

การปรับปรุงปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในปฏิกิริยาความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/เอซีโตน/
ไฮโดรเจน โดยใช้ระบบการกลั่นเชิงปฏิกิริยา

นางสาววัชรา อูไรสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

IMPROVEMENT OF DEHYDROGENATION REACTION IN ISOPROPANOL/ACETONE/HYDROGEN
CHEMICAL HEAT PUMP USING REACTIVE DISTILLATION SYSTEM

Miss Watchara Uraisakul

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในปฏิกิริยา
พลังงานเคมีชนิดไอโซโทรพานอล/แอซีโตน/
ไฮโดรเจน โดยใช้ระบบการกลั่นเชิงปฏิกิริยา

โดย

นางสาวรัชรา อูไรสกุล

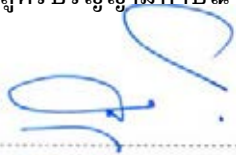
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกื้อวลี พุกษาทร)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุชฌารา)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธำรงค์ มุ่งเจริญ)

วิชา อุไรสกุล : การปรับปรุงปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/แอซีโตน/ไฮโดรเจน โดยใช้ระบบหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา (IMPROVEMENT OF DEHYDROGENATION REACTION IN ISOPROPANOL/ACETONE/HYDROGEN CHEMICAL HEAT PUMP USING REACTIVE DISTILLATION SYSTEM) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 105 หน้า.

ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีนำหลักการของปฏิกิริยาเคมีผันกลับได้มาใช้ในการสร้างวัฏจักรเพื่อปรับปรุงคุณภาพความร้อนโดยการยกระดับอุณหภูมิ สำหรับระบบที่ศึกษาคือปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอซีโตน และไฮโดรเจน เป็นระบบที่ดึงความร้อนเหลือทิ้งที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 80 - 90 องศาเซลเซียส) มาปรับปรุงให้ได้เป็นความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น (ประมาณ 200 องศาเซลเซียส) โดยผ่านปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันและไฮโดรจีเนชัน ตามลำดับ ในส่วนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งใช้ดึงความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการทำปฏิกิริยาแต่ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยา มีค่าต่ำเพียงร้อยละ 10 ที่สมดุลของปฏิกิริยา อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นเพื่อเพิ่มค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน จึงใช้หอกลั่นเชิงปฏิกิริยาเพื่อผลักดันสมดุลของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันไปด้านหน้ามากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเรนิย์นิกเกิล ในระบบปั๊มความร้อนชนิดที่มีหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา เพื่อศึกษาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา พลังงานกระตุ้น ค่าคงที่และค่าความร้อนของการดูดซับแอซีโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งศึกษาในหอกลั่นเชิงปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 80, 70 และ 60 องศาเซลเซียส ได้ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา $7.72E+8$, $4.01E+8$ และ $1.58E+8$ โมล/กรัมตัวเร่งปฏิกิริยา/นาที่ พลังงานกระตุ้น 83,097 81,194 และ 78,193 จูล/โมล ค่าคงที่การดูดซับแอซีโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา $1.48E+15$, $4.06E+19$ และ $1.80E+21$ ลิตร/โมล พลังงานการดูดซับแอซีโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา -130,405 -126,489 และ -92,335 จูล/โมล ตามลำดับ และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อน โดยพิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (η) และค่าประสิทธิภาพเอนทรานซี (G*) โดยศึกษาผ่านการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรมทางการค้า ASPEN Plus พบว่า หอกลั่นเชิงปฏิกิริยาช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันจากร้อยละ 10 เป็น ร้อยละ 28 และสามารถเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันได้มากขึ้น โดยใช้ข้อมูลจากจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสม การเพิ่มความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันเป็นพารามิเตอร์หลัก ที่ส่งผลให้ระบบมีค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเชื้อเพลิง.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2556.....

5372323223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CHEMICAL HEAT PUMP / REACTIVE DISTILLATION / ISOPROPANOL ACETONE HYDROGEN

WATCHARA URAISAKUL : IMPROVEMENT OF DEHYDROGENATION REACTION IN ISOPROPANOL/ACETONE/HYDROGEN CHEMICAL HEAT PUMP USING REACTIVE DISTILLATION SYSTEM. ADVISOR : ASSOC. PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 105 pp.

The study of chemical heat pump employs the reversible chemical reaction to improve the efficiency of the waste heat utilization. Isopropanol/Acetone/Hydrogen chemical heat pump system is a system that retrieves energy from the low grade waste heat (about 80 - 90°C) and converts to the higher grade heat (about 200°C) via dehydrogenation and hydrogenation reactions, respectively. In dehydrogenation reaction zone, the endothermic reaction occurs and the low grade heat is consumed. The conversion at 80°C under equilibrium condition in this zone was very low approximately 10 percent. To increase this value the separation of the reactant and products would help the reaction moving forward and increase the conversion of the reaction.

In this work, the kinetic of dehydrogenation reaction with Raney nickel for a reactive distillation was investigated. At 80, 70 and 60 °C, the rate constants are 0.72E+8, 4.01E+8 and 1.58E+8 mol/g.cat/min respectively. This activation energies are 83,097 81,194 and 78,193 J/mol with acetone equilibrium adsorption constants of 1.48E+15, 4.06E+19 and 1.80E+21 mol/g.cat/min. The heat of acetone adsorptions are -130,405 -126,489 and -92,335 J/mol respectively. The effects of various design parameters were investigated and expressed in terms of efficiencies such as COP, η and G^* using ASPEN plus simulator. From the simulation, the reactive distillation can increase dehydrogenation conversion from 10% to 28% and it could improve percent conversion if the proper design is conducted. Furthermore, it was found that inlet pressure of hydrogenation reactor has high impact on the system efficiency.

Department : Chemical Technology Student's Signature.....

Field of Study : Fuel Technology Advisor's Signature.....

Academic Year : 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากความช่วยเหลือจากบุคคลสำคัญหลายท่าน โดยผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ที่คอยชี้แนะแนวทางการศึกษาวิจัย เป็นผู้ให้คำตอบในเวลางานวิจัยมีปัญหา เป็นผู้เข้มงวดในการทำวิจัย และฝึกให้มีวินัยในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกื้อวลี พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลฑธา ผู้ให้คำแนะนำ และข้อสังเกตในการรายงานความก้าวหน้างานวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ บุคลากร เพื่อน พี่ และน้อง ที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้คอยเป็นกำลังใจ และน้ำใจที่มีให้

และสุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา และน้องสาวที่คอยเป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือทุกอย่าง จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎี.....	3
2.1 ป้อนความร้อน.....	3
2.2 ประเภทของป้อนความร้อนพลังงานเคมี.....	7
2.3 องค์ประกอบและลักษณะการทำงานของป้อนความร้อนพลังงานเคมี.....	8
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
2.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	12
2.6 การประเมินประสิทธิภาพป้อนความร้อนพลังงานเคมี.....	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา.....	22
3.2 อุปกรณ์การทดลอง และเครื่องมือวิเคราะห์ในการศึกษาจลนพลศาสตร์.....	22
3.3 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	27
3.4 การจำลองป้อนความร้อนพลังงานเคมี และพารามิเตอร์ที่ศึกษา.....	27
บทที่ 4 ผล และอภิปรายผลการทดลอง.....	31

	หน้า
4.1 ส่วนของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชัน.....	31
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	31
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	33
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	35
การคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชัน (k) และ	
ค่าคงที่การดูดซับแอซีโทนลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา (K_{acc}).....	37
การคำนวณค่าพรีเอกโพรเนนเชียลของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา	
ดิไฮโดรจีเนชัน (k_p) และพลังงานกระตุ้น (E_a).....	41
การคำนวณค่าพรีเอกโพรเนนเชียลของค่าคงที่สมดุลการดูดซับ	
แอซีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (K_p) และพลังงานการดูดซับแอซีโทน	
บนตัวเร่งปฏิกิริยา (H_{ad}).....	46
4.2 ส่วนของการจำลองทางคณิตศาสตร์.....	49
ผลจากการศึกษาอัตราส่วนการป้อนกลับ.....	50
ผลจากการศึกษาช่วงชั้นของการเกิดปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชัน.....	56
ผลจากการศึกษาชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอล.....	62
ผลจากการศึกษาความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน.....	66
ผลจากการศึกษาค่าความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน.....	69
ผลจากการศึกษาปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	72
ผลจากการศึกษาอัตราการไหลของไอโซโพรพานอลเข้าสู่หอกลั่น.....	75
วิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพ.....	78
เปรียบเทียบผลของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูล	
จลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	86
ข้อเสนอแนะ.....	87
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	104

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ.....	11
2.2	ชนิดและภาวะของระบบในงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาความร้อน.....	18
3.1	ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในส่วนการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	24
3.2	ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในส่วนการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	25
3.3	ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในส่วนการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	26
3.4	ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในส่วนการจำลองทางคณิตศาสตร์ทุกภาวะ.....	30
4.1	ผลการคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (k) และค่าคงที่ สมดุลการดูดซับของแอซีโทน (K_{acc}) ในแต่ละขวดที่ทำการทดลอง.....	41
4.2	ค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ($\frac{1}{T}$) ในแต่ละขวดจำลองอุณหภูมิ และ ค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ($\ln(k)$)....	42
4.3	ผลการคำนวณค่าพรีเอ็กโพเนนเชียลของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา ดีไฮโดรจีเนชัน (k_0) และพลังงานกระตุ้น (E_a) ในแต่ละขวดที่ทำการทดลอง.....	45
4.4	ค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในแต่ละขวดจำลองอุณหภูมิ ($\frac{1}{T}$) และ ค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่สมดุลการดูดซับแอซีโทนบน ตัวเร่งปฏิกิริยา ($\ln(K_{acc})$).....	46
4.5	ผลการคำนวณค่าพรีเอ็กโพเนนเชียลของค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K_0) และ พลังงานในการดูดซับของแอซีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (H_{ad}) ในแต่ละขวดที่ทำการทดลอง.....	49
4.6	อัตราการไหลโดยโมลของไอโซโพรพานอล แอซีโทน และไฮโดรเจนในแต่ละชั้น ของหอกถัน เมื่อช่วงที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันคือ ชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 14 ในกรณี การป้อนสารที่ชั้นที่ 7.....	58

ตารางที่	หน้า	
4.7	อัตราการผลิตโดยโมลของไอโซโพรพานอล แอซีโตน และไฮโดรเจนในแต่ละชั้น ของหอกถัน เมื่อชั้นที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันคือ ชั้นที่ 8 - 14 ในกรณี การป้อนสารที่ชั้นที่ 7.....	59
4.8	ผลของร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีชัน เปรียบเทียบระหว่างแบบกิบส์ และแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์จาก การทดลอง.....	81
4.8	ผลของสภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดในงานวิจัย.....	85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอของวัฏจักรแบบผันกลับไม่ได้ของแรงกิน..... 4
2.2	ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน..... 5
2.3	ปั๊มความร้อนชนิดพลังงานเคมี..... 6
2.4	การแบ่งประเภทของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี..... 7
2.5	ระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ที่ไม่ใช่หอกลับเชิงเร่งปฏิกิริยา..... 9
2.6	ระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมีในระบบที่มีหอกลับเชิงเร่งปฏิกิริยา..... 10
2.7	การทำงานของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยของ Guo J. และคณะ..... 20
3.1	เครื่องมือในการทดลองเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์..... 23
3.2	เครื่องมือวิเคราะห์แก๊ส รุ่น 2014 SHIMAZU..... 26
3.3	แผนผังกระบวนการที่ใช้ในการศึกษาการจำลองปั๊มความร้อนพลังงานเคมี..... 28
4.1	ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (มิลลิโมล) ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขวดจำลอง อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส..... 32
4.2	ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลในขวดจำลอง อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส..... 33
4.3	ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (มิลลิโมล) ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (2)..... 34
4.4	ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลในขวดจำลอง อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (2)..... 34
4.5	ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (มิลลิโมล) ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (3)..... 36
4.6	ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลในขวดจำลอง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (3)..... 37
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอซีโตนและส่วนกลับของอัตรา การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส..... 38
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอซีโตนและส่วนกลับของอัตรา การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส..... 39

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอซีโทนและส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชันในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	40
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน.....	43
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน.....	44
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน.....	44
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่ของการดูดซับแอซีโทน.....	47
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่ของการดูดซับแอซีโทน.....	48
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่ของการดูดซับแอซีโทน.....	48
4.16 แผนผังกระบวนการป้อนความร้อนพลังงานเคมี ในกรณีศึกษาผลของอัตราส่วนการป้อนกลับ.....	51
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน.....	52
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับต่อภาวะความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน.....	53
4.19 ความสัมพันธ์อัตราส่วนการป้อนกลับต่อค่าภาวะความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	54
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับต่อค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน.....	54
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับต่อค่าภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ.....	55
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน.....	56

รูปที่	หน้า
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	57
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	60
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน.....	61
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่การป้อนสาร ก) ชั้นที่ 4, ข) ชั้นที่ 7.....	62
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	63
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอลต่อค่าภาระทางความร้อนของหม้อต้มซ้ำ.....	64
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอลต่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	64
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอลต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน เมื่อชั้นที่เกิดปฏิกิริยา ก) ชั้นที่ 6-14, ข) ชั้นที่ 10-14.....	66
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของเครื่องอัดไอต่อร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	67
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของเครื่องอัดไอต่อค่าภาระทางความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน.....	68
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของเครื่องอัดไอต่อค่าภาระทางความร้อนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	68
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของเครื่องอัดไอต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน.....	69
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	70
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์.....	71
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน.....	72

รูปที่	หน้า
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่อง ปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน.....	73
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่อง ปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องหล่อเย็น.....	74
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่อง ปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่ออุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน.....	74
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่อง ปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน.....	75
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	76
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่อค่าภาระทางความร้อน ของหม้อต้มซ้ำ.....	76
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่ออุณหภูมิที่เครื่อง ปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน.....	77
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่อค่าประสิทธิภาพ ทางความร้อน.....	78
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเพิ่มของพารามิเตอร์ และค่าร้อยละของ ประสิทธิภาพ ก) สัมประสิทธิ์การทำงาน ข) เอนทรานซี และ ค) เอ็กเซอร์จี.....	79
4.47 แผนผังกระบวนการจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี โดยใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์จากการทดลอง.....	81
4.48 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองที่มี และ ไม่มีผลทางจลนพลศาสตร์ ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	82
4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	83
4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่อค่าภาระทางความร้อน ของหม้อต้มซ้ำ.....	84
4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่อค่าประสิทธิภาพ ทางความร้อน.....	85

รูปที่		หน้า
4.52	ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนกลับของอุณหภูมิและค่าลอการิทึมธรรมชาติ ของค่าคงที่ของการดูดซับแอซีโตน.....	72
4.53	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โมลของไฮโดรเจนสะสมและเวลา.....	73
4.54	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันและเวลา.....	74
4.55	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โมลของไฮโดรเจนสะสมและเวลาที่ขึ้นก้นหอ.....	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ป้อนความร้อนพลังงานเคมีนำหลักการของปฏิกิริยาผันกลับได้มาใช้ในการสร้างวัฏจักรเพื่อปรับปรุงคุณภาพความร้อน โดยการยกระดับอุณหภูมิ สำหรับระบบที่ศึกษาคือป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอซีโตน และไฮโดรเจน เป็นระบบที่ดึงความร้อนเหลือทิ้งที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 80 - 90 องศาเซลเซียส) มาปรับปรุงให้ได้เป็นความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น (ประมาณ 200 องศาเซลเซียส) โดยผ่านปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันและไฮโดรจีเนชันตามลำดับ ในส่วนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งใช้ดึงความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการทำปฏิกิริยาแต่ค่าการเปลี่ยน (conversion) มีค่าต่ำเพียงร้อยละ 10 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ที่ภาวะสมดุล) และเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ การแยกผลิตภัณฑ์ออกจากสารตั้งต้นจะช่วยผลักดันให้ปฏิกิริยาดำเนินไปด้านหน้าได้มากขึ้น การใช้หอกลั่นเชิงปฏิกิริยาเป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มการเปลี่ยนของปฏิกิริยาเคมี โดยหอกลั่นเชิงปฏิกิริยาจะมีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาและมีส่วนเกิดปฏิกิริยาอยู่ทางด้านล่าง มีส่วนทำหน้าที่กลั่นแยกอยู่ด้านบนเพื่อแยกผลิตภัณฑ์ (แอซีโตน และไฮโดรเจน) ที่ได้ออกจากระบบและทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้ดีขึ้น สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้ไปใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไอโซโพรพานอล และวนกลับไปใช้ใหม่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันได้ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งความร้อนส่วนนี้มีอุณหภูมิสูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล ด้วยหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา และศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันภายในหอกลั่นเชิงปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรนิี่ยมเกิด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ดำเนินการทดลอง เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล
2. ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอซีโตนและไฮโดรเจน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล และการปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีโดยการจำลองระบบที่มีหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล ของระบบปั๊มความร้อนชนิดที่มีหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา เพื่อศึกษาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา พลังงานกระตุ้น ค่าคงที่สมดุลและค่าความร้อนของการดูดซับแอซีโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ศึกษาตัวแปรที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบทั้งในส่วนของปฏิกิริยา ความร้อนและคายความร้อน ซึ่งส่วนนี้ได้ศึกษาโดยการจำลองโปรแกรมเชิงการค้า Aspen Plus และใช้ Thermodynamic properties เป็น UNIQUAC

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

นำสมการทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล มาใช้เป็นแนวทางปรับปรุงระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี นำความร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้งานได้ เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎี

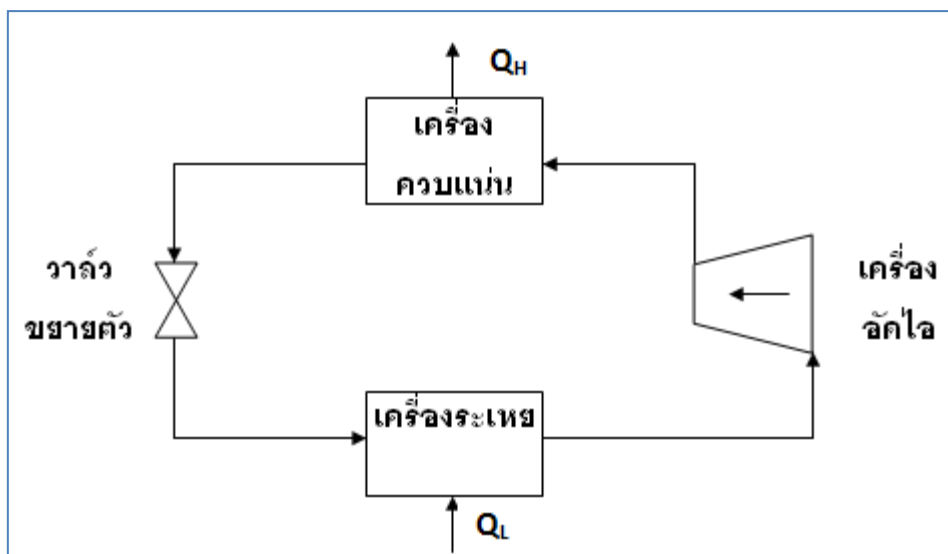
2.1 ป้อนความร้อน

ป้อนความร้อนเป็นกระบวนการที่ขับเคลื่อนความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นวัฏจักร อาศัยพลังงานจากภายนอกช่วยในการทำงานของเครื่องมือ

ป้อนความร้อนมีหลายชนิด เช่น ป้อนความร้อนชนิดวัฏจักรอัดไอ ป้อนความร้อนชนิดคูคกลีน และป้อนความร้อนพลังงานเคมี

2.1.1 ป้อนความร้อนชนิดวัฏจักรอัดไอ

หลักการทำงานของป้อนความร้อนชนิดอัดไอ ดังรูปที่ 2.1 เริ่มจากการที่ของผสมระหว่างของเหลวและไอได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอ ไอจะถูกส่งไปยังเครื่องอัดไอเพื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิให้สูงขึ้น จากนั้นส่งไปยังเครื่องควบแน่นเพื่อปล่อยความร้อนที่อุณหภูมิสูง จนสารเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และส่งต่อไปยังวาล์วขยายตัวเพื่อลดความดันไปใช้เป็นพลังงาน หลังจากนั้น ของเหลวจะถูกส่งกลับไปยังเครื่องระเหยเพื่อครบวัฏจักร

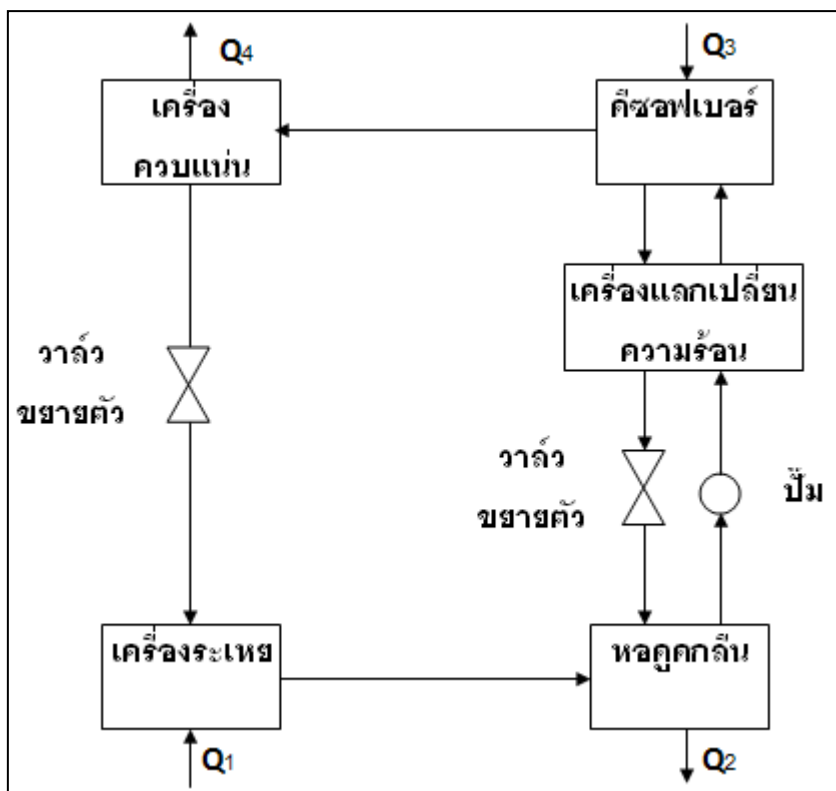


รูปที่ 2.1 ป้อนความร้อนชนิดอัดไอของวัฏจักรแบบผันกลับไม่ได้ของแรงกิน

(Kiatkitisophon and Piumsomboon , 2004)

2.1.2 ป้อนความร้อนชนิดดูดกลืน

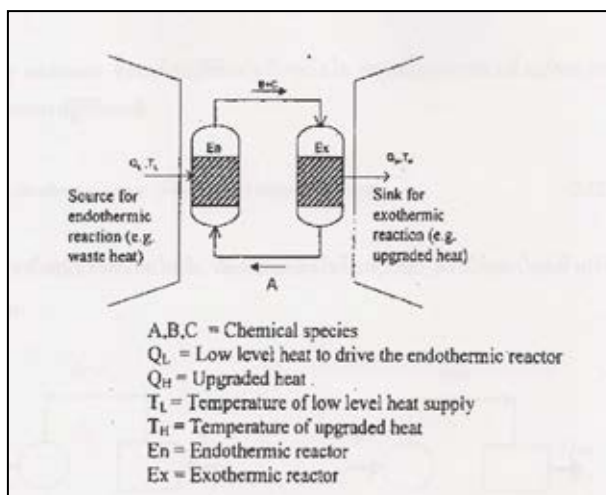
หลักการทำงานของป้อนความร้อนชนิดดูดกลืน ดังรูปที่ 2.2 มีหลักการใกล้เคียงกับป้อนความร้อนชนิดอัดไอ แต่ส่วนของการเพิ่มความดันนั้น เปลี่ยนสถานะของของไหลทำงานจากสถานะแก๊สเป็นสถานะของเหลว เพื่อลดงานที่ต้องให้กับเครื่องอัด โดยมีของไหลดูดกลืน ซึ่งช่วยดูดซับไอของของไหลทำงาน ซึ่งทำให้ของไหลทำงานมีสถานะเป็นของเหลวในขณะที่ถูกเพิ่มความดัน



รูปที่ 2.2 ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน (Kiatkitisophon and Piumsomboon, 2004)

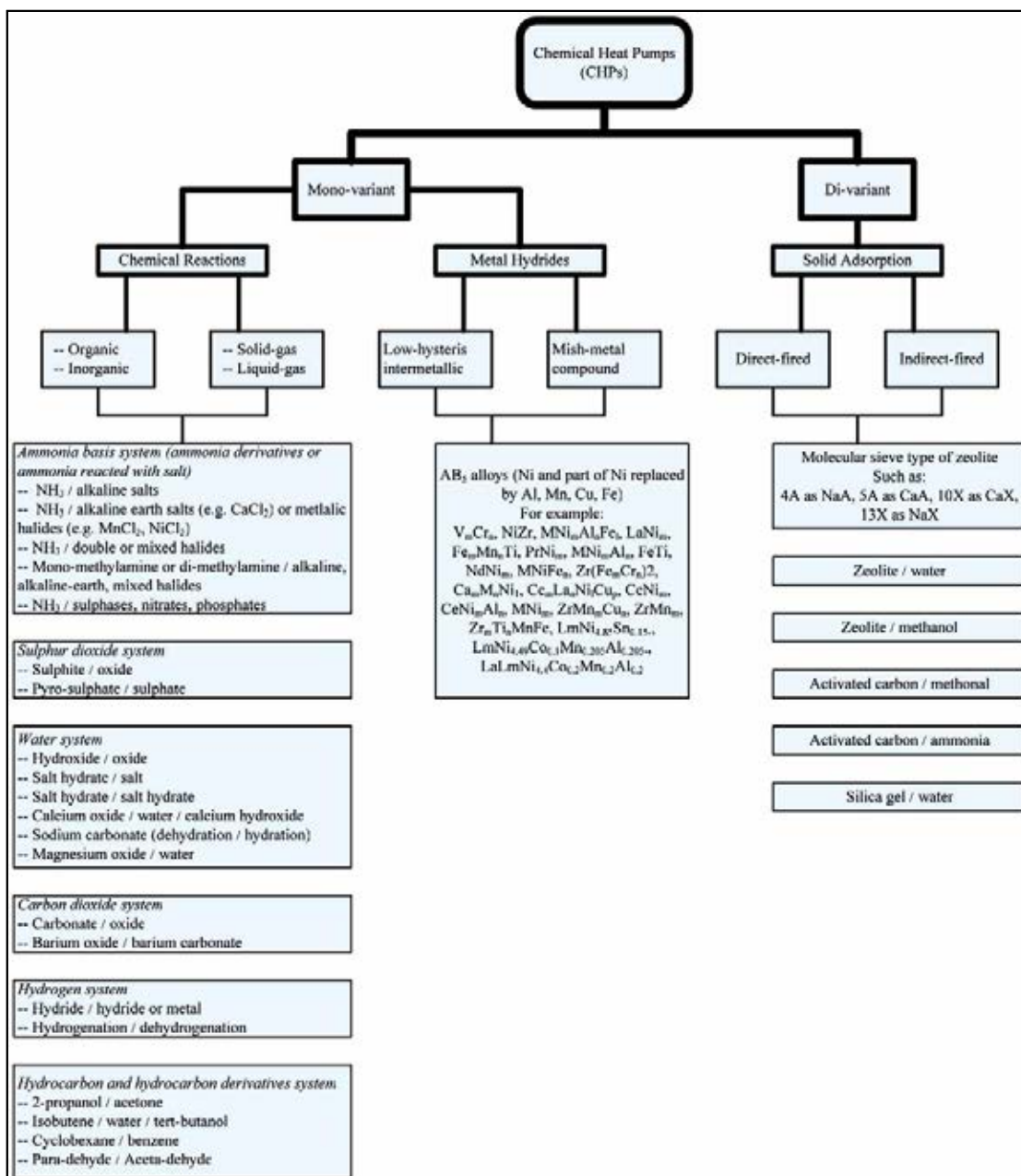
2.1.3 ปั๊มความร้อนชนิดพลังงานเคมี

หลักการทำงานของปั๊มความร้อนชนิดนี้แตกต่างจากปั๊มความร้อน 2 ชนิดแรก เนื่องจากปั๊มความร้อนชนิดนี้มีการป้อนงานจากภายนอกให้กับอุปกรณ์ในระบบ แต่พลังงานความร้อนที่ผลิตเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีชนิดดูดความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ และคายความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ป้อนความร้อนชนิดพลังงานเคมี (Nay, 1998)

2.2 ประเภทของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี



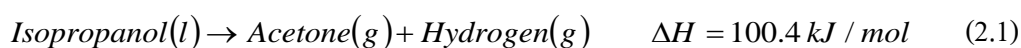
รูปที่ 2.4 การแบ่งประเภทของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี (Wang et al., 2008)

ในงานวิจัยของ Wang et al., 2008 แบ่งประเภทของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ดังรูปที่ 2.4 โดยใช้เกณฑ์คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้เพื่อระบุสถานะของระบบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มที่ใช้ข้อมูลเพียงข้อมูลเดียว เช่น กลุ่มของปฏิกิริยาเคมี และกลุ่มของโลหะไฮไดรด์ ส่วนอีกกลุ่มคือกลุ่มที่ใช้ข้อมูล 2 ชนิด เช่น กลุ่มของการดูดซับ ซึ่งต้องระบุทั้งความดันและอุณหภูมิเพื่อทราบสถานะของระบบ

2.3 องค์ประกอบ และลักษณะการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

2.3.1 ระบบที่ไม่ใช้หอกลิ้นเชิงปฏิกิริยา หรือระบบที่ใช้หอกลิ้นปกติ

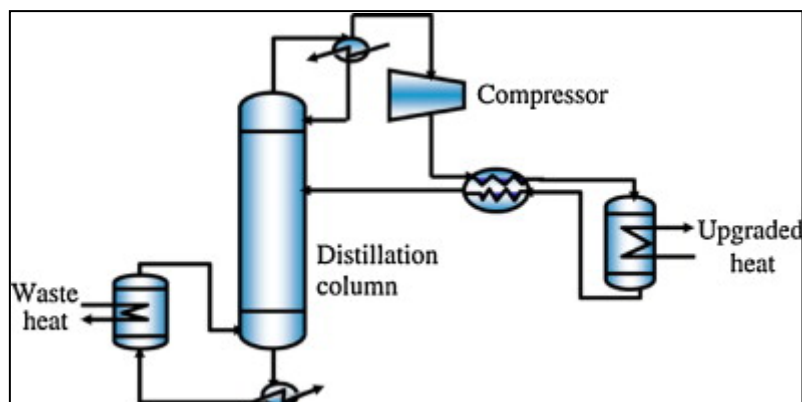
ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปรับปรุงความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้ ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีมีลักษณะดำเนินการได้จากปฏิกิริยาเคมีหลายปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.5 แต่ในงานวิจัยนี้ศึกษาปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล แอซีโตนและไฮโดรเจน เนื่องจากสามารถดึงความร้อนเหลือทิ้งที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ 80 องศาเซลเซียส มาใช้ในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน เพื่อเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (2.1)



สมการที่ (2.1) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังหอกลิ้นเพื่อแยกแอซีโตนและไฮโดรเจนออกจากไอโซโพรพานอล ถ้าปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเกิดขึ้นมาก จะสามารถใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำให้เกิดประโยชน์ได้มากขึ้นด้วย ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา คือ แอซีโตน และไฮโดรเจนจะถูกกลั่นแยกจากไอโซโพรพานอล และส่งต่อไปยังเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน เพื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ดังสมการที่ (2.2) และเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



สมการที่ 2.2 คือสมการปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์อีกเครื่องหนึ่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่งเข้าหอกลิ้นเพื่อแยกไอโซโพรพานอลออกจากแอซีโตน และไฮโดรเจน โดยไอโซโพรพานอลที่ได้จะถูกป้อนกลับไปยังเครื่องปฏิกรณ์เครื่องดีไฮโดรจีเนชัน เพื่อเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ส่วนความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาคายความร้อนนี้ เป็นความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

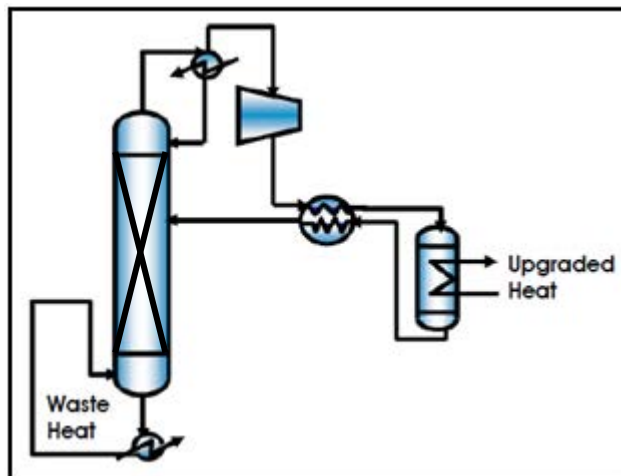


รูปที่ 2.5 ระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ที่ไม่ใช้หอกลั่นเชิงปฏิบัติ (Klinsoda and Piumsomboon, 2007)

การเปลี่ยนของปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันที่สมดุลเกิดขึ้นเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อการเกิดปฏิกริยามีค่าต่ำ การดึงความร้อนเหลือทิ้งที่อุณหภูมิต่ำมาใช้ จึงมีค่าน้อย ส่งผลให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีค่าน้อยไปด้วย ดังนั้นการพัฒนาในส่วนปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงระบบปั๊มความร้อนชนิดนี้เป็นอย่างมาก

2.3.2 ระบบที่มีหอกลั่นเชิงปฏิบัติ

เนื่องจากปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชัน และปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันในระบบนี้เป็นปฏิกริยาที่สามารถผันกลับได้ ดังนั้นการดึงผลิตภัณฑ์ออกจากระบบสมดุล จะทำให้ปฏิกริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น โดยภายในหอกลั่นเชิงปฏิบัติจะเกิดปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันขึ้น พร้อมกับ การกลั่นแยกออกจากกัน ซึ่งเป็นหลักการทำงานของหอกลั่นเชิงปฏิบัติ หอกลั่นเชิงปฏิกริยานี้ มีส่วนที่เกิดปฏิกริยาอยู่ด้านล่างของหอ จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและสารตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกริยา จะเคลื่อนไปทางด้านบนของหอกลั่น และเกิดการแยกสารตามจุดเดือดของสารแต่ละชนิด ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งการใช้หอกลั่นเชิงปฏิบัติจะทำให้ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันดำเนินไปข้างหน้าได้มากกว่าระบบเดิม



รูปที่ 2.6 ระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมีในระบบที่มีหอกลับเชิงปฏิกิริยา (Klinsoda and Piumsomboon, 2007)

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากงานวิจัยของ Saito et al., 1994 ได้ศึกษาปฏิกิริยาของไอโซโพรพานอล แอซีโทน และไฮโดรเจน ในรายละเอียดพบว่าเรนิี่ยมเกิดช่วยเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา และมีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ง่ายกว่า

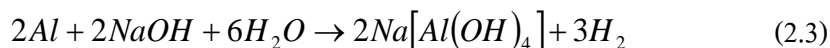
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลสรุปดังตารางที่ 2.1 สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรนิี่ยมเกิด

ตารางที่ 2.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ (Saito et al., 2000)

ชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราเร็วของปฏิกิริยา (Rate constant)		ค่าคงที่ของความล่าช้า (retardation)
	(mmol/h.g)	(mmol/h.g.dm ³)	(mmol/dm ³)
Ru-Pt/C+Pt(acac) ₂	6290	62900	0.009
Ru-Pt/C+Pd(acac) ₂	5660	56600	0.009
Ru-Pt/C	5870	58700	0.014
Ru/C	4630	46300	0.017
Rh/C	1560	15600	0.014
Pt/C	390	3900	0.004
Pt/Ni fine particle	268	1340	0.052
Ni fine particle	96.9	969	0.066
Nickle boride	60	300	0.011
Raney Ni	51.5	51.5	0.015

เรนิี่ยมเกิด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ ของโลหะอัลลอยด์นิกเกิลและอลูมิเนียม หรือบางชนิดเป็นโลหะอัลลอยด์ของนิกเกิลและสังกะสี ซึ่งโลหะอัลลอยด์จะมีความว่องไวเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮโดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะโครงสร้างที่มีรูพรุนคล้ายโครงกระดูก

หรือฟองน้ำ เนื่องจากสารละลายเบสจะทำหน้าที่เป็นตัวชะละลายโลหะที่เป็นอัลลอยด์กับนิกเกิล ออกมาในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียม (Na[Al(OH)₄]) ดังปฏิกิริยาที่ (2.3)



การชะละลายโลหะอื่นนอกจากโลหะนิกเกิลในรูปของไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมจำเป็นต้องดำเนินการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้ภาวะของความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์ประมาณ 5 โมลาร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสารละลายอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ซึ่งเป็นสารต่อต้านปฏิกิริยาการชะละลาย และการเกิดรูพรุน ส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ประสิทธิภาพและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีค่าลดลงด้วย ส่วนไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน

อุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการชะละลายจะอยู่ในช่วง 50-100 องศาเซลเซียส ซึ่งหากอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นลดลง หลังจากการชะละลาย ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นรูพรุน เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมหรือสังกะสี ได้หลุดออกไปจากพื้นผิวโลหะอัลลอยด์ เหลือเพียงนิกเกิลที่มีรูพรุน ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น

2.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่ำ เป็นผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการคายตัวของแอซีโทนออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้ช้า พื้นที่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ดังเช่นอธิบายในงานวิจัยของ Sakurai., 2007

การศึกษาความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในหลายวัฏภาค ซึ่งถูกควบคุมโดยการดูดซับและคายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถอธิบายด้วยสมการของ Langmuir-Hinshelwood ดังนี้

$$r_d = \frac{k}{1 + K_{ace} C_{ace}^n} \quad (2.4)$$

- r_d = อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน
- k = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน
- K_{ace} = ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับแอซีโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา
- C_{ace} = ความเข้มข้นของแอซีโตน
- n = อันดับของปฏิกิริยา

จากสมการที่ 2.4 จะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน และการค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับแอซีโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งหากค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมีค่ามาก และค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับแอซีโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อย อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่ามาก

ความเข้มข้นของแอซีโตนคำนวณได้จากความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2.5

$$r_d = \frac{1}{m_{cat}} \frac{dN_H}{dt} \quad (2.5)$$

- m_{cat} = น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา
- N_H = จำนวนโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น
- t = เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

โดยค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$\ln(k) = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (2.6)$$

- k = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน
- k_0 = ค่าพรีเอ็กโพเนนเชียลของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

E_a = พลังงานกระตุ้น

R = ค่าคงที่ของแก๊ส

T = อุณหภูมิ

และค่าคงที่สมดุลของการดูดซับแอสีโทน เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเช่นกัน แสดงดังสมการที่ 2.7

$$\ln(K_{ace}) = \ln K_0 + \frac{\Delta H_{ad}}{RT} \quad (2.7)$$

K_{ace} = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

K_0 = ค่าพรีเอ็กโพเนนเชียลของค่าคงที่สมดุลของการดูดซับแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

ΔH_{ad} = ความร้อนในการดูดซับแอสีโทนลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

2.6 การประเมินประสิทธิภาพปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

การประเมินค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ผ่านมานิยมใช้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) และค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (η) ต่อมามีการศึกษาถึงค่าประสิทธิภาพชนิดใหม่คือค่าประสิทธิภาพเอนทรานซี (G^*) ดังในงานวิจัยของ Guo et al., 2007 ซึ่งผู้วิจัยอ้างว่าเป็นการหาค่าประสิทธิภาพที่สะดวกกว่าชนิดอื่น เนื่องจากสามารถศึกษาถึงคุณภาพของความร้อนที่ได้ และจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมีน้อยกว่าค่าประสิทธิภาพความร้อนชนิดอื่น

ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพความร้อน สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$COP = \frac{\sum Q_H}{\sum W_L} \quad (2.6)$$

$$\eta = \frac{\sum Q_H (1 - T_a / T_H)}{\sum Q_L (1 - T_a / T_L)} \quad (2.7)$$

$$G^* = \frac{\sum Q_H T_H}{\sum Q_L T_L} \quad (2.8)$$

โดยที่ตัวแปรต่างๆ แสดงถึง

COP	=	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ
η	=	ค่าประสิทธิภาพเอนทาลปีในกรณีที่คำนวณจากงานที่ได้สูงสุด
G^*	=	ค่าประสิทธิภาพเอนทาลปี
Q	=	ภาระความร้อน
W	=	งาน
T_a	=	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
T	=	อุณหภูมิของอุปกรณ์
Q_H	=	$Q_{Exo} + Q_{Cooler}$
Q_L	=	$Q_{Heater} + Q_{Reboiler} + Q_{Compressor}$
W_L	=	$W_{Heater} + W_{Reboiler} + W_{Compressor}$
Exo	=	เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน
Cooler	=	เครื่องหล่อเย็น
Heater	=	เครื่องให้ความร้อน
Reboiler	=	หม้อต้มซ้ำ
Compressor	=	เครื่องอัดไอ

2.7 งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

ข้อดีของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอซีโตนและไฮโดรเจน คือการเกิดปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลต่ำ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาระบบให้มีการเปลี่ยนของปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้น โดยผู้วิจัยแบ่งส่วนของงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.7.1 หอกลับเชิงปฏิกิริยา

งานวิจัยของ Gaspillo, 1998 ได้ปรับปรุงระบบปั๊มความร้อนชนิดนี้ด้วยการใช้หอกลับเชิงปฏิกิริยาแทนการใช้เครื่องปฏิกรณ์และหอกลับแบบธรรมดา พบว่าช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้ว มีการดึงผลิตภัณฑ์ออกจากสมดุลเคมี เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น โดยใช้อัตราการป้อนไอโซโพรพานอลที่ต่ำเพียง 0.04 มิลลิโมลต่อวินาที ใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 130 กรัม และขนาดของหอกลับเชิงปฏิกิริยาที่มีความสูง 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ได้ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันร้อยละ 60 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีในระบบที่ไม่มีหอกลับเชิงปฏิกิริยาโดยใช้ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดเดียวกัน ดังแสดงในงานวิจัยของ Klinsoda and Piumsomboon, 2007 และงานวิจัยของ Kiatkitisophon and Piumsomboon, 2004 พบว่ามีร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันอยู่เพียงร้อยละ 8.5 และ 7.9 ตามลำดับ

2.7.2 ลักษณะการป้อนไอโซโพรพานอล

เมื่อใช้เกณฑ์ของความต่อเนื่องในการป้อนสารเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

การป้อนไอโซโพรพานอลแบบต่อเนื่อง

การป้อนสารแบบต่อเนื่อง มีข้อดีที่ทำให้ระบบมีความสม่ำเสมอทั้งการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน และไฮโดรจีเนชัน ดังเช่นงานวิจัยของ Gaspillo et al., 1998 และงานวิจัยของ Klinsoda and Piumsomboon, 2007

ในงานวิจัยของ Klinsoda I. และ Piumsomboon P. (2007) ได้ทำการศึกษาระบบป้อนความร้อนพลังงานเคมีทั้งระบบ ในส่วนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ใช้เครื่องปฏิกรณ์และหอกลั่นแบบธรรมดา เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร หอกลั่นแบบธรรมดา มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.75 เซนติเมตร สูง 110 เซนติเมตร ซึ่งมีจำนวน 14 ชั้น ภายในคอลัมน์มีการบรรจุตัวแพกกิ่งชนิด raschig ring มีอัตราการป้อนไอโซโพรพานอล 20-40 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5-10 กรัม พบว่าได้ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันร้อยละ 8.5

การป้อนไอโซโพรพานอลแบบไม่ต่อเนื่อง

แม้ว่าการป้อนสารในลักษณะนี้จะทำให้ระบบไม่สม่ำเสมอ แต่กลับพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มักเลือกใช้การป้อนสารในลักษณะนี้มากกว่า ดังเช่นในงานวิจัยของ Gaspillo et al., 1998 ได้ศึกษาลักษณะของการป้อนไอโซโพรพานอลเป็นช่วงๆ ภายในหอกลั่นเชิงปฏิกิริยาที่มีอัตราการป้อนไอโซโพรพานอลเฉลี่ย 0.062 มิลลิโมลต่อวินาที ใช้หอกลั่นเชิงปฏิกิริยาที่มีความสูง 50 เซนติเมตร ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 130 กรัม ช่วงเวลาที่หยุดรอเพื่อจะป้อนสารชุดใหม่ 3 วินาที เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นภายในป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล แอซีโตนและไฮโดรเจนนี้ คืออัตราการคายตัวของแอซีโตนออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาไปอย่างช้าๆ ดังนั้นการทิ้งช่วงเวลาเพื่อรอให้แอซีโตนคายตัวออกจากพื้นผิวสัมผัสจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วจึงป้อนไอโซโพรพานอลชุดใหม่เข้าไป จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมากกว่าลักษณะการป้อนสารแบบต่อเนื่องถึงร้อยละ 30-40

2.7.3 ลักษณะอุปกรณ์ และภาวะที่ใช้ในปฏิกิริยาความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอซีโตน และไฮโดรเจน

ตารางที่ 2.2 รวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปฏิกิริยาความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอซีโตนและไฮโดรเจน โดยจำแนกรายละเอียดของอุปกรณ์ ภาวะที่จำเป็น และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน

ตารางที่ 2.2 ชนิดและภาวะของระบบในงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาความร้อน (Mooksuwan and Kumar, 2000)

No.	Condition	Kim et al., 1992	Doi and Tanaka, 1992	Doi et al., 1995	Mooksuwann and Kumar, 2000
1	Heat supply	Oil bath with heater	Oil bath	Heated oil flowrate in the reactor jacket	Oil bath
2	Reactor	3-necked flask (1000 ml)	3-necked flask (300 ml)	Mixing tank (200 l)	3-necked flask (1000 ml)
3	Reaction temp (°C)	82.4	71-83.5	-	60-80
4	Volume of isopropanol	0.5	0.05-0.20	180	0.30-0.50
5	Catalyst used	Raney nickel	Nickel-fine particle	5 wt% Ru-Pd/C	10 wt% Ru-Pt/C
6	Catalyst weight (g)	1.70-6.69	0.10-0.40	81.4	0.15-0.40
7	Catalyst concentration (g/l)	3.5-13.4	0.5-8.0	0.45	0.5-1.7
8	Separation unit	Simple condenser	Reflux condenser	Rectifying column	Condenser
9	Mixing device	Magnetic stirrer	Magnetic stirrer	Stirrer	Nitrogen bubble
10	Flow rate measurement	Bubble flow meter	Gas burette	Gas flow meter	Bubble flow and gas flow meters

No.	Condition	Kim et al., 1992	Doi and Tanaka, 1992	Doi et al., 1995	Mooksuwann and Kumar, 2000
11	Time (min)	-	60	-	60

2.7.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

งานวิจัยของ Sakurai et al., 2007 ศึกษาผลการพ่นไอโซโพรพานอลเป็นละอองฝอยลงบนแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความร้อน ซึ่งลักษณะการป้อนไอโซโพรพานอลแบบเป็นช่วงๆ พบว่าช่วยเพิ่มการเปลี่ยนของไอโซโพรพานอล เนื่องจากมีช่วงเวลาให้ไอโซโพรพานอลจากสถานะของเหลวระเหยเป็นไอก่อนที่จะดูดซับลงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอสีโทนและไฮโดรเจน

งานวิจัยของ Saito et al., 2004 ทำการศึกษาระบบป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอสีโทน และไฮโดรเจน พบว่าปริมาณของไอโซโพรพานอลต้องมีความเหมาะสมกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสูงสุด ปริมาณไอโซโพรพานอลที่มากเกินไปจากทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ลดลง และอัตราส่วนของน้ำหนักไอโซโพรพานอลต่อน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้อยู่ที่ประมาณ 3 ซึ่งอัตราส่วนนี้จะใช้ได้กับระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch) และมีการป้อนสารที่คงที่เท่านั้น โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้จะแตกต่างกัน ตามปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ ลักษณะการป้อนไอโซโพรพานอล อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

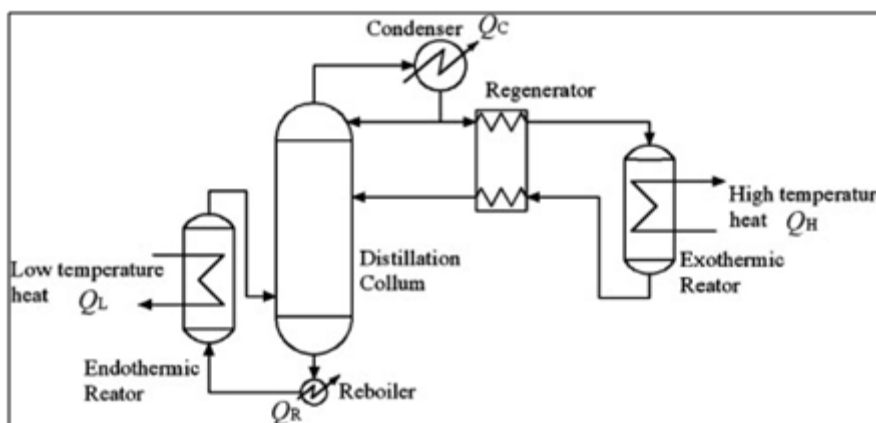
2.7.5 ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

จากข้อมูลของ William, 2011 มีค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน $3.51E+5$ โมล/กรัมตัวเร่งปฏิกิริยา/นาที่ และพลังงานกระตุ้น $72,380$ จูล/โมล

2.7.6 การประเมินประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล แอซีโตน และไฮโดรเจน

งานวิจัยของ Guo et al., 2012 ศึกษากระบวนการปั๊มความร้อนพลังงานเคมี โดยมีเครื่องปฏิกรณ์ 2 เครื่อง หอกั่นแยก 1 เครื่อง และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 1 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่

2.7



รูปที่ 2.7 การทำงานของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยของ Guo et al., 2012

โดยงานวิจัยนี้ทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อนด้วยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (η) โดยตัวแปรที่ส่งผล มีดังนี้

การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับ เป็นการเพิ่มภาระความร้อนที่เครื่องควบแน่นและหม้อต้มซ้ำ ซึ่งส่งผลให้ COP และ η มีค่าลดลง

การเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน ทำให้ COP และ η มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันลดลง

การเพิ่มอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อแอสีโทนให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้ COP และ η มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันได้เพิ่มขึ้น จึงได้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น

การเพิ่มจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Regenerator) ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนให้กับสารที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันได้มากขึ้น ค่า COP และ η จึงมีค่าเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน เพื่อหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

1. การทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน
2. การศึกษาแบบจำลองระบบป้อนความร้อนพลังงานเคมี

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

1. โลหะอัลลอยด์นิกเกิล อะลูมิเนียม (Ni-Al) เกรด AR ขนาด 500 กรัม บริษัท Fluka
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรด AR ขนาด 1 กิโลกรัม บริษัท Merck
3. ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) เกรด AR ขนาด 2.5 ลิตร บริษัท Merck
4. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol) เกรด AR ขนาด 2.5 ลิตร บริษัท Merck

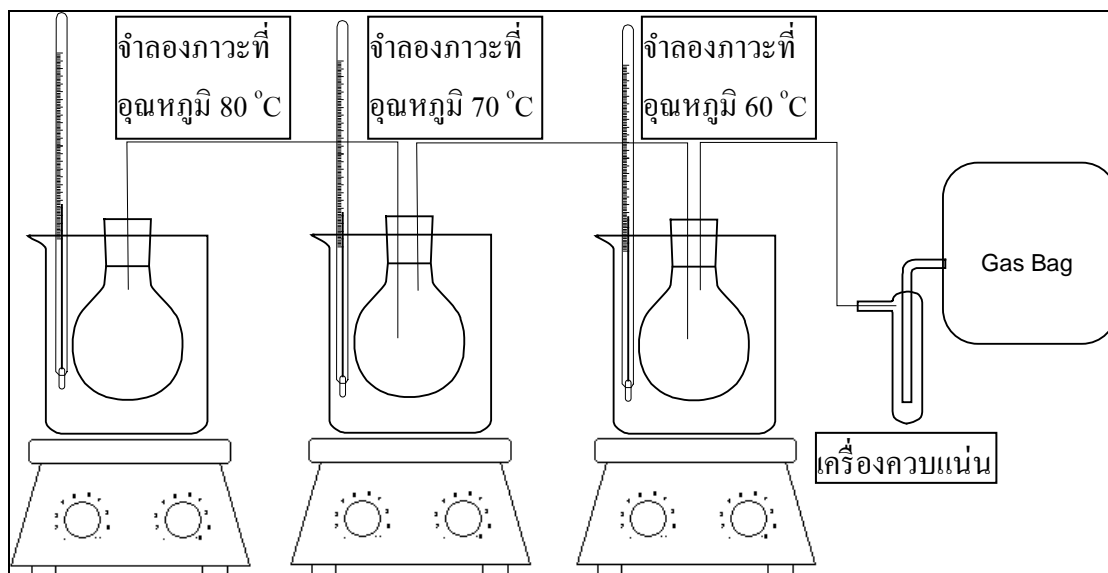
3.2 อุปกรณ์การทดลอง และเครื่องมือวิเคราะห์ในการศึกษาจลนพลศาสตร์

ทำการทดลองหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ในหอกถันเชิงปฏิกิริยา โดยออกแบบการทดลองดังรูปที่ 3.1

จากรูปที่ 3.1 ศึกษาปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล ในแต่ละชั้นของหอกถันเชิงปฏิกิริยา ที่จำลองภาวะโดยการออกแบบเครื่องมือการทดลองเป็นขวดแก้วขนาด 50 มิลลิลิตร จุ่มอยู่ในบีกเกอร์น้ำร้อนขนาด 250 มิลลิลิตร เพื่อให้ความร้อนแก่ขวดแก้วอย่างทั่วถึง โดย

ควบคุมความร้อนที่ขึ้นก้นห่อ กึ่งกลางห่อ และยอดห่อ ไม่ให้เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 1 องศาเซลเซียส ระหว่างขวดแก้ว ทำการเจาะรูที่ปากขวดเพื่อใส่ท่อสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 1/16 นิ้ว เป็นทางเดินของสารที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกจากขวดทดลองขวดสุดท้ายและเข้าสู่เครื่องควบแน่นที่ใช้น้ำแข็งในการหล่อเย็น เครื่องควบแน่นนี้จะทำให้แอซิโตนที่เกิดขึ้นและไอโซโพรพานอลที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยากลับตัวเป็นของเหลว ส่วนไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่ถุงเก็บแก๊ส เพื่อวัดปริมาตรต่อไป

ในการอธิบายขวดแก้วที่จำลองภาวะที่อุณหภูมิ 80 70 และ 60 องศาเซลเซียส จะถูกเรียกว่าขวดที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 เครื่องมือในการทดลองเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์

การบรรจุไอโซโพรพานอลจะบรรจุในขวดที่ 1 เท่านั้น การวัดปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนในแต่ละบริเวณของหอกถัน และดำเนินการศึกษาดังต่อไปนี้

- การวัดปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนที่ขวดที่ 3 ติดตั้งชุดขวดแก้ว 3 ชุด และบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ขวด ดังรูปที่ 3.1
- การวัดปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนที่ขวดที่ 2 ติดตั้งชุดขวดแก้ว 2 ชุด แล้วต่อชุดขวดแก้วที่ 2 เข้ากับเครื่องควบแน่น และถุงเก็บแก๊ส บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ขวด

- การวัดปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนที่ขึ้นก้นหอ ตัดตั้งชุดขวดแก้วเพียง 1 ชุด แล้วต่อชุดขวดแก้วขวดที่ 1 เข้ากับเครื่องควบแน่น และดูดเก็บแก๊ส บรรจุกว้างปฏิบัติการเพียง 1 ขวด

เก็บแก๊สไฮโดรเจนครั้งแรกที่ 5 นาที หลังจากนั้นจึงเก็บแก๊สทุกๆ 10 นาที จนกระทั่งทำการทดลองครบ 1 ชั่วโมง ซึ่งทำการทดลองดังภาวะต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ขวดที่ 1)

ภาวะที่	ปริมาตร ไอโซโพรพานอล (มิลลิลิตร)	ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (นาที)	ขวดที่ เกิดปฏิกิริยา
1	30	1	82	60	1
2	30	1	80	60	1
3	30	1	78	60	1
4	30	1	76	60	1

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (ขวดที่ 2)

ภาวะที่	ปริมาตร ไอโซโพรพานอล (มิลลิลิตร)	ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (นาที)	ขวดที่ เกิดปฏิกิริยา
1	30	1	73	60	1, 2
2	30	1	70	60	1, 2
3	30	1	68	60	1, 2
4	30	1	65	60	1, 2

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ขวดที่ 3)

ภาวะที่	ปริมาตร ไอโซโพรพานอล (มิลลิลิตร)	ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (นาที)	ขวดที่ เกิดปฏิกิริยา
1	30	1	65	60	1, 2, 3
2	30	1	62	60	1, 2, 3
3	30	1	60	60	1, 2, 3
4	30	1	58	60	1, 2, 3

เครื่องมือ และภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สไฮโดรเจน

เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC) (SHIMAZU MODEL GC 2014) ซึ่งใช้คอลัมน์วิเคราะห์เป็น UNIBEAD C และมีภาวะที่ใช้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องมือวิเคราะห์แก๊ส รุ่น 2014 SHIMAZU

อุณหภูมิ 60 °C

ความดัน 110 กิโลปาสกาล

อัตราการไหลของแก๊สตัวพาในคอลัมน์ซ้าย 30 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของแก๊สตัวพาในคอลัมน์ขวา 5 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง 5 นาทีต่อตัวอย่าง

3.3 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเรนิย์ นิกเกิลชนิดผง ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ตามงานวิจัยของ Dkins H. และ Billica H. (1948) โดย

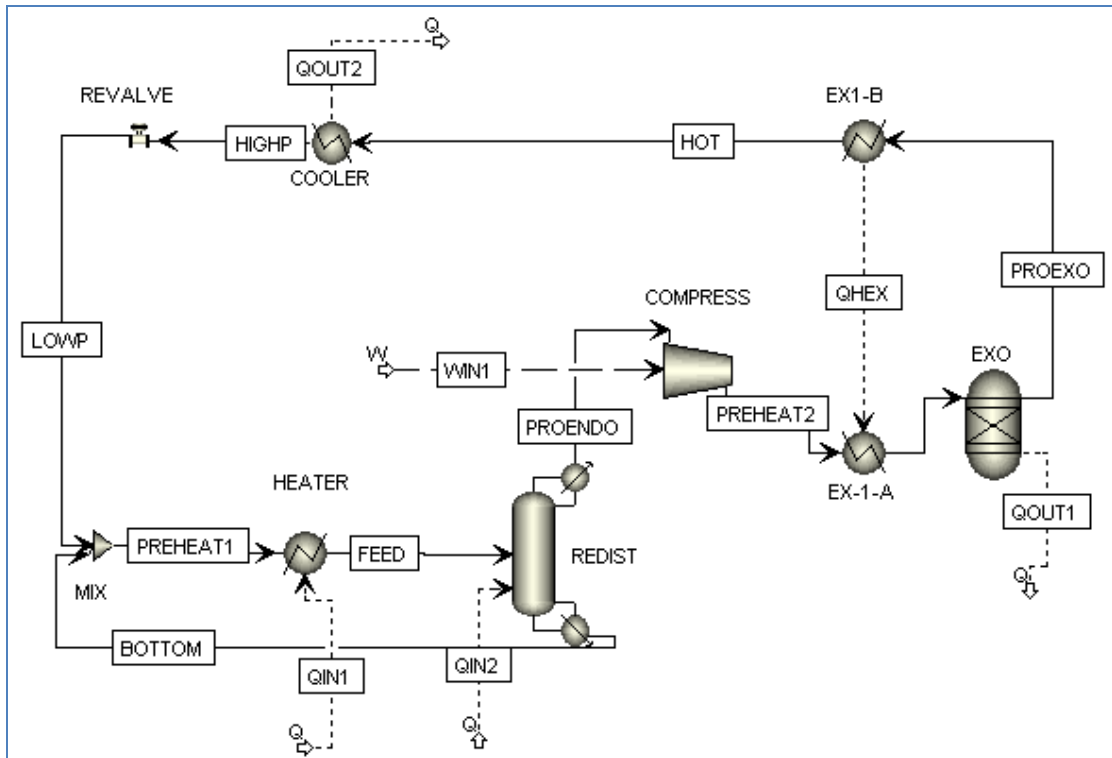
- เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 160 กรัม ในขวดรูปชมพู่ ใช้น้ำกลั่นปริมาตร 600 มิลลิลิตร จากนั้นรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำเย็น
- ใส่ผงอัลลอยด์ เรนิย์ นิกเกิล อะลูมิเนียมน้ำหนัก 125 กรัม โดยใส่ผงอัลลอยด์ลงในขวดรูปชมพู่ครั้งละปริมาณน้อย เพื่อป้องกันการคายความร้อนอย่างรวดเร็วของปฏิกิริยาการชะละลาย โดยใส่ผงอัลลอยด์ให้เสร็จสิ้นภายในเวลา 25-30 นาที และรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่ 50 องศาเซลเซียสเท่าเดิม
- หลังจากเติมผงอัลลอยด์เสร็จสิ้นแล้ว รักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 50 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำร้อนเป็นเวลา 50 นาที เพื่อให้ผงอัลลอยด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง
- ล้างตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ครั้งด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน
- เก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่ล้างแล้ว ในเอทานอลเข้มข้น 95% เพื่อป้องกันการสัมผัสกับอากาศ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ

3.4 การจำลองป้อนความร้อนพลังงานเคมี และพารามิเตอร์ที่ศึกษา

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง และศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน

อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในส่วนของปฏิกิริยาการดูดความร้อน คือ หอกกลั่นเชิงปฏิกิริยา (reactive distillation) เพื่อเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล

อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในส่วนของปฏิกิริยาคายความร้อน คือเครื่องปฏิกรณ์แบบกิบส์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลอง แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังกระบวนการที่ใช้ในการศึกษาการจำลองปฏิกิริยาความร้อนพลังงานเคมี

จากรูปที่ 3.30 สามารถอธิบายกระบวนการจำลองปฏิกิริยาความร้อนพลังงานเคมีได้ดังนี้

ให้ความร้อนแก่อไอโซโพรพานอลโดยเครื่องให้ความร้อน (HEATER) ก่อนที่จะป้อนไอโซโพรพานอลเข้าสู่หอกลั่นเชิงปฏิกิริยา (REDIST) เมื่อเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันขึ้น จะได้อเอซีโตนและไฮโดรเจนที่ขอดีและไอโซโพรพานอลที่ก้นหอ ซึ่งไอโซโพรพานอลที่เหลือจากปฏิกิริยาจะนำกลับมาใช้ที่หอกลั่นนี้อีก ผลิตภัณฑ์ที่ขอดีถูกส่งต่อไปยังเครื่องอัดไอ (COMPRESS) เพื่อเพิ่มความดัน จากนั้นให้ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (EX-1-A-B) ก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (EXO) เพื่อนำความร้อนที่อุณหภูมิสูงไปใช้งาน หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้น ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะถูกส่งไปยังเครื่องหล่อเย็น (COOLER)

เมื่ออุณหภูมิลดลงจึงส่งสารไปลดความดันที่วาล์ว (REVALVE) จากนั้นส่งสารทั้งหมดกลับเข้ามาทำปฏิกิริยาใหม่ วนเช่นนี้เป็นวัฏจักร

จากนั้นทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่อาจจะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพความร้อนของระบบ เพื่อประเมินว่าระบบปั๊มความร้อนนี้สามารถนำความร้อนมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษามีดังนี้

1. อัตราส่วนการป้อนกลับในหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา
2. ช่วงชั้นการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในหอกลั่นเชิงเร่งปฏิกิริยา
3. ชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอล
4. ความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน
5. ค่าความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน
6. ค่าปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
7. อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลเข้าสู่หอกลั่นเชิงปฏิกิริยา

ซึ่งในการศึกษาแบบจำลองใช้ภาวะดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในส่วนการจำลองทางคณิตศาสตร์ทุกภาวะ

ภาวะที่หอกลับเชิงปฏิกิริยา		
อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	0.01	ลิตรต่อนาที
ความดันที่เครื่องควบแน่น	1	บรรยากาศ
ชนิดของเครื่องควบแน่น	Partial-Vapor	
ชนิดของหม้อต้มซ้ำ	Kettle	
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น	ไอโซโพรพานอล = แอซีโตน + ไฮโดรเจน	
จำนวนชั้นของหอกลับเชิงปฏิกิริยา	15	
ภาวะที่เครื่องปฏิกรณ์ชนิดคายความร้อน		
ภาระทางความร้อน	20	วัตต์
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น	แอซีโตน + ไฮโดรเจน = ไอโซโพรพานอล	

ทำการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อน

ศึกษาค่าประสิทธิภาพความร้อนทั้งหมด 4 ชนิด คือ

1. ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)
2. ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (η)
3. ค่าประสิทธิภาพเอนทรานซี (G^*)

บทที่ 4

ผล และอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษาป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอซีโตนและไฮโดรเจนในงานวิจัยนี้ เพื่อต้องการเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล ซึ่งหมายถึงการดึงความร้อนเหลือทิ้งที่อุณหภูมิต่ำมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น โดยใช้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเป็นค่าที่ระบุถึงประสิทธิภาพของระบบป้อนความร้อนนี้ว่ามีประสิทธิภาพมากเพียงใดในการผลิตความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน
2. การศึกษาแบบจำลองระบบป้อนความร้อนพลังงานเคมี

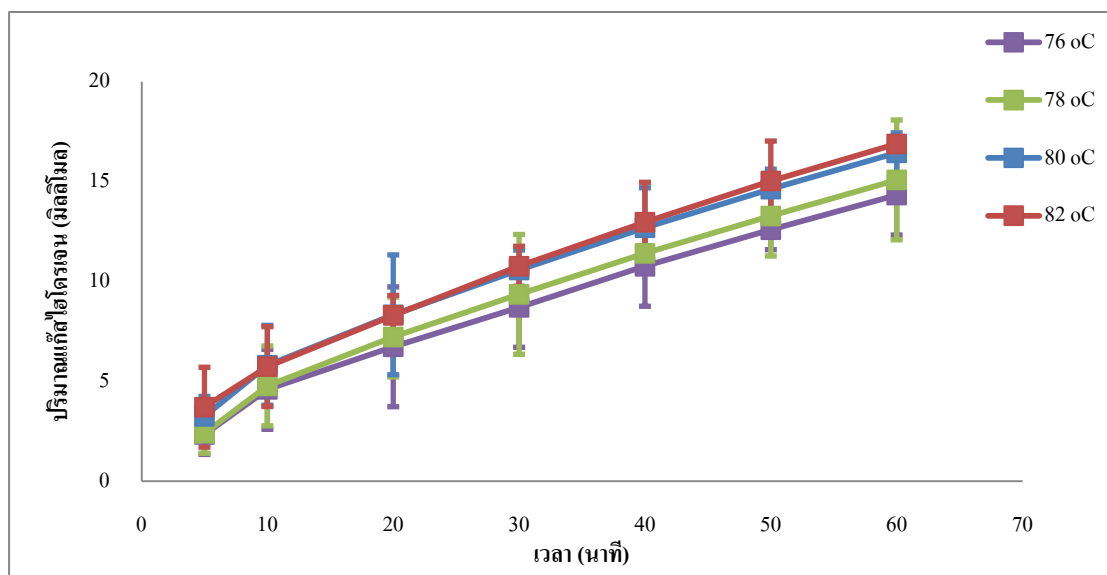
ส่วนที่ 1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน

การศึกษาผลของจลนพลศาสตร์ ทำได้โดยการวัดปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อต้องการคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน พลังงานที่ใช้ในการดูดซับแอซีโตน และค่าคงที่สมดุลของการดูดซับแอซีโตนลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งดำเนินการทดลองตามอุปกรณ์ที่ออกแบบให้มีลักษณะการทำงานใกล้เคียงกับหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา

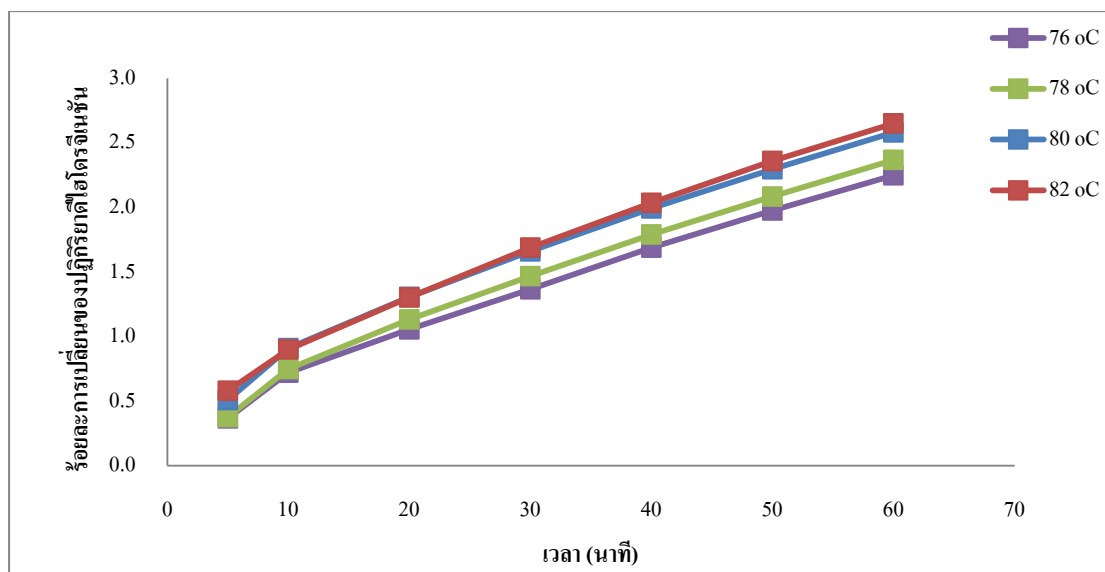
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ในขดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ขดที่ 1)

เมื่อศึกษาผลของจลนพลศาสตร์ในขดแรกซึ่งเป็นการจำลองที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยปรับอุณหภูมิ 82, 80, 78 และ 76 องศาเซลเซียส บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเรนิย์นิกเกิล 1 กรัม และปริมาตรของไอโซโพรพานอล 30 มิลลิลิตรลงในขดที่จำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในขดนี้ ส่งผลให้ปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นการเพิ่ม

อุณหภูมิจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าเพิ่มขึ้น เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนสจึงพบว่ามีความเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยที่อุณหภูมิที่ 82 องศาเซลเซียสเป็นภาวะที่ทำให้ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน และมีร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนสชันมากที่สุด



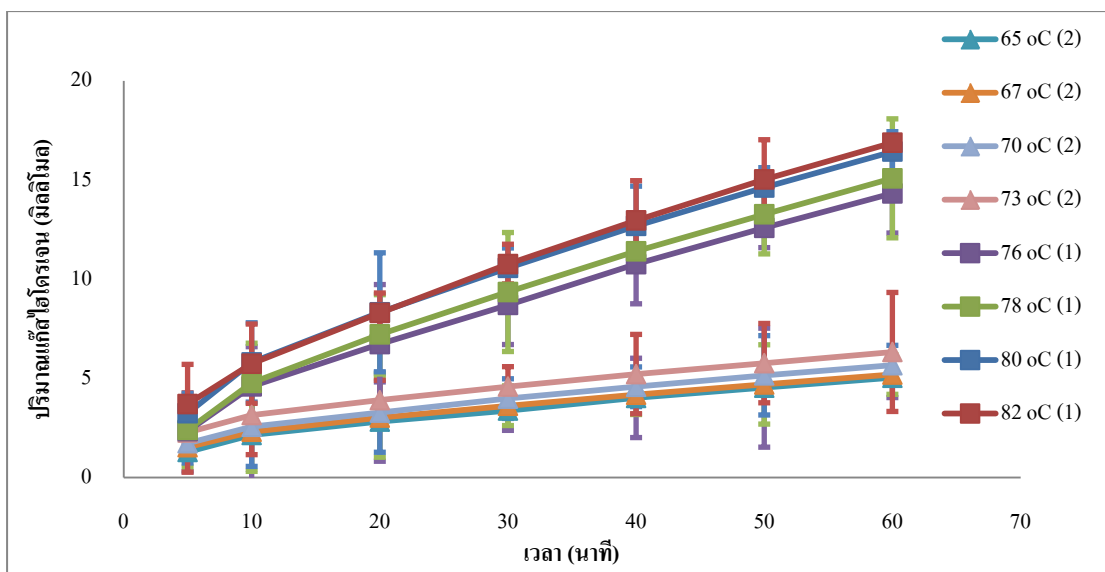
รูปที่ 4.1 ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (มิลลิโมล) ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



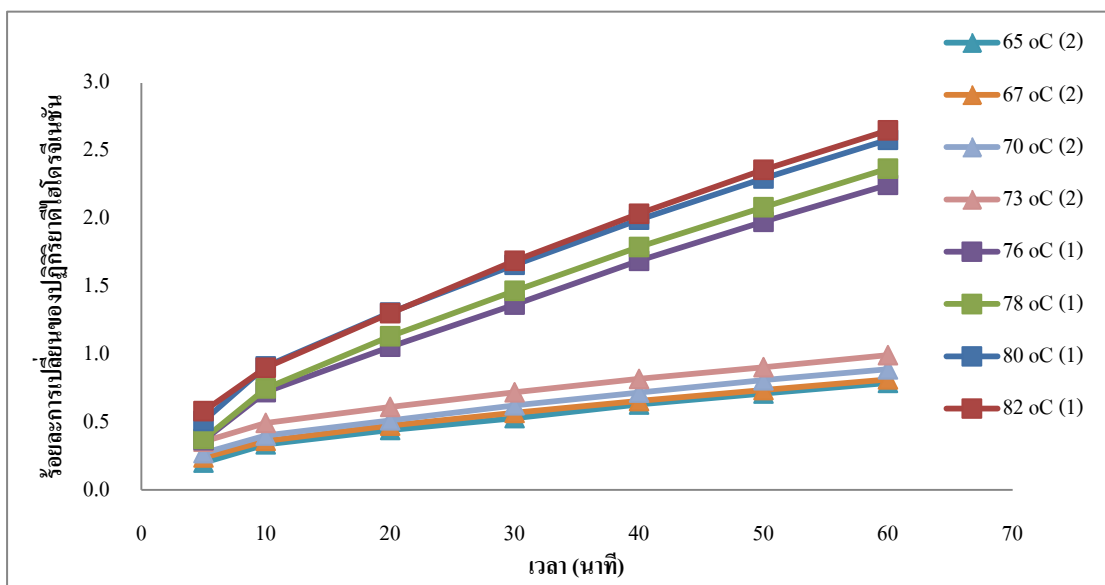
รูปที่ 4.2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (ขวดที่ 2)

เมื่อศึกษาผลของจลนพลศาสตร์ในขวดที่จำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งศึกษาที่อุณหภูมิ 73, 70, 68 และ 65 องศาเซลเซียส บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเรนิย์นิกเกิล ลงในขวดที่จำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และขวดที่จำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ขวดละ 1 กรัม และบรรจุไอโซโพรพานอล 30 มิลลิลิตร ลงในขวดที่จำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเท่านั้น พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในขวดนี้ ส่งผลให้ปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่มีค่าน้อยกว่าขวดที่จำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.3 เมื่อคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน พบว่ามีค่าน้อยกว่าเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจากรูป 4.3 และ 4.4 พบว่าที่ภาวะอุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นมากที่สุด และมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชันมากที่สุด ในการทดลองภายในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (มิลลิโมล) ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (2)

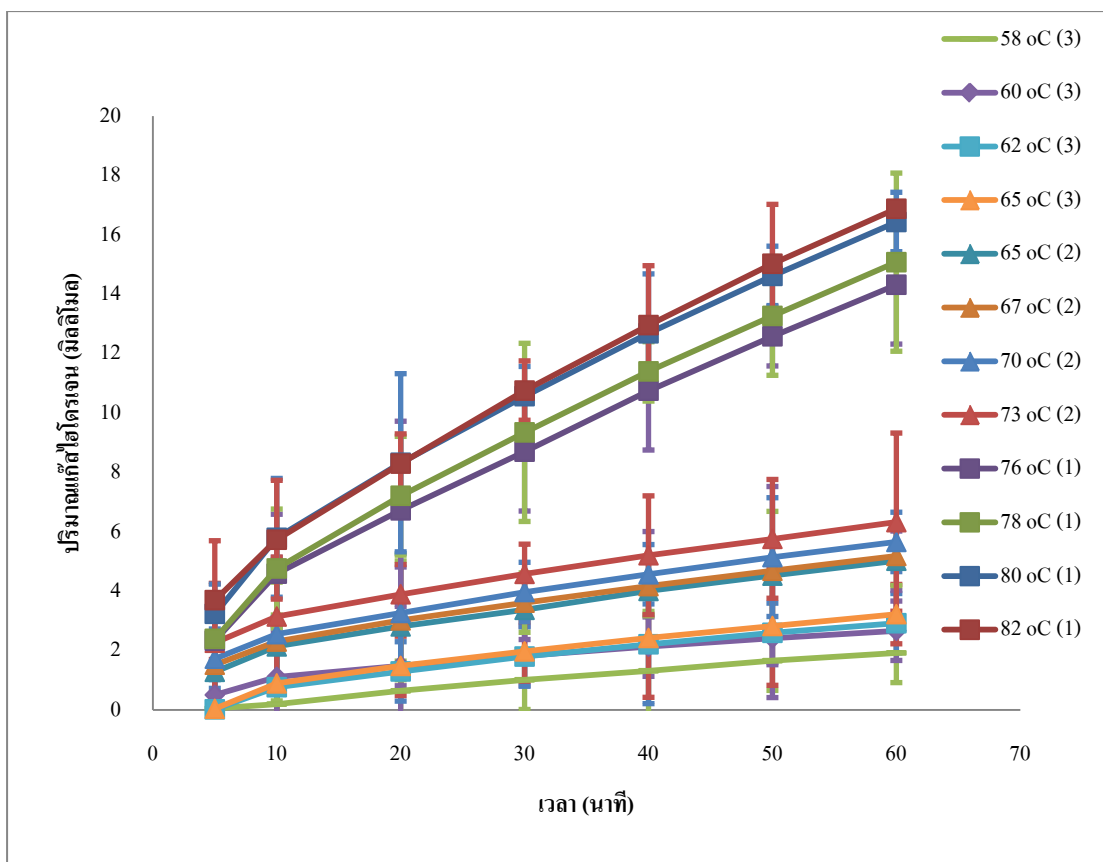


รูปที่ 4.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (2)

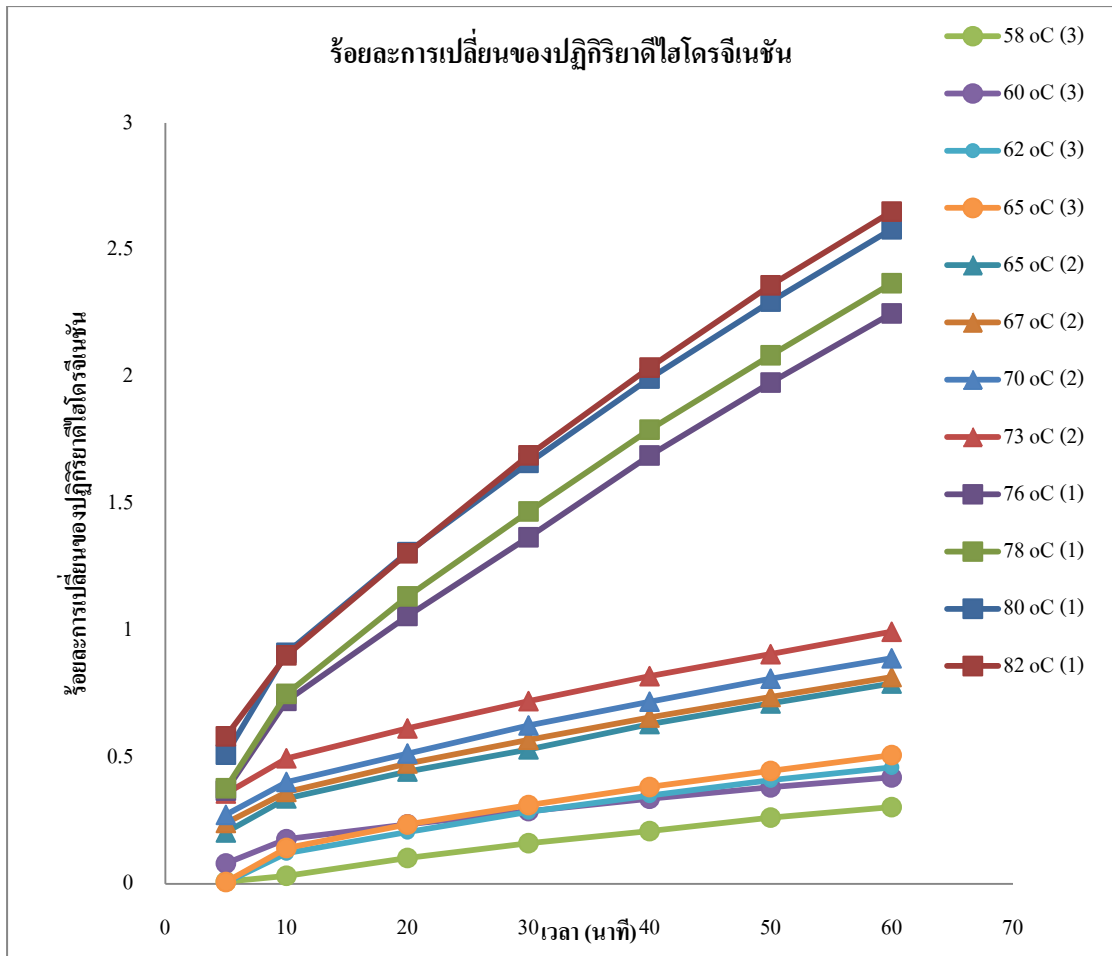
ผลการศึกษาจนผลศาสตร์ในเขตจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (เขตที่ 3)

เมื่อศึกษาผลของจนผลศาสตร์ในเขตที่จำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งศึกษาที่อุณหภูมิ 65, 62, 60 และ 58 องศาเซลเซียส บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเรณีย์นิกเกิล ลงในเขตที่จำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เขตที่จำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเขตที่จำลองอุณหภูมิ 60 เขตละ 1 กรัม และบรรจุไอโซโพรพานอล 30 มิลลิลิตร ลงในเขตที่จำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในเขตนี้ ส่งผลให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่มีปริมาณน้อยกว่าในเขตอื่นๆ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิต่ำที่สุดในการศึกษา จึงเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันได้ต่ำที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน พบว่ามีค่าน้อยที่สุดเช่นกัน และพบว่าที่ภาวะอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด และมีร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมากที่สุดของการทดลองในเขตจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 นี้พบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจน และร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันภายในเขตจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีค่ามาก แตกต่างกับผลการทดลองในเขตอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันนี้เกิดในเขตจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นหลัก



รูปที่ 4.5 ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (มิลลิโมล) ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (3)



รูปที่ 4.6 ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซพรพานอลในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (3)

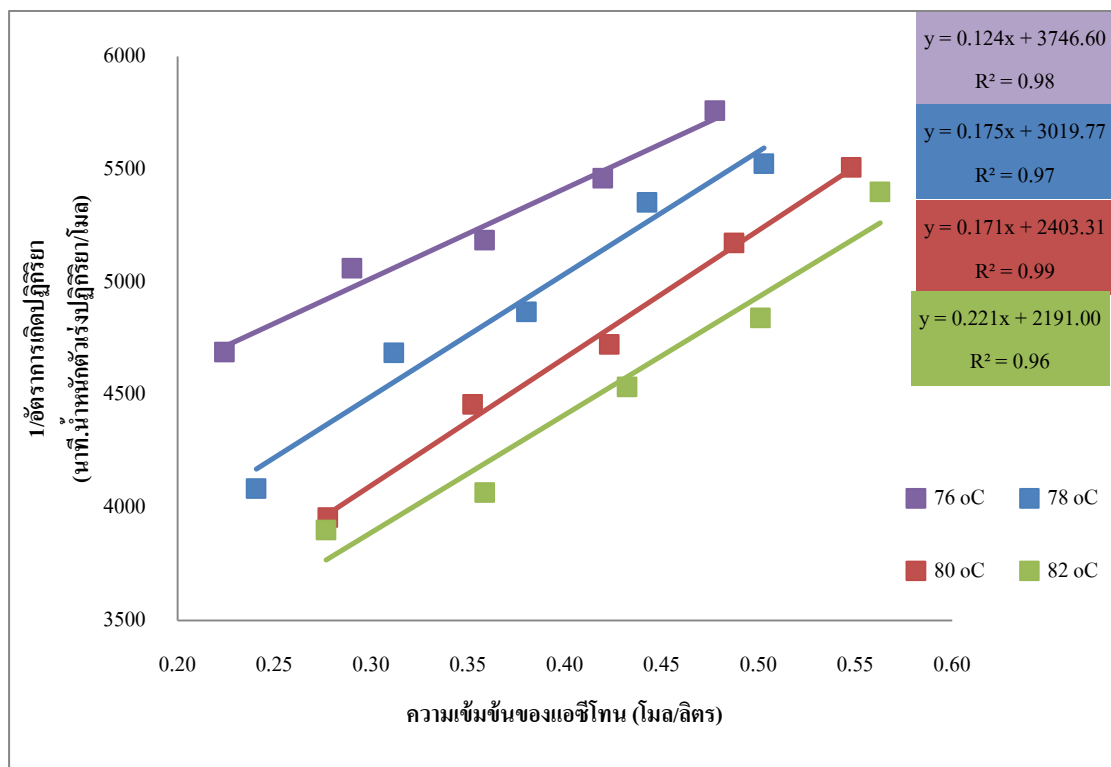
การคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (k) และค่าคงที่การดูดซับแอซีโทนลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา (K_{ace})

หลังจากการทดลอง นำผลปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นของแอซีโทน เนื่องจากปริมาณโมลของแอซีโตนและไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากันตามดุลปฏิกิริยาเคมี นำผลของความเข้มข้นของแอซีโทนมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ของสมการของ Langmuir–Hinshelwood โดยเขียนกราฟระหว่างส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\frac{1}{r_d}$) และความเข้มข้นของแอซีโทน (C_{ace}) ดังสมการต่อไปนี้

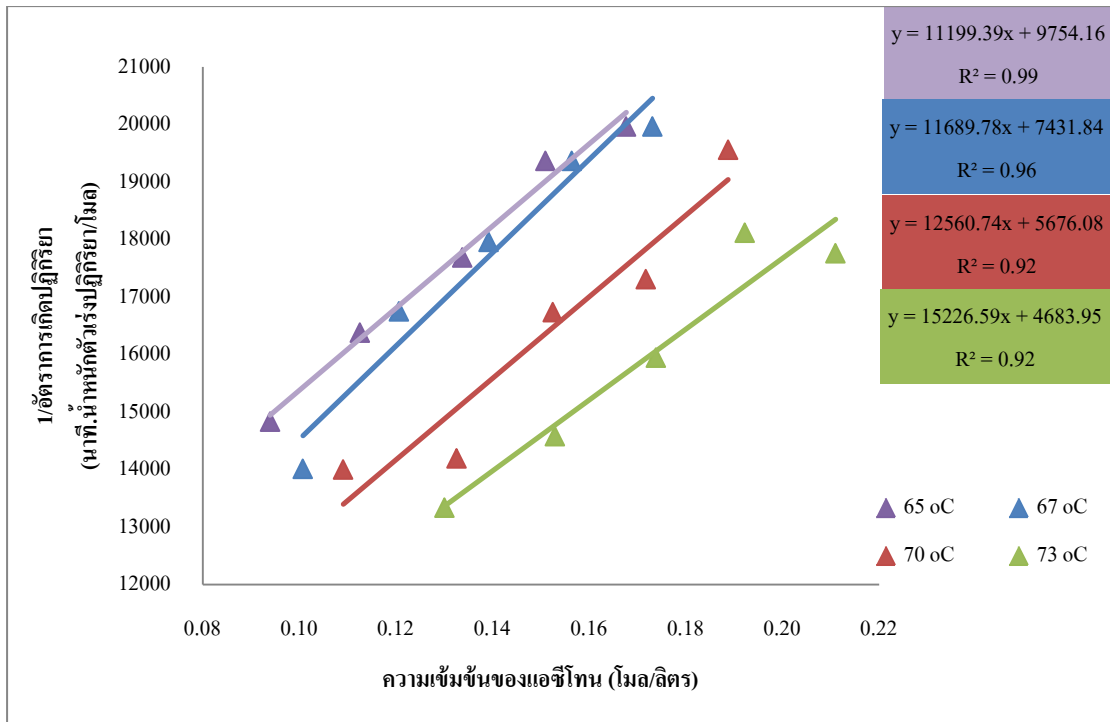
$$\frac{1}{r_d} = \frac{1}{k} + \frac{K_{ace}}{k} C_{ace} \quad (4.1)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{r_d}$ และ C_{ace} ของขวดที่จำลองอุณหภูมิ 80, 70 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้น โดยค่า R^2 ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 0.9 แสดงดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จากสมการที่ 4.1 สามารถนำค่าจุดตัดแกนและค่าความชันที่ได้จากสมการเชิงเส้น ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ได้แก่ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (k) และ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแอซีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (K_{acc})

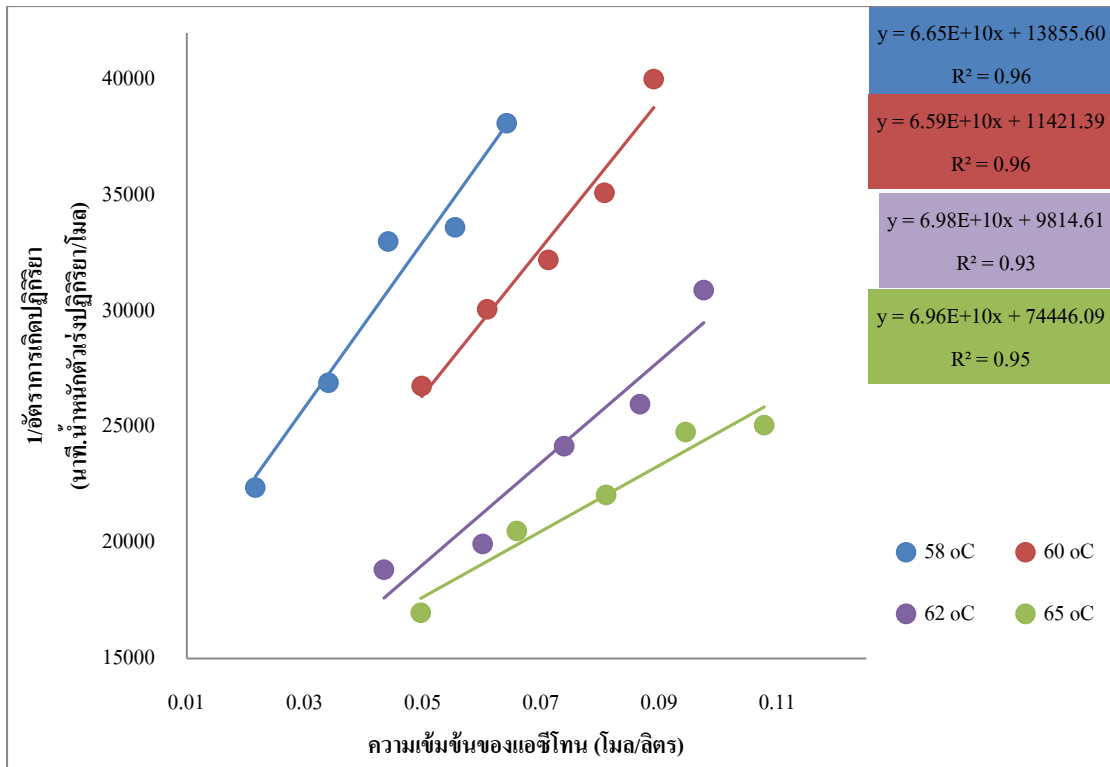
เมื่อพิจารณาค่าความชัน และจุดตัดแกนของสมการเชิงเส้น พบว่าที่ขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 70 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอซีโทนและส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอซีโตนและส่วนกลับของอัตรา
การเกิดปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอซีโตนและส่วนกลับของอัตรา
การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

จากสมการเชิงเส้นจะได้ค่าจุดตัดแกน $\left(\frac{1}{k}\right)$ ซึ่งค่าส่วนกลับของจุดตัดแกน คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (k) และเมื่อนำค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันคูณกับค่าความชันของกราฟ $\left(\frac{K_{ace}}{k}\right)$ จะได้ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับเอซีโตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (K_{ace}) ซึ่งแสดงค่าดังตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาที่ขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยามากที่สุด ซึ่งค่านี้แสดงถึงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในหนึ่งวินาที หากค่านี้มีค่ามาก แสดงว่าเกิดผลิตภัณฑ์ได้เร็ว ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสพบว่ามีปริมาณมากที่สุด สอดคล้องกับค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงเหมาะสมในปฏิกิริยาดูดความร้อน เพราะสมดุลของปฏิกิริยาเคมีดำเนินไปด้านหน้าได้ดี เกิดผลิตภัณฑ์มาก

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (k) และค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแอมโมเนีย (K_{acc}) ในแต่ละขวดที่ทำการทดลอง

ขวดที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	จุดตัดแกน	ความชัน	k	K_{acc}
1	76	3746.60	1.24E-01	2.67E-04	3.32E-05
1	78	3019.77	1.75E-01	3.31E-04	5.79E-05
1	80	2403.31	1.71E-01	4.16E-04	7.10E-05
1	82	2191.00	2.21E-01	4.56E-04	1.01E-04
2	65	9754.16	1.12E+04	1.03E-04	1.15E+00
2	67	7431.84	1.17E+04	1.35E-04	1.57E+00
2	70	5676.08	1.26E+04	1.76E-04	2.21E+00
2	73	4683.95	1.52E+04	2.13E-04	3.25E+00
3	58	13835.60	6.65E+10	7.23E-05	4.80E+06
3	60	11421.39	6.59E+10	8.76E-05	5.77E+06
3	62	9814.61	6.98E+10	1.02E-04	7.12E+06

การคำนวณค่าพรีเอกโพรเนนเชียลของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (k_0) และพลังงานกระตุ้น (E_a)

คำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของแต่ละขวดจำลองอุณหภูมิโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ และ $\frac{1}{T}$ ซึ่งเป็นไปตามสมการของ อาร์เรเนียส โดยค่าส่วนกลับของ

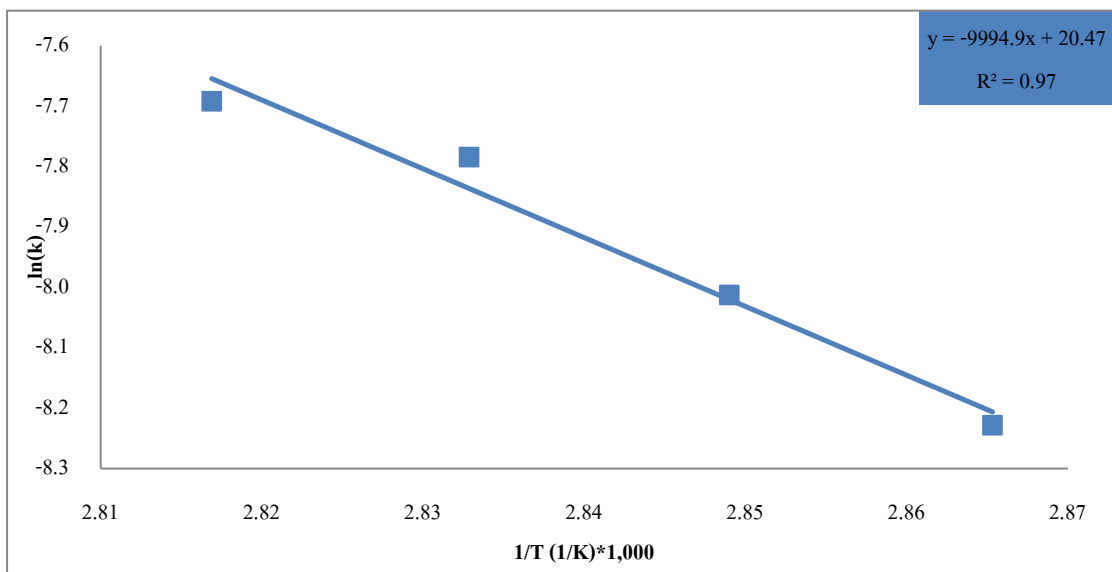
อุณหภูมิและค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา
ดีไฮโดรจีเนชันแสดงดังตารางที่ 4.2

$$\ln(k) = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (4.2)$$

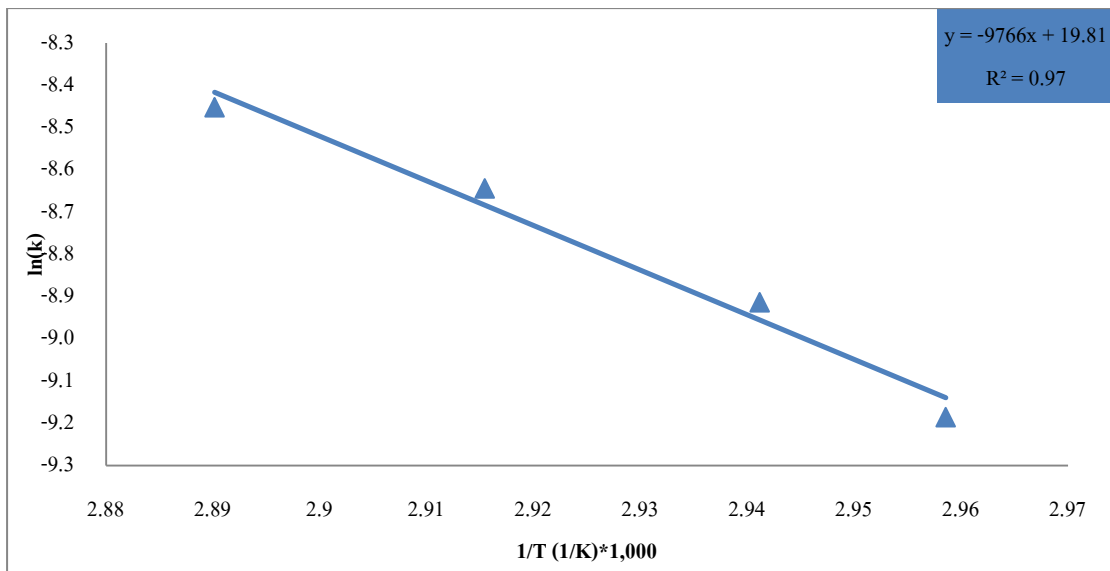
ตารางที่ 4.2 ค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ($\frac{1}{T}$) ในแต่ละขวดจำลองอุณหภูมิ และค่าลอการิทึมธรรมชาติ
ของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ($\ln(k)$)

ขวดที่	อุณหภูมิ (°C)	1/T*10 ³ (1/K)	ln(k)
1	76	2.87	-8.23
1	78	2.85	-8.01
1	80	2.83	-7.78
1	82	2.82	-7.69
2	65	2.96	-9.19
2	67	2.94	-8.91
2	70	2.92	-8.64
2	73	2.89	-8.45
3	58	3.02	-9.54
3	60	3.00	-9.34
3	62	2.99	-9.19
3	65	2.96	-8.92

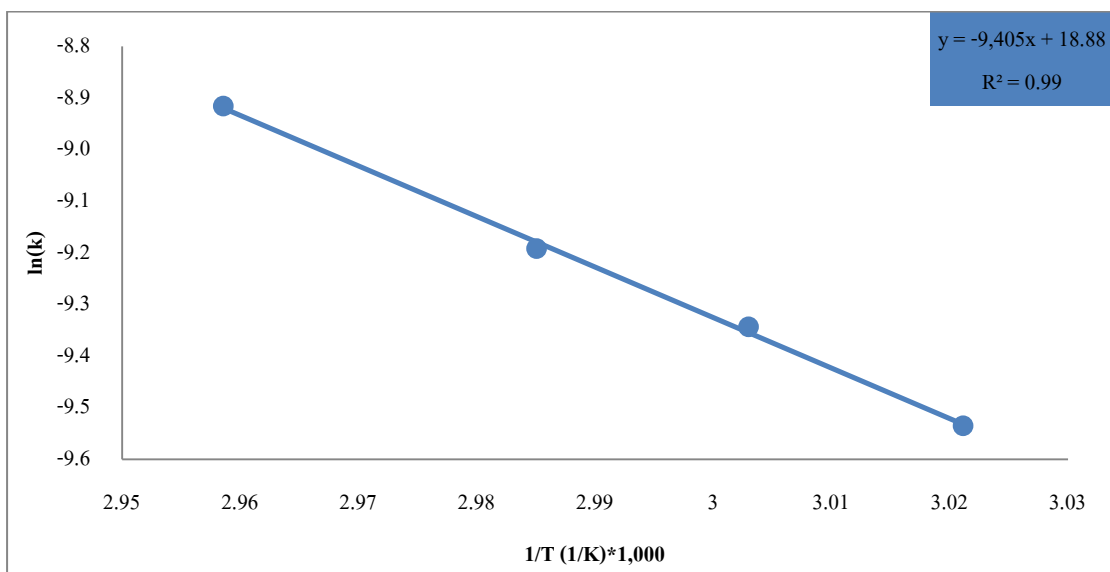
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิ และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้นในทุกจุดที่เกิดปฏิกิริยา แตกต่างกันที่ค่าความชันและจุดตัดแกน แสดงดังรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ โดยความชันในจุดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ 70 และ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในจุดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในเขตจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในเขตจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

จากนั้นจึงนำค่าจากสมการเชิงเส้น คำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E_a) ได้จากการนำค่าคงที่ของแก๊สคูณกับความชันของกราฟ และค่าพรีเอกโพรเนนเชียล (k_0) ส่วนค่าคงที่ปฏิกิริยาคำนวณได้จากการถอดค่าลอการิทึมธรรมชาติของจุดตัดแกน ค่าพลังงานกระตุ้นเป็นค่า

พลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดขึ้น ค่าพลังงานกระตุ้นที่มีค่าต่ำ แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ให้แก่ปฏิกิริยามีค่าต่ำ สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย จากตารางที่ 4.3 การที่ขวดจำลองอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียสนั้นมีค่าพลังงานกระตุ้นสูงที่สุด แต่พลังงานกระตุ้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่อุณหภูมิ 70 และ 60 องศาเซลเซียส เพียงร้อยละ 2 และ 6 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าคงที่อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันสูงกว่าถึง 5 เท่า ดังนั้นค่า k_0 จึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา

ส่วนค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน แสดงถึงอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ค่าคงที่อัตราเร็วที่มีค่ามาก แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาและให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่มาก จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีค่าสูงสุด สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิสูงนั้นช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบจากข้อมูลของ Willium, 2011 พบว่ามีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา $3.51E+5$ โมล/กรัมตัวเร่งปฏิกิริยา/นาที่ และพลังงานกระตุ้น $72,380$ จูล/โมล ซึ่งผลที่ได้ในงานวิจัยมีค่า พลังงานกระตุ้นที่มากกว่า แต่มีค่าคงที่อัตราเร็วที่มากกว่า อาจเป็นผลมาจากลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ศึกษาที่ไม่มีการส่งผลิตภัณฑ์จากส่วนอุณหภูมิต่ำกลับมายังส่วนอุณหภูมิสูง จึงทำปฏิกิริยาดำเนินไปด้านหน้าได้ดี และอัตราการกวนสารที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์คายตัวออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาจึงมีค่าสูง

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าพรีเอ็กโพเนนเชียลของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (k_0) และพลังงานกระตุ้น (E_a) ในแต่ละขวดที่ทำการทดลอง

ขวดที่	จุดตัดแกน	ความชัน	k	Ea (J/mol)
1	20.47	-9,994.9	7.72E+08	83,097
2	19.81	-9,766.0	4.01E+08	81,194
3	18.88	-9,405.0	1.58E+08	78,193

การคำนวณค่าพรีเอกโพรเนนเชียลของค่าคงที่สมดุลการดูดซับแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (K_0) และพลังงานการดูดซับแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (H_{ad})

จากตารางที่ 4.1 สามารถใช้ค่าอุณหภูมิ และค่าคงสมดุลการดูดซับของแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (K_{ace}) มาคำนวณค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงสมดุลการดูดซับแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา $\ln(K_{ace})$ ดังตารางที่ 4.4 เพื่อคำนวณหาค่าพรีเอกโพรเนนเชียลของการดูดซับแอสีโทน (K_0) และค่าพลังงานของการดูดซับแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (H_{ad}) ดังสมการของแวนฮอฟฟ์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.3 โดยเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{T}$ และ $\ln(K_{ace})$

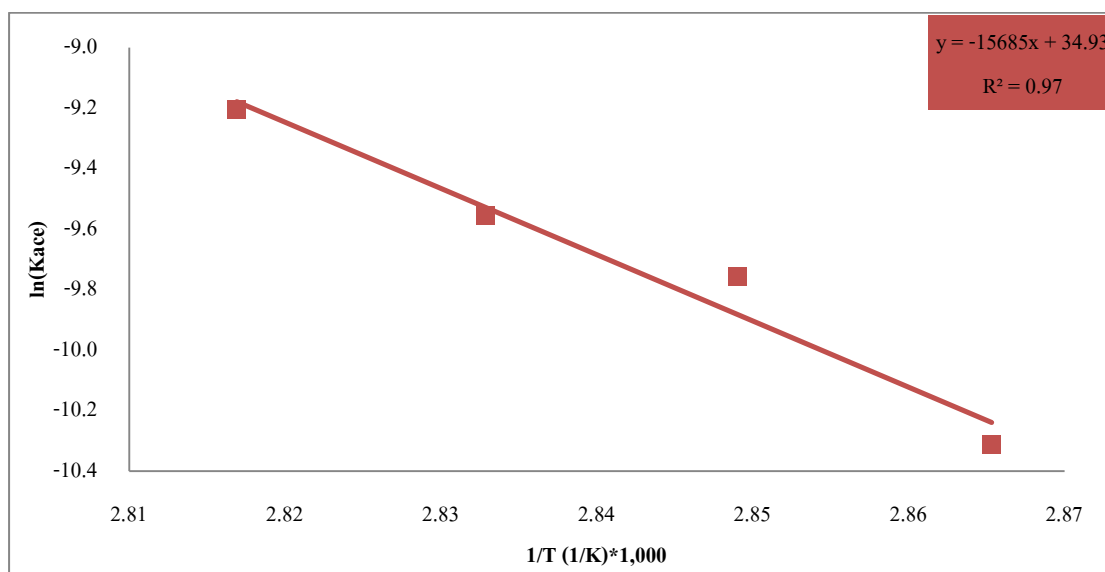
$$\ln(K_{ace}) = \ln K_0 + \frac{H_{ad}}{RT} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.4 ค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในแต่ละขวดจำลองอุณหภูมิ ($\frac{1}{T}$) และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงสมดุลการดูดซับแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ($\ln(K_{ace})$)

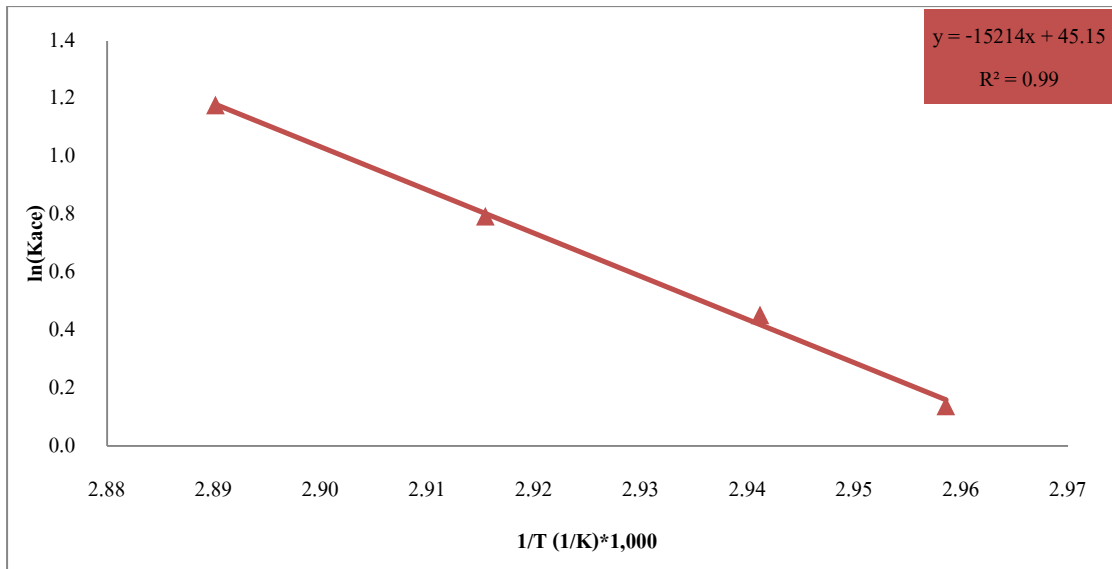
ขวดที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$1/T \cdot 10^3$ (1/K)	$\ln(K_{ace})$
1	76	2.87	-10.31
1	78	2.85	-9.76
1	80	2.83	-9.55
1	82	2.82	-9.20
2	65	2.96	0.14
2	67	2.94	0.45
2	70	2.92	0.79
2	73	2.89	1.18

ขวดที่	อุณหภูมิ (°C)	$1/T \cdot 10^3$ (1/K)	$\ln(K_{ace})$
3	58	3.02	15.39
3	60	3.00	15.57
3	62	2.99	15.78
3	65	2.96	16.05

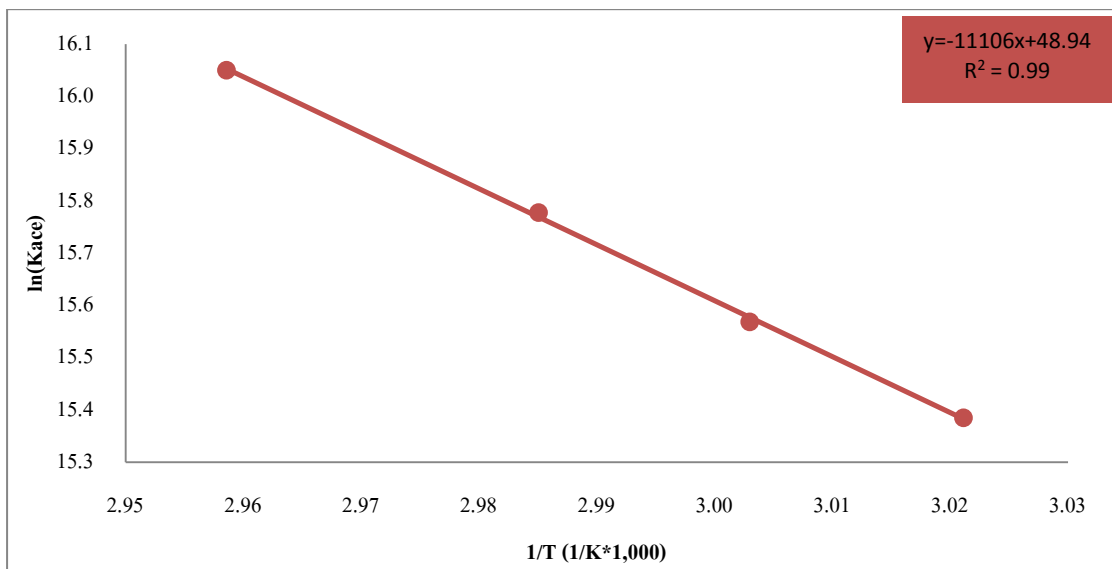
เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิ และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงสมดุลการดูดซับแอซีโทน จะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.13. 4.14 และ 4.15 โดยเป็นความสัมพันธ์จากขวดจำลองอุณหภูมิ 80, 70 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากรูปพบว่าความชันของขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงสมดุลการดูดซับแอซีโทน



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงสมดุลการดูดซับแอสีโทน



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ ในขวดจำลองอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงสมดุลการดูดซับแอสีโทน

นำค่าจุดตัดแกนจากสมการเชิงเส้นมาคำนวณค่าพรีเอ็กโพรเนนเชียลของการดูดซับแอสีโทน (K_0) โดยถอดค่าลอการิทึมธรรมชาติ ส่วนค่าพลังงานการดูดซับ (H_{ad}) คำนวณได้จากค่าความชันคูณกับค่าคงที่ของแก๊ส ซึ่งสรุปผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณค่าพรีเอ็กโพรเนนเชียลของค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K_0) และพลังงานในการดูดซับของแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนส (H_{ad}) ในแต่ละขดที่ทำการทดลอง

ขดที่	จุดตัดแกน	ความชัน	K_0	H_{ad} (J/mol)
1	34.93	-15,685	1.48E+15	-130,405
2	45.15	-15,214	4.05E+19	-126,489
3	48.94	-11,106	1.80E+21	-92,335

นำผลของค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา พลังงานกระตุ้น ค่าคงที่สมดุลการดูดซับแอสีโทน และพลังงานในการดูดซับแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ในแต่ละขดจำลองอุณหภูมิ หอกลั่น ไปใช้ในส่วนของการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางการค้า ASPEN Plus

ส่วนที่ 2 การจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาส่วนของการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมทางการค้า ASPEN Plus นี้ เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของทั้งระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล แอสีโทนและไฮโดรเจน ซึ่งศึกษาชนิดของค่าประสิทธิภาพต่างกัน 3 ชนิด

1. ประสิทธิภาพสัมประสิทธิ์การทำงาน (COP) จะพิจารณาปริมาณความร้อนที่ได้จากระบบเป็นหลัก
2. ประสิทธิภาพเอนทรานซี (G^*) จะพิจารณางานที่เกิดขึ้นจากระบบ ซึ่งเป็นการคำนวณงานที่เกิดขึ้นอย่างหยาบๆ จากผลคูณของภาระความร้อนกับอุณหภูมิ
3. ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (η) จะพิจารณาถึงงานที่ได้ระบบจากระบบจริง

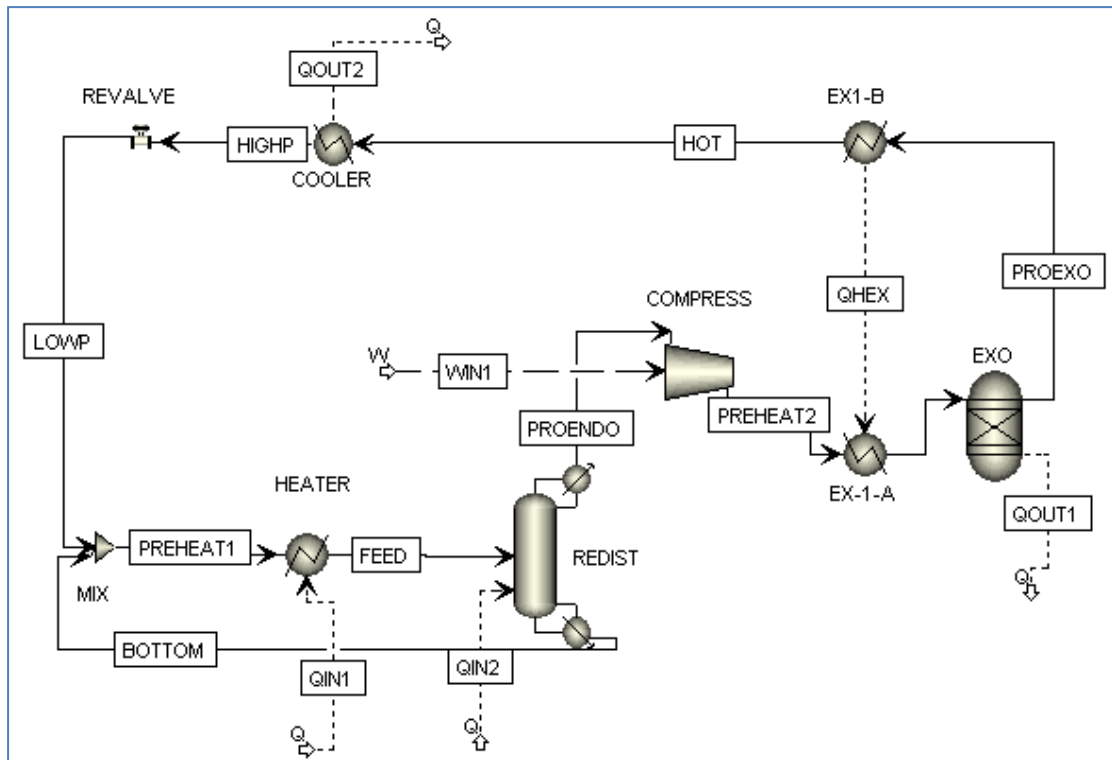
ซึ่งในการใช้งานจากระบบปั๊มความร้อน สามารถพิจารณาค่าประสิทธิภาพตามลักษณะของการใช้งาน แต่ในความเห็นของผู้วิจัยนั้นจะพิจารณาค่าประสิทธิภาพเอ็ทเซอร์จีเป็นหลัก เนื่องจากเป็นค่าที่คำนวณจากงานที่สามารถใช้งานได้จริง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากระบบยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งหมด จะต้องมีการสูญเสียงานเกิดขึ้น อีกทั้งเอ็ทเซอร์จีเป็นงานที่พิจารณาถึงคุณภาพ และปริมาณงานที่ได้ โดยคุณภาพดังกล่าวหมายถึงค่าอุณหภูมิ อุณหภูมิสูงจะสามารถนำไปใช้งานได้มากกว่า แต่สัมประสิทธิ์สมรรถนะพิจารณาถึงปริมาณเพียงอย่างเดียว หากความร้อนที่เกิดขึ้นมีอุณหภูมิต่ำ แต่ปริมาณมาก จะสามารถนำปริมาณความร้อนนั้น ไปใช้งานได้น้อยลง

โดยในการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบปั๊มความร้อนจะศึกษาพารามิเตอร์ทั้งหมด 7 ชนิดคือ

1. อัตราส่วนการป้อนกลับในหอกลับเชิงปฏิกิริยา
2. ช่วงชั้นการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันในหอกลับเชิงเร่งปฏิกิริยา
3. ชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอล
4. ความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจิเนชัน
5. ค่าความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจิเนชัน
6. ค่าปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
7. อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลเข้าสู่หอกลับเชิงปฏิกิริยา

1. ผลจากการศึกษาอัตราส่วนการป้อนกลับ

ศึกษาผลของอัตราส่วนการป้อนกลับ ตั้งแต่ 1 ถึง 10 และกำหนดภาวะการจำลองดังตารางที่ 3.4 ซึ่งสร้างแบบจำลองที่มีอุปกรณ์ที่สำคัญคือ หอกลับเชิงปฏิกิริยา และเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจิเนชัน แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แผนผังกระบวนการกู้คืนความร้อนพลังงานเคมี ในกรณีศึกษาผลของ
อัตราส่วนการป้อนกลับ

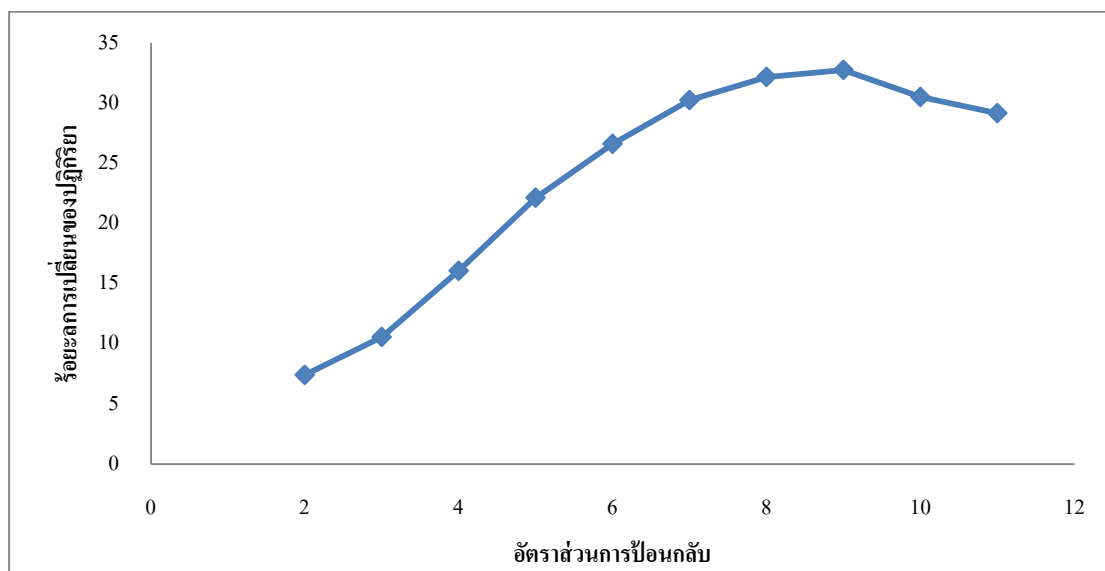
อัตราส่วนการป้อนกลับคือ อัตราการไหลของของเหลวกลับเข้าสู่หอกลั่นต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ แสดงดังสมการที่ 4.4

$$R = \frac{L}{D} \quad (4.4)$$

โดยที่ R = อัตราส่วนการป้อนกลับ. L = อัตราการไหลของของเหลวผลิตภัณฑ์กลับเข้าสู่หอกลั่น และ D = อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ

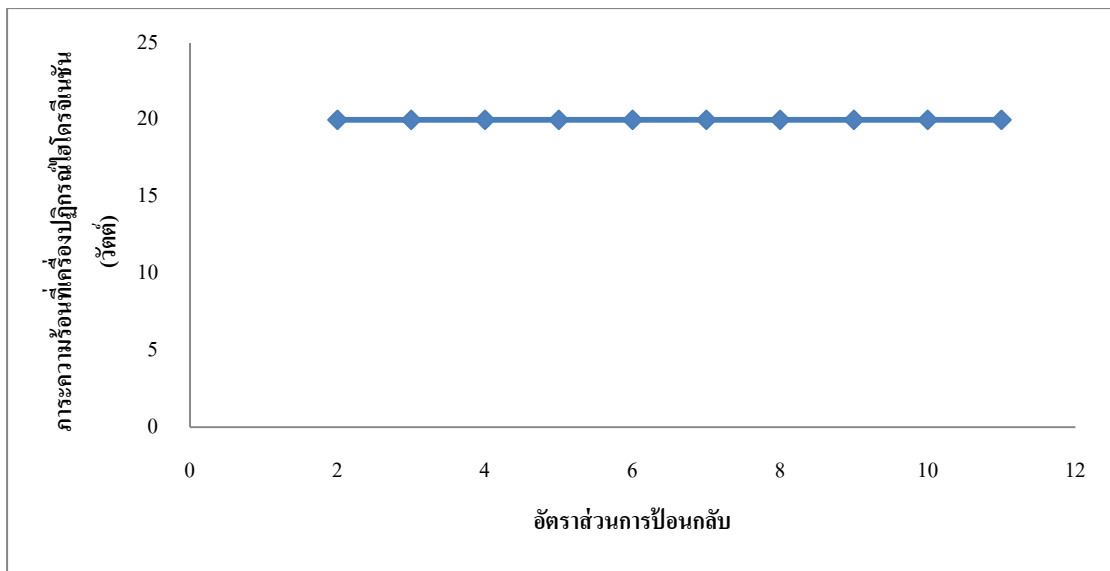
การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับ เป็นการเพิ่มปริมาณสารให้กลับเข้าสู่หอกลั่นมากขึ้น ส่งผลให้ไอโซโพรพานอลที่หลีกเลี่ยงการทำปฏิกิริยาที่ยอดหอ กลับเข้ามาเพื่อทำปฏิกิริยาภายในหอกลั่นเชิงปฏิกิริยามากขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนในปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลจึงมีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 4.17 พบว่าเกิดปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันถึงร้อยละ 33 ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใช้หอกลั่นเชิงปฏิกิริยา (ภาวะดุลของปฏิกิริยา) จะเกิดปฏิกิริยาได้เพียงร้อยละ 10 เท่านั้น เนื่องจากระบบที่มีหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา ไอโซโพรพานอลสามารถเกิดปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอซีโตน และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสารที่มีจุดเดือดต่ำ จะถูกแยกออก

จากหอกันทางด้านบนทันทีที่เกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น เพราะผลิตภัณฑ์ถูกแยกออกจากระบบสมดุล



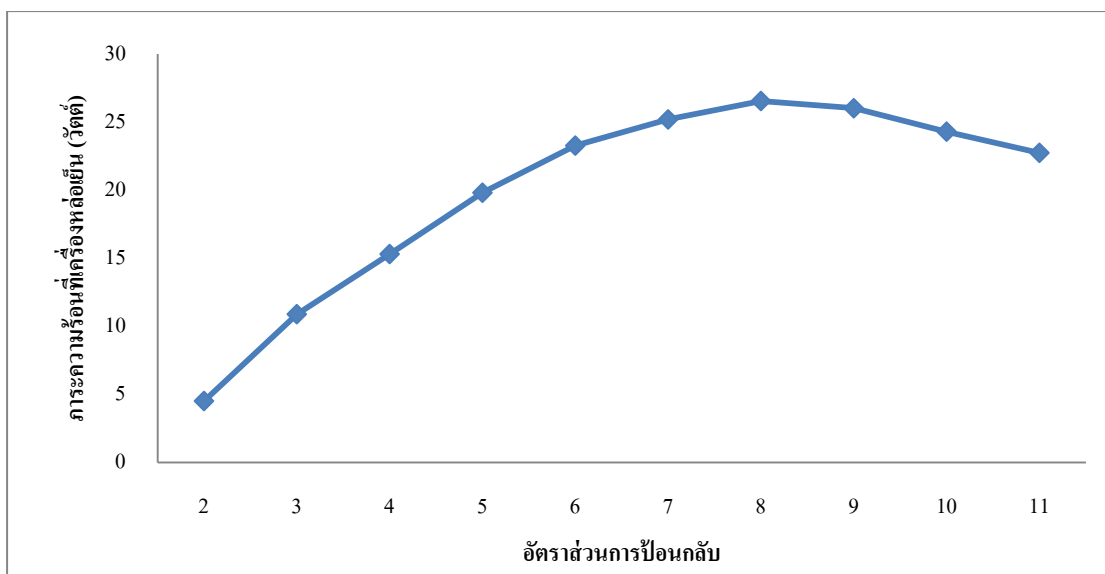
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการป้อนกลับต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

เมื่อเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแอซีโทน และไฮโดรเจนมากขึ้น ซึ่งแอซีโทนและไฮโดรเจนนี้จะถูกส่งไปเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน จึงเป็นการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันให้มีปริมาณมากขึ้น การเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นให้กับระบบ สมดุลจะดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาจึงมากขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับ โดยที่ความร้อนนี้จะเป็นความร้อนอุณหภูมิสูง (ประมาณ 200 องศาเซลเซียส) ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น จากรูปที่ 4.18 พบว่าความร้อนที่ดึงไปใช้จากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่าคงที่ เนื่องจากถูกกำหนดให้ดึงค่าพลังงานความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันไปใช้อย่างคงที่ เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์อื่นๆ ภายในระบบป้อนความร้อน



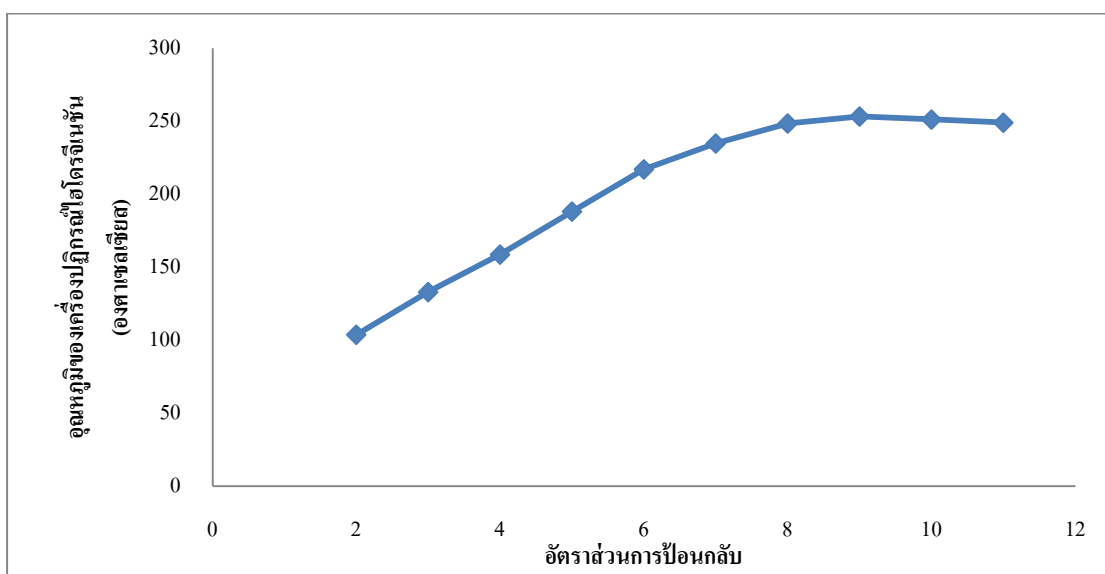
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการป้อนกลับต่อภาวะความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน

ความร้อนที่เหลือจากการดึงไปใช้ประโยชน์ที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับ เป็นการเพิ่มค่าความร้อนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อดึงความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันด้วยค่าที่เท่ากัน ทำให้มีความร้อนที่เหลือถูกดึงไปใช้ที่เครื่องหล่อเย็น ดังรูปที่ 4.19 แต่คุณภาพความร้อนที่ได้จากเครื่องหล่อเย็นนี้มีค่าต่ำกว่าคุณภาพความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน เนื่องจากเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิขาเข้า และขาออกของเครื่องหล่อเย็น จึงมีอุณหภูมิต่ำลง



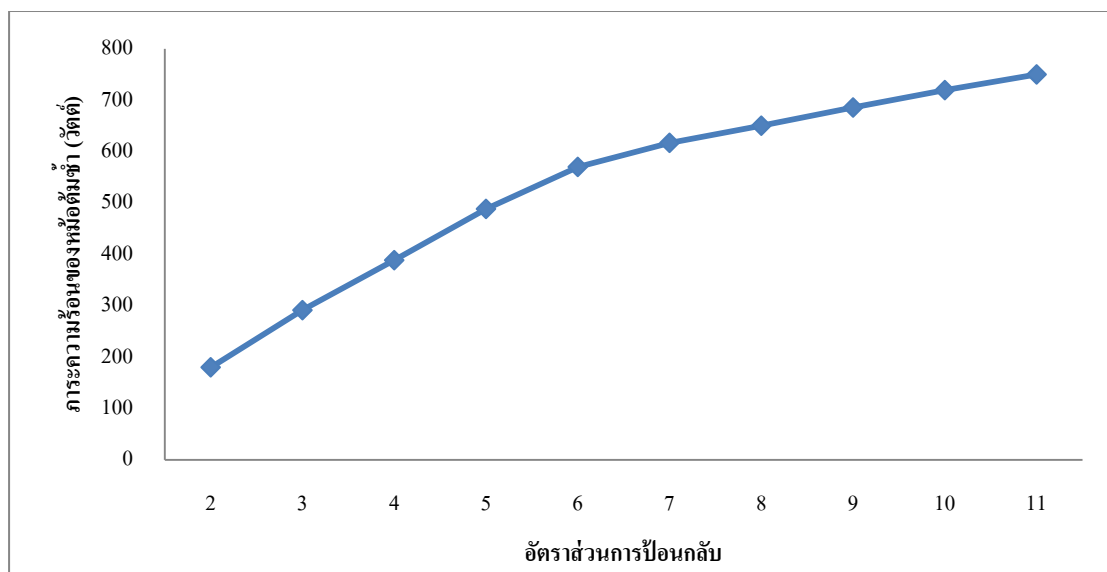
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์อัตราส่วนการป้อนกลับต่อค่าภาวะความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับ ทำให้อุณหภูมิขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.20 สอดคล้องกับค่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันที่ได้แสดงไปใน รูปที่ 4.19 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นด้วย คุณภาพของความร้อนจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจากรูปพบว่า เมื่อค่าอัตราส่วนการป้อนกลับเป็น 11 อุณหภูมิขาออกของเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่าเป็น 249.1 องศาเซลเซียส



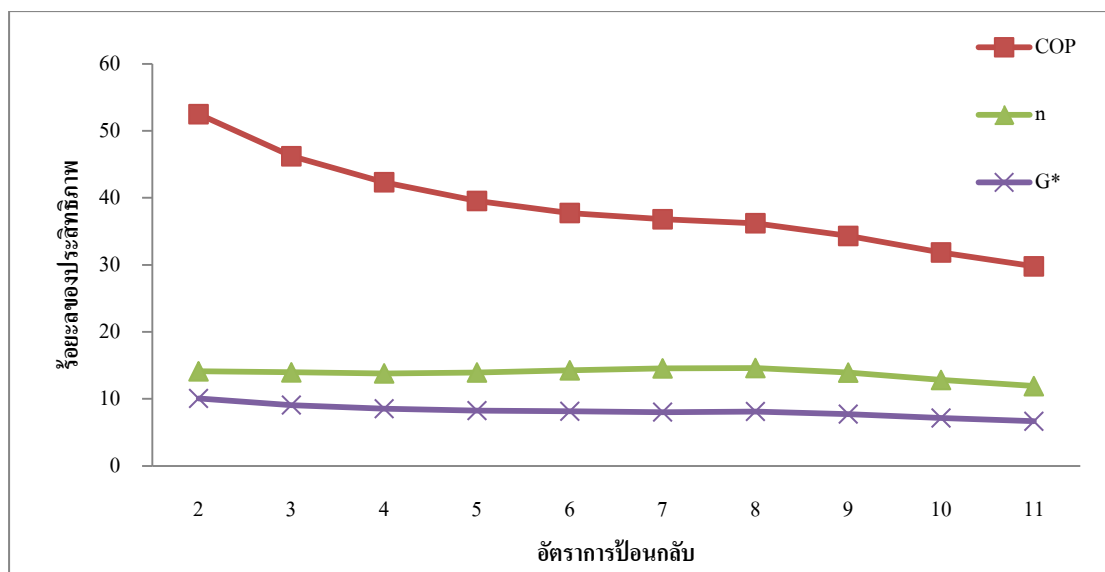
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับต่อค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน

การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับที่หอกลับเชิงปฏิกิริยา ส่งผลให้มีสารกลับเข้าสู่ภายในหอกลับมากขึ้น หม้อต้มซ้ำจึงต้องให้พลังงานความร้อนกับสารมากขึ้น เพื่อให้อุณหภูมิสูงเพียงพอ ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับจึงเป็นการเพิ่มภาระทางความร้อนให้กับหม้อต้มซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับต่อค่าภาระความร้อนของหม้อต้มซ้ำ

ผลจากการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันจึงเพิ่มขึ้น แต่กลับทำให้ค่าประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากการเพิ่มภาระทางความร้อนของหม้อต้มซ้ำมากกว่า การเพิ่มปริมาณความร้อนอุณหภูมิสูงที่ได้รับจากปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งค่าความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีทีที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ดีไฮโดรจีเนชันมีค่า 20.00, 6.20 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีทีที่ปลดปล่อยจากเครื่องหล่อเย็นมีค่า 15.3, 3.71 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีทีที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน 29.66, 4.77 วัตต์ และค่าภาระความร้อน และเอ็กเซอร์จีทีที่หม้อต้มซ้ำมีค่า 388.28, 62.16 วัตต์ ค่าภาระความร้อนนี้เป็นค่าที่ได้จากภาวะอัตราส่วนการป้อนกลับที่มีค่า 2 โดยวิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพแสดงในภาคผนวก



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกลับต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน

2. ผลจากการศึกษาช่วงชั้นการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันในหอกลั่นเชิงเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของช่วงชั้นในการเกิดปฏิกิริยานี้ ศึกษาในหอกลั่นเชิงปฏิกิริยาทั้งหมด 15 ชั้น ซึ่งชั้นที่ 1 แสดงถึงชั้นของเครื่องควบแน่น และชั้นที่ 15 แสดงถึงชั้นของหม้อต้มซ้ำ โดยศึกษาช่วงเกิดปฏิกิริยา 14-14 ถึง 2-14 ใช้ชนิดของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาสมดุลเคมี สามารถผันกลับได้ อัตราส่วนการป้อนกลับมีค่า 8 และเปรียบเทียบข้อมูลการป้อนสารเข้าสู่หอกลั่นที่ชั้น (Feed stage) 4 และ 7

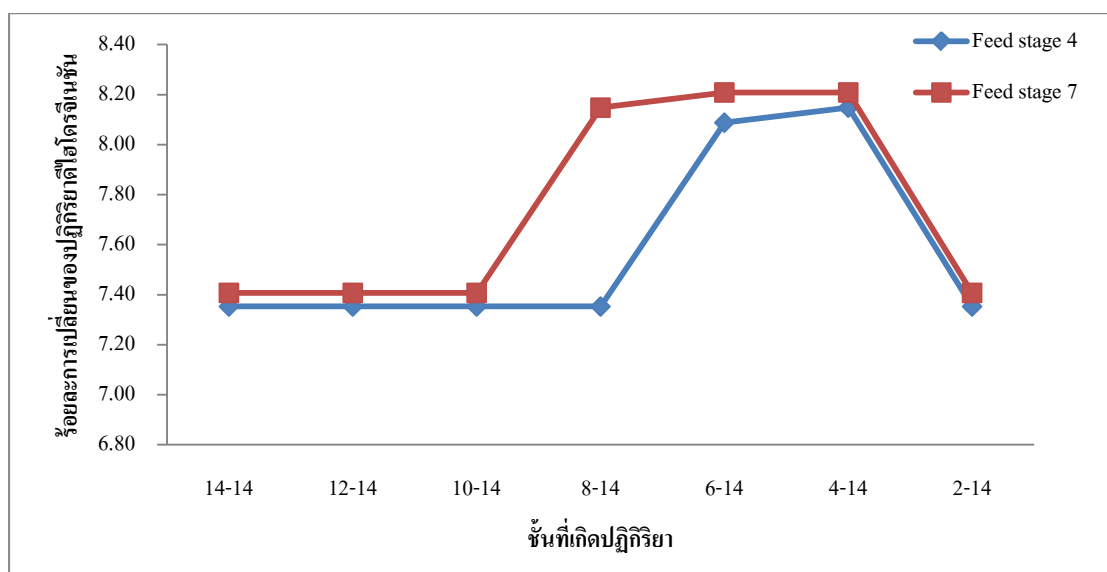
ในงานวิจัยเลือกศึกษาช่วงของการเกิดปฏิกิริยาในช่วงล่างของหอกลั่นขึ้นสู่ด้านบน เนื่องจากไอโซโพรพานอลเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา มีจุดเดือดสูงที่สุดในระบบ ดังนั้น ไอโซโพรพานอลจึงควรอยู่ช่วงล่างของหอกลั่นมากกว่าช่วงบน การเลือกช่วงในการเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้ เพื่อเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของไอโซโพรพานอล

จากรูปที่ 4.23 การเพิ่มช่วงชั้นของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันให้กว้างขึ้น ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มช่วงชั้นของการเกิดปฏิกิริยาตลอดทั้งหอกลั่นจะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันลดลง

เมื่อเพิ่มช่วงของการเกิดปฏิกริยาถึงขั้นที่ป้อนสาร จะได้ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มช่วงการเกิดปฏิกริยามากขึ้นกว่านี้จะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนลดลง

ในหอกถันชั้นบนของการป้อนสาร ซึ่งเป็นพื้นที่ของอุณหภูมิต่ำ พบว่าการเพิ่มช่วงของการเกิดปฏิกริยาให้กว้างขึ้น ส่งผลให้การเกิดปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันลดลง เพราะเพิ่มโอกาสการเกิดปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันให้มากขึ้นแทน

ส่วนในหอกถันช่วงล่าง ซึ่งมีอุณหภูมิสูง การเพิ่มช่วงของการเกิดปฏิกริยาส่งผลให้การเกิดปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อป้อนไอโซโพรพานอลเข้าสู่หอกถันแล้ว ไอโซโพรพานอลจะเคลื่อนลงสู่ด้านล่างตามจุดเดือด หากเคลื่อนผ่านชั้นที่เกิดปฏิกริยา จะทำให้เกิดปฏิกริยาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเกิดปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชัน

การเพิ่มช่วงของการเกิดปฏิกริยานั้น เป็นการเพิ่มโอกาสให้เกิดปฏิกริยาผันกลับได้มากขึ้น แสดงผลของการเกิดปฏิกริยาดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 โดยเครื่องหมายลบ แสดงถึงการเป็นสารตั้งต้น และเครื่องหมายบวก แสดงถึงการเป็นผลิตภัณฑ์ พิจารณาที่ตาราง 4.2 พบว่าที่ชั้นของ

หอกลับสูงขึ้น อุณหภูมิลดต่ำลง จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับ เกิดไอโซโพรพานอลเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นภายในหอกลับซึ่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.6 อัตราการไหลโดยโมลของไอโซโพรพานอล แอซีโตน และไฮโดรเจนในแต่ละชั้นของหอกลับ เมื่อช่วงที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันคือ ชั้นที่ 2 - 14 ในกรณีการป้อนสารที่ชั้นที่ 7

ชั้นที่	อัตราการไหลโดยโมล (โมล/นาท)		
	ไอโซโพรพานอล	แอซีโตน	ไฮโดรเจน
1	0	0	0
2	1.91E-03	-1.91E-03	-1.91E-03
3	1.61E-04	-1.61E-04	-1.61E-04
4	1.32E-05	-1.32E-05	-1.32E-05
5	1.09E-06	-1.09E-06	-1.09E-06
6	8.90E-08	-8.90E-08	-8.90E-08
7	-1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03
8	-5.53E-05	5.53E-05	5.53E-05
9	-7.37E-06	7.36E-06	7.36E-06
10	-9.85E-07	9.85E-07	9.85E-07
11	-1.32E-07	1.32E-07	1.32E-07
12	-1.77E-08	1.76E-08	1.76E-08
13	-2.36E-09	2.36E-09	2.36E-09
14	-1.05E-02	1.05E-02	1.05E-02
15	0	0	0

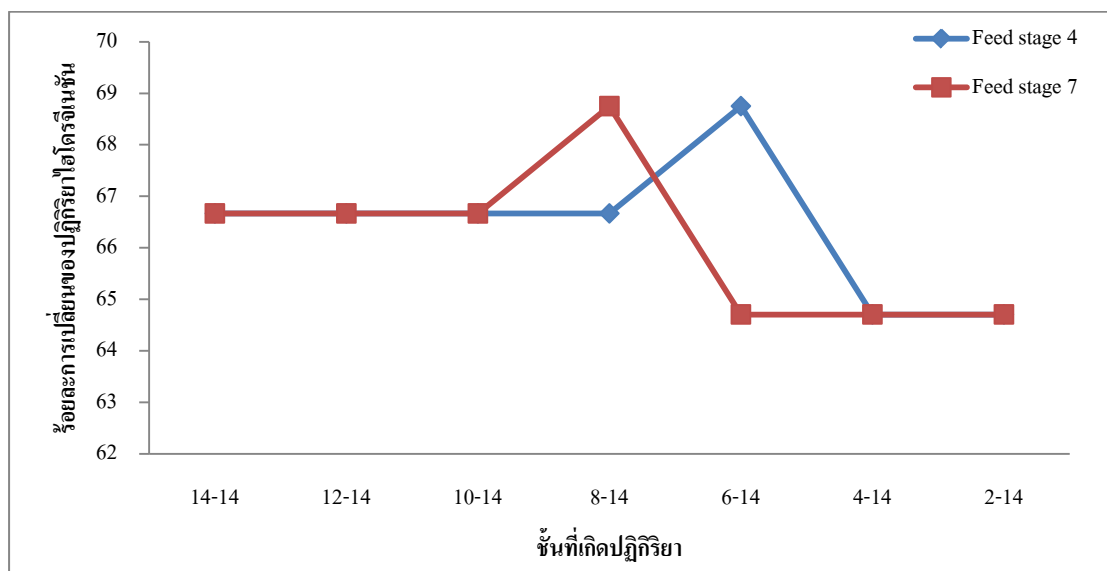
ตารางที่ 4.7 อัตราการไหลโดยโมลของไอโซโพรพานอล แอซีโตน และไฮโดรเจนในแต่ละชั้นของ
หอกลับ เมื่อชั้นที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันคือ ชั้นที่ 8 - 14 ในกรณีการป้อนสารที่ชั้นที่ 7

ชั้นที่	อัตราการไหลโดยโมล (โมล/นาท)		
	ไอโซโพรพานอล	แอซีโตน	ไฮโดรเจน
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	1.48E-06	-1.48E-06	-1.48E-06
7	-1.10E-03	1.10E-03	1.10E-03
8	-5.56E-05	5.56E-05	5.56E-05
9	-7.41E-06	7.41E-06	7.41E-06
10	-9.92E-07	9.92E-07	9.92E-07
11	-1.33E-07	1.33E-07	1.33E-07
12	-1.78E-08	1.78E-08	1.78E-08
13	-2.38E-09	2.38E-09	2.38E-09
14	-1.07E-02	1.07E-02	1.07E-02
15	0	0	0

เมื่อพิจารณาค่า ΔG ของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลเป็น 13.9 กิโลจูลต่อโมล (Kiatkitisophon and Piumsomboon, 2004) ดังนั้นปฏิกิริยาผันกลับคือปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของแอซีโตน จะมีค่า ΔG เป็น -13.9 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโอกาสที่ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันจะเกิดขึ้นในระบบมีความเป็นไปได้มากกว่า ดังนั้นช่วงของการเกิดปฏิกิริยาควรแคบลง และอยู่ด้านล่างของหอกลับ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันระหว่างแอซีโตนและไฮโดรเจนภายในหอกลับเชิงปฏิกิริยา

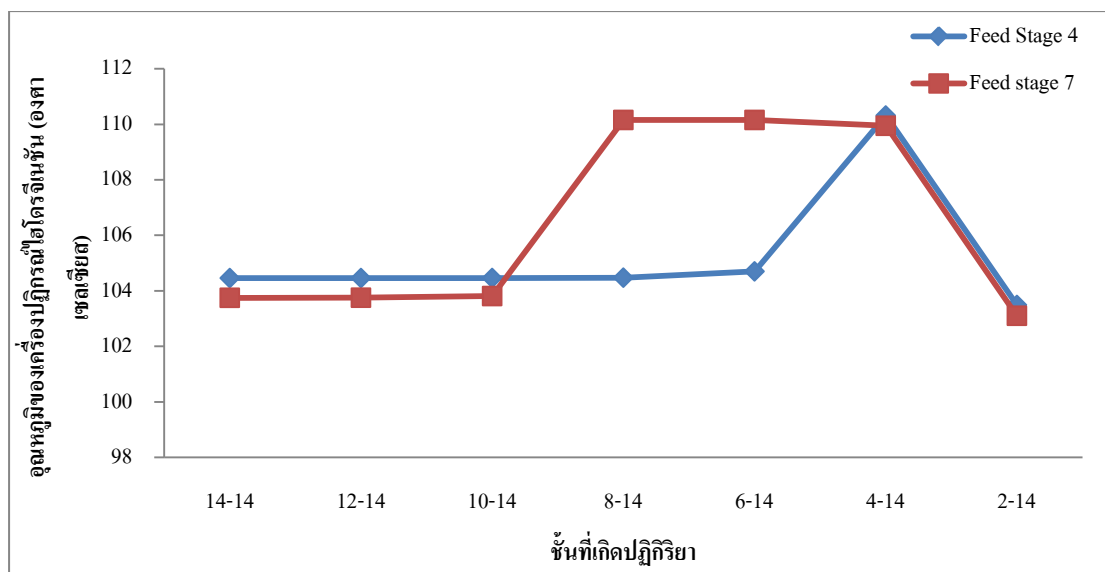
ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน มีความสอดคล้องกับร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน โดยร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันมีค่าเพิ่มขึ้นถึง

ชั้นการเกิดปฏิกิริยาที่มีการป้อนสาร แต่เมื่อเพิ่มช่วงของการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น เกินกว่าชั้นที่มีการป้อนสาร ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาจะมีค่าลดลงแสดงดังรูปที่ 4.24 เนื่องจากผลติดกันของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน



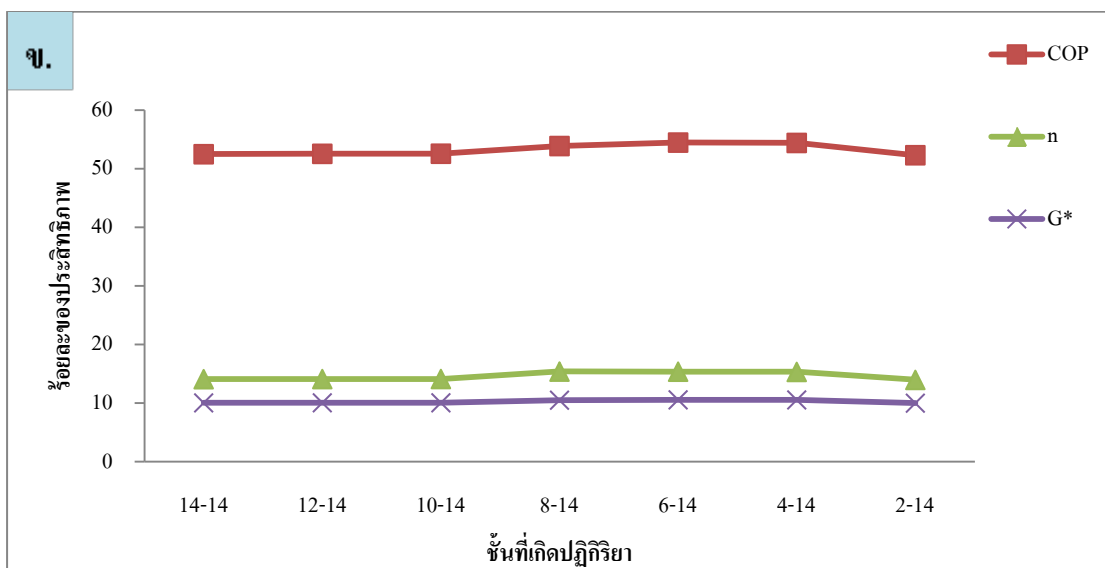
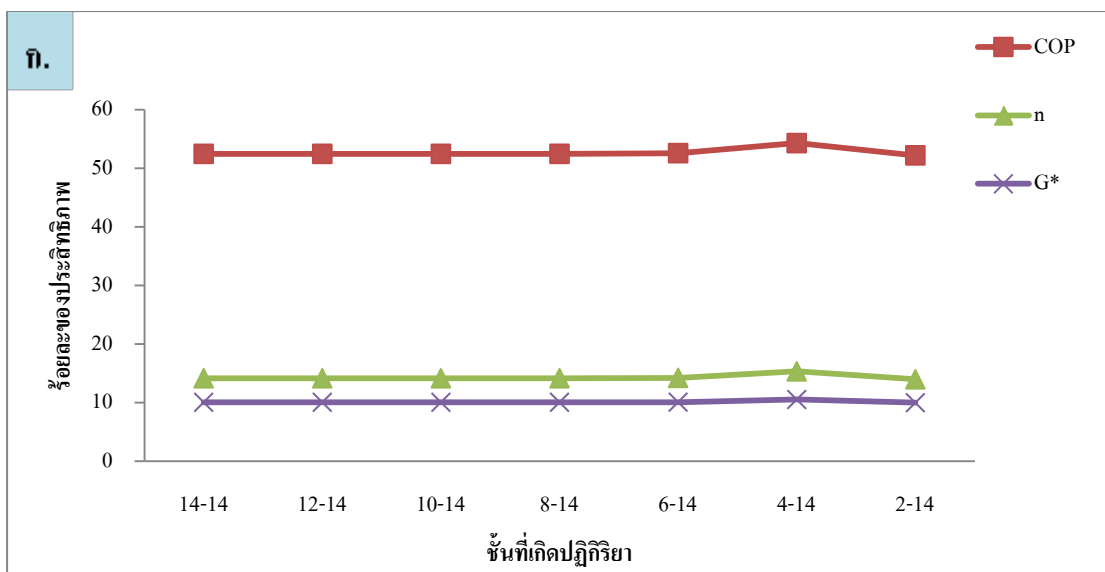
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

เมื่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันลดลง ความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันจึงมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นการเพิ่มช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเกินกว่าชั้นที่มีการป้อนสาร ส่งผลให้อุณหภูมิขาออกของเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.25 แต่ในกรณีนี้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีค่าเพียง 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากกรณีนี้เลือกอัตราส่วนการป้อนกลับในหอกลั่นเท่ากับ 2



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน

ผลจากการเพิ่มช่วงในการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาให้กว้างขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น แล้วจึงลดลง สอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันที่มีค่าเพิ่มขึ้น และลดลง ดังนั้นค่าภาระความร้อนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันจึงสอดคล้องกัน เพราะฉะนั้นการเพิ่มช่วงในการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในหอกถัน ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แล้วจึงลดลง ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 20.00, 4.22 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องหล่อเย็นมีค่า 4.79, 0.77 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน 13.69, 2.23 วัตต์ และค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่หม้อต้มซ้ามีค่า 181.65, 29.08 วัตต์ ซึ่งค่าภาระความร้อนนี้เป็นค่าที่ได้จากภาวะที่ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเกิดขึ้นที่ชั้นที่ 6-14 และการป้อนสารที่ชั้น 4



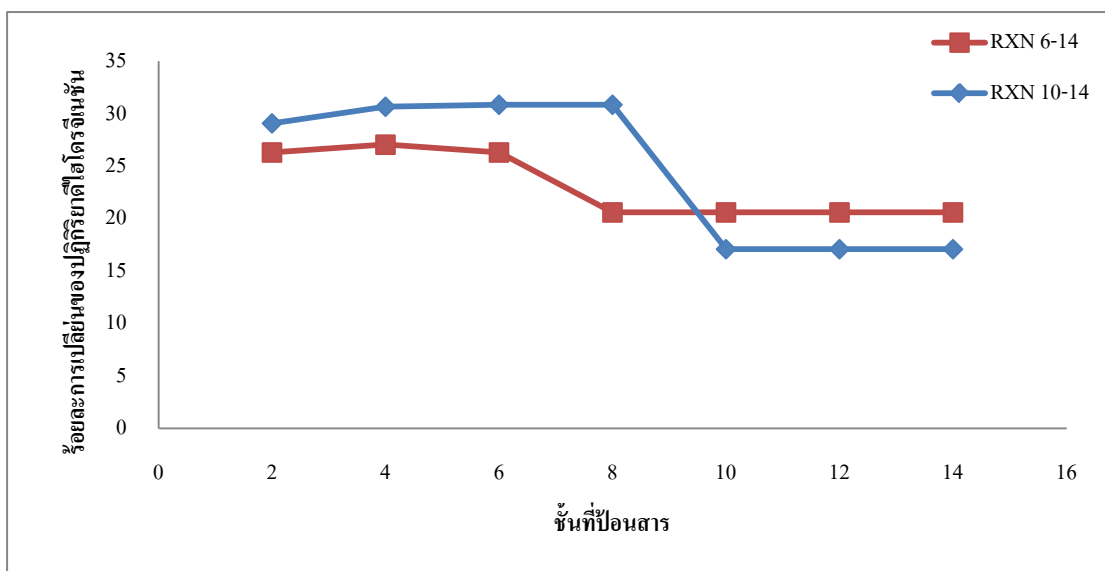
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันต่อ
ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่การป้อนสาร ก) ชั้นที่ 4, ข) ชั้นที่ 7

3. ผลจากการศึกษาชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอลเข้าสู่หอกลั่นเชิงปฏิกิริยา

ศึกษาผลของการป้อนสารในตำแหน่งชั้นต่างๆ ตั้งแต่ชั้นที่ 2 ถึง 14 ที่ภาวะอัตราส่วนการป้อนกลับเท่ากับ 8 และเปรียบเทียบข้อมูลชั้นการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (RXN) คือชั้นที่ 6-14 และ 10-14 ส่วนภาวะการจำลองอื่นๆ กำหนดดังตารางที่ 3.4

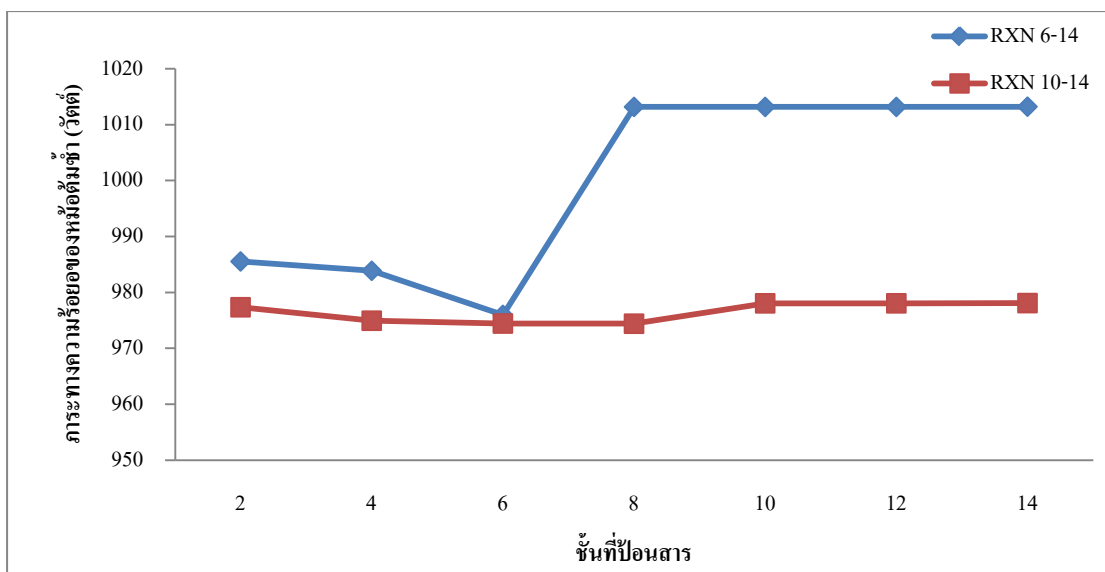
การป้อนสารเหนือชั้นที่เกิดปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น

แสดงดังรูปที่ 4.27



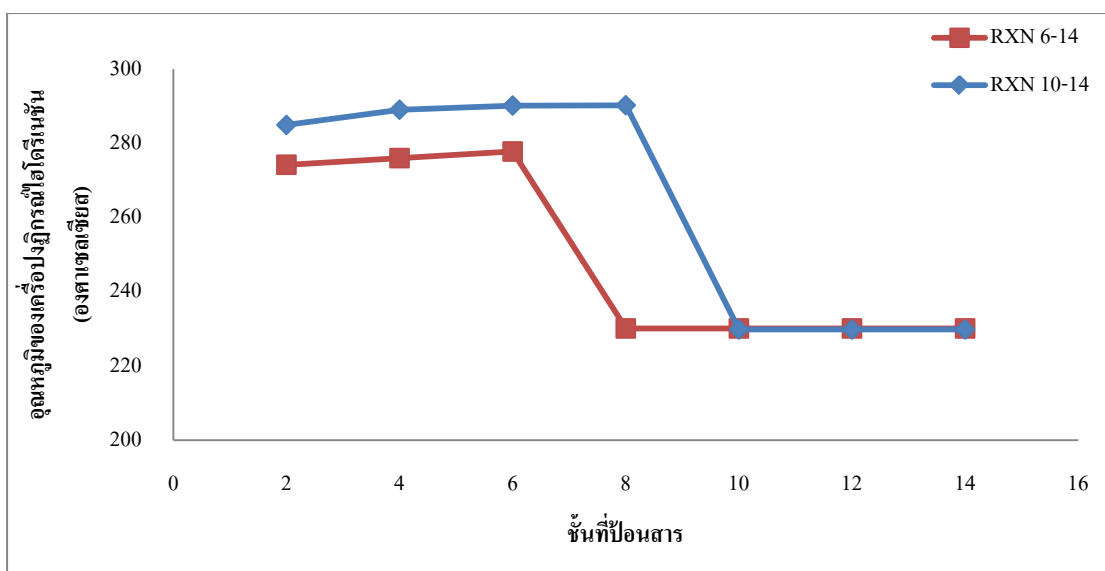
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอลต่อ
ค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

การป้อนสารเข้าสู่หอกถั่วเขียวปฏิกิริยาในชั้นล่างส่งผลให้หม้อต้มซ้ามีภาระทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.28 เนื่องจากมีปริมาณสารเคลื่อนที่ลงสู่หม้อต้มซ้าสูงขึ้น หากป้อนสารที่ชั้นบน ส่งผลให้มีปริมาณสารออกจากหอกถั่วออกทางด้านบนเพิ่มขึ้น ปริมาณสารภายในหอกถั่ว และหม้อต้มซ้าจึงลดลง ภาระทางความร้อนของหม้อต้มซ้าจึงลดลง



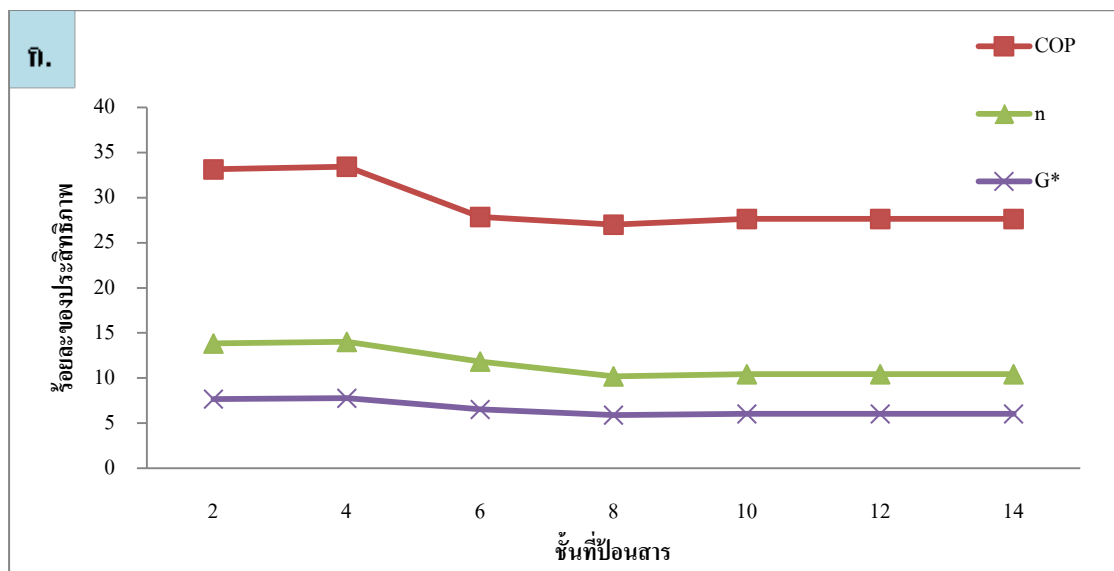
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการป้อนไอโซโทรพานอลต่อ
ค่าภาระทางความร้อนของหม้อต้มซ้ำ

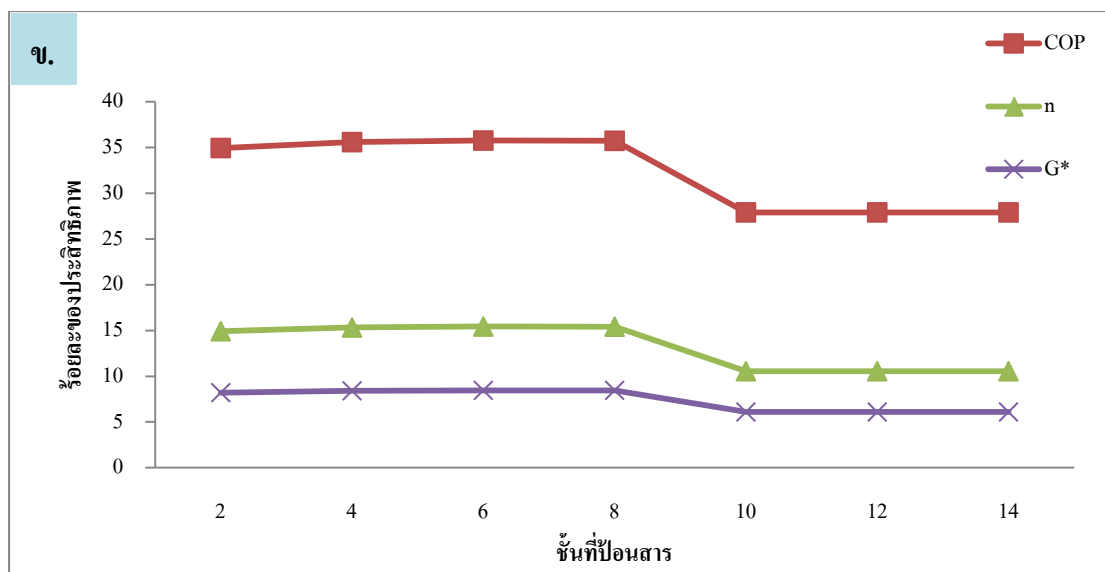
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีนชั้นพบว่า การป้อนสารเข้าสู่
หอกลับทางด้านล่างของหอกลับส่งผลให้อุณหภูมิต่ำลง แสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการป้อนไอโซโทรพานอลต่อ
อุณหภูมิของปฏิกริยาไฮโดรจีนชั้น

เนื่องจากการป้อนสารเหนือชั้นที่เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่าสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.30 ซึ่ง ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน 20.00, 9.42 วัตต์ความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องหล่อเย็นมีค่า 52.26, 18.35 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน 74.52, 34.03 วัตต์ และค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่หม้อต้มซ้ามีค่า 974.40, 156.23 วัตต์ ซึ่งค่าภาระความร้อนนี้เป็นค่าที่ได้จากภาวะที่ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเกิดขึ้นที่ชั้นที่ 10-14 และการป้อนสารที่ชั้น 8



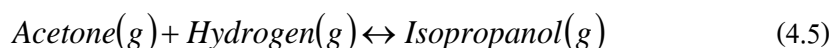


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นของการป้อนไอโซโพรพานอลต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน เมื่อชั้นที่เกิดปฏิกิริยา ก) ชั้นที่ 6-14, ข) ชั้นที่ 10-14

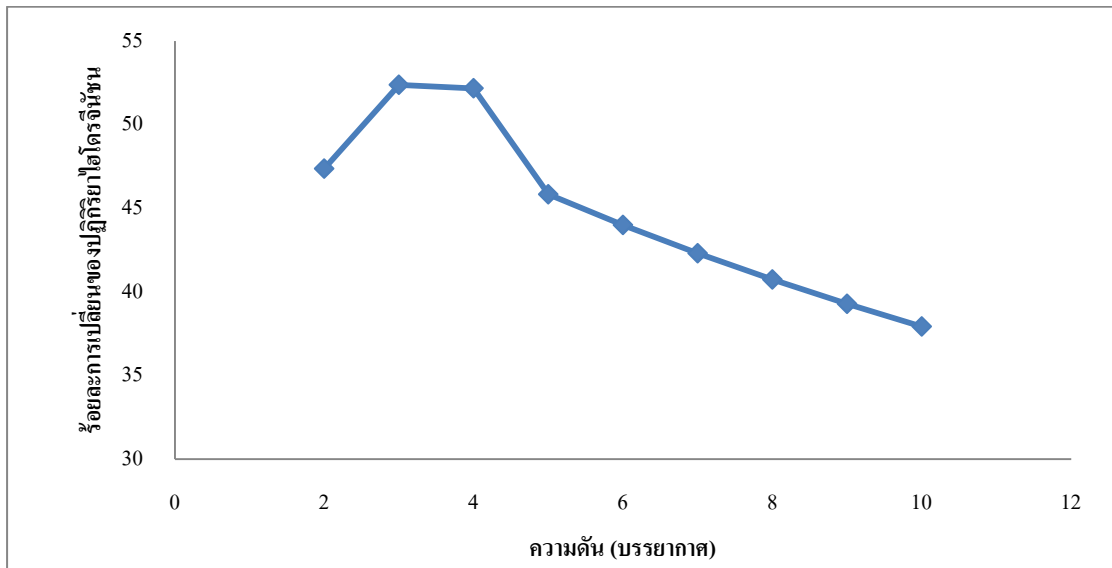
4. ผลจากการศึกษาความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน

การเพิ่มความดันให้กับเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน เพื่อต้องการเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของเอซีโตนและไฮโดรเจนให้มีค่าสูงขึ้น ทำได้โดยติดตั้งเครื่องอัดไอเพื่อเพิ่มความดันให้กับสารก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน และกำหนดให้ศึกษาผลของความดัน ในช่วง 1 ถึง 10 บรรยากาศ ปริมาณความร้อนปลดปล่อยที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันประมาณ 20 วัตต์ และอัตราส่วนการป้อนกลับมีค่า 8 ส่วนภาวะอื่นๆ กำหนดดังตารางที่ 3.4

เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.5 โมลของสารตั้งต้นทั้งหมดมีค่าเป็น 2 และโมลของสารผลิตภัณฑ์เป็น 1 การเพิ่มความดันให้แก่ระบบสมดุล ส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปทางโมลน้อยกว่า ดังนั้นการเพิ่มความดันให้แก่ระบบจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอโซโพรพานอลมากขึ้น

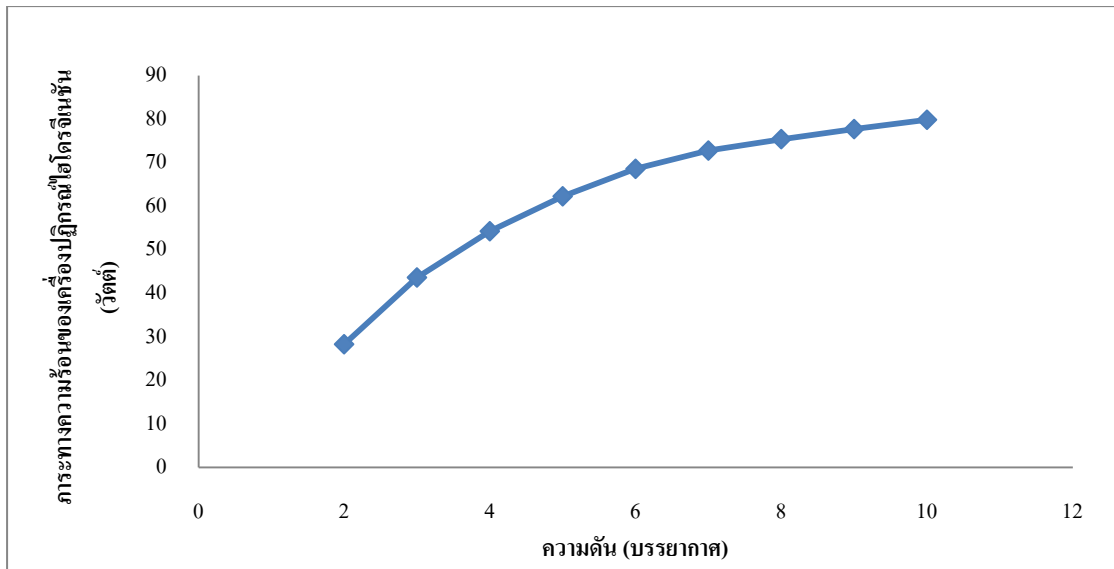


เมื่อเพิ่มความดันให้กับสารเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน พบว่าร้อยละการปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดัน จะทำให้สารมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังรูปที่ 4.31



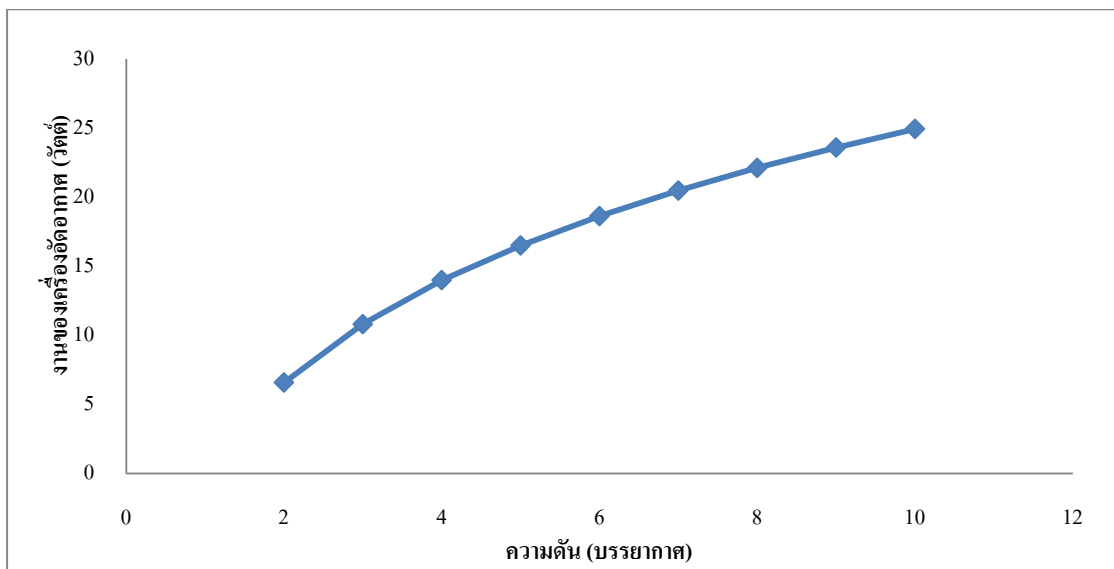
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของเครื่องอัดไอต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

การเพิ่มความดันส่งผลให้สามารถดึงความร้อนอุณหภูมิสูงจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันไปใช้งานได้ปริมาณมากขึ้น ในกรณีที่กำหนดให้อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันคงที่ที่ 200 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.32 อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันนี้เป็นความร้อนจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาก็มีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเครื่องยนต์ไอต้อค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล

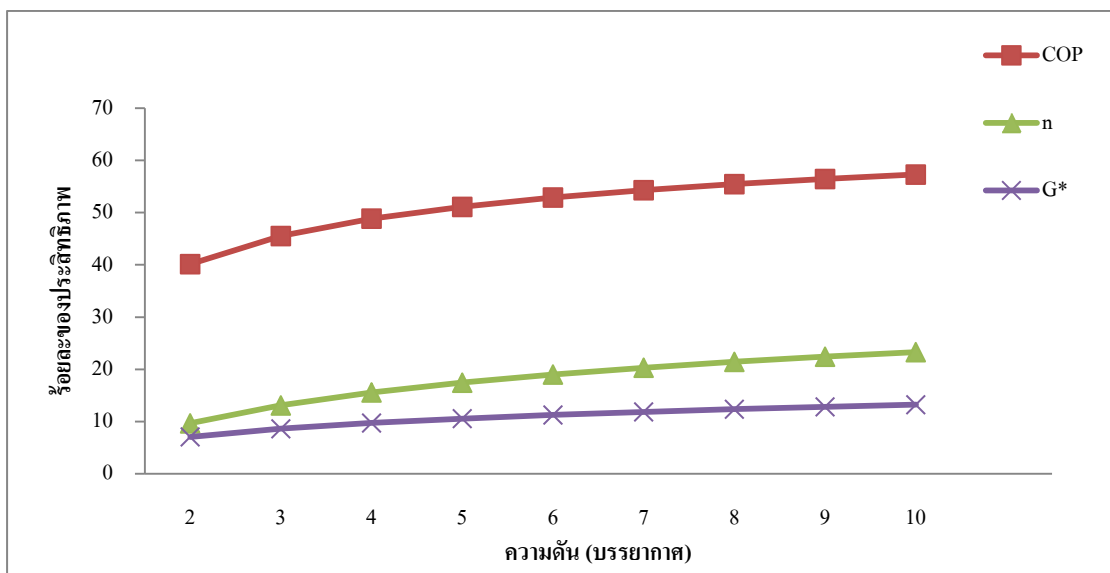
เมื่อเพิ่มความเร็วให้สูงขึ้น งานของเครื่องยนต์ไอต้อจึงมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเครื่องยนต์ไอต้อค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล

การเพิ่มความเร็วให้กับสารขาเข้าสู่เครื่องยนต์ดีเซล ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาดีเซลลดลง แต่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสูงขึ้น แม้ค่าการถ่ายเทความร้อนของ

เครื่องอัดไอจะเพิ่มขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพความร้อนนั้นยังมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.34 ดังนั้นการเพิ่มความดันส่งผลให้ได้ค่าความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้น มากกว่าค่าพลังงานที่ต้องให้เพิ่มแก่ระบบ ซึ่งค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 10.00, 2.99 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องหล่อเย็นมีค่า 23.70, 6.38 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน 15.02, 2.42 วัตต์ และค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่หม้อต้มซ้ำมีค่า 196.44, 31.45 วัตต์ ซึ่งค่าภาระความร้อนนี้เป็นค่าที่ได้จากภาวะที่เครื่องอัดไอมีความดัน 10 บรรยากาศ



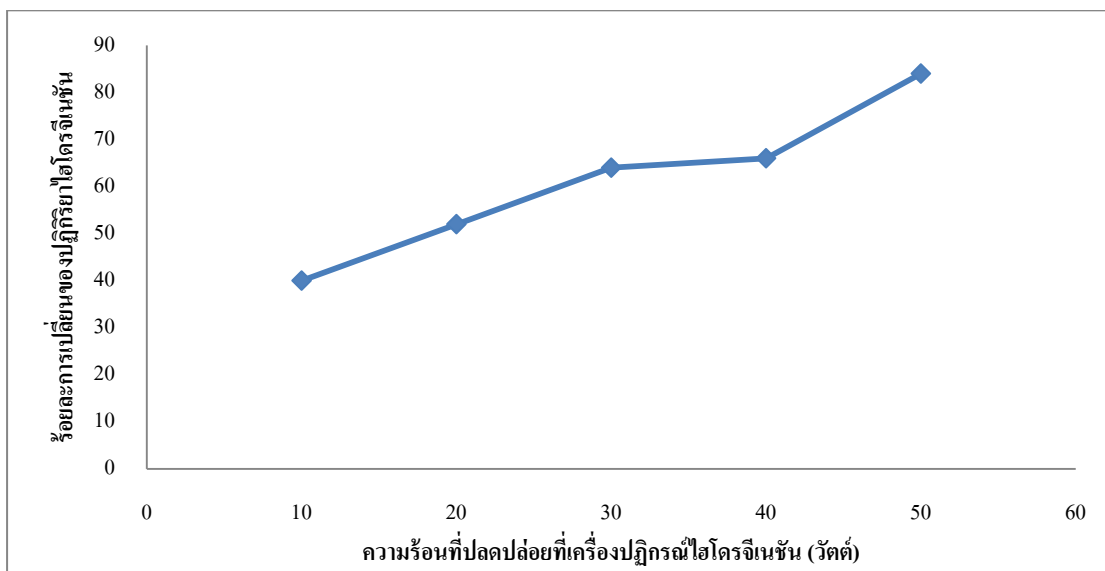
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของเครื่องอัดไอต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน

5. ผลจากการศึกษาค่าความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันปลดปล่อย

ค่าความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน เป็นความร้อนที่อุณหภูมิสูงสามารถคายความร้อนสู่แหล่งรองรับที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การดึงความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ออกมามาก หมายถึงการนำปริมาณความร้อนที่อุณหภูมิสูงไปใช้งานได้มาก

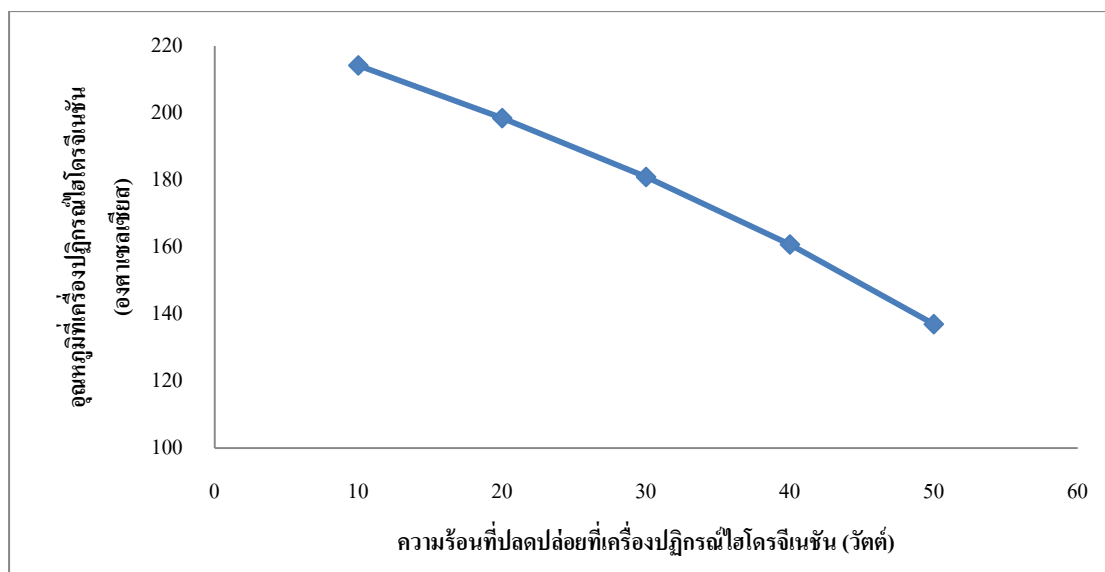
ในการศึกษานี้ใช้ภาวะดำเนินการดังตารางที่ 3.4 โดยมีอัตราส่วนการป้อนกลับที่ 8 ช่วงของการเกิดปฏิกิริยาชั้นที่ 9-14 ป้อนสารเข้าสู่หอกลั่นเชิงปฏิกิริยาที่ชั้น 7 ความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 8 บรรยากาศ

เมื่อเพิ่มค่าความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันให้มีการปลดปล่อยปริมาณสูงขึ้น พบว่าเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.35 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การดึงความร้อนออกจากระบบ จะทำให้สมดุลดำเนินไปด้านหน้ามากขึ้น เกิดผลตกค้างเป็นไอโซโพรพานอลเพิ่มขึ้น



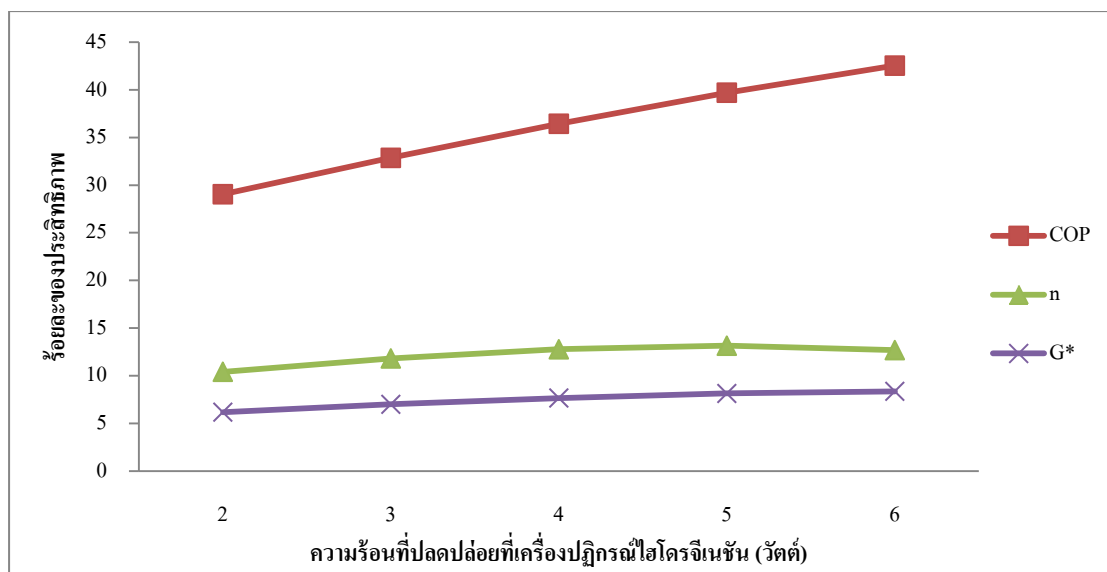
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

แม้ว่าการเพิ่มค่าความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความร้อนอุณหภูมิตั้งสูงที่ปลดปล่อยที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีอุณหภูมิต่ำลง ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์

การเพิ่มค่าความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันให้มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพความร้อนจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.37 แม้ว่าการดึงความร้อนออกที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมากขึ้นจะทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น แต่การดึงความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมากขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิของความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันนั้นมีค่าต่ำลง ซึ่งค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 50.00, 13.67 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องหล่อเย็นมีค่า 12.04, 2.66 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน 53.24, 8.56 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่หม้อต้มซ้ามีค่า 696.19, 111.46 วัตต์ ซึ่งค่าภาระความร้อนนี้เป็นค่าที่ได้จากภาวะที่มีปริมาณความร้อนปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน 50 วัตต์



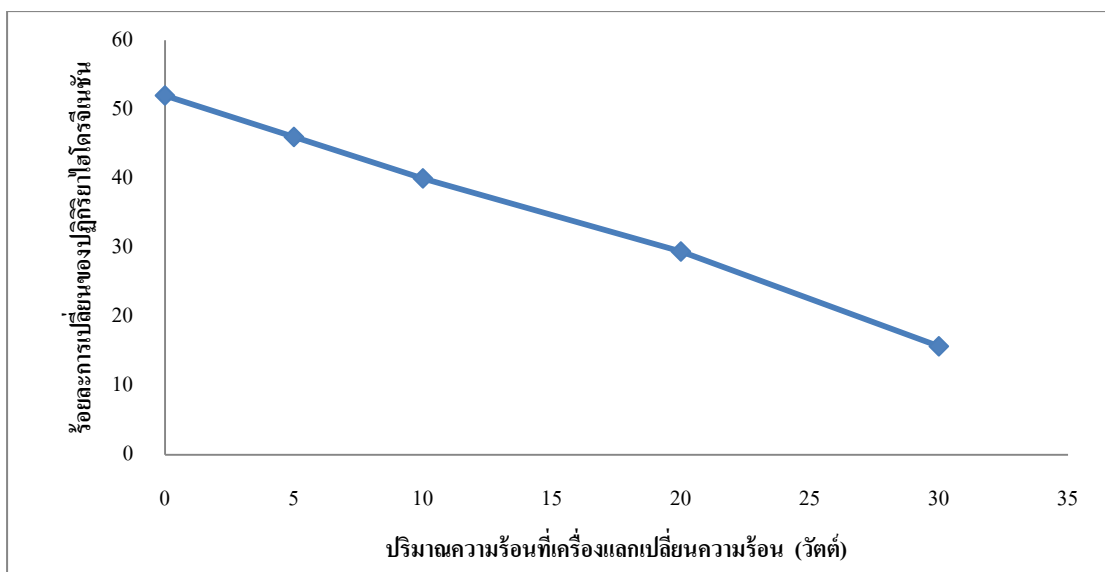
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความ COP ความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน

6. ผลจากการศึกษาปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ทำหน้าที่นำความร้อนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน มาให้กับสารที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันเดิม เพื่อนำความร้อนที่ได้มาใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น

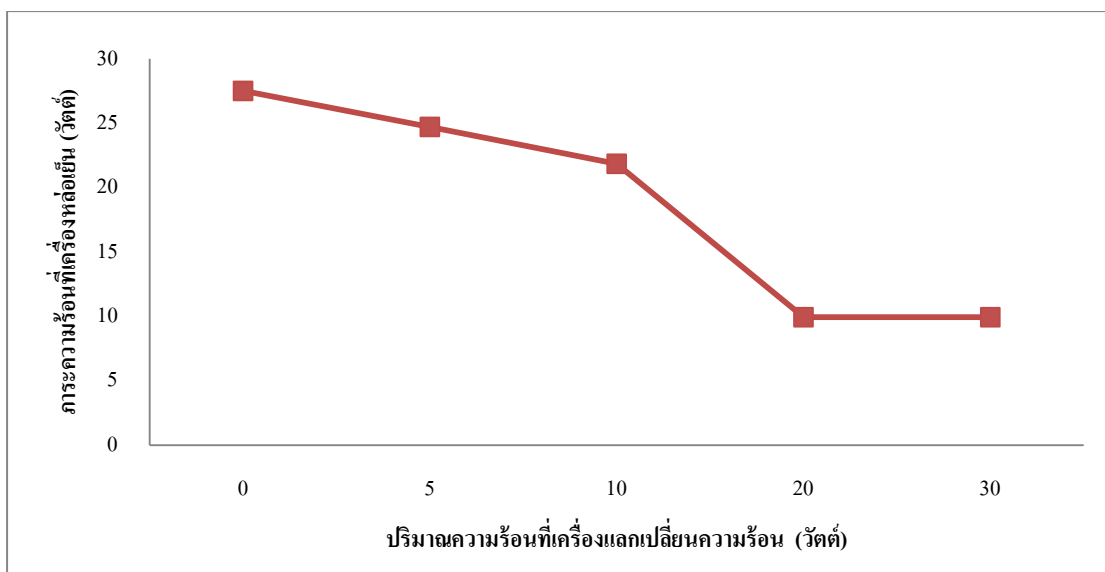
ในการศึกษานี้ใช้ภาวะดำเนินการดังตารางที่ 3.4 โดยมีอัตราส่วนการป้อนกลับที่ 8 ช่วงของการเกิดปฏิกิริยาชั้นที่ 9-14 ป้อนสารเข้าสู่หอกลั่นเชิงปฏิกิริยาที่ชั้น 7 ความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 8 บรรยากาศ

การเพิ่มปริมาณความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ ส่งผลให้สารขาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีอุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันจึงมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.38



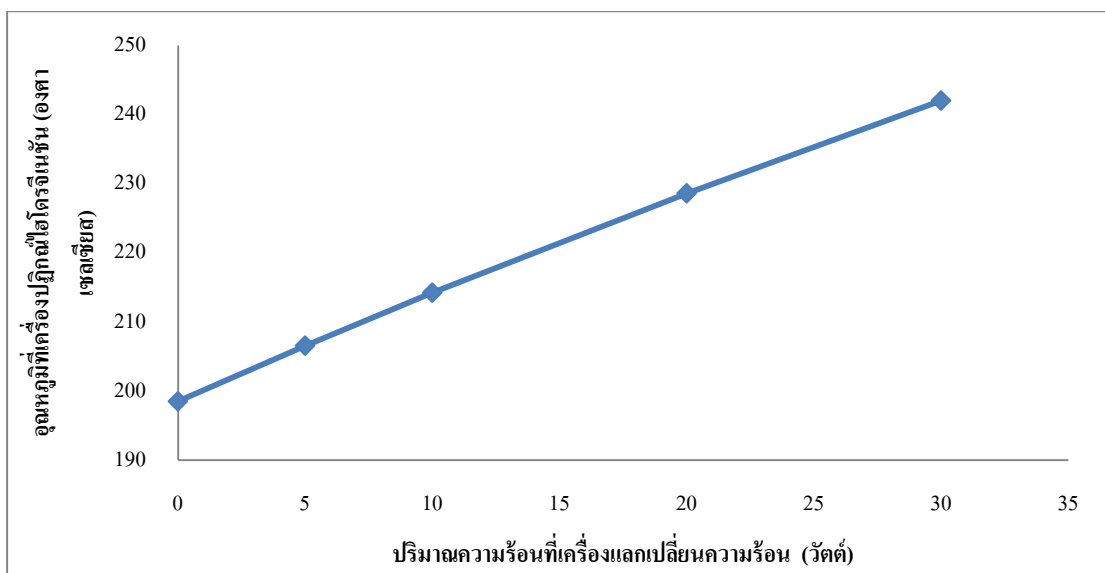
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเจนชั้นต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาไฮโดรเจนชั้น

เมื่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนชั้นลดลง ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮโดรเจนชั้นจึงมีค่าลดลง แต่เนื่องจากกรณีนี้มีการกำหนดให้ค่าความร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเจนชั้นมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงพิจารณาปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮโดรเจนชั้นที่เครื่องหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.39 พบว่าการเพิ่มปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องหล่อเย็นมีค่าลดลง แสดงถึงปริมาณความร้อนอุณหภูมิสูงที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรเจนชั้นมีค่าลดลง



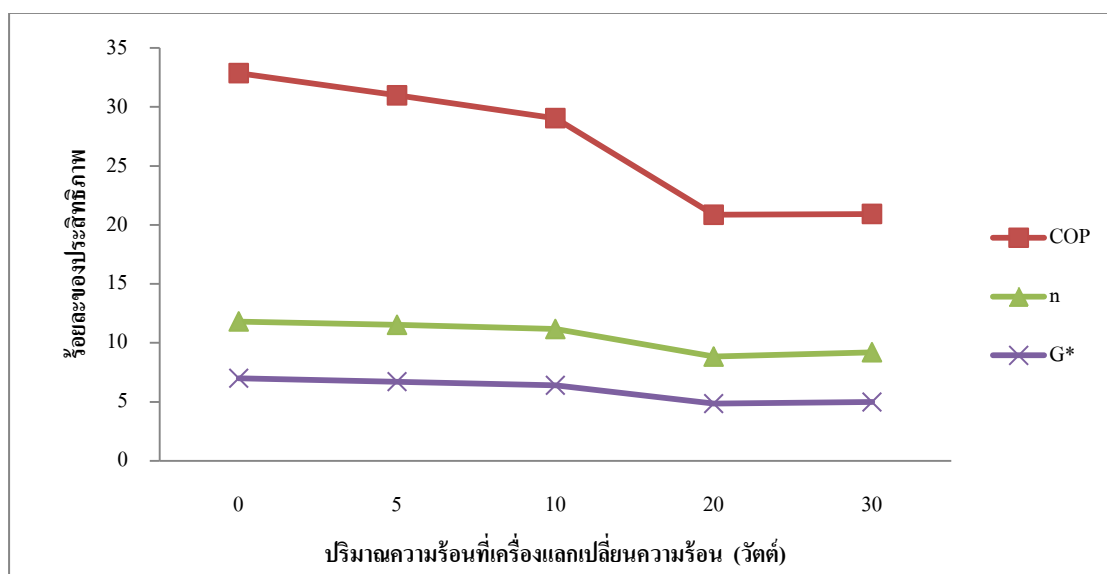
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องหล่อเย็น

การเพิ่มปริมาณความร้อนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน ทำให้ได้อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่ออุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน

แต่เมื่อกำหนดผลของทั้งระบบ จะพบว่าค่าประสิทธิภาพมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.41 ซึ่งค่าการระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 20.00, 7.36 วัตต์ ค่าการระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องหล่อเย็นมีค่า 27.5, 7.68 วัตต์ ค่าการระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน 52.61, 8.46 วัตต์ ค่าการระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่หม้อต้มซ้ามีค่า 687.74, 110.11 วัตต์ ซึ่งค่าการระความร้อนนี้เป็นค่าที่ได้จากภาวะที่มีปริมาณความร้อนแลกเปลี่ยนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 0 วัตต์

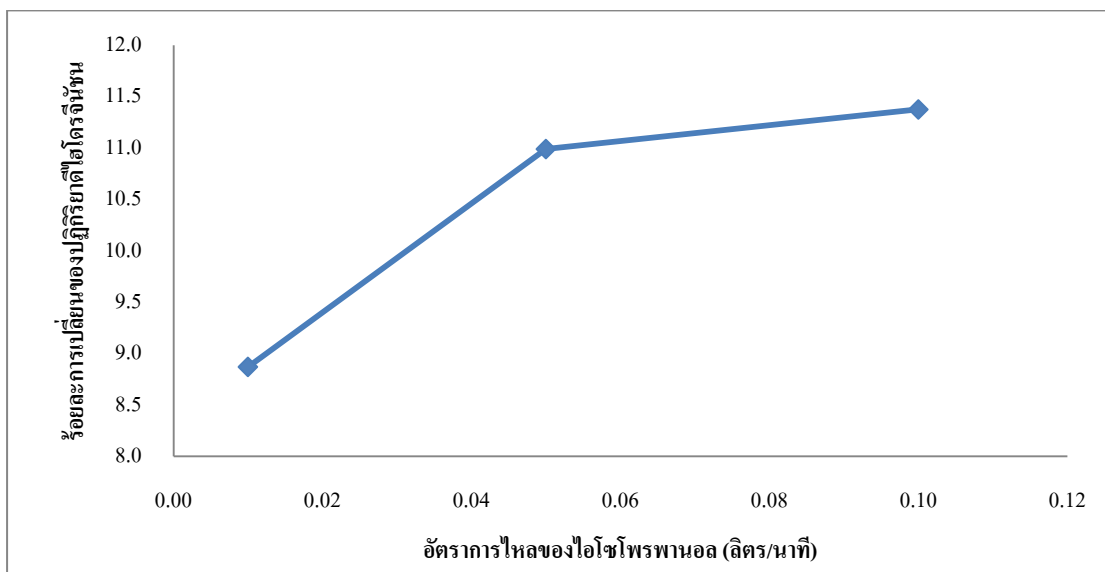


รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้กับสารขาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันต่อค่าประสิทธิภาพทางความร้อน

7. ผลจากการศึกษาปริมาณอัตราการไหลของไอโซโทปรานอล

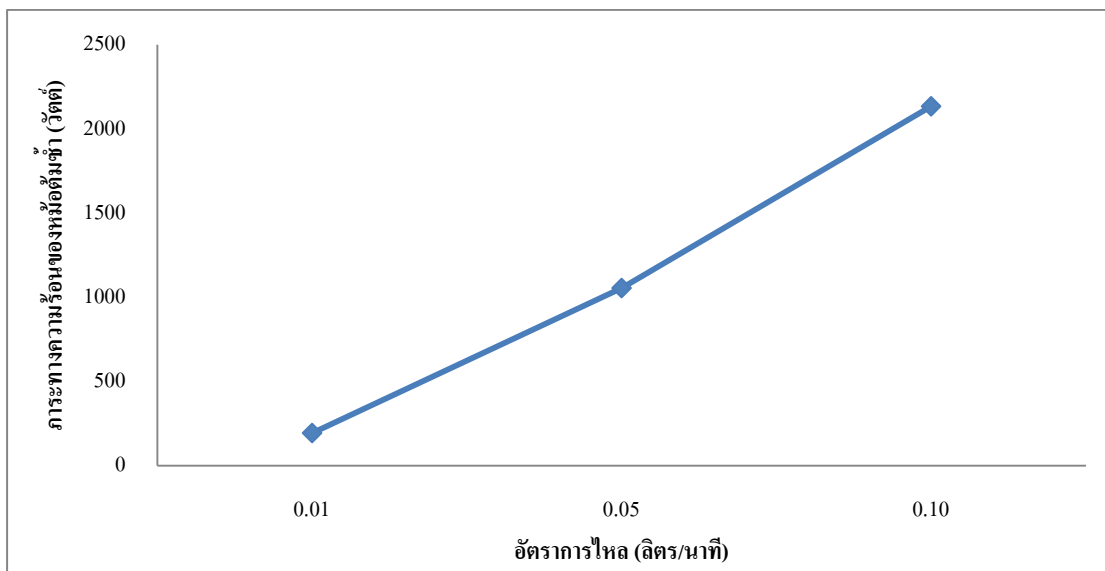
ในการศึกษานี้ใช้ภาวะดำเนินการดังตารางที่ 3.4 โดยมีอัตราส่วนการป้อนกลับที่ 2 ช่วงของการเกิดปฏิกิริยาชั้นที่ 9-14 ป้อนสารเข้าสู่หอกลั่นเชิงปฏิกิริยาที่ชั้น 7 ความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 8 บรรยากาศ

การเพิ่มอัตราการไหลของไอโซโทปรานอลเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นให้กับปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ไอโซฟลาโวนอลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีนีน

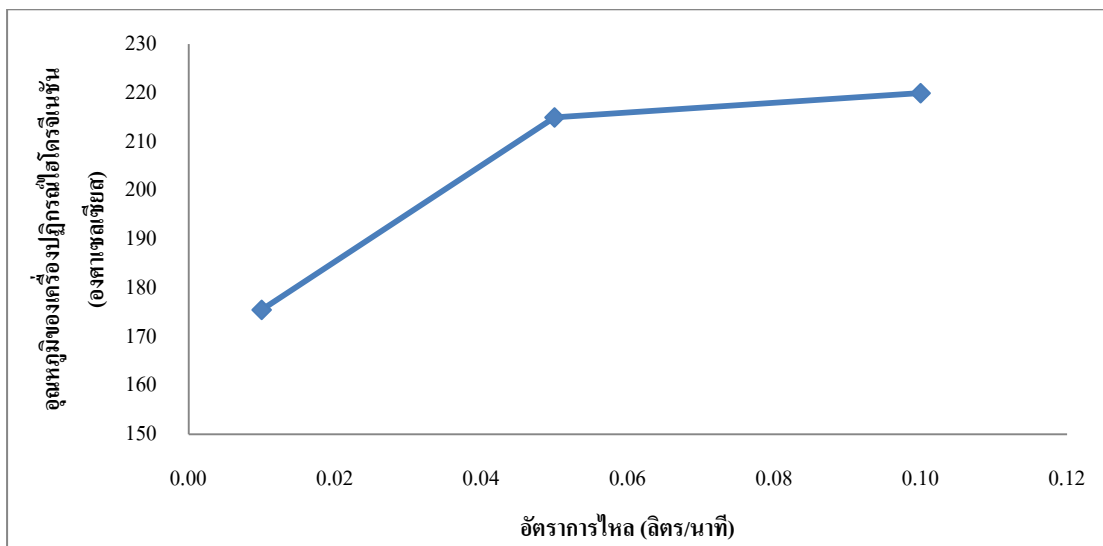
การเพิ่มอัตราการใช้ไอโซฟลาโวนอล เป็นการเพิ่มปริมาณสารเข้าสู่หอกถั่วมากขึ้น ดังนั้นหม้อต้มชาจึงมีภาวะความร้อนเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ไอโซฟลาโวนอลต่อค่าภาวะทางความร้อนของหม้อต้มชา

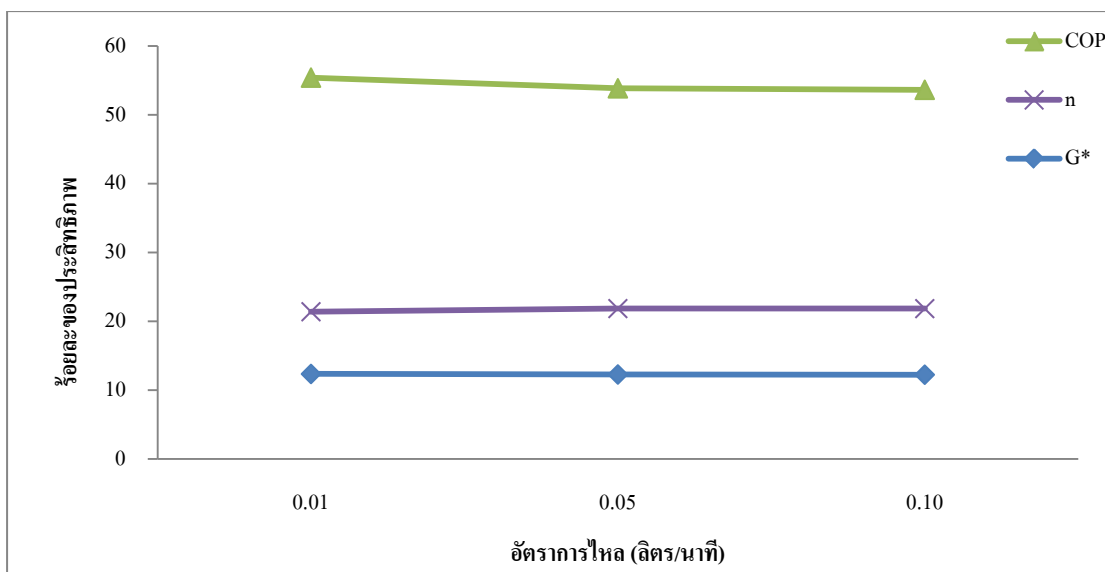
เมื่อเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเพิ่ม ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันจึงให้อุณหภูมิสูงขึ้น

ด้วย แสดงดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไอน้ำของไอโซโพรพานอลต่ออุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ดีไฮโดรจีเนชัน

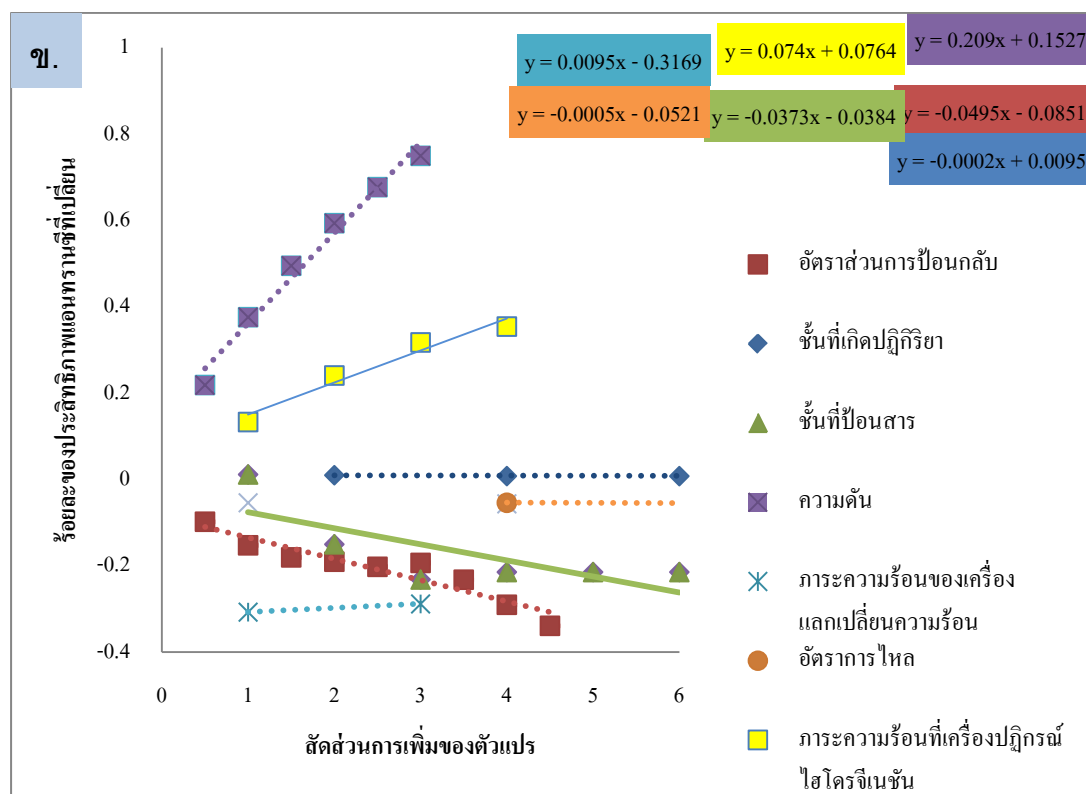
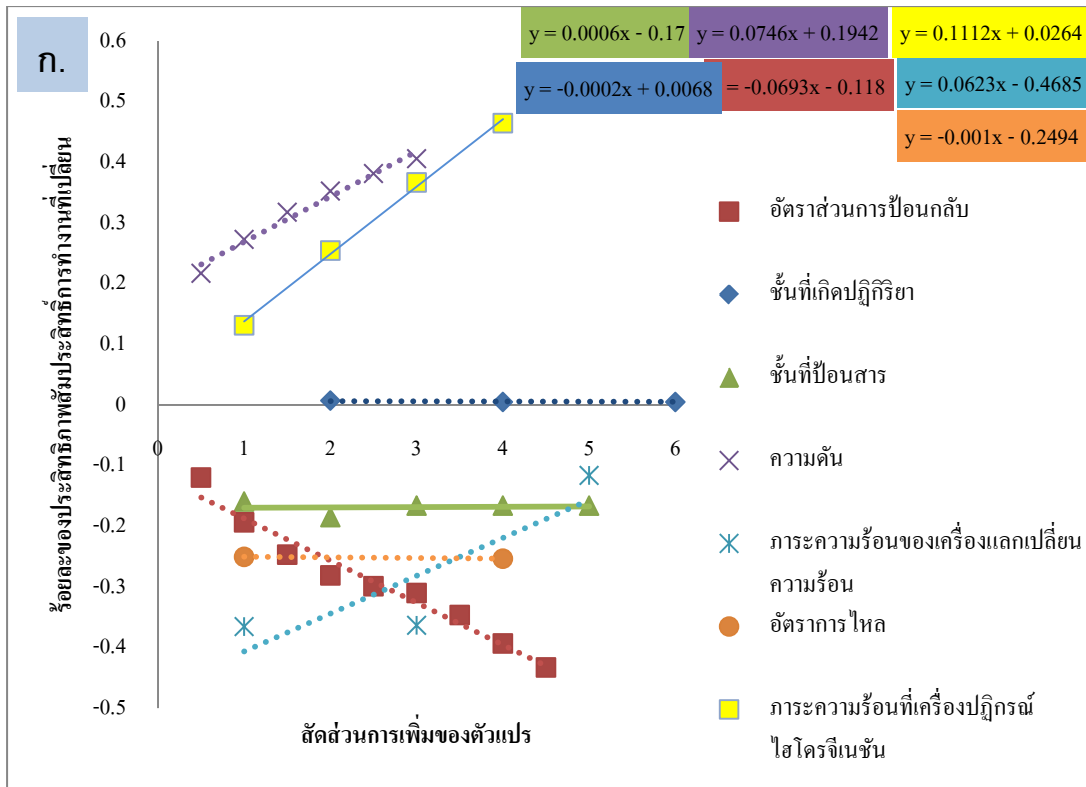
เมื่อเพิ่มอัตราไอน้ำของไอโซโพรพานอลเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มอัตราไอน้ำของไอโซโพรพานอล ส่งผลให้ปริมาณสารตั้งต้นของสมดุลเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาจึงดำเนินไปข้างหน้าได้ดีขึ้น แต่การเพิ่มอัตราไอน้ำนั้นส่งผลให้มีปริมาณสารเข้าสู่หอกั่นเชิงปฏิกิริยามากขึ้น ภาระทางความร้อนของหม้อต้มซ้ำจึงเพิ่มขึ้น แต่จากการเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันนั้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ดีไฮโดรจีเนชันมีค่ามากขึ้น ดังนั้นค่าประสิทธิภาพจึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงดังรูปที่ 4.45 ซึ่งค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีทีที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ดีไฮโดรจีเนชันมีค่า 20.00, 9.24 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีทีที่ปลดปล่อยจากเครื่องหล่อเย็นมีค่า 42.80, 6.88 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีทีที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน 82.85, 13.32 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีทีที่หม้อต้มซ้ำมีค่า 1004.80, 95.33 วัตต์ ซึ่งค่าภาระความร้อนนี้เป็นค่าที่ได้จากภาวะที่มีอัตราไอน้ำของไอโซโพรพานอล 0.10 ลิตร/นาที

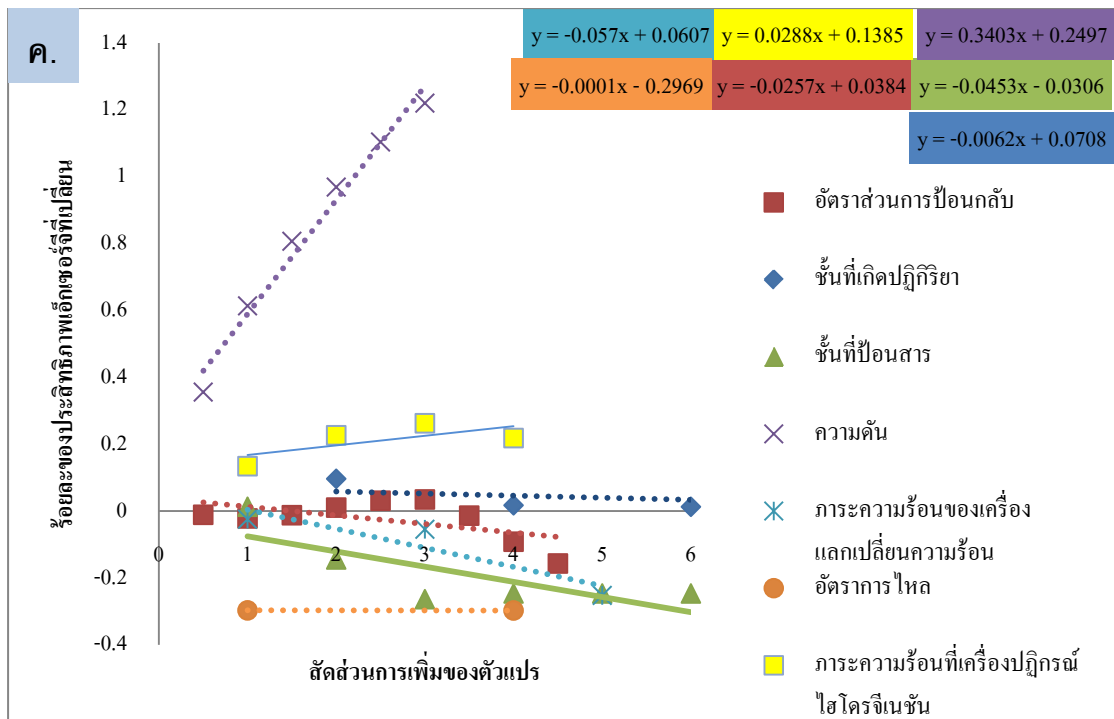


รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่อ
ค่าประสิทธิภาพทางความร้อน

8. วิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพ

การระบุถึงความสำคัญของพารามิเตอร์ ทำได้โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเพิ่มของพารามิเตอร์ และค่าประสิทธิภาพที่เปลี่ยนแปลง จากความสัมพันธ์ที่ได้พบว่ามี ความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้น โดยจากรูปที่ 4.46 พบว่า ความชันของสมการเชิงเส้นที่เป็นค่าบวก แสดงถึงการเพิ่มค่าของพารามิเตอร์นั้น แล้วส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่หากความชันเป็น ค่าลบ แสดงถึงการเพิ่มค่าของพารามิเตอร์นั้น แล้วส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพลดลง โดยค่าความชันที่มีค่ามาก แสดงถึงการที่ปรับเพิ่มพารามิเตอร์แล้วส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพมีการเปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อระบบ โดยพบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ ไฮโดรจิเนชันมีค่าความชันมากที่สุด ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้น ในการนำไปใช้งานจริงควรเพิ่มความดันให้กับส่วนของปฏิกริยาไฮโดรจิเนชัน และดึงความร้อน ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจิเนชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้น ส่วนการปรับส่วน อื่นๆ นั้นอาจจะไม่จำเป็นต่อระบบ เนื่องจากส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของระบบเพียงเล็กน้อย เท่านั้น และเป็นการลดความยุ่งยากในการปฏิบัติงานจริง



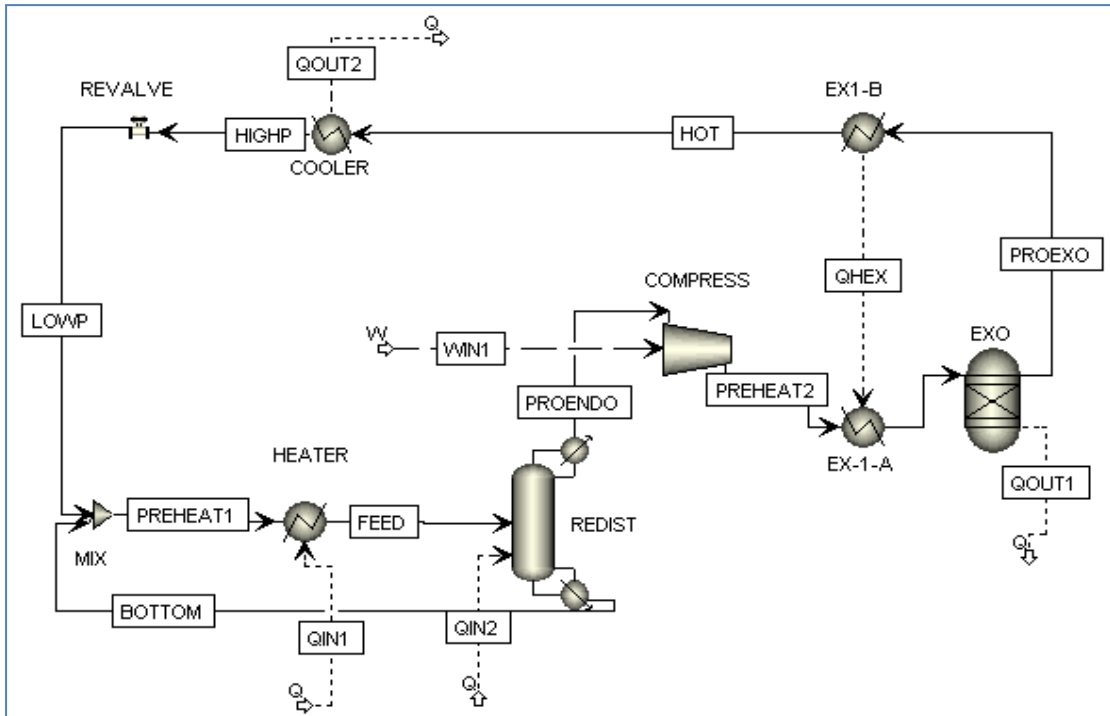


รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเพิ่มของพารามิเตอร์ และค่าร้อยละของประสิทธิภาพ
ก) สัมประสิทธิ์สมรรถนะ ข) เอนทรานซี และ ค) เอ็กเซอร์จี

9. เปรียบเทียบผลของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง

เมื่อได้ผลจลนพลศาสตร์จากการทดลอง จึงนำค่าพลังงานกระตุ้น และค่าคงที่ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมาใช้ภายในหอกถันเชิงปฏิกิริยา เพื่อจำลองให้ได้ภาวะสอดคล้องกับความจริงมากขึ้น และคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากข้อมูลแบบจำลองกิบส์ โดยแผนผังการจำลองได้แสดงดังรูปที่ 4.47 ซึ่งใช้ภาวะของการทดลองเหมือนกัน ดังนี้

ในการศึกษานี้ใช้ภาวะดำเนินการดังตารางที่ 3.4 โดยมีอัตราส่วนการป้อนกลับที่ 8 ช่วงของการเกิดปฏิกิริยาชั้นที่ 6-14 ป้อนสารเข้าสู่หอกถันเชิงปฏิกิริยาที่ชั้น 7 ความดันที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 8 บรรยากาศ ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน 20 วัตต์



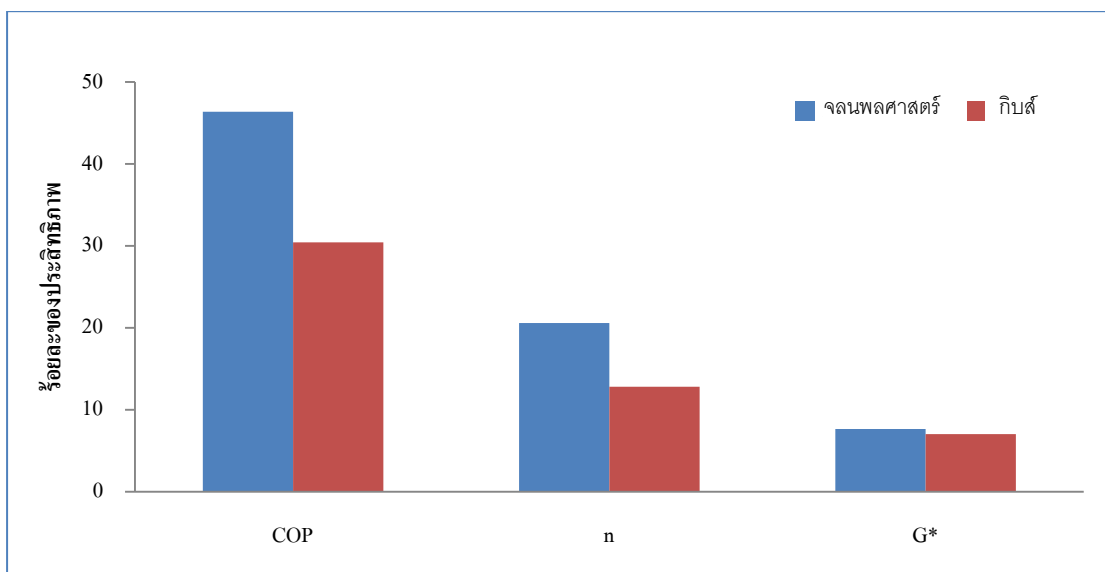
รูปที่ 4.47 แผนผังกระบวนการจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมีโดยใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์จากการทดลอง

ที่ภาวะเดียวกันนี้ พบว่าการใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์จากการทดลองแสดงผลของปฏิกิริยาที่ต่างไป แสดงดังตารางที่ 4.8 ผลทางจลนพลศาสตร์จากการทดลองช่วยทำให้ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเกิดมากขึ้นมากกว่าการใช้ชนิดปฏิกิริยาเป็นกิบส์ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันมากขึ้น ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันจึงมีค่าการเปลี่ยนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งจากตารางที่ 4.8 พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลเมื่อใช้ข้อมูลจากค่าจลนพลศาสตร์มีค่าเป็น 100 เนื่องจากอัตราการป้อนไอโซโพรพานอลต่ำ แต่ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองเร็วกว่ามาก

ตารางที่ 4.8 ผลของร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเปรียบเทียบระหว่างแบบกิบส์ และแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์จากการทดลอง

	ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยา	
ชนิดของปฏิกิริยา	ดีไฮโดรจีเนชัน	ไฮโดรจีเนชัน
จลนพลศาสตร์	100.0	39.1
กิบส์	28.3	38.9

ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันที่เกิดมากขึ้นนั้นส่งผลดีต่อระบบ จากรูปที่ 4.48 ค่าประสิทธิภาพในแบบจำลองที่ใช้ผลทางจลนพลศาสตร์จากการทดลองมีค่าสูงกว่าแบบจำลองที่ใช้ค่าสมมูลปฏิกิริยาแบบกิบส์ เนื่องจากลักษณะของเครื่องมือที่ทำการทดลองนั้นช่วยแยกผลิตภัณฑ์ออกจากสมดุลของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันจึงดำเนินไปข้างหน้าได้ดี ลดการเกิดปฏิกิริยาผันกลับ และพบว่าค่าประสิทธิภาพมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาต่างกัน โดยค่าประสิทธิภาพสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) และประสิทธิภาพเอเธรานซี (G^*) จะพิจารณาพลังงานที่ได้จากระบบในรูปแบบของพลังงานความร้อนเป็นหลัก ส่วนค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (η) จะพิจารณาพลังงานที่ได้จากระบบในรูปแบบของงานเป็นหลัก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งหมด จะต้องมีการสูญเสียพลังงานไป ดังนั้นเมื่อค่าที่ใช้พิจารณาของ η มีค่าต่ำ จึงส่งผลให้ η มีค่าต่ำกว่า COP ส่วนค่าการที่ COP มีค่ามากกว่า G^* เนื่องจาก COP พิจารณาส่งที่ให้กับระบบเป็นงาน G^* พิจารณาพิจารณาสิ่งที่ให้กับระบบเป็นความร้อน ซึ่งค่าความร้อนปริมาณที่ให้กับระบบมีค่าสูงกว่างานเสมอ จึงส่งผลให้ค่า COP มีค่าสูงสุด

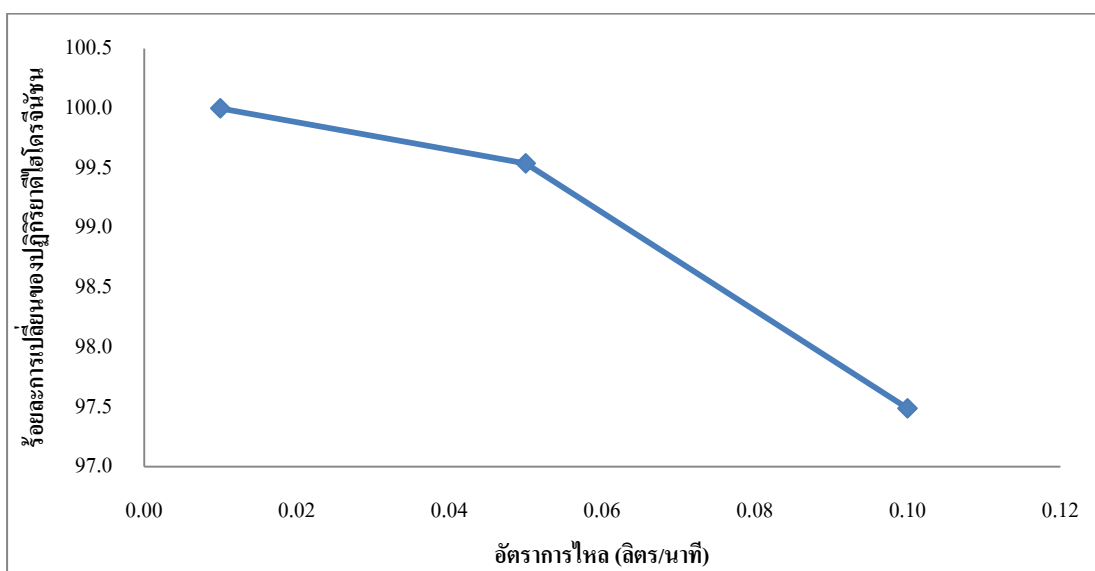


รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองที่มี และไม่มีผลทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

9.1 ผลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพต่างกับระหว่างปฏิกิริยาแบบกิบส์ และปฏิกิริยาแบบจลนพลศาสตร์

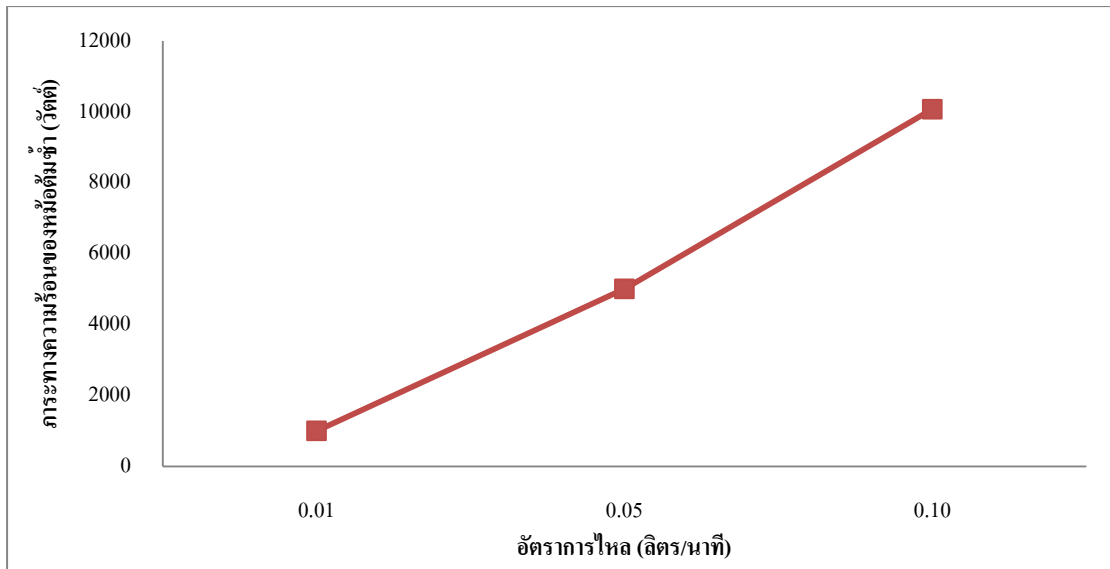
9.1.1 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล

เมื่อใช้ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ศึกษาผลของอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีชันลดลง ซึ่งตรงกับผลจากปฏิกิริยาแบบกิบส์ เนื่องจาก การเพิ่มอัตราการไหลในกรณีนี้ส่งผลให้ระยะเวลาที่สารทำปฏิกิริยาภายในหอกสั้นลง แสดงดังรูปที่ 4.49



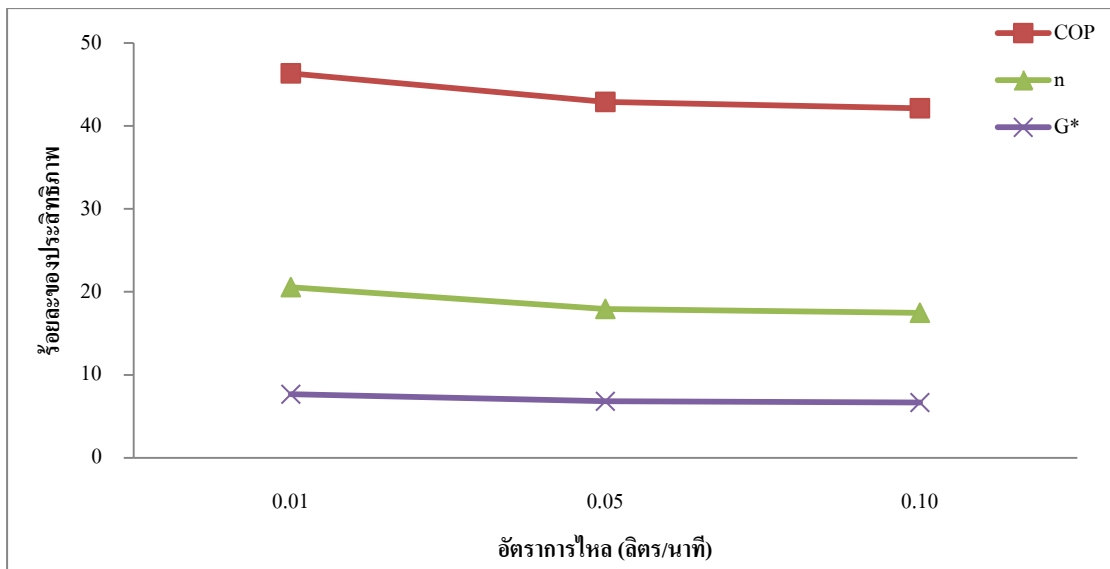
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโพรพานอลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

การเพิ่มอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ส่งผลให้มีสารเข้าสู่หอกสั้นเชิงปฏิกิริยามากขึ้น ดังนั้นภาระทางความร้อนของหม้อต้มซ้ำจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลที่ได้จากปฏิกิริยาแบบกิบส์ แสดงดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโพรพานอลต่อค่าภาระทางความร้อนของหม้อต้มซ้ำ

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไอโซโพรพานอลเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันลดลง เพราะการเพิ่มอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ส่งผลให้ระยะเวลาที่อยู่ภายในส่วนการเกิดปฏิกิริยาลดลง ภาระทางความร้อนของหม้อต้มซ้ำเพิ่มขึ้น และร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันลดลง ดังนั้นค่าประสิทธิภาพจึงมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.51 ซึ่งค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันมีค่า 10.00, 3.36 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ปลดปล่อยจากเครื่องหล่อเย็นมีค่า 20.8, 5.396 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน 14.83, 2.38 วัตต์ ค่าภาระความร้อน และค่าเอ็กเซอร์จีที่หม้อต้มซ้ำมีค่า 194.64, 31.21 วัตต์ ซึ่งค่าภาระความร้อนนี้เป็นค่าที่ได้จากภาวะที่มีอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล 0.10 ลิตร/นาท



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอโซโทรพานอลต่อ
ค่าประสิทธิภาพทางความร้อน

ภาวะที่ให้ประสิทธิภาพของระบบมากที่สุดแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลของภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงที่สุดในงานวิจัย

อัตราส่วนการป้อนกลับ	2
อัตราการไหลของไอโซโทรพานอล (ลิตร/นาทื)	0.01
ชั้นที่เกิดปฏิกิริยา ในหอกลั่นเชิงปฏิกิริยา	8-14
ชั้นที่ป้อนสารเข้าสู่หอกลั่นเชิงปฏิกิริยา	7
ภาวะความร้อนที่หม้อต้มซ้ำ (วัตต์)	1004.8
อุณหภูมิที่หม้อต้มซ้ำ (เคลวิน)	329.1
ภาวะความร้อนของเครื่องให้ความร้อนแก่สารขาเข้าสู่หอกลั่นเชิงเร่งปฏิกิริยา (วัตต์)	82.9
อุณหภูมิของเครื่องให้ความร้อนขาเข้าสู่หอกลั่นเชิงปฏิกิริยา (เคลวิน)	355.1
ความดันที่เครื่องอัดความดัน (บรรยากาศ)	8

ความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน (วัตต์)	20
ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนให้สารขาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน (วัตต์)	0
ความร้อนที่ปลดปล่อยที่เครื่องหล่อเย็น (วัตต์)	43.0
อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน (เคลวิน)	554.0
ภาระงานที่เครื่องอัดความดัน (วัตต์)	26.8
อุณหภูมิขาออกจากเครื่องอัดความดัน (เคลวิน)	422.5
ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (%)	100.0
ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (%)	38.9
COP` (%)	46.0
η (%)	20.0
G*(%)	9.8
Exergy(%)	15.7

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ส่วนของการดำเนินการทดลองจนผลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

- ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันจากการทดลองที่อุณหภูมิ 80, 70 และ 60 องศาเซลเซียสมีค่าดังนี้ $7.724E+08$, $4.012E+08$ และ $1.583E+08$
- พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันจากการทดลองที่อุณหภูมิ 80, 70 และ 60 องศาเซลเซียสมีค่าดังนี้ 83,097, 81,194 และ 78,193
- ค่าคงที่ของการดูดซับแอสีโทบนบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน จากการทดลองที่อุณหภูมิ 80, 70 และ 60 องศาเซลเซียสมีค่าดังนี้ $1.479E+15$, $4.047E+19$ และ $1.796E+21$
- พลังงานการดูดซับแอสีโทบนบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน จากการทดลองที่อุณหภูมิ 80, 70 และ 60 องศาเซลเซียสมีค่าดังนี้ -130,405, -12,6489 และ -92,335

ส่วนของการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- การเพิ่มอัตราส่วนการป้อนกลับ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง
- การเพิ่มช่วงของการเกิดปฏิกิริยาให้กว้างขึ้น ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง
- การเพิ่มความดันให้กับสารก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชัน ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น
- การเพิ่มปริมาณความร้อนที่ดึงออกที่เครื่องปฏิกรณ์ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น
- การเพิ่มปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบต่ำลง
- การเพิ่มอัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง

- ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเมื่อใช้ปฏิกิริยาแบบกิบส์ และใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์มีค่า 28.3 และ 100
- ร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเมื่อใช้ปฏิกิริยาแบบกิบส์ และใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์มีค่า 38.9 และ 39.1

ข้อเสนอแนะ

ส่วนการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

1. ในส่วนของการทดลอง มีการออกแบบเครื่องมือเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของหอกลั่น แต่มีการออกแบบในแนวนอน เนื่องจากจำนวนชั้นที่ศึกษามีเพียง 3 ชั้นเท่านั้น หากมีการศึกษาจำนวนชั้นที่มากขึ้น การออกแบบในแนวนอนอาจส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารอันเนื่องมาจากความดันได้
2. ค่าคงที่ที่ได้นั้นเกิดจากสัดส่วนระหว่างปริมาตรไอโซโพรพานอล 30 มิลลิลิตร และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม ซึ่งการเปลี่ยนสัดส่วนนี้ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นแตกต่างกัน
3. ความถี่ในการกวนสารภายในขวดแก้วมีค่า 700 รอบ/นาที ซึ่งการเพิ่มความถี่นี้อาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น
4. ระยะเวลาของการให้ความร้อนแก่ขวดแก้วก่อนเกิดปฏิกิริยา ส่งผลต่ออุณหภูมิของขวดแก้ว และอุณหภูมิของปฏิกิริยา ดังนั้นควรให้ความร้อนแก่ขวดแก้วที่อุณหภูมิคงที่อย่างน้อย 30 นาที
5. ควรมีการให้ความร้อนแก่ไอโซโพรพานอลก่อนบรรจุลงในขวดแก้ว เพื่อให้อุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มต้นทำปฏิกิริยามีอุณหภูมิเท่าที่ต้องการ
6. ควรจัดเครื่องมือการทดลองเพื่อให้เกิดระยะห่างระหว่างขวดแก้วน้อยที่สุด เพื่อลดการสูญเสียความร้อนที่ท่อสแตนเลส

ส่วนการศึกษาการจำลองระบบที่มีความร้อนด้วยโปรแกรม ASPEN Plus

การกำหนดภาวะในเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันแบบกิบส์นั้น สามารถเลือกค่าระหว่าง ภาวะความร้อน และอุณหภูมิ ในการจำลองนั้นสามารถเลือกค่าใดค่าหนึ่งได้ ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าใดๆ แต่ในการทดลองจริงนั้นควรเลือกกำหนดอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ เพื่อลดผลกระทบทางจลนพลศาสตร์ต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

รายการอ้างอิง

- Adkins H. and Billica H. R., The preparation of raney nickel catalyst and their use under conditions comparable with those for platinum and palladium, Contribution from the Laboratory of Organic Chemistry University of Wisconsin 70 (1948): 695-698.
- Gaspillo P. D., Abella L. C. and Goto S., Dehydrogenation of 2-propanol in reactive distillation column for chemical heat pump, Journal of Chemical Engineering of Japan 31 (1998): 440-4.
- Goto S., Hori K., Periodic operation of reactive distillation for dehydrogenation of 2-propanol, Asean Journal of Chemical Engineering 4 (2004): 135-147.
- Guo J., Huai X., Li X. and Xu M., Performance analysis of isopropanol-acetone-hydrogen chemical heat pump, Applied Energy 93 (2012): 261-267.
- Kiatkitisophon W., and Piumsomboon P., Dynamic Simulation and Control of IAH Chemical Heat Pump, Science Asia 30 (2004): 135-147.
- Klinsoda I. and Piumsomboon P., Isopropanol/Acetone/Hydrogen Chemical Heat Pump A Demonstration Unit, Energy Conversion and Management 48 (2007): 1200-1207.
- Mooksuwan W. and Kumar S., Study on 2-propanol/acetone/hydrogen chemical heat pump: endothermic dehydrogenation of 2-propanol, Journal of Chemical Engineering of Japan 24 (2000) 1109-1122.
- Saito Y., Yamashita M., Ito E. and Meng N., Hydrogen production from 2-propanol as a key reaction for a chemical heat pump with reaction couple of 2-propanol dehydrogenation/aetone hydrogenation, International Journal of Hydrogen Energy 19 (1994): 223-226.
- Sakurai M., Honda H. and Kameyama H., Fundamental study of a non-steady operation for 2-propanol de-hydrogenation, International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007): 1303-1308.
- Wang C., Zhang P. and Wang R., Review of recent patents on chemical heat pump, Recent Patents on Engineering 2 (2008) :208-216
- William L. L., Principles and case studies of simultaneous design. A john willey and sons, Canada, 2011.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

การคำนวณ

ตารางที่ 1 แสดงค่าพลังงานและอุณหภูมิจากการจำลองทางคณิตศาสตร์

QH (W)	20.00
Q Cooler (W)	15.31
QR (W)	388.28
Q Heater (W)	29.66
W Compress (W)	15.31
TH (K)	431.79
T Cooler (K)	393.45
TR (K)	354.80
T heater (K)	355.10
T Compressor (K)	423.29
T0 (K)	298.00

1. ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)

เป็นอัตราส่วนระหว่างงานที่ให้กับระบบ และความร้อนระบบให้ คำนวณได้จากสมการที่

(1)

$$COP = \frac{\sum Q_{output}}{\sum W_{input}} \times 100 \quad (1)$$

COP = ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

W = งานที่ได้รับจากระบบปั๊มความร้อน (งานที่ได้ที่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน และเครื่องหล่อเย็น)

Q = ภาระความร้อนของอุปกรณ์ที่ต้องให้พลังงาน (ภาระความร้อนที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อน, หม้อต้มฆ่าภายในหอกลั่นเชิงเร่งปฏิกิริยา และเครื่องอัดอากาศ

ตัวอย่างการคำนวณ

ผลจากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมเชิงการค้า ASPEN Plus นั้น ได้ผลเป็นภาระความร้อน ซึ่งต้องนำมาคำนวณเป็นงาน

จากความสัมพันธ์ระหว่างงาน และภาระทางความร้อน

$$W = Q \left(\frac{T - T_a}{T} \right) \quad (2)$$

W = งาน (วัตต์)

Q = ภาระความร้อน (วัตต์)

T = อุณหภูมิของอุปกรณ์ (เคลวิน)

T_a = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (เคลวิน)

$$W_R = 388.28 \left(\frac{354.80 - 298.10}{354.80} \right)$$

$$W_R = 62.16 \text{ วัตต์}$$

เมื่อใช้สมการที่ (2) จะสามารถคำนวณงานของเครื่องให้ความร้อนได้เช่นกัน

$$W_{\text{Heater}} = 4.77 \text{ วัตต์}$$

การคำนวณค่าประสิทธิภาพความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$COP = \frac{20.00 + 15.31}{62.16 + 4.77 + 423.29} \times 100$$

$$COP = 42.93\%$$

2. ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (η)

ค่าประสิทธิภาพนี้เป็นอัตราส่วนระหว่างงานที่ได้รับ และงานที่ให้กับระบบ โดยมี ความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (3)

$$\eta = \frac{W_{\text{output}}}{W_{\text{input}}} \times 100 \quad (3)$$

η = ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี

T_a = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

T_H = อุณหภูมิของปฏิกิริยาคายความร้อน

$$\eta = \frac{6.20 + 3.71}{62.16 + 4.77 + 15.31} \times 100$$

$$\eta = 2.02\%$$

3. ค่าประสิทธิภาพเอนทรานซี (G^*)

ค่าประสิทธิภาพชนิดนี้เป็นค่าประสิทธิภาพชนิดใหม่ซึ่งลดตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณลง ซึ่งยังคงเป็นความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของผลคูณของภาวะความร้อนกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่ระบบให้ความร้อน และผลคูณของภาวะความร้อนกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่ต้องให้ภาวะความร้อนกับระบบ โดยคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$G^* = \frac{Q_{output} T_{output}}{Q_{input} T_{input}} \quad (4)$$

G^* = ค่าประสิทธิภาพเอนทรานซี

T_R = อุณหภูมิของหม้อต้มซ้ำ

ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพชนิดนี้ ต้องคำนวณภาวะความร้อนของเครื่องอัดอากาศ จากความสัมพันธ์ระหว่างภาวะความร้อนและงานในสมการที่ (2)

$$Q = W \left(\frac{T}{T - T_a} \right)$$

$$Q = 15.31 \left(\frac{423.29}{423.29 - 298} \right)$$

$$Q = 51.72 \text{ วัตต์}$$

จากนั้นคำนวณค่าประสิทธิภาพเอนทรานซี

$$G^* = \frac{(20.00 \times 431.79) + (15.31 \times 393.45)}{(388.28 \times 254.80) + (29.66 \times 355.10) + (51.72 \times 423.29)} \times 100$$

$$G^* = 8.61\%$$

ตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

เวลา (นาทึ)	ปริมาตร (มิลลิตร)	ปริมาตรสะสม (มิลลิลิตร)	แก๊สไฮโดรเจน (โมล)	แก๊สไฮโดรเจน สะสม (โมล)	แก๊สไฮโดรเจน สะสม (กรัม)	การเปลี่ยนของ ปฏิกิริยา (%)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (rd) (โมล/นาทึ.กรัมตัวเร่งปฏิกิริยา)	1/rd	ความเข้มข้น ของแอซี โทน
5	58.17	58.17	2.34E-03	0.0023	2.34	0.37	4.68E-04	2137	0.08
10	56.08	114.25	2.26E-03	0.0046	4.60	0.72	4.51E-04	2217	0.15
20	53.02	167.27	2.13E-03	0.0067	6.73	1.06	2.13E-04	4690	0.22
30	49.12	216.39	1.98E-03	0.0087	8.70	1.37	1.98E-04	5061	0.29
40	51.08	267.47	2.05E-03	0.0108	10.78	1.69	2.05E-04	4868	0.36
50	45.53	313.00	1.83E-03	0.0126	12.59	1.98	1.83E-04	5460	0.42
60	43.17	356.17	1.74E-03	0.0143	14.33	2.25	1.74E-04	5760	0.48

4. ปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนสะสม

ปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนสะสม = ผลรวมทั้งหมดของปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นก่อน + ปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ณ เวลาที่พิจารณา

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาตรสะสมของแก๊สไฮโดรเจนที่เวลา 30 นาที = $167.27 + 49.12 = 216.39$ (ml)

5. โมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสม

มวลของแก๊สไฮโดรเจนสะสม = ผลรวมทั้งหมดของปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนสะสม * ความหนาแน่น

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการ $PV = nRT$ (11)

$P = 1$ atm

$R = 82.06$ ml.atm/k.mol

$T = 303.00$ K

สามารถคำนวณโมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสมได้ดังนี้

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 49.12}{82.06 \times 303.00} = 1.98 \times 10^{-3}$$

โมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เวลา 30 นาที = 1.98×10^{-3} (mol)

6. โมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสม

โมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสม = ผลรวมทั้งหมดของ โมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสม + โมลของแก๊สไฮโดรเจน ณ เวลาที่ศึกษา

ตัวอย่างการคำนวณ

โมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่เวลา 30 นาที = $0.0067 + 1.98 \times 10^{-3}$ (mol)

7. ร้อยละการเปลี่ยน

ร้อยละการเปลี่ยนของไฮโดรเจนสะสม = (โมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสม / โมลของไอโซโพรพานอลเริ่มต้น) * 100

ตัวอย่างการคำนวณ

ซึ่งโมลของไอโซโพรพานอล = 0.637 (mol)

ร้อยละการเปลี่ยนของไฮโดรเจนสะสมที่เวลา 30 นาที = $\frac{0.0087}{0.6370} \times 100 = 1.37\%$

8. อัตราการเกิดปฏิกิริยา

$$r_d = \frac{1}{m_{cat}} \frac{dN_H}{dt}$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยา = (โมลของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น / เวลาที่ใช้ในการเก็บแก๊สไฮโดรเจน) / มวลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา = 1 กรัม

อัตราการเกิดปฏิกิริยา = $r_d = \frac{1}{1} \times \frac{1.98 \times 10^{-3}}{(30 - 20)} = 1.98 \times 10^{-4}$ (mol/g.min)

9. ความเข้มข้นของแอสีโทน

ความเข้มข้นของแอสีโทน = โมลของแก๊สไฮโดรเจนสะสม / ปริมาตรของไอโซโพรพานอล

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาตรของไอโซโพรพานอล 30 (ml)

$$\text{ความเข้มข้นของแอสีโทนที่เวลา 30 นาที} = \frac{0.0087}{30 \times 10^{-3}} = 0.29 \text{ (mol/l)}$$

10. ค่าคงที่ของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน(k) และค่าคงที่ของการดูดซับของแอสีโทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา (K_{ace})

จากสมการ

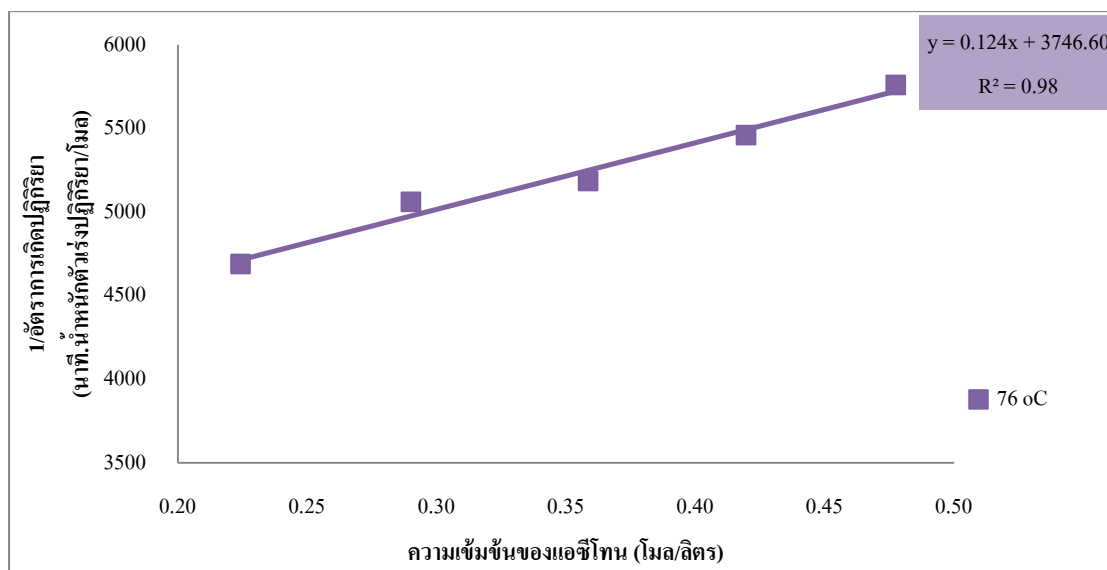
$$r_d = \frac{k}{1 + K_{ace} C_{ace}}$$

สามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{r_d} = \frac{1}{k} + \frac{K_{ace}}{k} C_{ace}$$

การคำนวณค่าคงที่ของปฏิกิริยาคีไฮโดรจีเนชัน ทำได้โดยพล็อตกราฟระหว่าง C_{ace} เป็นแกน x

และ $\frac{1}{r_d}$ เป็นแกน y



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของแอซีโตนและค่าเศษส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

จากรูปที่ 1 เมื่อได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรง สมการเส้นตรงที่ได้จึงมีความเหมาะสมในการใช้หาค่าคงที่ต่างๆ ของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

จากจุดตัดแกนของสมการมีค่า 3,746.60 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{k}$

$$\text{ดังนั้น } k = \frac{1}{3,746.60} = 2.67 \times 10^{-4}$$

จากความชันของสมการมีค่า 0.124 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{K_{ace}}{k}$

$$\text{ดังนั้น } \frac{K_{ace}}{k} = 0.124$$

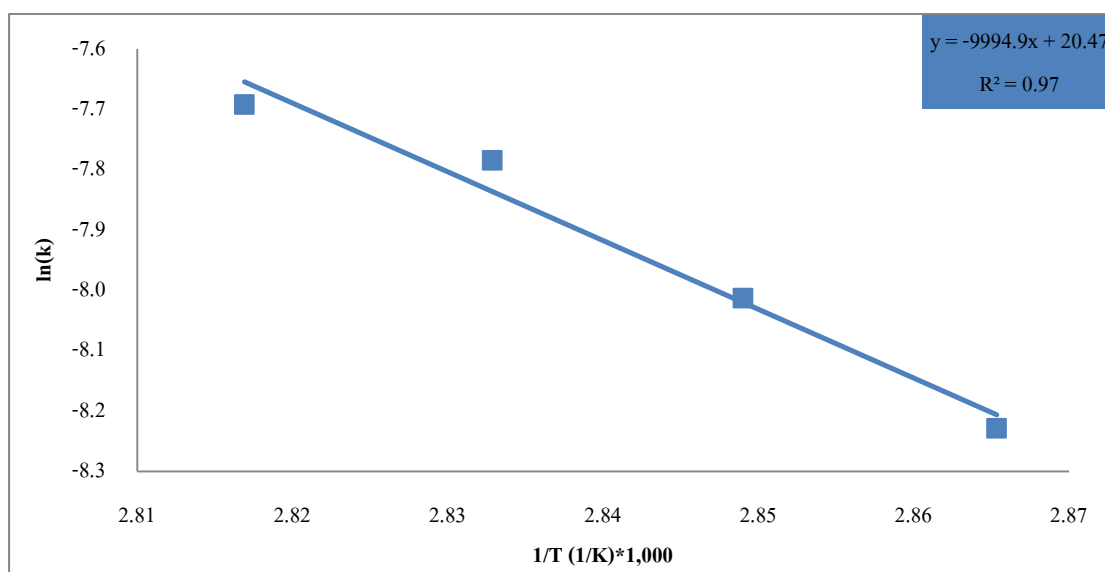
$$K_{ace} = 3,746.60 \times 0.124 = 3.32 \times 10^{-5}$$

11. ค่าพลังงานก่อกัมมันต์

จากสมการ

$$\ln(k) = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT}$$

การคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น ทำได้โดยพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{T}$ เป็นแกน x และ $\ln(k)$ เป็นแกน y



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนกลับของอุณหภูมิและค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่
สมดุลของปฏิกิริยา

จากรูปที่ 2 เมื่อได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรง สมการเส้นตรงที่ได้จึงมีความเหมาะสมในการใช้หาค่า
พลังงานกระตุ้น

จากจุดตัดแกนของสมการมีค่า 20.46 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\ln k_0$

ดังนั้น

$$\ln k = 20.46$$

$$k = 7.72 \times 10^{-8}$$

จากความชันของสมการมีค่า -9994.9 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-\frac{E_a}{R}$

$$\text{ดังนั้น } -\frac{E_a}{R} = -9994.9$$

$$E_a = 9994.9 \times 8.314 = 83097.6 \text{ (J/mol)}$$

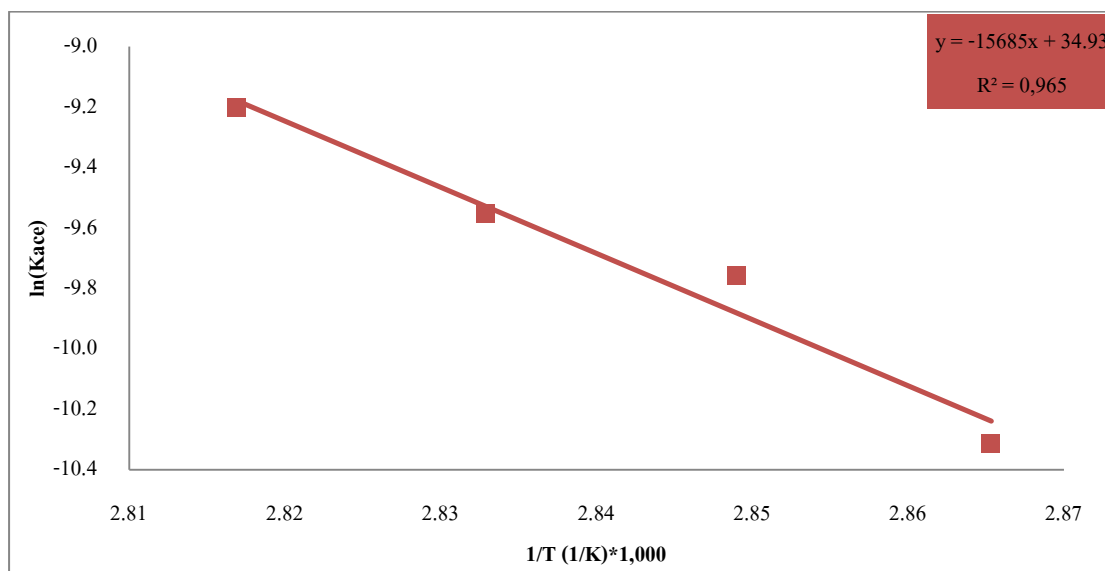
12. ค่าพรีเอกโพเนนเชียลแฟกเตอร์ (K_0)

จากสมการ

$$\ln(K) = \ln K_0 - \frac{\Delta H_{ad}}{RT}$$

การคำนวณค่าพรีเอกโพเนนเชียลแฟกเตอร์ทำได้โดยพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{T}$ เป็นแกน x และ

$\ln(K)$ เป็นแกน y



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนกลับของอุณหภูมิและค่าลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่ของการดูดซับแอซีโตน

จากกราฟที่ 3 เมื่อได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรง สมการเส้นตรงที่ได้จึงมีความเหมาะสมในการใช้หาค่าพรีเอกโพเนนเชียลแฟกเตอร์

จากจุดตัดแกนของสมการมีค่า 45.14 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\ln K_0$ ดังนั้น

$$\ln K_0 = 34.93$$

$$K_0 = 1.47879E + 15$$

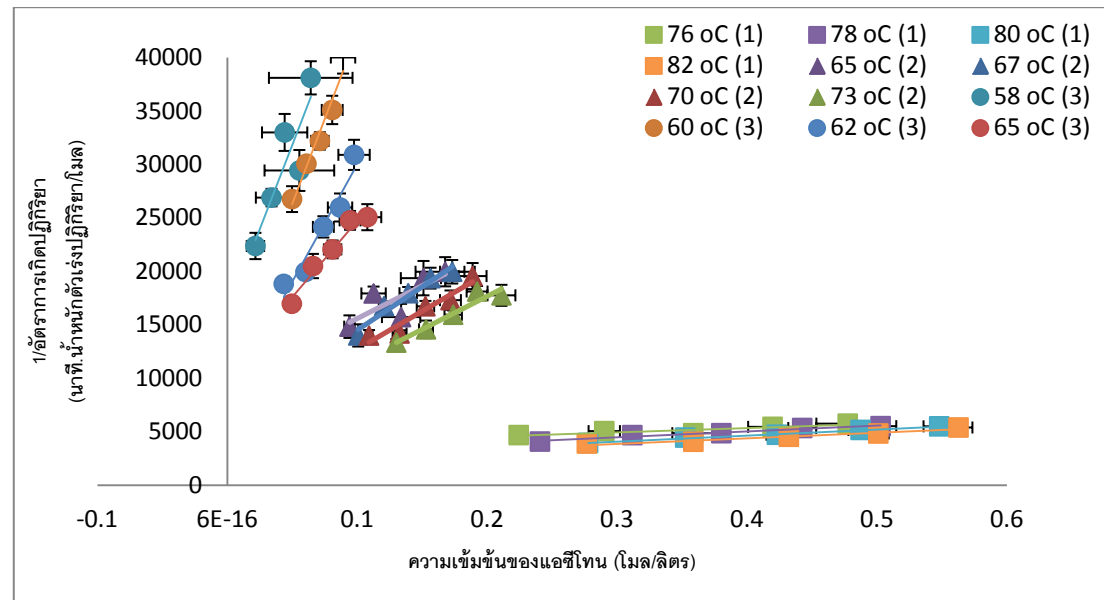
จากความชันของสมการมีค่า -15685 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\Delta H_{ad}}{R}$ ดังนั้น

$$\frac{\Delta H_{ad}}{R} = -15685$$

$$\Delta H_{ad} = -15685 \times 8.314$$

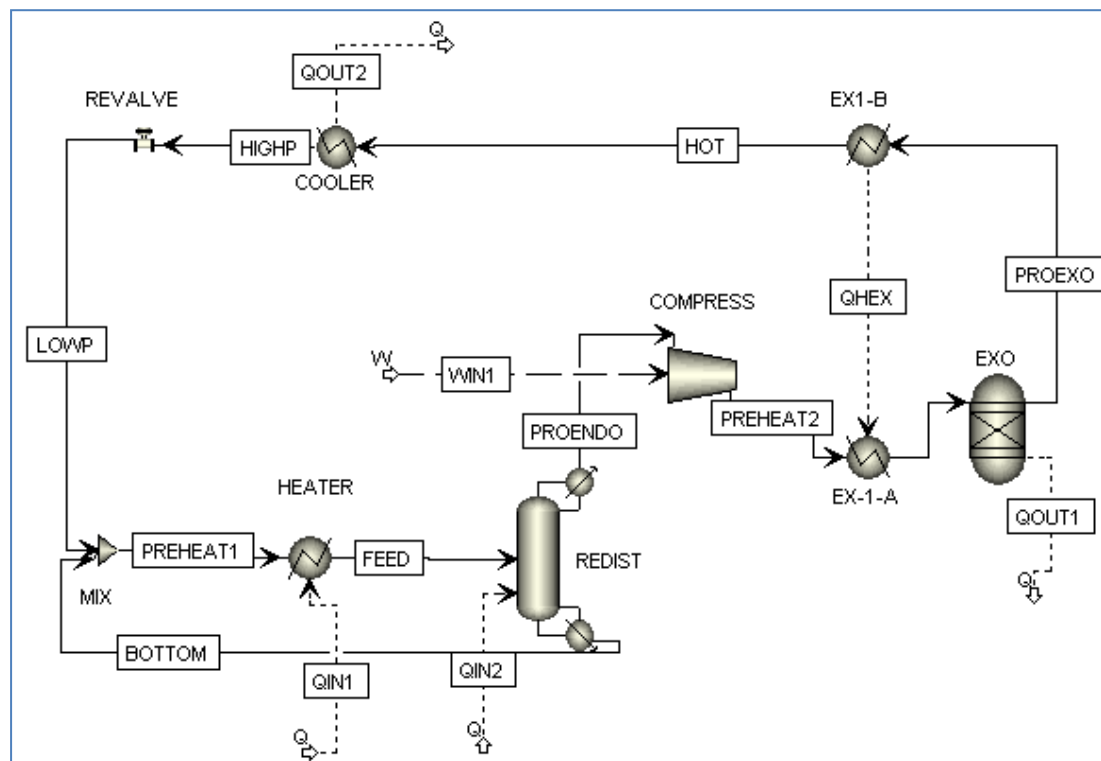
$$\Delta H_{ad} = -130,405.1 \text{ (J/mol)}$$

ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของแอสีโทนทุกอุณหภูมิ



**รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอสีโทนและส่วนกลับของอัตรา
การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในขวดจำลองอุณหภูมิ (1) 80, (2) 70 และ (3) 60 องศาเซลเซียส**

ภาพแสดงการจำลองระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี



รูปที่ 5 แสดงแบบจำลองระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววัชรอรุไรสกุล เกิดเมื่อวันพุธที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยี
เชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2553