานให้อยู่ในวัฏภาคของเหลว ดังสมการ 2.7-2.8 ตัวอย่างคู่สาร เช่น แอมโมเนียกับน้ำ ลิเทียมโบรไมด์กับน้ำ เป็นต้น



ไอของของไหลทำงานออกจากเครื่องระเหย (ภาวะ 1) เข้าสู่หอดูดกลืนเพื่อดูดกลืนเพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นสารละลายของเหลวเข้มข้น (Rich/Strong Solution) กระบวนการดูดกลืนคายความร้อน ดังนั้น น้ำหล่อเย็นต้องหมุนเวียนผ่านหอดูดกลืนเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ อุณหภูมิของไหลดูดกลืนต้องรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำเท่าที่เป็นไปได้ เนื่องจากปริมาณของไหลที่ถูกดูดกลืนจะลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น สารละลาย (ภาวะ 5) ถูกอัดโดยเครื่องสูบล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายเจือจาง (Weak Solution) ที่จะไหลกลับ (ภาวะ 8) เข้าสู่หอดูดกลืน และในขณะเดียวกันจะเพิ่มอุณหภูมิของเหลวที่ไหลเข้าหอดูดกลืน (ภาวะ 6) เพื่อลดความร้อนไล่ไอของของไหลทำงานออกจากสารละลาย สารละลายเจือจางจะไหลผ่านวาล์วกลับเข้าสู่หอดูดกลืน (ภาวะ 9) ไอบริสุทธิของของไหลทำงานไหล (ภาวะ 7) เข้าสู่เครื่องควบแน่นคายความร้อนกลายเป็นของเหลวอิ่มตัว (ภาวะ 3) และไหลผ่านวาล์วลดความดัน (ภาวะ 4) ได้ไอผสมของเหลวไหลเข้าเครื่องระเหยเพื่อลดความร้อนต่อไปเป็นอันครบวัฏจักร สรุปได้ว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นคือ การควบแน่นที่ความดันคงที่, การขยายตัวแบบเอนโทรปีคงที่, การระเหยที่ความดันคงที่เป็นของไหลทำงานความร้อนยวดยิ่ง, การดูดกลืนไอที่ความดันคงที่, การดีซอพชั่นที่ความดันคงที่ ดังรูปที่ 2.7-2.8



รูปที่ 2.7 ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน (วราพร,2002 :11)



รูปที่ 2.8 แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนเชิงอุดมคติ

(Brodowicz and Dyakowski, 1993:111)

จากรูป 2.8 ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนประกอบด้วยเครื่องขนถ่ายความร้อนซึ่งผลิตงานให้กับปั๊มความร้อน สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนแสดงดังสมการ

$$\eta_{COP} = \frac{Q_{ab} + Q_{con}}{Q_{de}} \quad (2.9)$$

$$\eta_{ideal} = \frac{T_{hs}}{T_{hs} + T_{ls}} \frac{T_{ext} - T_{ls}}{T_{ext}} \quad (2.10)$$

Q_{ab} = ความร้อนของหอดูดกลืน (กิโลวัตต์)

Q_{con} = ความร้อนของเครื่องควบแน่น (กิโลวัตต์)

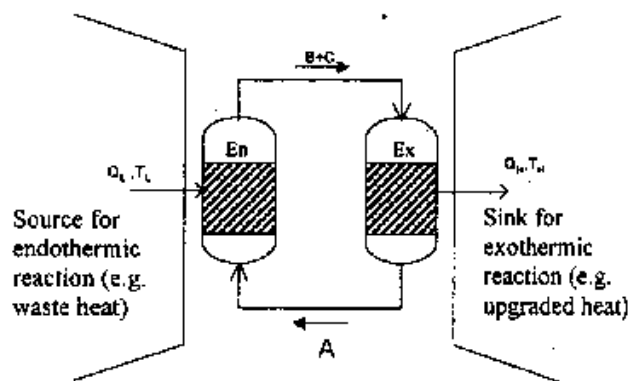
Q_{de} = ความร้อนของดีซอพเบอร์ (กิโลวัตต์)

T_{hs} = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (เคลวิน)

T_{ls} = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (เคลวิน)

T_{ext} = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนภายนอก (เคลวิน)

2.2.3. ปั๊มความร้อนพลังงานเคมี (Chemical Heat Pump หรือ Chemical Heat Transformer) เป็นปั๊มความร้อนชนิดหนึ่งซึ่งใช้ความร้อนจากปฏิกิริยาผันกลับได้ โดยใช้สารเคมีหรือของไหลทำงาน (working fluid) ที่เหมาะสมไหลวนอยู่ในกระบวนการระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน โดยปั๊มความร้อนชนิดนี้อาศัยหลักการทำงานของปฏิกิริยาเคมีเป็นสำคัญ โดยจะดูดซับพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ และปล่อยพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยใช้งานเพียงเล็กน้อยในการขับเคลื่อน รูปที่ 2.9 แสดงถึง แผนภาพการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีซึ่งประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน โดยของเสียความร้อนอุณหภูมิต่ำจะถูกดูดซับที่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนในการสลายสารตั้งต้น A เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ B และ C โดยดูดซับความร้อนปริมาณ Q_L ที่อุณหภูมิ T_L จากนั้นผลิตภัณฑ์ B และ C จะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนที่อุณหภูมิ T_H โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจะกลายเป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ขณะเกิดปฏิกิริยาจะปล่อยความร้อนปริมาณ Q_H ออกมาแล้วไหลวนอยู่ในกระบวนการอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา



A,B,C = Chemical species
 Q_L = Low level heat to drive the endothermic reactor
 Q_H = Upgraded heat
 T_L = Temperature of low level heat supply
 T_H = Temperature of upgraded heat
 En = Endothermic reactor
 Ex = Exothermic reactor

รูปที่ 2.9 แผนภาพปั๊มความร้อนพลังงานเคมี (Nay Myo Moo,1998 :7)

A, B และ C = สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ

T_L = อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนอุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)

Q_L = พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (กิโลวัตต์)

T_H = อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาคายความร้อนอุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)

Q_H = พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (กิโลวัตต์)

ประสิทธิภาพความร้อนของปั๊มความร้อนชนิดพลังงานเคมี แสดงดังสมการ

$$\eta = \frac{Q_H}{Q_L} \quad (2.11)$$

η = ประสิทธิภาพความร้อน

Q_H = พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (กิโลวัตต์)

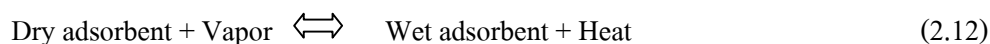
Q_L = พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (กิโลวัตต์)

ชนิดของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีสามารถแบ่งได้ ดังนี้

(Nay Myo Oo,1998 :11)

1. กระบวนการของแข็ง/ก๊าซ (Solid/Gas Combination) โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ผันกลับได้ในรูปของของแข็ง และก๊าซ ในกระบวนการประกอบด้วย เครื่องปฏิกรณ์ของแข็ง-ก๊าซที่เชื่อมต่อระหว่าง เครื่องควบแน่น หรือเครื่องระเหย ในเครื่องปฏิกรณ์จะบรรจุของแข็งที่ใช้ในการ

ดูดซับ (dry adsorbent) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับก๊าซหรือไอ กลายเป็นของเหลวแล้วปล่อยความร้อนออกมา ดังสมการปฏิกิริยาเคมี



เช่น ระบบ แก๊สอินทรีย์/แอมโมเนีย, แคลเซียมคลอไรด์/เมทานอล, คิวปริกออกไซด์/คิวปรัสออกไซด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.10 แผนภาพการดำเนินการของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดของแข็ง/แก๊ส (Neveu and Casting, 1993)

T_l = อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาอุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)

T_m = อุณหภูมิของตัวกลาง (องศาเซลเซียส)

T_h = อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาอุณหภูมิสูง (องศาเซลเซียส)

P_l = ความดันต่ำ (บรรยากาศ)

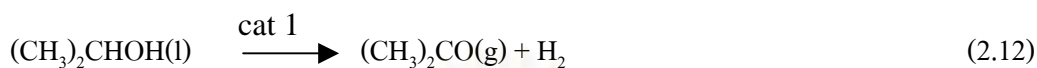
P_h = ความดันสูง (บรรยากาศ)

S/G = ของแข็ง/ของเหลว

2. กระบวนการของเหลว/แก๊ส (Liquid/Gas Combination) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในรูปของของเหลว และแก๊ส บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมไหลวนในกระบวนการวัฏจักรปิด เช่น ระบบ ไอโซพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน, ไอโซบิวทีน/น้ำ/เตตระบิวทานอล, โซโคลเฮกเซน/เบนซีน/ไฮโดรเจน เป็นต้น

2.3. ป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน(วราพร,2002:13)

ป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดนี้ใช้ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) ของ ไอโซโพรพานอล และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) ของอะซีโตน ดังสมการปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน



$$\Delta H_{rxn}^\circ = 100.4 \text{ kJ/mol}$$

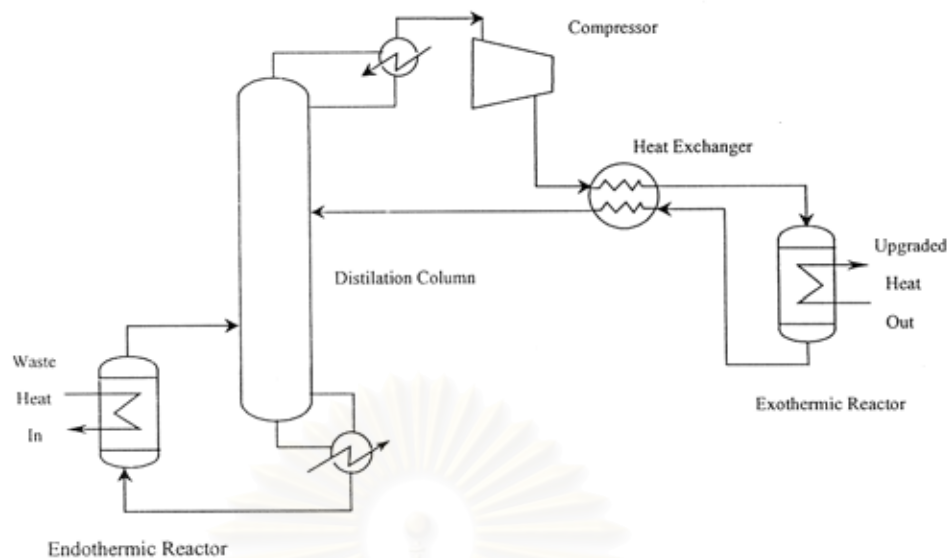
ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน



$$\Delta H_{rxn}^\circ = -55 \text{ kJ/mol}$$

หลักการทำงานของป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน เครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยา ดีไฮโดรจีเนชัน โดยดูดซับความร้อนคุณภาพต่ำที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย อะซีโตน และไฮโดรเจน ส่วน ไอโซโพรพานอลที่เหลือจากปฏิกิริยาจะถูกส่งเข้าสู่หอกลั่นให้ผลิตภัณฑ์ยอดหอ ประกอบด้วย อะซีโตนและไฮโดรเจน ส่วนผลิตภัณฑ์ก้นหอ คือ ไอโซโพรพานอล และส่งกลับเข้าเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน ผลิตภัณฑ์ยอดหอผ่านเครื่องอัดเพื่อเพิ่มความดันสอดคล้องกับความดันลดที่เกิดขึ้นภายในระบบ หลังจากนั้นผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนเกิดปฏิกิริยา ไฮโดรจีเนชัน คายความร้อนคุณภาพสูงที่อุณหภูมิ ประมาณ 200 องศาเซลเซียส จากรูป 2.11 จะเห็นว่าความร้อนที่ใส่ให้กับกระบวนการทางเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อนและหอกลั่นนั้น มีเพียงบางส่วนที่กลายเป็นความร้อนคุณภาพสูง อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียออกไปกลายเป็นความร้อนคุณภาพต่ำที่เครื่องควบแน่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

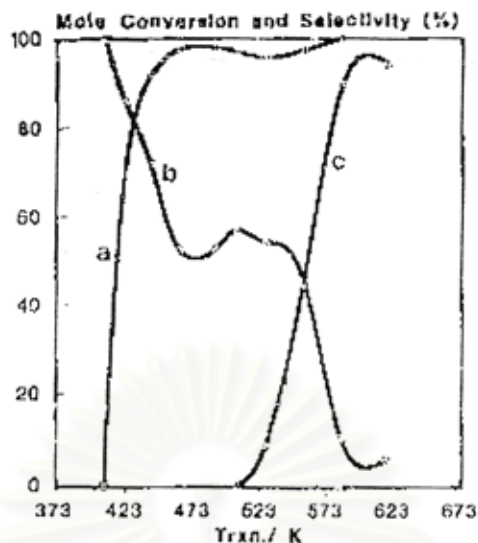


รูปที่ 2.11 แผนภาพการดำเนินงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน (วราพร,2002 :14)

2.3.1. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาโดยปกติแล้วปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล และ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ของอะซีโตน สามารถเกิดได้ที่ภาวะเหมาะสมเท่านั้น คือ ภายใต้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยมีลักษณะความว่องไว (activity) และการเลือกเกิด (selectivity) สูง รวมถึงสามารถใช้ได้ยาวนาน พอจะกล่าวได้ดังนี้

- ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของ ไอโซโพรพานอล

Cunningham และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาถึงปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/TiO_2 โดยทำการทดลองที่ภาวะอัตราการไหลขาเข้า 20 มิลลิลิตรต่อ นาที ความดันของไอโซโพรพานอล 20 ทอร์ บวกกับก๊าซอาร์กอน 740 ทอร์ ที่ช่วงอุณหภูมิ 410-623 องศาเซลวิน จากผลการทดลอง รูปที่ 2.12 แสดงถึง ค่าการเปลี่ยนของไอโซโพรพานอล (a) มีค่าค่อนข้างคงที่ ในช่วงอุณหภูมิ 473-550 องศาเซลวิน ขณะที่ค่าการเลือกเกิดของอะซีโตน (b) และ โพรพิลีน (c) มีค่าน้อยในช่วงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูง และค่าการเลือกเกิดของโพรพิลีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0-95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาจาก 523-623 องศาเซลวิน ซึ่งแตกต่างกับค่าการเลือกเกิดของอะซีโตนที่มีค่าสูงในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400-623 องศาเซลวิน ค่าการเลือกเกิดของอะซีโตนลดลงจาก 100 เปอร์เซ็นต์เหลือ 5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับค่าความว่องไว และค่าการเลือกเกิดต่อค่าการเปลี่ยนของไอโซโพรพานอล (Cunningham และคณะ, 1996)

Taneda และคณะ (1994) ได้ศึกษาถึงผลพลอยได้ (byproducts) ที่เกิดขึ้นจากการใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ru/C, Ru-Pt/C และ Ru-Pd/C ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 15 ลิตร โดยตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสภาพแขวนลอยอยู่ในไอโซโพรพานอล ผลพลอยได้หลักที่เกิดขึ้นแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ru-Pd/C ให้ค่าการเลือกเกิดสูงที่สุด เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ มีค่าปริมาณผลพลอยได้ต่ำเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 ปริมาณหลักของผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา ดีไฮโดรจีเนชันของ ไอโซโพรพานอล (Taneda และคณะ, 1994)

	CH ₄ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₃ H ₈ (ppm)
Ru/C	400	150	700
Ru-Pt/C	300	100	4950
Ru-Pd/C	260	100	640

- ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน

Cunningham และคณะ (1996) ได้ศึกษาถึงตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดงบนตัวรองรับหลายชนิดในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน โดยมีภาวะการทดลองดังตารางที่ 2.2 และผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Cu/SiO₂ ให้ผลที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 473 องศาเซลเซียส ซึ่งค่า

การเลือกเกิด ลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 470 เหลือ 448 องศาเซลวิน และแสดงให้เห็นว่า กระบวนการก่อนการรีดักชัน (pre reduction) ไม่มีผลต่อค่าความว่องไวของปฏิกิริยา ตารางที่ 2.2 ภาวะที่ใช้ในการทดลอง (Cunningham และคณะ ,1996)

Reactor Type	Conventional continuous-flow microcatalytic reactor
Pressure:P(Ac):P(H ₂):P(Ar)	30:380:350 Torr
Inlet flow rate	20 ml/min.
Test Period	40-180 min.
Reaction Condition	Pseudo-steady state

ตารางที่ 2.3 ค่าความว่องไว และการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Catalyst	Selectivity		Activity	
	448-473 K	510 K	473 K ^a	448 K ^b
Cu/Al ₂ O ₃	> 98 %		60 %	38 %
Cu/Cr ₂ O ₃	> 98 %	70 %	60 %	0
Cu/SiO ₂	> 98 %		57 %	50 %
Cu/TiO ₂	> 98 %	37 %	40 %	0

a = กระบวนการก่อนการรีดักชัน ในบรรยากาศ H₂ ที่ 473 K

b = กระบวนการก่อนการรีดักชัน ในบรรยากาศ H₂ ที่ 773 K, 2 ชั่วโมง

Taneda และคณะ (1994) ได้ศึกษา ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Cu/Al₂O₃ ในเครื่องปฏิกรณ์ แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 423 องศาเซลวิน โดยให้อัตราการไหลของอะซิโตน และ ไฮโดรเจน เท่ากับ 3 โมลต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นแสดงดัง ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ni-Cu (1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) /Al₂O₃ 260 กรัม

Pressure (MPa)	CH ₄ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	C ₃ H ₈ (ppm)	CO,CO ₂ (ppm)	4-methyl 2-pentanone(ppm)
0.122	400	6	260	300	6300
0.304	1200	14	600	750	2200

2.4. อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

ตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์, ตัวเร่งปฏิกิริยา, อุณหภูมิของปฏิกิริยา จะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถควบคุมการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดจึงควรจะทราบว่าตัวแปรต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีอย่างไรจากการรวบรวมผลงานที่ผ่านมาพอจะกล่าวถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีได้ดังนี้

2.4.1 ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล

จากการศึกษาผลงานที่ผ่านมา พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยา ดีไฮโดรจีเนชัน ของ ไอโซโพรพานอล ได้แก่

1. ชนิด และปริมาณ ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้
2. ปริมาณส่วนผสมของอะซีโตนในสารตั้งต้น
3. อุณหภูมิของปฏิกิริยา
4. ความเร็วรอบที่ใช้ในการกวน
5. ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์

โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการทดลองที่ภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.5 (Kim และคณะ, 1992; Doi and Tanaka, 1992; Doi และคณะ, 1995; Doi และคณะ, 1997)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะสำคัญในการทดลองที่ภาวะต่าง ๆ

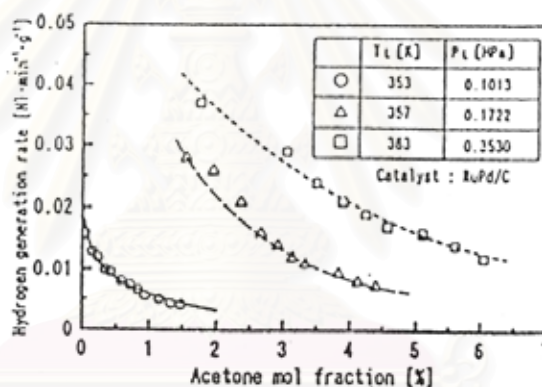
Feature	Kim และคณะ (1992)	Doi and Tanada, (1992)	Doi และคณะ (1995)	Doi และคณะ (1997)	Walaiporn (1999)
1.Heat Supply	Oil bath with magnetic stirrer and heater	Oil bath with magnetic stirrer	Heated oil flowing in the reactor jacket	-	Silicone bath
2.Reactor	3- necked flask (1000 ml.)	3- necked flask (300 ml.)	Mixing tank (200 L)	Falling liquid film reactor	3- necked flask (1000 ml.)
3.Mixing	stirrer	stirrer	stirrer	-	N ₂ bubble
4.Separation unit	Simple Condenser	Reflux Condenser	Rectifying column	Reflux Condenser	Reflux Condenser
5.Flow rate measuring device	Bubble flow meter	Gas Burette	Gas flow meter	Gas Burette	Bubble flow meter

2.4.1.1. อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

Kim และคณะ, 1992 ; Doi และคณะ, 1992 ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา พบว่าค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยามีอิทธิพลต่อปริมาณของ ไอโซโพรพานอล และอุณหภูมิของปฏิกิริยา ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อลิตรของไอโซโพรพานอลเท่ากัน ปริมาณของไอโซโพรพานอลที่ปริมาณมากกว่า จะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าปริมาณของไอโซโพรพานอลที่ต่ำ ๆ

2.4.1.2. อิทธิพลของความเข้มข้นของอะซีโตน

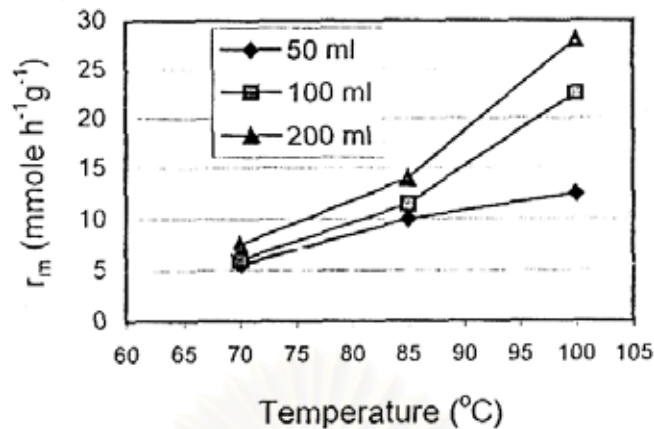
อะซีโตนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ดีไฮโดรจีเนชัน ของไอโซโพรพานอล สามารถละลายในสารตั้งต้น และมีพฤติกรรมยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาโดยการเข้าไปปกคลุมพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากนั้น จึงเกิดการยับยั้งปฏิกิริยาซึ่งที่ความเข้มข้นของอะซีโตนสูง ในวัฏภาคของเหลวของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าต่ำ โดยปรากฏการณ์นี้ได้เกิดขึ้นกับทุกงานที่ศึกษามาก่อนหน้านี้ ในการศึกษาเรื่องตัวเร่งปฏิกิริยา (Kim และคณะ 1992; Taneda และคณะ 1994) จากรูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น กับความเข้มข้นในวัฏจักรของเหลวของอะซีโตนที่อุณหภูมิ ของปฏิกิริยาต่าง ๆ กันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ru-Pd/C โดยจะสังเกตได้ว่าที่เศษส่วนโมลของอะซีโตนมีค่ามากจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงอิทธิพลของอะซีโตนในเฟสของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ดีไฮโดรจีเนชันต่ออัตราการเกิดไฮโดรเจน (Taneda และคณะ, 1994)

2.4.1.3. อิทธิพลของอุณหภูมิของปฏิกิริยา และปริมาณของไอโซโพรพานอล

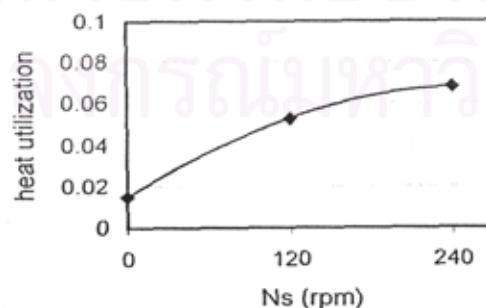
จากรูปที่ 2.14 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิของปฏิกิริยา ที่ปริมาณของไอโซโพรพานอลต่าง ๆ กัน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ปริมาณของไอโซโพรพานอลคงที่ และอุณหภูมิของปฏิกิริยามีค่าสูงส่งผลให้เกิดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูง นอกจากนี้ที่อุณหภูมิมักคงที่ และปริมาณของไอโซโพรพานอลมีค่ามากก็จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงตามไปด้วย



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิของปฏิกิริยา และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ ปริมาณของไอโซโพรพานอลต่าง ๆ กัน (Doi และคณะ, 1992)

2.4.1.4. อิทธิพลของการกวน

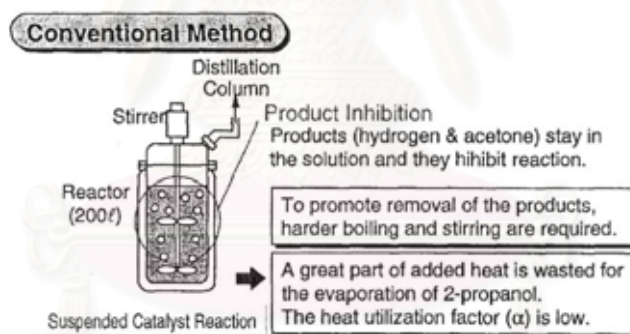
เมื่อทำการเพิ่มความเร็วยกของการกวน จะเป็นการเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น เพราะว่า ผลึกที่เกิดขึ้นสามารถ หลุดออกได้ง่าย และรวดเร็วจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และยังช่วยให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง อีกทั้งยังช่วยให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นได้ดีขึ้น จากรูปที่ 2.15 แสดงถึง ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วยกของการกวนกับ ค่า heat utilization ซึ่งค่า heat utilization เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่าเมื่อความเร็วยกของการกวน เพิ่มขึ้นเป็น 120 รอบต่อนาที และเพิ่มขึ้นช้าลง เมื่อความเร็วยกเพิ่มขึ้นถึง 240 รอบต่อนาที ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วยกนั้นจะช่วยให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง และช่วยให้ผลึกหลุดออกจากผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น



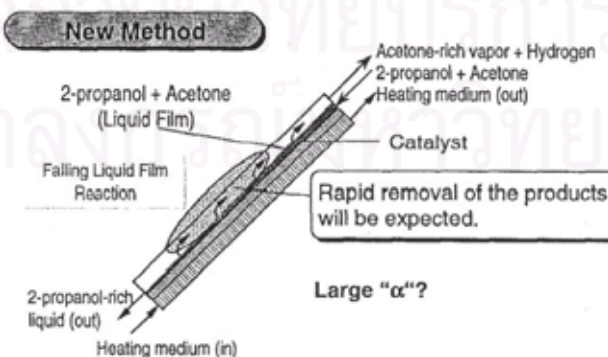
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วยกของการกวนกับค่า heat utilization (Doi และคณะ, 1995)

2.4.1.5. ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาถึงเครื่องปฏิกรณ์ 2 ชนิด ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์แบบแขวนลอย และเครื่องปฏิกรณ์แบบ falling liquid film โดยปกติเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous-stirred tank) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแขวนลอยอยู่ในสารตั้งต้น และสารละลายจะถูกผสมโดยใช้แท่งกวน และผลิตภัณฑ์ไอที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกอย่างต่อเนื่องโดยใช้หอกลั่น จากรูป 2.16 แสดงถึงเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้โดยทั่วไป และเครื่องปฏิกรณ์ชนิดใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเก่าในตัวเร่งปฏิกิริยาจะแขวนลอยอยู่ในไอโซโพรพานอล และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ อะซีโตน กับไฮโดรเจนจะอยู่ที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคของเหลว และวัฏภาคก๊าซในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งเป็นการยากที่จะแยกเอาผลิตภัณฑ์ออกได้หมดและอะซีโตนยังเป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา หรือในการที่จะเอาผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยานั้น การทำให้เดือด และการกวนที่มากขึ้นก็จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์หลุดออกได้ดีขึ้น แต่ก็ต้องสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วยเช่นกัน



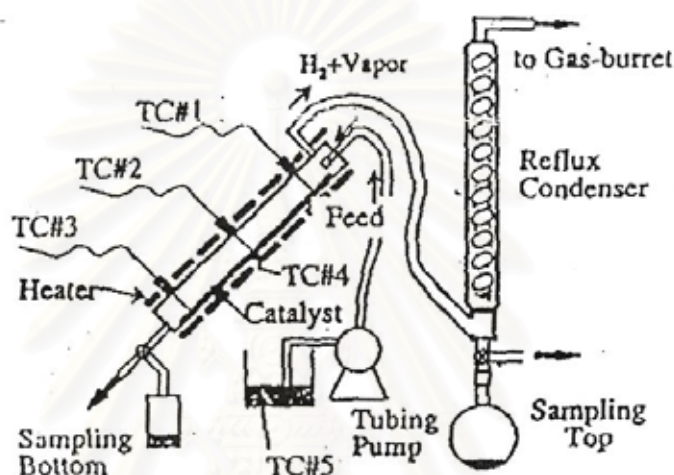
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.16 เครื่องปฏิกรณ์ (ก) แบบปกติ (ข) แบบที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Doi และคณะ, 1997)

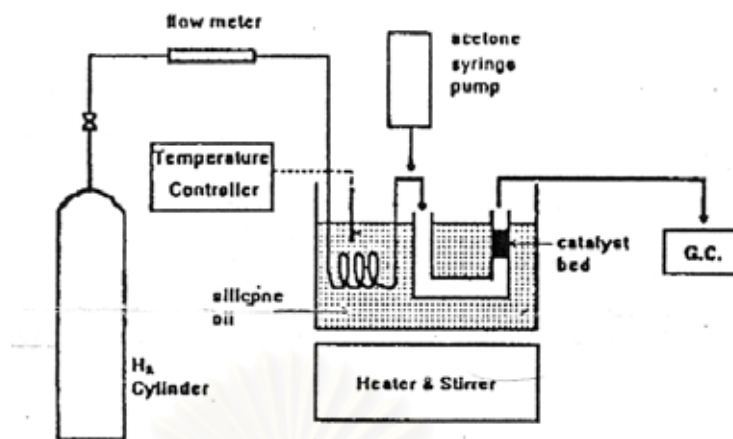
ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ falling liquid film การไหลของไอโซโพรพานอลจะไหลลงมาในลักษณะเป็นฟิล์มบางตามแนวเอียงซึ่งฉาบพื้นผิวเอียงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไอโซโพรพานอลจะระเหยขณะที่ไหลผ่านตามแนวเอียงของเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจากผลการทดลองสามารถเพิ่มค่า heat utilization ได้ถึง 27.4 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส และได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเท่ากับ 14.6 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าให้ผลการทดลองได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเดิม (Doi และคณะ; 1997)



รูปที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์ชนิด Falling Liquid Film (Doi และคณะ; 1997)

2.4.2. ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของอะซีโตน

ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของอะซีโตน เป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน เกิดในวัฏภาคแก๊สโดยอะซีโตน และไฮโดรเจนทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดท่อแบบเบดนิ่งได้ผลิตภัณฑ์ เป็น ไอโซโพรพานอล และได้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 200 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์ของปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของอะซีโตนคือเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนจากอะซีโตนไปเป็นไอโซโพรพานอลปริมาณมาก ๆ เพื่อที่จะได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Kim และคณะ; 1992, Takashima และคณะ; 1995, Taneda และคณะ; 1994) รูปที่ 2.18 Kim และคณะ(1992) ได้ติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองดังรูป โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดท่อแบบเบดนิ่งวางอยู่ในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิโดยควบคุมอัตราการไหลขาเข้าของอะซีโตนและไฮโดรเจน โดยวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี

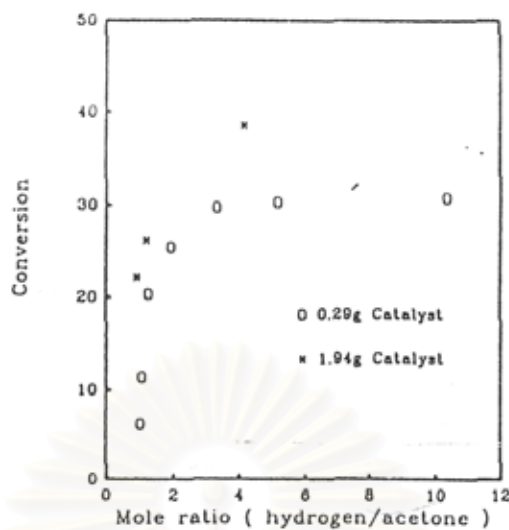


รูปที่ 2.18 อุปกรณ์การทดลองสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของอะซีโตน
(Kim และคณะ, 1992)

2.4.2.1. อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่อัตราส่วนเศษส่วน โมลไฮโดรเจนต่ออะซีโตนเดียวกันและที่อุณหภูมิคงที่ เมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการเปลี่ยนของอะซีโตนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (Kim และคณะ; 1992) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Raney-Nickel น้ำหนัก 0.29-1.94 กรัม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนของอะซีโตน และอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตน ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน ณ อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส จากรูป จะได้ว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตน (1-2) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตน ที่อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตนเท่ากับ 4 และค่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 0.29 เป็น 1.94 กรัม ค่าการเปลี่ยนเพิ่มขึ้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

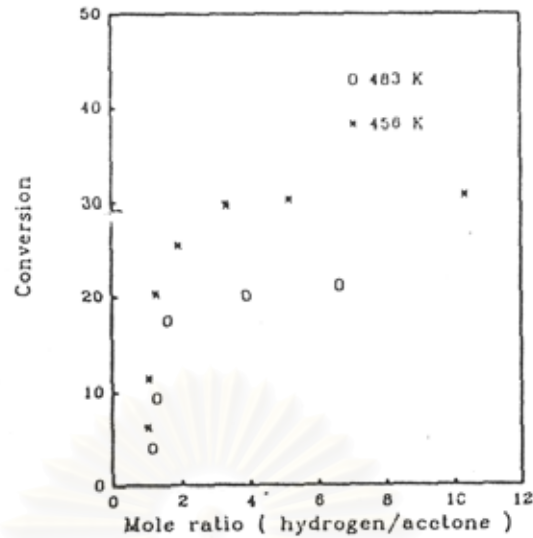
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19 อิทธิพลของอัตราเศษส่วนโดยโมลของอะซีโตนต่อไฮโดรเจน และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าการเปลี่ยน (Kim และคณะ; 1992)

2.4.2.2. อิทธิพลของความเข้มข้นของอะซีโตนกับไฮโดรเจน

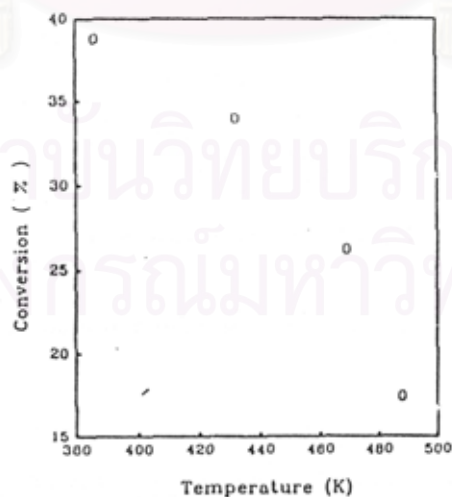
ที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการเปลี่ยนของอะซีโตน เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเริ่มมีแนวโน้มคงที่ (Kim และคณะ; 1992) รูป 2.20 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนกับค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.29 กรัม ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตน เท่ากับ 4 หลังจากนั้นแนวโน้มคงที่ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตนมีค่าเท่ากับ 4



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนกับค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่ออะซีโตนที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Kim และคณะ; 1992)

2.4.2.3. อิทธิพลของอุณหภูมิก่เกิดปฏิกิริยา

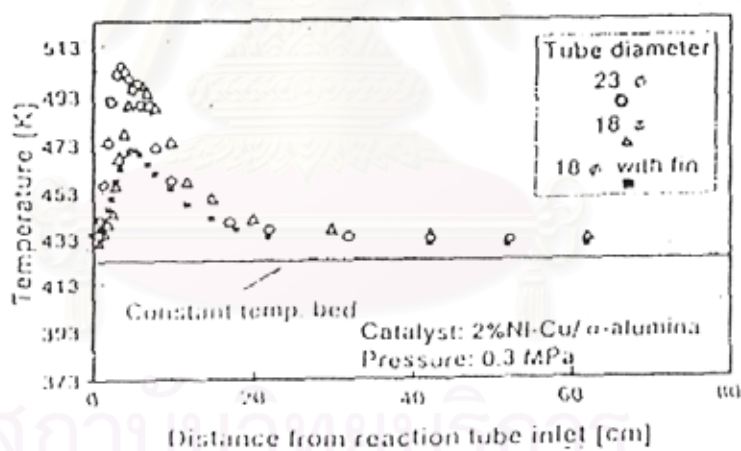
จากรูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน กับค่าการเปลี่ยนของอะซีโตนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีนน้ำหนักเท่ากับ 1.92 กรัม ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน และอะซีโตนเท่ากับ 0.0154 โมลต่อนาที และ 0.0128 โมลต่อนาทีตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยา มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการเปลี่ยนของอะซีโตนมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไฮโดรจีเนชันของปฏิกิริยาต่อค่าการเปลี่ยน (Kim และคณะ; 1992)

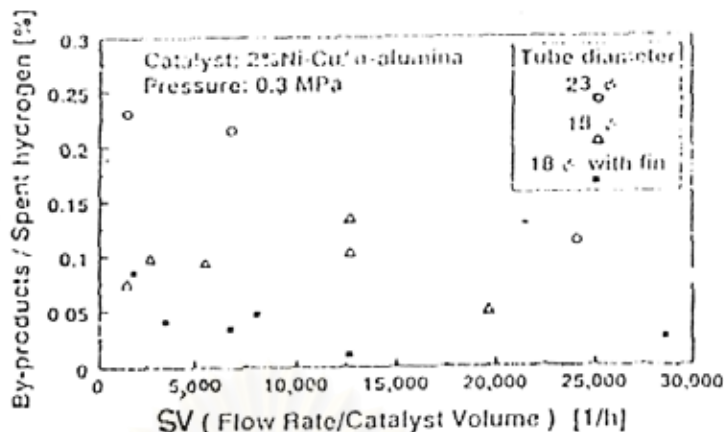
2.4.2.4. อิทธิพลของขนาดของท่อเครื่องปฏิกรณ์

จากรูปที่ 2.22 แสดงถึงค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ แบบท่อ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ 3 ขนาด ได้แก่ ท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 เซนติเมตร, 18 เซนติเมตร และ 18 เซนติเมตรที่ติดตั้งระบายความร้อน ที่อุณหภูมิ 423 องศาเซลเซียส ความดัน 0.3 เมกะพาสคัล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 2 เปอร์เซ็นต์ $\text{Ni-Cu}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่ตำแหน่งเริ่มต้นขณะที่ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเกิดขึ้นซึ่งจะทำให้เบคของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสูงขึ้นซึ่งหมายความว่าถ้าปริมาณความร้อนสามารถถ่ายโอนได้ดีอุณหภูมิในเบคตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีค่าต่ำ ๆ ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 18 เซนติเมตร ที่ติดตั้งระบายความร้อนจะให้อุณหภูมิที่ต่ำสุด ประมาณ 473 องศาเซลเซียสภายในเบคตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะว่าความร้อนสามารถถ่ายโอนได้อย่างดีจากภายในเครื่องปฏิกรณ์สู่ครีระบายความร้อน และในการทดลองได้ทำการวัดปริมาณของผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นซึ่งจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูง ๆ นั้นจะมีอิทธิพลต่อค่าการเลือกเกิดของ ไอโซโพรพานอล (Taneda และคณะ; 1994)



รูปที่ 2.22 การกระจายตัวของอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันในเครื่องปฏิกรณ์

(Taneda และคณะ; 1994)



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลจำเพาะ ต่อค่าอัตราการเกิดผลพลอยได้ (Taneda และคณะ; 1994)

2.5. วิธีการเลือกปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาความร้อนพลังงานเคมี

ในระบบปฏิกิริยาความร้อนพลังงานเคมี ปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดขอบเขตของสารทำงาน (working pairs) ซึ่งอาจจะเป็นระบบ ของแข็ง/แก๊ส หรือระบบของเหลว/แก๊ส ซึ่งการเลือกสารทำงานของทั้ง 2 ระบบนี้แตกต่างกันเนื่องจากมีธรรมชาติของปฏิกิริยาทางเคมีที่แตกต่างกัน

โดยวิธีการพื้นฐานในการเลือกสารทำงานไม่แตกต่างกันมากนัก Balaras และ Jefer (1991) ได้ให้ข้อสังเกตในการเลือกสารทำงานให้เหมาะสมได้ดังนี้

1. สำนวความเป็นไปได้ของสารทำงานที่จะใช้
2. เลือกสารทำงานให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการใช้
3. คำนวณสมบัติทางกายภาพทางอุณหพลศาสตร์ของสารเคมีที่จะใช้
4. วิเคราะห์ความเหมาะสมของสารที่จะใช้กับอุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่ใช้ดำเนินการ และระดับความปลอดภัย

ข้อสำคัญพื้นฐานที่เป็นข้อควรพิจารณาในการเลือกสารทำงาน ได้แก่ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์, จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา, สมบัติทางกายภาพของสาร ฯลฯ และปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้ปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยาความร้อนพลังงานเคมี ได้แก่ ความร้อนของปฏิกิริยา หรือแหล่งเก็บพลังงาน, ค่าการเปลี่ยน, อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ในช่วงอุณหภูมิที่สนใจ, ธรรมชาติของปฏิกิริยา, ตัวเร่งปฏิกิริยา, เสถียรภาพของสารทำงาน, ปฏิกิริยาข้างเคียง และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น (Lenz และคณะ, 1982) เมื่อได้

สมบัติทางอุณหพลศาสตร์แล้ว หลังจากนั้นควรคำนึงถึงสารทำงานที่จะใช้ในปี้ความร้อนพลังงานเคมีในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มคุณภาพของพลังงาน ดังนี้

1. ปฏิกริยาแบบผันกลับได้

โดยปฏิกริยาเคมีที่ใช้ในระบบจะต้องเป็นปฏิกริยาที่ผันกลับได้ และไม่มีปฏิกริยาข้างเคียงเพื่อที่จะให้สารเคมีใช้ได้ในระยะเวลานาน โดยผลิตภัณฑ์ของเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อนจะต้องใช้เป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน และในทางกลับกัน ผลิตภัณฑ์ของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน จะต้องเป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน โดยปฏิกริยาชนิดผันกลับได้ที่เกิดขึ้นต้องมีค่าใช้จ่ายไม่มากจนเกินไป แต่ถ้าปฏิกริยาที่ใช้มีปฏิกริยาข้างเคียงเกิดขึ้นที่จะไปรบกวนปฏิกริยาหลักของระบบต้องมีวิธีการกำจัด ผลพลอยได้นั้นออกไป นอกจากนั้นถ้าปฏิกริยาไม่สามารถผันกลับได้ ก็จะไม่สามารถดำเนินการปี้ความร้อนพลังงานเคมีได้ด้วยเช่นกัน

2. อุณหภูมิเทิร์นนิ่ง(turning temperature) และทิศทางของปฏิกริยาเคมี

อุณหภูมิเทิร์นนิ่ง เป็นอุณหภูมิของปฏิกริยา ซึ่งทำนายได้จากพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs Free Energy) ที่อุณหภูมิใด ๆ

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (2.14)$$

K = ค่าคงที่สมดุลของปฏิกริยาในเทอมของแอกทิวิตี

ซึ่งจะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของปฏิกริยามีค่าเป็น บวก, ลบ หรือ ศูนย์ โดยพลังงานเสรีของกิบส์จะบอกถึงทิศทางของปฏิกริยา เช่น ที่อุณหภูมิเทิร์นนิ่ง พลังงานเสรีของกิบส์มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายความว่า ปฏิกริยาเข้าสู่สมดุล, ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิ่ง พลังงานเสรีของกิบส์มีค่าเป็นบวก หมายความว่า ปฏิกริยาไม่สามารถดำเนินไปได้ถ้าปราศจากพลังงานที่ใส่เข้ามาในระบบ และที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิ่ง ค่าพลังงานของกิบส์มีค่าเป็นลบ หมายความว่า ปฏิกริยาสามารถเกิดขึ้นได้เอง กรณีพิจารณาที่ความดันต่ำแก๊สเป็นอุดมคติ สามารถพิจารณาค่าคงที่สมดุลในรูปของความดันย่อยแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$-RT \ln K = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.16)$$

$$T = \frac{\Delta H^\circ}{\Delta S^\circ - R \ln K} \quad (2.17)$$

$$\Delta H^\circ = \Delta H^\circ_{T_1} + \int_{T_1}^T C_p dT \quad (2.18)$$

$$\Delta S^\circ = \Delta S^\circ_{T_1} + \int_{T_1}^T \frac{C_p}{T} dT \quad (2.19)$$

T_1 = อุณหภูมิอ้างอิง

แทนสมการ 2.18, 2.19 ใน 2.17

$$T = \frac{\Delta H^\circ_{T_1} + \int_{T_1}^T C_p dT}{\Delta S^\circ_{T_1} + \int_{T_1}^T \frac{C_p dT}{T} - R \ln K} \quad (2.20)$$

สมมติให้ C_p เปลี่ยนแปลงไม่มาก

$$T = \frac{\Delta H^\circ}{\Delta S^\circ - R \ln K} \quad (2.21)$$

เมื่อ $K = 1$ ได้

$$T^\circ = \frac{\Delta H^\circ}{\Delta S^\circ} \quad (2.22)$$

ในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจำเป็นต้องใส่พลังงานความร้อนเข้าไปเพื่อให้เกิดการดูดซับพลังงาน ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนพลังงานความร้อนจะถูกปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งปฏิกิริยาดูดความร้อนจะต้องมีอุณหภูมิของปฏิกิริยาน้อยกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิ่ง และปฏิกิริยาคายความร้อนจะต้องมีช่วงอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิ่ง

3. ความร้อนโมลาร์ของปฏิกิริยา และปริมาตรโมลาร์ (Molar heat of reaction และ Molar volume)

ระบบป้อนความร้อนพลังงานเคมี เป็นระบบที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางพลังงานของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งถ้าให้ปฏิกิริยาเคมีเป็นระบบที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้วนั้น ค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมีต่อ 1 หน่วยปริมาตรควรมีค่ามาก ซึ่งค่าปริมาตรโมลาร์น้อย ๆ นั้นแสดงถึง ขนาดที่น้อยที่สุดของระบบที่ควรจะเป็น เช่น

สำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีระบบ ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน มีค่าความร้อนโมลาร์ของปฏิกิริยา (ΔH_r) เท่ากับ 55.06 กิโลจูลต่อโมล) และ ปริมาตรโมลาร์ เท่ากับ 76.42 มิลลิลิตรต่อโมล และอัตราส่วนระหว่าง ความร้อน โมลาร์ของปฏิกิริยาต่อปริมาตรโมลาร์ เท่ากับ 0.72 กิโลจูลต่อมิลลิลิตร

4. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ลักษณะของปฏิกิริยาเคมีควรจะเกิดได้เร็ว เมื่อมีพลังงานที่ดูดซับจากระดับ อุณหภูมิต่ำมากพอ และปล่อยพลังงานในระดับอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจำเป็นต้องมีพลังงานกระตุ้นในระดับต่ำ หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา

ตามทฤษฎีการชน (Collision Theory) ซึ่งโมเลกุลของสารจะเกิดการชนกันอย่างเหมาะสมเพื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี ถ้าพลังงานของโมเลกุลขณะชนน้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นปฏิกิริยา ปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดได้, ถ้าพลังงานของโมเลกุลขณะชนมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ เพื่อให้ได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ๆ จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาโดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเท่านั้นแต่ไม่ทำให้สมดุลเปลี่ยนไป (Fogler, 1992; Furmer และ Zaitsev, 1985) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีความว่องไวสูง และค่าการเลือกเกิดที่ดี

สำหรับปฏิกิริยาร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Nickel fine particle, Raney-Ni และอื่น ๆ ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี จากการศึกษาพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ถ้าอยากได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่ามากต้องใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากด้วยเช่นกัน

5. ปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่

- สมบัติการส่งถ่ายความร้อน

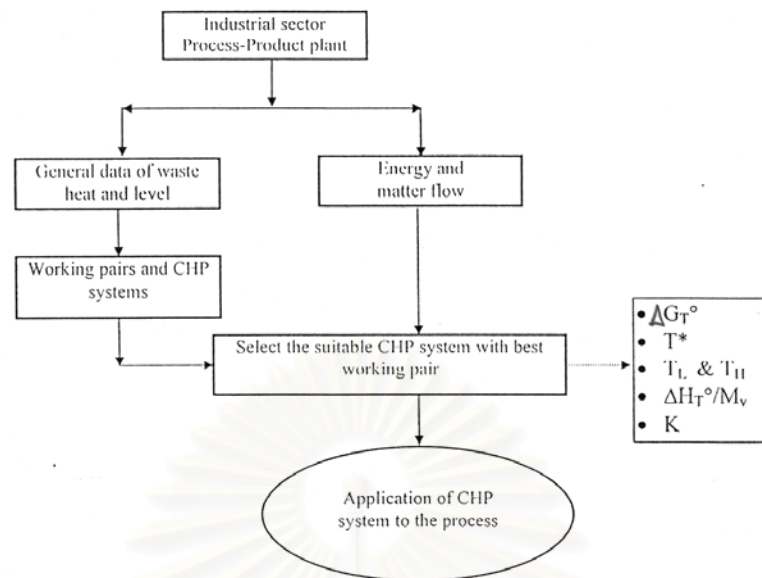
ค่าการนำความร้อน และค่าความหนืดเป็นสมบัติการส่งถ่ายความร้อนที่สำคัญซึ่งค่าการนำความร้อน และค่าความจุความร้อนควรมีค่ามาก ขณะที่ความหนืดของสารควรมีค่าน้อย

- ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย

โดยปัจจัยที่ควรคำนึงถึง ความเป็นพิษ และระดับความไวไฟ

- การกัดกร่อน สารเคมีที่ใช้ไม่ควรเกิดการกัดกร่อน และมีราคาถูก
- เสถียรภาพ สารที่ใช้ควรมีค่าความร้อนคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ
- สารที่ใช้ควรถ่ายได้ง่าย และราคาถูก

ในการเลือกระบบปฏิกิริยาร้อนพลังงานเคมี ต้องอาศัยข้อมูล อาทิเช่น อุณหภูมิของเสีย ความร้อนเหลือทิ้ง, การไหลของมวล และพลังงาน, ความเป็นไปได้ของสารทำงาน และความเหมาะสมของประสิทธิภาพในอุตสาหกรรม ซึ่งจากรูปที่ 2.24 แสดงถึงแผนภาพการเลือกสารทำงานในระบบปฏิกิริยาร้อนพลังงานเคมี

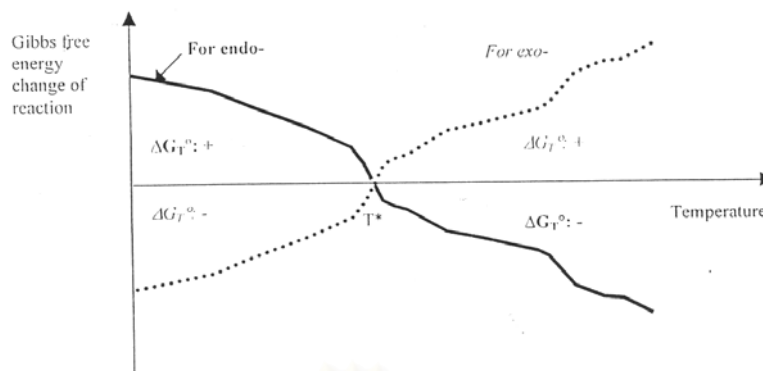


รูปที่ 2.24 แผนภาพการเลือกสารทำงานในระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี
(Nay Myo Moo,1998 :36)

อุณหภูมิต่ำ (T_L) และอุณหภูมิสูง (T_H)

ขอบเขตของอุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูงสามารถประมาณได้โดยใช้ความรู้จาก อุณหภูมิเทิร์นนิ่ง และค่าพลังงานอิสระของกิบส์ โดยปกติแล้วปฏิกิริยาคูดความร้อนจะดูดซับพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำ ในส่วนของปฏิกิริยาคายความร้อนจะปล่อยพลังงานความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิสูง

จากรูปที่ 2.25 แสดงถึงการประมาณค่าอุณหภูมิเทิร์นนิ่งในขอบเขต T_H และ T_L จากรูป ΔG_T° เป็นบวก เมื่อ $T < T^*$ และ ΔG_T° เป็นลบเมื่อ $T > T^*$ สำหรับปฏิกิริยาคูดความร้อน และคายความร้อนตามลำดับ ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนจะเกิดเมื่อพลังงานความร้อนถูกดูดซับจากสิ่งแวดล้อมโดยอุณหภูมิของปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วงซึ่ง ΔG_T° เป็นบวก แต่สำหรับปฏิกิริยาคายความร้อนมีจุดประสงค์ คือคายพลังงานความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยปราศจากงานที่ใส่เข้าไปในระบบซึ่งการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนนั้น อุณหภูมิของปฏิกิริยาควรอยู่ในเขตที่ ΔG_T° เป็นลบ ซึ่งทั้ง T_H และ T_L ควรน้อยกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิ่ง



รูปที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิบส์กับอุณหภูมิของสารทำงาน
(Nay Myo Moo,1998 :37)

2.6. แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Heat Sources) (วราพร, 2002: 23)

ความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ มีความสำคัญเปรียบได้กับแหล่งวัตถุดิบสำหรับป้อนความร้อน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติ และที่ไม่ได้มาจากธรรมชาติ การเลือกชนิดแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ต้องคำนึงถึง

1. ตำแหน่งของแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำควรอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่จะนำความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ได้จากป้อนความร้อนมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ และการขนส่ง
2. สมบัติการกัดกร่อนของสาร เช่น น้ำทะเล, น้ำบาดาล, ไอที่มีส่วนผสมของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำมาพิจารณาเลือกวัสดุอุปกรณ์ที่ทนทานต่อการกัดกร่อน
3. ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนของแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำซึ่งจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของป้อนความร้อน โดยแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำจากธรรมชาติส่วนมากอุณหภูมิ และปริมาณจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เช่น อากาศ ในขณะที่แหล่งความร้อนจากน้ำบาดาล, ดิน และแม่น้ำ จะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำจากโรงงานอุตสาหกรรมอุณหภูมิต่ำ และปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้
4. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ และดำเนินกระบวนการนำความร้อนเข้าสู่ป้อนความร้อนส่วนสำคัญเป็นราคาของพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อน โดยค่าใช้จ่ายสูงสุดมาจากน้ำบาดาล (deep drilling) รองลงมาคือ พลังงานแสงอาทิตย์, ดิน, น้ำจากบ่อน้ำ และอากาศตามลำดับ

2.6.1. แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติ (The Natural Low Temperature Heat Sources)

1. อากาศ (Atmospheric Air) นิยมใช้กับปั๊มความร้อนขนาดเล็ก มีข้อดี คือ หาง่าย ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุณหภูมิต่ำ มีข้อเสีย คือ ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิ

2. น้ำผิวดิน (Surface Water) ดูดกลืนพลังงานความร้อนจากอากาศ และดิน ได้แก่ แม่น้ำ, ทะเลสาบ ใช้กับปั๊มความร้อนขนาดใหญ่จึงจะคุ้มทุน เพราะค่าใช้จ่ายในการนำน้ำมาใช้มีค่าสูง น้ำมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามฤดูกาล

3. น้ำใต้ดิน (Underground Water) ดูดกลืนพลังงานความร้อนโดยตรงจากดิน เหมาะกับปั๊มความร้อนขนาดเล็ก มีอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนสม่ำเสมอ นำมาใช้ได้ง่าย

4. ดิน (Soil) สะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์ และอากาศอยู่ที่ชั้นบนของผิวดินที่ ความลึกประมาณ 10 เมตร มีค่าใช้จ่ายสูง นิยมขุดลงไปถึงความลึก ประมาณ 10-15 เมตร

5. พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) พลังงานแสงอาทิตย์ที่มาถึงบรรยากาศของโลกมีฟลักซ์ความหนาแน่นของพลังงานที่พื้นผิว (The Surface Density Energy Flux) ประมาณ 1.38 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามสภาพภูมิอากาศ ฟลักซ์ความหนาแน่นของพลังงานที่ได้จากแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 0.12-0.5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งถ้าปั๊มความร้อนที่ต้องการความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 15 กิโลวัตต์ จะต้องใช้แผงรับแสงอาทิตย์หลายตารางเมตร

2.6.2. แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ไม่ได้มาจากธรรมชาติ (Artificial Low Temperature Heat Sources)

เป็นแหล่งความร้อนจากกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งพลังงานที่เหลือจากการใช้งานแล้ว หรือความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat) เป็นพลังงานความร้อนที่มีอยู่ในอากาศ แก๊ส น้ำ หรือของเหลวอื่นที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง หรืออุปกรณ์ใด อุปกรณ์หนึ่ง มีภาวะและสมบัติแตกต่างกันตามชนิดของกระบวนการ มักจำแนกตามระดับอุณหภูมิออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 600-1000 องศาเซลเซียส กลุ่มอุณหภูมิปานกลางมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200-600 องศาเซลเซียส กลุ่มอุณหภูมิต่ำมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35-200 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนที่สูงกว่าความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติ จึงเหมาะที่จะ

เป็นแหล่งความร้อนให้กับปั๊มความร้อน โดยแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงพอแล้วอาจนำมาใช้ได้เลยโดยไม่ต้องผ่านปั๊มความร้อน

2.7. แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (High Temperature Heat Sources) (วราพร,2002 :25)

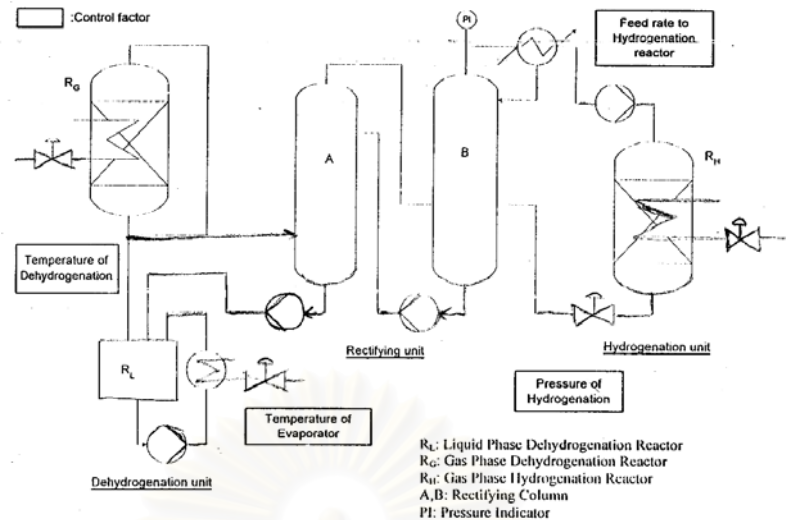
อยู่ที่เครื่องควบแน่น และหอดูดกลืนนิยมใช้น้ำมารับความร้อนเพื่อส่งไปยังที่ที่ต้องการใช้

2.8. ข้อดีของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี(วราพร, 2002 :25)

1. ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีมีค่ามากกว่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และความร้อนแฝงของการควบแน่นทำให้ความร้อนคุณภาพสูงที่ได้มีอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปั๊มความร้อนชนิดอัดไอซึ่งความร้อนที่ได้มีอุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ดำเนินไปสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่
2. สามารถเลือกอุณหภูมิของความร้อนคุณภาพสูงได้ตามต้องการด้วยการเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสม
3. การเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปพลังงานเคมี มีความเป็นไปได้ในการเก็บพลังงานโดยปราศจากความร้อนสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ
4. มีประสิทธิภาพสูงกว่าปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ

2.9 หน่วยทดลองปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน (Taneda และคณะ, 1995)

ในปี ค.ศ. 1993 หน่วยทดลองปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน แห่งแรกของโลกได้สร้างขึ้นที่ประเทศญี่ปุ่น จากรูป 2.26 แสดงแผนภาพของหน่วยทดลองปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน และตารางที่ 2.6 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ โดยหน่วยทดลองประกอบด้วย คอลัมน์หอกลิ้นจำนวน 2 หอ (A และ B), เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีนชั้น, เครื่องปฏิกรณ์ดีไฮโดรจีนชั้น จำนวน 2 เครื่อง ได้แก่เครื่องปฏิกรณ์เฟสของเหลว และเฟสแก๊สเพื่อป้องกันการดูดซับของอะซีโตนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.26 แผนภาพของหน่วยทดลองป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน (Taneda และคณะ, 1995)

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดของหน่วยทดลองป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตนไฮโดรเจน (Taneda และคณะ, 1995)

Component	Specification
Dehydrogenation	Unit size : 2300*5000*2500 ^H Dehydrogenation tank : 0.4 m ² Heat supply : ~2.5*10 ⁴
Rectifying column	Column size : 450∅*4260, 450∅*4960 Column type : plate type (8 stages)
Hydrogenation	Unit size : 2300*5000*2500 ^H Dehydrogenation tank : shell & tube type Fixed bed reactor 16∅*1000*81 (tube)

ในการทดลองได้ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ni-Cu/Al₂O₃ (Ni:Cu = 1:4) สำหรับปฏิกิริยา ไฮโดรจีนเนชันของอะซีโตน และRu/C สำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจีนเนชันของไอโซโพรพานอล ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระบวนการสามารถผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากน้ำ 90 องศาเซลเซียส โดยได้ปริมาณของพลังงานความร้อนที่สามารถนำมาใช้ใหม่ ประมาณ 6.3 เมกะจูลต่อชั่วโมง
2. หน่วยทดลองปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน มีเสถียรภาพในการผลิตไอน้ำ
3. ประสิทธิภาพของพลังงาน และค่า COP ของหน่วยทดลองมีค่า ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 10-20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Karaca และคณะ (2002) : ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของปั๊มความร้อนชนิดพลังงานเคมีโดยเปรียบเทียบความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของปั๊มความร้อนชนิดพลังงานเคมีประเภทที่ใช้สารตั้งต้นเป็นแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ระบบ เมทานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์-ไฮโดรเจน (M-F-H), เอทานอล-อะซีตัลดีไฮด์-ไฮโดรเจน (E-AL-H), ไอโซโพรพานอล-อะซีโตน-ไฮโดรเจน (iP-A-H), นอร์มอลบิวทานอล-บิวทิลอัลดีไฮด์-ไฮโดรเจน (nB-B-H) พบว่าระบบ iP-A-H และ nB-B-H จะให้คุณภาพของความร้อนสูงกว่าระบบ M-F-H และ E-AL-H และ ปั๊มความร้อนชนิดพลังงานเคมีชนิด nB-B-H จะให้ค่าคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

วราพร (2002) : ทำการจำลองกระบวนการปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน โดยโครงสร้างการควบคุมสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ประกอบด้วย 8 วงควบคุม ได้แก่ การควบคุมความดันของหอกถัน และแก๊สภายในกระบวนการซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดเสถียรภาพของปั๊มความร้อน การควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ การควบคุมอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน การควบคุมระดับของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ทำการควบคุมกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยปรับอัตราการไหลกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ทำการควบคุมกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยปรับพลังงานของเครื่องอัดไอผ่านวงควบคุมแบบขั้นลำดับ ซึ่งผลของโครงสร้างการควบคุมทั้ง 2 แบบมีสมรรถนะใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาในแง่ความทนทานต่อการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง ความเร็วในการปรับกระบวนการจากค่าไอเออีรวม ค่าการตอบสนองสูงสุดของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม ประสิทธิภาพความร้อน โดยข้อจำกัดของการควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

Mooksuwan และ Kumar (2000) : ศึกษาปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของไอโซโพรพานอล โดยใช้ Ru-Pt/C 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 75-80 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 400 มิลลิกรัม ไอโซโพรพานอล 300 มิลลิลิตรจะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะทำให้อัตราเร็วลดลง อัตราเร็วของปฏิกิริยาตกลงเมื่อปริมาณอะซิโตนในสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะซิโตนถูกดูดกลืนได้ดีบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ความว่างไว และค่าการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยาตกลง การเพิ่มอัตราการไหลของไนโตรเจนภายในเตาปฏิกรณ์จะช่วยให้เกิดการผสมที่ดี อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การดูดกลืนของอะซิโตนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาตกลง ช่วยเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา

Gastauer และ คณะ (1995) : ศึกษาอิทธิพลของภาวะการทำงานที่มีต่อป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน และชนิดไซโคลเฮกเซน/เบนซีน/ไฮโดรเจน โดยพิจารณาสมรรถนะของระบบจากอัตราส่วนความร้อน และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ จากการจำลองสภาวะการดำเนินงานโดยโปรแกรม AspenPlus พบว่าสำหรับ ป้อนความร้อนชนิดพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน เมื่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ขุดห่อและค่าการเปลี่ยนของเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อนมีค่าสูงจะส่งผลให้ป้อนความร้อนพลังงานเคมีมีสมรรถนะสูง สำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันในวัฏภาคแก๊สการเปลี่ยนจะถูกจำกัดด้วยสมดุลเคมี ซึ่งถ้าปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันในวัฏภาคของเหลวจะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนของเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนจะถูกแยกออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (reaction zone) เป็นการปรับปรุงสมรรถนะของป้อนความร้อนชนิดพลังงานเคมีได้ดียิ่งขึ้นแต่ในขณะเดียวกันอัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันในวัฏภาคของเหลวจะลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นของอะซิโตนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งควบคุมความดันลดให้มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดผนังสอง ด้าน (Double-Sided Wall Type Reactor) สำหรับการนำระบบไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน และระบบไซโคลเฮกเซน/เบนซีน/ไฮโดรเจน มารวมกัน ทำให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิของความร้อนจาก 80 องศาเซลเซียส จนถึง 350 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราส่วนความร้อน 16.6 เปอร์เซ็นต์ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ 2.5

Kim และคณะ (1992) : ศึกษาป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน ปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของไอโซโพรพานอลเกิดในวัฏภาคของเหลวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Raney Nickel เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของอะซิโตนเกิดในวัฏภาคแก๊สที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้ Raney Nickel เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันมีค่าเป็นบวกทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกผลิตภัณฑ์อันประกอบด้วยอะซิโตนและไฮโดรเจนออกอย่างต่อเนื่อง เนื่องจาก Reaction Medium จากการทดลองพบว่าสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยา

ไฮโดรจีเนชัน คือ $V = 0.1C_p / (1 + 0.7C_A) V$ คือ อัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน โดยความเข้มข้นของอะซิโตนเป็นตัวควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยา อัตราการเปลี่ยนของอะซิโตนลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา จะทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับส่งผลให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาต่อน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาตกลงอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนสูงสุดของอะซิโตนเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนและอะซิโตนของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันเป็น 4 นอกจากนี้ยังทำการจำลองสถานะการณ์เพื่อประมาณประสิทธิภาพความร้อน โดยพบว่าประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันและดีไฮโดรจีเนชัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์ และ วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน และศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน โดยในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มีความจำเป็นต่อการทำงานของ หน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน และขั้นตอนในการวิจัย ดังนี้

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

หน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่แตกต่างกันซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วน ดังนี้

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน สร้างขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316 (Stainless Steel Type 316) โดยเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.08 เซนติเมตร และมีความสูง 30 เซนติเมตร มีปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยมีการติดตั้งตะแกรงที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาไว้บริเวณส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งไอโซโพรพานอลจะเข้าสู่ทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยเครื่องสูบลม (Peristaltic Pump) และ แก๊สผลิตภัณฑ์จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน ดังรูปที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์อุณหภูมิความร้อน

3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบเบดนิ่ง สร้างขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316 โดยเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 เซนติเมตร และมีความสูง 40 เซนติเมตร มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยมีการติดตั้งตะแกรงที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาไว้บริเวณส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งแก๊สจะเข้าสู่ทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และผลิตภัณฑ์แก๊สจะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน

3.1.3 คอลัมน์หอกกลั่น สร้างขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316 โดยคอลัมน์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8.75 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ภายในคอลัมน์บรรจุแพคกิง (packing) ชนิด raschig ring ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 มิลลิเมตร ยาว 1 เซนติเมตร ซึ่งเทียบเท่ากับหอกกลั่น 14 ชั้น ในส่วนหม้อต้มซ้ำ (reboiler) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 13.75 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 คอลัมน์หอกกลั่น และแพคกิง (packing)

3.1.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อคู่ (Double Pipe Heat Exchanger) สร้างขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316 โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก 2 ชั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในชั้นนอก 5 เซนติเมตร และขนาดเส้นศูนย์กลางภายในชั้นใน 1 เซนติเมตร มีความยาว 55 เซนติเมตร มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 0.25 ตารางเมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.1.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิ จะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ แก่สิ่งที่ต้องการควบคุมให้ได้ภาวะตามต้องการ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิชนิด K

3.1.6 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง (Tube Furnace) โดยเตาเผาให้ความร้อนจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิกงที่ตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ให้ได้ภาวะตามต้องการ โดยจะแปรค่าจากพลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานความร้อนให้แก่เครื่องปฏิกรณ์

3.1.7 เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) วัดอุณหภูมิชนิด K โดยเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ไม่เกิน 1300 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการทำงานของความต่างของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ระหว่างขั้วทั้ง 2 เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิมากก็จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ส่งมาจากเทอร์โมคัปเปิลจะเข้าเครื่องแสดงผลแสดงค่าอุณหภูมิออกมา

3.1.8 ชุดควบคุมอุณหภูมิในส่วนพรีฮีต (Preheat) ประกอบไปด้วย อ่างน้ำมัน (Oil Bath) สำหรับให้ความร้อนแก่สารเคมีที่อยู่ในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1 เซนติเมตร โดยที่มีตัวให้ความร้อนคือ เครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า ระบบจะถูกควบคุมอุณหภูมิโดยวัดอุณหภูมิของระบบผ่านเทอร์โมคัปเปิล แล้วส่งสัญญาณไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) และส่งสัญญาณกลับมาในรูปของการเปิดปิดเครื่องให้ความร้อน



รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิในส่วนพรีฮีต

3.1.9 เครื่องสูบสารเคมี (Peristaltic Pump) ยี่ห้อ Master Flex ทำหน้าที่สูบสารเคมีเข้าสู่ส่วนพรีฮีต โดยสามารถควบคุมอัตราการไหลโดยปริมาตรได้ตามต้องการ

3.1.10 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการป้อนของแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (Mass Flow Controller) ยี่ห้อ MKS รุ่น M 100B แก๊สที่ใช้ในการทดลองได้แก่ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน แก๊สทั้งหมดนี้บรรจุอยู่ในถังเก็บแก๊สรูปทรงกระบอกซึ่งในแต่ละถังจะมีการติดตั้งวาล์วปรับความดันเพื่อปรับความดันของแก๊สที่ออกจากถัง แก๊สที่ผ่านวาล์วปรับความดันจะไหลผ่านท่อแล้วจึงผ่านเครื่องวัดและควบคุมอัตราการป้อนแก๊สก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

3.1.11 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography; GC) เป็นเทคนิคในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier Gas) เป็น mobile phase เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโทแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

ในการศึกษานี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC 14 B โดยแก๊สโครมาโทกราฟีมีส่วนประกอบดังนี้

ก) แก๊สพา (Carrier Gas)

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอที่ Injector Port ให้เข้าสู่คอลัมน์ โดยจะต้องมีการควบคุมอัตราการไหลให้คงที่อยู่เสมอ แก๊สพาโดยทั่วไปมีสมบัติดังนี้ เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างมีความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปแก๊สที่นิยมใช้ คือ ไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน แต่ในการทดลองนี้ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพา

ข) คอลัมน์ (Column)

วัสดุที่ใช้ทำคอลัมน์มีหลายชนิด ในการทดลองนี้ใช้คอลัมน์บรรจุแบบ PEG 20 M เป็นตัวดูดซับสารต่าง ๆ ไว้ระหว่างภาชนะวิเคราะห์

ค) ดีเทคเตอร์ (Detector)

ดีเทคเตอร์ คือ ส่วนที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์ หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะสามารถให้สัญญาณกับสารต่าง ๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และอาจจะมีหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมของงานก็ได้ ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์ นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- a. ให้สภาพความไวสูง (High Sensitivity)
- b. มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- c. มี Dynamic Range ที่กว้าง

d. มีเสถียรภาพ (Stability)

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ ดีเทคเตอร์ ชนิด เฟลมไอออนในเซชันดีเทคเตอร์ (FID) ดีเทคเตอร์แบบ FID เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจสอบสารประกอบอินทรีย์ แก๊สไฮโดรเจนจะถูกจุดให้ติดไปด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า (Heater) ที่อยู่บริเวณใกล้ ๆ กับ Flame Jet ส่วนอากาศที่ผ่านเข้าป้อนจะทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ ช่วยเผาไหม้แก๊สไฮโดรเจน และช่วยพาแก๊สที่เผาไหม้ออกไป แก๊สพาและสารตัวอย่างที่ออกมาจากคอลัมน์จะเข้าสู่เปลวไฟ จะทำให้สารเหล่านั้นเกิดไอออนในเซชันได้เป็นอิเล็กตรอน และไอออนบวก อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยัง Flame Jet ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรด สัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังอิเล็กโทรมิเตอร์ และบันทึกสัญญาณด้วยเครื่องบันทึกได้เป็นโครมาโทแกรม

3.1.12 คอนเดนเซอร์ ใช้ทำหน้าที่ ควบแน่นสารจากสถานะแก๊สให้เปลี่ยนเป็นสถานะของเหลว

3.1.13 อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316 ขนาด 1/4 นิ้ว, เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก , ข้อต่อเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316 ขนาด 1/8, 1/4 และ 3/8 นิ้ว, วาล์วเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316 ขนาด 1/8, 1/4 นิ้ว, สายยางเทฟลอน, สายยางซิลิโคน และ ฉนวนกันความร้อน เป็นต้น

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมี	บริษัท
3.2.1 ไอโซโพรพานอล AR grade	BDH
3.2.2 อะซีโตน AR grade	BDH
3.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา เรนีนิกเกิล (Raney-Nickel)	Fluka
3.3.4 แก๊สไฮโดรเจน 99.999 %	PraxAir
3.3.5 แก๊สไนโตรเจน 99.999 %	PraxAir
3.3.6 แก๊สฮีเลียม 99.999 %	Linde
3.3.7 แอร์ ซีโร	PraxAir

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

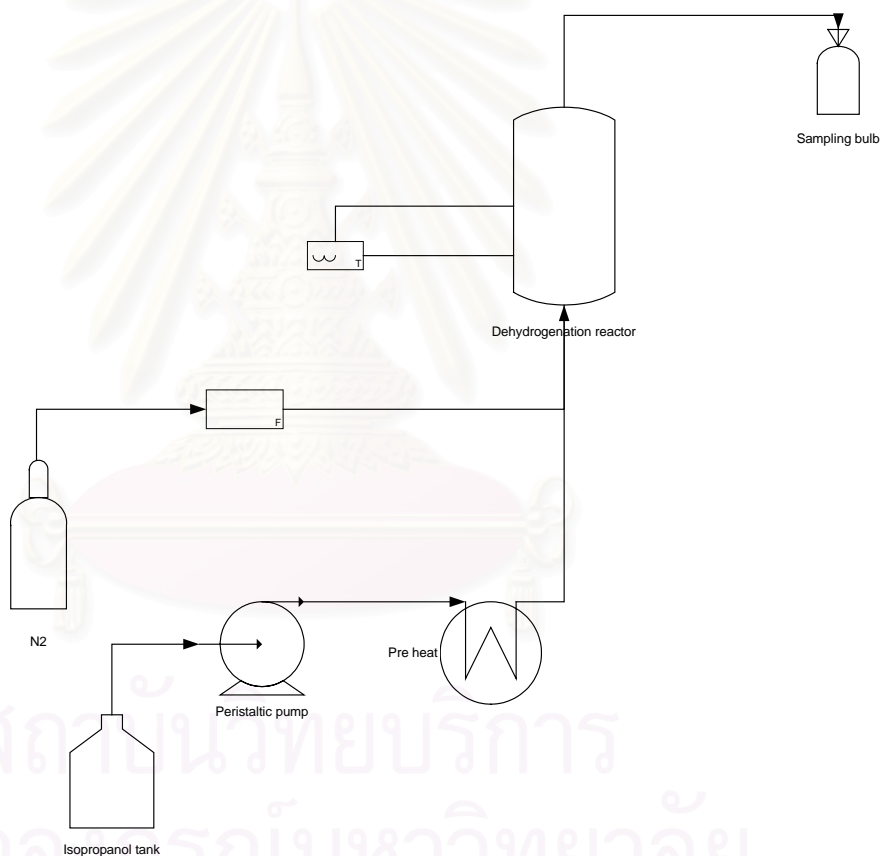
แก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu GC 14 B

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในส่วนของการออกแบบหน่วยสาธิตป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ได้ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

3.4.1 การทดลองในส่วนของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลซึ่งจะพิจารณาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน ได้แก่

- ค่าอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล
- ค่าอัตราการไหลของไนโตรเจน
- อุณหภูมิของปฏิกิริยา
- น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา



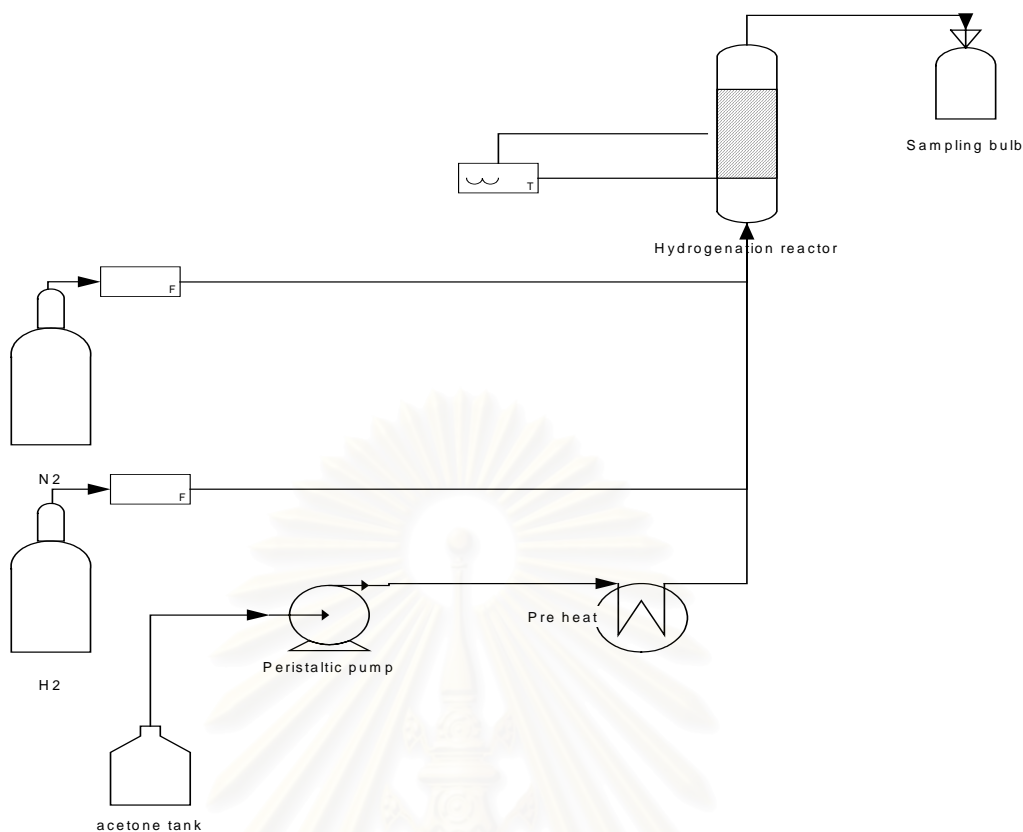
รูปที่ 3.6 แผนภาพกระบวนการ คีไฮโดรจีเนชัน

ผังรูปที่ 3.6 ซึ่งการดำเนินการทดลองมีดังนี้

1. บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาตามปริมาณที่กำหนดไว้ลงในเครื่องปฏิกรณ์แล้วจึงปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้แน่น
2. ให้ความร้อน โดยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้าพร้อมกับป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ตามสภาวะที่กำหนด เพื่อความปลอดภัยจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการจนเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady State)
3. เมื่อถึงสภาวะที่กำหนดจึงทำการป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามแต่ละกรณีที่ศึกษา โดยปรับอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล, อัตราการไหลของไนโตรเจน, อุณหภูมิของปฏิกิริยา, น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำการจับเวลาการทดลอง
4. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น จนกระทั่งผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าคงที่
5. หลังจากนั้นหยุดป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ แต่ยังคงปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ต่อจนกระทั่งเครื่องปฏิกรณ์เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง
6. ทำความสะอาดอุปกรณ์หลังเสร็จสิ้นการทดลอง

3.4.2. การทดลองในส่วนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน ซึ่งจะพิจารณาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน ได้แก่

- ค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง ไฮโดรเจนต่ออะซีโตน
- ค่าอัตราการไหลของไนโตรเจน
- น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา



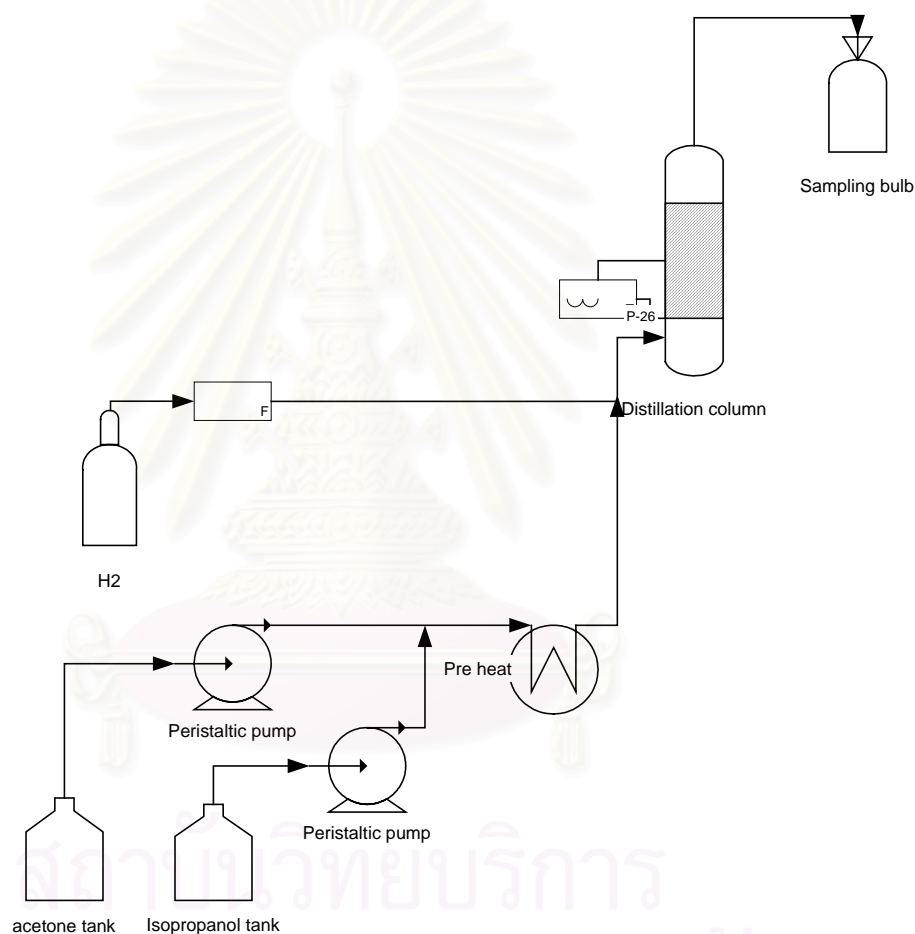
รูปที่ 3.7 แผนภาพกระบวนการ ไฮโดรจีเนชัน

ผังรูปที่ 3.7 ซึ่งการดำเนินการทดลองมีดังนี้

1. บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาตามปริมาณที่กำหนดไว้ลงในเครื่องปฏิกรณ์แล้วจึงปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้แน่น
2. ให้ความร้อนโดยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้าพร้อมกับป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ตามสภาวะที่กำหนด เพื่อความปลอดภัยจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการจนเข้าสู่สถานะคงตัว
3. เมื่อถึงสภาวะที่กำหนดจึงทำการป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามแต่ละกรณีที่ศึกษา โดยปรับอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่ออะซีโตน, อัตราการไหลของไนโตรเจน, น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำการจับเวลาการทดลอง
4. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น จนกระทั่งผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าคงที่
5. หลังจากนั้นหยุดป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ แต่ยังคงปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ต่อจนกระทั่งเครื่องปฏิกรณ์เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง
6. ทำความสะอาดอุปกรณ์หลังเสร็จสิ้นการทดลอง

3.4.3. การทดลองในส่วนของหอกลั่น โดยจะพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในส่วนยอดหอกลั่น และส่วนก้นหอกลั่น ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งการดำเนินการทดลองมีดังนี้

1. ให้ความร้อนโดยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้าแก่หอกลั่นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการจนเข้าสู่สถานะคงตัว
2. เมื่อถึงเวลาที่กำหนดจึงทำการป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่องค์ประกอบของสารผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน แล้วทำการจับเวลาการทดลอง
3. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น จนกระทั่งผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าคงที่



รูปที่ 3.8 แผนภาพกระบวนการกลั่น

3.4.4. การทดลองหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ซึ่งดำเนินการทดลองดังนี้

1. นำอุปกรณ์ในส่วนที่ทดลองในข้อ 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 รวมถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องสูบลมสารเคมี และเครื่องควบแน่น มาประกอบเข้าด้วยกัน เป็นหน่วยสาธิต
2. บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาตามปริมาณที่กำหนดไว้ลงในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแล้วจึงปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้แน่น
3. จากนั้นทำการให้ความร้อนโดยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า พร้อมกับป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ตามภาวะที่กำหนด เพื่อความปลอดภัยจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการจนเข้าสู่สถานะคงตัวแก่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนและหอกลับจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการจนเข้าสู่สถานะคงตัว
4. เมื่อถึงภาวะที่กำหนดจึงทำการป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามแต่ละกรณีที่ศึกษา แล้วทำการจับเวลาการทดลอง
5. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น ได้แก่ ที่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน, ที่ยอดหอกลับ, ที่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนจนกระทั่งผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าคงที่
6. หลังจากนั้นหยุดป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ แต่ยังคงปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ต่อจนกระทั่งเครื่องปฏิกรณ์เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง
7. ทำความสะอาดอุปกรณ์หลังเสร็จสิ้นการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการทำงานของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโทปพรานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อ ประสิทธิภาพการทำงาน ของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของกระบวนการ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของสารตั้งต้น, อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน, อุณหภูมิการทำงานของปฏิกิริยา และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาการทำงานของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโทปพรานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ส่วนดังนี้

- ผลของตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน
- ผลของตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน
- ผลของอุณหภูมิต่อการทำงานของหอกกลับ
- ผลจากการนำหน่วยปฏิบัติการต่าง ๆ มาประกอบเป็นหน่วยสาธิตปั๊มความร้อน
- ค่าประสิทธิภาพของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

4.1 ผลของตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโทปพรานอล

4.1.1 การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล (2^k factorial design)

ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโทปพรานอล เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อน ขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ หลายตัวแปร ที่มีผลกระทบต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน เช่น อัตราการไหลของไอโซโทปพรานอล, อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน, อุณหภูมิของปฏิกิริยา และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม และผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดดังกล่าว โดยทำการออกแบบการทดลอง (Experimental Design) โดยเลือกตัวแปรที่นำมาทำการออกแบบการทดลอง 4 ตัวแปรด้วยกันคือ อัตราการไหลของไอโซโทปพรานอล, อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน, อุณหภูมิของปฏิกิริยา และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อกำหนดภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมี การออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล เพื่อหาอัตราการไหลของไอโซโทปพรานอล, อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน, อุณหภูมิของปฏิกิริยา และน้ำหนัก

ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอลสูงที่สุด และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงกระบวนการต่อไป

โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล เป็นการออกแบบการทดลองที่ต้องการศึกษาผลของตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อค่าการตอบสนองของข้อมูล ซึ่งในการทดลองนี้ค่าการตอบสนองของข้อมูล คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอล โดยกำหนดค่าตัวแปรดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล

ตัวแปร	ระดับของตัวแปร	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล (A) (ml/min)	20	40
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (B) (ml/min)	0	50
อุณหภูมิของปฏิกิริยา (C) ($^{\circ}\text{C}$)	90	120
น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (D) (g)	5	10

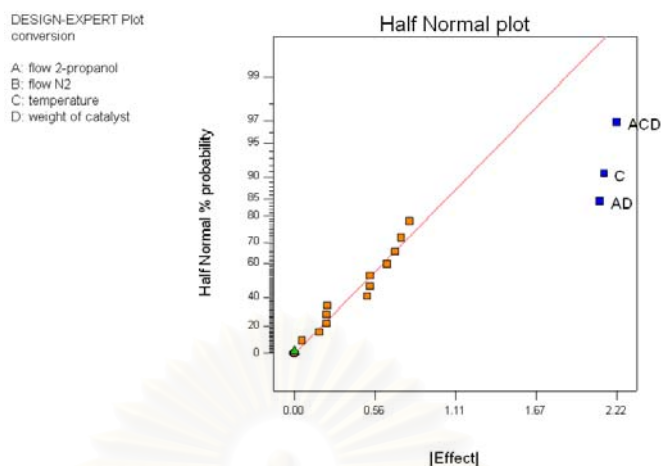
จากการออกแบบการทดลอง 2^4 แฟกทอเรียลต้องทำการทดลอง 16 การทดลอง นอกจากนี้ได้ทำการทดลองที่ค่ากลาง (0) ของตัวแปร (A = 30 มิลลิเมตรต่อนาที, B = 25 มิลลิเมตรต่อนาที, C = 105 องศาเซลเซียส และ D = 7.5 กรัม) เพื่อยืนยันสมมติฐานที่กำหนดว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรกับผลการทดลองมีความเป็นเชิงเส้นระหว่างช่วงระดับต่ำสุดและสูงสุดที่ทำการทดลอง ทำให้ต้องทำการทดลองทั้งหมดเป็น 18 การทดลอง ดังตารางที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าผลตอบของการทดลองปฏิบัติการดีไฮโดรจีเนชัน

ลำดับที่	ลำดับการทดลอง	การทดลอง	A	B	C	D	ค่า % การเปลี่ยน
1	13	[1]	-1	-1	-1	-1	2.13
2	1	a	1	-1	-1	-1	2.31
3	6	b	-1	1	-1	-1	3.74
4	10	ab	1	1	-1	-1	2.67
5	2	c	-1	-1	1	-1	7.89
6	14	ac	1	-1	1	-1	2.7
7	12	bc	-1	1	1	-1	4.78
8	3	abc	1	1	1	-1	3.41
9	5	d	-1	-1	-1	1	2.55
10	11	ad	1	-1	-1	1	3.08
11	4	bd	-1	1	-1	1	4.16
12	16	abd	1	1	-1	1	2.27
13	15	cd	-1	-1	1	1	4.26
14	9	acd	1	-1	1	1	7.66
15	7	bcd	-1	1	1	1	3.25
16	8	abcd	1	1	1	1	8.32
17	17	ศูนย์กลาง	0	0	0	0	3.08
18	18	ศูนย์กลาง	0	0	0	0	3.29

โดยทำการทดลองตามตารางที่ออกแบบไว้แล้ว นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรกับค่าตอบสนองของข้อมูล คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของสารตั้งต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยพิจารณาค่า F_0 ของแต่ละตัวแปรเทียบกับ F_0 ณ จุดวิกฤต ซึ่งเท่ากับ F_{α, U_1, U_2} โดยที่ α คือค่าความเชื่อมั่นที่พิจารณา U_1 คือ ค่าองศาอิสระของตัวแปร และ U_2 คือ ค่าองศาอิสระของความคลาดเคลื่อน ตัวแปรที่ศึกษาจะมีผลกระทบกับการทดลองเมื่อค่า $F_{(0)} > F_{\alpha, U_1, U_2}$ ในงานวิจัยนี้ กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีระดับนัยสำคัญ หรือ $\alpha = 0.05$ ซึ่งหมายความว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 รูปที่ 4.1 แสดงกราฟ normal probability plot ของผลกระทบจากตัวแปร และสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการตอบสนอง ได้แก่ ตัวแปร C และสหสัมพันธ์ระหว่าง AD และ ACD ซึ่งตัวแปรเหล่านี้สร้างความเบี่ยงเบนอย่างมีนัยสำคัญในการทดลอง



รูปที่ 4.1 normal probability plot กับค่า effect estimate

ตารางที่ 4.3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรสำหรับ ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล (ANOVA Table)

Source of Variance	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F0	Prob > F	
C	18.254	1	18.254	22.597	0.0005	Significant
AD	17.703	1	17.703	21.915	0.0005	Significant
ACD	19.736	1	19.736	24.431	0.0003	Significant
ABD	2.536	1	2.536	3.139	0.1018	
Quadratic	0.992	1	0.992	1.228	0.2896	Not Significant
Error	9.634	12	0.808	28.698	0.0213	
Lack of fit	9.672	11	0.879	39.875	0.123	Not Significant
Pure Error	0.022	1	0.022			
Cor Total	68.91	17				

จากตารางค่าวิกฤต ($F_{critical} = F_{0.05,1,12}$) เท่ากับ 4.75 พบว่าตัวแปร C, AD และ สหสัมพันธ์ ACD มีค่ามากกว่า 4.75 แสดงว่าตัวแปรทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์การ

เปลี่ยนของไอโซโพรพานอล และค่าที่จุดศูนย์กลางไม่แสดงความผิดปกติแต่อย่างใด ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า อุณหภูมิของปฏิกิริยา (C) สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตของไอโซโพรพานอลกับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (AD) และสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตของไอโซโพรพานอล, อุณหภูมิของปฏิกิริยา, น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (ACD) มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอลอย่างมีนัยสำคัญ จากผลที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ ANOVA นำมาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ต่อไป

4.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ของปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล

ในการออกแบบ 2^4 แฟกทอเรียล เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ผลจึงนำผลที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองมาจัดในรูปของแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\hat{y}_{Dh} = \beta_0 + \beta_C C + \beta_{ACD} ACD + \beta_{AD} AD + \beta_{ABD} ABD \quad (4.1)$$

ซึ่งแสดงได้สมการที่ 4.2

$$\hat{y}_{Dh} = 3.864 + 1.08C + 1.094ACD + 1.035AD - 0.415ABD \quad (4.2)$$

โดย \hat{y}_{Dh} คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชัน

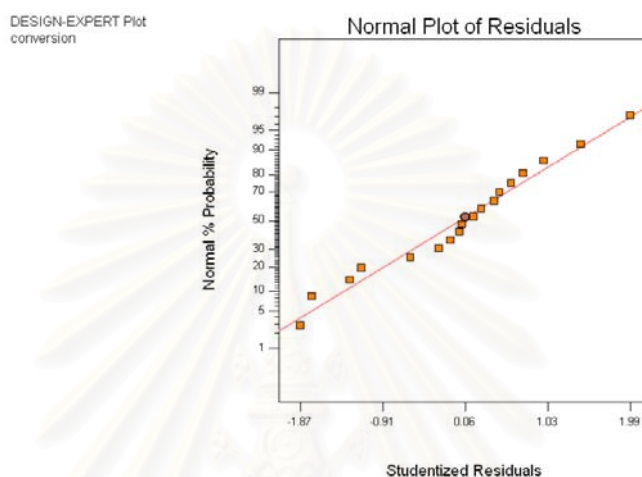
β_0 คือ ค่าของผลตอบสนองเนื่องจากตัวแปรที่ไม่ได้ทำการทดลองซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลองซึ่งคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

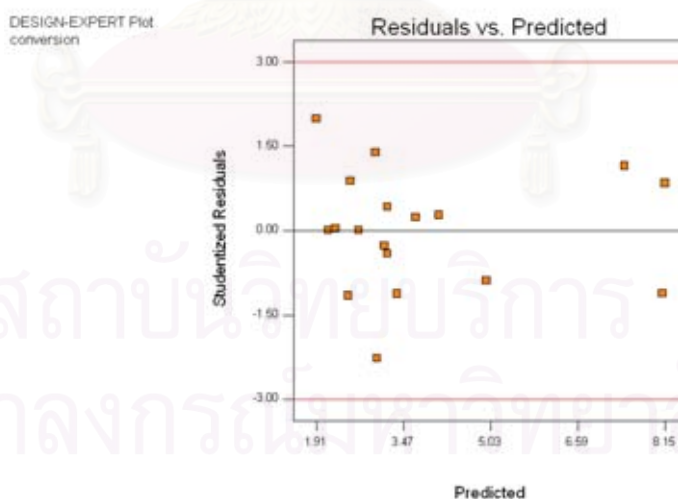
ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นพจน์ไร้หน่วย เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง (residual) จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีพจน์ C, AD และ ACD พบว่าค่าส่วนตกค้างยังมีข้อมูลที่สำคัญเหลืออยู่ หรืออีกนัยหนึ่งคือ แบบจำลองที่ได้ยังไม่สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม จึงได้ทำการเพิ่มพจน์ ABD เข้ามาเนื่องจากผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเห็นได้ว่าพจน์ ABD มีค่าความแปรปรวนใกล้ค่า Fวิกฤตที่ 4.75 มากที่สุด นำผล

จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้อบรมพจน์ ABD มาเขียนกราฟเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนโดยแสดงในรูป 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการแจกแจงค่าส่วนตกค้างซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของการกระจายตัวแบบปกติ และข้อมูลไม่ได้แสดงความไม่เป็นปกติแต่อย่างใด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติและไม่ขึ้นต่อกัน และความแปรปรวนเป็นแบบสุ่ม

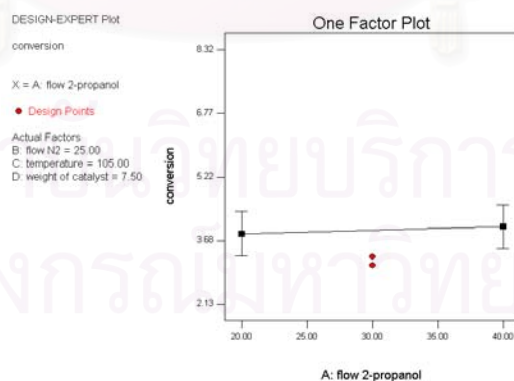


รูปที่ 4.2 normal probability plot ของค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอล

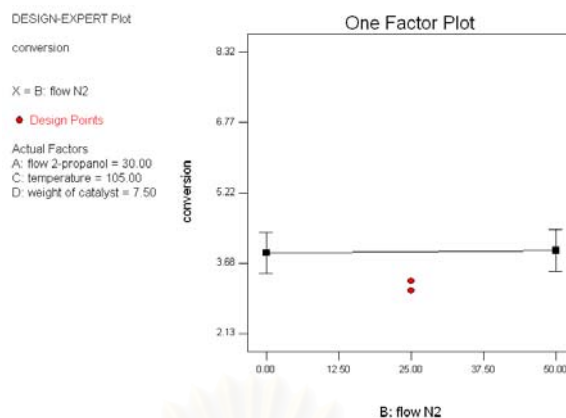


รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองที่มาจากค่าการคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง การกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนในรูปที่ 4.3 ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นแสดงว่าความแปรปรวนของข้อมูลเป็นความแปรปรวนแบบสุ่มโดยแท้จริง สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ ตัวแปรที่มีบทบาทต่อค่า

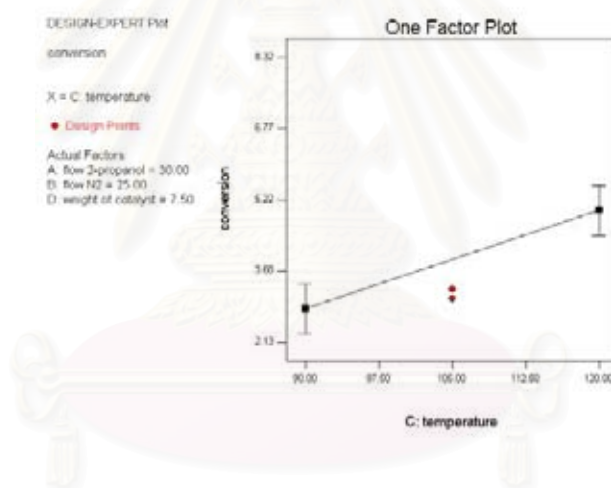
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอล คือ อุณหภูมิของปฏิกิริยา (C) สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโพรพานอลกับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (AD), สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล, อุณหภูมิของปฏิกิริยา, น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (ACD) และสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน, น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (ABD) จากสมการที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อต้องการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอลควรเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยา และชุดของสหสัมพันธ์ของตัวแปรมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งกราฟค่าผลหลักเฉลี่ยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหลักดังรูปที่ 4.4-4.7 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความชันของเส้นกราฟของผลหลักสำหรับแต่ละตัวแปรมีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายความว่า ถ้าต้องการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอลจำเป็นต้องเพิ่มค่าตัวแปรหลักทุกตัว โดยตัวแปรอุณหภูมิก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด รองลงมาคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนมีผลไม่มากนัก และเนื่องจากจุดประสงค์ของการทดลองคือ ต้องการให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอลสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยการเพิ่มค่าตัวแปรหลักอันได้แก่ อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็น 2 เท่าของค่าเดิม โดยให้อุณหภูมิคงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิของเสียความร้อนอุณหภูมิต่ำ (waste heat) ส่วนใหญ่ถูกปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมสู่สิ่งแวดล้อมจากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอลเท่ากับ 9.05 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนที่ได้มีค่าเข้าใกล้ค่าสมมูลการเปลี่ยนมีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ (วราพร, 2002) ที่ภาวะนี้



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล
ในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

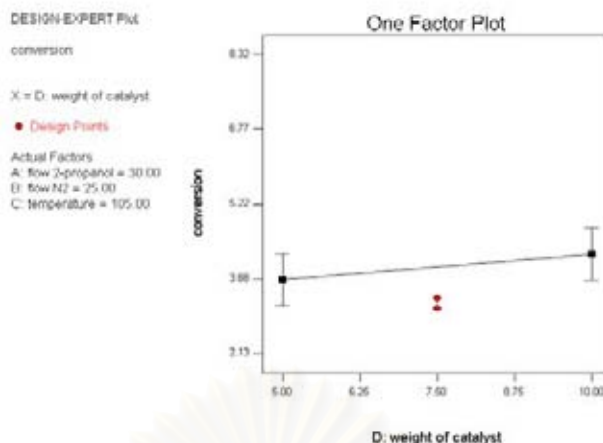


รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
 ในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอุณหภูมิของปฏิกิริยา
 ในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

สถาบันวิจัยการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา
ในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

4.2 ผลของตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน

4.2.1 การออกแบบการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม และผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ หลายตัว อันได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและอะซีโตน, อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน, และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนในหน่วยสาธิตเพิ่มความร้อนพลังงานเคมีโดยทำการออกแบบการทดลองเป็นการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนองชนิดการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนสูงที่สุด และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงกระบวนการต่อไป

ดังนั้นในการออกแบบการทดลองจะเป็นแบบ 2^3 แฟกทอเรียล และส่วนประสมกลางอีก 9 การทดลอง โดยกำหนดค่าตัวแปร ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน

ตัวแปร	ระดับของตัวแปร	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแก๊สไฮโดรเจน กับอะซีโตน (A)	1.39	2.85
อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (B) (ml/min)	20	40
น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (C) (g)	15	30

โดยทำการทดลองตามตารางที่ 4.5 แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร จากตารางที่ 4.5 แสดงถึงค่าตอบสนองของข้อมูล คือค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตน สำหรับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าผลตอบสนองของการทดลองปฏิบัติการไฮโดรจีเนชัน

ลำดับที่	ลำดับการทดลอง	การทดลอง	A	B	C	ค่า % การเปลี่ยน
1	6	[1]	-1	-1	-1	6.27
2	7	a	1	-1	-1	11.05
3	9	b	-1	1	-1	5.78
4	15	c	-1	-1	1	11.51
5	12	ab	1	1	-1	6.48
6	1	ac	1	-1	1	13.02
7	3	bc	-1	1	1	6.82
8	17	abc	1	1	1	10.39
9	5	แนวแกน	1.68	0	0	11.23
10	14	แนวแกน	0	1.68	0	7.19
11	4	แนวแกน	0	0	1.68	10.16
12	13	แนวแกน	-1.68	0	0	6.64
13	10	แนวแกน	0	-1.68	0	12.45
14	2	แนวแกน	0	0	-1.68	7.78
15	8	ศูนย์กลาง	0	0	0	9.19
16	11	ศูนย์กลาง	0	0	0	9.7
17	16	ศูนย์กลาง	0	0	0	10.31

ตารางที่ 4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรสำหรับ ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันของ อะซีโตน (ANOVA Table)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	76.585	3	25.528	29.600	< 0.0001	Significant
A	24.466	1	24.466	28.369	0.0001	Significant
B	32.990	1	32.990	38.252	< 0.0001	Significant
C	19.128	1	19.128	22.179	0.0004	Significant
Error	11.211	13	0.862			
Lack of Fit	10.582	11	0.962	3.059	0.2720	Not Significant
Pure Error	0.628	2	0.314			
Cor Total	87.797	16				

การทดลองมีค่าวิกฤต ($F_{critical} = F_{0.05,1,13}$) เท่ากับ 4.67 จากตารางพบว่าตัวแปร A, B และ C มีค่ามากกว่า 4.67 แสดงว่าตัวแปรหลักทั้ง 3 ตัวสร้างผลกระทบต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนอย่างมีนัยสำคัญ และค่าที่จุดศูนย์กลางไม่แสดงความผิดปกติแต่อย่างใด แสดงว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและอะซีโตน (A), อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (B) และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกริยา (C) มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอลอย่างมีนัยสำคัญ ผลที่ได้จากตาราง ANOVA จะนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ต่อไป

4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ของปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน

ผลจากการออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถนำไปใช้ในการประมาณการการเปลี่ยนแปลงของอะซีโตนได้ เมื่อภาวะของตัวแปรต่าง ๆ เปลี่ยนไปโดยนำมาเขียนในรูปแบบจำลองคณิตศาสตร์ จากผลสรุปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังนี้

$$\hat{y}_h = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C \quad (4.3)$$

และเมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์จะได้สมการที่ 4.4

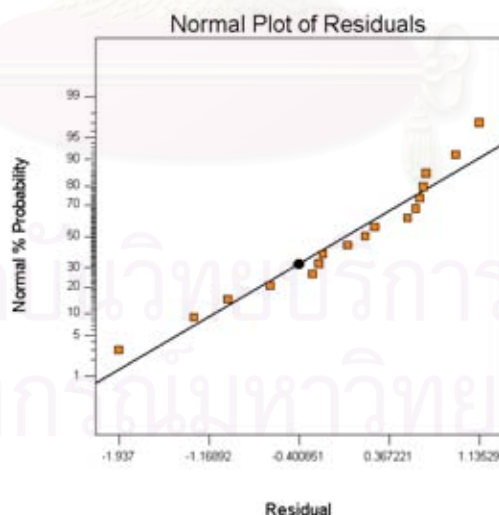
$$\hat{y}_h = 9.17 + 1.34A - 1.55B + 1.18C \quad (4.4)$$

โดย \hat{y}_h คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

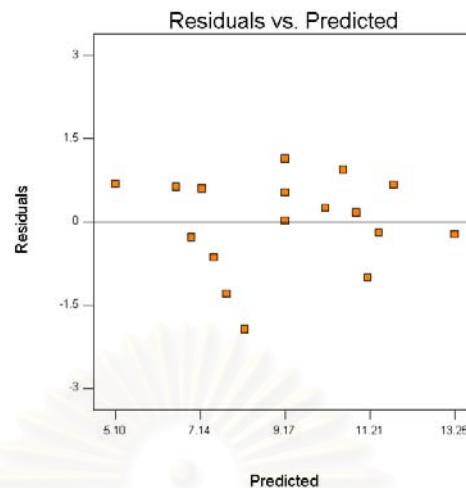
β_0 คือ ค่าของผลตอบสนองเนื่องจากตัวแปรที่ไม่ได้ทำการทดลองซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลองซึ่งคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นพจน์ไร้หน่วย แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้นำไปวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน โดยการเขียนกราฟศึกษาการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อน และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนที่ระดับการตอบสนองขึ้นต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการแจกแจงมีความเป็นเชิงเส้น และไม่ได้แสดงความไม่เป็นปกติแต่อย่างใด จึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากผลต่างของแบบจำลองกับผลจากการทดลองมีการกระจายตัวแบบอิสระ และความแปรปรวนเป็นแบบสุ่ม



รูปที่ 4.8 normal probability plot ของค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอะซีโตน

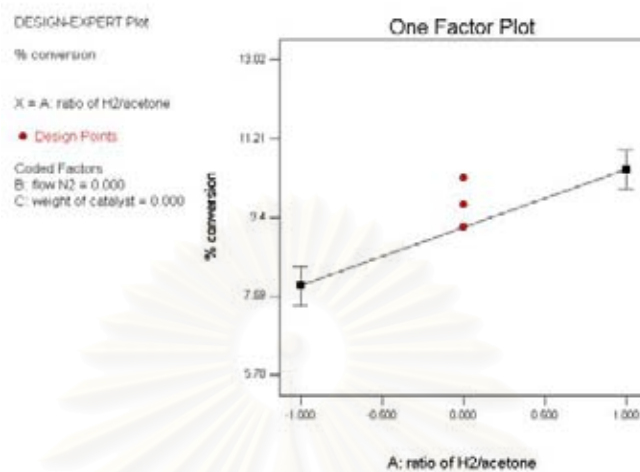


รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองที่มาจากกรคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

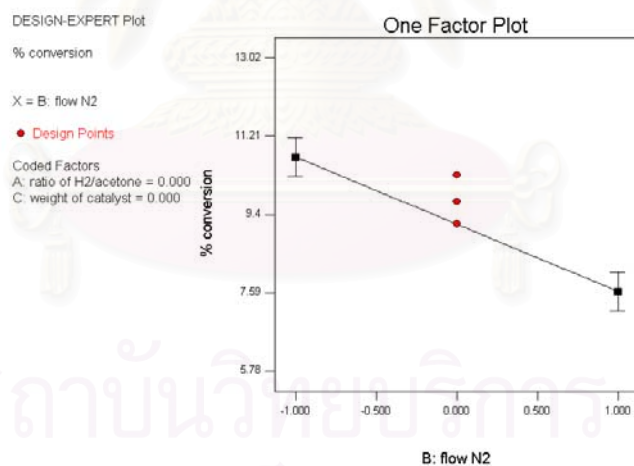
จากการกระจายตัวในรูปที่ 4.9 เป็นแบบไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นแสดงว่าความแปรปรวนของข้อมูลเป็นความแปรปรวนแบบสุ่มโดยแท้จริง จึงสามารถสรุปว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ ตัวแปรที่มีบทบาทต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตน คือ ค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและอะซีโตน (A), อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (B) และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (C) และสามารถสรุปได้ว่า เมื่อต้องการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตน ควรเพิ่มค่าอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและอะซีโตน (A) เพิ่มน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (C) และลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (B)

กราฟค่าผลหลักเฉลี่ยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหลักในรูปที่ 4.10-4.12 แสดงว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและอะซีโตนเป็นการเพิ่มสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ซึ่งสามารถหลักสมดุลเคลื่อนหน้าทำให้ได้ไอโซโพรพานอลมากขึ้น ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วยส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนเพิ่มขึ้น และเมื่อลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนจะช่วยพาแก๊สไฮโดรเจนที่ดูดซับอยู่บนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้หลุดออกได้เร็วขึ้น ทำให้แก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาน้อยลง (Hagen, 2000) จึงทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนน้อยลง รูปที่ 4.13 เป็นการเขียนค่าพื้นที่ผิวผลตอบสนองของการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าพื้นที่ผิวผลตอบสนองของการทดลองให้ผลเหมือนกับกราฟการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหลัก คือ เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนและอะซีโตน และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยลดอัตราการ

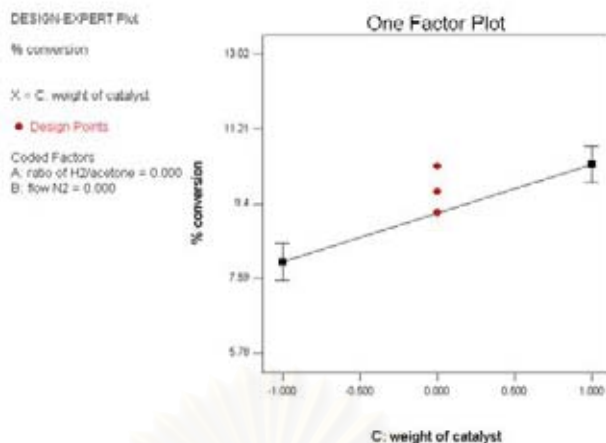
ไหลของแก๊สไนโตรเจน จะทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนเพิ่มขึ้น



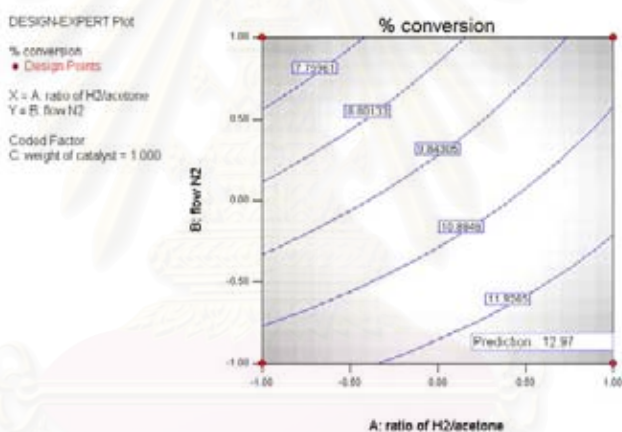
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างอะซีโตน และแก๊สไฮโดรเจน ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน



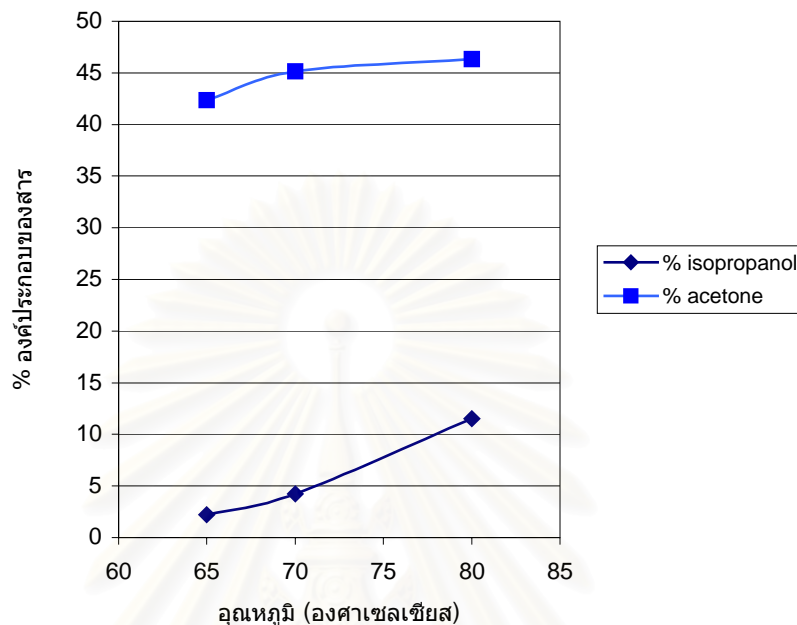
รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองต่อค่าผลหลักของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา
ในปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน



รูปที่ 4.13 พื้นที่ผิวตอบสนองของปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของอะซีโตน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

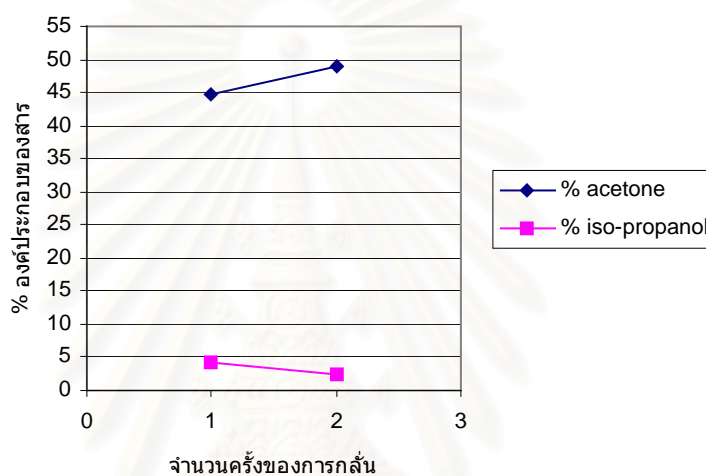
4.3 ผลของอุณหภูมิหม้อต้มซ้ำที่มีผลต่อองค์ประกอบของสารบนยอดหอกลิ้น (Distillation Column)



รูปที่ 4.14 กราฟผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบในส่วนของยอดหอกลิ้น

รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสในหม้อต้มซ้ำ องค์ประกอบในส่วนของยอดหอกลิ้นของไอโซโพรพานอลมีค่าเท่ากับ 2.21 เปอร์เซ็นต์, อะซีโตน 42.34 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ 70 องศาเซลเซียส จะมีไอโซโพรพานอล 4.22 เปอร์เซ็นต์ และอะซีโตน 45.14 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออุณหภูมิของหม้อต้มซ้ำเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส มีไอโซโพรพานอล 6.35 เปอร์เซ็นต์, อะซีโตน 46.33 เปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวแสดงว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นองค์ประกอบของทั้งไอโซโพรพานอลและอะซีโตนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้สารเกิดการกลายเป็นไอน้ำมากขึ้นโดยจุดเดือดของอะซีโตนอยู่ที่ 56 องศาเซลเซียส และไอโซโพรพานอลที่ 83 องศาเซลเซียส ไอของสารเหล่านี้จะเคลื่อนตัวสู่ด้านบนของยอดหอกทำให้ได้องค์ประกอบของสารเพิ่มขึ้นตามลำดับ สำหรับในหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีต้องการให้องค์ประกอบยอดหอกมีเฉพาะอะซีโตนและไฮโดรเจน ส่วนองค์ประกอบกันหอกมีเฉพาะไอโซโพรพานอล เนื่องจากว่าผลผลิตทางยอดหอกจะถูกส่งไปเป็นสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันในเครื่องปฏิกรณ์ด้านคายความร้อน ส่วนด้านบนกันหอกไอโซโพรพานอลจะถูกป้อนกลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้านดูดความร้อนเพื่อใช้ในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ดังนั้นในการทำงานของหอกลิ้นควรเลือกการทำงาน โดยควบคุมอุณหภูมิในส่วนของหม้อต้มซ้ำให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของไอโซโพรพานอล คือ 83 องศา

เซลเซียส ซึ่งในการทดลองนั้นจะเลือกการทำงานในช่วง 70-75 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.15 แสดงถึงการกลั่นองค์ประกอบไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน โดยได้ทำการทดลองนำองค์ประกอบที่ได้จากการกลั่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสในครั้งแรกมาป้อนกลับเข้าสู่หอกลั่นอีกครั้งหนึ่ง เห็นได้ว่าเมื่อป้อนองค์ประกอบที่ได้จากครั้งแรกเข้าสู่หอกลั่นอีกครั้งหนึ่งค่าเปอร์เซ็นต์อะซีโตนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และได้เปอร์เซ็นต์ไอโซโพรพานอลลดลง ซึ่งหมายความว่าถ้าเพิ่มหอกลั่นให้สูงขึ้นหรือเพิ่มจำนวนหอกลั่นมากขึ้นจะได้เปอร์เซ็นต์ของอะซีโตนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่คุ้มในด้านของการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการดำเนินการ



รูปที่ 4.15 กราฟผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบในส่วนของยอดหอกลั่นในการกลั่น 2 ครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

4.4 หน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน

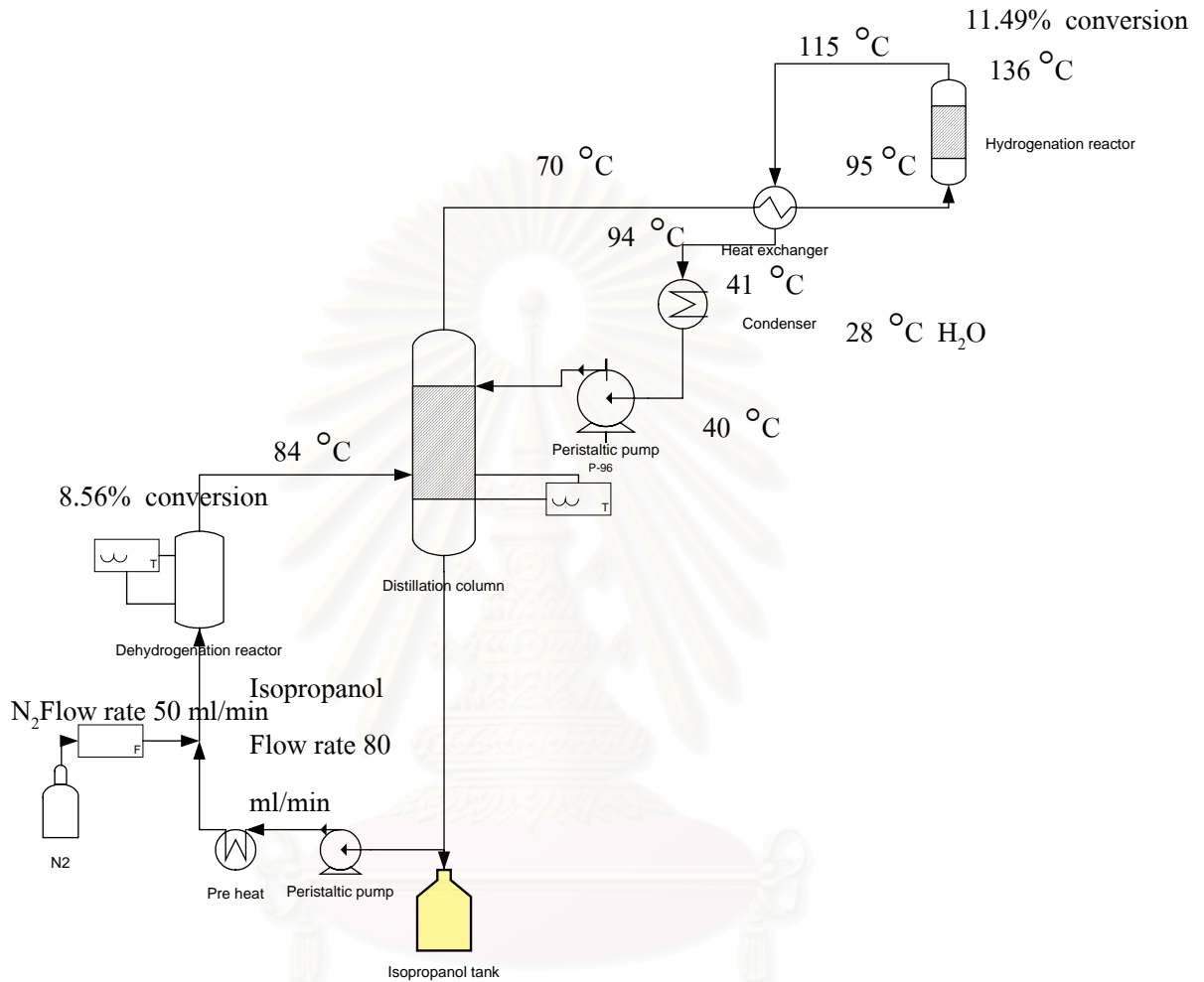
หน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน, หอกลั่น, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน จากการทดลองและทดสอบเพื่อหาสภาวะการดำเนินงานสำหรับหน่วยปฏิบัติการต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาในส่วนที่ 4.1-4.3 แล้วจึงนำหน่วยปฏิบัติการเหล่านี้มาต่อเชื่อมเข้าด้วยกันเป็นปั๊มความร้อนพลังงานเคมี โดยทำการทดลองตามภาวะดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.16 แสดงถึงการดำเนินการของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อน

ตารางที่ 4.7 ภาวะที่ใช้ในการทดลองหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน

อัตราการไหลไอโซโพรพานอล	80 มิลลิลิตรต่อนาที
อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน	50 มิลลิลิตรต่อนาที
อุณหภูมิของปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน	84 องศาเซลเซียส
น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน	40 กรัม
อุณหภูมิในส่วนของหม้อต้มซ้ำ	75 องศาเซลเซียส
น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	80 กรัม
ระยะเวลาทดลอง	120 นาที

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของกระบวนการในแต่ละสายของหน่วยสาธิตป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

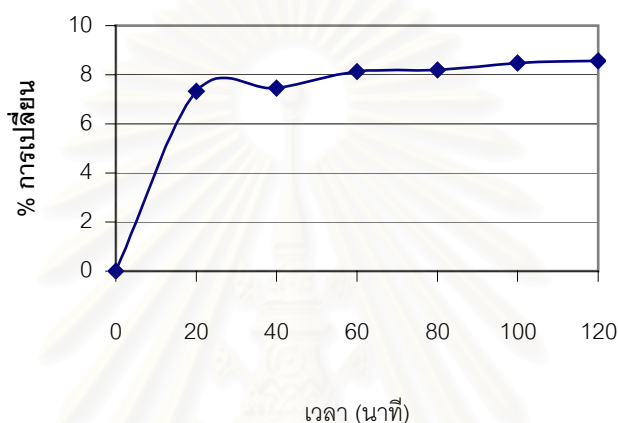
ตารางที่ 4.8 ภาวะการดำเนินการที่สถานะคงตัวของหน่วยสาขิตปี้มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน

อุปกรณ์	อุณหภูมิ (° C)	อัตราการไหล (mol/s)	อัตราการไหล ไอโซโพรพานอล (mol/s)	อัตราการไหล อะซีโตน (mol/s)	อัตราการไหล ไฮโดรเจน (mol/s)	พลังงานของอุปกรณ์ (kJ)
เครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน	84	0.0194	0.0165	0.0015	0.014	-
-ภาระความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์	-	-	-	-	-	5100
หอกลิ้น						
-กระแสนอกหอ	70	0.023	0.0011	0.0104	0.0116	-
-กระแสกันหอ	75	0.0065	0.0065	0	0	-
-ภาระความร้อนของหม้อต้มซ้ำ	-	-	-	-	-	6000
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน						902.19
-กระแสน้อน	70	0.023	0.00105	0.0104	0.0116	-
-กระแสน้อนเครื่องปฏิกรณ์	95	0.023	0.00105	0.0104	0.0116	-
คายความร้อน						
-กระแสนอกจากเครื่องปฏิกรณ์	115	0.021	0.0023	0.0092	0.0095	-
คายความร้อน						
-กระแสน้อนหอกลิ้น	94	0.021	0.0023	0.0092	0.0095	-

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

อุปกรณ์	อุณหภูมิ (° C)	อัตราการไหล (mol/s)	อัตราการไหล ไอโซโพรพานอล (mol/s)	อัตราการไหล อะซีโตน (mol/s)	อัตราการไหล ไฮโดรเจน (mol/s)	พลังงานของอุปกรณ์ (kJ)
เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	136	-	-	-	-	4245.70

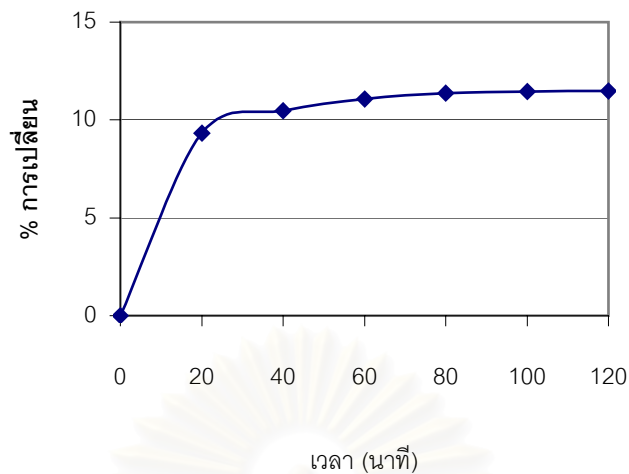
ผลการทดลองในตารางที่ 4.8 ถูกนำมาใช้คำนวณค่าประสิทธิภาพของกระบวนการและสัมประสิทธิ์สมรรถนะได้ ค่าเท่ากับ 0.38 และ 1.79 ตามลำดับ อุณหภูมิที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ด้านคายความร้อนเท่ากับ 136 องศาเซลเซียส ซึ่งยังเป็นอุณหภูมิไม่สูงมากนัก เนื่องจากการทดลองมีข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโครพานอลที่เวลาต่าง ๆ

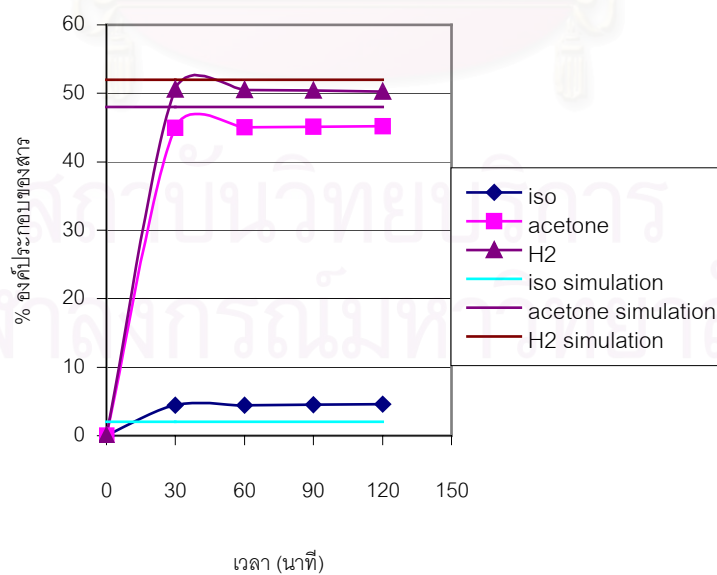
จากรูปที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโครพานอลที่เวลาต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโครพานอลจะเข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลาประมาณ 60 นาที โดยค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโครพานอลมีค่าเท่ากับ 8.56 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



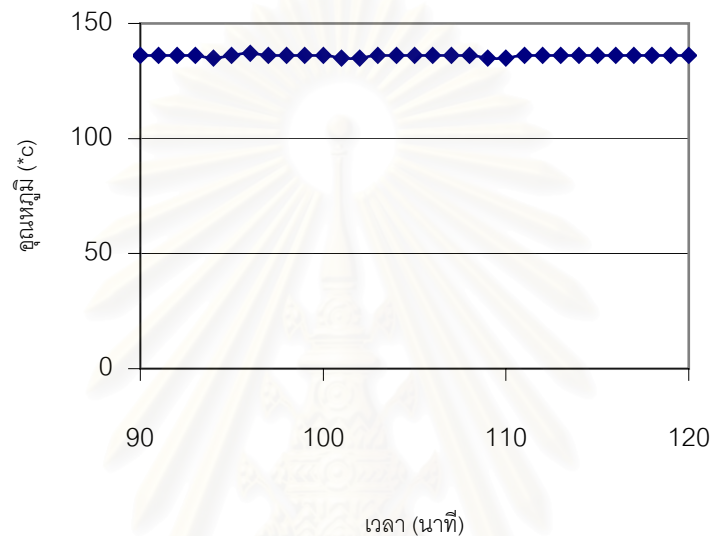
รูปที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาไฮโครจีนินชั้นของอะซีโตนที่เวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาไฮโครจีนินชั้นของอะซีโตนที่เวลาต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาไฮโครจีนินชั้นของอะซีโตนจะเข้าสู่สถานะคงตัวที่เวลาประมาณ 60 นาที เช่นเดียวกับปฏิกิริยาคีไฮโครจีนินชั้นของไอโซโพรพานอลโดยค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของอะซีโตนมีค่าเท่ากับ 11.49 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.19 ค่าเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบบนยอดหอกกลั่นที่เวลาต่าง ๆ

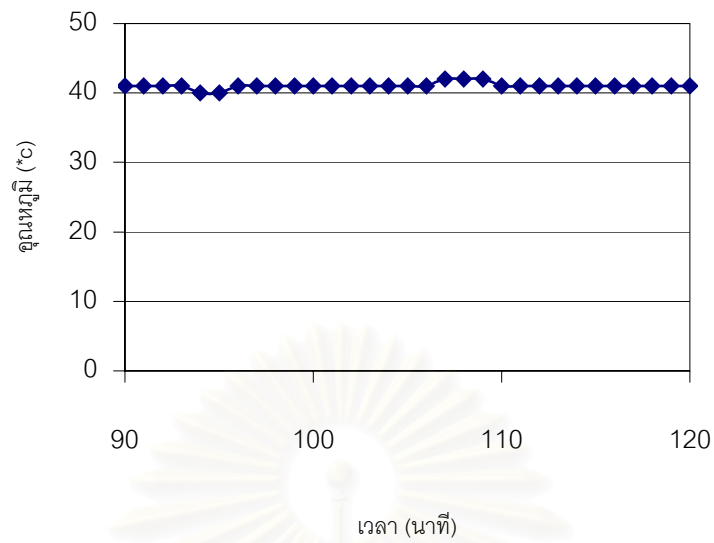
จากรูปที่ 4.19 ค่าเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบของ ไอโซโพรพานอล อะซีโตน และไฮโดรเจนที่ขุดหอกันที่เวลาต่าง ๆ จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าองค์ประกอบของสารจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 นาทีโดยประกอบด้วยไอโซโพรพานอล 4.56 % , อะซีโตน 45.21 % , ไฮโดรเจน 50.23 % และเมื่อเปรียบเทียบค่าจากการทดลองกับค่าจากการจำลองกระบวนการจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน (วราพร, 2002)



รูปที่ 4.20 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน

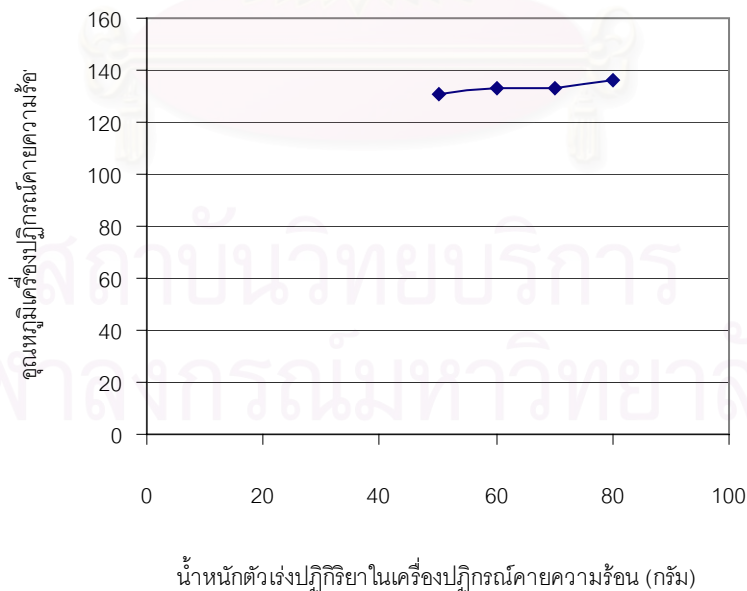
จากรูปที่ 4.20 อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนจากรูปจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาค่อนข้างมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกมาจากคอนเดนเซอร์

จากรูปที่ 4.21 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกมาจากคอนเดนเซอร์จากรูปจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาอ่อนข้างมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.22 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นตามลำดับที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา 80 กรัมได้อุณหภูมิของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 136 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่ได้จากปฏิกิริยายังมีค่าที่ไม่สูงนัก จากงานวิจัยพบว่าค่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยา ถ้าสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาให้มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่ป้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.9 ผลของการจำลองกระบวนการในงานวิจัยที่ผ่านมา Kim et.al.(1997)

อุปกรณ์	กระแส	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล(mol/s)			ค่าการ เปลี่ยน
			Acetone	2-Propanol	Hydrogen	
เครื่องปฏิกรณ์	สารตั้งต้น	184.6	39.8	3.6	43.4	22.4 %
คายความร้อน	ผลิตภัณฑ์	200.0	30.9	12.5	34.5	
เครื่องแลกเปลี่ยน	กระแสขาออก	75.0	30.9	12.5	34.5	
ความร้อน						
เครื่องปฏิกรณ์	สารตั้งต้น	80.3	3.6	103.5	0.0	8.6 %
ดูดความร้อน	ผลิตภัณฑ์	82.5	12.5	94.6	8.9	
หอกถั่น	ผลิตภัณฑ์ขยอดหอ	58.2	39.8	3.6	43.4	
	ผลิตภัณฑ์ก้นหอ	80.3	3.6	103.5	0.0	

จากตารางที่ 4.9 แสดงรายงานวิจัยโดย Kim และคณะถึงผลของการจำลองกระบวนการป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่รายงานมีความแตกต่างจากผลพหุสมการทั้งนี้การทดลอง เนื่องจากในการจำลองกระบวนการนั้นมีการตั้งสมมติฐานเป็นกระบวนการอุดมคติที่ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นในหน่วยต่าง ๆ ในกระบวนการ แต่ในการทดลองจริงนั้นมีอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการ เช่น การสูญเสียพลังงานในกระบวนการ, ความดันลด, ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น จึงทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองจริง กับค่าที่ได้จากการจำลองกระบวนการมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่ายังมีช่องทางอีกมากเพื่อทำการปรับปรุงหน่วยปฏิบัติการย่อยต่าง ๆ ในหน่วยสาธิตเพื่อให้ได้อุณหภูมิความร้อนที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิตามทฤษฎี

4.5 ประสิทธิภาพของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ ไฮโดรเจน

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนความร้อนจากความร้อนอุณหภูมิต่ำไปเป็นความร้อนอุณหภูมิสูง (heat utilization efficiency) และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการ จากข้อมูลที่น่าเสนอมาทั้งหมดเบื้องต้น ภาวะการณ์ดำเนินการของอุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกนำมาใช้ในการเดินหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ดังรูปที่ 4.16 โดยภาวะที่ทำการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

จากตารางที่ 4.10 แสดงถึงค่าพลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการของหน่วยสาธิตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน

ตารางที่ 4.10 พลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ
เวลาในการทดลอง 120 นาที
สำหรับพลังงานของอุปกรณ์
เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนคิดที่เวลาดำเนินการ 85 นาที
หม้อต้มซ้ำคิดที่เวลาดำเนินการ 100 นาที

อุปกรณ์	กำลังไฟฟ้า (kW)	พลังงานของ อุปกรณ์ (kJ)
เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	1	5100
หม้อต้มซ้ำ	1	6000
เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	0.589	4245.70
ปั๊มสุบภายในกระบวนการ	0.328	2361.60
ประสิทธิภาพการเปลี่ยน ความร้อน	0.29	0.38
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ	1.79	1.79
ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอจี	0.34	0.44

ในงานวิจัยนี้สามารถหาเอ็กซ์เซอจี (Exergy) ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในหน่วยสาริต ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน, หอกลั่น, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เอ็กซ์เซอจีของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในหน่วยสาริตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน

อุปกรณ์	สภาพย้อนกลับไม่ได้ของอุปกรณ์ (Irreversibility) %
เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	2.74
หอกลั่น	21.08
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	3.03
เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	8.23

จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ของหอกลั่นมีค่ามากที่สุด แสดงว่ามีการสูญเสียที่อุปกรณ์นี้มากที่สุด ดังนั้นควรทำการปรับปรุงหอกลั่น เพื่อลดสภาพย้อนกลับไม่ได้ของอุปกรณ์ และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของหน่วยสาริตปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลของตัวแปรต่าง ๆ

5.2.1 ปฏิริยาดีไฮโดรจีเนสของไอโซโพรพานอล

จากการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน, อุณหภูมิของปฏิริยา และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิริยา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเพิ่มขึ้น เพราะว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของสารตั้งต้นของปฏิริยาดีไฮโดรจีเนสของปฏิริยา
2. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเพิ่มขึ้น เพราะจะช่วยในการถ่ายโอนมวลสารของอะซีโตนให้หลุดจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิริยาได้ดียิ่งขึ้น
3. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิริยาขึ้น จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของไอโซโพรพานอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิริยาเป็นแบบดูดความร้อนซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิริยาจะทำให้ปฏิริยาเดินไปข้างหน้า มากขึ้น
4. น้ำหนักของตัวเร่งปฏิริยามีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน คือเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิริยา ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิริยาให้กับตัวเร่งปฏิริยาทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเพิ่มขึ้นด้วย

5.2.2 ปฏิริยาดีไฮโดรจีเนสของอะซีโตน

จากการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่ออะซีโตน, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิริยา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและอะซีโตนมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิริยาเมื่อเพิ่มอัตราส่วนป้อนจะทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนเพิ่มขึ้น
2. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนมีผลเป็นลบต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตน เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนจะช่วยพาแก๊สไฮโดรเจนหลุดออกจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิริยาได้เร็วขึ้น ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนมีค่าลดลง

3. น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน คือเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเพิ่มขึ้นด้วย

5.2 ประสิทธิภาพของหน่วยสาธิตป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน

จากการศึกษาประสิทธิภาพของหน่วยสาธิตป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของกระบวนการ, สัมประสิทธิ์สมรรถนะ ได้ 0.38 และ 1.79 ตามลำดับ และประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอจี เท่ากับ 0.44

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือทำการออกแบบในส่วนของเครื่องปฏิกรณ์แยกในส่วนเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กับวัฏภาคของเหลว และเครื่องปฏิกรณ์ใช้กับวัฏภาคแก๊สเพื่อป้องกันการดูดซับของอะซีโตนบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ควรติดเครื่องอัดไอเพื่อเพิ่มความดันของกระแสขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ซึ่งเมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบคือกระแสขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของอะซีโตนเพิ่มขึ้น และจะทำให้ได้ความร้อนที่ออกจากปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย
3. ในส่วนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนควรออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้เป็นลักษณะ shell และ tube โดยให้น้ำเป็นตัวรับความร้อนของปฏิกิริยา
4. ควรศึกษาถึงตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเพิ่มขึ้น
5. ควรทำการติด hour-meter เพื่อทำการวัดเวลาการทำงานของเครื่องให้ความร้อนเพื่อนำไปคำนวณค่าความร้อนที่ใส่เข้าไปให้ถูกต้องยิ่งขึ้น
6. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการป้อนความร้อนพลังงานเคมี

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัญจนา บุญเกียรติ. 2547. การคำนวณขั้นต้นในวิชาเคมีวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 7 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ. 2538. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วราพร กิติเกียรติโสภณ. 2545. ระบบควบคุมสำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโทรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Bolat,E., Karaca,F. and Kincay,O. 2002 . Economic analysis and comparison of chemical heat pump systems. Applied thermal engineering 22 : 1789-1799

Brodowicz, K., and Dyakowski, T. 1993. Heat Pumps. Great Britain: Butterworth-Heinemann.

Cengel, Y.A. 1998. Heat transfer: A practical approach. USA: Mcgraw-Hill,Inc.

Chung, Y.,Kim, J.B., Yeo, K.Y. and Keun, H. 1997. Optimal design of a chemical heat pump using the 2-propanol/acetone/hydrogen system. Energy. 22 no.5: 525-536.

Cunningham, Jr., Hickey, J.N., and Wang, Z. 1996. Activities and selectivities of copper/metal-oxide catalysts at temperature relevant to chemical heat pump based on [isopropanol/acetone interconversions. Int.J.Energy Res.22: 525-536.

Doi, T. and Tanaka, T. 1992. Fundamental study on solar chemical heat pump system :Basic experiment on dehydrogenation of 2-propanol. Proceedings of ASME/JSES International Solar Energy Conference 1992 : 285-290.

- Doi, T., Takashima, T., and Tanaka, T. 1995. Experimental study on solar chemical heat pump system : Dehydrogenation of 2-propanol and Rectification Process. Proceedings of ASME/JSES International Solar Energy Conference 1995 : 93-98.
- Doi, T., Ando, Y., Takashima, T., and Tanaka, T. 1997. Study on solar chemical heat pump system: Basic experiment on falling film reaction of 2-propanol dehydrogenation. Proceedings of the IECEC 3: 1883-1888.
- Fogler, H., S. 1992. Elements of chemical reaction engineering. 2nd ed. USA: Prentice-Hall International, Inc.
- Furmer, I., and Zaitsev. 1985. General Chemical Engineering. Moscow. Mir Publishers.
- Gandia, L.M., and Montes, M. 1992. Effect of the design variables on the energy performance and sizes parameters of a heat transformer based on the system acetone/hydrogen/2-propanol. Int.J.Energy Res. 16: 851-864.
- Gaspillo, D.P.A., Abella, C.L., and Goto, S. 1998. Dehydrogenation of 2-propanol in reactive distillation column for chemical heat pump. Journal of Chemical Engineering of Japan. 31 no.3: 440-444.
- Gasteur,P.,Kameyama,H.and Murata, K. 1995. Combination of the isopropanol/acetone/hydrogen cycle and the cyclohexane/benzene/hydrogen chemical heat pumps: Proposal and evaluation. International Symposium on Energy,Environment and Economics.
- Geankoplis, C.J. 1995. transport processes and unit operations. Singapore: Prentice-Hall International, Inc.
- Hagen, J. 2000. Industrial Catalyst. 1st ed. New York: Wiley-VCH.
- Kato, Y., Kameyama, H., and Saito, Y. 1986. Catalyst-assisted chemical heat pump with reaction couple of acetone hydrogenation 2-propanol dehydrogenation for upgrading low-level thermal energy:Proposal and Evaluation. Int.J.Energy Res. 11: 549-558.
- Kim, G.T., Yoo, K.Y., and Song, K.M. 1992.Chemical heat pump based on dehydrogenation and hydrogenation of 2-propanol and acetone. Int.J.Energy Res. 16: 897-916.
- Kim, B.J., Chung, Y., Yeo, Y.K., Song, H.K. 1997. Optimal design of a chemical heat pump using the 2-propanol/acetone/hydrogen system. Energy. 22: 525-536.
- Lenz, T.G., Hegedus, L.S., and Vaughan, J.D. 1982. Liquid phase thermochemical energy conversion systems-An application of diels-alder chemistry. Int.J.Energy Res. 6: 357-365.

- Luyben, W.L., and Wenzel, L.A., 1988. Chemical Process Analysis: Mass and Energy Balances. USA: Prentice-Hall International, Inc.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P. 1993. Unit operations of chemical engineering. 5th ed. Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- Montgomery, D.C. 2001. Design and analysis of experiments. 5th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Mooksuwan, W. 1999. Study on Analysis of a hydrogenation/dehydrogenation system to upgrade heat. Master's thesis. School of Environment, Resource and development AIT.
- Nay, M.O., 1998. A study on energy upgrading using a chemical heat pump. Master's thesis. School of Environment, Resource and development AIT.
- Neveu, P., and Casting, J. 1993. Solid-gas chemical heat pump: Field of application and performance of the internal heat of reaction recovery process. Heat Recovery Systems and CHP. 13 no.3: 233-251.
- Saito, Y., Yamashita, M., Ito, E., and Meng, N. 1994. Hydrogen production from 2-propanol as a key reaction for a chemical heat pump with reaction couple of 2-propanol dehydrogenation/acetone hydrogenation. Int.J.Hydrogen Energy. 19 no.3: 223-226.
- Taneda, D., Yasutomi, I., and Imasishi, T. 1994. Studies of 2-propanol/acetone/hydrogen energy conversion system. Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference 3: 1479-1487.
- Taneda, D., Yasutomi, I., and Imasishi, T., and Shibata, S. 1995. Pilot plant proving tests of solar chemical heat pump system. Solar engineering 1: 87-92.
- Wenworth, W.E., and Chen, E. 1976. Simple thermal decomposition reactions for storage at solar thermal energy. Solar Energy. 18: 205-214.
- Wongsuwan, W., Kumar, S., Neveu, P., and Meumier, F. 2001. A review of chemical heat pump technology and application. Applied Thermal Engineering. 21: 1489-1519.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

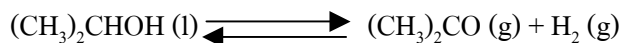
ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 ภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติของแก๊สโครมาโทกราฟี	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดของคอลัมน์	PEG 20 M
ชนิดของดีเทคเตอร์	FID
อุณหภูมิของคอลัมน์	100 °C
อุณหภูมิของอินเจคเตอร์	120 °C
อุณหภูมิของดีเทคเตอร์	120 °C
ชนิดของแก๊สพา	Helium
อัตราการไหลของแก๊สพา	30 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาคผนวก ข

ข1 ตัวอย่างการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยา
จากสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี



$$\% \text{ conversion} = \left[\frac{N_{AO} - N_A}{N_{AO}} \right] * 100$$

N_{AO} = อัตราการไหลโดยโมลขาเข้าของไอโซโพรพานอล

N_A = อัตราการไหลโดยโมลขาออกของไอโซโพรพานอล

ที่ภาวะอัตราการไหล 80 ml/min, อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส, อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 ml/min, น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 40 กรัม

อัตราการป้อนไอโซโพรพานอล = 0.018 mol/min

อัตราการไหลไอโซโพรพานอลขาออก = 0.01645 mol/min

แทนค่าในสูตร ได้ % conversion = 8.56 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข2 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการเปลี่ยนความร้อน

ที่สภาวะ ตามตารางที่ 4.7

$$\eta = \frac{Q_H}{Q_L}$$

จากตารางที่ 4.8

$$Q_H = 4245.70 \text{ kJ}$$

$$Q_L = 5100 + 6000 = 11100 \text{ kJ}$$

$$\text{ได้ } \eta = 0.38$$

ข3 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพสมรรถนะ (COP)

$$COP = \frac{Q_H}{W_{in}}$$

จากตารางที่ 4.8

$$Q_H = 4245.70 \text{ kJ}$$

$$W_{in} = 2361.6 \text{ kJ}$$

$$\text{ได้ } COP = 1.79$$

ข4 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอจี (η_E) (Gandia et al.,1992)

$$\eta_E = \frac{Q_H \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right)}{Q_L \left(1 - \frac{T_C}{T_L}\right)}$$

โดย T_C = อุณหภูมิอ้างอิงที่ 25 องศาเซลเซียส

$$T_H = 136 \text{ องศาเซลเซียส}$$

$$T_L = 84 \text{ องศาเซลเซียส}$$

จากตารางที่ 4.8

$$\text{ได้ } \eta_E = 0.44$$

ข5 ตัวอย่างการคำนวณเอนทาลปีของอุปกรณ์

$$\dot{I} = \dot{m} T_0 \left[C_p \ln \left(\frac{T_e}{T_i} \right) - \sum_r \frac{Q_r}{T_r} \right]$$

เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน

$$\dot{m} = 0.00108 \text{ kg/s}$$

$$T_0 = 298 \text{ Kelvin}$$

$$C_p = 1.704 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_r = 100.54 \text{ kJ/kg}$$

$$T_i = 353 \text{ Kelvin}$$

$$T_r = 357 \text{ Kelvin}$$

ได้ $\dot{I} = 0.045 \text{ kW}$.

$$\dot{E} = \left[C_p (T - T_0) - T_0 C_p \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + E^Q \right] \times \dot{m}$$

$$\dot{E}^Q = \sum_r \left[\dot{Q}_r \left(\frac{T_r - T_0}{T_r} \right) \right]$$

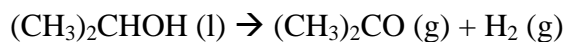
$$\text{Exergy}_{\text{input}} - \text{Exergy}_{\text{output}} = 0.164 \text{ kW}$$

คิดเป็น $\frac{\dot{I}}{\text{Exergy}_{\text{input}} - \text{Exergy}_{\text{output}}} = 2.74 \%$

ในส่วนอุปกรณ์อื่น ๆ คำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

ภาคผนวก ค

ค1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์คู่ความร้อน



การคำนวณอ้างอิงข้อมูลจาก โปรแกรม HYSYS 2.4.1 Simulation

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_A) = $7.68 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. (Walaiporn, 1999)

อัตราการไหลโดยโมลของไอโซโพรพานอล (F_{AO}) = 0.0275 mol/s

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอโซโพรพานอล (C_{AO}) = 16.5 mol/dm^3

ค่าการเปลี่ยน (x) = 0.1

สมการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง

$$-r_A = k[C_A]$$

$$C_A = C_{AO}(1-X)$$

$$-r_A = k C_{AO}(1-X)$$

$$v = F_{AO} \int_0^X \frac{dx}{-r_A}$$

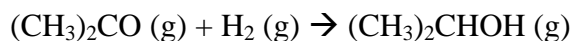
$$v = \left(-\frac{F_{AO}}{k * C_{AO}} \right) \int_0^X \frac{dx}{1-x}$$

$$v = \left(-\frac{F_{AO}}{k * C_{AO}} \right) \left[\ln(1-x) \right]_0^{0.1}$$

ประมาณการโดยสมมติให้ $-r_A$ มีค่าคงที่ แทนค่าในสมการได้

$$v = 229 \text{ ml.}$$

ค2 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน



ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_A) = $2.26 \cdot 10^{-4} \text{ dm}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$. (Walaiporn, 1999)

อัตราการไหลโดยโมลของสารตั้งต้น (F_{T0}) = 0.0396 mol/s

ความเข้มข้นเริ่มต้นของอะซีโตน (C_{B0}) = $17.2 \text{ mol}/\text{dm}^3$

ค่าการเปลี่ยน (x) = 0.25

เศษส่วนโมลของอะซีโตน (y_{B0}) = 0.44

เศษส่วนโมลของไฮโดรเจน (y_{C0}) = 0.53

$$\delta = -1$$

$$\varepsilon = y_{B0} \cdot \delta = 0.44 \cdot (-1) = -0.44$$

$$\theta_c = y_{C0}/y_{B0} = 1.20$$

$$T_0 = 140 \text{ องศาเซลเซียส}$$

$$T = 200 \text{ องศาเซลเซียส}$$

สมการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชนิดไหลต่อเนื่อง

$$-r_B = k_B [C_B][C_C]$$

$$C_B = C_{B0} \left(\frac{1-X}{1+\varepsilon X} \right) \frac{T_0}{T}$$

$$C_C = C_{B0} \left(\frac{\theta_c - X}{1+\varepsilon X} \right) \frac{T_0}{T}$$

$$v = F_{B0} \int_0^x \frac{dx}{-r_B}$$

$$v = \left(\frac{F_{B0} \cdot T^2}{-k_b \cdot C_{b0}^2 T_0^2} \right) \int_0^x \frac{(1+\varepsilon X)^2}{(1-X) \cdot (\theta_c - X)} dx$$

$$v = \left(\frac{F_{B0} \cdot T^2}{-k_b \cdot C_{b0}^2 T_0^2} \right) \left[\varepsilon_A^2 \cdot x_A + \frac{(1+\varepsilon_A)^2}{(\theta_B - 1)} \ln \left(\frac{1}{1-x_A} \right) + \left(\frac{(1+\varepsilon_A \cdot \theta_B)^2}{\theta_B - 1} \right) \ln \left(\frac{\theta_B - x_A}{\theta_B} \right) \right]_0^{0.25}$$

ประมาณการโดยสมมติให้ $-r_B$ มีค่าคงที่ แทนค่าในสมการได้

$$V = 321 \text{ ml.}$$

ค3 การออกแบบหอกลั่น

จากโปรแกรม HYSYS 2.4.1 (วราพร, 2002)

จำนวนชั้น (N) = 14 ชั้น

อัตราการไหลโดยปริมาตรของไอ (U_G) = $5.579 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

อัตราเร็วของไอ (V_G) = 1.393 m/s

$A_c = U_G/V_G = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

เส้นผ่านศูนย์กลาง (D_c) = $(4 \times A_c / 3.14)^{0.5} = 0.0225 \text{ m.}$

ประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์

ความสูง (H) = HETP * N

HETP = $d_c / 0.075$

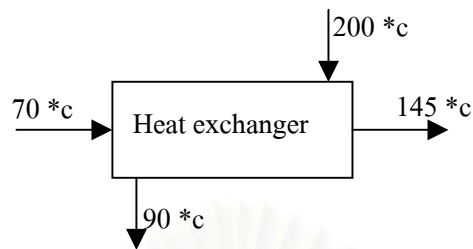
d_c = เส้นผ่านศูนย์กลางของแพกกิง (packing)

HETP = $0.005 / 0.075 = 0.066$

H = 0.92 เมตร.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค4 การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



กำหนดให้ ด้าน shell มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม.

ด้าน tube มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม.

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมคำนวณได้จากคุณสมบัติเฉลี่ยของสารดังตาราง

ก4 และ ก4.1 (Yaws, 1999)

ตารางที่ ค4 ขาเข้า เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน อุณหภูมิเฉลี่ย 110 องศาเซลเซียส

$\rho_{\text{gas}} =$	2.42	kg/m ³
Pr =	1	
k =	0.0124	w/m*K
$\nu =$	0.0000019	m ² /s
$D_H =$	0.01	m.
m =	0.00169	kg/s
$A_c =$	0.0000785	m ²
$\nu =$	8.9	m/s
Reynold number =	46821.80	turbulent
Nusselt number =	790.84	
h =	980.64	w/m ² *K

ตารางที่ ค4.1 ขาออก เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน อุณหภูมิเฉลี่ย 145 องศาเซลเซียส

$\rho_{\text{gas}} =$	2.23	kg/m ³
Pr =	0.75	
k =	0.0222	w/m*K
$\nu =$	0.0000012	m ² /s
$D_H =$	0.04	m.
m =	0.00169	kg/s
$A_c =$	0.00125	m ²
$\nu =$	0.61	m/s
Reynold number =	20209.27	turbulent
Nusselt number =	359.91	
h =	199.75	w/m ² *K

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (U) = 165 W/m²*K

อุณหภูมิขาเข้า = 70 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิขาออก = 145 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลโดยมวล = 0.0017 kg/s

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท $\dot{Q} = 1484$ W.

$\Delta T_{\text{ln}} = 34.59$

แทนค่าได้ค่าพื้นที่ถ่ายโอนความร้อน (A) = 0.25 m²

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$1. V = \frac{m}{\rho * A_c}$$

$$5. Q = m C_p \Delta T$$

$$2. \text{Reynold number} = \frac{V * D}{\nu}$$

$$6. \dot{Q} = UA \Delta T_{\text{ln}}$$

$$3. Nu = \frac{h * D}{k} = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.4}$$

$$4. U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$$

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง1 องค์ประกอบของสารยอดหอกลิ้น

65	2.21	iso
70	4.22	iso
80	11.52	iso
65	42.34	acetone
70	45.14	acetone
80	46.33	acetone

ตารางที่ ง2 องค์ประกอบของสารยอดหอกลิ้นที่ได้จากการจำลองกระบวนการโดยโปรแกรม HYSYS 2.1.4 ที่สถานะคงตัว

iso	2%
acetone	45%
H ₂	53%

ตารางที่ ง3 องค์ประกอบของสารยอดหอกลิ้นเมื่อทำการกลั่นจำนวน 2 ครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

	acetone	iso
1	44.68	4.15
2	48.9	2.31

ตารางที่ 44 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ของอะซีโตน
90	136
91	136
92	136
93	136
94	135
95	136
96	137
97	136
98	136
99	136
100	136
101	135
102	135
103	136
104	136
105	136
106	136
107	136
108	136
109	135
110	135
111	136
112	136
113	136
114	136
115	136
116	136
117	136
118	136
119	136
120	136

ตารางที่ ๖5 อุณหภูมิของน้ำจากคอนเดนเซอร์ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาทึ)	อุณหภูมิของน้ำจาก คอนเดนเซอร์
90	41
91	41
92	41
93	41
94	40
95	40
96	41
97	41
98	41
99	41
100	41
101	41
102	41
103	41
104	41
105	41
106	41
107	42
108	42
109	42
110	41
111	41
112	41
113	41
114	41
115	41
116	41
117	41
118	41
119	41
120	41

ตารางที่ ๖ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	% การเปลี่ยน
0	0
20	7.32
40	7.45
60	8.13
80	8.19
100	8.48
120	8.56

ตารางที่ ๗ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	% การเปลี่ยน
0	0
20	9.34
40	10.47
60	11.07
80	11.36
100	11.45
120	11.48

ตารางที่ ๘ องค์ประกอบของสารบนยอดหอกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ไอโซโพรพานอล	อะซีโตน	ไฮโดรเจน
0	0	0	0
30	4.45	44.96	50.59
60	4.48	45.03	50.49
90	4.5	45.12	50.38
120	4.56	45.21	50.23

ตารางที่ ๑๑ จุดหลอมของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตนที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน

ตัวเร่งปฏิกิริยา (g)	จุดหลอมของปฏิกิริยา (°C)
50	131
60	133
70	133
80	136



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอิทธิกร กลิ่น โขคา เกิดวันที่ 24 กันยายน 2523 เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาเตรียมวิศวกรรมโยธาจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย