

ระบบควบคุมสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน



นางสาววราพร กิติเกียรติโสภณ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

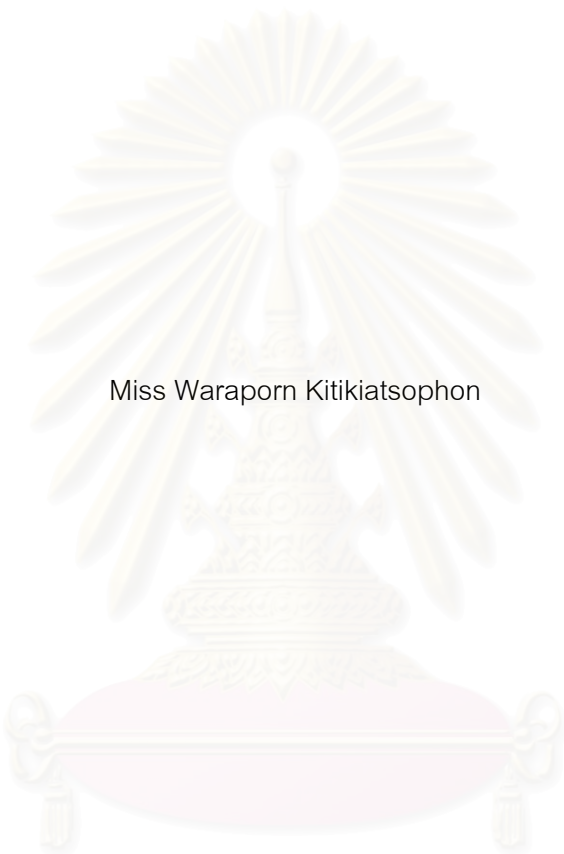
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2719-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A CONTROL SYSTEM FOR A CHEMICAL HEAT PUMP: ISOPROPANOL/ACETONE/HYDROGEN



Miss Waraporn Kitikiatsophon

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2719-4



วราพร กิติเกียรติโสภณ : ระบบควบคุมสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน. (A CONTROL SYSTEM FOR A CHEMICAL HEAT PUMP: ISOPROPANOL/ ACETONE/ HYDROGEN) อ. ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์. จำนวนหน้า 150 หน้า. ISBN 974-17-2719-4.

ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานซึ่งอาศัยปฏิกิริยาผันกลับได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งมาเพิ่มคุณค่าให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการหรือกิจกรรมที่ต้องการพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง โครงสร้างการควบคุมสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจนประกอบด้วย 8 วงควบคุมดังนี้ การควบคุมความดันของหอกลิ้นและแก๊สภายในกระบวนการซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดเสถียรภาพของปั๊มความร้อน การควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ การควบคุมอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ทำการควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยปรับอัตราการไหลกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ทำการควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยปรับพลังงานของเครื่องอัดไอน้ำผ่านวงควบคุมแบบชั้นลำดับ โครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบมีสมรรถนะใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาในแง่ความทนทานต่อการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง ความเร็วในการปรับกระบวนการจากค่าโอเออีรวม ค่าการตอบสนองสูงสุดของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม ประสิทธิภาพความร้อน โดยข้อจำกัดของการควบคุมคือการควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2545.....

## 4272389323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CHEMICAL HEAT PUMP / CONTROL STRUCTURE / DYNAMIC SIMULATION / ISOPROPANOL / ACETONE / HYDROGEN

WARAPORN KITIKIATSOPHON : A CONTROL SYSTEM FOR A CHEMICAL HEAT PUMP: ISOPROPANOL/ACETONE/HYDROGEN. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.PORNPOTE PIUMSOMBOON, 150 pp. ISBN 974-17-2719-4.

Chemical heat pump is a way to improve energy utilization by upgrading low quality heat to higher quality heat via chemical reaction. Two control structures for chemical heat pump: isopropanol/ acetone/ hydrogen were proposed. Each consisted of 8 control loops. The column pressure and process pressure control loops were the main factors for chemical heat pump stability. Isopropanol concentration in top product, liquid level in top accumulator and column base, endothermic reactor feed temperature, high temperature product stream and its flow rate were also the control loops. The last control loop was different for each control structure. Type I control structure, high temperature stream was controlled by manipulating exothermic reactor feed rate. In contrast, type II control structure, the high temperature stream was controlled by using cascade configuration. The secondary loop was used to control process pressure by manipulating power of the compressor. Each structure demonstrated quite the same performance, in term of handling large temperature and flow rate changes, speed of suppressing disturbances, overshoot of controlled and manipulated variables, and thermal efficiency. The limitation of control structures was to control isopropanol composition of the top product.

Department....Chemical Technology..... Student signature.....  
 Field of study...Chemical Technology..... Advisor' s signature.....  
 Academic year.....2002.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ในทุกๆ ด้านทั้งคำแนะนำและอุปการณ์ในการทำวิจัย จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ที่ห้องวิจัยคอมพิวเตอร์ 'ไซเบอร์เนติกส์' ทุกท่านสำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนทำให้การทำงานวิจัยเป็นไปอย่างมีความสุข ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมาตั้งแต่เกิดจนถึงวันนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม .....	3
2.1 ปุ่มความร้อน .....	3
2.1.1 ปุ่มความร้อนชนิดอัดไอ .....	8
2.1.2 ปุ่มความร้อนชนิดดูดกลืน .....	10
2.1.3 ปุ่มความร้อนพลังงานเคมี .....	13
2.2 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ .....	23
2.2.1 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติ.....	23
2.2.2 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ไม่ได้มาจากธรรมชาติ.....	24
2.3 แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง .....	25
2.4 ข้อดีของปุ่มความร้อนพลังงานเคมี.....	25
2.5 เกณฑ์เบื้องต้นสำหรับเลือกปฏิกิริยาสำหรับปุ่มความร้อน.....	26
2.6 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมตามหลักแพลนที่ไวต์ .....	27
2.7 การควบคุมแต่ละหน่วย .....	29
2.8 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม .....	32
2.9 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของโครงสร้างการควบคุมแบบหลายวงควบคุม .....	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 การปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบขั้นลำดับ .....	34
2.11 หลักการเลือกชนิดของเครื่องควบคุม .....	34
2.12 กฎนี้วโป่ง .....	35
2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองป้อนความร้อนและการออกแบบระบบควบคุม .....	39
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	39
3.2 วิธีการทดลอง .....	39
3.3 ป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไฮโดรฟรานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน.....	39
3.4 การออกแบบระบบควบคุมสำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไฮโดรฟรานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน.....	40
3.5 การจำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไฮโดรฟรานอล/ อะซิโตน/ไฮโดรเจน.....	49
3.5.1 การจำลองสถานการณ์ที่ภาวะคงตัว .....	49
3.5.2 การจำลองสถานการณ์ภาวะพลวัต .....	50
3.6 การปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุม.....	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง.....	57
4.1 พฤติกรรมเชิงพลวัตของป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไฮโดรฟรานอล/ อะซิโตน/ไฮโดรเจน .....	57
4.2 ผลของตัวแปรรอบวนที่มีต่อป้อนความร้อน .....	86
4.3 การจำลองสถานการณ์โดยใช้โครงสร้างการควบคุม ป้อนความร้อนพลังงานเคมีที่แตกต่างกัน.....	92
4.3.1 การจำลองสถานการณ์โดยใช้โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1.....	92
4.3.2 การจำลองสถานการณ์โดยใช้โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 .....	106
4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของโครงสร้างการควบคุม.....	119
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย.....	124
รายการอ้างอิง.....	126



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	128
ภาคผนวก ก .....	129
ภาคผนวก ข.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	150



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 หลักการของปั๊มความร้อน เครื่องจักรความร้อนและเครื่องทำความเย็น.....	4
2.2 วัฏจักรเปรียบเทียบสำหรับปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ .....	5
2.3 รายละเอียดของวัฏจักรต่างๆ .....	5
2.4 รายละเอียดของปั๊มความร้อนชนิดต่างๆ .....	6
2.5 ประเภทของปั๊มความร้อนแบบต่างๆ.....	7
2.6 ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ.....	8
2.7 ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน.....	11
2.8 แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนเชิงอุดมคติ .....	12
2.9 ปั๊มความร้อนพลังงานเคมี .....	14
2.10 การแยกไฮโดรเจนออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา .....	14
2.11 ปฏิกิริยาที่ใช้กับปั๊มความร้อนพลังงานเคมี .....	18
2.12 โครงสร้างการควบคุมมวลสารและปริมาณการผลิต .....	28
2.13 การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์.....	29
2.14 การควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	30
2.15 หอกกลั่นและวาล์วควบคุม .....	31
2.16 ผังการเลือกชนิดของเครื่องควบคุม.....	34
3.1 ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน.....	41
3.2 โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 สำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน.....	45
3.3 โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 สำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน.....	46
3.4 การกำหนดสัมประสิทธิ์การไหลของไอน้ำในหอกกลั่น .....	51
3.5 การกำหนดสัมประสิทธิ์การไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	52
3.6 การกำหนดสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว.....	52
4.1 ปัจจัยรบกวนปั๊มความร้อน .....	58
4.2 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยดหอ .....	59
4.3 ความดันของหอกกลั่น.....	59

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.4 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ.....	60
4.5 อัตราการไหลของอะซีโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	60
4.6 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	60
4.7 การควบคุมความดันของหอกลั่น.....	61
4.8 การควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการ .....	62
4.9 การควบคุมความดันของหอกลั่นและแก๊สภายในกระบวนการ.....	63
4.10 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ .....	64
4.11 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของ แก๊สภายในกระบวนการ .....	65
4.12 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของ หอกลั่น.....	66
4.13 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของ หอกลั่นและความดันของแก๊สภายในกระบวนการ.....	67
4.14 ความดันของหอกลั่น.....	68
4.15 ความดันของก้นหอกลั่น .....	68
4.16 อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	69
4.17 อัตราการไหลของอะซีโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	69
4.18 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	69
4.19 ความดันของกระแสน้ำออกจากเครื่องอัดไอ.....	70
4.20 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	70
4.21 ความดันของยอดหอกลั่น .....	71
4.22 อัตราการไหลของอะซีโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	71
4.23 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	71
4.24 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ.....	72
4.25 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	72
4.26 ความดันของยอดหอกลั่น .....	73
4.27 อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	73
4.28 อัตราการไหลของอะซีโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	73

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.29 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	74
4.30 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	74
4.31 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	75
4.32 ความดันของหอกลั่น.....	75
4.33 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	75
4.34 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	76
4.35 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	76
4.36 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	77
4.37 ความดันของหอกลั่น.....	77
4.38 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	78
4.39 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	78
4.40 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	78
4.41 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	79
4.42 ความดันก้นหอ.....	79
4.43 ความดันยอดหอ.....	80
4.44 อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	80
4.45 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	80
4.46 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	81
4.47 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	81
4.48 ความดันของหอกลั่น.....	82
4.49 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	82
4.50 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	82
4.51 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	83
4.52 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของ หอกลั่นและแก๊สภายในกระบวนการ การควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหล กระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง การควบคุมอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ ดูความร้อน .....	85

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.53 ผลการจำลองสถานการณ์เพิ่มความร้อนเมื่อเพิ่มค่าเป้าหมายแบบขั้นบันไดของ วงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำอุณหภูมิสูง 5 องศาเซลเซียส.....	86
4.54 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอหด	87
4.55 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอหด	87
4.56 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอหด	87
4.57 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	88
4.58 ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาคายความร้อน	88
4.59 การควบคุมระดับของของเหลวยอหดและก้นหอย การควบคุมความดันของ หอกลิ้นและแก๊สภายในกระบวนการ การควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหล กระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง การควบคุมอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ ดูดความร้อน	89
4.60 การจำลองสถานการณ์เพิ่มความร้อนเมื่อเพิ่มค่าเป้าหมายแบบขั้นบันไดของ วงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำอุณหภูมิสูง 5 องศาเซลเซียส.....	90
4.61 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอหด	90
4.62 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอหด	91
4.63 อัตราการไหลของไฮโดรเจนกระแสผลิตภัณฑ์ยอหด	91
4.64 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	91
4.65 ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาคายความร้อน	92
4.66 โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1	93
4.67 อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง	95
4.68 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	95
4.69 ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอหด	95
4.70 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสแก๊ส	96
4.71 อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	96
4.72 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ	96
4.73 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ	97
4.74 ร้อยละการเปิดวาล์วพลังงานของเครื่องอัดไอ	97
4.75 ความดันของหอกลิ้น	97

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.76 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น .....	98
4.77 ระดับของของเหลวยอดหอ .....	98
4.78 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์ .....	98
4.79 ระดับของเหลวกันหอ .....	99
4.80 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ.....	99
4.81 อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง .....	99
4.82 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง .....	100
4.83 อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง .....	100
4.84 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง .....	101
4.85 อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง.....	101
4.86 ร้อยละการปรับความดันของแก๊สภายในกระบวนการ .....	101
4.87 ความเข้มข้นของไอโซโทปพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	102
4.88 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสกันหอ.....	102
4.89 อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน.....	102
4.90 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ.....	103
4.91 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ .....	103
4.92 ร้อยละการเปิดวาล์วพลังงานของเครื่องอัดไอ .....	103
4.93 ความดันของหอกลั่น.....	104
4.94 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น .....	104
4.95 ระดับของของเหลวยอดหอ .....	104
4.96 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์ .....	105
4.97 ระดับของของเหลวกันหอ .....	105
4.98 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ.....	105
4.99 โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 .....	107
4.100 อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง.....	108
4.101 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง .....	108
4.102 อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง.....	109
4.103 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง .....	109

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.104 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ .....	109
4.105 ร้อยละการเปิดวาล์วพลังงานของเครื่องอัดไอ .....	110
4.106 ความเข้มข้นของไอโซโทรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	110
4.107 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสแก๊นหอ.....	110
4.108 อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน.....	111
4.109 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ.....	111
4.110 ความดันของหอกลั่น.....	111
4.111 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น .....	112
4.112 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น .....	112
4.113 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์ .....	112
4.114 ระดับของของเหลวก้นหอ .....	113
4.115 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ.....	113
4.116 อัตราการไหลกระแสไอน้ำอุณหภูมิสูง .....	114
4.117 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง .....	114
4.118 อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง.....	114
4.119 ร้อยละการเปลี่ยนความดันของแก๊สภายในกระบวนการ .....	115
4.120 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ .....	115
4.121 ร้อยละการเปิดวาล์วพลังงานของเครื่องอัดไอ .....	115
4.122 ความเข้มข้นของไอโซโทรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ .....	116
4.123 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสแก๊นหอ.....	116
4.124 อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน.....	116
4.125 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ.....	117
4.126 ระดับของของเหลวยอดหอ .....	117
4.127 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์ .....	117
4.128 ระดับของของเหลวยอดหอ .....	118
4.129 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ.....	118
4.130 ความดันของหอกลั่น.....	118

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.131 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น .....	119
ก1 กราฟการตอบสนองของอุณหภูมิไอน้ำ .....	129



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของ ไอโซโพรพานอล .....	16
2.2 ปฏิริยาผันกลับได้สำหรับปฏิกิริยาร้อนพลังงานเคมีจำแนกตาม อุณหภูมิเทอนิง .....	18
2.3 แหล่งและอุณหภูมิของความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิสูง .....	24
2.4 แหล่งและอุณหภูมิของความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิปานกลาง .....	25
2.5 แหล่งและอุณหภูมิของความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิต่ำ .....	25
3.1 ภาวะดำเนินการที่ภาวะคงตัวของปฏิกิริยาร้อนพลังงานเคมีชนิด ไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน .....	42
3.2 ดุลองค์ประกอบภายในกระบวนการ .....	48
3.3 การกำหนดขนาดของอุปกรณ์โดยใช้ไดนามิกส์แอสซิชแทนท์ .....	53
3.4 พารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมอิสระ .....	55
3.5 พารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมอิสระที่มีการตอบสนองอย่างมีเสถียรภาพ .....	55
3.6 สรุปพารามิเตอร์เครื่องควบคุมของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และ 2 .....	56
4.1 สรุปการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อ 4.1.1-4.1.8 .....	84
4.2 อุณหภูมิและอัตราการไหลสูงสุดของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงที่ทั้งสอง โครงสร้างยังสามารถรักษาเสถียรภาพของการดำเนินการกระบวนการได้ .....	119
4.3 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของการเพิ่มค่าเป้าหมายวง ควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำอุณหภูมิสูง 5 องศาเซลเซียส .....	120
4.4 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของการเพิ่มค่าเป้าหมายวง ควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำอุณหภูมิสูง 9 กิโลโมลต่อชั่วโมง .....	121
4.5 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในกระบวนการจากภาวะพลวัต .....	123
ก1 ตัวอย่างข้อมูลเชิงพลวัตของวงควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง .....	130
ก2 ลักษณะการทำงานของเครื่องควบคุม .....	131
ข1.1 หอกถัน .....	132
ข1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง .....	133
ข1.3 เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน .....	134

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ข1.4 เครื่องอัดไอ .....	135
ข1.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ .....	135
ข1.6 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน .....	136
ข1.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง .....	136
ข2.1 หอกลิ้น .....	138
ข2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง .....	139
ข2.3 เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน .....	140
ข2.4 เครื่องอัดไอ .....	141
ข2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ .....	141
ข2.6 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน .....	142
ข2.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง .....	142
ข3.1 หอกลิ้น .....	144
ข3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง .....	145
ข3.3 เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน .....	146
ข3.4 เครื่องอัดไอ .....	147
ข3.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ .....	147
ข3.6 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน .....	148
ข3.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง .....	148

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

นับตั้งแต่การปฏิวัติอุตสาหกรรมเป็นต้นมา อัตราการใช้พลังงานจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป โดยเฉพาะพลังงานจากซากดึกดำบรรพ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันคิดเป็นร้อยละ 95 ของพลังงานทั้งหมดที่มนุษย์ใช้ ร้อยละ 2 มาจากพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 3 มาจากพลังงานหมุนเวียน เช่น ชีวมวล น้ำ แสงอาทิตย์ ลม ความร้อนใต้พิภพ จากการบริโภคพลังงานที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานสำรองของโลกลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมนุษย์ไม่สามารถสร้างหรือสังเคราะห์ปิโตรเลียมได้และปิโตรเลียมไม่สามารถเกิดได้ในช่วงชีวิตมนุษย์ เพราะต้องใช้เวลานานนับล้านปีกว่าที่ตะกอนอินทรีย์วัตถุจะสะสมตัวกลายเป็นแหล่งปิโตรเลียม นอกจากนี้การผลิต การขุดค้นและการแปรรูปพลังงานมาใช้อย่างก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยก่อให้เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด รวมทั้งพัฒนาวิธีการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ให้เกิดผลสูงสุดเพียงพอที่จะทดแทนพลังงานที่สิ้นเปลืองและมีมลพิษ

ป้อนความร้อนพลังงานเคมีเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาผันกลับได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) มาเพิ่มคุณค่าให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการหรือกิจกรรมที่ต้องการพลังงานความร้อนที่มีคุณภาพสูง ทำให้สามารถประหยัดพลังงานจากเชื้อเพลิงประเภทใช้แล้วหมดไป

โดยทั่วไปการเดินกระบวนการของป้อนความร้อนอาจไม่ได้อยู่ที่ภาวะที่ออกแบบไว้เสมอไป ภาวะการดำเนินการอาจเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยรบกวนภายนอก ดังนั้นระบบควบคุมจึงมีความจำเป็นเพื่อช่วยให้ป้อนความร้อนดำเนินการได้ตามวัตถุประสงค์

### 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตและออกแบบระบบควบคุมสำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจนเพื่อให้ได้พลังงานที่มีปริมาณและคุณภาพตามต้องการ

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตขององค์ประกอบแต่ละส่วนของป้อนความร้อน
2. ออกแบบระบบควบคุมสำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/

อะซิโตน/ไฮโดรเจน เพื่อให้ได้พลังงานที่มีปริมาณและอุณหภูมิตามต้องการ

3. เลือกชนิดและพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม
4. ตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างการควบคุม (Control Structure)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบควบคุมสำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมสำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน

#### 1.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ
3. ศึกษาโปรแกรมไฮซิสแพลนท์ (Hysys.Plant) รุ่น 2.4.1
4. ออกแบบระบบควบคุมและจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรมไฮซิสแพลนท์รุ่น 2.4.1
5. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล
6. เขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

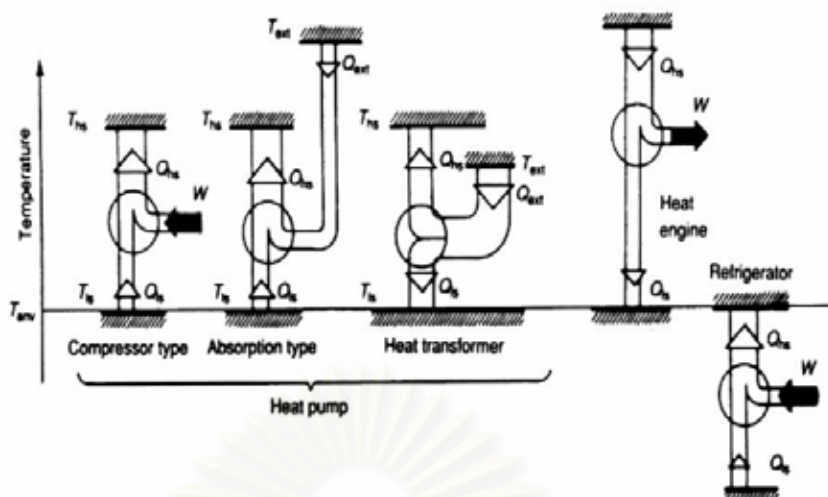
### ปรีทัศน์วรรณกรรม

#### 2.1 ป้อนความร้อน

ทอมสัน (W.Thomson) เป็นผู้ริเริ่มแนวคิดป้อนความร้อนขึ้นเป็นครั้งแรกใน ค.ศ. 1852 (Brodowicz and Dyakowski, 1993: 1) แต่ยังไม่มีการใช้ในทางปฏิบัติจนกระทั่งในทศวรรษที่ 1880 เป็นช่วงเริ่มต้นการพัฒนาวิศวกรทำความเย็นซึ่งมีแอมโมเนียเป็นของไหลทำงาน ฮาเดน (T.G. Haldane) ได้ทำการติดตั้งป้อนความร้อนขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1928 ซึ่งมีองค์ประกอบเหมือนกับระบบทำความเย็นในการทำความร้อนภายในบ้าน หลังจากนั้นได้มีการปรับปรุงเทคโนโลยีจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการติดตั้งป้อนความร้อนขนาด 1050 กิโลวัตต์ขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา ทศวรรษ 1940 การแพร่หลายของของไหลทำงานอินทรีย์ทำให้ป้อนความร้อนขนาดเล็กสำหรับใช้ภายในบ้านได้รับความนิยมอย่างมากและมีการใช้งานเป็นครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาสำหรับทำความร้อนในฤดูหนาวและทำความเย็นในฤดูร้อน และต่อมาได้แพร่หลายเข้าสู่ประเทศแถบยุโรปได้แก่ นอร์เวย์ สวีเดน เยอรมัน ฝรั่งเศส อิตาลีและโปแลนด์ ช่วงทศวรรษ 1980 ป้อนความร้อนชนิดอัดไอ (Compression Heat Pump) ได้รับความนิยมอย่างมาก จนกระทั่งสิ้นปี ค.ศ. 1986 ได้มีการติดตั้งป้อนความร้อนขนาดใหญ่ 600 เมกะวัตต์ถึง 40 เครื่อง ป้อนความร้อนเหมาะที่จะนำมาใช้ในหลายกรณีดังนี้

1. นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยความร้อนอุณหภูมิต่ำเป็นจำนวนมาก เช่น จากเครื่องปรับอากาศ เครื่องทำแห้ง เครื่องระเหย หอกลิ้น
2. นำมาใช้ในบริเวณที่ต้องการทั้งการทำความเย็นและการทำความร้อน
3. ใช้ส่งผ่านความร้อนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งไม่มาก
4. ภาคอุตสาหกรรมที่มีระบบผลิตความร้อน (Heat Generation) การติดตั้งป้อนความร้อนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตความร้อน

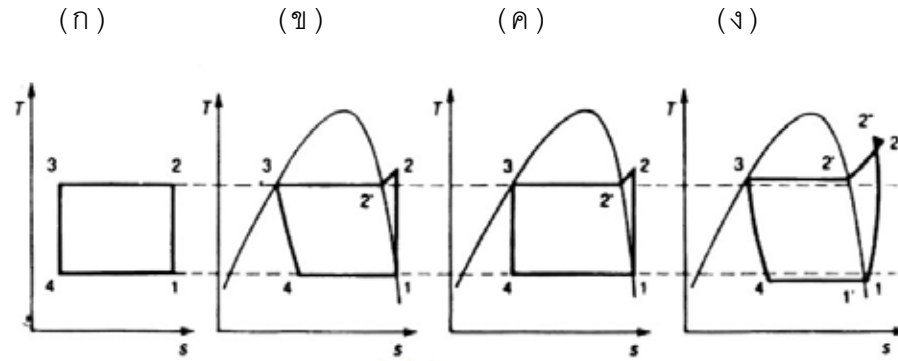
ป้อนความร้อนเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่สิ่งที่เราต้องการอุ่นในขณะที่สิ่งแวดล้อมอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า หน้าที่ของป้อนความร้อนจึงขับเคลื่อนให้ไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Heat Source) ไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (High Temperature Heat Source) โดยอาศัยงานหรือความร้อนเป็นแรงขับ รูปที่ 2.1 แสดงหลักการของป้อนความร้อน เครื่องจักรความร้อนและเครื่องทำความเย็น



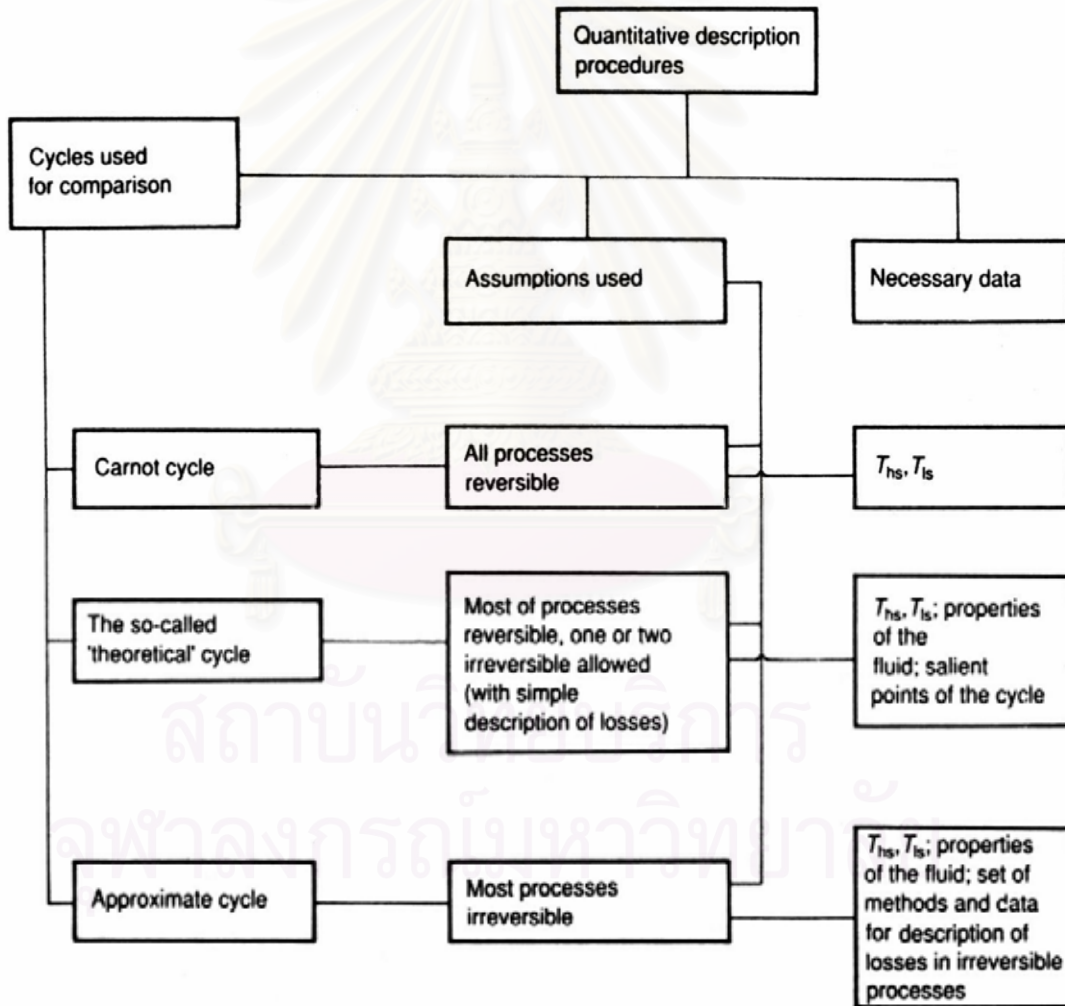
รูปที่ 2.1 แสดงหลักการของปั๊มความร้อน เครื่องจักรความร้อนและเครื่องทำความเย็น (Brodowicz and Dyakowski, 1993: 6)

ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอเป็นวัฏจักรเดียวกับเครื่องทำความเย็น โดยต้องอาศัยแรงขับจากงานเพื่อขับความร้อนให้ไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง และให้ความร้อนไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้ในกรณีของเครื่องทำความเย็น ส่วนเครื่องจักรความร้อนมีหน้าที่เปลี่ยนความร้อนให้เป็นงาน ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนและชนิดฮีทรอนฟอर्मเมอร์อาศัยความร้อนเป็นแรงขับ โดยความร้อนที่เข้าสู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนเป็นงานก่อน เปรียบได้ว่ามี 2 วัฏจักรรวมกันคือเครื่องจักรความร้อนและปั๊มความร้อน

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ของปั๊มความร้อน สามารถทำได้โดยวัฏจักรเปรียบเทียบ (Comparative Cycle) ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 วัฏจักรอย่างง่ายที่สุดคือ วัฏจักรคาร์โนต์เป็นวัฏจักรอุดมคติ ทุกกระบวนการทำงานแบบผันกลับได้ ไม่มีพลังงานสูญเสีย สามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิของแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำ โดยไม่ขึ้นกับชนิดของของไหลทำงาน (Working Fluid) สำหรับวัฏจักรทางทฤษฎี (Theoretical Cycle) จะมี 1 หรือ 2 กระบวนการที่ทำงานแบบผันกลับไม่ได้ มีการคิดพลังงานสูญเสียอย่างง่ายเพิ่มเข้ามา เช่น วัฏจักรจริงแบบผันกลับได้ของแรงกิน (Non-Ideal Reverse Rankine) หรือวัฏจักรลินเด (Linde Cycle) ประกอบด้วยกระบวนการผันกลับได้ ยกเว้นกระบวนการขยายตัวแบบเอนโทรปีคงที่ (Isentropic Expansion) ของวาล์วทรอตติง ดังนั้นลักษณะเฉพาะของวัฏจักรจะขึ้นกับชนิดของของไหลทำงานที่ใช้ด้วย โดยวัฏจักรลินเดนิยมที่จะใช้อธิบายงานต่างๆ ไปทางวิศวกรรม สำหรับวัฏจักรแบบประมาณ (Approximate Cycle) นั้นกระบวนการเกือบทั้งหมดทำงานแบบผันกลับไม่ได้ และมีการคิดพลังงานสูญเสียอย่างละเอียด

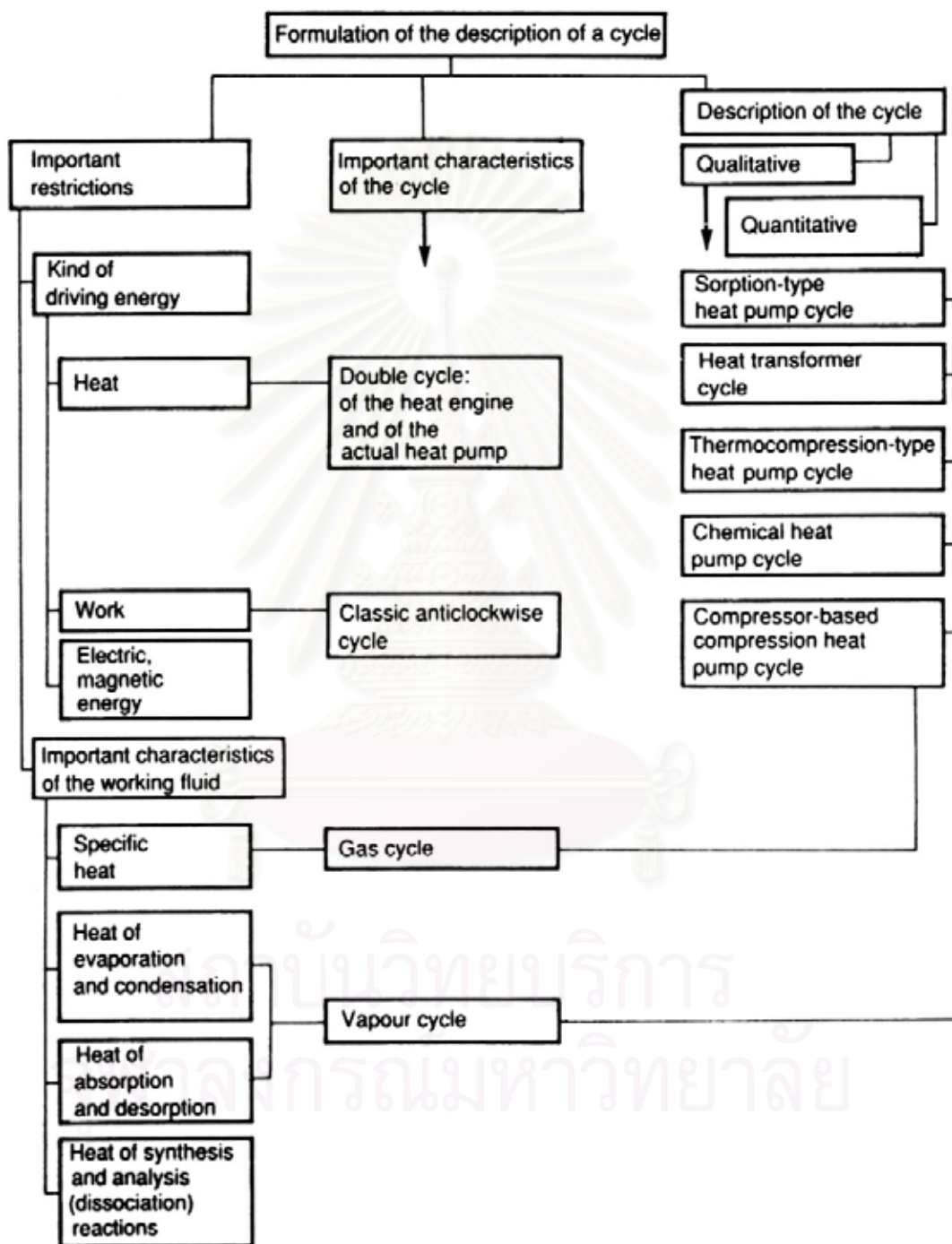


รูปที่ 2.2 วัฏจักรเปรียบเทียบสำหรับปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ (ก) วัฏจักรคาร์โนต์ (ข) วัฏจักรจริงแบบผันกลับได้ของแรงกิ้น (ค) วัฏจักรอุดมคติแบบผันกลับได้ของแรงกิ้น (ง) วัฏจักรประมาณ (Brodowicz and Dyakowski, 1993: 85)



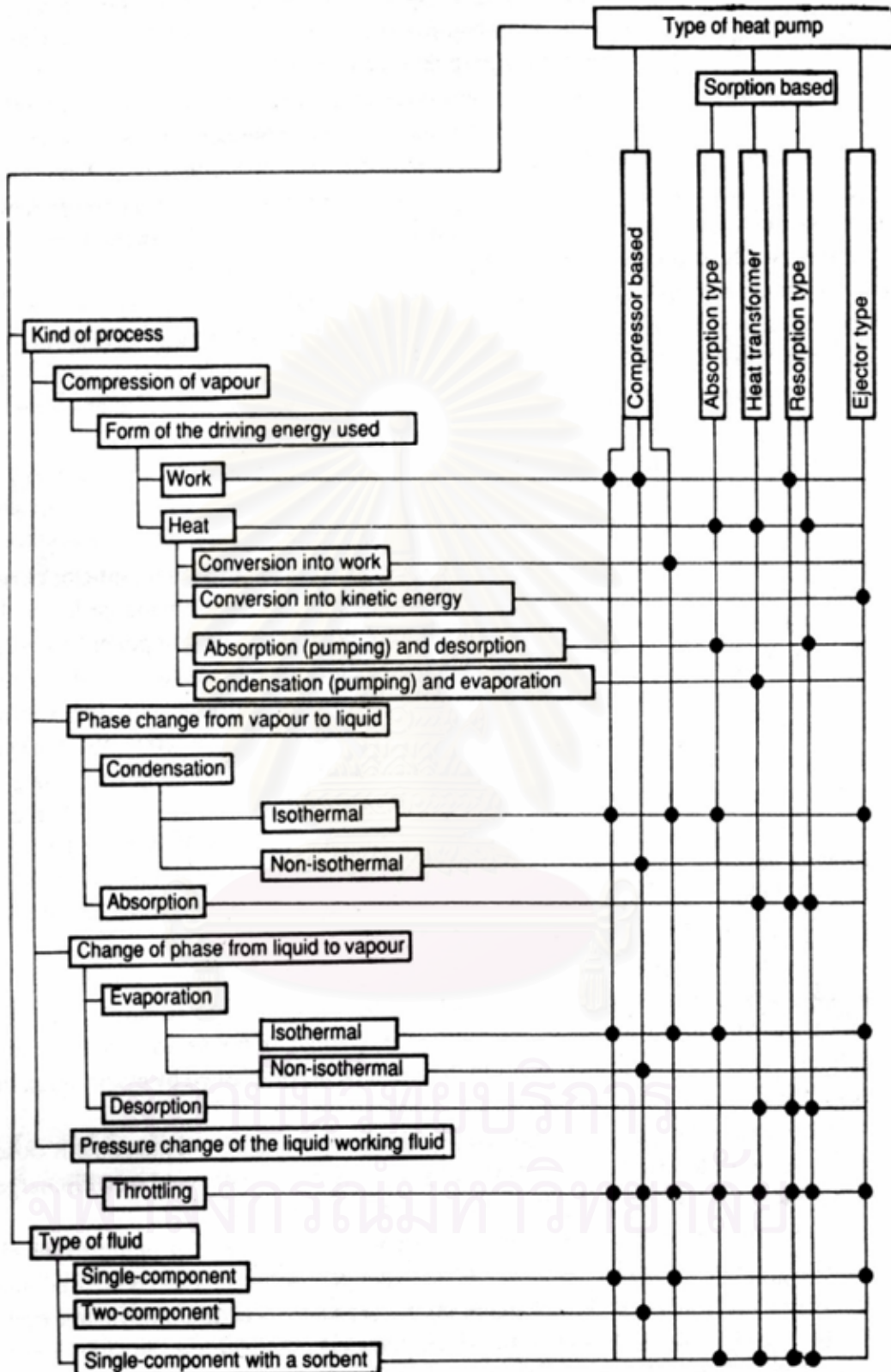
รูปที่ 2.3 รายละเอียดของวัฏจักรต่างๆ (Brodowicz and Dyakowski, 1993: 34)

ปั๊มความร้อนมีหลายชนิดจำแนกได้ตามลักษณะการทำงานของของไหลทำงาน ได้แก่ ของไหลทำงานหนึ่งชนิด ของไหลทำงานสองชนิดและปฏิกิริยาเคมี ชนิดของกระบวนการปั๊มความร้อนแสดงในรูป 2.4 และ 2.5 อาจกล่าวถึงประเภทหลักๆ ของปั๊มความร้อนได้ดังนี้



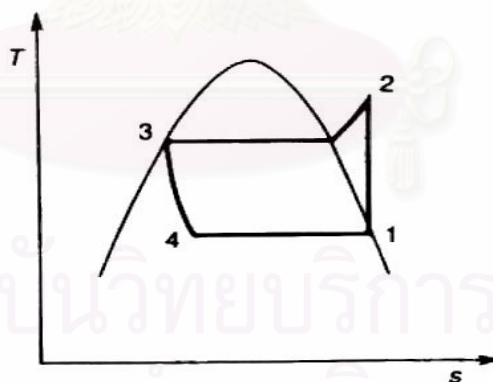
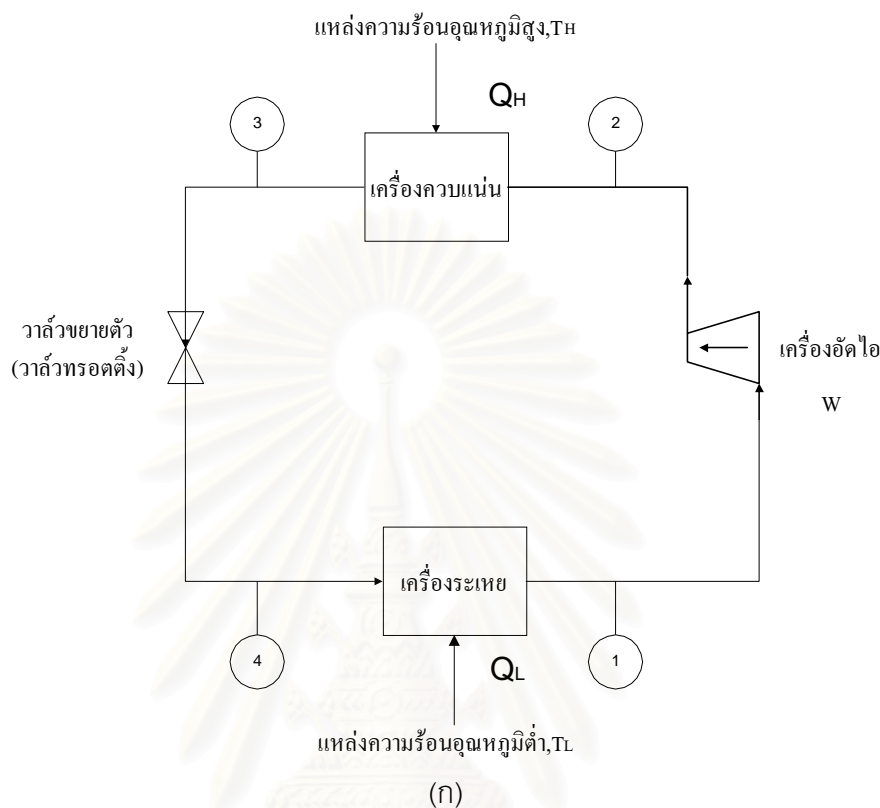
รูปที่ 2.4 รายละเอียดของปั๊มความร้อนชนิดต่างๆ (Brodowicz and Dyakowski, 1993: 33)





รูปที่ 2.5 ประเภทของปั๊มความร้อนแบบต่างๆ (Brodowicz and Dyakowski.1993: 8)

2.1.1. ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ (Vapor Compression Cycle Heat Pump) ใช้วิธีการส่งผ่านความร้อนจากการเปลี่ยนวัฏภาคของของไหลทำงาน (Working Fluid) ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการพื้นฐาน 4 หน่วย ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 (ก) ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ (ข) แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของวัฏจักรจริงแบบผันกลับ  
ได้ของแรงกิน

- 1 → 2 เครื่องอัดเชิงกลอัดไอแบบเอนโทรปีคงที่ให้ความดันและอุณหภูมิสูง
- 2 → 3 ของเหลวอิ่มตัวออกจากเครื่องควบแน่นหลังจากคายความร้อนที่อุณหภูมิและความดันสูง
- 3 → 4 ของเหลวอิ่มตัวขยายตัวผ่านวาล์วแบบเอนโทรปีคงที่กลายเป็นของเหลวผสมไอ

4→1 ของผสมระหว่างของเหลวและไอดูความร้อนที่อุณหภูมิและความดันต่ำจากเครื่องระเหย กลายเป็นไออิ่มตัว

สำหรับปั๊มความร้อนทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนในปริมาณที่ต้องการให้กับกระบวนการที่ต้องการ ความร้อน ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance) และประสิทธิภาพความร้อน (Thermal Efficiency) ดังสมการ

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

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

$COP$  = สัมประสิทธิ์สมรรถนะ

$Q_H$  = พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิสูง (กิโลวัตต์)

$\eta$  = ประสิทธิภาพความร้อน

$Q_L$  = พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (กิโลวัตต์)

ประสิทธิภาพสูงสุดของวัฏจักรใดๆ คิดได้จาก ประสิทธิภาพของของวัฏจักรคาร์โนต์ ซึ่งมีค่าขึ้นกับ อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำและแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเท่านั้น

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

$COP_{ideal}$  = สัมประสิทธิ์สมรรถนะของวัฏจักรคาร์โนต์

$T_H$  = อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนอุณหภูมิต่ำ (เคลวิน)

$T_L$  = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (เคลวิน)

พารามิเตอร์ที่กล่าวมาในสมการ (2.1) และ (2.2) เป็นการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการในการ เปลี่ยนความร้อนคุณภาพต่ำและงานให้เป็นความร้อนคุณภาพสูง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่ สำคัญสำหรับวัดคุณภาพของกระบวนการจริงว่าใกล้เคียงกับกระบวนการอุดมคติมากน้อยเพียงไร คือ ประสิทธิภาพเอกซ์เซอร์จี (Exergetic Efficiency หรือ Second Law Efficiency) เป็นการวัด ระดับการผันกลับไม่ได้และการสูญเสียเอกซ์เซอร์จี (Degree of Irreversibility และ Exergy

Losses) ของกระบวนการ ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้เปรียบเทียบกระบวนการที่ใช้แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำและของไหลทำงานต่างชนิดกันดังสมการ

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

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

$\varepsilon$  = ประสิทธิภาพเอกซ์เซอริจ

พาทวาทาน (Patwardhan, V.R. and Patwardhan, V.S., 1987) ทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของวัฏจักรจริงแบบผันกลับได้ของแรงกิ้นเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนดังสมการ 2.6 ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กับสมบัติของของไหลทำงาน

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

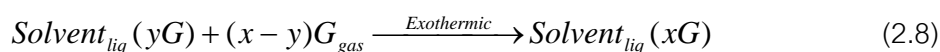
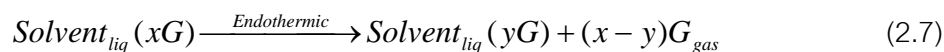
$r$  = ความร้อนของการกลายเป็นไอ ( $kJ/kg$ )

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

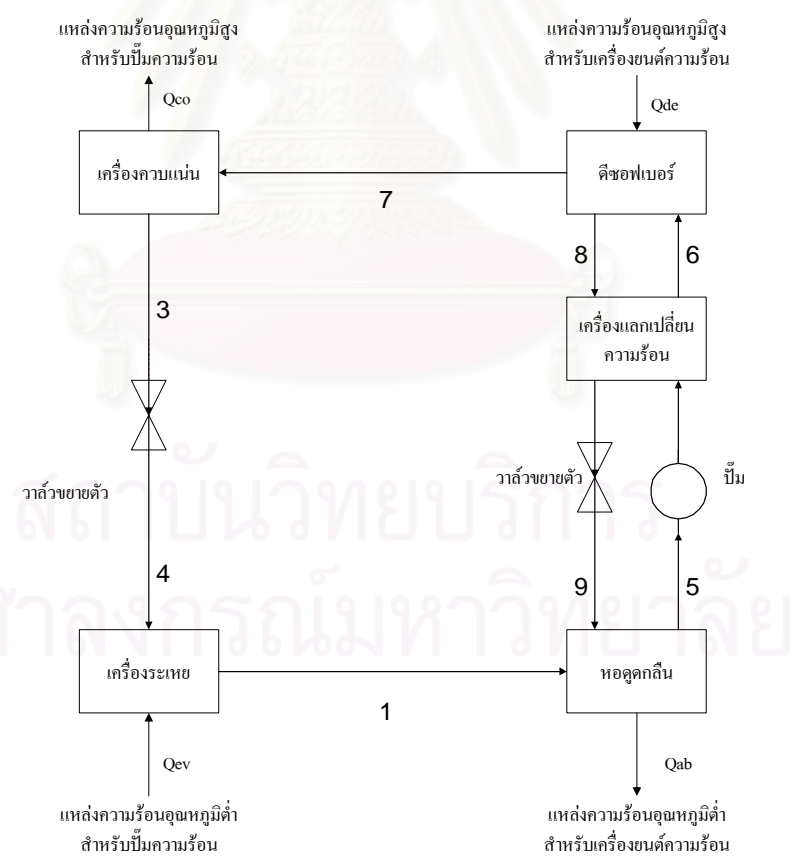
$COP_{niR}$  = สัมประสิทธิ์สมรรถนะของวัฏจักรจริงแบบผันกลับได้ของแรงกิ้น

### 2.1.2 ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน (Sorption-Type Heat Pump)

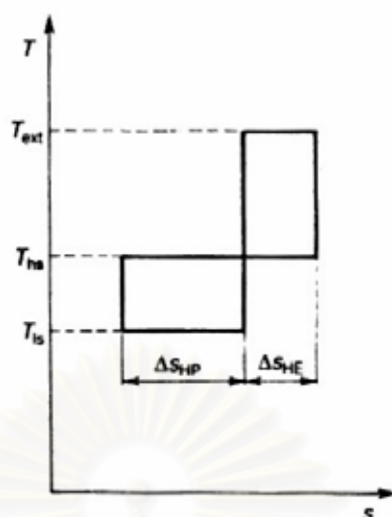
ปั๊มความร้อนชนิดดูดไอ ต้องให้งานกับเครื่องอัดเพื่ออัดไอของของไหลทำงานให้มีความดันสูง ปริมาณงานจำนวนนี้สามารถลดลงได้โดยเปลี่ยนไปอัดของเหลวแทน ทั้งนี้เพราะของเหลวมีปริมาตรน้อยกว่าไอมาก จึงต้องการงานน้อยกว่า ในทางปฏิบัติหลักการลดงานดังกล่าวสามารถทำได้โดยการแทนเครื่องอัดด้วยหอดูดกลืน (Absorber หรือ Resorber) และ หอดีซอพเบอร์ (Desorber หรือ Generator หรือ Stripper) กระบวนการใหม่นี้ต้องอาศัยของเหลวเพิ่มขึ้นอีก 1 ชนิด เรียกว่า ของไหลดูดกลืน (Absorbent) ของไหลดูดกลืนจะทำหน้าที่ดูดไอของของไหลทำงานให้อยู่ในวัฏภาคของเหลว ดังสมการ 2.7-2.8 ตัวอย่างคู่สาร เช่น แอมโมเนียกับน้ำ ลิเทียมโบรไมด์กับน้ำ เป็นต้น



ไอของของไหลทำงานออกจากเครื่องระเหย (สภาวะ 1) เข้าสู่หอดูดกลืนเพื่อดูดกลืนไอของของไหลทำงานกลายเป็นสารละลายของเหลวเข้มข้น (Rich/ Strong Solution) กระบวนการดูดกลืนคายความร้อน ดังนั้นน้ำหล่อเย็นต้องหมุนเวียนผ่านหอดูดกลืนเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ อุณหภูมิของไหลดูดกลืนต้องรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำเท่าที่เป็นไปได้ เนื่องจากปริมาณของไหลที่ถูกดูดกลืนจะลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น สารละลาย (สภาวะ 5) ถูกอัดโดยเครื่องสูบล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายเจือจาง (Weak Solution) ที่จะไหลกลับ (สภาวะ 8) เข้าสู่หอดูดกลืน และในขณะเดียวกันจะเพิ่มอุณหภูมิของเหลวที่ไหลเข้าหอดีสซอพเบอร์ (สภาวะ 6) เพื่อดูดความร้อนไอของของไหลทำงานออกจากสารละลาย สารละลายเจือจางจะไหลผ่านวาล์วกลับเข้าสู่หอดูดกลืน (สภาวะ 9) ไอบริสุทธิของของไหลทำงาน (สภาวะ 7) เข้าสู่เครื่องควบแน่นคายความร้อนกลายเป็นของเหลวอิ่มตัว (สภาวะ 3) ผ่านวาล์วลดความดัน (สภาวะ 4) ได้ไอน้ำของเหลวไหลเข้าเครื่องระเหยเพื่อดูดความร้อนต่อไปเป็นอันครบวงจร สรุปได้ว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นคือ การควบแน่นที่ความดันคงที่ การขยายตัวแบบเอนโทรปีคงที่ การระเหยที่ความดันคงที่ เป็นของไหลทำงานร้อนยวดยิ่ง การดูดกลืนไอที่ความดันคงที่ การดีซอพชั่นที่ความดันคงที่ ดังรูปที่ 2.7-2.8



รูปที่ 2.7 ป้อนความร้อนชนิดดูดกลืน



รูปที่ 2.8 แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนเชิงอุณหพลศาสตร์  
(Brodowicz and Dykowski, 1993: 111)

จากรูป 2.8 ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนประกอบด้วยเครื่องยนต์ความร้อนซึ่งผลิตงานให้กับปั๊มความร้อน สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืนแสดงดังสมการ

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

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

$Q_{ab}$  = ความร้อนของหอดูดกลืน (กิโลวัตต์)

$Q_{con}$  = ความร้อนของเครื่องควบแน่น (กิโลวัตต์)

$Q_{de}$  = ความร้อนของดีซอพเบอร์ (กิโลวัตต์)

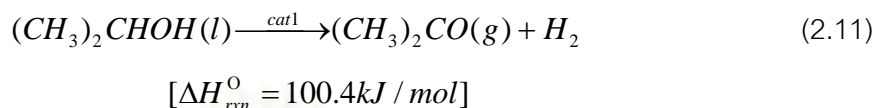
$T_{hs}$  = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (เคลวิน)

$T_{ls}$  = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (เคลวิน)

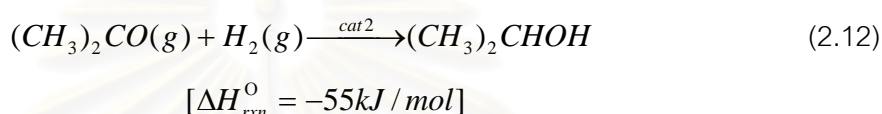
$T_{ext}$  = อุณหภูมิของแหล่งความร้อนภายนอก (เคลวิน)

2.1.3 ป้อนความร้อนพลังงานเคมี (Chemical Heat Pump หรือ Chemical Heat Transformer) ใช้ความร้อนจากปฏิกิริยาผันกลับได้ งานวิจัยนี้ศึกษาป้อนความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซีโตน ดังสมการ

ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน



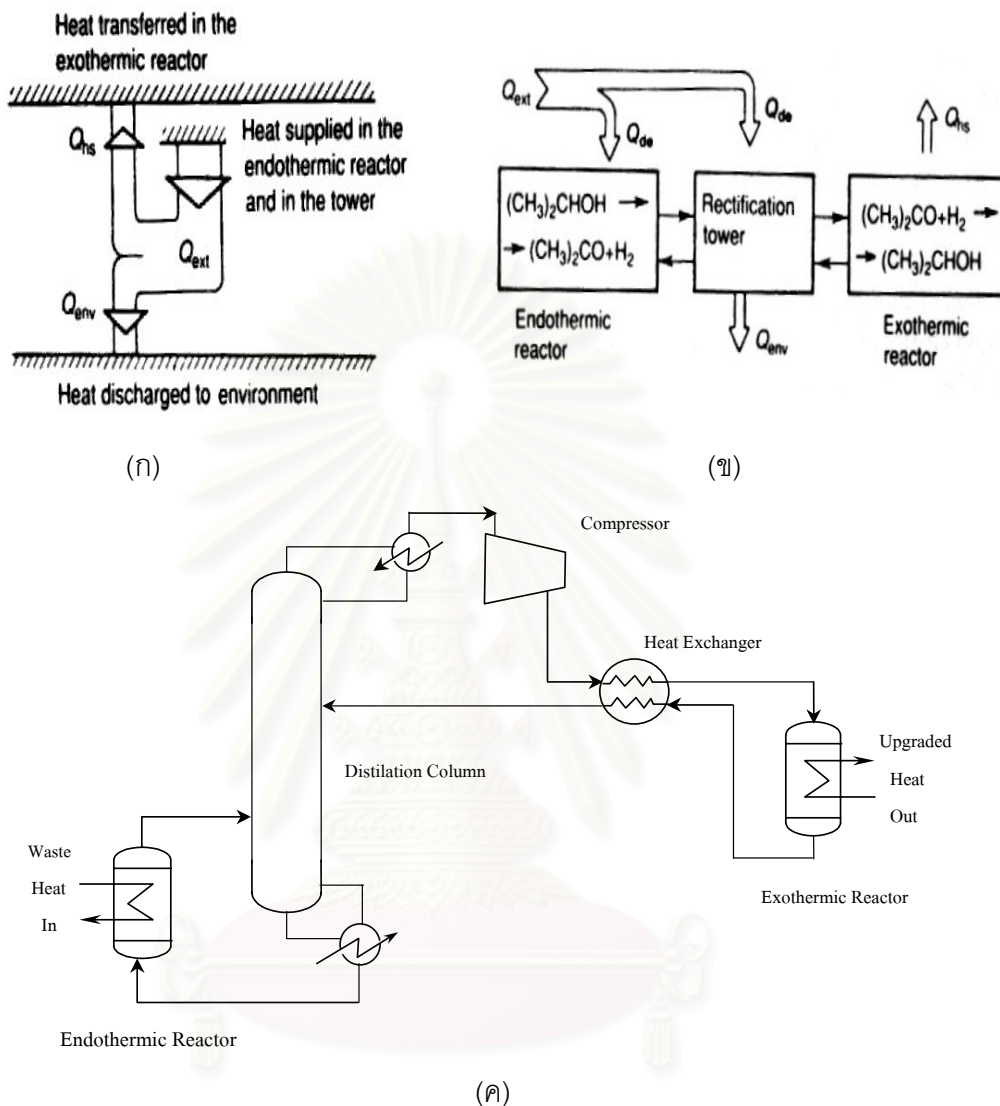
ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน



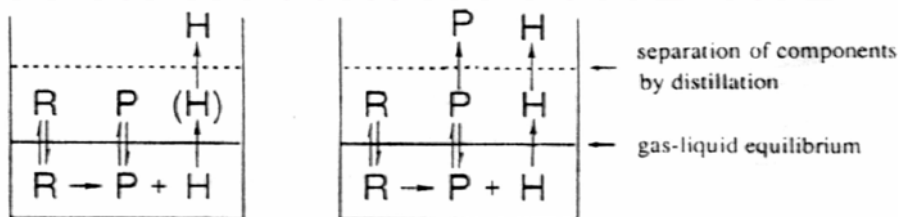
หลักการทำงานของป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ดังรูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) โดยดูดความร้อนคุณภาพต่ำที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยอะซีโตน (จุดเดือด 56.3 องศาเซลเซียส) ไฮโดรเจน และไอโซโพรพานอล (จุดเดือด 82.4 องศาเซลเซียส) ที่เหลือจากปฏิกิริยาจะถูกส่งเข้าหอกลั่นโดยผลิตภัณฑ์ยอดหอประกอบด้วยอะซีโตนและไฮโดรเจน ส่วนผลิตภัณฑ์ก้นหอคือไอโซโพรพานอลนำกลับเข้าเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน ผลิตภัณฑ์ยอดหอผ่านเครื่องอัดเพื่อเพิ่มความดันชดเชยกับความดันลดที่เกิดภายในระบบ หลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ที่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน คายความร้อนคุณภาพสูงที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส จากรูป 2.9 จะเห็นว่าความร้อนที่ใส่ให้กับกระบวนการทางเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนและหอกลั่นนั้น มีเพียงบางส่วนที่กลายเป็นความร้อนคุณภาพสูงอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียออกไปกลายเป็นความร้อนคุณภาพต่ำที่เครื่องควบแน่น

ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล มีค่าพลังงานเสรีมาตรฐานของกิบส์เป็นบวก ที่อุณหภูมิน้อยกว่า 192 องศาเซลเซียส ( $G_{82^\circ C}^0 = 7$  กิโลจูลต่อโมล, Perry and Chilton cited in Gandia, L.M. 1992) ปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดได้เองที่อุณหภูมิต่ำ ไซโต (Y.Saito, M.Yamashita, E. to และ N.Meng, 1994) กล่าวว่าไฮโดรเจนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล เพื่อให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้ควรรักษาอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของอะซีโตนและไอโซโพรพานอลไฮโดรเจนจะถูกแยกออกจากบริเวณ

ที่เกิดปฏิกิริยาช่วยให้สมดุลเคลื่อนไปข้างหน้า หรือดำเนินกระบวนการโดยอาศัยภาวะการกลั่นทำให้อะซิโตนและไฮโดรเจนถูกแยกออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องดังรูป 2.10



รูปที่ 2.9 ป้อนความร้อนพลังงานเคมี (ก) หลักการทำงาน (ข) แผนภาพการถ่ายโอนมวลสารและพลังงาน (Brodowicz and Dyakowski, 1993: 23) (ค) แผนภาพของกระบวนการ



รูปที่ 2.10 การแยกไฮโดรเจนออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

(Y.Saito, M.Yamashita, E. Ito และ N.Meng ,1994)



แกสพิโล (Gaspillo ,1998) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในวัฏภาคของเหลวด้านก้นหอ โดยใช้หอกลั่นแบบรีแอกทีฟ (Reactive Distillation Column) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกอะซิโตนออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาพบว่าสามารถทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ดียิ่งขึ้น การเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคแก๊สมีค่าการเปลี่ยนสูงสุดประมาณ 0.108 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดสมดุลเคมีทำให้การดำเนินไปของปฏิกิริยาเป็นไปอย่างช้าๆ แกสทอเดอ (Gastauer ,1995) พบว่าการเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลวจะให้ค่าการเปลี่ยนสูงกว่าการเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคแก๊ส ในขณะที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของอะซิโตนเพิ่มขึ้น อีโต (Ito cited in Gaspillo,1998) พบว่าเนื่องจากอะซิโตนถูกดูดกลืนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าไอโซโพรพานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการนำมาใช้กับปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล เช่น Ni, Raney Ni, Nickel boride, Ru-Pt/C, Copper เป็นต้น

ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมีความเป็นไปได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ มีค่าพลังงานเสรีของกิบส์เป็นบวก ( $G_{200^{\circ}\text{C}}^{\circ} = -20.2$  กิโลจูลต่อโมล, Perry and Chilton cited in Gandia,L.M. 1992) ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (Saito et al,1994) ได้แก่ Copper, Copper Chromia, Nickel, Raney Nickel เป็นต้น คาโต (Y.Kato et.al,1986) ศึกษาปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันโดยใช้ Ni/C ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก Ni มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 200 อังสตรอม ถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 300 อังสตรอม พื้นที่ผิว 130 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าดังสมการ 2.13-2.18 อัตราเร็วของปฏิกิริยาเกิดสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 170-210 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปมักเป็น 200 องศาเซลเซียส มีขั้นตอนควบคุมอัตราเร็ว คือปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

$$r\left(\frac{\text{mol}}{\text{gcat.h}}\right) = \frac{K P_{H_2} P_{AC} - K_2 K_i P_i}{(1 + K_H P_{H_2} + K_A P_{AC} + K_i P_i)^2} \quad (2.13)$$

$$K = K_1 K_H K_{AC}$$

$$K_1 = 1.46 \times 10^7 \exp(-14.7/RT) \left(\frac{\text{mol}}{\text{gcat.h}}\right) \quad (2.14)$$

$$K_2 = 3.25 \times 10^6 \exp(-18.2/RT) \left(\frac{\text{mol}}{\text{gcat.h}}\right) \quad (2.15)$$

$$K_H (\text{atm}^{-1}) = 2.58 \times 10^{-11} \exp(19.7/RT) \left(\frac{\text{mol}}{\text{gcat.h}}\right) \quad (2.16)$$

$$K_{AC} (\text{atm}^{-1}) = 1.89 \times 10^{-5} \exp(13/RT) \left(\frac{\text{mol}}{\text{gcat.h}}\right) \quad (2.17)$$

$$K_i (\text{atm}^{-1}) = 4.82 \times 10^{-9} \exp(22.5/RT) \left(\frac{\text{mol}}{\text{gcat.h}}\right) \quad (2.18)$$

$K$  = ค่าคงที่อัตราเร็ว (โมลต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชั่วโมง)

ไซโตและคณะ ( Y.Saito, M.Yamashita, E.Ito and N.Meng ,1994) ศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอลโดยใช้สมการอัตราเร็วชนิดแลงเมียร์ ดังสมการ

$$v = \frac{k}{(1 + K[Acetone])} \quad (2.19)$$

$v$  = อัตราเร็วของปฏิกิริยา

$k$  = ค่าคงที่อัตราเร็ว

$K$  = ค่าคงที่ของความล่าช้า (Retardation Constant) ที่เกิดจากอะซิโตน

พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาแตกต่างกันตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ยังได้เสนอแผนภาพกระบวนการ (Flow Sheet) ของป้อนความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้กับเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนและหอกั่น

ตารางที่ 2.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไอโซโพรพานอล (Y.Saito, M.Yamashita, E.Ito and N.Meng, 1994)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราเร็วของปฏิกิริยา ( $mmol/h.g$ )	ค่าคงที่อัตราเร็ว ( $mmol/h.g.dm^3$ )	ค่าคงที่ของความล่าช้า ( $mmol/dm^3$ )
$Ru - Pt/C + Pt(acac)_2$	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
Nickel boride	60	300	0.011
Raney Ni	51.5	51.5	0.015

ปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีมีหลายชนิด เวนเวิร์ท (Wenworth และ E.Chen, 1976) เสนออุณหภูมิเทอนนิง (Turning temperature,  $T^*$ ) ในการคัดเลือกปฏิกิริยาเคมีให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ โดยอาศัยสมบัติทางเคมีและเทอร์โมไดนามิกส์ของสารตั้ง

ต้นและผลิตภัณฑ์ สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยากับพลังงานเสรีของกิบส์ที่อุณหภูมิใดๆ แสดงดังสมการ

$$\Delta G^{\circ} = RT \ln K \quad (2.20)$$

$K$  = ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาในเทอมของแอกทิวิตี

กรณีพิจารณาที่ความดันต่ำ แก๊สเป็นอุดมคติ สามารถพิจารณา ค่าคงที่สมดุลในรูปของความดันย่อย

$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ} \quad (2.21)$$

จากสมการ 2.20 และ 2.21

$$-RT \ln K = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ} \quad (2.22)$$

$$T = \frac{\Delta H^{\circ}}{\Delta S^{\circ} - R \ln K} \quad (2.23)$$

$$\Delta H^{\circ} = \Delta H_{T_1}^{\circ} + \int_{T_1}^T \Delta C_p dT \quad (2.24)$$

$$\Delta S^{\circ} = \Delta S_{T_1}^{\circ} + \int_{T_1}^T \frac{\Delta C_p dT}{T} \quad (2.25)$$

$T_1$  = อุณหภูมิอ้างอิง

แทนสมการ 2.24, 2.25, ใน 2.23

$$T = \frac{\Delta H_{T_1}^{\circ} + \int_{T_1}^T \Delta C_p dT}{\Delta S_{T_1}^{\circ} + \int_{T_1}^T \frac{\Delta C_p dT}{T} - R \ln K} \quad (2.26)$$

สมมติให้  $\Delta C_p$  เปลี่ยนแปลงไม่มาก

$$T = \frac{\Delta H^{\circ}}{\Delta S^{\circ} - R \ln K} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $K = 1$  ได้

$$T^* = \frac{\Delta H^{\circ}}{\Delta S^{\circ}} \quad (2.28)$$

โดยอุณหภูมิเทอนิงควรมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำและแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาผันกลับได้และอุณหภูมิเทอนิงของปฏิกิริยานอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาผันกลับได้อีกหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้กับปั๊มความร้อนได้ดังแสดงในรูป 2.11

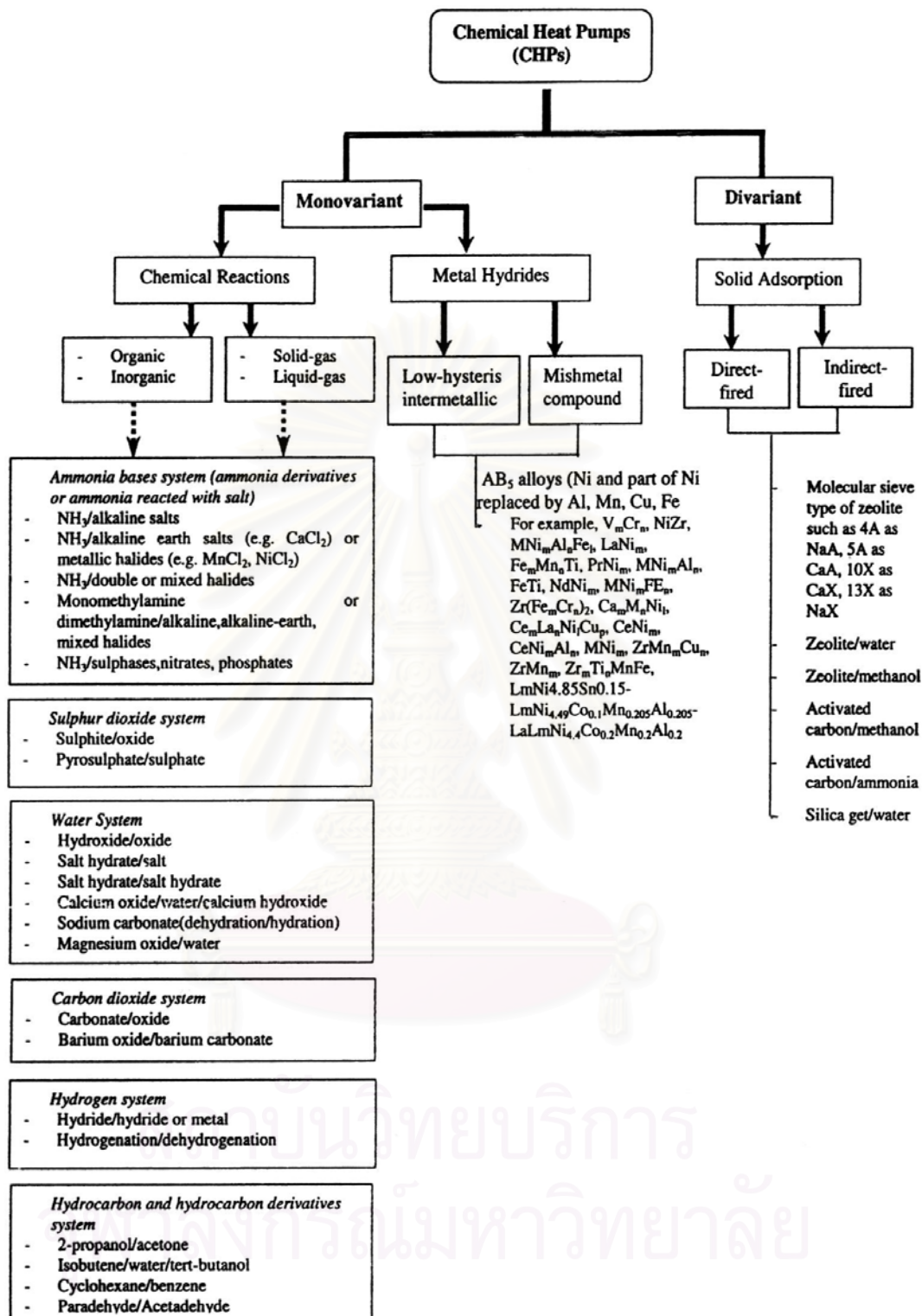
ตารางที่ 2.2 ปฏิกริยาผันกลับได้สำหรับปฏิกิริยาร้อนพลังงานเคมีจำแนกตามอุณหภูมิเทอนนิง

น้อยกว่า 52 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิเทอนนิง
$6Fe_2O_3 + 13SO_2 \Leftrightarrow FeS_2 + 11FeSO_4$	-29
$6FeS + 4H_2O \Leftrightarrow 3FeS_2 + Fe_3O_4 + 4H_2$	40
52-60 องศาเซลเซียส	
$N_2O_4 \Leftrightarrow 2NO_2$	53
60-100 องศาเซลเซียส	
$2H_2O + 3S \Leftrightarrow 2H_2S + SO_2$	76
$3H_2O + 4S + MnO \Leftrightarrow 3H_2S + MnSO_4$	75
$Fe + 5CO \Leftrightarrow Fe(CO)_5$	69
$8H_2O + 11S + Mn_3O_4 \Leftrightarrow 8H_2S + 3MnSO_4$	67
100-121 องศาเซลเซียส	
$Ni + 4CO \Leftrightarrow Ni(CO)_4$	111
$CH_3OH \Leftrightarrow 2H_2 + CO$	112
121-177 องศาเซลเซียส	
$C_{10}H_8 + 5H_2 \Leftrightarrow C_{10}H_{18}$	128
$CuO + H_2O \Leftrightarrow Cu(OH)_2$	155
$11Fe_3O_4 + 2SO_2 \Leftrightarrow 16Fe_2O_3 + FeS_2$	139
$Fe_3O_4 + 8HCl \Leftrightarrow 3FeCl_2 + Cl_2 + 4H_2O$	171
$NH_3 \Leftrightarrow 3 / 2H_2 + 1 / 2N_2$	149
$SO_2 + Cl_2 \Leftrightarrow SO_2Cl_2$	149
177-371 องศาเซลเซียส	
$H_2SO_4 \Leftrightarrow H_2O + SO_3$	325
$NH_4F \Leftrightarrow NH_3 + HF$	227
$NH_4Cl \Leftrightarrow NH_3 + HCl$	350
$SO_2 + 10MnO \Leftrightarrow MnS + 3MnO_4$	365
$4H_2O + 4S + MnS \Leftrightarrow 4H_2S + MnSO_4$	210
$MgCO_3 \Leftrightarrow MgO + CO_2$	304
$Mg(OH)_2 \Leftrightarrow MgO + H_2O$	259
$Fe_2O_3 + 1 / 2Cl_2 + 8HCl \Leftrightarrow 3 / 2Cl_2 + 4H_2O + FeCl_3$	366

$CO + 2Fe_3O_4 \Leftrightarrow C + 3Fe_2O_3$	227
$FeO + CO_2 \Leftrightarrow C + 3Fe_2O_3$	244
$3FeS + 4H_2O \Leftrightarrow Fe_3O_4 + 3H_2S + H_2$	319
$C + 2Cl_2 \Leftrightarrow CCl_2$	336
$C_2H_5Cl \Leftrightarrow C_2H_4 + HCl$	238
$C_7H_8 + 3H_2 \Leftrightarrow C_7H_{14}$	274
$CH_3CHOHCH_3 \Leftrightarrow C_3H_6O + H_2$	192
$Cl_2 + H_2O \Leftrightarrow 2HCl + 1/2O_2$	280
$C_6H_{12} \Leftrightarrow C_6H_6 + 3H_2$	299
371-727 องศาเซลเซียส	
$NH_4I \Leftrightarrow NH_3 + HI$	373
$2SO_2 + MnO \Leftrightarrow 2S + MnSO_4$	375
$3FeCl_2 + 4H_2O \Leftrightarrow Fe_3O_4 + 6HCl + H_2$	376
$2Fe_2O_3 + 5SO_2 \Leftrightarrow S + 4FeSO_4$	378
$2CH_3Cl + H_2O \Leftrightarrow CH_3OH + HCl$	380
$4Fe_2O_3 + 8SO_2 \Leftrightarrow FeS + 7FeSO_4$	385
$2H_2S \Leftrightarrow 2H_2 + 2S$	389
$NH_4Br \Leftrightarrow NH_3 + HBR$	412
$HF + KF \Leftrightarrow KHF_2$	418
$FeS + H_2S \Leftrightarrow FeS_2 + H_2$	425
$2LiOH \Leftrightarrow Li_2O + H_2O$	428
$FeCl_2 + H_2O \Leftrightarrow FeO + 2HCl$	455
$NH_4HSO_4 \Leftrightarrow NH_3 + H_2O + SO_3$	467
$1.66CO + 3.49C_4H_6 \Leftrightarrow 2.15C_2H_2 + 1.66CH_3CHO + C_6H_4(CH_3)_2$	473
$2H_2O + 3FeS_2 \Leftrightarrow 3FeS + SO_2 + 2H_2S$	475
$Ca(OH)_2 \Leftrightarrow CaO + H_2O$	486
$2BaO_2 \Leftrightarrow 2BaO + O_2$	492
$SO_2 + Mn_3O_4 \Leftrightarrow 2MnO + MnSO_4$	501
$C_{10}H_{12} \Leftrightarrow C_{10}H_8 + 2H_2$	504
$2NO_2 \Leftrightarrow 2NO + O_2$	504

$4SO_2 + Mn_3O_4 \Leftrightarrow S + 3MnSO_4$	527
$COCl_2 \Leftrightarrow CO + Cl_2$	528
$2NF_3 \Leftrightarrow N_2 + 3F_2$	566
$4SO_2 + 4MnO \Leftrightarrow MnS + 3MnSO_4$	560
$H_2O + 4SO_2 + 3MnO \Leftrightarrow 2H_2S + 3MnSO_4$	568
$4Fe_2O_3 + 7S_2 \Leftrightarrow 8FeS + 6SO_2$	620
$2H_2O + 11SO_2 + 3Mn_3O_4 \Leftrightarrow 2H_2S + 9MnSO_4$	642
$FeO + 3/2Cl_2 \Leftrightarrow FeCl_3 + 1/2O_2$	654
$2KO_2 \Leftrightarrow K_2O_2 + O_2$	657
$3FeO + H_2O \Leftrightarrow Fe_3O_4 + H_2$	661
$CH_4 + H_2O \Leftrightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$	692
$3Fe + 4H_2O \Leftrightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$	677
$4FeSO_4 \Leftrightarrow 2Fe_2O_3 + 4SO_2 + O_2$	717
727-1727 องศาเซลเซียส	
$KIO_3 + 5KI + 6HCl \Leftrightarrow 6KCl + 3H_2O + 3I_2$	747
$FeCl_2 + H_2 \Leftrightarrow Fe + HCl$	779
$SO_3 \Leftrightarrow SO_2 + 1/2O_2$	780
$CaCO_3 \Leftrightarrow CaO + CO_2$	808
$CS_2 \Leftrightarrow C + 2S$	821
$C_2H_6 \Leftrightarrow C_2H_2 + H_2$	867
$2FeS_2 \Leftrightarrow 2FeS + S_2$	901
$6Fe_3O_4 + 3Cl_2 \Leftrightarrow 2FeCl_3 + 8Fe_2O_3$	882
$3MnSO_4 \Leftrightarrow Mn_3O_4 + 3SO_2 + O_2$	927
$4Fe_2O_3 + 16S \Leftrightarrow 8FeS_2 + 6O_2$	968
$ZnO + SO_3 \Leftrightarrow ZnSO_4$	1074
$3Fe_3O_4 + 2S \Leftrightarrow 4Fe_2O_3 + FeS_2$	1102
$Li_2CO_3 \Leftrightarrow Li_2O + CO_3$	1113
$SrCO_3 \Leftrightarrow SrO + CO_2$	1177
$SO_2 + I_2 + 2H_2O \Leftrightarrow 2HI + H_2SO_4$	1250
$Na_2CO_3 \Leftrightarrow Na_2O + CO_2$	1256

$S + 4MnO \Leftrightarrow Mn_3O_4 + MnS$	1281
$Ba(OH)_2 \Leftrightarrow BaO + H_2O$	1517
มากกว่า 1727 องศาเซลเซียส	
$Na_2SO_4 \Leftrightarrow Na_2O + SO_3$	1769
$K_2O \Leftrightarrow K + 1/2O_2$	1805
$CaSO_4 \Leftrightarrow CaO + SO_3$	1898
$ZnO + CO_2 \Leftrightarrow ZnCO_3$	1957
$SrSO_4 \Leftrightarrow SrO + SO_3$	2121
$1/2Cl_2 + Fe_3SO_4 + 1/2H_2O \Leftrightarrow 3/2Fe_2O_3 + HCl$	2159
$BaSO_4 \Leftrightarrow BaO + SO_3$	2377
$K_2CO_3 \Leftrightarrow K_2O + CO_2$	2293
$Na_2O \Leftrightarrow Na + 1/2O_2$	2502
$4H_2O + 4SO_2 + 3MnS \Leftrightarrow 4H_2S + 3MnSO_4$	2770
$Fe_3O_4 + 5S \Leftrightarrow 2FeS_2 + FeSO_4$	2785
$3SO_2 + 2MnO \Leftrightarrow S + 3MnSO_4$	2825
$K_2SO_4 \Leftrightarrow K_2O + SO_3$	3567
$MgSO_4 \Leftrightarrow Mg + SO_3$	4429
$BaO \Leftrightarrow Ba + 1/2O_2$	5475
$MgO \Leftrightarrow Mg + 1/2O_2$	5366
$SrO \Leftrightarrow Sr + 1/2O_2$	5732
$CaO \Leftrightarrow Ca + 1/2O_2$	5802
$Li_2O \Leftrightarrow Li + 1/2O_2$	6159
$4S + 4MnO \Leftrightarrow 3MnS + MnSO_4$	8067



รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาที่ใช้กับปั๊มความร้อนพลังงานเคมี (Wongsuwan et al, 2001)



## 2.2 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Heat Sources)

ความร้อนจากแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำ มีความสำคัญเปรียบได้กับเป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับปั๊มความร้อน แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติและที่ไม่ได้มาจากธรรมชาติ การเลือกชนิดแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำต้องคำนึงถึง

1. ตำแหน่งของแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำควรอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่จะนำความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ได้จากปั๊มความร้อนมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์และการขนส่ง
2. สมบัติการกัดกร่อนของสารเช่น น้ำทะเล น้ำบาดาล ไซที่มีส่วนผสมของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำมาพิจารณาเลือกวัสดุอุปกรณ์ที่ทนทานต่อการกัดกร่อน
3. ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและปริมาณความร้อนของแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำซึ่งจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน โดยแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำจากธรรมชาติ ส่วนมากอุณหภูมิและปริมาณจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เช่น อากาศ ในขณะที่แหล่งความร้อนจากน้ำบาดาล ดิน และแม่น้ำจะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำจากโรงงานอุตสาหกรรมอุณหภูมิและปริมาณความร้อนจะขึ้นกับกระบวนการที่ใช้
4. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์และดำเนินกระบวนการนำความร้อนเข้าสู่ปั๊มความร้อน ส่วนสำคัญเป็นราคาของพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มและพัดลม โดยค่าใช้จ่ายสูงสุดมาจากน้ำบาดาล (Deep Drilling) รองลงมาคือ พลังงานแสงอาทิตย์ ดิน น้ำจากบ่อน้ำ และอากาศ ตามลำดับ

### 2.2.1 แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำตามธรรมชาติ (The Natural Low Temperature Heat Sources)

- 1) อากาศ (Atmospheric Air) นิยมใช้กับปั๊มความร้อนขนาดเล็ก มีข้อดีคือ หาง่าย ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ต่ำ มีข้อเสียคือ ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิ
- 2) น้ำผิวดิน (Surface Water) ดูดกลืนพลังงานความร้อนจากอากาศและดิน ได้แก่ แม่น้ำ ทะเลสาบ ใช้กับปั๊มความร้อนขนาดใหญ่จึงจะคุ้มทุน เพราะค่าใช้จ่ายในการนำน้ำมาใช้มีค่าสูง น้ำมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามฤดูกาล
- 3) น้ำใต้ดิน (Underground Water) ดูดกลืนพลังงานความร้อนโดยตรงจากดิน เหมาะกับปั๊มความร้อนขนาดเล็ก มีอุณหภูมิและปริมาณความร้อนสม่ำเสมอ นำมาใช้ได้ง่าย
- 4) ดิน (Soil) สะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์และอากาศอยู่ที่ชั้นบนของผิวดินที่ความลึกประมาณ 10 เมตร มีค่าใช้จ่ายสูง นิยมขุดลงไปที่มีความลึกประมาณ 10-15 เมตร
- 5) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) พลังงานแสงอาทิตย์ที่มาถึงบรรยากาศของโลกมี

ฟลักซ์ความหนาแน่นของพลังงานที่พื้นผิว (The Surface Density Energy Flux) ประมาณ 1.38 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามสภาพภูมิอากาศ ฟลักซ์ความหนาแน่นของพลังงานที่ได้จากแผ่รังสีดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 0.12-0.5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งถ้าปีมีความร้อนที่ต้องการความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 15 กิโลวัตต์ จะต้องใช้แผ่รังสีดวงอาทิตย์หลายตารางเมตร

## 2.2.2 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ไม่ได้มาจากธรรมชาติ (Artificial Low Temperature Heat Sources)

เป็นแหล่งความร้อนจากกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งพลังงานที่เหลือจากการใช้งานแล้วหรือความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) เป็นพลังงานความร้อนที่มีอยู่ในอากาศ แก๊ส น้ำ หรือของเหลวอื่นที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งหรืออุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่ง มีภาวะและสมบัติแตกต่างกันตามชนิดของกระบวนการ มักจำแนกตามระดับอุณหภูมิออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 600-1000 องศาเซลเซียส กลุ่มอุณหภูมิปานกลางมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200 ถึง 600 องศาเซลเซียส กลุ่มอุณหภูมิต่ำมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35-200 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2.3-2.5 เนื่องด้วยอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่สูงกว่าความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติ จึงเหมาะที่จะเป็นแหล่งความร้อนให้กับปั๊มความร้อน โดยแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงพอแล้วอาจนำมาใช้ได้เลยโดยไม่ต้องผ่านปั๊มความร้อน

ตารางที่ 2.3 แหล่งและอุณหภูมิของความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิสูง (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยพลังงาน, 2546)

อุปกรณ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Aluminum Refining Furnace	650-750
Zinc Refining Furnace	750-1100
Copper Refining Furnace	750-800
Steel Heating Furnace	900-1050
Copper Reverberatory Furnace	900-1100
Cement Kiln (Dry Process)	600-750
Glass Melting Furnace	1000-1550
Solid Waste Incinerator	650-100
Fume Incinerator	640-1450

ตารางที่ 2.4 แหล่งและอุณหภูมิของความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิปานกลาง (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยพลังงาน, 2546)

อุปกรณ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Steam Boiler Exhaust	220-380
Gas Turbine Exhaust	380-540
Reciprocating Engine Exhaust	320-600
Heat Treating Furnace	420-650
Drying and Baking Oven	220-600
Annealing Furnace Cooling System	420-650

ตารางที่ 2.5 แหล่งและอุณหภูมิของความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิต่ำ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยพลังงาน, 2546)

อุปกรณ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Process Steam Condensate	50-90
Cooling Water Injection Molding Machine	35-90
Annealing Furnace	65-220
Air Compressor	30-50
Internal Combustion Engine	65-120
Air Conditioning and Refrigeration Condenser	35-45
Drying, Baking and Curing Oven	90-220
Hot-Processed Liquid	35-220

### 2.3 แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (High Temperature Heat Sources)

อยู่ที่เครื่องควบแน่นและหอดูดกลืน นิยมใช้น้ำมารับความร้อนเพื่อส่งไปยังที่ที่ต้องการใช้

### 2.4 ข้อดีของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

1. ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีมีค่ามากกว่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและความร้อนแฝงของการควบแน่นทำให้ความร้อนคุณภาพสูงที่ได้มีอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปั๊มความร้อนชนิดอัดไอซึ่งความร้อนที่ได้มีอุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ต่ำเกินไปสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่

2. สามารถเลือกคุณสมบัติของความร้อนคุณภาพสูงได้ตามต้องการด้วยการเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสม
3. การเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปพลังงานเคมี มีความเป็นไปได้ในการเก็บพลังงานโดยปราศจากความร้อนสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ
4. มีประสิทธิภาพสูงกว่าปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ

## 2.5 เกณฑ์เบื้องต้นสำหรับเลือกปฏิกิริยาสำหรับปั๊มความร้อน

1. ปฏิกิริยาผันกลับได้ควรมีผลได้ (Yield) สูงทั้งปฏิกิริยาเดินหน้าและผันกลับ
2. ปฏิกิริยาคายความร้อนควรมีค่าพลังงานอิสระสูง
3. สารตั้งต้นมีความเสถียรและใช้ได้ยาวนานภายใต้ภาวะดำเนินการ
4. ปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยอัตราเร็วที่ต้องการคือมีพลังงานกระตุ้นต่ำ
5. ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาสามารถแยกจากสารตั้งต้นได้ง่าย
6. สารประกอบในปฏิกิริยาสามารถจัดการได้ด้วยเทคโนโลยีที่มีในปัจจุบันโดยไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์พิเศษ
7. ความร้อนจากปฏิกิริยามีค่าสูงและผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาตรโดยโมลน้อยจะทำให้ขนาดของอุปกรณ์ลดลง
8. สารประกอบเสถียร (Not Reactive) ต่อน้ำและออกซิเจน เนื่องจากการกำจัดน้ำและออกซิเจนออกจากกระบวนการให้หมดทำได้ยาก
9. หาง่าย ราคาถูก
10. มีสมบัติกัดกร่อนน้อยต่อวัสดุที่ใช้กับอุปกรณ์ในกระบวนการ
11. ไม่เป็นพิษ
12. ไม่มีกลิ่นฉุน โดยเฉพาะกับปั๊มความร้อนขนาดเล็กมักใช้ทำความร้อนตามบ้านเรือน
13. ไม่ติดไฟ (Inflammability)
14. มีจุดแข็งตัวต่ำ เพื่อป้องกันการอุดตัน
15. มีความเสถียรภายใต้ภาวะการทำงานของวัฏจักร

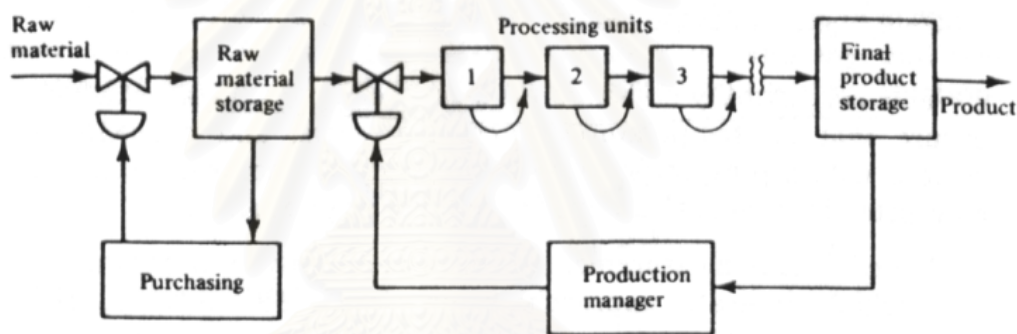
ระบบควบคุมมีความสำคัญกับกระบวนการเกือบทุกกระบวนการที่ปัจจัยเข้าอาจมีความเปลี่ยนแปลงได้ โดยทั่วไปเป้าหมายของระบบควบคุมที่มีคุณภาพตามหลักการของแพลนท์ไวด์ประกอบด้วย การดำเนินกระบวนการอย่างปลอดภัยและราบเรียบ การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์แบบกระชับ (Tight Control) เมื่อมีสิ่งรบกวนเข้าสู่กระบวนการ หลีกเลี่ยงภาวะที่เป็นอันตราย ระบบควบคุมทำงานในโหมดอัตโนมัติแทนระบบใช้คนสั่งการซึ่งลดการดูแลอย่างใกล้ชิดของผู้ปฏิบัติงาน มีอัตราเร็วการเปลี่ยนคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูง ไม่ปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม การออกแบบระบบควบคุมตามหลักการของแพลนท์ไวด์จะพิจารณาทั้งกระบวนการพร้อมกันแทนการพิจารณาการควบคุมแต่ละหน่วยแล้วนำมารวมกัน โดยคำนึงถึงลักษณะสำคัญ

3 ประการของกระบวนการคือ ผลจากการป้อนกลับของสาร ผลที่เกิดจากการใช้พลังงานร่วม (Heat Integration) และการสะสมของสารองค์ประกอบภายในกระบวนการ

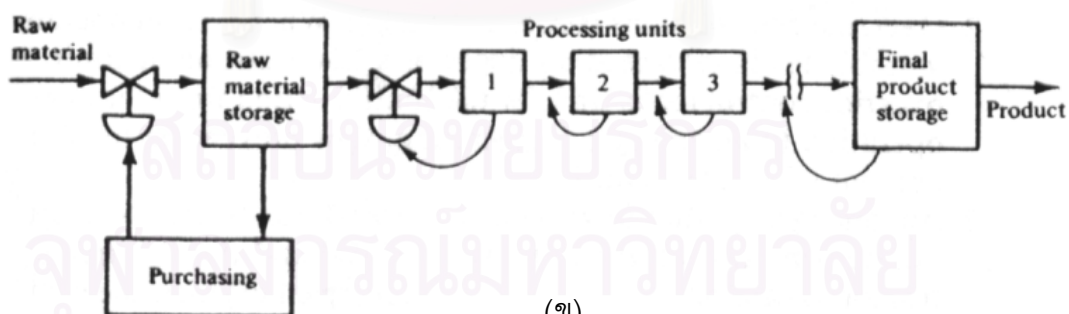
## 2.6 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมตามหลักแพลนท์ไวด์

1. กำหนดวัตถุประสงค์ของการควบคุม เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด วัตถุประสงค์การควบคุมที่แตกต่างกัน ส่งผลให้โครงสร้างการควบคุมมีความแตกต่างกัน
2. นับองศาอิสระหรือจำนวนวาล์วควบคุมที่มีในกระบวนการ หากจำนวนวาล์วควบคุมมีไม่เพียงพอกับตัวแปรควบคุม อาจต้องทำการออกแบบกระบวนการใหม่ เช่น เพิ่มกระแสบายพาส (By Pass) เพิ่มเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น
3. ติดตั้งระบบจัดการพลังงานในกระบวนการ มีหน้าที่หลัก 2 ประการคือ ดึงความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีออกจากกระบวนการหรือนำไปใช้ที่หน่วยอื่น และกำจัดสิ่งรบกวนด้านพลังงานที่จะส่งผ่านไปทั้งกระบวนการให้ออกไปที่หน่วยยูทิลิตี้ (Utility) สำหรับปฏิกิริยาดูดความร้อน ต้องมีการใส่พลังงานให้เพียงพอเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในอัตราเร็วที่เหมาะสม
4. กำหนดปริมาณการผลิต พิจารณาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการผลิต (Productivity) ของเครื่องปฏิกรณ์ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความดัน เป็นต้น
5. ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จัดการด้านความปลอดภัย ข้อจำกัดด้านการดำเนินการและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากตัวแปรควบคุมเหล่านี้ไม่ต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าเป้าหมาย ดังนั้นควรเลือกตัวแปรปรับที่มีค่าเวลาคงที่ของกระบวนการและเวลาหน่วงน้อย มีค่าอัตราขยายเชิงสถิติสูง ตำแหน่งของตัวแปรปรับควรอยู่ใกล้กับตัวแปรควบคุม
6. ควบคุมอัตราการไหลของกระแสป้อนกลับและการสะสมของมวลสารภายในกระบวนการ ได้แก่ ความดันและระดับของของเหลว เพื่อป้องกันผลกระทบจากการป้อนกลับ การป้อนกลับส่งผลให้ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการเพิ่มขึ้นกระบวนการปรับตัวเข้าสู่ภาวะคงตัวและกำจัดผลกระทบจากตัวแปรรบกวนได้ช้าลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์สโตนวอลล์ โดย

การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของอัตราการใช้หรือความเข้มข้นกลับทำให้อัตราการใช้ของ กระแสป้อนกลับเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ส่งผลกระทบต่อหน่วยปฏิบัติการภายในกระบวนการ ที่อาจได้รับผลกระทบมากเกินไปจนสูญเสียเสถียรภาพในที่สุด สำหรับกระแสป้อนกลับที่เป็นแก๊ส ดักลาส (Douglas, 1988) แนะนำควรมีอัตราการใช้สูงสุดเพื่อเพิ่มผลได้ของกระบวนการ ตำแหน่งของวาล์วที่กำหนดปริมาณการผลิตและวาล์วควบคุมการสะสมของสารภายใน โครงสร้างการควบคุมมี 2 ลักษณะตามหลักการของบัคเลย์ (Buckley, 1964) คือเลือกกระแส ป้อนเป็นตัวกำหนดการผลิต แล้วควบคุมการสะสมของสารในทิศทางเดียวกับการไหล อีก กรณีเป็นการกำหนดการผลิตด้วยกระแสผลิตภัณฑ์และควบคุมการสะสมของมวลสารในทิศ ทิศทางตรงข้ามกับการไหล ดังรูป 2.12 ซึ่งทั้งสองกรณีไม่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง กระจายไปทั่วทั้งทางเดินหลักของกระบวนการ (Primary Process Path) จากกระแสป้อนหลัก ไปสู่กระแสผลิตภัณฑ์หลัก



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.12 (ก) โครงสร้างการควบคุมคุณสมบัติมวลสารและปริมาณการผลิตทิศทางเดียวกับการไหล (ข)

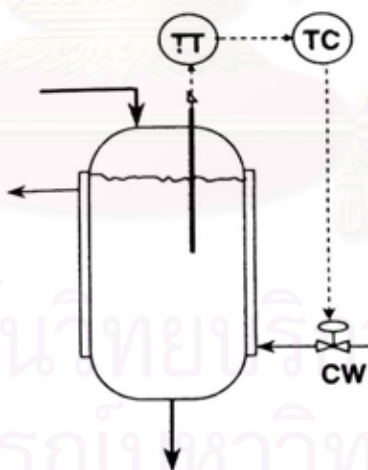
โครงสร้างการควบคุมคุณสมบัติมวลสารและปริมาณการผลิตทิศทางตรงข้ามกับการไหล

(Stephanopoulos, 1984: 531)

7. ตรวจสอบดุลองค์ประกอบเคมี ได้แก่ สารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์และสารเฉื่อยที่เข้าและออกจากกระบวนการ สร้างและใช้ไปภายในกระบวนการ เพื่อให้มั่นใจว่าสารตั้งต้นที่เข้าสู่กระบวนการได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์โดยปฏิกิริยาเคมีหรือปล่อยออกจากกระบวนการโดยไม่มีสารสะสมเกิดขึ้น ควบคุมสารตั้งต้นไม่ให้ออกไปจากกระบวนการทางกระแสผลิตภัณฑ์มากเกินไป โดยการควบคุมความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์
8. ควบคุมแต่ละหน่วย เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม เช่น ควบคุมอุณหภูมิสารป้อน เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน ควบคุมอัตราการไหลของตัวทำละลายของเหลวที่เข้าหอดูดกลืนให้อยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับอัตราการป้อนของแก๊ส
9. หากภาวะที่เหมาะสมที่สุดทางเศรษฐศาสตร์หรือปรับปรุงความสามารถในการควบคุมได้ โดยใช้วาล์วควบคุมที่เหลือ

## 2.7 การควบคุมแต่ละหน่วย

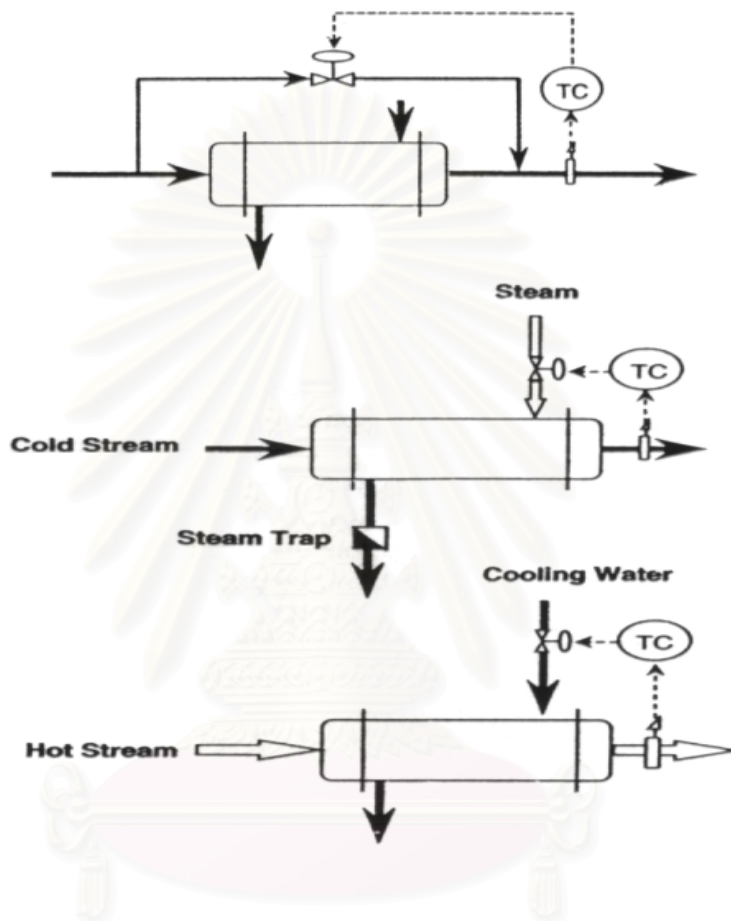
1. เครื่องปฏิกรณ์ ปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมส่วนมากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ระบบควบคุมมีหน้าที่ดึงความร้อนที่เกิดขึ้นออกไปโดยอาศัยการหมุนเวียนของน้ำหล่อเย็น โดยที่อุณหภูมิเป็นตัวแปรควบคุมที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น และส่งผลโดยตรงต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาซึ่งหมายถึงอัตราการคายความร้อนจากปฏิกิริยา ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (Luyben, 1999)

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มี 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากภายนอก (Utility Heat Exchanger) ทำหน้าที่ดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนเข้าสู่กระบวนการและระบายความร้อนจากกระบวนการออกสู่สิ่งแวดล้อม เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ (Process to Process Heat Exchanger) ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากตำแหน่งหนึ่งของ

กระบวนการไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่ง โดยมักควบคุมอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวแทนของปริมาณความร้อน ดังรูปที่ 2.14 แสดงการควบคุมอุณหภูมิโดยปรับอัตราการไหลของกระแสหล่อเย็นหรือไอน้ำ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการใช้กระแสบายพาสสำหรับควบคุม อุณหภูมิ มักบายพาสกระแสที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิโดยให้มีอัตราการไหลประมาณร้อยละ 5-10

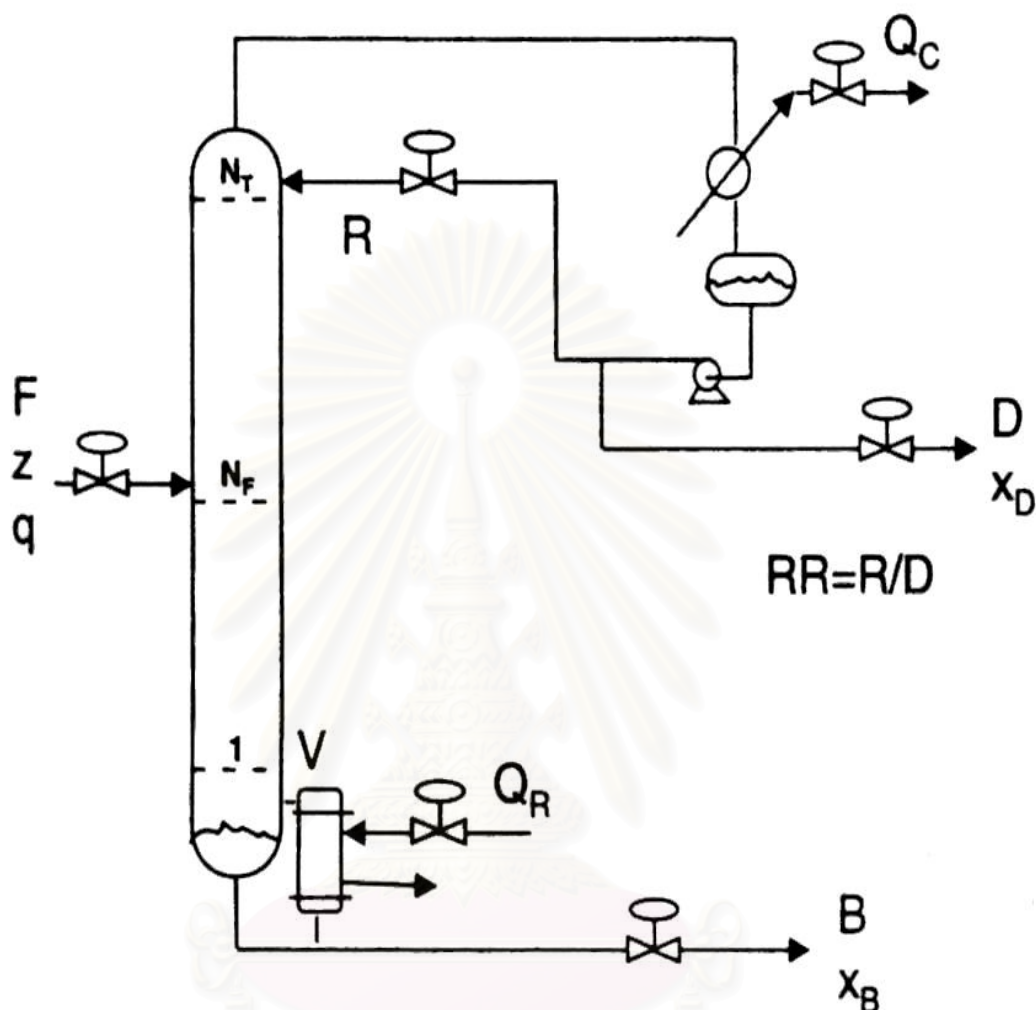


รูปที่ 2.14 การควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Luyben, 1999)

3. หอกลับ มีวาล์วควบคุม 6 ตัว ดังรูป 2.15 วาล์วควบคุมแรกใช้ควบคุมปริมาณการผลิตโดย อาจใช้วาล์วควบคุมที่ตำแหน่งกระแสป้อนหรือกระแสผลิตภัณฑ์ วาล์วควบคุมอีก 2 ตัวใช้ ควบคุมระดับของเหลวยอดหอและก้นหอ โดยทั่วไปมักเลือกกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ (Distillate) ควบคุมระดับของเหลวยอดหอ ยกเว้นหอกลับที่มีสัดส่วนป้อนกลับ (Reflux Ratio) มากกว่า 4 กฎของ Richardson แนะนำให้ใช้กระแสป้อนกลับซึ่งมีปริมาณมากกว่า ส่วนระดับ ของเหลวก้นหอมักใช้กระแสผลิตภัณฑ์ก้นหอเป็นตัวแปรปรับ วาล์วควบคุมตัวที่ 4 ใช้ควบคุม ความดันของหอกลับโดยมักใช้ภาระความร้อนของเครื่องควบแน่นเป็นตัวแปรปรับ ตัวแปรปรับ ที่เหลืออีก 2 ตัวใช้ควบคุมความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์โดยตรงหรือควบคุมอุณหภูมิในกรณีนี้



อุณหภูมิสามารถใช้กำหนดความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ได้ การวัดอุณหภูมิทำได้ง่ายและมีความแม่นยำมากกว่าการวัดความเข้มข้นโดยตรง



รูปที่ 2.15 หอกลิ้นและวาล์วควบคุม (Luyben, 1999)

อย่างไรก็ดีหอกลิ้นส่วนมากควบคุมความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์เพียง 1 ตำแหน่ง (Single-End Composition Control) เนื่องจากการควบคุมความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ทั้งสองกระแส (Dual Composition Control) จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างวงควบคุมทั้งสองอย่างมากทำให้การปรับแต่งเครื่องควบคุมทำได้ยาก และที่สำคัญหอกลิ้นส่วนมากมีอุณหภูมิเพียงตำแหน่งเดียวที่เป็นอุณหภูมิหลักในการอ้างถึงความเข้มข้น

## 2.8 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม

เริ่มจากการกำหนดเกณฑ์สำหรับพฤติกรรมของกระบวนการที่ต้องการ โดยแบ่งเป็น เกณฑ์สำหรับสภาวะคงตัว คือไม่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวแปรควบคุมและค่าเป้าหมาย ตัวแปรควบคุมปรับตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว เกณฑ์สำหรับสภาวะพลวัต ได้แก่ การรักษาให้ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำที่สุด (Time Integral Criterion) กำหนดค่าสัดส่วนลดทอนตามต้องการ วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมมี 2 วิธีดังนี้

1. วิธีปรับแต่งวงควบคุมแบบวงปิด ทำโดยใช้เครื่องควบคุมชนิดพีทำงานในโหมดอัตโนมัติ เปลี่ยนค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุม หลังจากนั้นค่อยๆ เพิ่มอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุมอย่างช้าๆ จนตัวแปรควบคุมเกิดการแกว่งด้วยแอมพลิจูดคงที่ ค่าอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุมที่ทำให้เกิดการแกว่งคงที่เรียกว่า ค่าอัตราขยายเชิงสถิติสูงสุด จากกราฟการตอบสนองวัดค่าคาบการแกว่งของตัวแปรควบคุมแล้วนำค่าเหล่านี้มาคำนวณพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมด้วยสมการต่างๆ ต่อไป
2. วิธีปรับแต่งวงควบคุมแบบวงเปิด ทำได้โดยให้เครื่องควบคุมทำงานในโหมดใช้คนสั่งการ เปลี่ยนตัวแปรปรับแบบขั้นบันได จากกราฟการตอบสนองหาค่าอัตราขยายเชิงสถิติ ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการและค่าเวลาหน่วง แล้วนำค่าเหล่านี้มาคำนวณพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยสมการต่างๆ ต่อไป

## 2.9 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของโครงสร้างการควบคุมแบบหลายวงควบคุม (Tuning

Multiloop Control System) มีหลายวิธีการ แต่ไม่มีวิธีการใดที่ถือเป็นบรรทัดฐานแน่นอน ขึ้นกับการชั่งน้ำหนักระหว่างสมรรถนะและความทนทานในการตอบสนองของกระบวนการเป็นสำคัญ

วิธีการที่หนึ่ง (Seborg et al, 1989)

ปรับแต่งพารามิเตอร์ทีละวงควบคุม โดยเครื่องควบคุมที่ยังไม่ปรับแต่งให้ทำงานในโหมดใช้คนสั่งการได้ (Manual Mode) หลังจากได้พารามิเตอร์แต่ละวงควบคุมแล้วเมื่อนำมาใช้เกิดพฤติกรรมที่ไม่พึงประสงค์อันเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างวงควบคุม ให้ทำการปรับแต่งต่อโดยการลดอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุมและเพิ่มค่าเวลาคงที่อินทิกรัล (Detune) สำหรับวงควบคุมที่มีปัญหา โดยอาจเลือกดีจูนวงควบคุมที่มีความสำคัญน้อย เพื่อให้การตอบสนองมีการแกว่งในลักษณะที่พอเหมาะ

#### วิธีการที่สอง (Seborg et al, 1989)

เหมาะสำหรับเมื่อมีหนึ่งหรือสองวงควบคุมที่สำคัญกว่าวงอื่น โดยให้ทำการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมที่สำคัญที่สุดก่อน ในขณะที่วงควบคุมอื่นทำงานในโหมดใช้คนสั่งการ หลังจากได้พารามิเตอร์เครื่องควบคุมที่สำคัญแล้วให้ทำงานในโหมดอัตโนมัติ ทำการปรับแต่งพารามิเตอร์สำหรับวงควบคุมที่เหลือ โดยอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุมที่ไม่สำคัญควรมีค่าต่ำพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อวงควบคุมที่สำคัญ ซึ่งวิธีการเช่นนี้ส่งผลให้พารามิเตอร์เครื่องควบคุมที่ได้เอื้อประโยชน์กับวงควบคุมที่สำคัญมากกว่า

#### วิธีการที่สาม (Stephanopoulos, 1984)

ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมทีละหน่วย ทดสอบเสถียรภาพและความทนทาน หลังจากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมมาต่อรวมกันทั้งกระบวนการ แต่ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไม่สามารถรับประกันได้ว่าเมื่อใช้กับวงควบคุมแบบปิดทุกวงพร้อมกันแล้วกระบวนการจะยังคงความเสถียร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับแต่งค่าอีกที เนื่องจากการปรับแต่งพารามิเตอร์ทีละวงไม่สามารถรับประกันการมีเสถียรภาพเมื่อวงควบคุมทั้งสองทำงานในโหมดอัตโนมัติพร้อมกัน

#### วิธีการที่สี่ (Brenner et al, 2001)

เริ่มด้วยการใช้เครื่องควบคุมชนิดพีดอย่างเดียวก่อน หาค่าอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุมก่อน หลังจากนั้นจึงค่อยๆ ปรับแต่งเครื่องควบคุมด้วยค่าเวลาที่คงที่อินทิกรัลและค่าเวลาคงที่อนุพันธ์จนได้ลักษณะการตอบสนองของกระบวนการตามต้องการ ดำเนินการทีละวงควบคุมโดยเริ่มจากวงควบคุมที่มีผลต่อเสถียรภาพของกระบวนการก่อนเช่น ความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล หลังจากนั้นจึงค่อยพิจารณาวงควบคุมระดับรองของของเหลว

#### วิธีการที่ห้า (Yu, Chen-Chin, 1998)

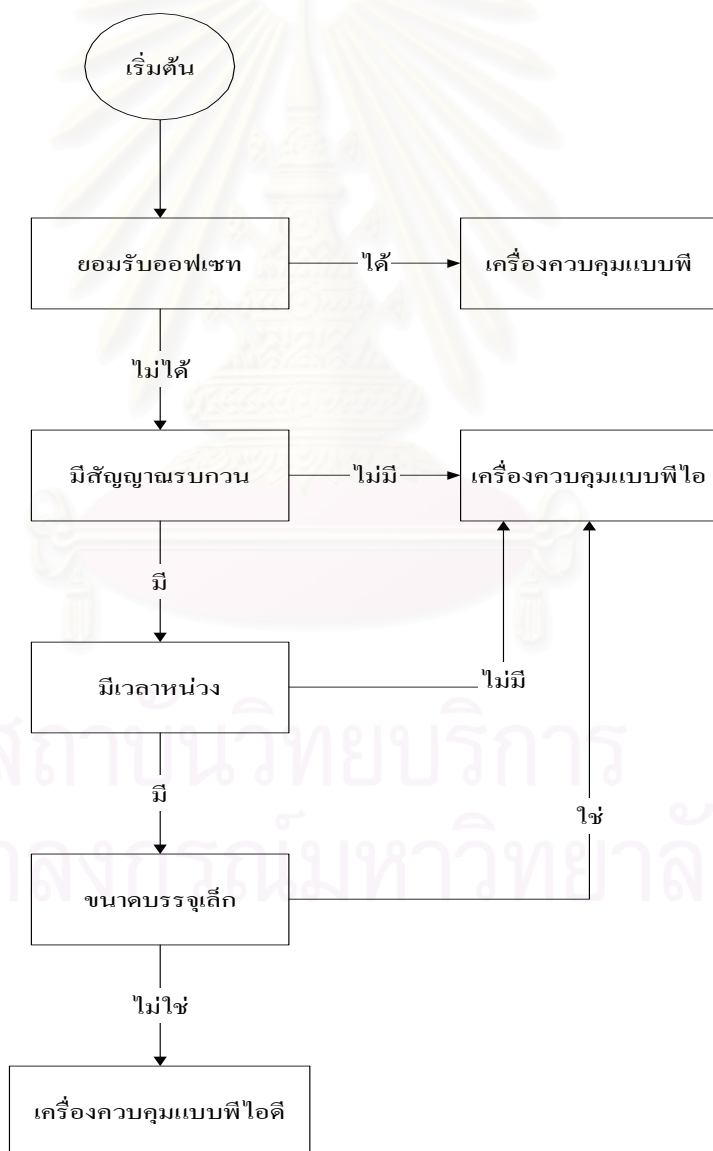
ทำการปรับแต่งเครื่องควบคุมตามลำดับ (Sequential Tuning) โดยวงควบคุมที่ปรับแต่งแล้วให้ทำงานในโหมดอัตโนมัติแล้วทำการปรับแต่งวงควบคุมอื่นต่อไป โดยลำดับการปรับแต่งเริ่มจากวงควบคุมที่เร็วก่อนหรือวงควบคุมที่เป็นอิสระจากวงควบคุมอื่น วงควบคุมการสะสมของมวลสารควรเปิดเมื่อทำการปรับแต่งวงควบคุมคุณภาพ เช่น อุณหภูมิและความเข้มข้น

## 2.10 การปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบขั้นลำดับ (Brenner et al, 2001)

ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้านในก่อน เมื่อได้ค่าแล้วให้ทำงานในโหมดอัตโนมัติ ส่วนเครื่องควบคุมด้านนอกทำงานในโหมดใช้คนสั่งการ ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมหลักโดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมด้านใน

## 2.11 หลักการเลือกชนิดของเครื่องควบคุม

เครื่องควบคุมแบบพีเอ็มใช้กับการควบคุมระดับของของเหลวและความดันของแก๊ส เครื่องควบคุมแบบพีไอเอ็มใช้กับการควบคุมระดับของของเหลว ความดันของแก๊สและอัตราการไหล ส่วนเครื่องควบคุมแบบพีไอดีเอ็มใช้กับการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้น



รูปที่ 2.16 ผังการเลือกชนิดของเครื่องควบคุม (Brenner et al, 2001)

2.12 กฎนิ้วโป้ง (Rules of Thumb) เป็นข้อสังเกตที่ได้จากการทดลองและสรุปมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบดังนี้

1. ค่าเวลาคงที่อินทิกรัลควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.1- 50 นาที
2. ค่าเวลาคงที่อินทิกรัลควรมีค่ามากกว่าค่าเวลาคงที่อนุพันธ์ 4 เท่า
3. อัตราส่วนระหว่างค่าเวลาหน่วงและค่าเวลาคงที่ของกระบวนการควรมีค่าเท่ากับ 1/4
4. ความดันลดคร่อมวาล์วสำหรับวาล์วควบคุมมักกำหนดให้มีค่าเป็น 1/4 หรือ 1/3 เท่าของความดันลดทั้งกระบวนการที่อัตราการไหลตามค่าที่ออกแบบ
5. เครื่องควบคุมแบบพีเป็นเครื่องควบคุมที่เหมาะสมกับการควบคุมแบบพิจารณาค่าเฉลี่ย โดยที่เราต้องการให้ค่าอัตราขยายเชิงสถิติเครื่องควบคุมมีค่าต่ำที่สุดที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ระดับของเหลวในถังสามารถรองรับความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการ เมื่อพิจารณาสมการสำหรับเครื่องควบคุมแบบพี  $c(t) = c_s + K_c e(t)$  ถ้ากำหนดให้  $c_s = 50\%CO$  หมายความว่าวาล์วควบคุมจะเปิดครึ่งทางที่สภาวะคงตัว หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าวาล์วควบคุมจะเปิดครึ่งทางเมื่อตัวแปรควบคุมมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมาย ซึ่งถ้ากำหนดว่าค่าเป้าหมายมีค่าเท่ากับ  $50\%TO$  ของค่าตัวแปรวัดได้ เนื่องจากช่วงการทำงานของค่าตัวแปรขาออกในหน่วยเปอร์เซ็นต์คือจาก 0-100 ทำให้ได้ข้อสรุปว่า ค่าอัตราขยายเชิงสถิติต่ำสุดซึ่งป้องกันระดับไม่ให้มีค่าเกินขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์วัดคือ  $1\%CO / \%TO$
6. กฎการปรับแต่งเครื่องควบคุมของไทร์ส (Tyreus Tuning) กล่าวว่าให้ใช้เครื่องควบคุมแบบพีควบคุมระดับของของเหลวซึ่งเป็นการควบคุมที่ไม่จำเป็นต้องรักษาภาวะดำเนินการให้ตรงค่าเป้าหมาย เพียงแต่รักษาภาวะดำเนินการให้อยู่ในช่วงที่อุปกรณ์สามารถดำเนินการได้เท่านั้น การปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมชนิดนี้ให้กำหนดอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุมเป็น 1.67 โดยวาล์วควบคุมจะเปิดกว้างเมื่อระดับของของเหลวอยู่ที่ร้อยละ 80 วาล์วปิดเมื่อระดับของเหลวอยู่ที่ร้อยละ 20

## 2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

W. Mooksuwan และ S.Kunar (2000): ทำการทดลองศึกษาปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของ ไอโซโพรพานอล โดยใช้ Ru-Pt/C ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 75 – 80 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 400 มิลลิกรัม ไอโซโพรพานอล 300 มิลลิลิตร จะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะทำให้ อัตราเร็วลดลงเนื่องจากถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิของปฏิกิริยาในขณะนั้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาลดลงเมื่อปริมาณอะซิโตนในสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะซิโตนถูกดูดกลืนได้ดีบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ Activity และ Selectivity ของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง การเพิ่มอัตราการไหลของ ไนโตรเจนภายในเครื่องปฏิกรณ์จะช่วยให้เกิดการผสมที่ดี อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การดูดกลืนของอะซิโตนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ช่วยเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา

Yonsoo Chung, Beom – Jae Kim, Yeong – Koo Yeo และ Hyung Keun (1997): สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์และจำลองสภาวะการณศึกษาถึงอิทธิพลของจำนวนชั้นของหอกลับ, อัตราส่วนการป้อนกลับ ตำแหน่งกระแสที่ป้อนเข้าหอกลับ อุณหภูมิของปฏิกิริยาดูดและคาย ความร้อนที่มีต่อประสิทธิภาพเอนทัลปีของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้ปฏิกิริยาผันกลับได้ ระหว่างไอโซโพรพานอล อะซิโตน ไฮโดรเจน และหาภาวะที่เหมาะสมซึ่งมีประสิทธิภาพเอนทัลปีสูง พบว่าจำนวนชั้นของหอกลับต่ำสุดคือเก้าชั้น ประสิทธิภาพไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นสูงกวานี้ อัตราส่วนการป้อนกลับควรต่ำกว่าห้า และประสิทธิภาพเอนทัลปีสูงที่สุดเมื่ออัตราส่วนการป้อนกลับเป็นหนึ่งใน ผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนควรป้อนเข้าหอกลับในช่วงชั้นที่ 1–8 ผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนควรป้อนเข้าหอกลับด้านกันหอก อุณหภูมิของปฏิกิริยาดูดความร้อนควรสูง ในขณะที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคายความร้อนควรต่ำ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง Temperature Boost และประสิทธิภาพเอนทัลปีเป็นแบบผกผัน ดังนั้นจึงควรพิจารณาอย่างรอบคอบถึงภาวะที่เหมาะสมที่สุด

Paul Gastauer, Hideo Kameyama และ Kyu Murata (1995): ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำงานที่มีต่อปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน และชนิดไซโคลเฮกเซน/เบนซีน/ไฮโดรเจน โดยพิจารณาสมรรถนะของระบบจากอัตราส่วนความร้อนและสัมประสิทธิ์สมรรถนะ จากการจำลองสภาวะการณโดยโปรแกรม AspenPlus พบว่าสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน เมื่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยอดหอกและค่าการเปลี่ยนของเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนมีค่าสูงจะส่งผลให้ปั๊มความ

ร้อนพลังงานเคมีมีสมรรถนะสูง สำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในวัฏภาคแก๊สการเปลี่ยนแปลงจะถูกจำกัดด้วยสมดุลเคมี ซึ่งถ้าปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเกิดในวัฏภาคของเหลวจะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนของเครื่องปฏิกรณ์ดูความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนจะถูกแยกออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Reaction Zone) เป็นการปรับปรุงสมรรถนะของป้อนความร้อนพลังงานเคมีได้ดียิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันอัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในวัฏภาคของเหลวจะลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นของอะซิโตนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งควบคุมความดันลดของระบบให้มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดผนังสองด้าน (Double – Sided Wall Type Reactor) สำหรับการนำระบบไฮโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน และระบบไซโคลเฮกเซน/เบนซีน/ไฮโดรเจนมารวมกัน ทำให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิของความร้อนจาก 80 องศาเซลเซียส จนถึง 350 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราส่วนความร้อน 16.6 % และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ 2.5

Tae Gyung Kim, Yeong Koo Yoo และ Myung Keun Song (1992): ทำการทดลองศึกษาป้อนความร้อนพลังงานเคมีของปฏิกิริยาผันกลับได้ระหว่างไฮโซโพรพานอล - อะซิโตน ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไฮโซโพรพานอลเกิดในวัฏภาคของเหลวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ Raney Nickel เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอะซิโตนเกิดในวัฏภาคแก๊สที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้ Raney Nickel เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมีค่าเป็นบวกทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกผลิตภัณฑ์อันประกอบด้วยอะซิโตนและไฮโดรเจนออกอย่างต่อเนื่องจาก Reaction Medium ผลจากการทดลองพบว่าสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน คือ  $V = 0.1C_p / (1 + 7.0C_A)$ ,  $V$  คืออัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน โดยความเข้มข้นของอะซิโตนเป็นตัวควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยา อัตราการเปลี่ยนของอะซิโตนลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับส่งผลให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาต่อหน้าหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงสูงสุดของอะซิโตนเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนและอะซิโตนของกระแสน้ำเข้าเครื่องปฏิกรณ์ดีไฮโดรจีเนชันเป็น 4 นอกจากนี้ยังทำการจำลองสภาวะการณเพื่อประมาณประสิทธิภาพความร้อน โดยพบว่าประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันและดีไฮโดรจีเนชัน

L.M. Gandia และ M. Montes (1992): สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของปฏิกิริยาต่อความร้อนต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอร์จี

(Exergetic Efficiency) และพารามิเตอร์ด้านขนาด (Size Parameters) ของปั๊มความร้อน พลังงานเคมีในระบบไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน รวมทั้งภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรควบคุม (Control Variables) ที่ทำให้พารามิเตอร์ด้านพลังงาน (Energetic Parameters) มีค่าสูง และพารามิเตอร์ด้านขนาดมีค่าต่ำ โดยกำหนดฐานการคำนวณที่พลังงานความร้อนคุณภาพสูงเท่ากับ 0.32 เมกะวัตต์ ผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ภาวะของตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนการป้อนกลับเป็น 1.2 – 1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนกลับต่ำสุด ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขาออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ 20 – 30 เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนและอะซิโตนของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันเป็นสอง อัตราส่วนโดยโมลเทียบกับผลรวมของจำนวนโมลของอะซิโตนและไอโซโพรพานอลของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรจีเนชันเป็น 0.9 – 0.98 อุณหภูมิของความร้อนที่ทิ้งจากกระบวนการคือ 336 – 343 เคลวิน อุณหภูมิของความร้อนคุณภาพสูงคือ 453 – 473 เคลวิน โดยเป็นภาวะที่มีสัมประสิทธิ์สมรรถนะ 0.20 – 0.30 และประสิทธิภาพเอ็กซ์เซอร์จี 0.60 – 0.80 ส่วนพารามิเตอร์ของขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหอกลิ้นเป็น 1 เมตร จำนวนชั้นของหอกลิ้น 6 – 10 ชั้น และพารามิเตอร์สัดส่วน (Proportional Factor) สำหรับพื้นที่ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (UA) คือ 1.4 – 2.5 กิโลวัตต์ต่อเคลวิน โดยหลายปัจจัยจะส่งผลกระทบข้ามกันต่อพารามิเตอร์ด้านพลังงานและขนาด ดังนั้นการหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ประกอบกับข้อมูลทางด้านราคาของตัวเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์ และพลังงาน จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพิจารณาควบคู่ไปกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### การสร้างแบบจำลองป้อนความร้อนและการออกแบบระบบควบคุม

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) คอมพิวเตอร์เพนเทียมทรี (Pentium III) ความเร็ว 933 เมกะเฮิรตซ์
- 2) โปรแกรมไฮซิสแพลนท์ (Hysys.Plant) รุ่น 2.4.1

#### 3.2 วิธีการทดลอง

- 1) ศึกษาป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน
- 2) ออกแบบระบบควบคุมป้อนความร้อนพลังงานเคมีโดยหลักการแบบแพลนท์ไวด์
- 3) จำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนพลังงานเคมีที่ภาวะคงตัวและภาวะพลวัต
- 4) ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุม
- 5) ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจนดังนี้
  - ก. ศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการที่มีต่อป้อนความร้อนได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง
  - ข. ประเมินสมรรถนะของโครงสร้างการควบคุมสองโครงสร้างโดยพิจารณาจาก
    - ประสิทธิภาพความร้อนและสัมประสิทธิ์สมรรถนะ
    - ผลรวมค่าสมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (Integral of Absolute Value of Error, IAE) ของวงควบคุมหลัก โดยโครงสร้างการควบคุมที่มีค่าไอเอเอ็น้อยแสดงถึงความเร็วในการปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย และกำจัดผลของตัวแปรกระบวนการได้อย่างรวดเร็ว

#### 3.3 ป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน

แผนภาพกระบวนการของป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจนแสดงดังรูปที่ 3.1 หลักการทำงานของป้อนความร้อนพลังงานเคมีเริ่มจากกระแสผลิตภัณฑ์ก้นหอมีความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพานอลร้อยละ 98 และอะซิโตนร้อยละ 2 ได้รับการเพิ่มพลังงานจากไอน้ำอุณหภูมิต่ำเพื่อให้มีพลังงานเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเปลี่ยนไอโซโพรพานอลเป็นอะซิโตนและไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกป้อนกลับเข้าหอกลั่นเพื่อแยกไอโซโพรพานอลออกจากกระแสก้นหอ ขณะที่กระแสยอดหอประกอบด้วยอะ

ซีโตนและไฮโดรเจนในอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง กระแสยอหดถูกส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนเพื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเปลี่ยนอะซีโตนและไฮโดรเจนกลับมาเป็นไอโซโพรพานอล กระแสผลิตภัณฑ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มพลังงานไอน้ำอุณหภูมิต่ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ ที่ต้องการพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูง พลังงานความร้อนในกระแสผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนอีกส่วนหนึ่งถูกนำกลับเข้ากระบวนการใหม่เพื่อเพิ่มอุณหภูมิสารป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่หอกลั่นเพื่อแยกไอโซโพรพานอลออกจากอะซีโตนและไฮโดรเจนเป็นอันครบวัฏจักร โดยที่เครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองดำเนินการแบบอะเดียบาติก เครื่องอัดไอทำหน้าที่เพิ่มความดันเพื่อชดเชยความดันลดที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ การดำเนินการปั๊มความร้อนที่สภาวะคงตัวแสดงในตารางที่ 3.1

**3.4 การออกแบบระบบควบคุมสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน** ดำเนินการโดยใช้หลักการออกแบบระบบควบคุมแบบแพลนที่โวกด์ ที่นำเสนอโดยลูเบน (1999) โดยมีขั้นตอนดำเนินการแบ่งเป็น 9 ขั้นตอนคือ

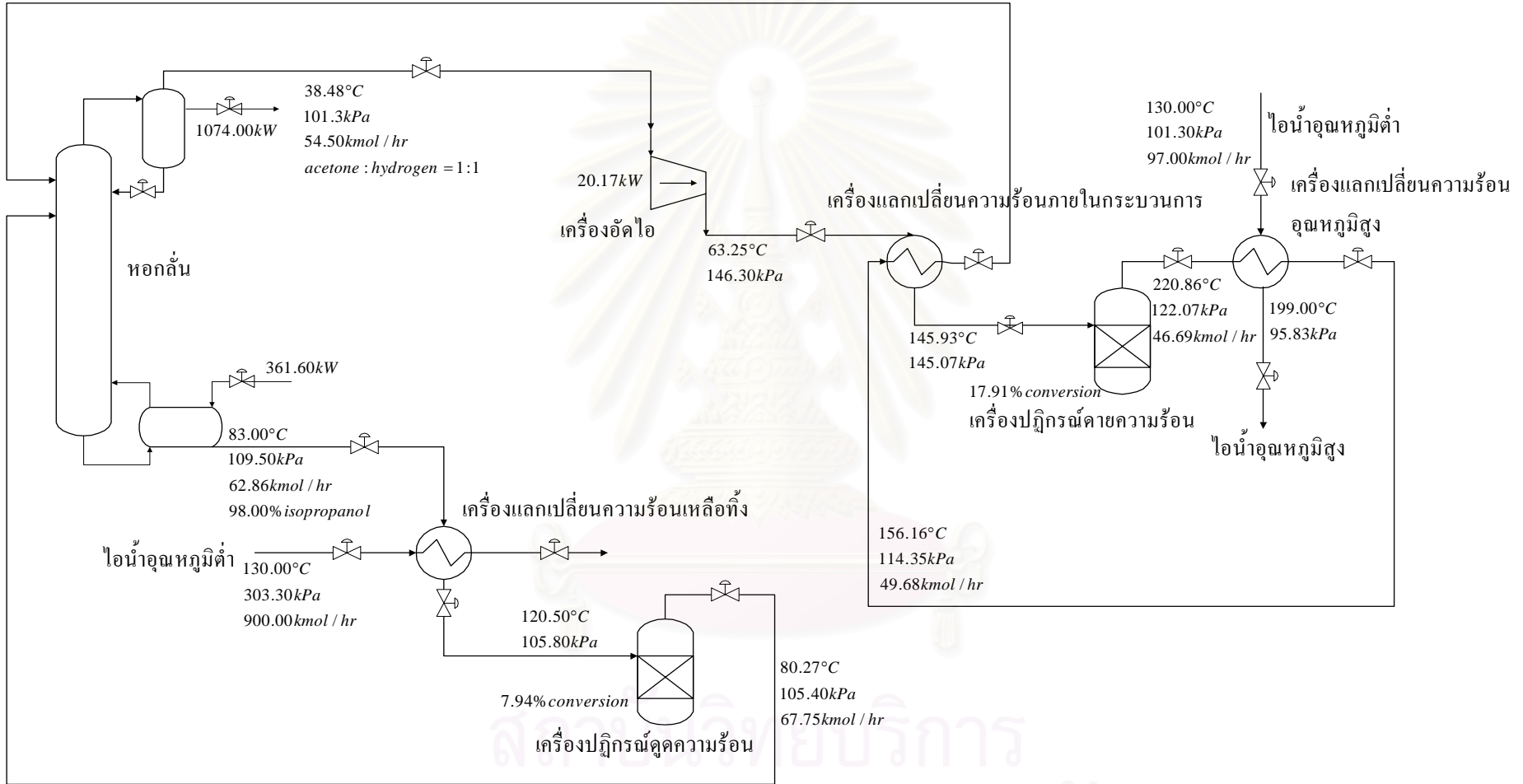
#### 3.4.1 กำหนดวัตถุประสงค์ของการควบคุม

เป้าหมายของปั๊มความร้อน คือการผลิตพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูงในปริมาณและอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อส่งความร้อนให้กับกระบวนการที่ต้องการใช้ความร้อนอุณหภูมิสูง ดังนั้นการควบคุมปั๊มความร้อนทำโดยการควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอน้ำที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน งานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างการควบคุม 2 แบบซึ่งแตกต่างกันที่ตัวแปรปรับที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำ

#### 3.4.2 นับองศาอิสระของการควบคุม

องศาอิสระหรือตัวแปรปรับได้ของปั๊มความร้อนมี 10 ตัวดังนี้

- 1) ภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น
- 2) ภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ
- 3) อัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์
- 4) อัตราการไหลกระแสน้ำหรืออัตราการไหลกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน
- 5) อัตราการไหลกระแสกันหอยหรืออัตราการไหลกระแสป้อนเครื่องดูดความร้อน
- 6) อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน
- 7) อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน
- 8) อัตราการไหลของไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 3.1 ป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/ อะซิโตน/ ไฮโดรเจน

ตารางที่ 3.1 ภาวะการดำเนินการที่ภาวะคงตัวของป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/ อะซิโตน/ ไฮโดรเจน

อุปกรณ์	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	ความดัน ( $kPa$ )	อัตราการไหล ( $kmol/h$ )	อัตราการไหล ไอโซโพรพานอล ( $kmol/h$ )	อัตราการไหล อะซิโตน ( $kmol/h$ )	อัตราการไหล ไฮโดรเจน ( $kmol/h$ )	อัตราการไหล ไอน้ำ ( $kmol/h$ )	พลังงานของ อุปกรณ์ ( $kW$ )
หม้อกลั่น								-
— กระแสยอดหม้อ	38.48	101.30	54.50	1.09	26.84	26.57	-	-
— กระแสก้นหม้อ	83.00	109.50	62.86	61.60	1.26	0.00	-	-
— ภาวะความร้อนของเครื่อง ควบแน่น	-	-	-	-	-	-	-	1074.00
— ภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ	-	-	-	-	-	-	-	361.60
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง								758.20
— กระแสไอน้ำอุณหภูมิต่ำ	130.00	303.90	900.00	-	-	-	900.00	-
— กระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์	120.50	105.80	62.86	61.60	1.26	0.00	-	-
เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน								-
— กระแสผลิตภัณฑ์	80.27	105.40	67.75	56.71	6.15	4.89	-	-
เครื่องอัด								20.17
— กระแสขาออก	63.25	146.30	54.50	1.09	26.84	26.57	-	-

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

อุปกรณ์	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	ความดัน ( $kPa$ )	อัตราการไหล ( $kmol/h$ )	อัตราการไหล ไอโซโพรพานอล ( $kmol/h$ )	อัตราการไหล อะซิโตน ( $kmol/h$ )	อัตราการไหล ไฮโดรเจน ( $kmol/h$ )	อัตราการไหล ไอน้ำ ( $kmol/h$ )	พลังงานของ อุปกรณ์ ( $kW$ )
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน กระบวนการ	-	-	-	-	-	-	-	74.71
— กระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คาย ความร้อน	145.81	122.07	54.50	1.09	26.84	26.57	-	-
— กระแสป้อนหอกลิ้น	73.57	105.40	49.68	5.90	22.02	21.76	-	-
เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน								
— กระแสผลิตภัณฑ์	220.86	122.07	46.69	5.89	22.03	21.77	-	-
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิสูง	-	-	-	-	-	-	-	64.86
— กระแสไอน้ำอุณหภูมิต่ำ	130.00	101.30	97.00	-	-	-	97.00	-
— กระแสไอน้ำอุณหภูมิสูง	199.00	95.83	97.00	-	-	-	97.00	-
— กระแสป้อนเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนภายในกระบวนการ	156.16	114.35	49.68	5.90	22.02	21.76	-	-

9) อัตราการไหลของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง

10) พลังงานของเครื่องอัดไอ

### 3.4.3 การจัดการด้านพลังงานความร้อน

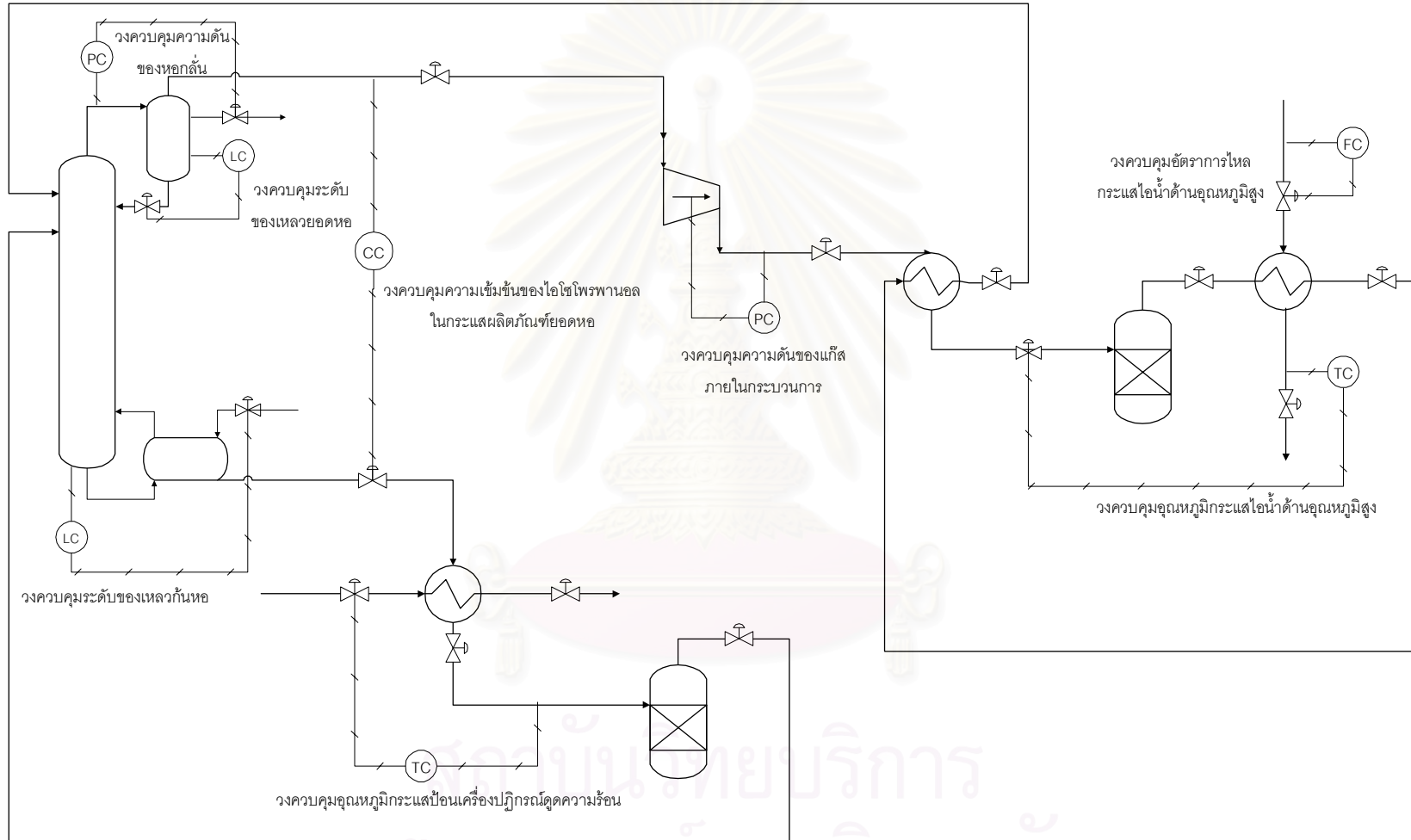
การจัดการด้านพลังงานพิจารณาได้สองตำแหน่งคือ ส่วนของการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชั่น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของสารป้อน โดยปรับอัตราการไหลของไอน้ำเพื่อรักษาอุณหภูมิของสารป้อนให้มีพลังงานเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ส่วนที่สองสำหรับการจัดการด้านพลังงาน คือพลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาคายความร้อนเปลี่ยนอะซิโตนและไฮโดรเจนกลับมาเป็นไอโซโพรพานอลที่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน พลังงานที่เกิดขึ้นและสะสมอยู่ในกระแสผลิตภัณฑ์ของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนถูกนำมาใช้สองส่วนดังนี้ ส่วนแรกถูกกำจัดออกจากกระบวนการโดยการให้ความร้อนแก่ไอน้ำที่จะนำไปใช้ในกระบวนการให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณความร้อนจำนวนนี้ควบคุมจากวงควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอน้ำในขั้นตอนที่ 3.4.4 พลังงานความร้อนส่วนที่เหลือนำกลับเข้ากระบวนการใหม่เพื่อเพิ่มอุณหภูมิสารป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน หลังจากนั้นพลังงานความร้อนส่วนเกินจะถูกดึงออกจากกระบวนการสู่สิ่งแวดล้อมโดยเครื่องควบแน่นของหอกลั่น

### 3.4.4 กำหนดปริมาณการผลิต

ปริมาณพลังงานความร้อนที่ไอน้ำได้รับขึ้นอยู่กับพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในกระแสผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทางกระแสป้อนและค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาโดยปริมาณทั้งสองมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราการไหล อุณหภูมิกระแสป้อน ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและความดันของเครื่องปฏิกรณ์ งานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้างการควบคุม 2 แบบซึ่งแตกต่างกันที่ตัวแปรปรับสำหรับควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำดังนี้

- 1) โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยปรับอัตราการไหลของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.2
- 2) โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยใช้การควบคุมแบบขั้นลำดับ วงควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำเป็นวงควบคุมหลักส่งค่าเป้าหมายให้กับวงควบคุมรอง ซึ่งจะทำการปรับความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยปรับพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอ แสดงดังรูปที่ 3.3

โครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบมีข้อดีคือ สามารถกำหนดการผลิตความร้อนได้โดยตรง (On-demand Structure) โดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายวงควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลไอน้ำเพื่อให้ได้ปริมาณและอุณหภูมิของความร้อนตามต้องการ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 สำหรับป้อนความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโทรพานอล/ อะซิโตน/ ไฮโดรเจน





### 3.4.5 ความคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ความปลอดภัยของการดำเนินการและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คุณภาพของความร้อนที่ได้จากปั๊มความร้อนสามารถวัดได้จากอุณหภูมิของไอน้ำ การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำได้ถูกกำหนดจากขั้นตอนการกำหนดกำลังการผลิตในขั้นตอนที่ 3.4.4 ปั๊มความร้อนดำเนินการโดยสารทำงานอยู่ในภาวะแก๊ส มีการหมุนเวียนพลังงานเข้าและออกจากกระบวนการตลอดเวลา หากอัตราการป้อนพลังงานเข้าสู่ปั๊มความร้อนไม่คู่กับอัตราการดึงพลังงานออกจากกระบวนการจะส่งผลกระทบต่อความดันภายในกระบวนการอย่างมาก การควบคุมความดันภายในกระบวนการจึงมีความจำเป็นเพื่อให้สามารถเดินปั๊มความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยโดยการปรับพลังงานที่ป้อนเครื่องอัดไอ

### 3.4.6 กำหนดอัตราการไหลคงที่ของกระแสป้อนกลับและควบคุมการสะสมของมวลสารภายในกระบวนการ

การควบคุมอัตราการไหลกระแสป้อนกลับมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมปริมาณสารที่ย้อนกลับสู่กระบวนการให้มีปริมาณคงที่เพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์สโนว์บอลและการรับภาระมากเกินไปในแต่ละหน่วยปฏิบัติการ ปั๊มความร้อนดำเนินการโดยมีมวลสารในระบบคงที่ หากปริมาณสารที่หมุนเวียนผ่านเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนมากเท่าใด ปริมาณพลังงานความร้อนที่ไอน้ำได้รับก็จะยิ่งมีค่ามากขึ้น ดังนั้นการหมุนเวียนปริมาณสารภายในกระบวนการควรมีอัตราการไหลที่ค่าสูงสุดซึ่งจะช่วยเพิ่มพลังงานความร้อนที่ไอน้ำได้รับ ด้วยเหตุนี้จึงไม่จำเป็นต้องควบคุมอัตราการไหลกระแสป้อนกลับ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของดักลาส (1988) ที่กล่าวว่าอัตราการไหลกลับของแก๊สควรมีค่าสูงสุดเพื่อปรับปรุงผลได้ของเครื่องปฏิกรณ์ การควบคุมปริมาณสะสมของสารภายในกระบวนการเป็นการควบคุมปริมาณแก๊สและของเหลวไม่ให้เกิดการสะสมภายในหน่วยปฏิบัติการใดๆ เพื่อให้อัตราการไหลของสารออกจากหน่วยปฏิบัติการได้คู่กับอัตราการไหลเข้า ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของการดำเนินกระบวนการอย่างหนึ่ง วงควบคุมลักษณะเช่นนี้สำหรับปั๊มความร้อนประกอบด้วย การควบคุมความดันภายในหอกลิ้นโดยการปรับภาระความร้อนของเครื่องควบแน่น การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอคโดยปรับอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์ และการควบคุมระดับของเหลวกันหอคโดยการปรับภาระความร้อนของหม้อต้มซ้ำ

### 3.4.7 การตรวจสอบดุลองค์ประกอบ

การตรวจสอบดุลองค์ประกอบมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการสะสมขององค์ประกอบภายในกระบวนการได้แก่ สารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์และสารเฉื่อย อันเกิดจากความไม่สมดุลระหว่างสารที่ป้อนเข้าและสารที่ออกจากกระบวนการ การใช้และการเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี ปั๊มความร้อนดำเนินการเป็นวัฏจักรปิดไม่มีมวลสารเข้าหรือออกจากกระบวนการ ดังนั้นดุลองค์ประกอบภายในกระบวนการจึงเหลือเพียงการควบคุมปริมาณสะสมแต่ละหน่วยปฏิบัติการดังแสดงในขั้นตอนที่

3.4.6 ซึ่งอาจพิจารณาว่าการควบคุมความดันของหอกลิ้นเปรียบเหมือนการควบคุมปริมาณไฮโดรเจนที่หมุนเวียนภายในกระบวนการ เนื่องจากไฮโดรเจนมีสถานะเป็นแก๊สตลอดภาวะการดำเนินการ สารป้อนหอกลิ้นมีปริมาณไฮโดรเจนเข้ามาเท่าใดก็จะถูกปล่อยออกไปกับกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอดทั้งหมด ส่วนระดับของเหลวยอดหอดเป็นตัวแทนซึ่งถึงปริมาณอะซิโตนที่สะสมภายในหอกลิ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยอดหอดประกอบด้วยไอโซโพรพานอลเพียงร้อยละ 2 อะซิโตนและไฮโดรเจนในอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง ไฮโดรเจนทั้งหมดออกจากหอกลิ้นไปกับกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอด ส่วนอะซิโตนที่เหลือจะมีปริมาณมากกว่าไอโซโพรพานอลมาก หลังจากการคายความร้อนที่เครื่องควบแน่นแล้วจะไหลกลับเข้าหอกลิ้นทางกระแสรีฟลักซ์ การควบคุมระดับของเหลวกันหอดเป็นตัวแปรซึ่งถึงปริมาณสะสมของไอโซโพรพานอลภายในหอกลิ้น เนื่องจากไอโซโพรพานอลเกือบทั้งหมดที่ป้อนเข้าหอกลิ้นจะออกไปกับกระแสผลิตภัณฑ์กันหอดถึงร้อยละ 98 สรุปการดุลองค์ประกอบภายในกระบวนการแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ดุลองค์ประกอบภายในกระบวนการ

สารองค์ประกอบ	เข้าสู่ระบบ	เกิดขึ้นภายในระบบ	ออกจากระบบ	ใช้ภายในระบบ	การสะสมในระบบ
ไอโซโพรพานอล	-	$r_2V_2$	-	$r_1V_1$	ระดับของเหลวกันหอด
อะซิโตน	-	$r_1V_1$	-	$r_2V_2$	ระดับของเหลวยอดหอด
ไฮโดรเจน	-	$r_1V_1$	-	$r_2V_2$	ความดันของหอกลิ้น

$r_1V_1$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน

$r_2V_2$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

### 3.4.8 การควบคุมหน่วยย่อยภายในกระบวนการ

หลังจากกำหนดวงควบคุมที่จำเป็นในขั้นตอนที่ 3.4.1-3.4.7 แล้วตัวแปรปรับกระบวนการที่เหลือจะใช้สำหรับการควบคุมที่จำเป็นในแต่ละหน่วยเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของกระบวนการและระบบควบคุม ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไอน้ำได้แก่การเปลี่ยนแปลงภาวะของเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ความเข้มข้นของสารป้อนเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งเป็นกระแสผลิตภัณฑ์จากหอกลิ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเปลี่ยนอะซิโตนและไฮโดรเจนเป็นไอโซโพรพานอล การมีไอโซโพรพานอลในสารป้อนมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่งผลให้ค่าการ

เปลี่ยนของปฏิกิริยาและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมการปนเปื้อนของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอซึ่งเป็นสารป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนโดยปรับอัตราการไหลออกของกระแสกันหอ การควบคุมที่จำเป็นของหน่วยย่อยอื่นสำหรับป้อนความร้อนได้ถูกพิจารณาไปแล้วในขั้นตอนที่ 3.4.1-3.4.7

3.4.9 หากภาวะที่เหมาะสมที่สุดทางเศรษฐศาสตร์หรือปรับปรุงความสามารถในการควบคุมได้

เป็นการหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรปรับที่เหลือ โดยวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น เพื่อหาสภาวะการควบคุมมีการใช้พลังงานของกระบวนการน้อยที่สุด โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาในประเด็นนี้

### 3.5 การจำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน

ป้อนความร้อนจะถูกจำลองสถานการณ์ที่ภาวะคงตัวก่อนเพื่อนำค่าสภาวะเหล่านี้มาใช้เป็นสภาวะเริ่มต้นสำหรับการจำลองกระบวนการที่สภาวะพลวัต จากนั้นจึงทำการจำลองกระบวนการที่สภาวะพลวัต สมมติฐานของการคำนวณคือ ไม่คิดความร้อนสูญเสียจากกระบวนการ ไม่คิดปริมาณสะสมในท่อ ประสิทธิภาพชั้นของหอกลับเท่ากับร้อยละ 100

#### 3.5.1 การจำลองสถานการณ์ที่ภาวะคงตัว

- 1) เลือกแบบจำลองแยกทิวิตี (Activity Model) ยูนิแควก-วิเรียล (Uniquac-Virial) สำหรับคำนวณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์
- 2) เลือกแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดสมดุล (Equilibrium Reactor) สำหรับจำลองสถานการณ์ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันและไฮโดรจีเนชัน แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดสมดุลต้องการข้อมูลอัตราส่วนมวลสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ค่าการเปลี่ยนและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์คิดจากค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาซึ่งมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิของปฏิกิริยาตามสมการ  $\Delta G = -RT \ln K$
- 3) เลือกแบบจำลองหอกลับชนิดป้อนกลับหมด (Fully-Refluxed Condenser) ซึ่งเป็นหอกลับที่มีเครื่องควบแน่นชนิดควบแน่นบางส่วน (Partial Condenser) โดยมีผลิตภัณฑ์ยอดหอเป็นแก๊ส ป้อนข้อมูลดังนี้
  - ก. ความดันของหอกลับที่ยอดหอและกันหอ 101.3 กิโลพาสคัล
  - ข. จำนวนชั้นของหอกลับ 15 ชั้น
  - ค. กระแสป้อนเข้าหอกลับที่ชั้น 8
  - ง. ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 2
  - จ. ความเข้มข้นของอะซิโตนของกระแสผลิตภัณฑ์กันหอร้อยละ 2

- 4) เลือกแบบจำลอง Dynamic Rating-Detail สำหรับการคำนวณเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนทั้ง 3 เครื่อง โดยแบบจำลองชนิดนี้คิดความดันลดและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมจากขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กำหนดพื้นที่แลกเปลี่ยน ความร้อนด้านนอกท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจนได้คุณหมุมิขาออกดังตาราง ที่ 3.1 ดังนี้
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง 0.74 ตารางเมตร
  - เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ 3.08 ตารางเมตร
  - เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูง 1.92 ตารางเมตร
- 5) เครื่องอัดไอ กำหนดความดันขาออกจากเครื่องอัดไอ 146.3 กิโลพาสคัล โดยเครื่องอัดไอทำหน้าที่เพิ่มความดัน 50 กิโลพาสคัลเพื่อชดเชยความดันลดที่เกิดขึ้นภายใน กระบวนการ

### 3.5.2 จำลองสถานการณ์ภาวะพลวัต

อาศัยความดันแตกต่างเป็นปัจจัยกำหนดอัตราการไหล โดยต้องการข้อมูลเพิ่มเติมคือ ขนาดของอุปกรณ์และการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหล (Pressure – Flow Specification)

#### 3.5.2.1 การกำหนดขนาดของอุปกรณ์

- กำหนดขนาดของหอกลิ้นโดยใช้เครื่องมือกำหนดขนาดชั้น (Tray Sizing Utility) จากโปรแกรมไฮซีส ได้ผลดังนี้
  - ความดันลด 8.2 กิโลพาสคัล
  - เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.067 เมตร
  - ความสูงเวีย (Weir Height) 0.0508 เมตร
  - ความยาวเวีย (Weir Length) 0.6263 เมตร
  - ระยะห่างระหว่างชั้น (Tray Space) 0.6096 เมตร
- กำหนดขนาดของเครื่องควบแน่น จากอัตราการไหลเข้าของของเหลว (Liquid Inlet Flow) และเวลาที่สารอยู่ในอุปกรณ์ (Residence Time) 15 นาที เมื่อระดับของเหลวที่ภาวะดำเนินการปกติเป็นร้อยละ 50

$$V = (11.539 \frac{m^3}{h})(15 \text{ min})(\frac{1}{60} \frac{h}{\text{min}})(\frac{1}{0.5}) = 5.769 m^3$$

- กำหนดขนาดของหม้อต้มซ้่า จากอัตราการไหลเข้าของของเหลว (Liquid Inlet Flow) และเวลาที่สารอยู่ในอุปกรณ์ 10 นาที เมื่อระดับของเหลวที่ภาวะดำเนินการปกติเป็นร้อยละ 50

$$V = (7.327 \frac{m^3}{h})(10 \text{ min})(\frac{1}{60} \frac{h}{\text{min}})(\frac{1}{0.5}) = 2.442 m^3$$

4) กำหนดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ จากอัตราการไหลเข้าโดยปริมาตรของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ (Actual Volume Flow) และเวลาที่สารอยู่ในอุปรกรณ์ 1 นาที

ก. ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน

$$V = (1901.286 \frac{m^3}{h})(1 \text{ min})(\frac{1}{60} \frac{h}{\text{min}}) = 31.69 m^3$$

ข. ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน

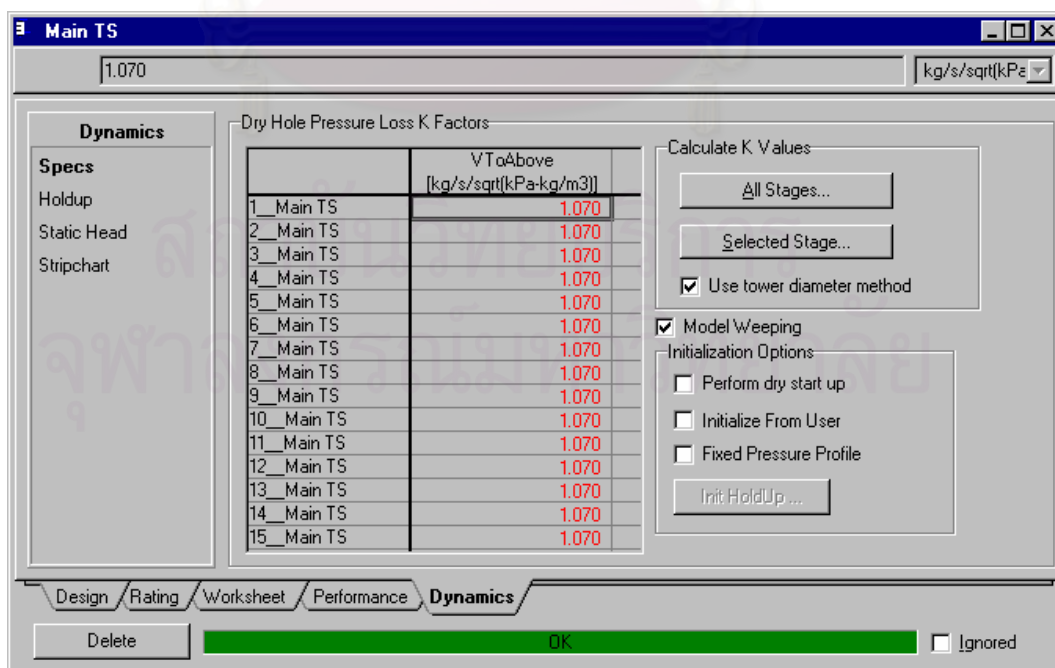
$$V = (1372.827 \frac{m^3}{h})(1 \text{ min})(\frac{1}{60} \frac{h}{\text{min}}) = 22.88 m^3$$

### 3.5.2.2 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหล

- 1) กระแสที่ไม่ได้ต่อกับหน่วยอื่น(Boundary Stream) มีสองกระแสคือ กระแสผลิตภัณฑ์ของเหลวจากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองกำหนดอัตราการไหลคงที่มีค่าเท่ากับศูนย์
- 2) ปรับความดันแตกต่างของหอกถัน โดยนำค่าความดันลดที่คำนวณจากเครื่องมือกำหนดขนาดขึ้นมาคิดความดันกันหอกถันดังนี้

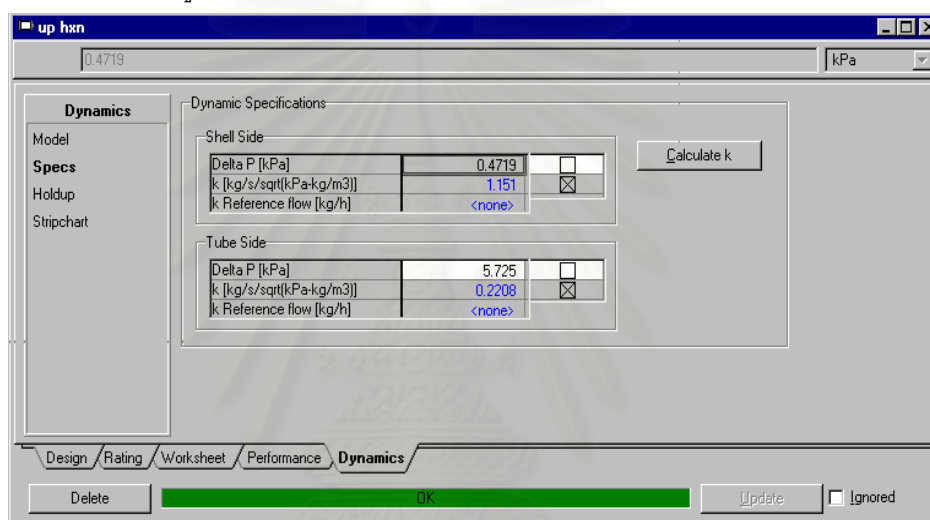
$$\begin{aligned} \text{ความดันที่กันหอก} &= \text{ความดันยอดหอก} + \text{ความดันลด} \\ &= 101.3 + 8.2 = 109.5 \text{ กิโลพาสคัล} \end{aligned}$$

กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การไหลของไอภายในหอกถันโดยเลือกคำสั่ง 'All Stage' ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ส่วนอัตราการไหลของของเหลวภายในหอกถันคิดจากสมการของเวีย (Brenner et al, 2001)

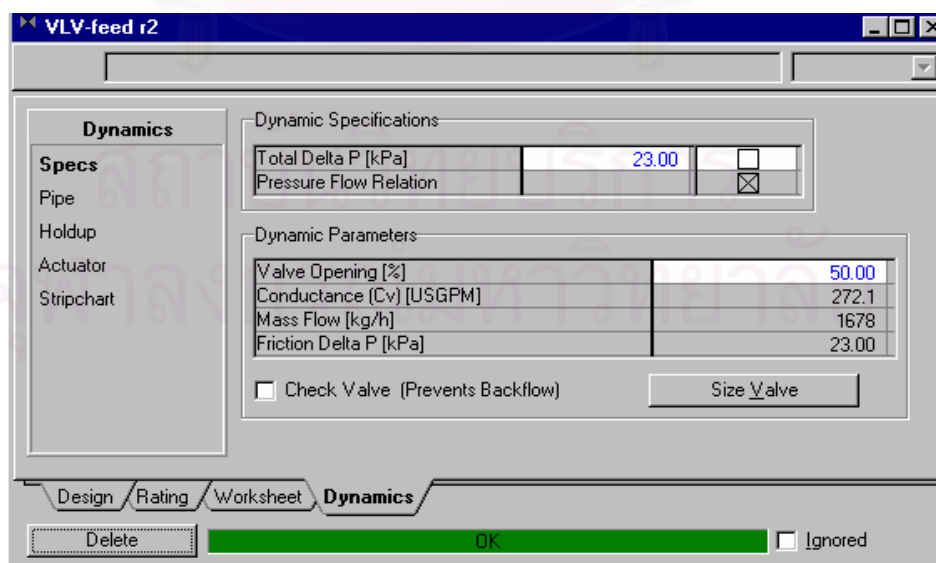


รูปที่ 3.4 การกำหนดสัมประสิทธิ์การไหลของไอภายในหอกถัน

- 3) เลือกแบบจำลองไดนามิกส์เรตติ้ง-เบสิก (Dynamic Rating-Basic) สำหรับการคำนวณเชิงพลวัตของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การไหลสำหรับคำนวณอัตราการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเลือกคำสั่ง 'Calculate K' ดังรูปที่ 3.5
- 4) กำหนดความดันลดคร่อมวาล์วดังรูปที่ 3.6 ยกเว้นวาล์วควบคุมกำหนดให้มีความดันลดสูงกว่าวาล์วปกติ หลังจากกำหนดความดันลดแต่ละวาล์วแล้วควรให้กระแสที่ป้อนกลับเข้าหอกลับมีความดันเท่ากับ 105.4 กิโลพาสคัลซึ่งเป็นความดันของชั้นที่ป้อนเข้า กำหนดขนาดวาล์วโดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การไหลจากคำสั่ง 'Size Valve' ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การกำหนดสัมประสิทธิ์การไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3.6 การกำหนดสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว

### ข้อสังเกต

โปรแกรมไฮซิสมีเครื่องมือช่วยสำหรับการกำหนดขนาดอุปกรณ์และความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหลเรียกว่าไดนามิกส์แอสซิสแทนท์ (Dynamic Assistant)

#### 1. ไดนามิกส์แอสซิสแทนท์กำหนดขนาดของอุปกรณ์โดยใช้เวลาที่สารอยู่ในอุปกรณ์

(Residence Time) และอัตราการไหลโดยปริมาตร (Actual Volume Flow) ของกระแสเข้าสู่อุปกรณ์ ดังนี้

ตารางที่ 3.3 การกำหนดขนาดของอุปกรณ์โดยใช้ไดนามิกส์แอสซิสแทนท์

อุปกรณ์	อัตราการไหล ( $m^3/h$ )	Residence Time		ปริมาตร ( $m^3$ )
		นาที	วินาที	
เครื่องควบแน่น	4446.00	5.00	-	370.50
หม้อต้มซ้ำ	8.18	8.00	55.38	1.26
เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	1092.00	33.00	57.12	1076.00
เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	1373.00	5.00	-	114.40

จากการจำลองกระบวนการพบว่าขนาดเครื่องควบแน่นที่กำหนดให้ไม่สามารถจำลองสถานการณ์เชิงพลวัตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงกำหนดขนาดใหม่โดยใช้เวลาที่สารอยู่ในอุปกรณ์และอัตราการไหลดังข้อ 3.5.2.1 ตามคำแนะนำจากคู่มือการใช้โปรแกรมไฮซิส

2. เส้นผ่านศูนย์กลางของหอกันที่กำหนดโดยเครื่องมือกำหนดขนาดชั้น ระหว่างการจำลองสถานการณ์ โปรแกรมจะเตือนว่าเกิด 'High Dry Hole Pressure Drop' และไดนามิกส์แอสซิสแทนท์แนะนำให้ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3.27 เมตรซึ่งพบว่าสามารถจำลองสถานการณ์ได้โดยไม่เกิดปัญหา การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหลของไอภายในหอกันมีลักษณะเช่นเดียวกับวาล์วคือ การกำหนดสัมประสิทธิ์การไหลเพื่อคำนวณอัตราการไหลดังสมการ

$$F_{vap} = K\sqrt{DP_{friction}} \quad (3.1)$$

โดย  $K$  = สัมประสิทธิ์การไหลซึ่งเป็นค่าคงที่และเป็นส่วนกลับกับความต้านทานการไหล

$DP_{friction}$  = ความดันลดดรายโฮล (Dry hole pressure drop)

$F_{vap}$  = อัตราการไหลของไอที่ออกจากชั้น N

ความดันลดในแต่ละชั้นของหอกันเป็นผลรวมของ Static Head และ Frictional Losses โดย Frictional Losses ในแต่ละชั้นคำนวณได้จากสมการ 3.1 ความดันลดดรายโฮลสูงอาจเกิดจากระยะการไหลของไอสูงกว่าภาวะคงตัวมากส่งผลให้ความดันลดมากหรือสัมประสิทธิ์การไหลมีค่าต่ำ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การไหลมีค่าขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหอกัน

ไดนามิกส์แอสซิงโครนัสจึงแนะนำให้แก้ปัญหาโดยการใส่เส้นผ่านศูนย์กลางของหอกสั้นมากขึ้น ในกรณีที่ไม่ต้องการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอาจทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การไหลโดยตรงดังรูป 3.4

3. จากการจำลองกระบวนการทำให้ทราบว่า ไม่จำเป็นต้องทำตามคำแนะนำของไดนามิกส์แอสซิงโครนัสทุกอย่าง เพียงแต่ตรวจสอบของความเป็นอิสระว่ามีค่าเท่ากับศูนย์โดยใช้เครื่องมือสรุปสมการ (Equation Summary View) ก่อนทำการจำลองสถานการณ์เชิงพลวัตก็เพียงพอ

### 3.6 การปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุม

เริ่มจากการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมที่ละวงแยกกันโดยใช้สมการคำนวณพารามิเตอร์เครื่องควบคุมของโคเฮน-คูน (Cohen Coon) (Stephanopoulos, 1984) ดังสมการ 3.2-3.3 ทดสอบเสถียรภาพของวงควบคุมจนได้การตอบสนองที่มีเสถียรภาพ นำพารามิเตอร์เครื่องควบคุมที่ได้มาจำลองสถานการณ์พร้อมกันทั้งกระบวนการ ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมอีกครั้งจนได้การตอบสนองที่มีเสถียรภาพกระบวนการ  
สมการเครื่องควบคุมชนิดพีไอ

$$Kc = \frac{1}{K} \frac{\tau}{t_d} (0.9 + \frac{t_d}{12\tau}) \quad (3.2)$$

$$\tau_i = t_d \left( \frac{30 + 3t_d/\tau}{9 + 20t_d/\tau} \right) \quad (3.3)$$

- 3.6.1 ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำ (โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1)
  - 1) จำลองสถานการณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูง
  - 2) กำหนดให้วงควบคุมอัตราการใช้ไอน้ำทำงานในโหมดอัตโนมัติ ใช้เครื่องควบคุมชนิดพีไอ ค่าอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุม 0.1 ค่าคงที่เวลาอินทิกรัล 0.2 จากคำแนะนำของคู่มือการใช้โปรแกรมไฮซิส (Brenner et al., 2001)
  - 3) ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำแบบวงเปิด ได้พารามิเตอร์เครื่องควบคุมดังตารางที่ 3.4
- 3.6.2 ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำ (โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2)
  - 1) จำลองสถานการณ์เครื่องอัดไอ, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูง
  - 2) กำหนดให้วงควบคุมรอง (วงควบคุมความดันของแก๊ส) และวงควบคุมหลัก (วงควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำ) ทำงานในโหมดใช้คนสั่งการ ปรับแต่งพารามิเตอร์แบบวง



เปิดของวงควบคุมรอง ได้ค่าอัตราขยายเชิงสถิติและค่าคงที่เวลาอินทิกรัลดังตารางที่ 3.4 นำค่าดังกล่าวมาใช้แล้วให้วงควบคุมรองทำงานในโหมดอัตโนมัติ ปรับแต่งพารามิเตอร์วงควบคุมหลักโดยเปลี่ยนค่าเป้าหมายของวงควบคุมรอง พิจารณาการตอบสนองของอุณหภูมิไอน้ำ ได้พารามิเตอร์เครื่องควบคุมดังตารางที่ 3.4

### 3.6.3 ปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมความเข้มข้นกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

- 1) จำลองสถานการณ์หอกลิ้น กำหนดให้วงควบคุมความดันของหอกลิ้น ระดับของของเหลวยอดหอและกั้นหอทำงานในโหมดอัตโนมัติ ใช้ค่าอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุมความดันเท่ากับ 2 ค่าคงที่เวลาอินทิกรัลเท่ากับ 2 ส่วนค่าอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องควบคุมระดับของเหลวยอดหอและกั้นหอมีค่าเท่ากับ 1
- 2) ปรับแต่งพารามิเตอร์วงควบคุมความเข้มข้นกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอแบบวงเปิด ได้พารามิเตอร์เครื่องควบคุมดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์เครื่องควบคุมอิสระ

วงควบคุม		$K_p$	$\tau_p$	$K_c$	$\tau_i$
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรปรับ				
อุณหภูมิของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1)	อัตราการไหลกระแส ป้อนเครื่องปฏิกรณ์ ความร้อน	0.297	0.449	12.408	0.246
อุณหภูมิของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2)	ความดันของแก๊ส ภายในกระบวนการ	0.400	0.940	9.208	0.516
ความดันของแก๊ส ภายในกระบวนการ	พลังงานของเครื่องอัดไอ	0.848	0.279	4.344	0.153
อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ	0.183	0.262	20.183	0.144
ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ	อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์กั้นหอ	0.001	247.431	2701.711	135.866

3.6.4 ทดสอบเสถียรภาพแต่ละวงควบคุมโดยเปลี่ยนค่าเป้าหมายของแต่ละวงควบคุม พบว่า พารามิเตอร์เครื่องควบคุมที่ให้การตอบสนองอย่างมีเสถียรภาพแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์เครื่องควบคุมอิสระที่มีการตอบสนองอย่างมีเสถียรภาพ

วงควบคุม	$K_c$	$\tau_I$
อุณหภูมิของไอน้ำ (โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1)	12.408	0.246
อุณหภูมิของไอน้ำ (โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2)	4.602	0.516
ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ	4.344	0.153
อุณหภูมิสารป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	10.092	0.144
ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ	21.107	135.866

3.6.5 จำลองสถานการณ์วงควบคุมทั้งหมดพร้อมกันโดยใช้พารามิเตอร์เครื่องควบคุมดังตารางที่ 3.5 ทดสอบเสถียรภาพของกระบวนการโดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายวงควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำ ปรับแต่งพารามิเตอร์วงควบคุมจนได้ตอบสนองอย่างมีเสถียรภาพแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สรุปพารามิเตอร์เครื่องควบคุมของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และ 2

วงควบคุม	โครงสร้างการควบคุมที่ 1		โครงสร้างการควบคุมที่ 2	
	$K_c$	$\tau_I$	$K_c$	$\tau_I$
อุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง	3.102	0.984	2.301	2.064
ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ	4.774	0.139	4.344	0.153
อุณหภูมิสารป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	2.523	0.576	2.523	0.576
ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ	2.638	16.983	2.638	16.983
ความดันของหอกลิ้น	2.000	2.000	2.000	2.000
ระดับของของเหลวยอดหอ	1.000	-	1.000	-
ระดับของของเหลวก้นหอ	1.000	-	1.000	-
อัตราการไหลของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง	0.100	0.200	0.100	0.200

## บทที่ 4

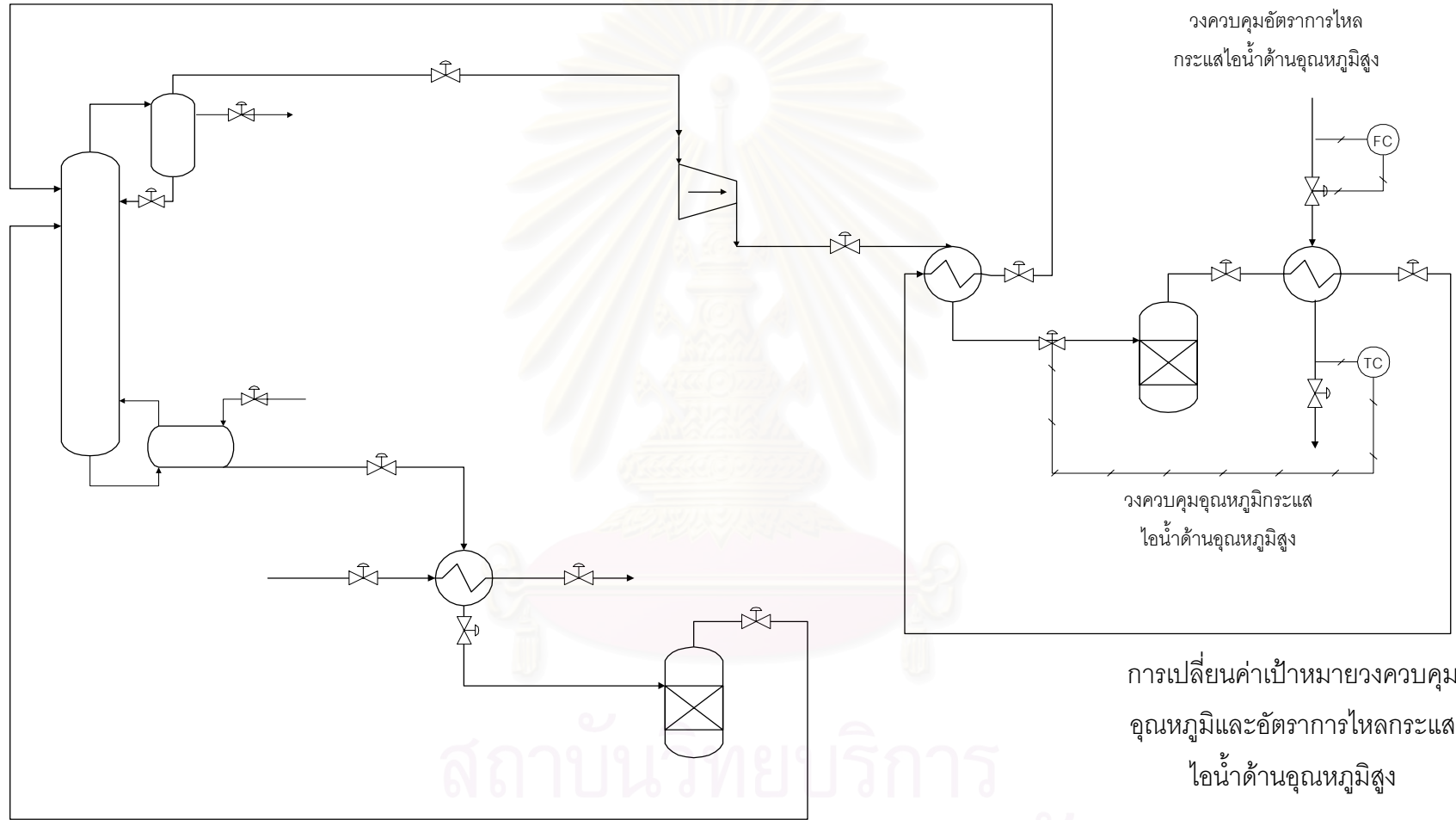
### ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกเช่น การเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิต การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมรอบกระบวนการ ความแปรปรวนจากสมบัติของวัตถุดิบ ส่งผลให้กระบวนการไม่อาจดำเนินไปภายใต้ภาวะที่ได้รับการออกแบบไว้ตลอดเวลา ความเบี่ยงเบนของภาวะการดำเนินการส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งอาจส่งผลต่อความปลอดภัยของการดำเนินการกระบวนการ ด้วยเหตุนี้การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของกระบวนการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยภายนอกจึงมีความสำคัญ เพื่อให้เกิดความเข้าใจต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการและจัดการกับการเปลี่ยนแปลงนั้นได้อย่างรวดเร็ว โดยอาศัยการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมในการกำจัดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอก เพื่อยังคงรักษาภาวะการดำเนินการของกระบวนการให้เป็นไปตามเป้าหมายและสามารถดำเนินการกระบวนการได้อย่างปลอดภัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/ อะซิโตน/ ไฮโดรเจน และทดสอบสมรรถนะของโครงสร้างการควบคุม 2 โครงสร้างที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนที่ปั๊มความร้อนถ่ายเทให้กับไอน้ำอุณหภูมิสูง การทดสอบโครงสร้างการควบคุมทำโดยเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงแบบขั้นบันไดประมาณร้อยละ 50 ของการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ทั้งสองโครงสร้างยังสามารถรักษาภาวะการดำเนินการของกระบวนการได้อย่างมีเสถียรภาพแล้วสังเกตการตอบสนองของกระบวนการ ดังรูปที่ 4.1 โดยลักษณะของโครงสร้างการควบคุมที่ดีต้องสามารถปรับกระบวนการเข้าสู่ภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการรบกวนจากปัจจัยภายนอก และสามารถปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตหรือทันทวนต่อการรบกวนจากปัจจัยภายนอกได้ในช่วงกว้างโดยที่ระบบควบคุมยังสามารถรักษาเสถียรภาพของกระบวนการได้

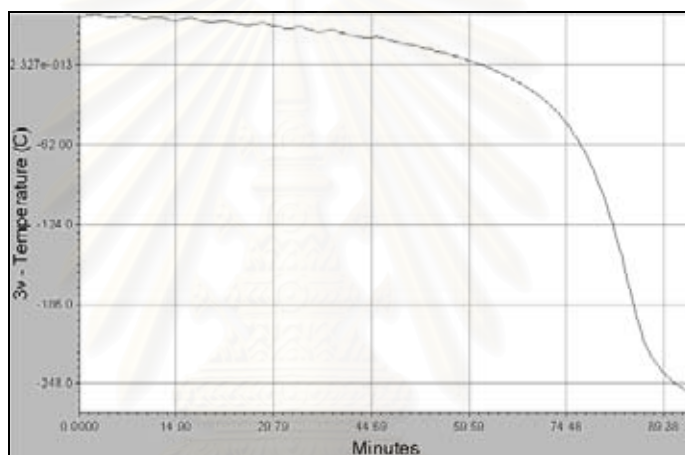
#### 4.1 พฤติกรรมเชิงพลวัตของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน

ปั๊มความร้อนจะถูกจำลองสถานการณ์ที่ภาวะคงตัวก่อน เพื่อนำค่าภาวะเหล่านี้มาใช้เป็นภาวะเริ่มต้นสำหรับการจำลองกระบวนการที่ภาวะพลวัต เมื่อเริ่มจำลองกระบวนการที่ภาวะพลวัตพบว่าปั๊มความร้อนไม่สามารถดำเนินการได้อย่างมีเสถียรภาพ หากปราศจากการควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการและความดันของหอกลิ้น ผลการจำลองสถานการณ์มีดังนี้

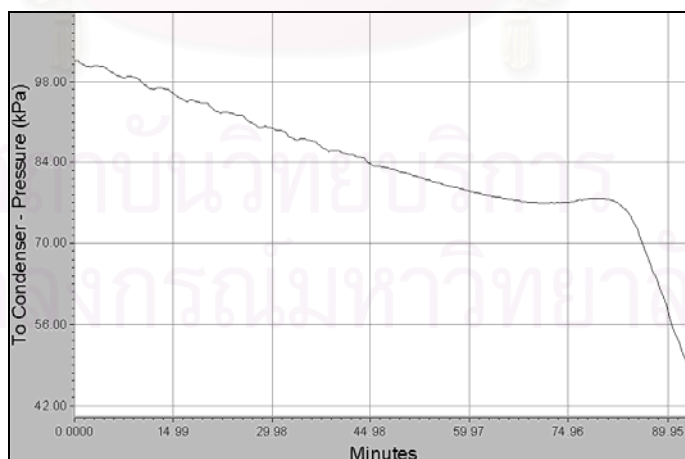


รูปที่ 4.1 ปัจจัยรบกวนบีบความร้อน

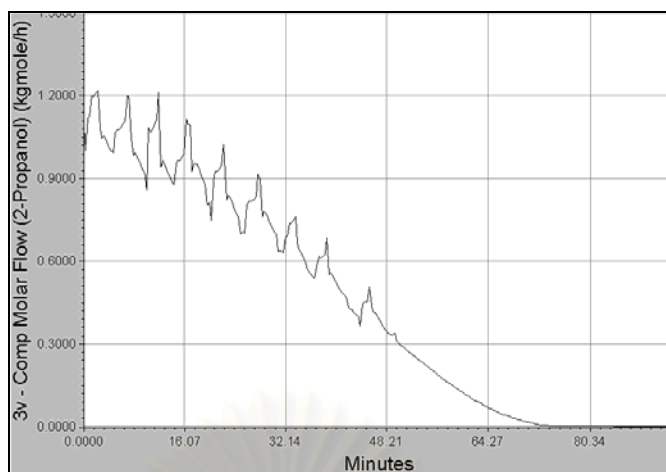
4.1.1 การจำลองสถานการณ์ปั๊มความร้อนเมื่อทุกวงควบคุมทำงานในโหมดใช้คนสั่งการ ผลการจำลองสถานการณ์กระแสผลิตภัณฑ์ยอดพบว่า อุณหภูมิและความดันของหอกกลับลดลงจากภาวะดำเนินการปกติอย่างมากดังรูป 4.2-4.3 ส่งผลให้ไม่สามารถแยกอะซิโตนจากไอโซโพรพานอลซึ่งเป็นสารหนักออกสู่กระแสผลิตภัณฑ์ยอดดังรูป 4.4-4.6 อัตราการไหลของอะซิโตนและไอโซโพรพานอลลดลงจากภาวะปกติจนเป็นศูนย์ ส่วนอัตราการไหลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามปริมาณไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าสู่หอกกลับ การที่อัตราการไหลของอะซิโตนลดลงจนเป็นศูนย์ทำให้เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนที่มีอะซิโตนและไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันไม่สามารถดำเนินการได้ โดยโปรแกรมหยุดการคำนวณที่เวลาประมาณ 94 นาที



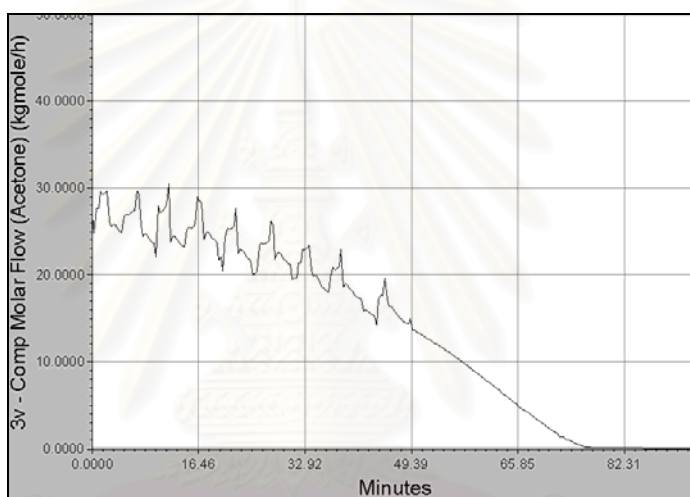
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอด



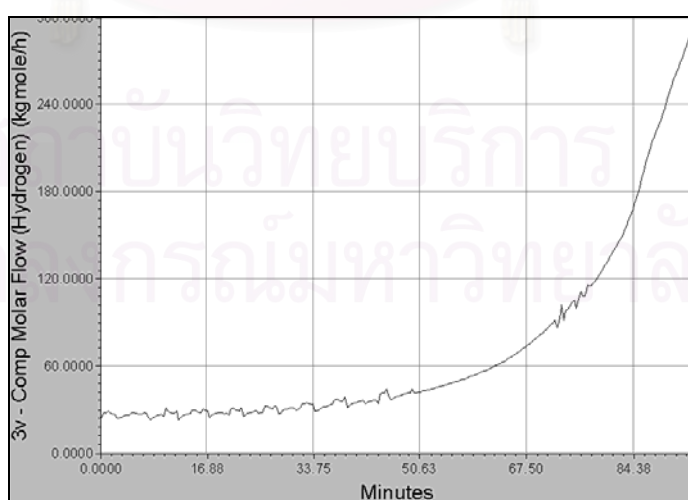
รูปที่ 4.3 ความดันของหอกกลับ



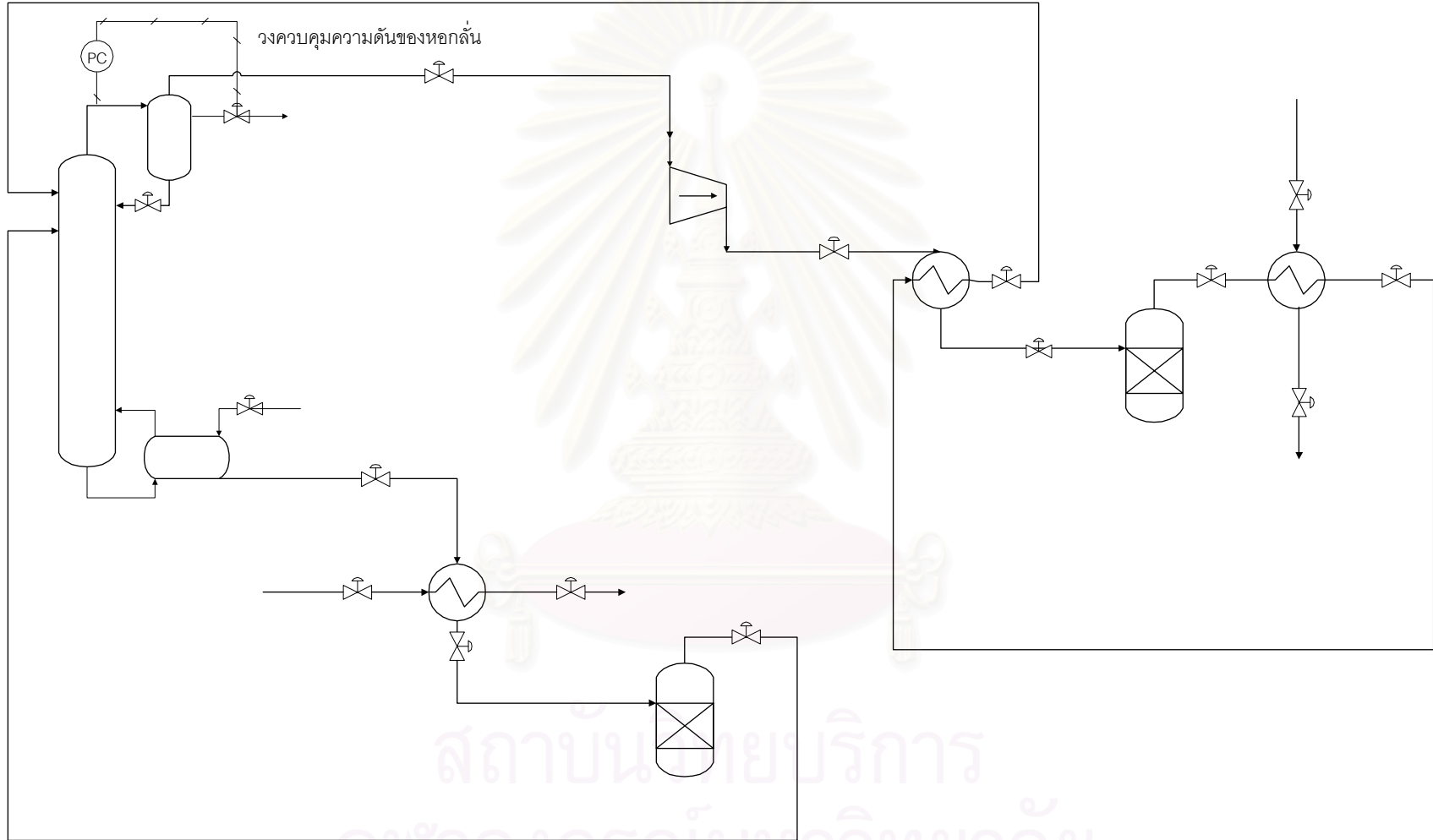
รูปที่ 4.4 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.5 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

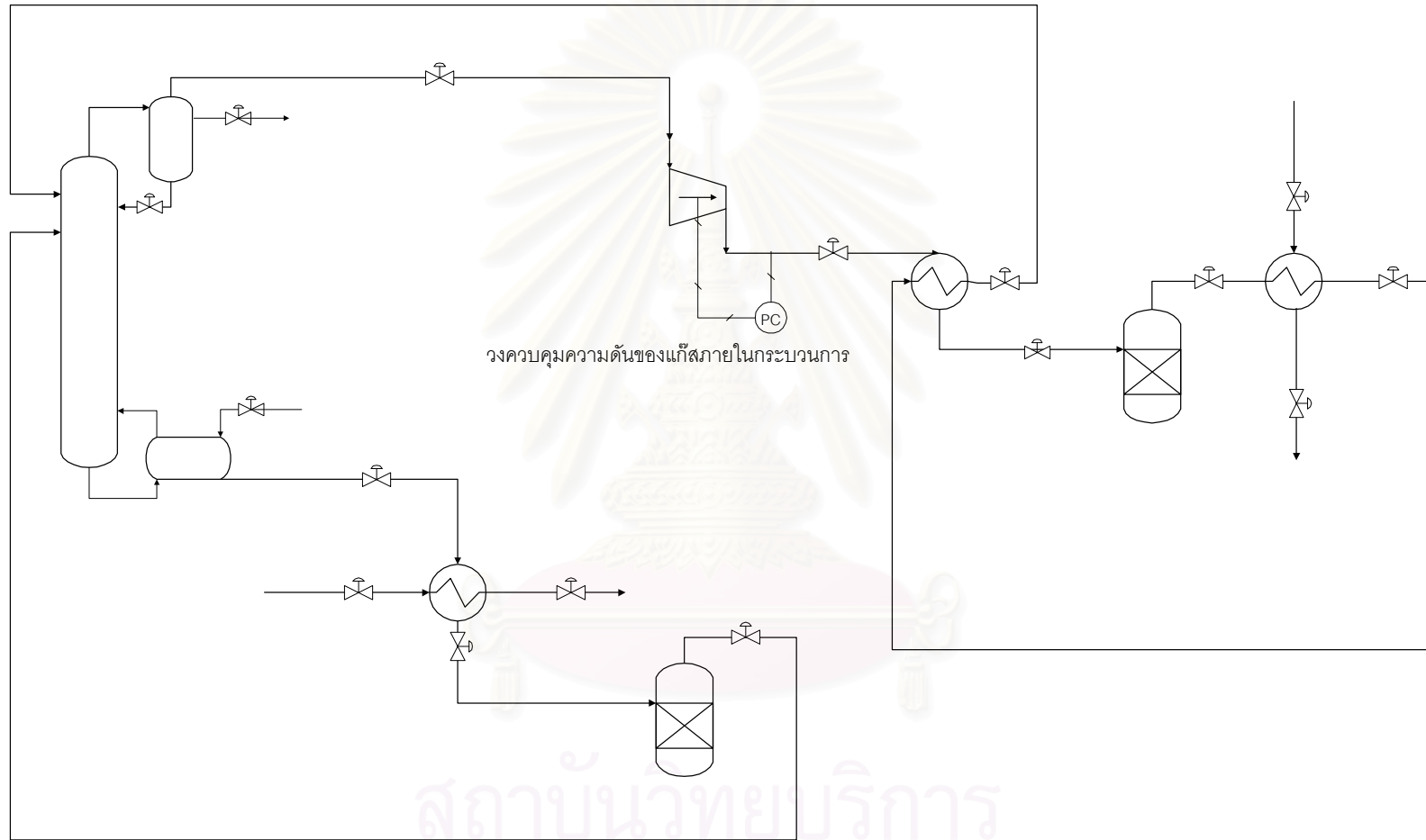


รูปที่ 4.6 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.7 การควบคุมความดันของหอกลั่น

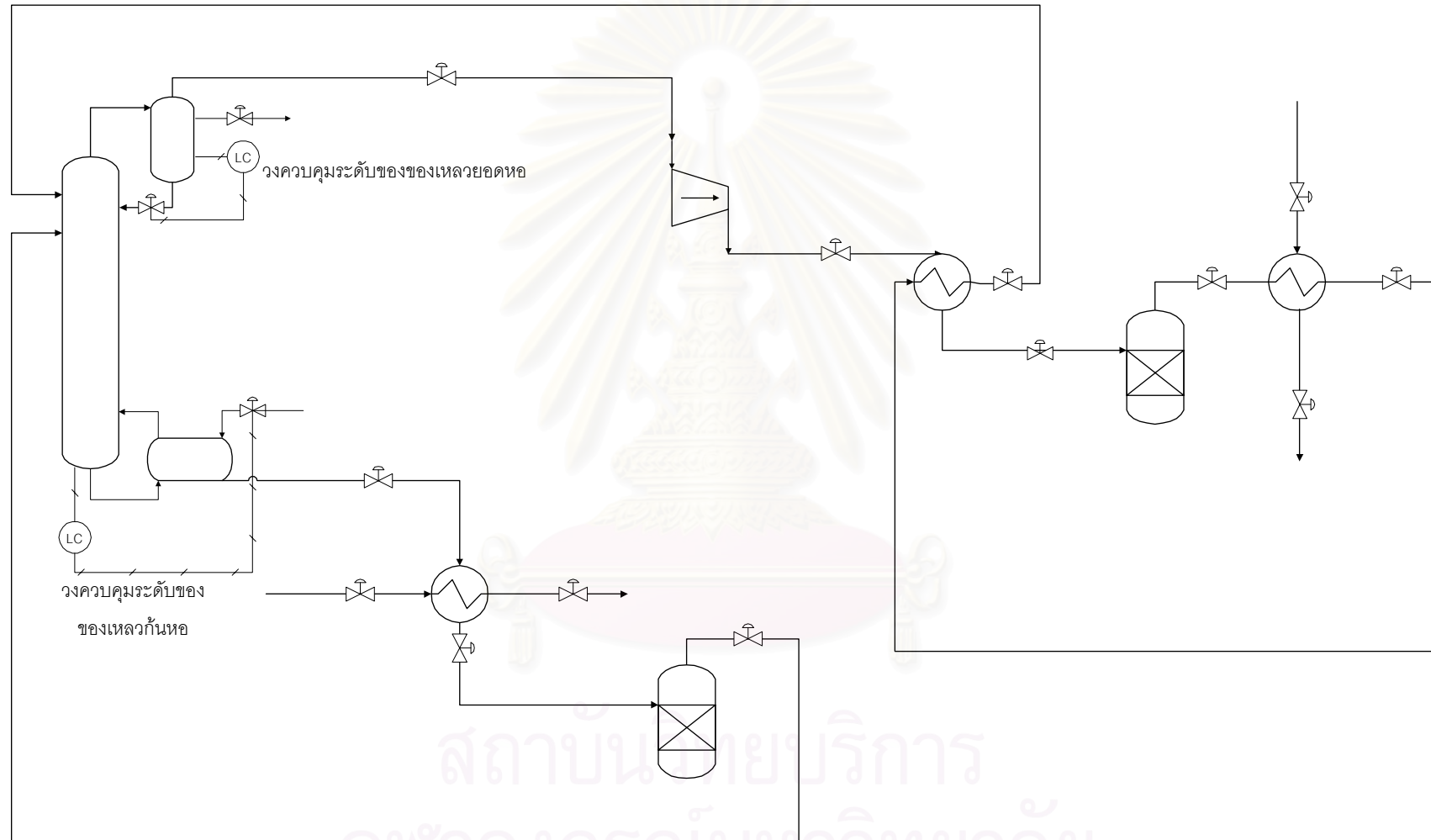
สถาบันฝ่ายบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



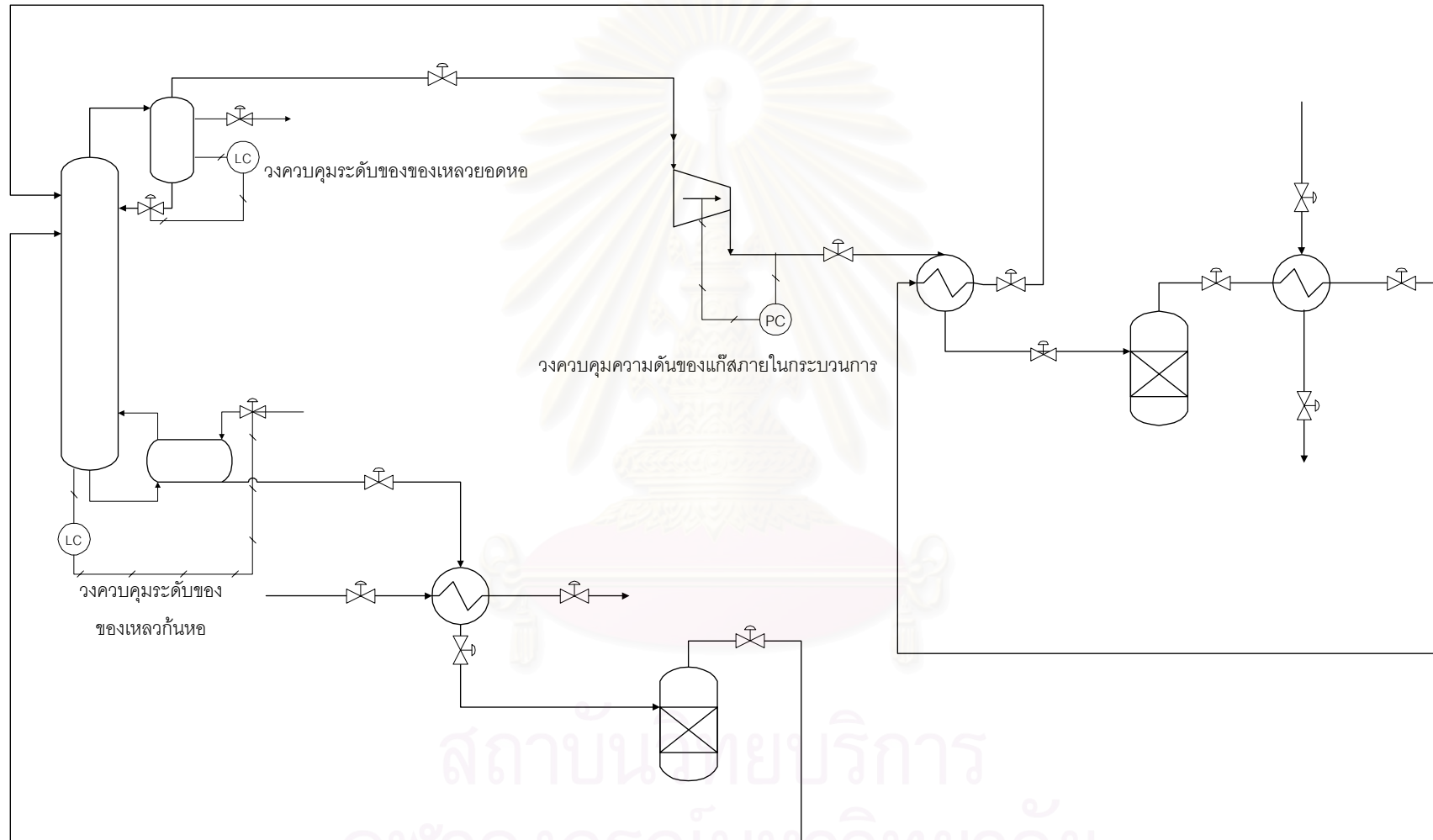
รูปที่ 4.8 การควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการ



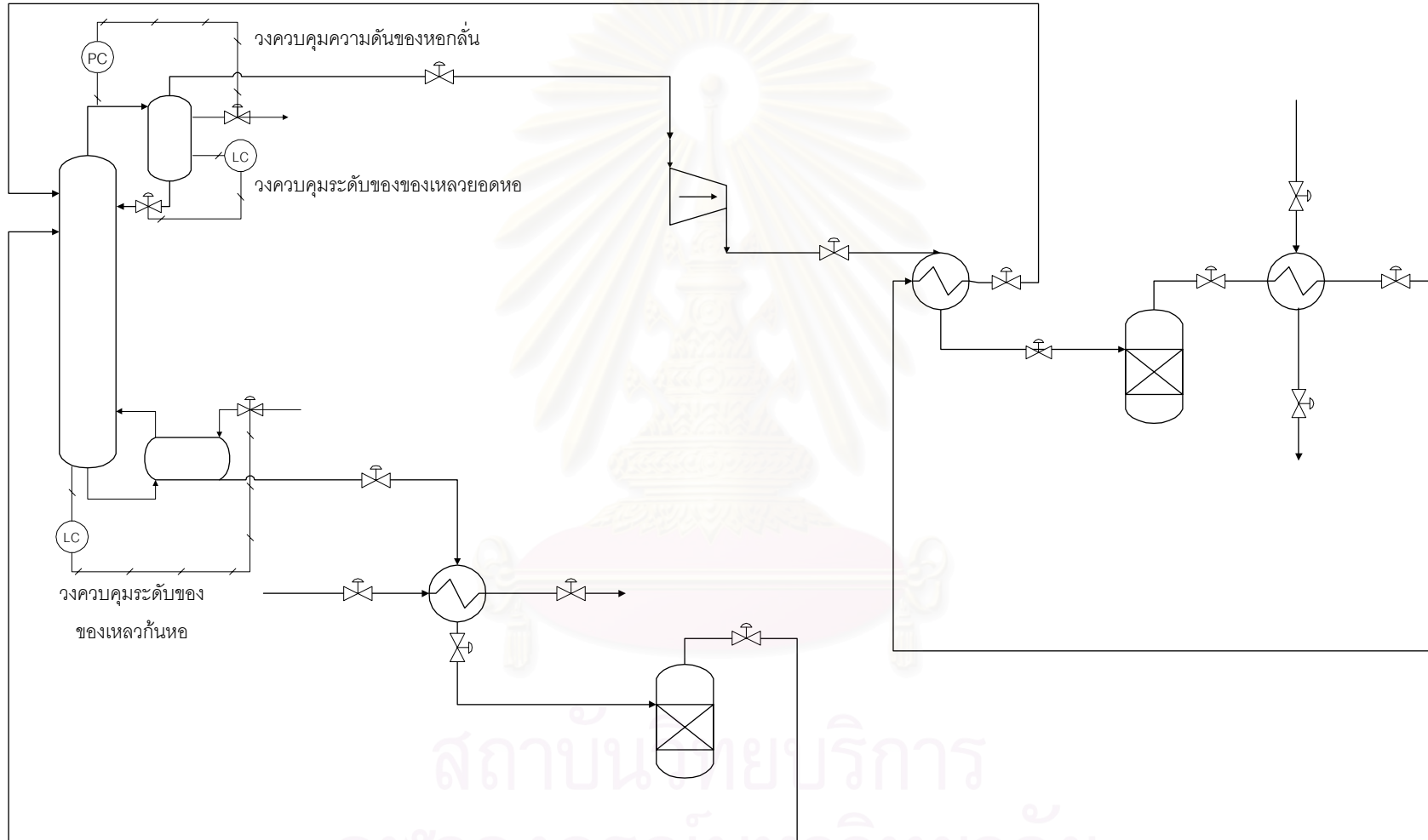




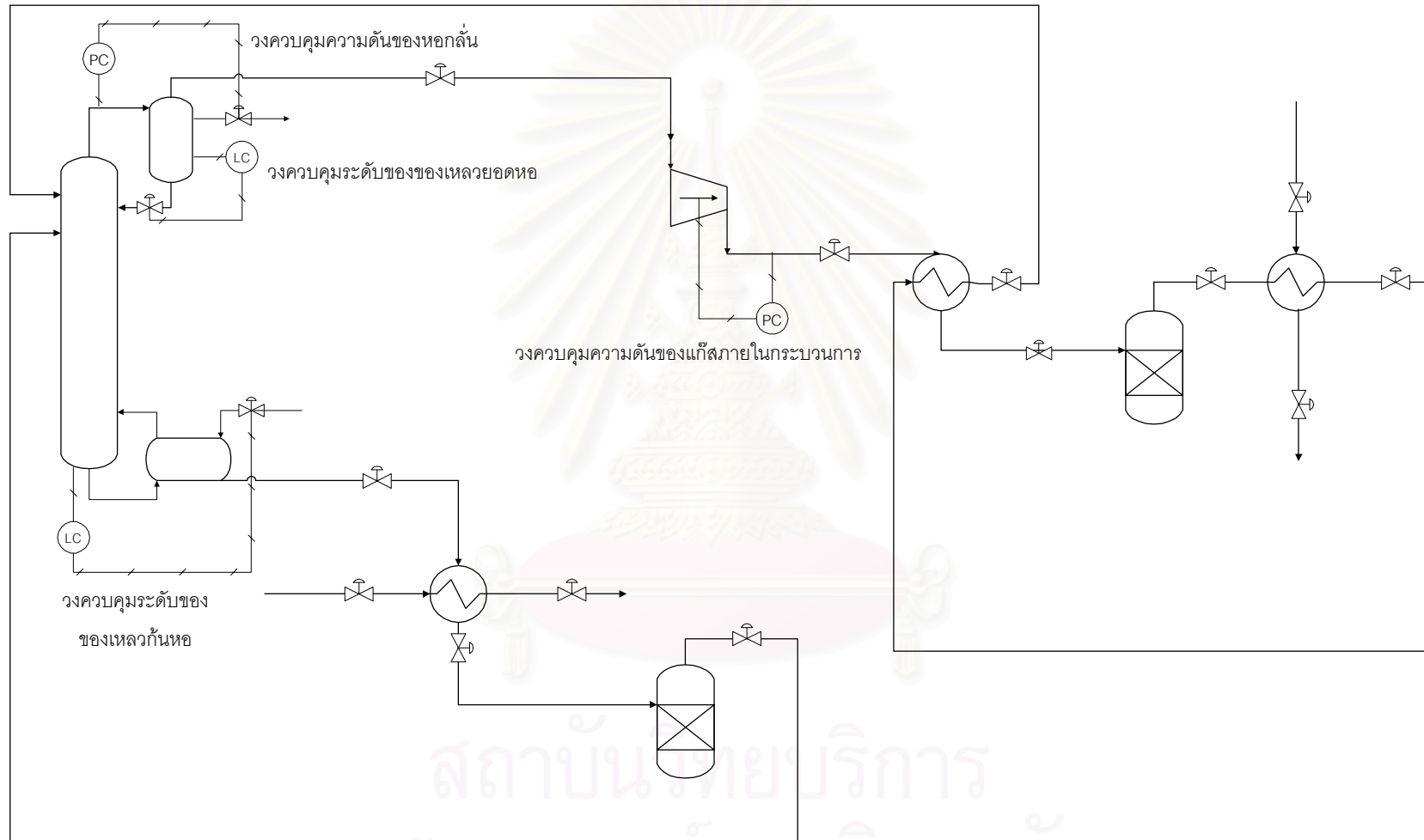
รูปที่ 4.10 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ



รูปที่ 4.11 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการ



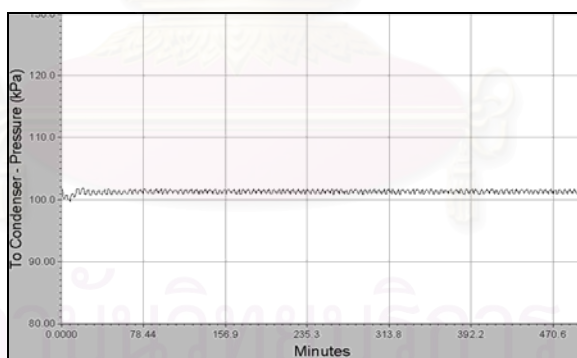
รูปที่ 4.12 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของหอกลั่น



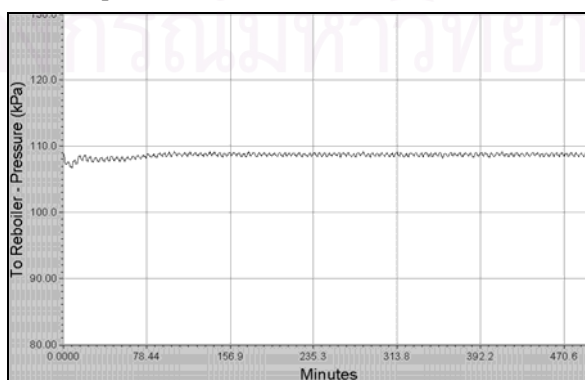
รูปที่ 4.13 การควบคุมระดับของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของหอกลั่นและความดันของแก๊สภายในกระบวนการ

4.1.2 การจำลองสถานการณ์ปั๊มความร้อนเมื่อทำการควบคุมความดันของหอกลิ้นโดยการปรับภาระความร้อนของเครื่องควบแน่น

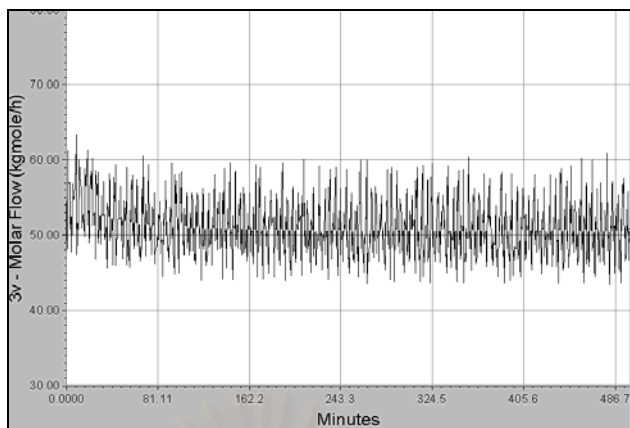
จำลองสถานการณ์ปั๊มความร้อนเป็นเวลา 500 นาที เมื่อทำการควบคุมความดันของหอกลิ้นโดยการปรับภาระความร้อนของเครื่องควบแน่นดังรูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอก พบว่ากระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอกมีอุณหภูมิและความดันที่พอเหมาะทำให้สามารถแยกอะซิโตนออกจากกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอกได้ การเปลี่ยนความดันของหอกลิ้นเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.14–4.15 โดยความดันทางยอดหอกและก้นหอกแกว่งอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ต่ำประมาณ 0.22 รอบต่อนาที ส่งผลให้อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอกเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากดังรูปที่ 4.16-4.18 อัตราการไหลแกว่งด้วยความถี่สูงประมาณ 0.38 รอบต่อนาทีอย่างต่อเนื่องด้วยแอมพลิจูดประมาณ 10 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของอะซิโตนแกว่งอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ประมาณ 0.25 รอบต่อนาทีด้วยแอมพลิจูด 10 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไฮโดรเจนแกว่งด้วยความถี่ประมาณ 0.64 รอบต่อนาที มีขนาดแอมพลิจูด 5 กิโลโมลต่อชั่วโมง เนื่องจากพลังงานจากเครื่องอัดไอที่กำหนดให้คงที่ส่งผลให้ความดันของแก๊สภายในกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลที่ไม่คงที่แล้วส่งผลกระทบต่อทั้งกระบวนการดังรูปที่ 4.19 แสดงความดันขาออกจากเครื่องอัดไอแกว่งด้วยความถี่ 0.22 รอบต่อนาที มีขนาดแอมพลิจูดประมาณ 10 กิโลพาสคัล ทำให้ปั๊มความร้อนไม่สามารถดำเนินการได้อย่างราบเรียบ



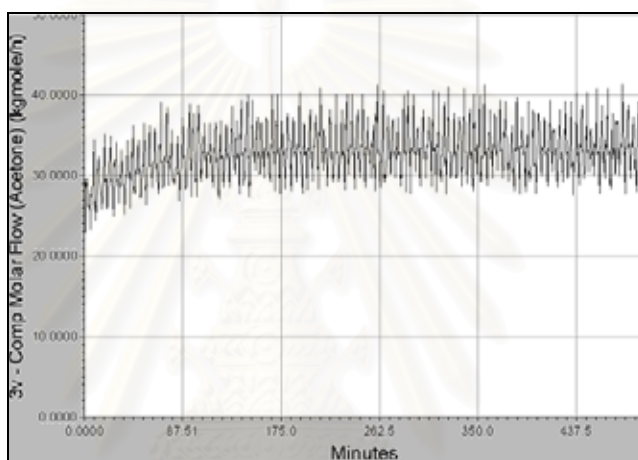
รูปที่ 4.14 ความดันของยอดหอกลิ้น



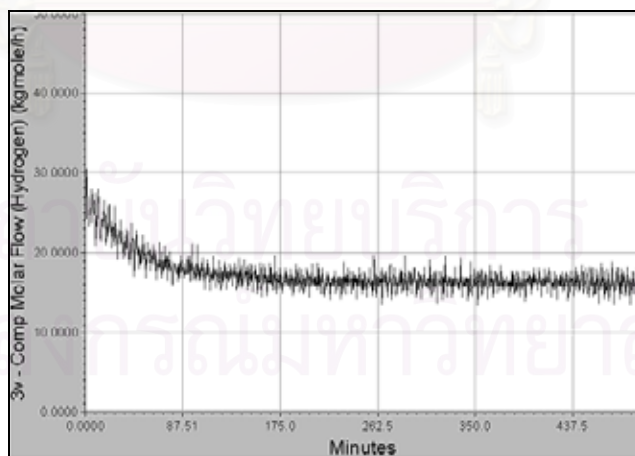
รูปที่ 4.15 ความดันของก้นหอกลิ้น



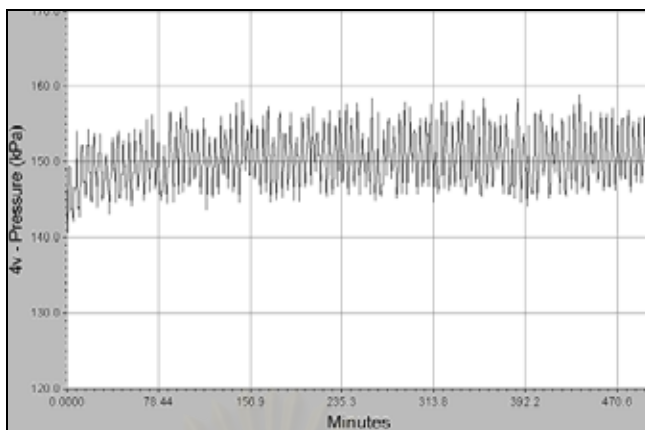
รูปที่ 4.16 อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.17 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



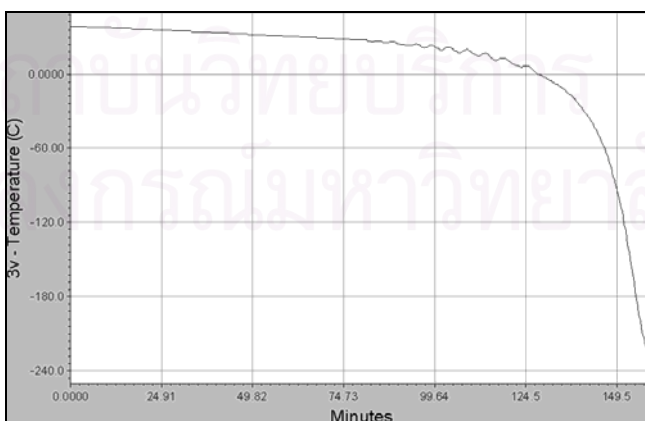
รูปที่ 4.18 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.19 ความดันของกระแสขาออกจากเครื่องอัดไอ

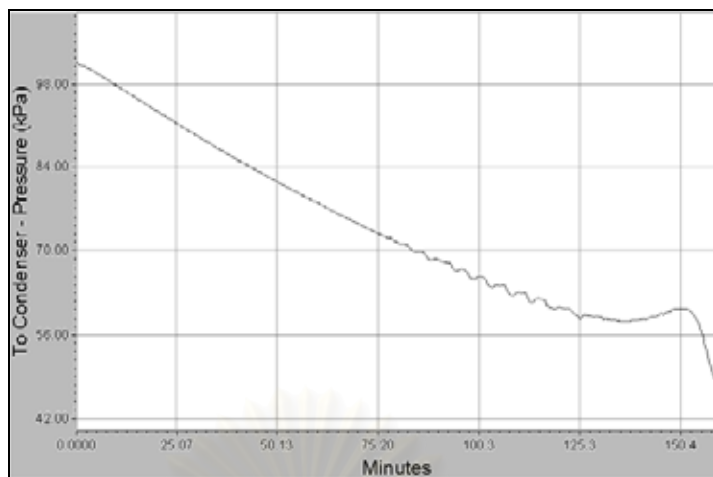
4.1.3 การจำลองสถานการณ์ที่มีความร้อนเมื่อทำการควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการ

รูปที่ 4.8 แสดงแผนภาพที่มีความร้อนเมื่อทำการควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยการปรับพลังงานของเครื่องอัดไอ ผลการจำลองสถานการณ์พบว่า การตอบสนองของกระบวนการมีลักษณะคล้ายกับหัวข้อที่ 4.1.1 คือความดันและอุณหภูมิของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดดลลดลงอย่างมากจากภาวะการดำเนินการปกติ ดังรูปที่ 4.20-4.21 ส่งผลให้ไม่สามารถแยกอะซิโตนจากไอโซโพรพานอลซึ่งเป็นสารหนักออกสู่กระแสผลิตภัณฑ์ยอดดลได้ ดังรูป 4.22 ส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนไม่มีสารตั้งต้นสำหรับการดำเนินปฏิกิริยาต่อไป โดยโปรแกรมไฮซิสหยุดการคำนวณเมื่อเวลาประมาณ 160 นาที ส่วนอัตราการไหลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่เข้าสู่หอกลับ ดังรูป 4.23 ในขณะที่ไอโซโพรพานอลออกสู่กระแสผลิตภัณฑ์ก้นหอยทั้งหมด ดังรูป 4.24 แสดงอัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดดลมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

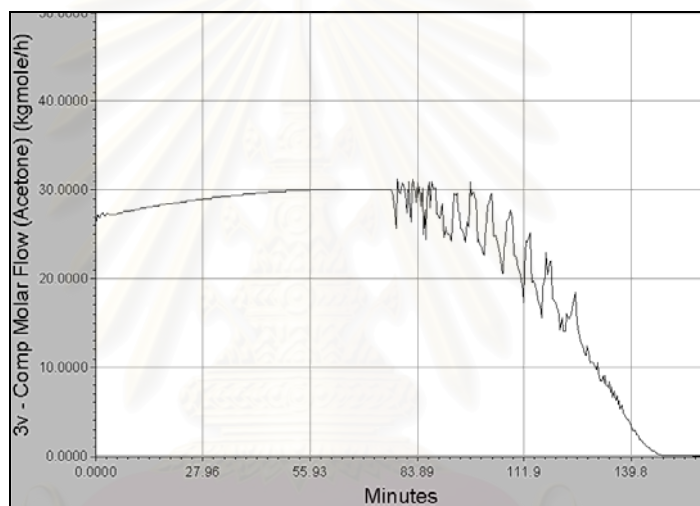


รูปที่ 4.20 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดดล

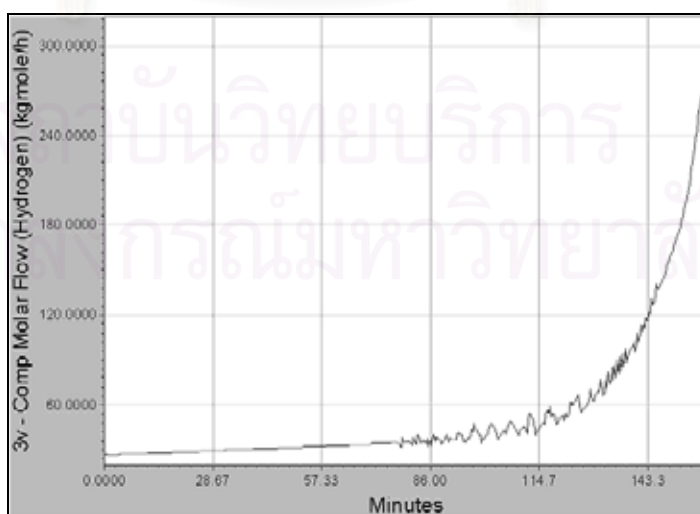




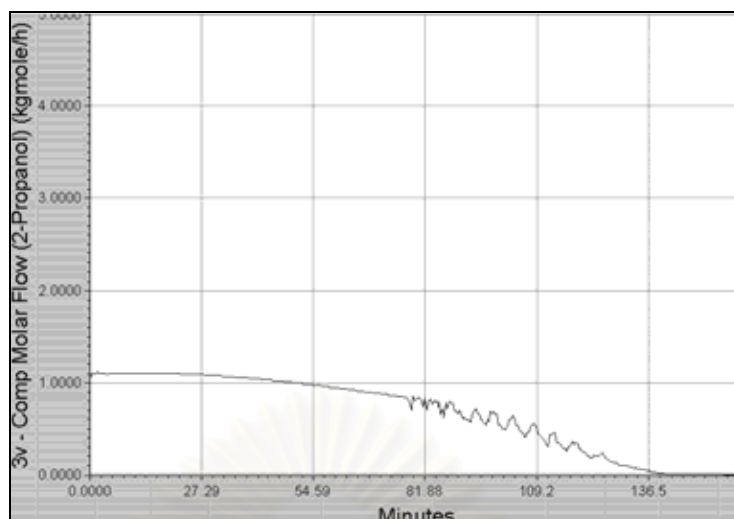
รูปที่ 4.21 ความดันของยอดหอกลั่น



รูปที่ 4.22 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



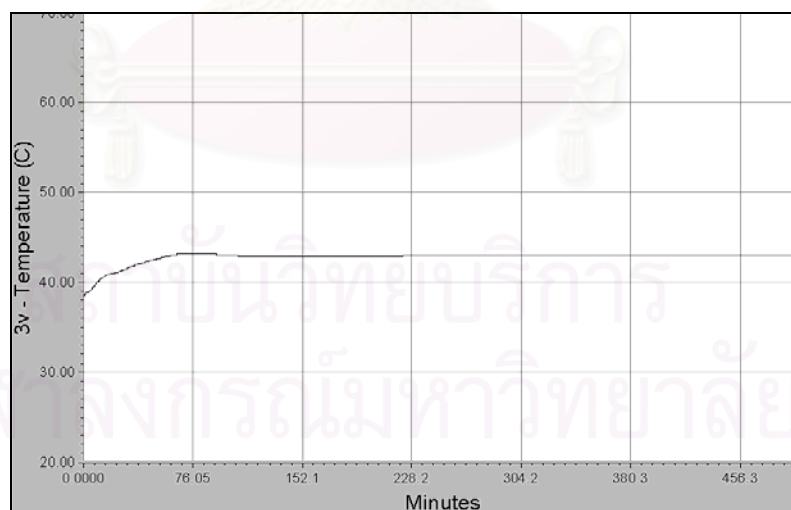
รูปที่ 4.23 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



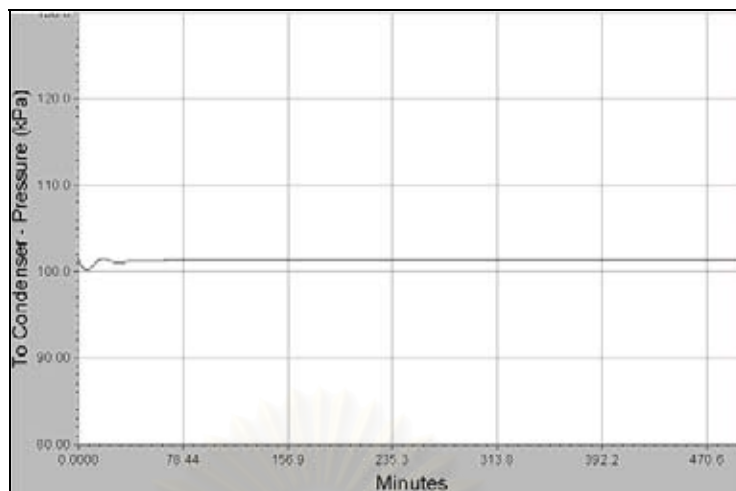
รูปที่ 4.24 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

4.1.4 การจำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนเมื่อทำการควบคุมความดันของหอกลั่นและความดันของแก๊สภายในกระบวนการ

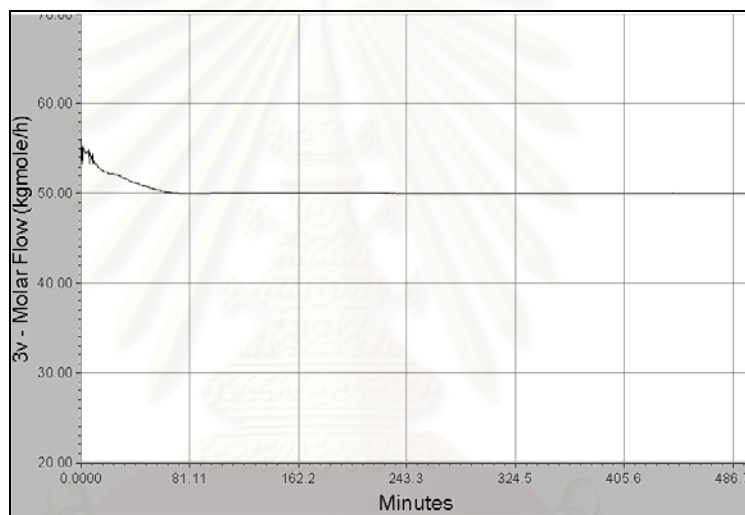
ทำการจำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนดังรูปที่ 4.9 เป็นเวลา 500 นาที โดยควบคุมความดันของหอกลั่นและแก๊สภายในกระบวนการโดยการปรับภาระความร้อนของเครื่องควบแน่นและพลังงานของเครื่องอัดไอ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.25-4.30 พบว่าป้อนความร้อนสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ



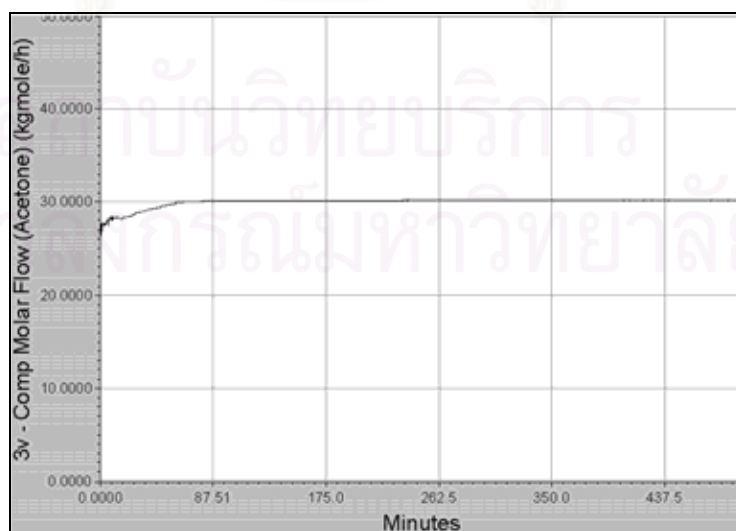
รูปที่ 4.25 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



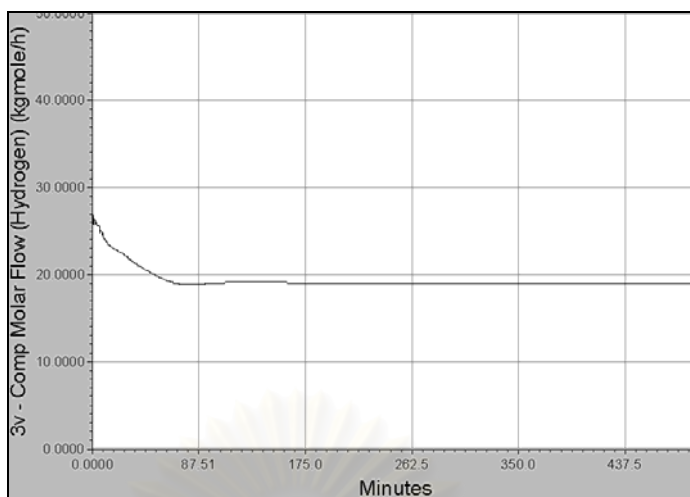
รูปที่ 4.26 ความดันของยอดหอกลั่น



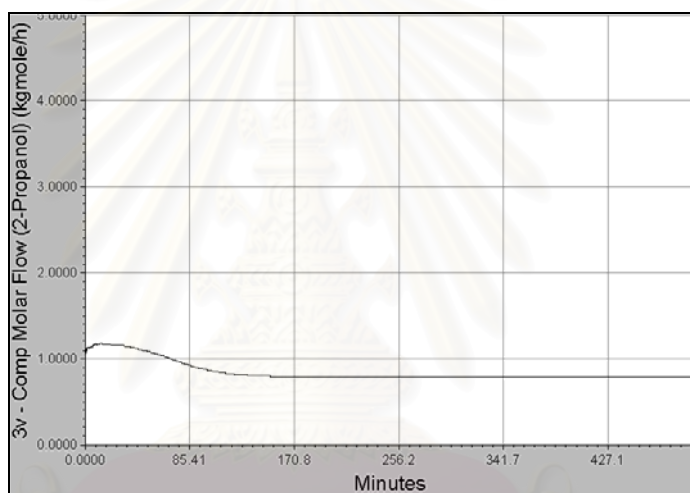
รูปที่ 4.27 อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.28 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.29 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

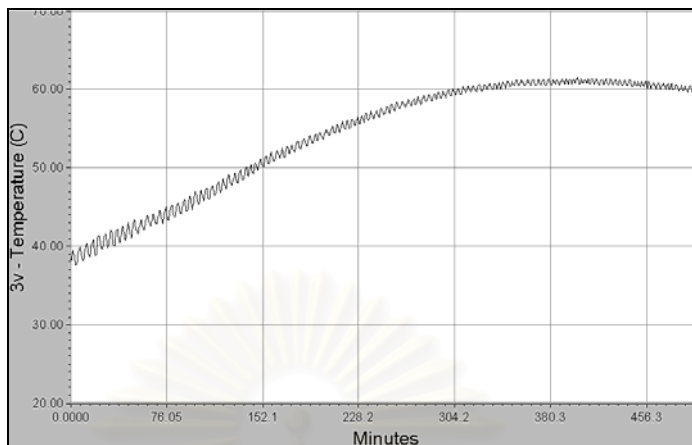


รูปที่ 4.30 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

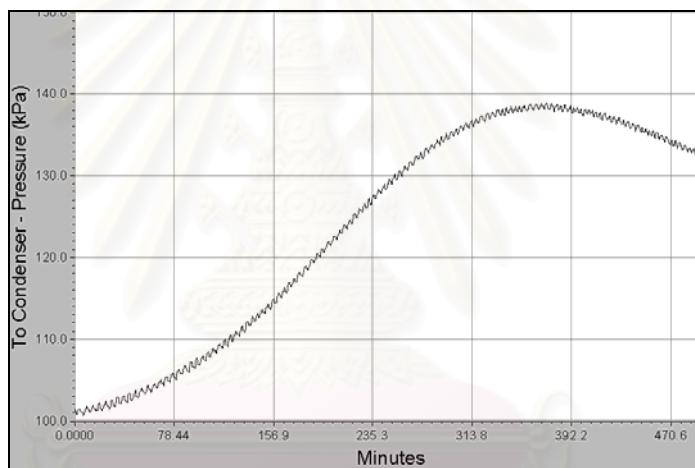
#### 4.1.5 การจำลองสถานการณ์ที่มีความร้อนเมื่อทำการควบคุมระดับของเหลวยอดหอและก้นหอ

ทำการจำลองสถานการณ์ที่มีความร้อนดังรูปที่ 4.10 ควบคุมระดับของเหลวยอดหอและก้นหอโดยการปรับอัตราการไหลกระแสฟลักซ์และภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ ผลการจำลองสถานการณ์เป็นเวลา 500 นาทีพบว่า คุณหมุมิของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอและความดันของหอกลั่นแกว่งด้วยความถี่ต่ำประมาณ 0.24 รอบต่อนาทีเพิ่มขึ้นจากภาวะดำเนินการปกติดังรูปที่ 4.31-4.32 การเปลี่ยนแปลงความดันของหอกลั่นเพียงเล็กน้อยส่งผลให้อัตราการไหลของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอแกว่งอย่างรุนแรงด้วยความถี่ประมาณ 0.29 รอบต่อนาทีตลอดเวลา โดยมีขนาดแอมพลิจูดประมาณ 10 กิโลโมลต่อชั่วโมงสำหรับอัตราการไหลของอะซิโตน ส่วนอัตราการ

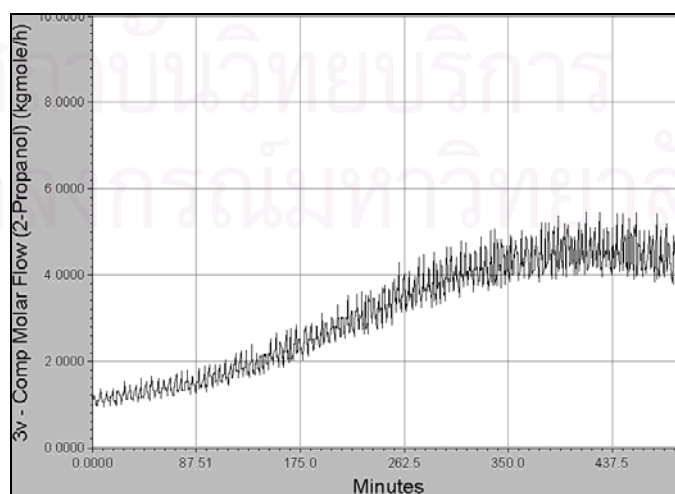
ไหลของไฮโดรเจนและไอโซโพรพานอลแกว่งด้วยแอมพลิจูดต่ำกว่าประมาณ 2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีความถี่ของการแกว่งประมาณ 0.29 และ 0.56 รอบต่อวินาทีตามลำดับดังรูป 4.33-4.35



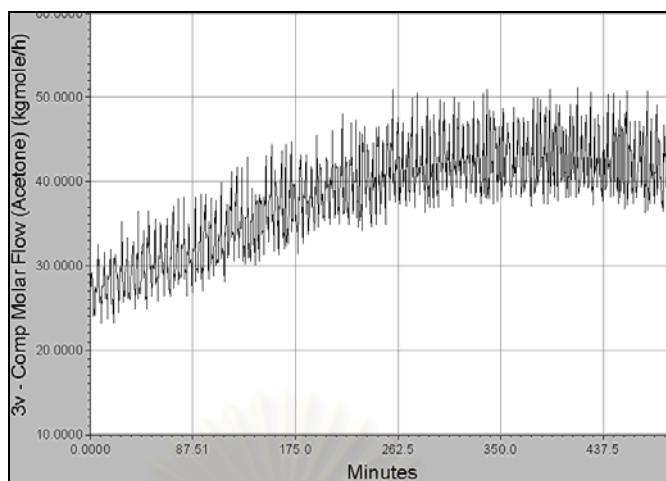
รูปที่ 4.31 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



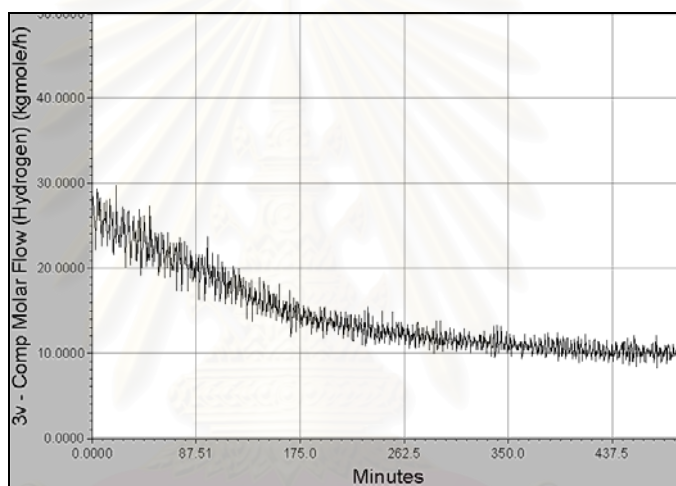
รูปที่ 4.32 ความดันของหอกลั่น



รูปที่ 4.33 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.34 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

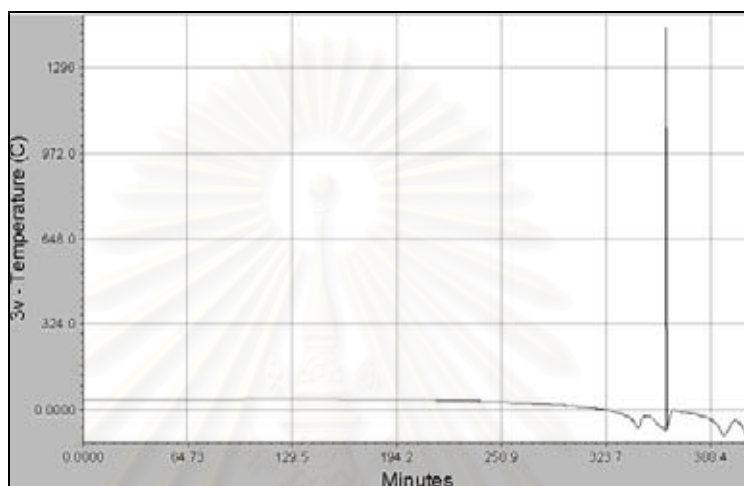


รูปที่ 4.35 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

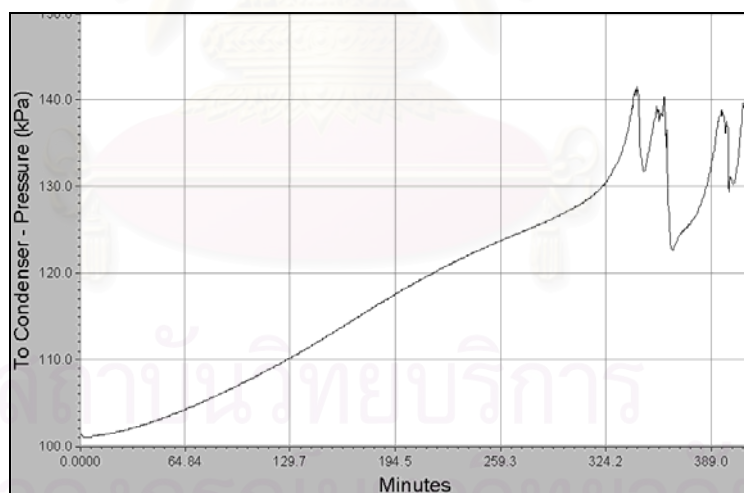
4.1.6 การจำลองสถานการณ์ที่มีความร้อนเมื่อทำการควบคุมระดับของเหลวยอดหอและก้นหอ ควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการ

ทำการจำลองสถานการณ์ที่มีความร้อนดังรูปที่ 4.11 ควบคุมระดับของเหลวยอดหอและก้นหอโดยการปรับอัตราการไหลกระแสฟลักซ์และภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น ควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยการปรับพลังงานของเครื่องอัดไอน้ำผลการจำลองสถานการณ์พบว่า อุณหภูมิของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอลดลงจากภาวะดำเนินการปกติจนมีค่าต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.36 ความดันของหอกลั่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากโดยเพิ่มขึ้นจากภาวะดำเนินการปกติดังรูปที่ 4.37 ส่งผลให้อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล อะซิโตนและไฮโดรเจนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากโดยอัตราการไหลของอะซิโตนเป็นศูนย์ในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ ส่วนไอโซโพรพานอลทั้งหมดจะไหลสู่กระแสผลิตภัณฑ์ก้นหอ ทำให้อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอมีค่าเป็นศูนย์ อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแส

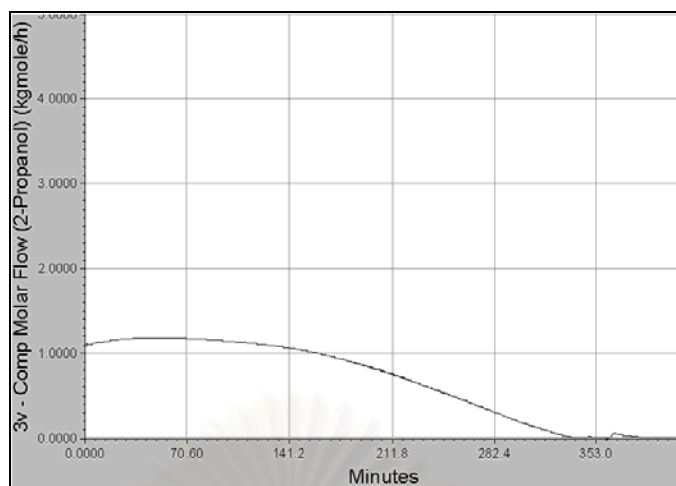
ผลิตภัณฑ์ยอดหอเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่เข้าสู่หอกลั่นดังรูป 4.38-4.40 การที่อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอลดลงจนเป็นศูนย์ส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนไม่สามารถดำเนินปฏิกิริยาต่อไป นอกจากนี้ความดันของหอกลั่นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันขาเข้าเครื่องอัดไอน้ำมีค่าสูงกว่าความดันขาออกของเครื่องอัดไอน้ำ ด้วยเหตุนี้กระบวนการจึงหยุดการตอบสนองและโปรแกรมไฮซิสหยุดการคำนวณเมื่อเวลาประมาณ 413 นาที



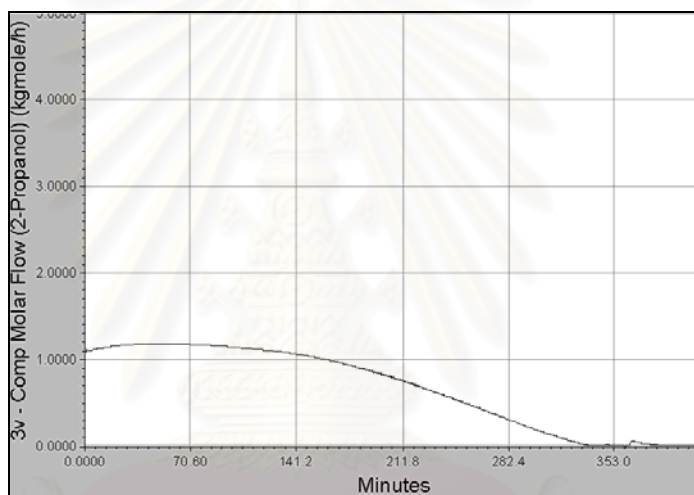
รูปที่ 4.36 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



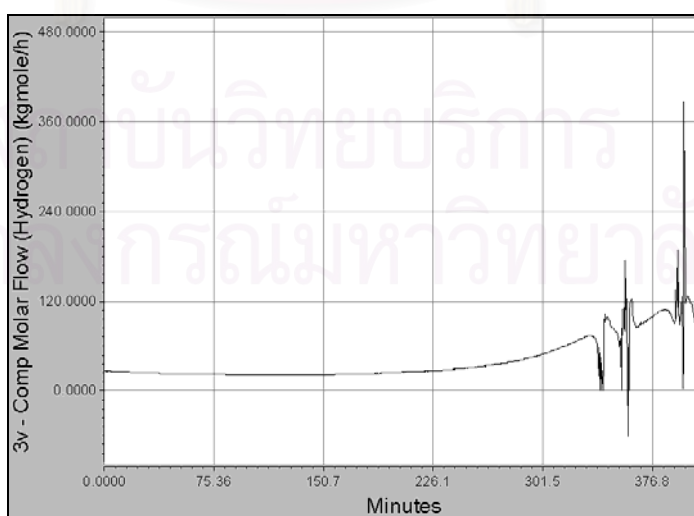
รูปที่ 4.37 ความดันของหอกลั่น



รูปที่ 4.38 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.39 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

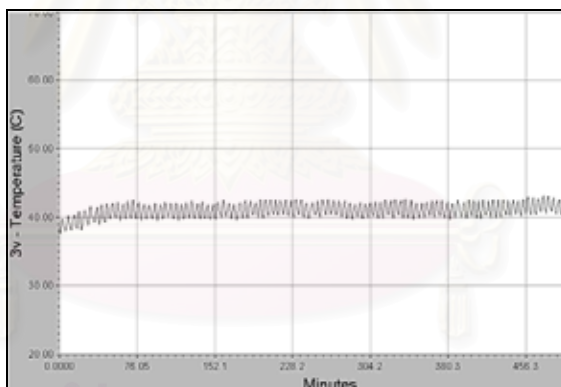


รูปที่ 4.40 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

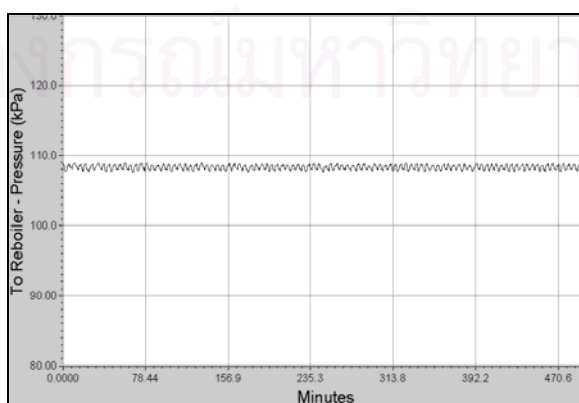


#### 4.1.7 การจำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนเมื่อทำการควบคุมระดับของเหลวอดหอและกั้นหอควบคุมความดันของหอกลั่น

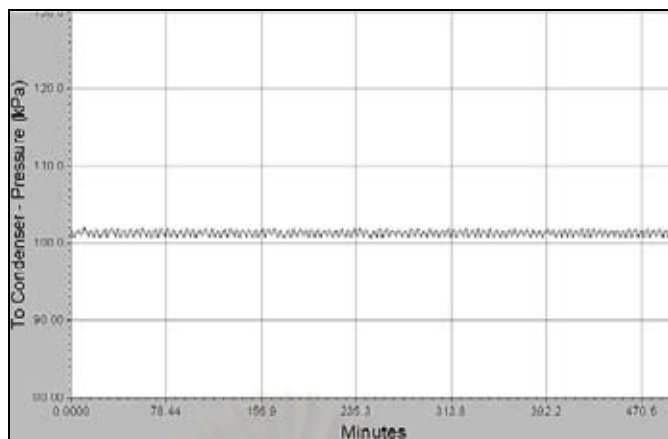
จำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนดังรูปที่ 4.12 เป็นเวลา 500 นาที ควบคุมความดันของของเหลวอดหอและกั้นหอโดยการปรับอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์และภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ ควบคุมความดันของหอกลั่นโดยการปรับภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น ผลการจำลองสถานการณ์ให้ผลคล้ายกับหัวข้อ 4.1.2 คือกระบวนการไม่อาจดำเนินไปอย่างราบเรียบ คุณหมุมิของกระแสผลิตภัณฑ์อดหอแกว่งด้วยความถี่ประมาณ 0.19 รอบต่อนาที โดยมีขนาดแอมพลิจูดประมาณ 3 องศาเซลเซียสดังรูป 4.41 การเปลี่ยนแปลงความดันด้านล่างของหอกลั่นส่งผลให้วงควบคุมความดันของหอกลั่นไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความดันของหอกลั่นจึงมีการแกว่งด้วยความถี่ประมาณ 0.19 รอบต่อนาที โดยมีขนาดแอมพลิจูดประมาณ 1 กิโลพาสคัลดังรูป 4.42-4.43 การเปลี่ยนแปลงความดันของหอกลั่นเพียงเล็กน้อยส่งผลให้อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์อดหอแกว่งด้วยความถี่ประมาณ 0.26 รอบต่อนาที มีขนาดแอมพลิจูดประมาณ 10 กิโลโมลต่อชั่วโมงเช่นเดียวกับอัตราการไหลของอะซิโตนดังรูป 4.44-4.45 ส่วนอัตราการไหลของไฮโดรเจนแกว่งด้วยความถี่ประมาณ 0.40 รอบต่อนาที แต่มีขนาดแอมพลิจูดที่ต่ำกว่าประมาณ 5 กิโลโมลต่อชั่วโมงดังรูป 4.46



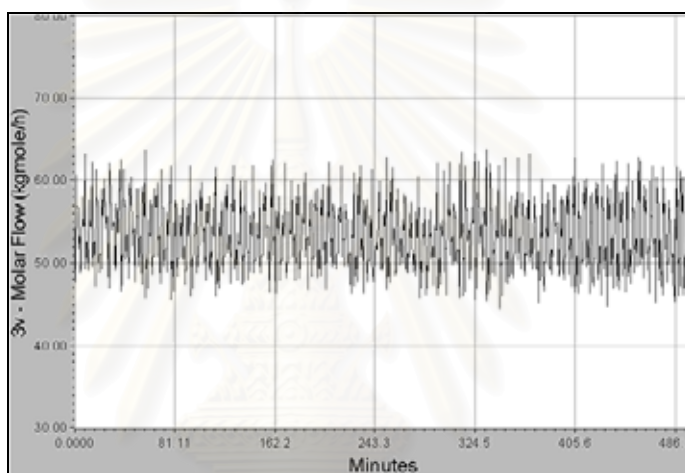
รูปที่ 4.41 คุณหมุมิกระแสผลิตภัณฑ์อดหอ



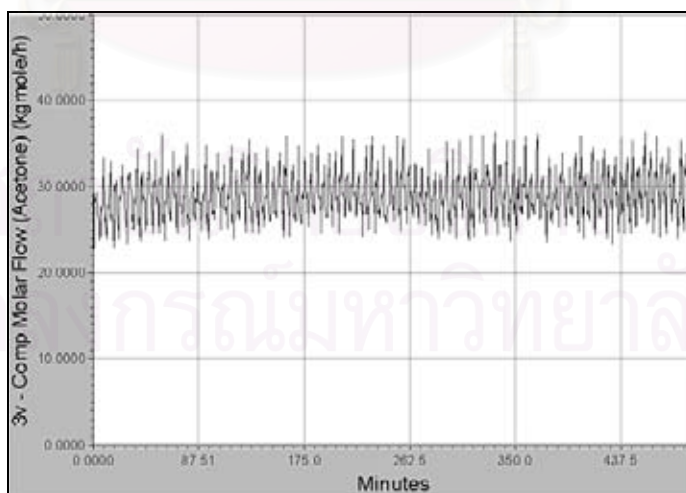
รูปที่ 4.42 ความดันกั้นหอ



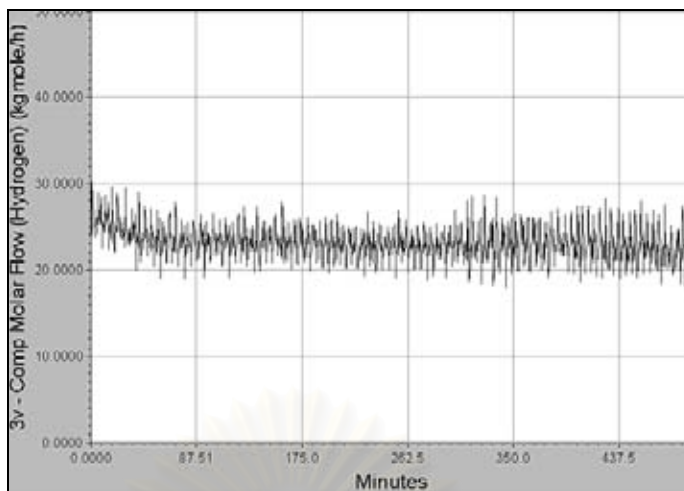
รูปที่ 4.43 ความดันยอดหอ



รูปที่ 4.44 อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.45 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



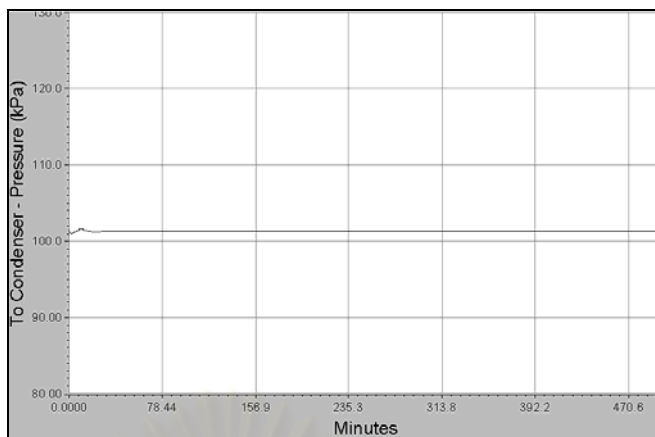
รูปที่ 4.46 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

4.1.8 การจำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนเมื่อทำการควบคุมระดับของเหลวยอดหอและก้นหอ ควบคุมความดันของหอกลั่นและแก๊สภายในกระบวนการ

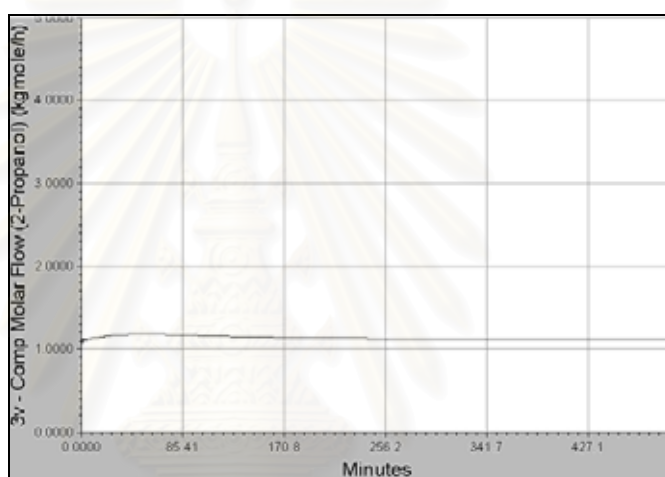
จำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนดังรูปที่ 4.13 เป็นเวลา 500 นาที ควบคุมระดับของเหลว ยอดหอและก้นหอโดยการปรับอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์และภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ ผล การจำลองสถานการณ์มีลักษณะคล้ายกับหัวข้อ 4.1.4 ดังรูปที่ 4.47-4.51 คือป้อนความร้อน สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ



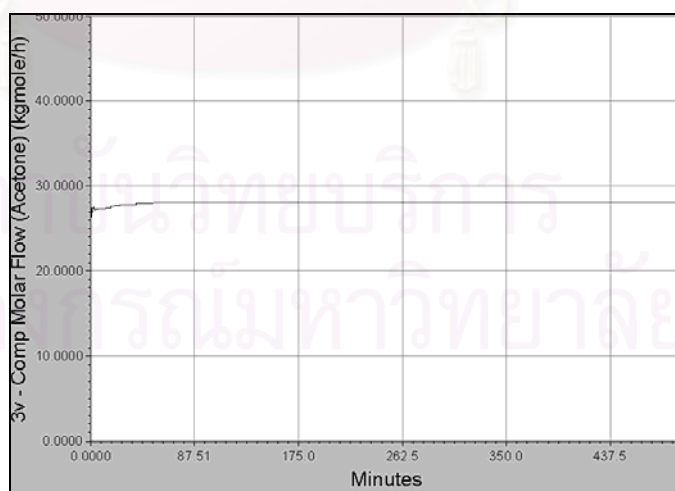
รูปที่ 4.47 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



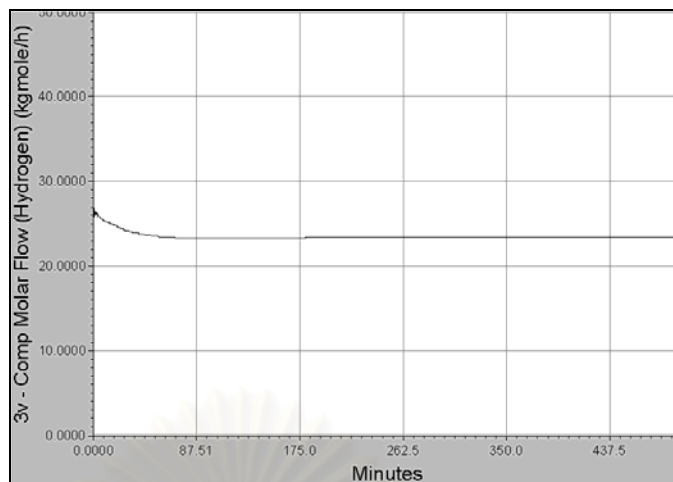
รูปที่ 4.48 ความดันของหอกลั่น



รูปที่ 4.49 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.50 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.51 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

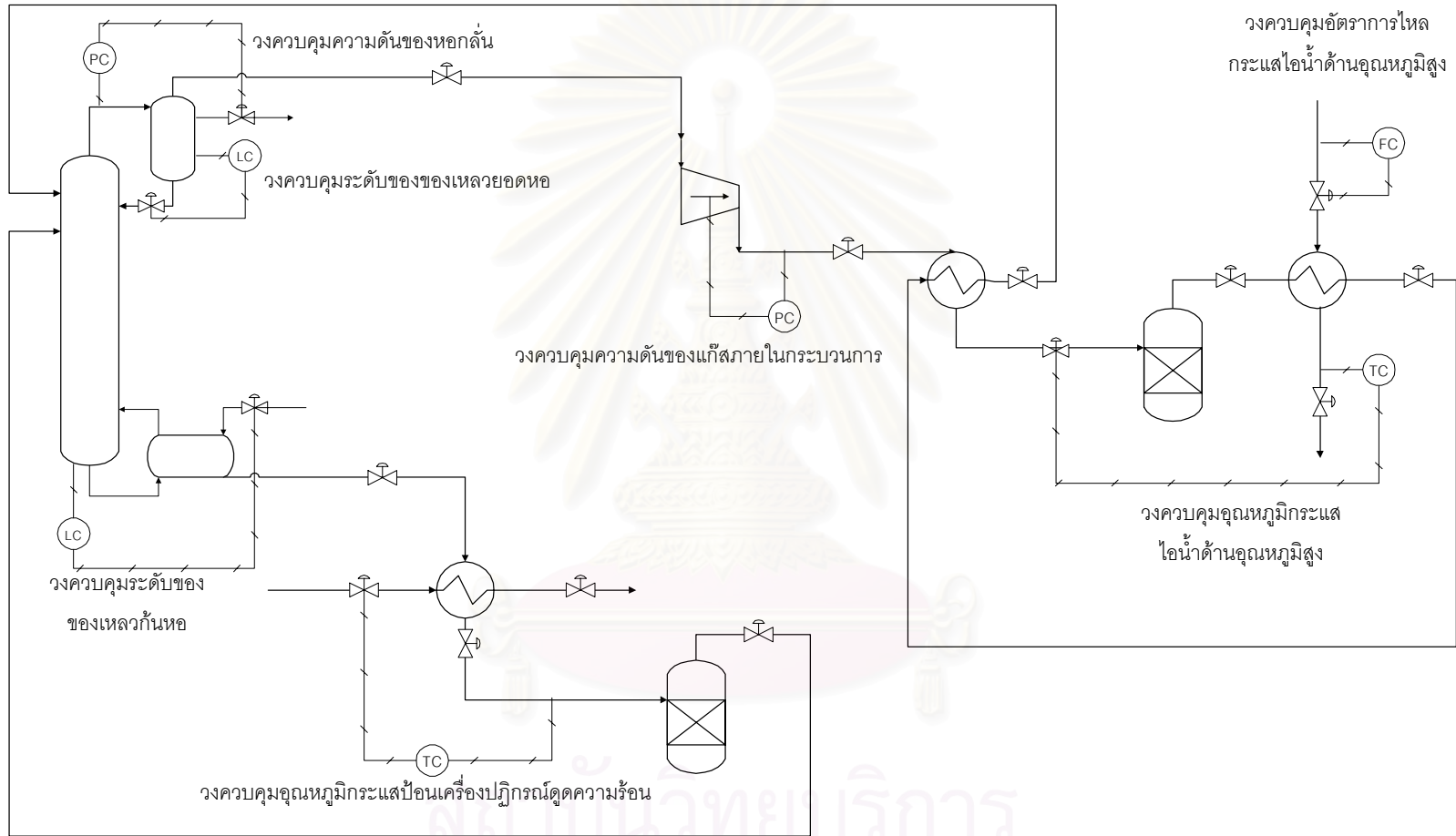
สรุปผลการจำลองสถานการณ์หัวข้อ 4.1.1-4.1.8 แสดงดังตารางที่ 4.1 พฤติกรรมเชิงพลวัตของปั๊มความร้อนมีลักษณะที่น่าสนใจดังนี้

1. กรณีไม่มีการควบคุมความดันของหอกลิ้น ส่งผลให้อุณหภูมิและความดันของหอกลิ้นลดลงจากภาวะดำเนินการปกติอย่างมากจนไม่สามารถแยกอะซิโตนออกจากไอโซโพรพานอลซึ่งเป็นสารหนักออกสู่กระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ ทำให้เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนที่มีอะซิโตนและไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันไม่สามารถดำเนินได้
2. กรณีไม่มีการควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการ การตอบสนองของกระบวนการมีการแกว่งอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ต่ำ การเปลี่ยนแปลงความดันของหอกลิ้นเพียงเล็กน้อยส่งผลให้อัตราการไหลของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอแกว่งอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่สูง ในขณะที่เดียวกันการกำหนดพลังงานของเครื่องอัดไอที่ทำให้ความดันของกระแสขาออกจากเครื่องอัดไอเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลแล้วส่งผลกระทบต่อทั้งกระบวนการ ทำให้ปั๊มความร้อนไม่สามารถดำเนินการได้อย่างราบเรียบ
3. การควบคุมระดับของเหลวส่งผลเล็กน้อยต่อเสถียรภาพของปั๊มความร้อน ปัจจัยหลักสำหรับการกำหนดเสถียรภาพของปั๊มความร้อนคือ การควบคุมความดันของหอกลิ้นและแก๊สภายในกระบวนการ การควบคุมระดับของเหลวส่งผลให้ปั๊มความร้อนดำเนินการได้ยาวนานกว่ากรณีไม่มีการควบคุมระดับของเหลวกันหอกก่อนที่โปรแกรมจะหยุดการคำนวณ

ตารางที่ 4.1 สรุปการจำลองสถานการณ์ในหัวข้อ 4.1.1-4.1.8

วงควบคุม	4.1.1	4.1.2	4.1.3	4.1.4	4.1.5	4.1.6	4.1.7	4.1.8
ความดันของหอกลับ	-	√	-	√	-	√	-	√
ความดันของแก๊ส ภายในกระบวนการ	-	-	√	√	-	-	√	√
ระดับของเหลวยอดหอ	-	-	-	-	√	√	√	√
ระดับของเหลวก้นหอ	-	-	-	-	√	√	√	√
เวลาทดลอง	94*	500	160*	500	500	413*	500	500
การตอบสนองจากป้อน ความร้อน	ไม่สามารถแยก อะซิโตนออก ทางยอดหอ	แกว่งอย่าง ต่อเนื่อง	แกว่งอย่าง ต่อเนื่อง	มี เสถียรภาพ	แกว่งอย่าง ต่อเนื่อง	ไม่สามารถแยก อะซิโตนออก ทางยอดหอ	แกว่งอย่าง ต่อเนื่อง	มี เสถียรภาพ

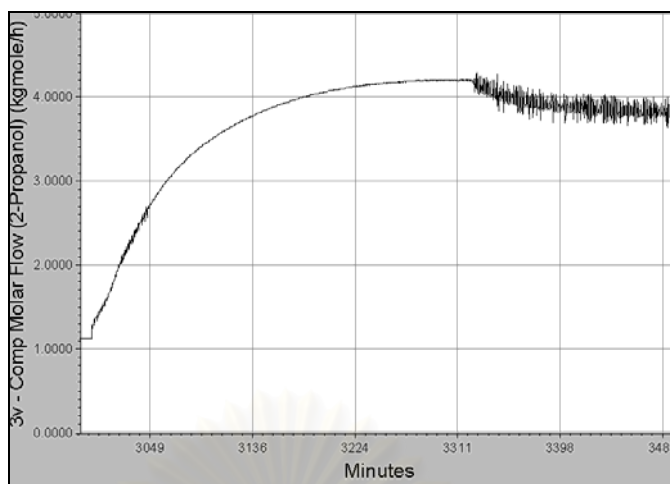
\*หมายถึงกระบวนการหยุดการตอบสนอง (โปรแกรมไฮซิสหยุดการคำนวณ)



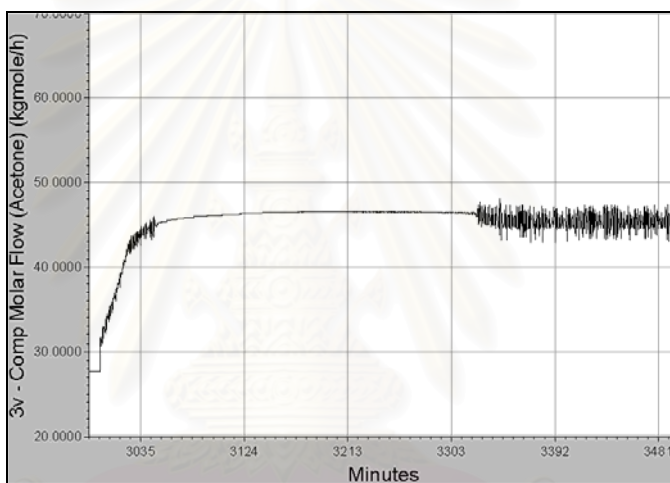
รูปที่ 4.52 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของหอกลั่นและแก๊สภายในกระบวนการ การควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหล กระแสน้ำด้านอุณหภูมิสูง การควบคุมอุณหภูมิกระแสน้ำร้อนเครื่องปฏิกรณ์



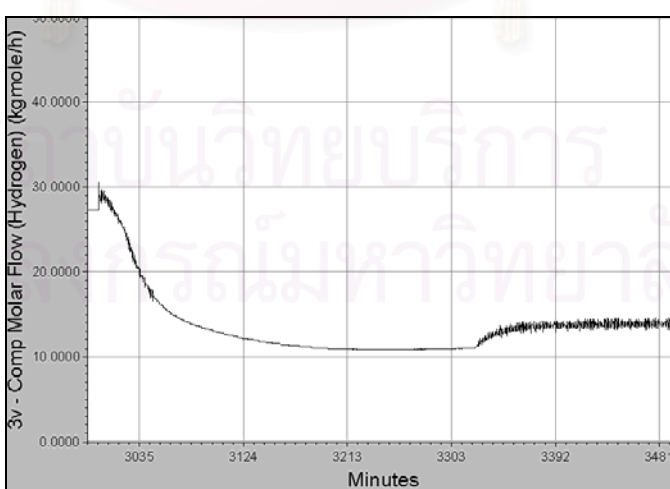




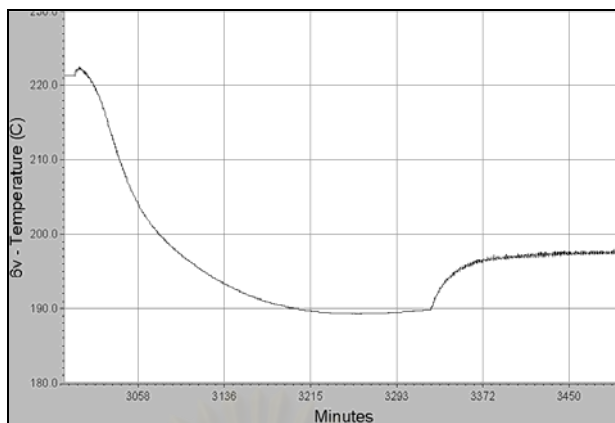
รูปที่ 4.54 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



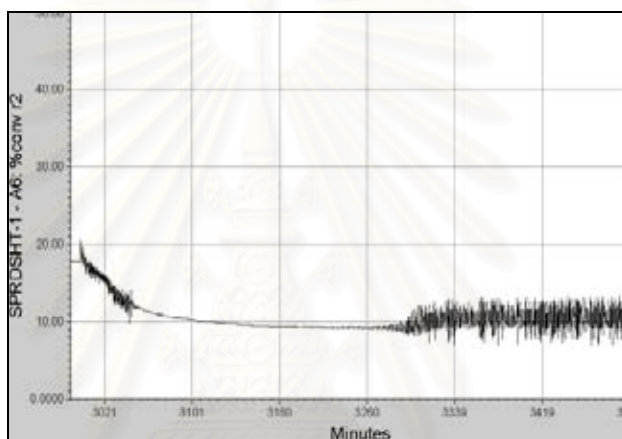
รูปที่ 4.55 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



รูปที่ 4.56 อัตราการไหลของไฮโดรเจนในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

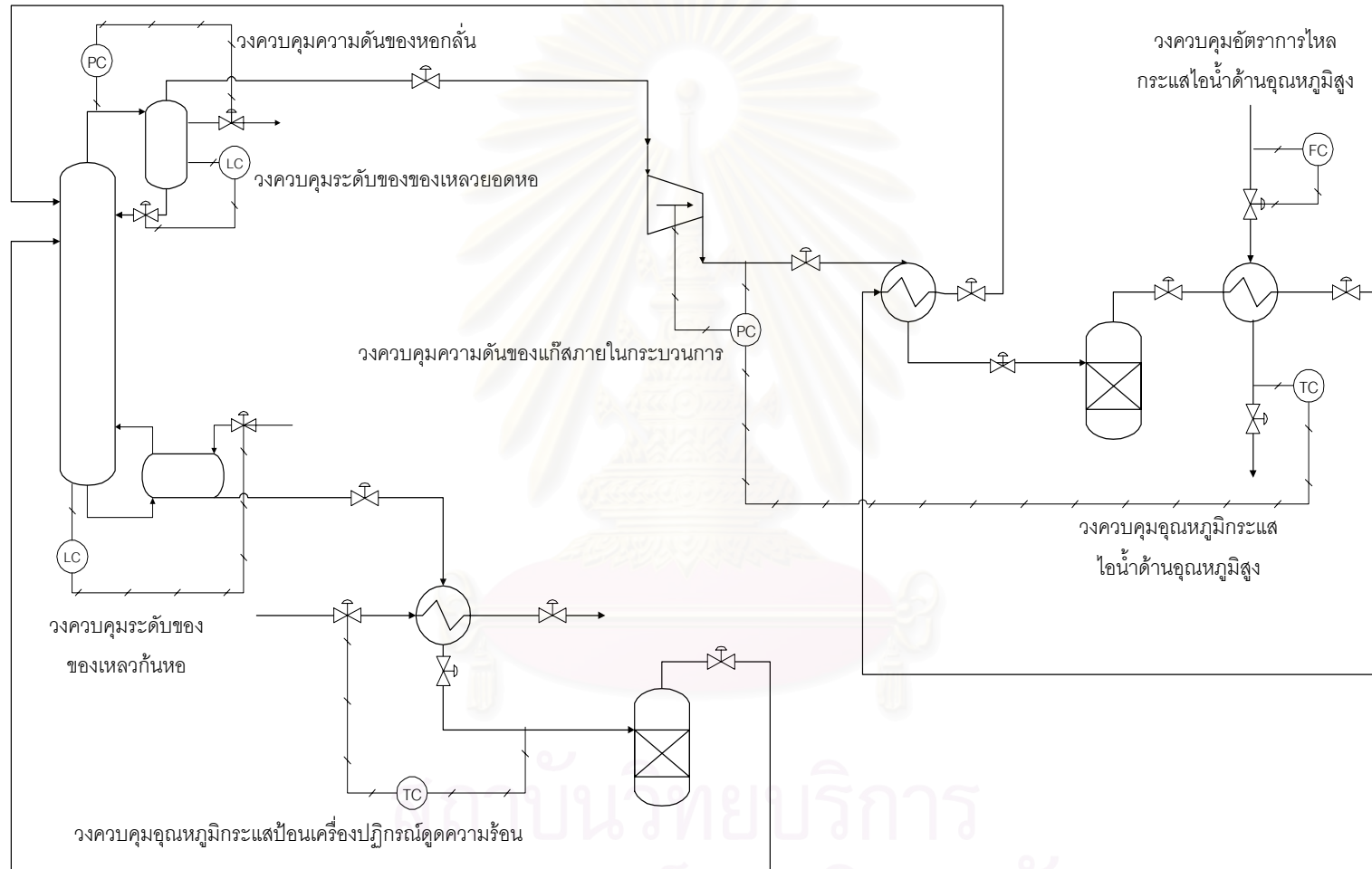


รูปที่ 4.57 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน



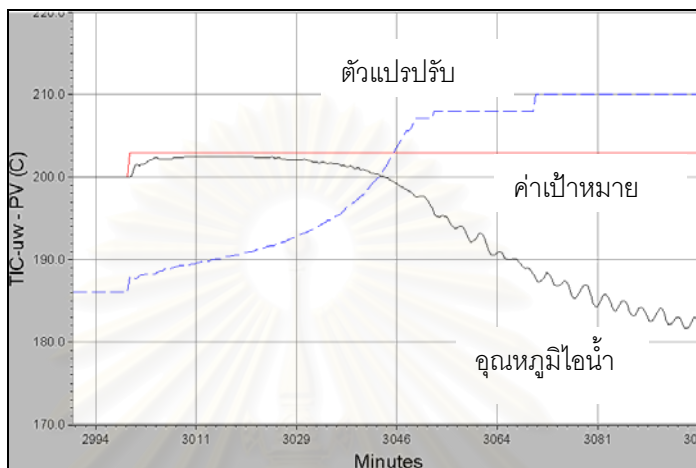
รูปที่ 4.58 ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาคายความร้อน

ผลการจำลองสถานการณ์ในลักษณะเดียวกันนี้ แต่เปลี่ยนวงควบคุมจากการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยปรับอัตราการไหลกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน เป็นการควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยปรับพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอน้ำผ่านวงควบคุมแบบขั้นลำดับแทนดังรูป 4.59 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเพิ่มค่าเป้าหมายแบบขั้นบันไดของวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น 5 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะการตอบสนองของกระบวนการคล้ายกับกรณีการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงด้วยการปรับอัตราการไหลของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.60-4.65 คือระบบควบคุมไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงได้แม้ว่าปรับความดันของแก๊สเพิ่มขึ้นอย่างเต็มที่แล้ว ซึ่งการที่ความดันของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาควรมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในภาวะแก๊สที่มีการเปลี่ยนสารตั้งต้น 2 โมลเป็นผลิตภัณฑ์ 1 โมล โดยหลักของเลอชาเตอลิเยร์แล้วสมดุลควรจะเคลื่อนไปข้างหน้า รูปที่ 4.61 แสดงการตอบสนองของอัตราการไหลของไอโซโพรพานอลมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4 กิโลโมลต่อชั่วโมง อัตราการไหลของอะซิโตนเพิ่มขึ้นประมาณ 30 กิโลโมลต่อชั่วโมงดังรูป 4.62

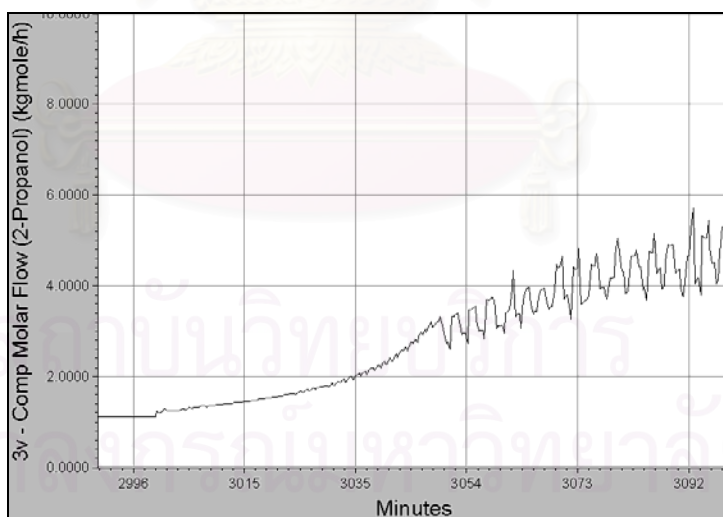


รูปที่ 4.59 การควบคุมระดับของของเหลวยอดหอและก้นหอ การควบคุมความดันของหอกลั่นและแก๊สภายในกระบวนการ การควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหล กระแสน้ำด้านอุณหภูมิสูง การควบคุมอุณหภูมิกระแสน้ำด้านอุณหภูมิสูง

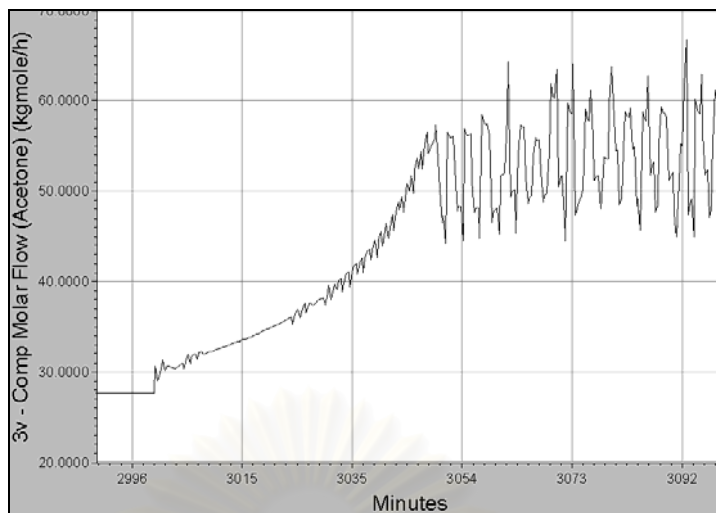
ในขณะที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนลดลงจากภาวะดำเนินการปกติประมาณ 15 กิโลโมลต่อชั่วโมงดังรูป 4.63 ด้วยเหตุที่สารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาคายความร้อนลดลงทำให้ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาลดลงประมาณร้อยละ 10 ส่งผลให้อุณหภูมิของกระแสผลิตภัณฑ์ลดลงดังรูป 4.64-4.65 ดังนั้นพลังงานที่จะถ่ายเทให้กับไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงจึงไม่เพียงพอ



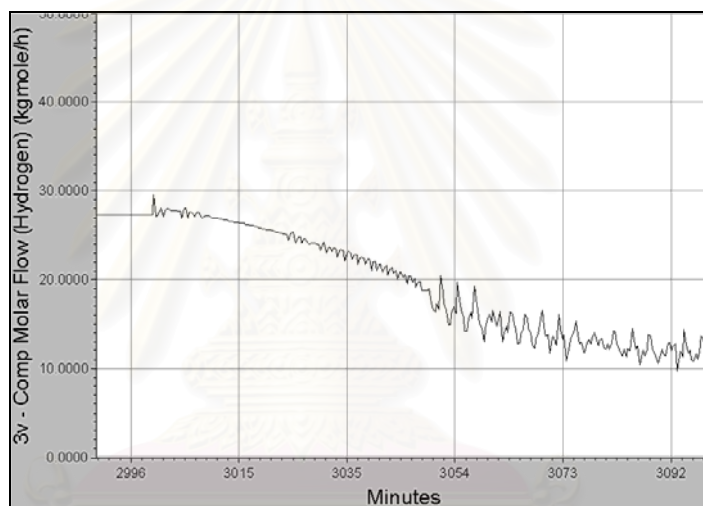
รูปที่ 4.60 การจำลองสถานการณ์ป้อนความร้อนเมื่อเพิ่มค่าเป้าหมายแบบขั้นบันไดของวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำอุณหภูมิสูง 5 องศาเซลเซียส



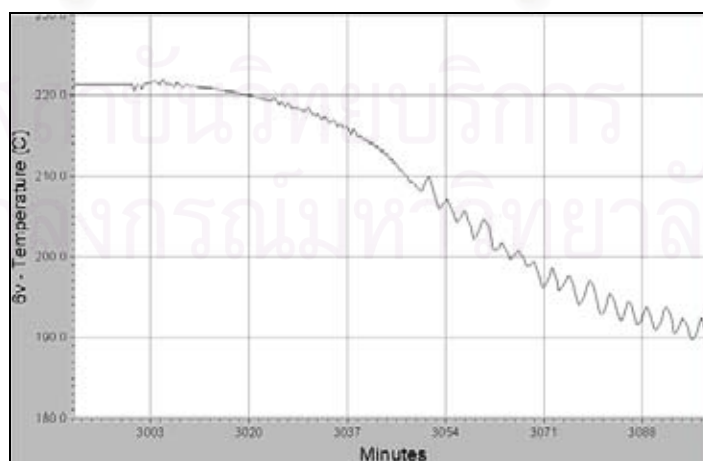
รูปที่ 4.61 อัตราการไหลของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ออกห



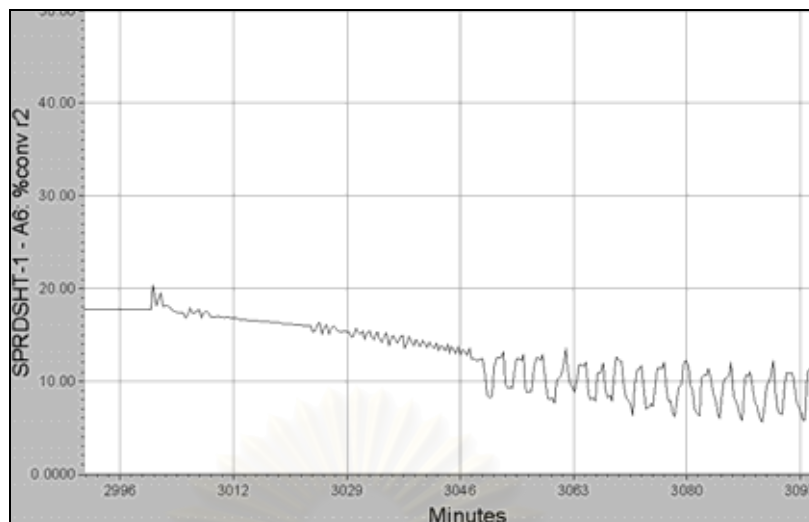
รูปที่ 4.62 อัตราการไหลของอะซิโตนในกระแสผลิตภัณฑ์แยกออก



รูปที่ 4.63 อัตราการไหลของไฮโดรเจนกระแสผลิตภัณฑ์แยกออก



รูปที่ 4.64 อุณหภูมิกระแสผลิตภัณฑ์เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน



รูปที่ 4.65 ค่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาคายความร้อน

ผลการจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณีในหัวข้อ 4.2 พบว่าการควบคุมการปนเปื้อนของปริมาณไอโซโทปฟานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอดมีความจำเป็นแม้ว่าผลิตภัณฑ์ยอดหอดจะมีการหมุนเวียนภายในกระบวนการเท่านั้นโดยไม่มีการนำผลิตภัณฑ์ออกจากระบบ การควบคุมการปนเปื้อนของไอโซโทปฟานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอดจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาสมดุลของอุณหภูมิและความดันรวมทั้งปริมาณอะซิโตนและไฮโดรเจนให้มีปริมาณที่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน

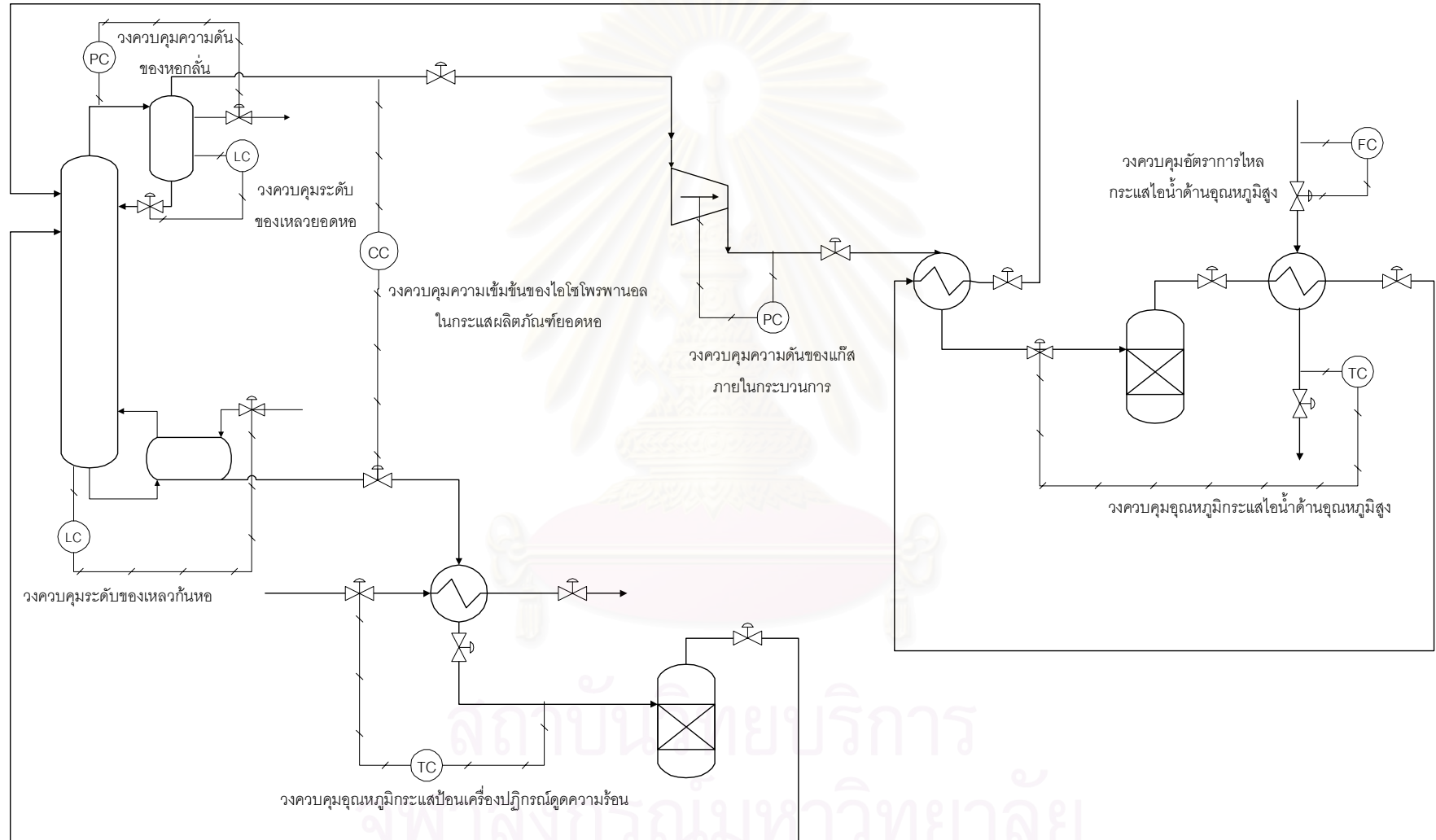
#### 4.3 การจำลองสถานการณ์โดยใช้โครงสร้างการควบคุมปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่แตกต่างกัน

ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมเชิงพลวัตของโครงสร้างการควบคุมปั๊มความร้อน 2 โครงสร้างเมื่อมีการเพิ่มปริมาณความร้อนที่ปั๊มความร้อนให้กับไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง โดยการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงแบบขั้นบันไดขึ้น 5 องศาเซลเซียส และเพิ่มอัตราการไหลของกระแสไอน้ำอุณหภูมิสูงขึ้น 9 กิโลโมลต่อชั่วโมง เริ่มทำการทดลองที่เวลา 3000 นาที ใช้เวลาทดลอง 500 นาที

##### 4.3.1 การจำลองสถานการณ์โดยใช้โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1

โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 สำหรับปั๊มความร้อนทำการติดตั้งวงควบคุม 8 วงดังรูป 4.66 ดังนี้

- 1) ควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยการปรับอัตราการไหลกระแสไอน้ำเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน



รูปที่ 4.66 โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1

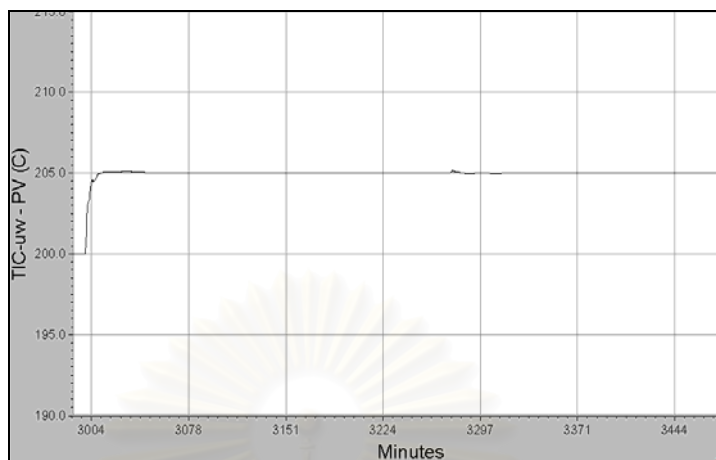
- 2) ควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง
- 3) ควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยการปรับพลังงานของเครื่องอัดไอ
- 4) ควบคุมความดันของหอกลิ้นโดยการปรับภาระความร้อนของเครื่องควบแน่น
- 5) ควบคุมการปนเปื้อนของไอโซโทปฟรานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอคอยโดยการปรับอัตราการไหลกระแสแก๊สกันหอคอย
- 6) ควบคุมอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนโดยการปรับอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ
- 7) ควบคุมระดับของเหลวยอดหอคอยโดยการปรับอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์
- 8) ควบคุมระดับของเหลวกันหอคอยโดยการปรับภาระความร้อนของหม้อต้มซ้ำ

#### 4.3.1.1 การตอบสนองของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ต่อการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น 5 องศาเซลเซียส

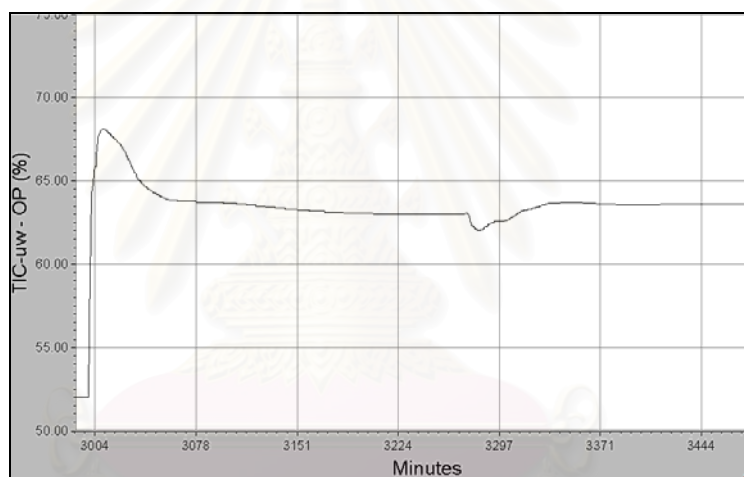
เมื่อเพิ่มค่าเป้าหมายของวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น 5 องศาเซลเซียส วงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำจะปรับอัตราการไหลของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนหรืออัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอคอยเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.96 ดังรูป 4.67-4.68 เมื่ออัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอคอยเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณไอโซโทปฟรานอล อะซิโตนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น วงควบคุมการปนเปื้อนของไอโซโทปฟรานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอคอยจะเพิ่มอัตราการไหลกระแสแก๊สกันหอคอยร้อยละ 12.95 เพื่อควบคุมปริมาณไอโซโทปฟรานอลดังรูป 4.69-4.70 ซึ่งความเข้มข้นของไอโซโทปฟรานอลจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องจากวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงตอบสนองต่อการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำเร็วกว่าวงควบคุมความเข้มข้นของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอคอย เมื่ออัตราการไหลกระแสแก๊สกันหอคอยเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของกระแสไอน้ำอุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.42 เพื่อรักษาอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนดังรูป 4.71-4.72 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการลดลงตามอัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอคอยที่เพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานของเครื่องอัดไอเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.92 เพื่อรักษาความดันของแก๊สในกระบวนการดังรูป 4.73-4.74 ความดันของหอกลิ้นเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอคอยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้วงควบคุมความดันของหอกลิ้นเพิ่มภาระความร้อนของเครื่องควบแน่นร้อยละ 14.34 เพื่อรักษาภาวะการแยกของหอกลิ้นดังรูปที่ 4.75-4.76 รูปที่ 4.77-4.78 แสดงระดับของเหลวยอดหอคอยเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 เนื่องจากการควบแน่นของไอที่เพิ่มขึ้นจากวงควบคุมความดันของหอกลิ้น วงควบคุมระดับของเหลวยอดหอคอยจะปรับอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.51 เพื่อรักษาระดับของเหลวยอดหอคอย รูปที่ 4.79-4.80 แสดงระดับของเหลวกันหอคอยลดลงประมาณร้อยละ 1 วงควบคุมระดับของเหลวกันหอคอยจะปรับภาระความร้อนของหม้อต้มซ้ำลดลงร้อยละ 1.32 เพื่อรักษาระดับของเหลวกัน



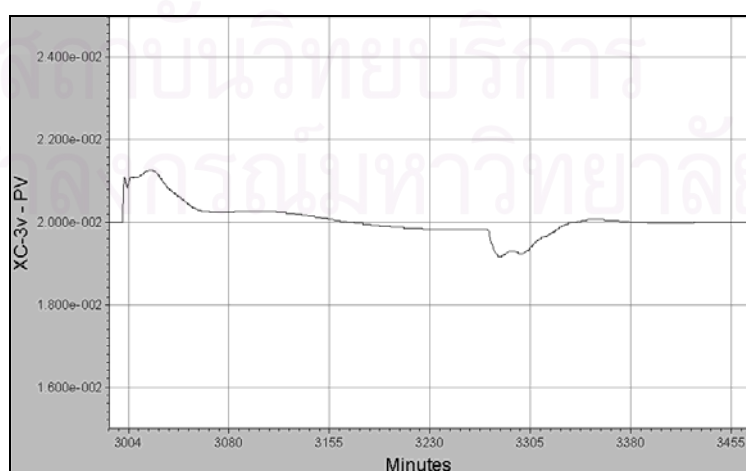
หอ รูปที่ 4.81-4.82 แสดงการควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลได้อย่างรวดเร็ว



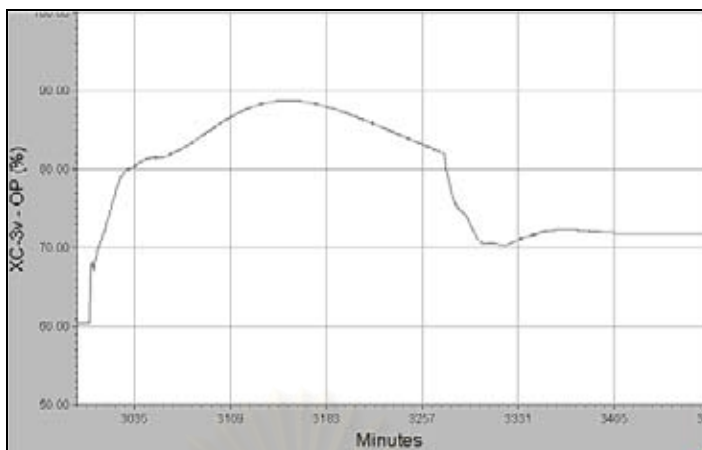
รูปที่ 4.67 อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



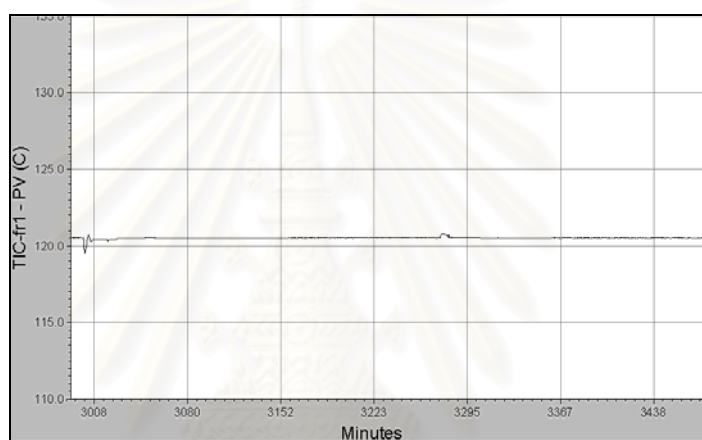
รูปที่ 4.68 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน



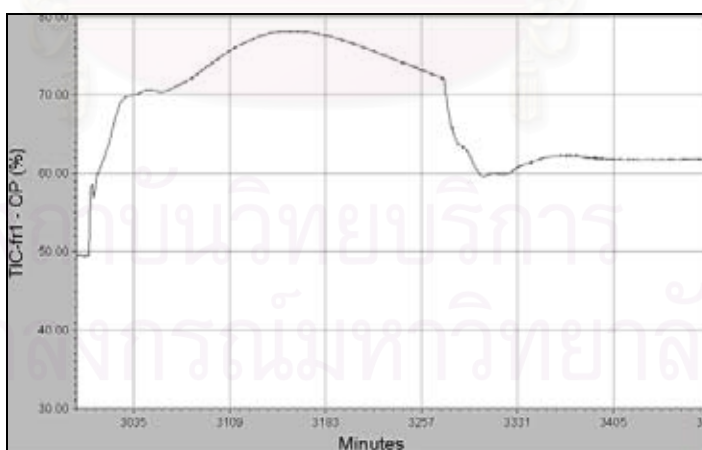
รูปที่ 4.69 ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ



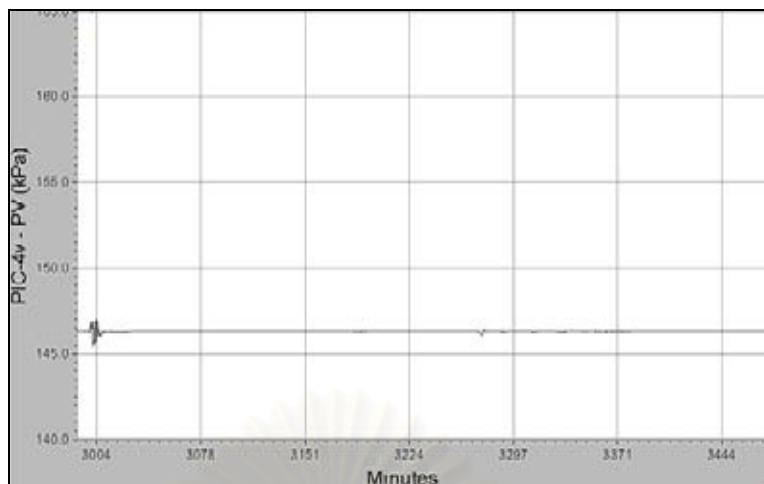
รูปที่ 4.70 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสแก๊สหนอ



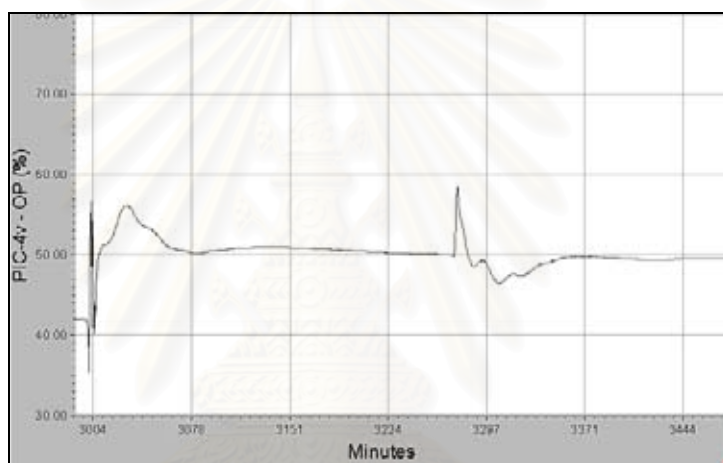
รูปที่ 4.71 อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน



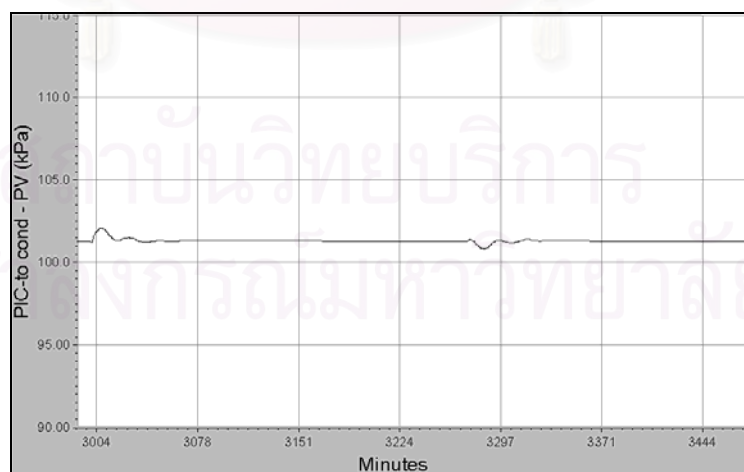
รูปที่ 4.72 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ



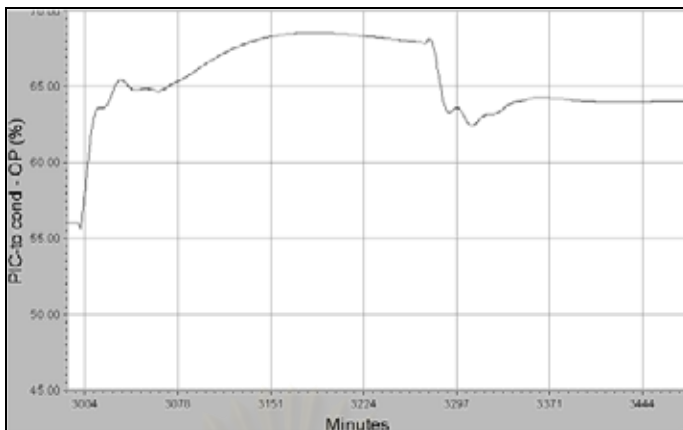
รูปที่ 4.73 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ



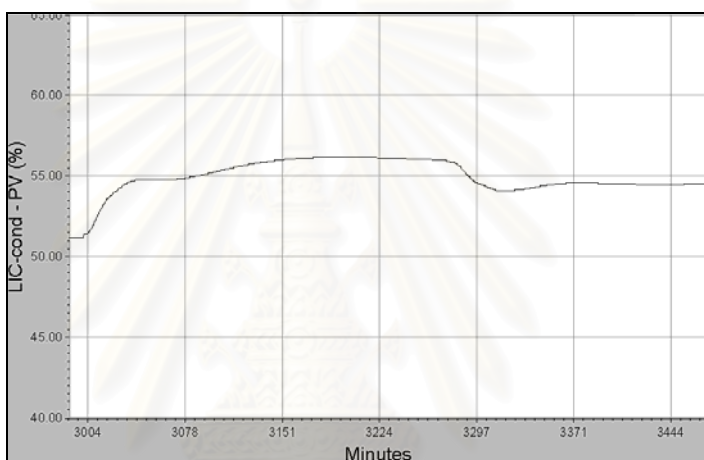
รูปที่ 4.74 ร้อยละการเปิดวาล์วพลังงานของเครื่องอัดไอ



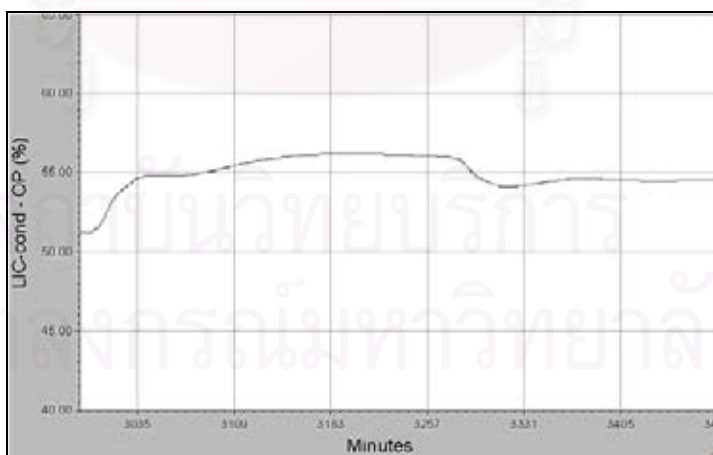
รูปที่ 4.75 ความดันของหอกถัน



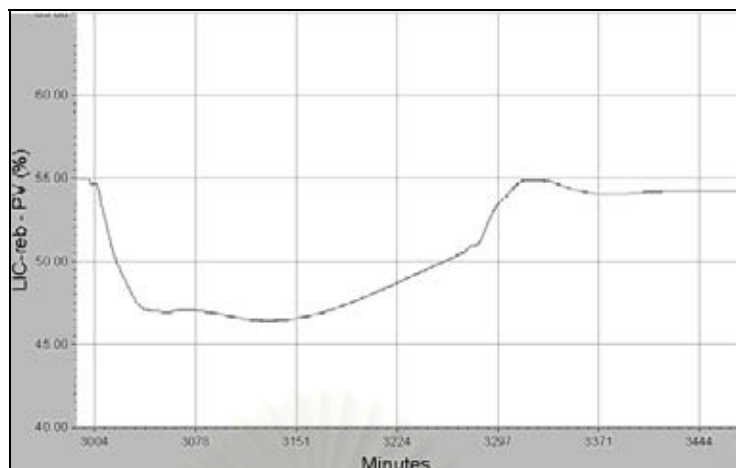
รูปที่ 4.76 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น



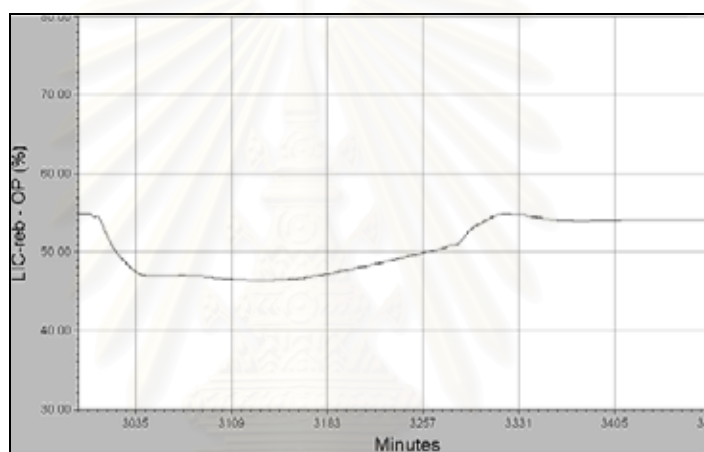
รูปที่ 4.77 ระดับของของเหลวยอดหอ



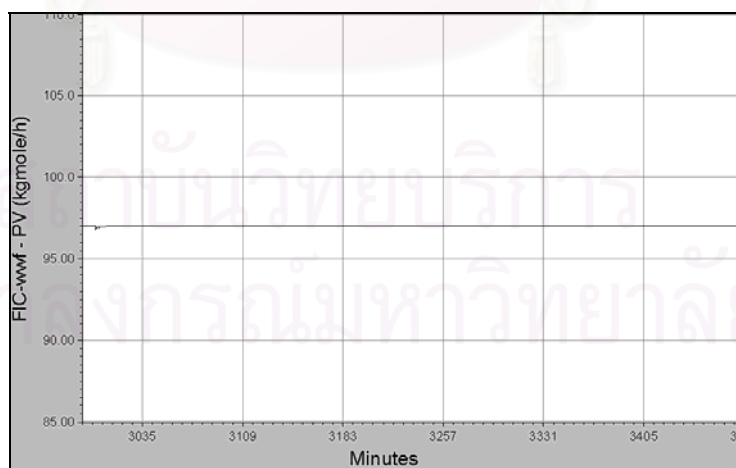
รูปที่ 4.78 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์



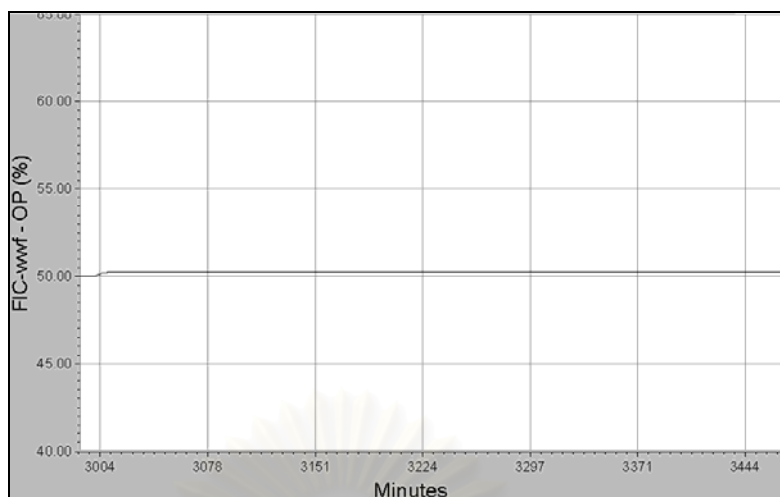
รูปที่ 4.79 ระดับของเหลวก้นหอ



รูปที่ 4.80 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ



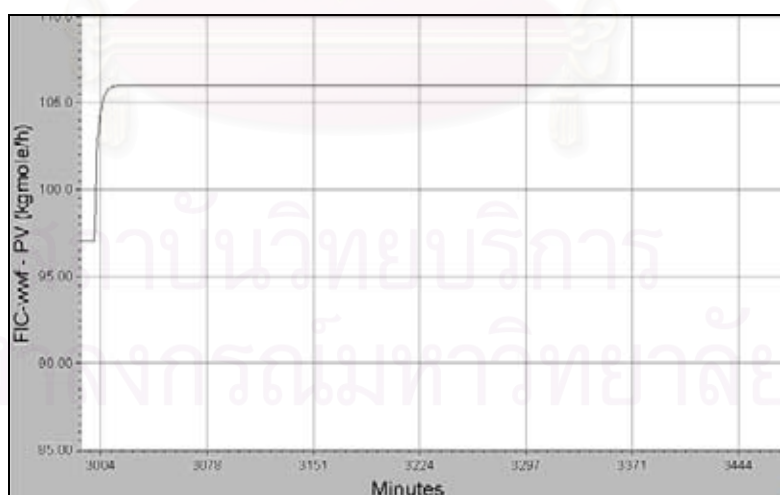
รูปที่ 4.81 อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



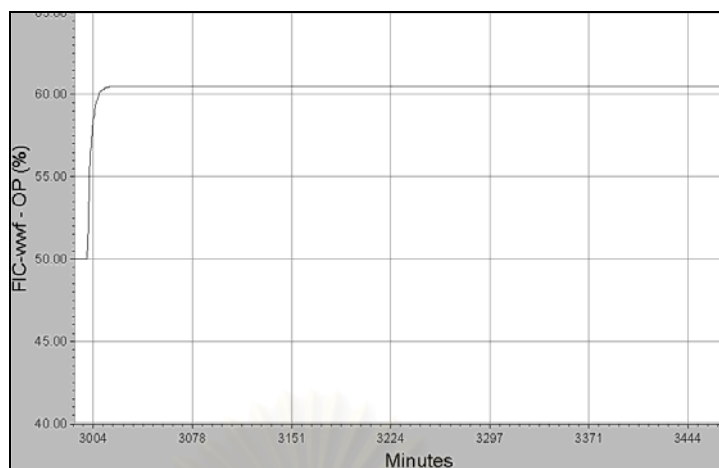
รูปที่ 4.82 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง

4.3.1.2 การตอบสนองของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ต่อการเพิ่มอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น 9 กิโลโมลต่อชั่วโมง

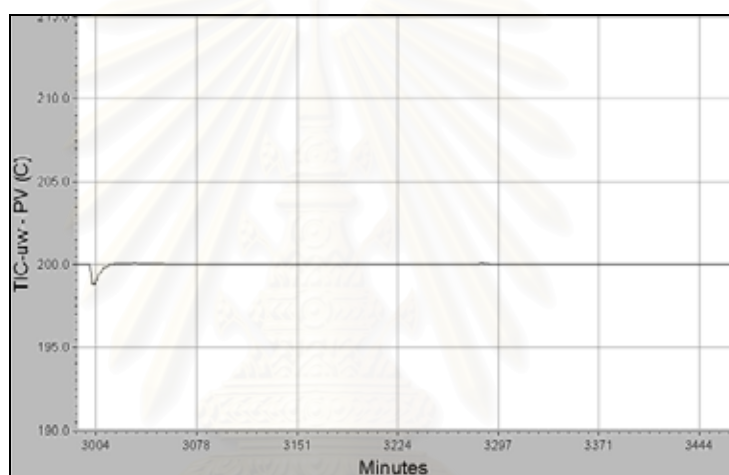
รูปที่ 4.83-4.98 แสดงผลการตอบสนองของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ต่อการเพิ่มอัตราการไหลของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง พบว่าการตอบสนองของกระบวนการมีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟการตอบสนองของกระบวนการเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



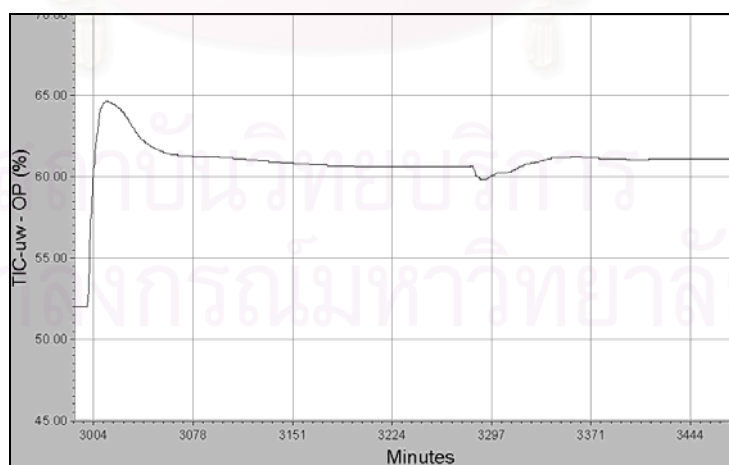
รูปที่ 4.83 อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



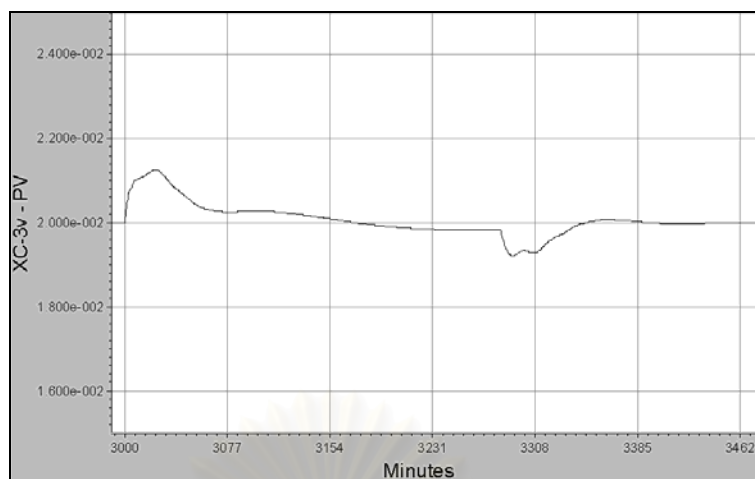
รูปที่ 4.84 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



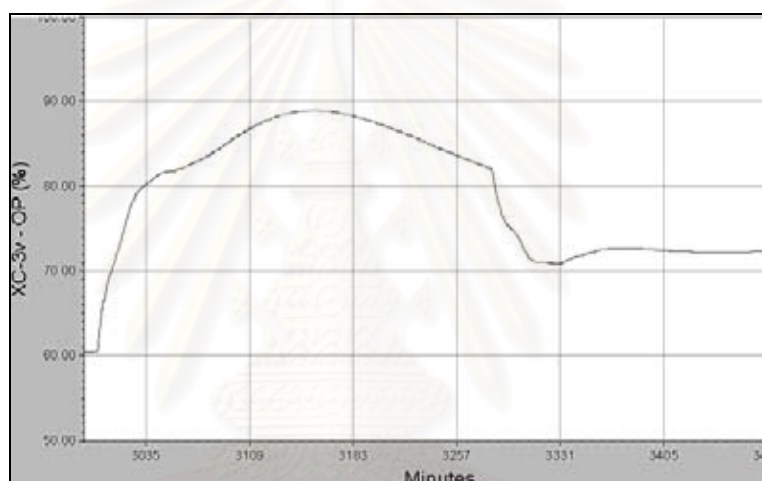
รูปที่ 4.85 อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



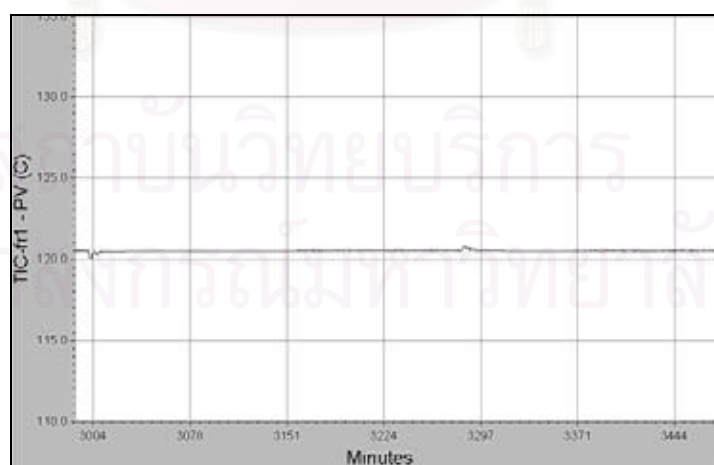
รูปที่ 4.86 ร้อยละการปรับความดันของแก๊สภายในกระบวนการ



รูปที่ 4.87 ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ขุดหอด

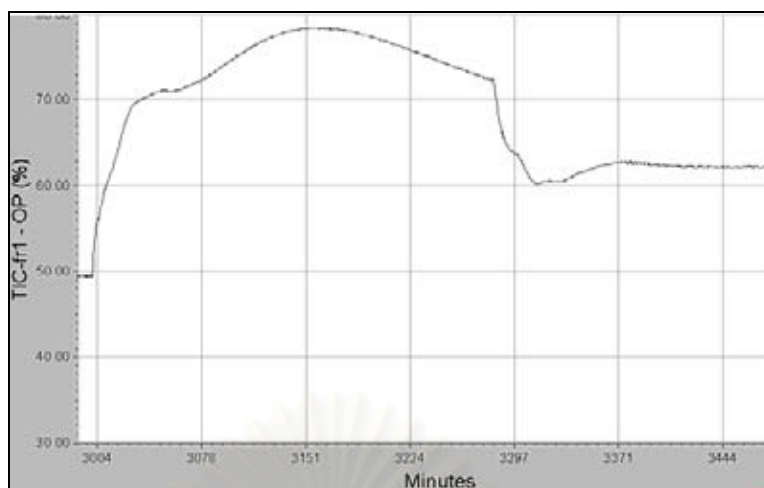


รูปที่ 4.88 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสแก๊นหอด

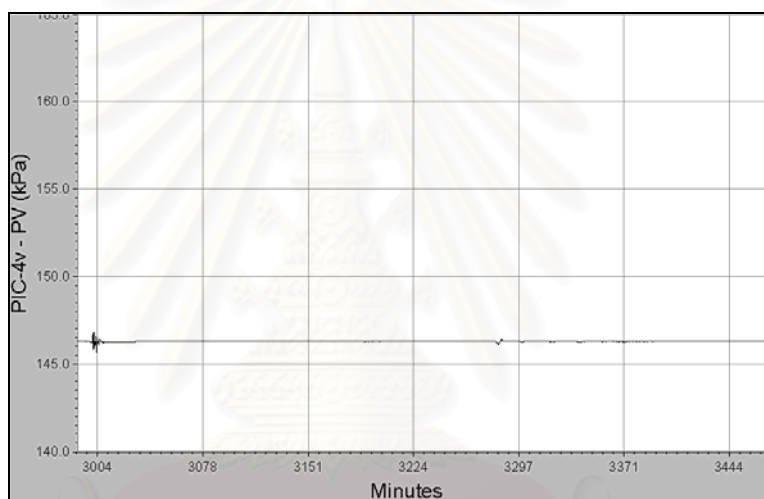


รูปที่ 4.89 อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูัดความร้อน

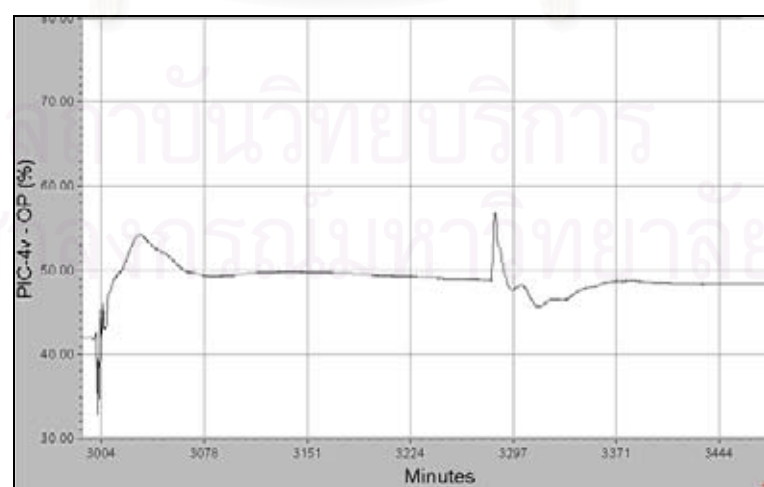




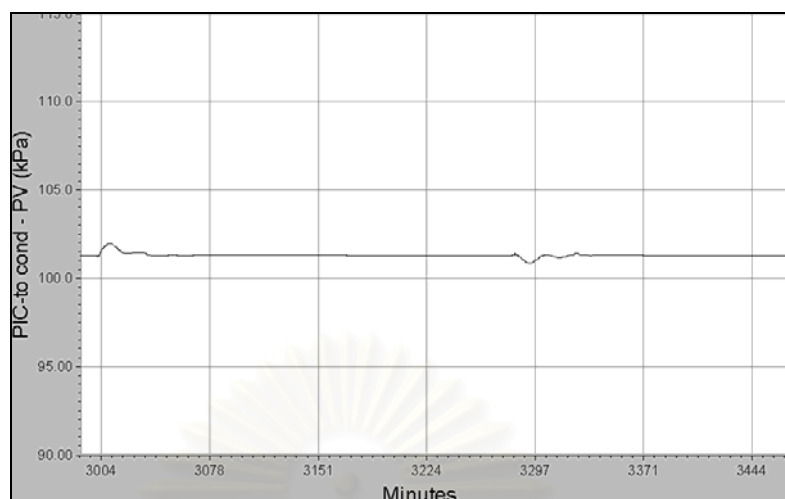
รูปที่ 4.90 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ



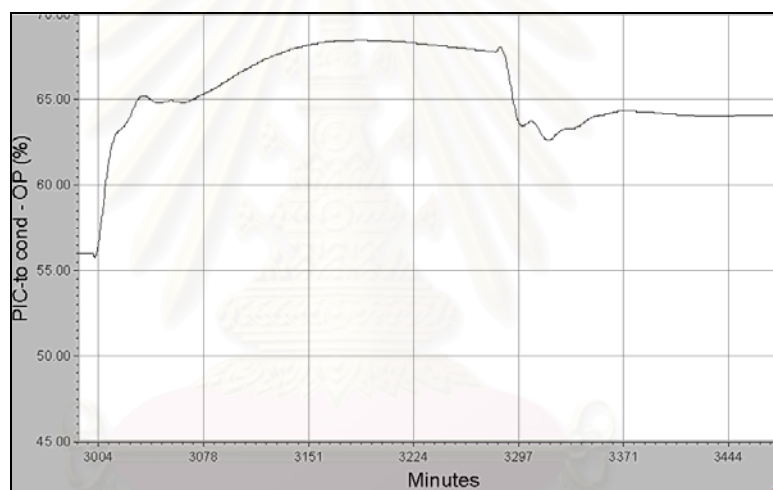
รูปที่ 4.91 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ



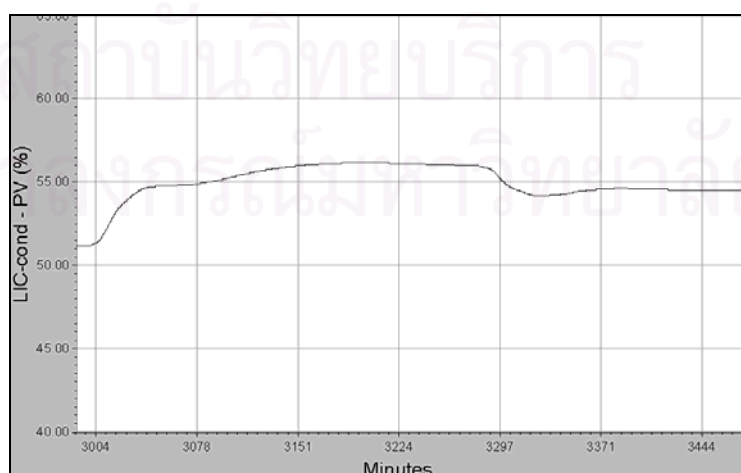
รูปที่ 4.92 ร้อยละการเปิดวาล์วพลังงานของเครื่องอัดไอ



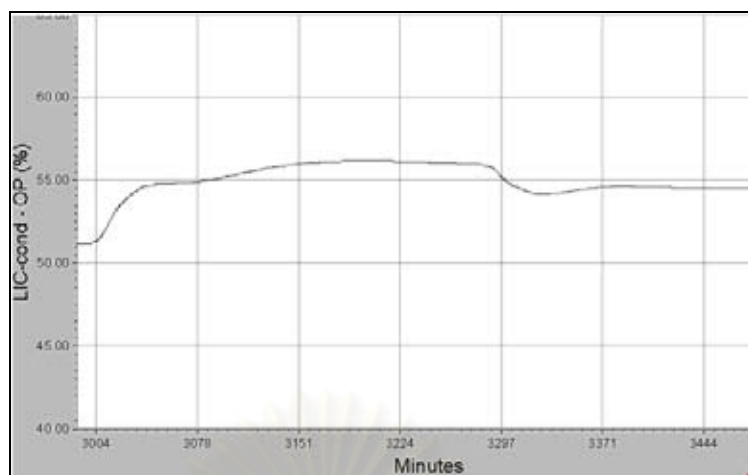
รูปที่ 4.93 ความดันของหอกถั่น



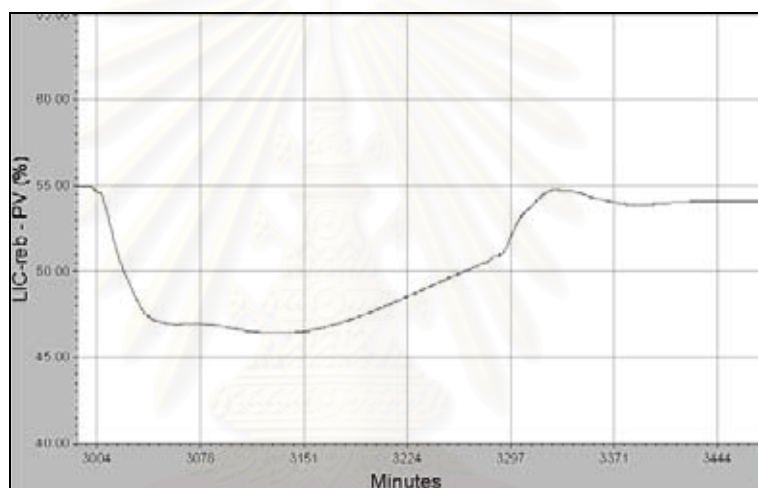
รูปที่ 4.94 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น



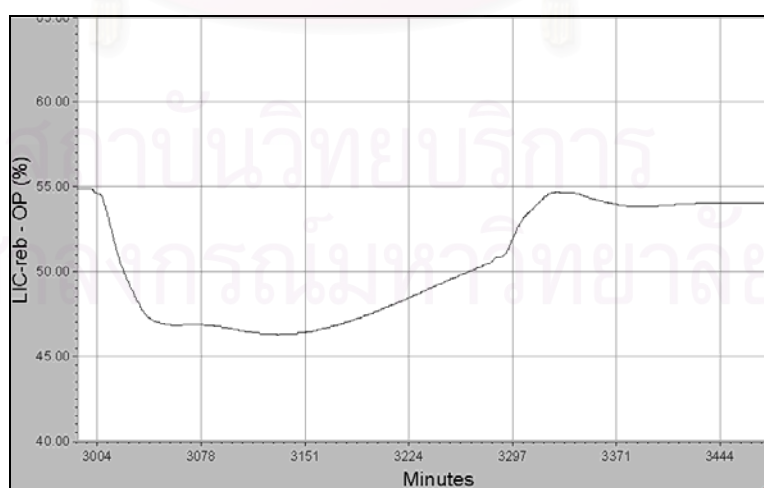
รูปที่ 4.95 ระดับของของเหลวอดหอ



รูปที่ 4.96 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.97 ระดับของของเหลวในหอ



รูปที่ 4.98 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ

#### 4.3.2 การจำลองสถานการณ์โดยใช้โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2

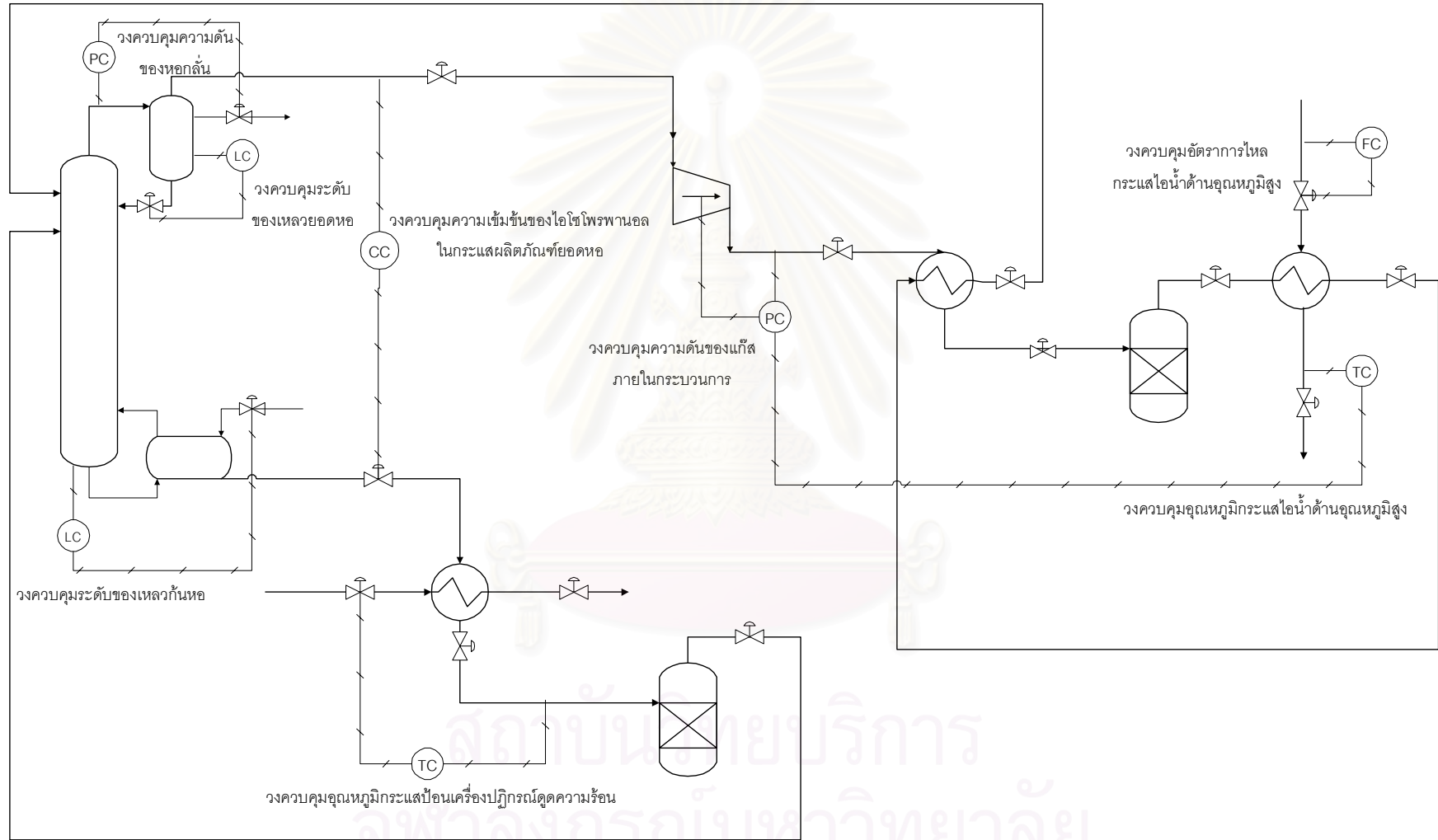
โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 สำหรับปั๊มความร้อนทำการติดตั้งวงควบคุม 8 วงดังรูป 4.99 ดังนี้

- 1) ควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยการควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยปรับพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอน้ำผ่านวงควบคุมแบบขั้นลำดับ
- 2) ควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง
- 3) ควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยการปรับพลังงานของเครื่องอัดไอน้ำ
- 4) ควบคุมความดันของหอกกลับโดยการปรับภาระความร้อนของเครื่องควบแน่น
- 5) ควบคุมการปนเปื้อนของไอโซโทปฟรานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอกโดยการปรับอัตราการไหลกระแสกันหอก
- 6) ควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนโดยการปรับอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ
- 7) ควบคุมระดับของเหลวยอดหอกโดยการปรับอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์
- 8) ควบคุมระดับของเหลวกันหอกโดยการปรับภาระความร้อนของหม้อต้มซ้ำ

สมมติฐานของการออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 คือการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยการควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยการปรับพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอน้ำผ่านวงควบคุมแบบขั้นลำดับนั้น น่าจะเพิ่มปริมาณความร้อนที่ผลิตจากปั๊มความร้อนคือ เพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงได้มากขึ้น เนื่องจากตัวแปรปรับที่ใช้เป็นตัวแปรปรับอิสระจากภายนอกซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วงกว้าง

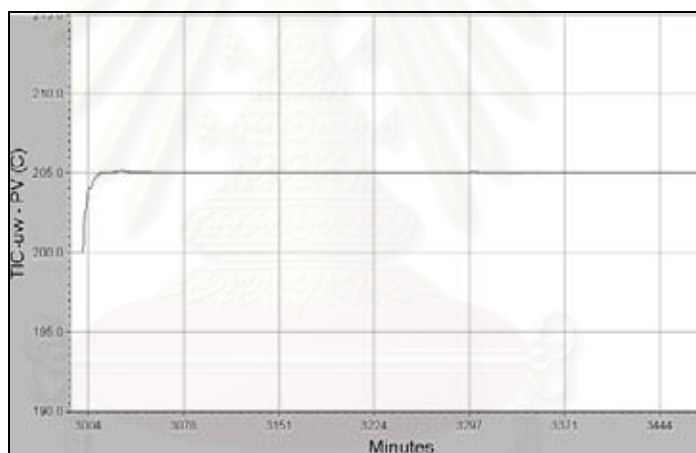
##### 4.3.2.1 การตอบสนองของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ต่อการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น 5 องศาเซลเซียส

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงแบบขั้นบันไดขึ้น 5 องศาเซลเซียสดังรูป 4.100-4.101 โดยควบคุมอัตราการไหลของกระแสไอน้ำอุณหภูมิสูงที่ 97 กิโลโมลต่อชั่วโมงดังรูป 4.102-4.103 วงควบคุมความดันจะรับคำสั่งจากวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงเพื่อปรับความดันของแก๊สเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.91 โดยใช้พลังงานจากเครื่องอัดไอน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 37.89 ดังรูป 4.104-4.105 ทำให้เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนมีความดันสูงขึ้น ส่งผลดีต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนสารตั้งต้น 2 โมลเป็นผลิตภัณฑ์ 1 โมล อีกทั้งการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มพลังงานที่จะส่งให้กับไอน้ำอุณหภูมิสูงอีกทางหนึ่ง รูปที่ 4.106-4.107 แสดงการตอบสนองของวงควบคุมความเข้มข้นของไอโซโทปฟรานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอก โดยอัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์กันหอกจะ

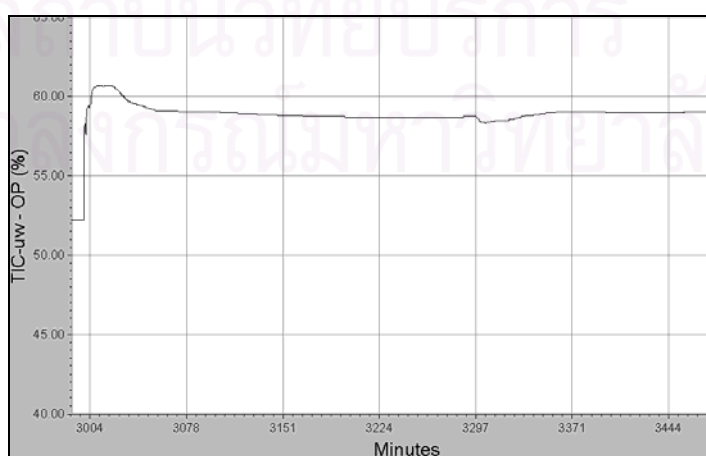


รูปที่ 4.99 โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2

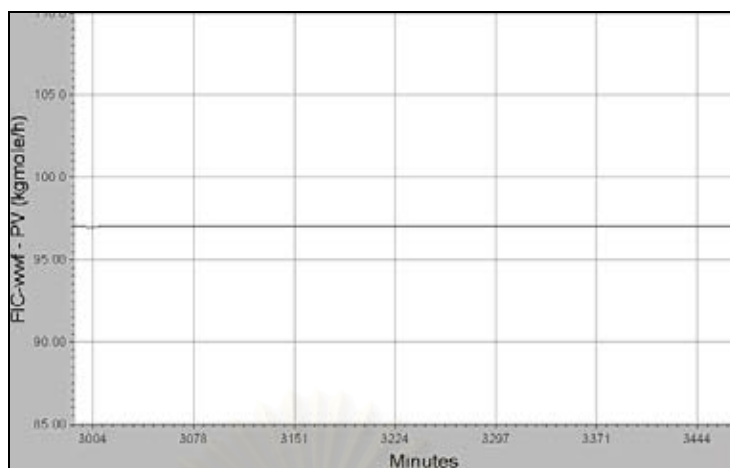
เพิ่มขึ้นร้อยละ 34.72 เพื่อควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลตามอัตราการไหล กระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.3 เมื่ออัตราการไหลกระแสแก๊สเพิ่มขึ้น วงควบคุมอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจะปรับอัตราการไหลกระแสไอน้ำ ด้านอุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.42 เพื่อรักษาอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูด ความร้อนดังรูป 4.108-4.109 ความดันของหอกด้นเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลกระแส ผลิตภัณฑ์ยอดหอที่เพิ่มขึ้น วงควบคุมความดันของหอกด้นจะปรับภาระความร้อนของ เครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 14 เพื่อควบคุมความดันดังรูปที่ 4.110-4.111 ระดับ ของเหลวยอดหอเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 3 ส่งผลให้อัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์เพิ่มขึ้น ร้อยละ 6.38 เพื่อรักษาระดับของเหลวยอดหอให้อยู่ในช่วงภาวะดำเนินการปกติดังรูป 4.112-4.113 รูปที่ 4.114-4.115 แสดงการลดลงของระดับของเหลวกันหอร้อยละ 1 ทำให้ ภาระความร้อนของหม้อต้มช้าลดลงร้อยละ 0.84 เพื่อรักษาระดับของเหลวยอดหอให้อยู่ ในภาวะดำเนินการปกติ



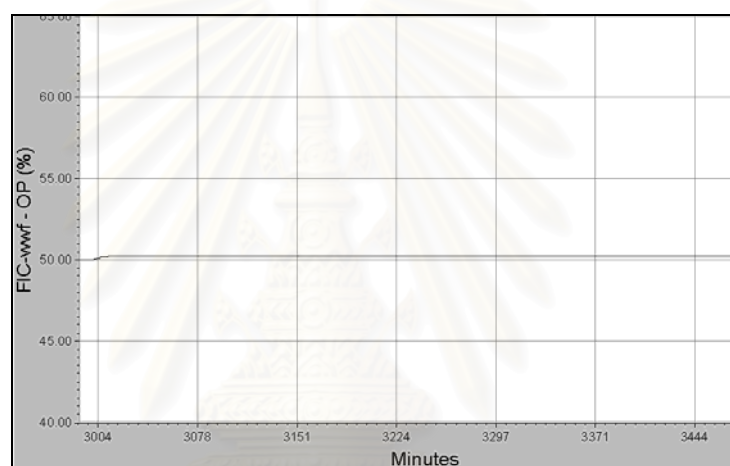
รูปที่ 4.100 อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



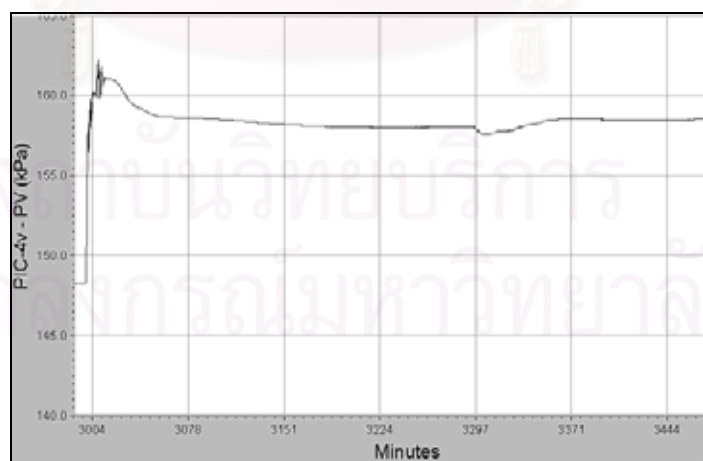
รูปที่ 4.101 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



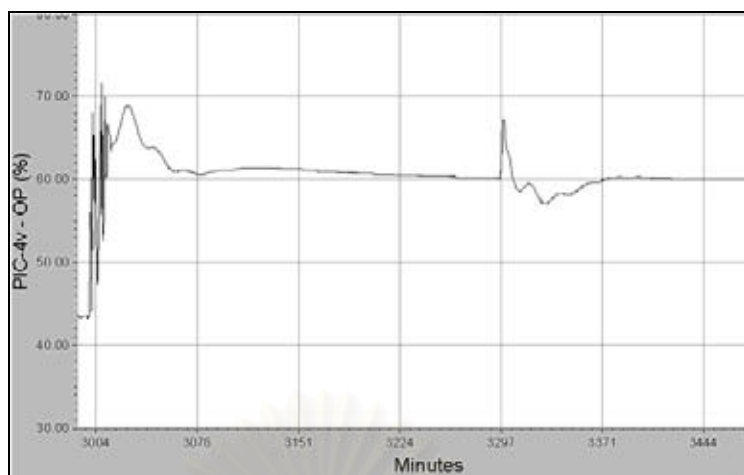
รูปที่ 4.102 อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



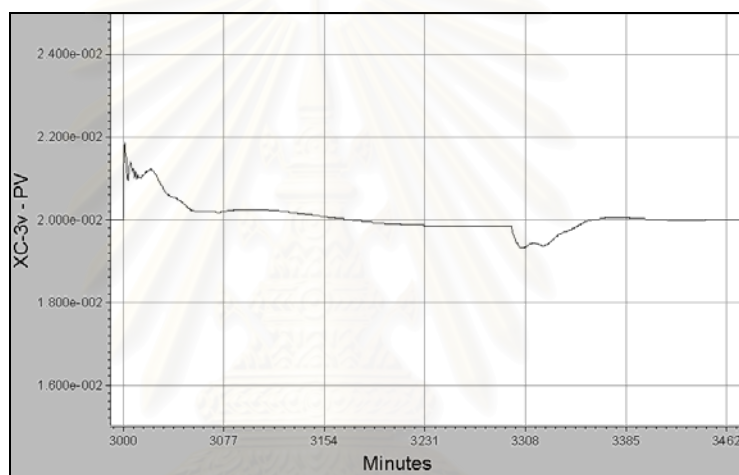
รูปที่ 4.103 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



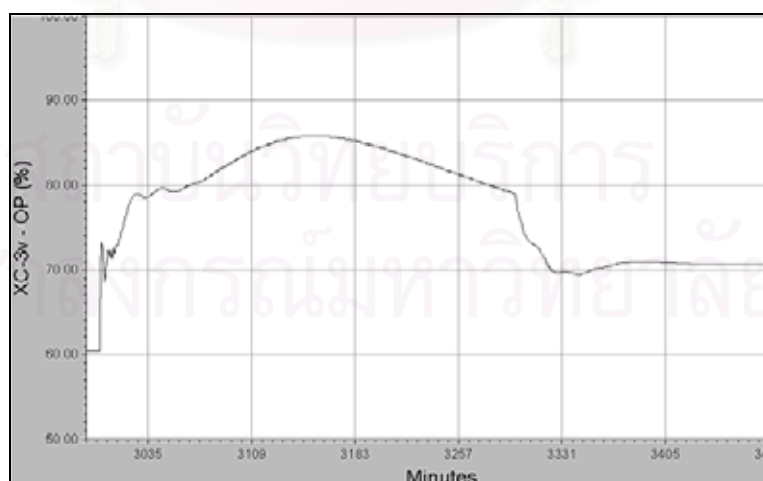
รูปที่ 4.104 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ



รูปที่ 4.105 ร้อยละการเปิดวาล์วพลังงานของเครื่องอัดไอ

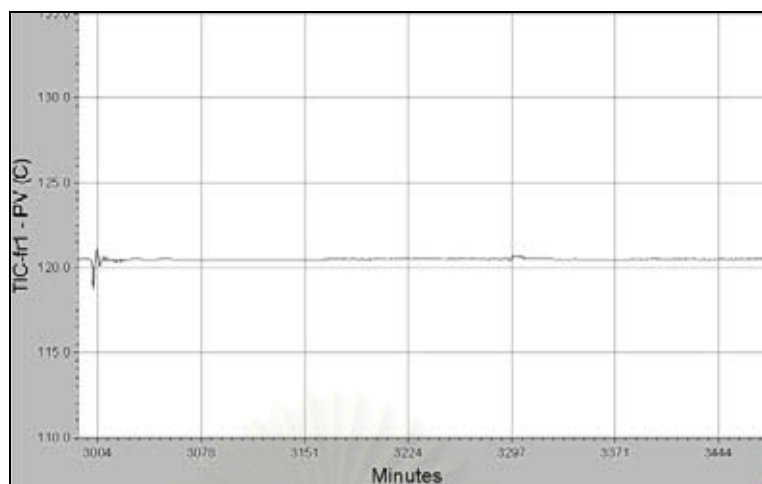


รูปที่ 4.106 ความเข้มข้นของไอโซโทรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ

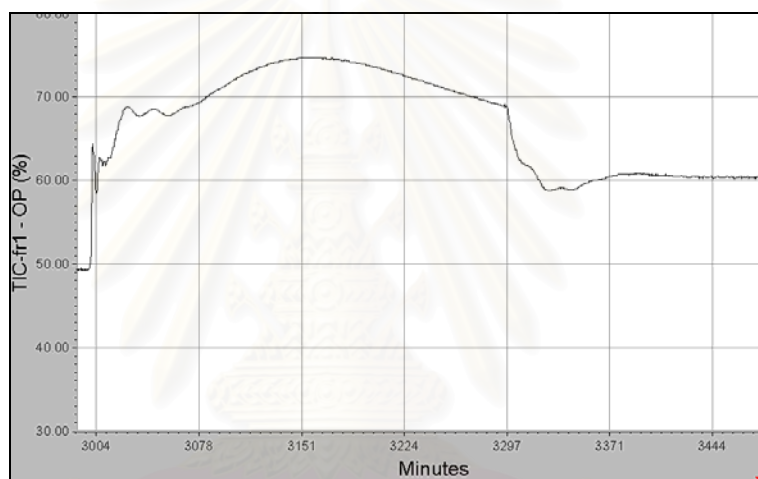


รูปที่ 4.107 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสแก๊นหอ

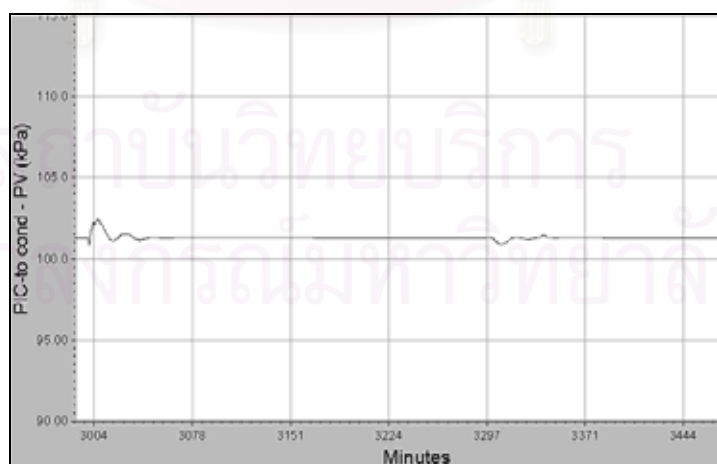




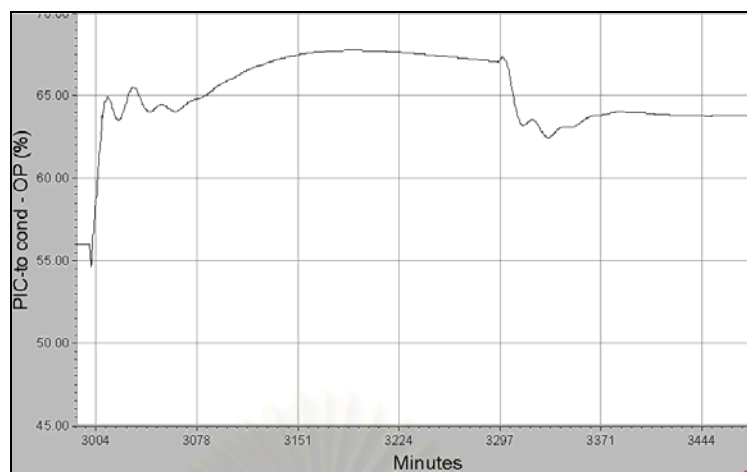
รูปที่ 4.108 อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน



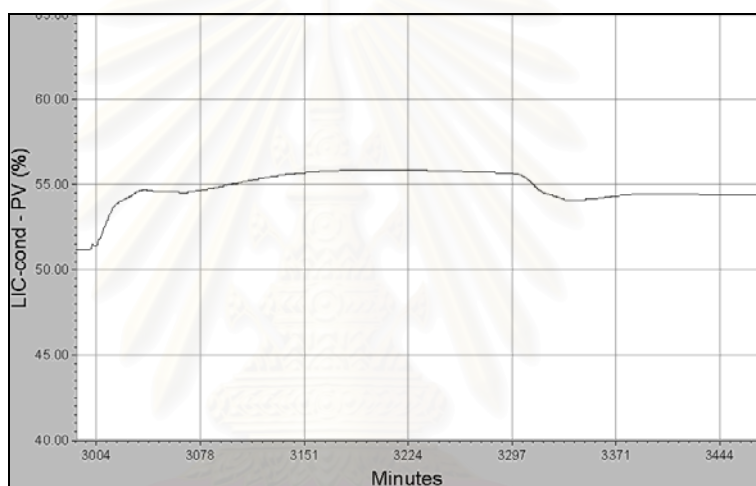
รูปที่ 4.109 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ



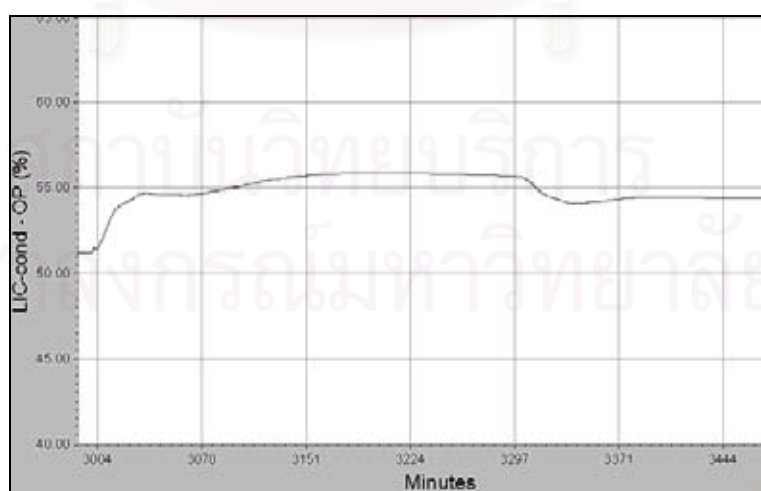
รูปที่ 4.110 ความดันของหอกลั่น



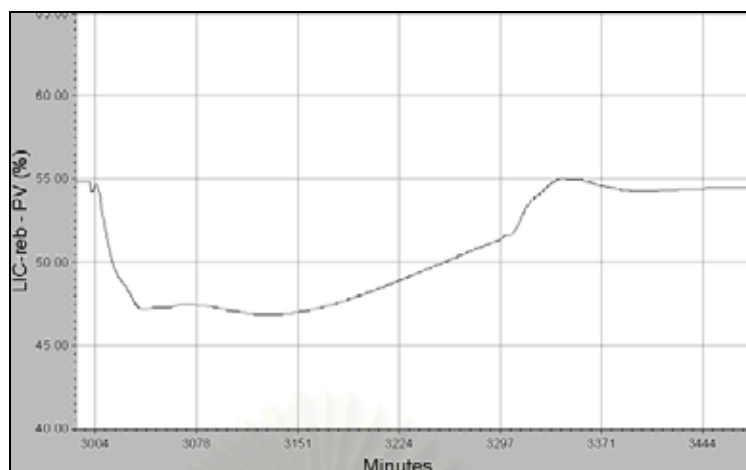
รูปที่ 4.111 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น



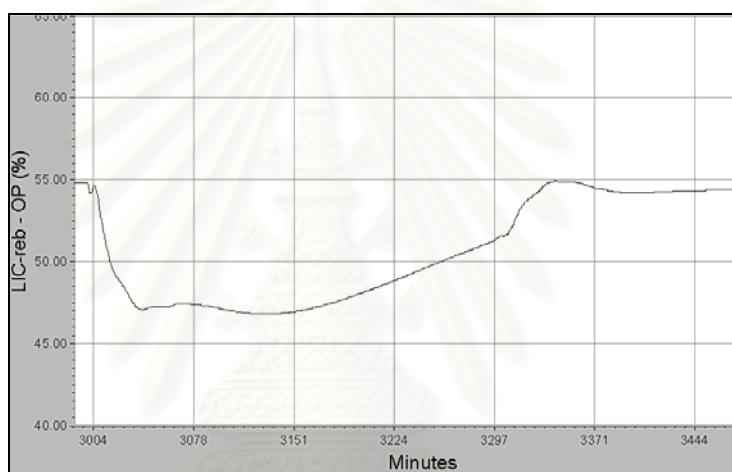
รูปที่ 4.112 ระดับของของเหลวยอดหอ



รูปที่ 4.113 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสฟลักซ์



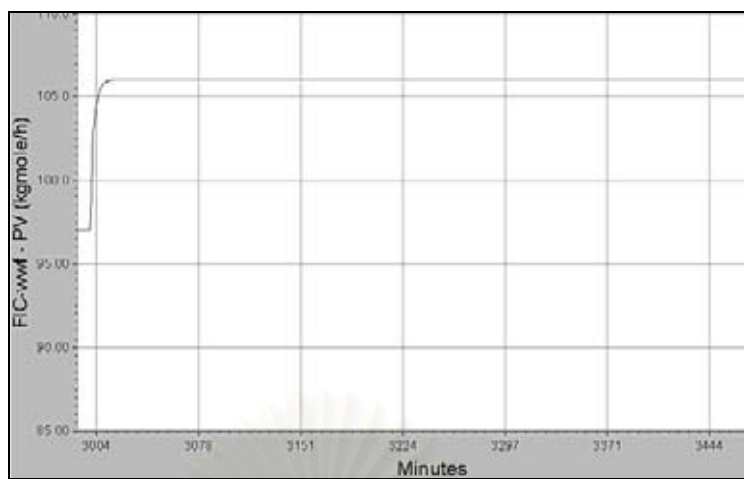
รูปที่ 4.114 ระดับของของเหลวก้นหอ



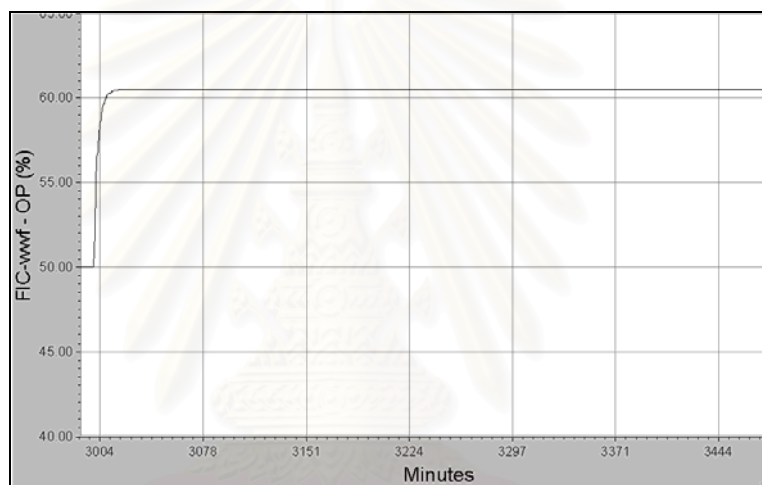
รูปที่ 4.115 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ

4.3.2.2 การตอบสนองของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ต่อการเพิ่มอัตราการไหลกระแส  
ไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

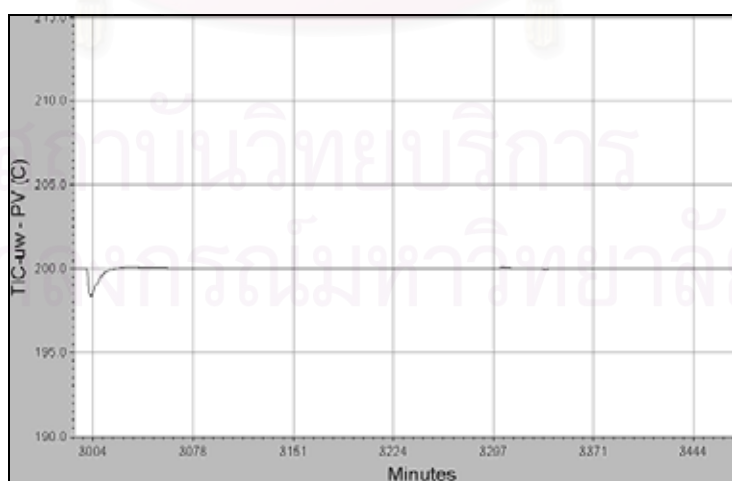
รูปที่ 4.116-4.131 แสดงผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเพิ่มอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้าน  
อุณหภูมิสูงพบว่า การตอบสนองของกระบวนการมีลักษณะเช่นเดียวกับการตอบสนองของ  
กระบวนการเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง 5 องศาเซลเซียส



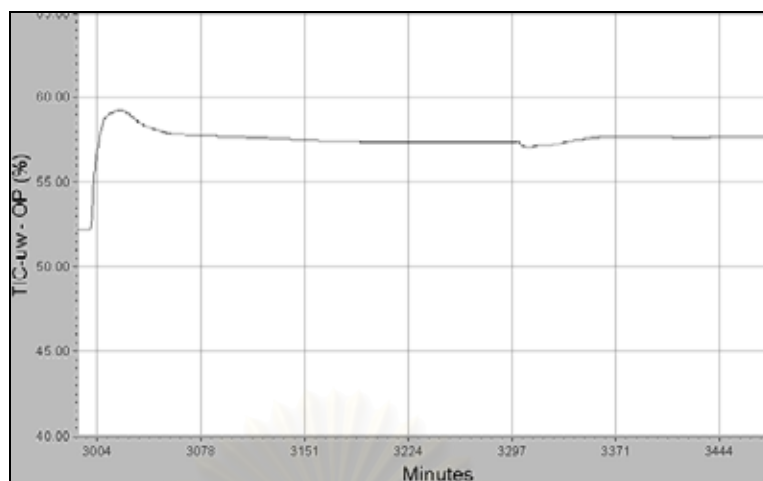
รูปที่ 4.116 อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



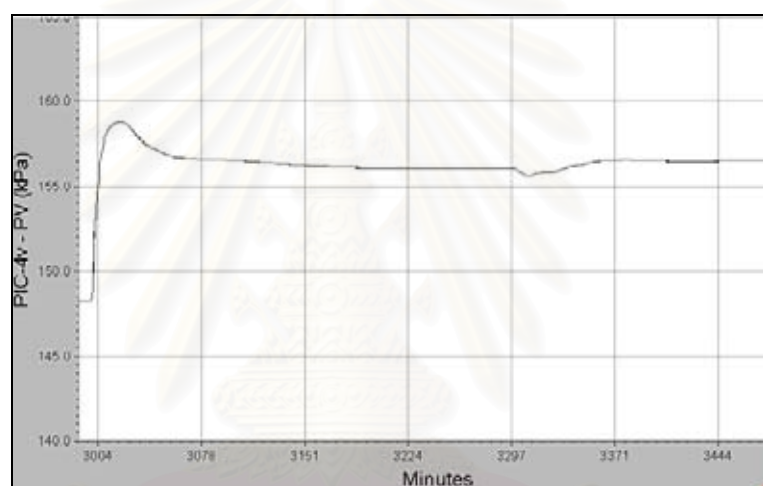
รูปที่ 4.117 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



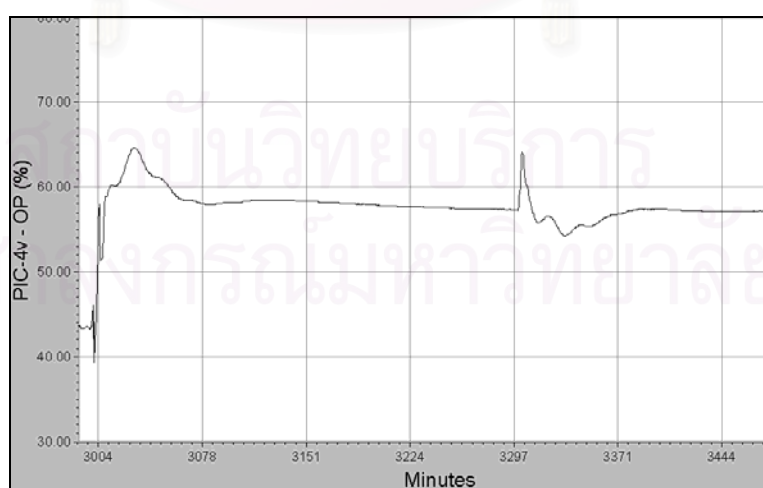
รูปที่ 4.118 อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง



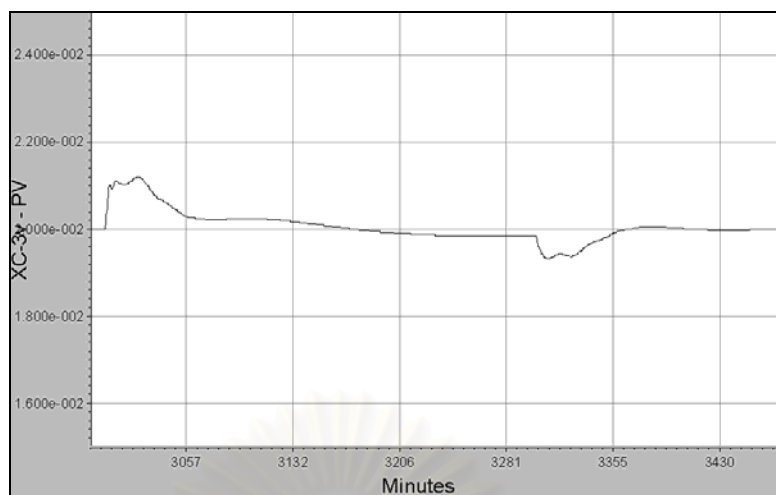
รูปที่ 4.119 ร้อยละการเปลี่ยนความดันของแก๊สภายในกระบวนการ



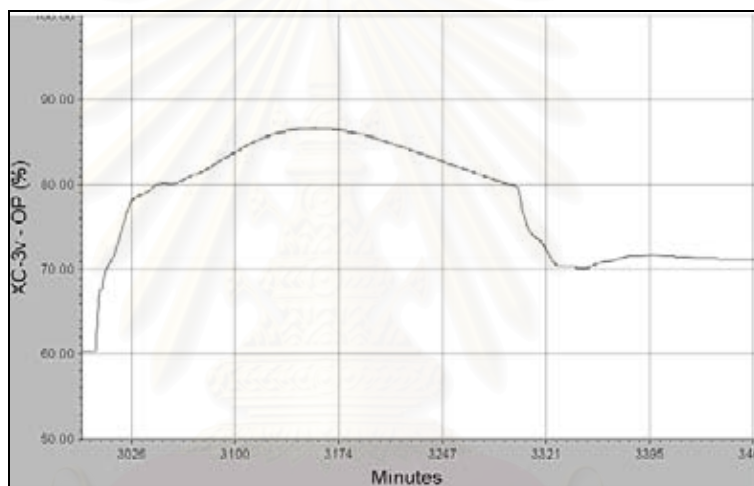
รูปที่ 4.120 ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ



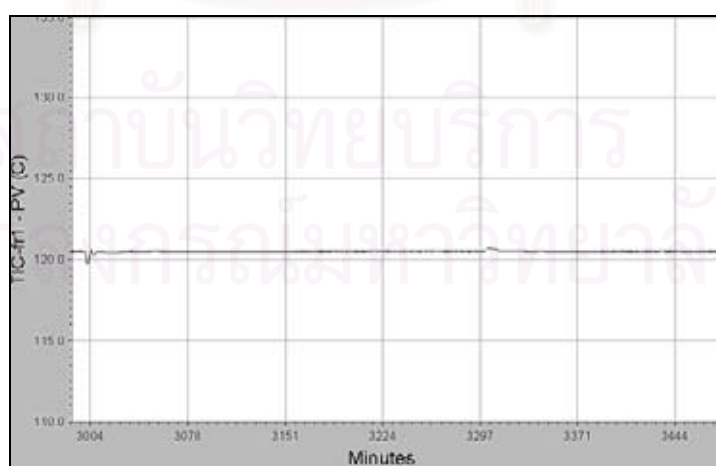
รูปที่ 4.121 ร้อยละการเปิดวาล์วพลังงานของเครื่องอัดไอ



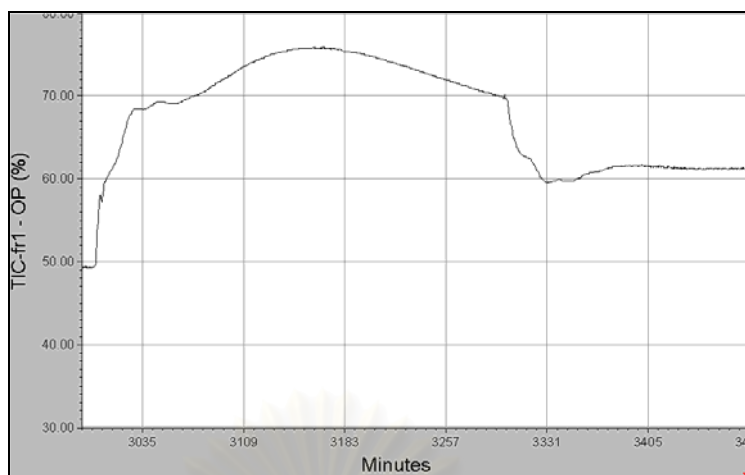
รูปที่ 4.122 ความเข้มข้นของไอโซพราพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดห่อ



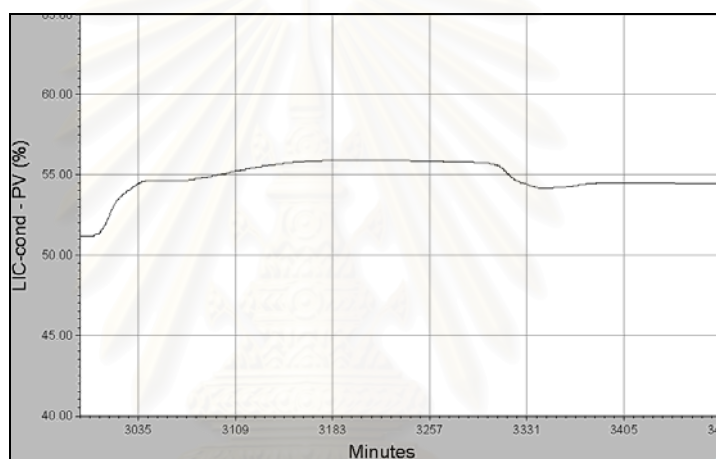
รูปที่ 4.123 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสแก๊นห่อ



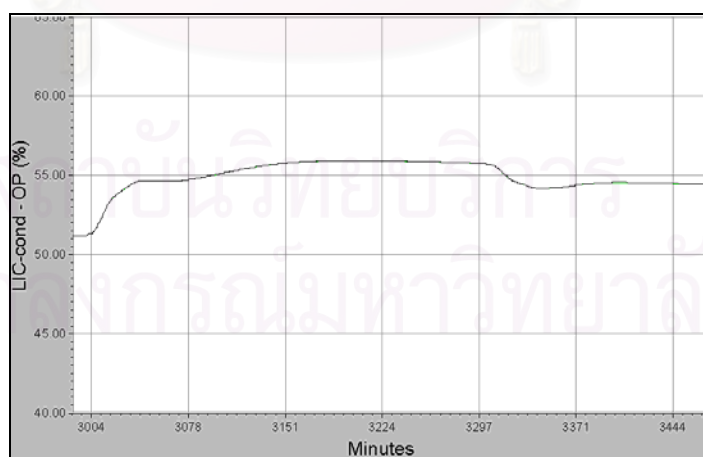
รูปที่ 4.124 อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิบัติการวัดความร้อน



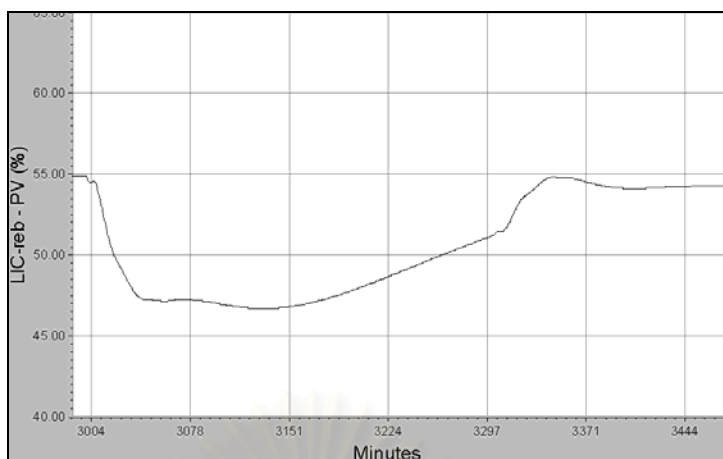
รูปที่ 4.125 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ



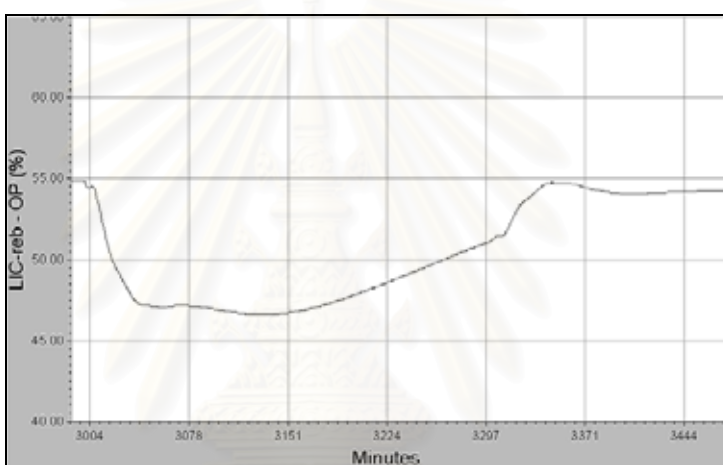
รูปที่ 4.126 ระดับของของเหลวขดหอ



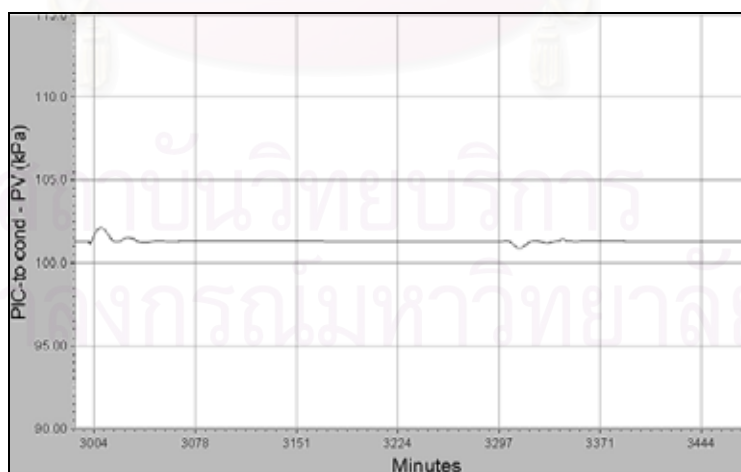
รูปที่ 4.127 ร้อยละการเปิดวาล์วอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์



รูปที่ 4.128 ระดับของของเหลวอดหอ

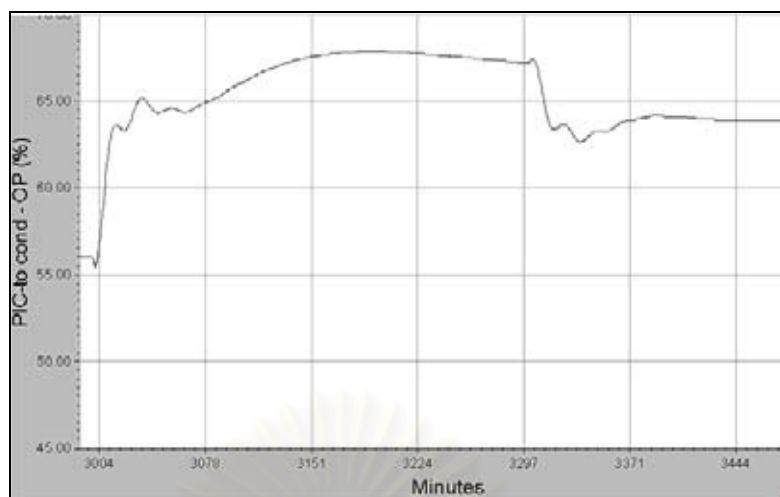


รูปที่ 4.129 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ



รูปที่ 4.130 ความดันของหอกลั่น





รูปที่ 4.131 ร้อยละการเปิดวาล์วภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น

#### 4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของโครงสร้างการควบคุม

##### 4.4.1 ความทนทานของโครงสร้างการควบคุม

ความทนทานของโครงสร้างการควบคุมหมายถึง ความสามารถของโครงสร้างการควบคุมในการรับการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยรบกวนภายนอกได้ในช่วงกว้างโดยที่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ได้ การทดสอบความทนทานของโครงสร้างการควบคุม 2 โครงสร้างมีวิธีการดังนี้

ก. กรณีทดสอบอุณหภูมิของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง ทำโดยเพิ่มค่าเป้าหมายของวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น รอจนกระบวนการเข้าสู่ภาวะคงตัว แล้วเพิ่มค่าเป้าหมายของวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงอีก จนได้ค่าเป้าหมายสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยที่โครงสร้างการควบคุมยังคงรักษาภาวะการดำเนินการได้อย่างมีเสถียรภาพ ส่วนค่าเป้าหมายของวงควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงอยู่ที่ภาวะดำเนินการปกติคือ 97 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ข. กรณีทดสอบอัตราการไหลของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง ทำโดยเพิ่มค่าเป้าหมายของวงควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น รอจนกระบวนการเข้าสู่ภาวะคงตัว แล้วเพิ่มค่าเป้าหมายของวงควบคุมอัตราการไหลไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงอีก จนได้ค่าเป้าหมายสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยที่โครงสร้างการควบคุมยังคงรักษาภาวะการดำเนินการได้อย่างมีเสถียรภาพ ส่วนค่าเป้าหมายของวงควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงอยู่ที่ภาวะดำเนินการปกติคือ 200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิและอัตราการไหลสูงสุดของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงที่ทั้งสองโครงสร้างยังสามารถรักษาเสถียรภาพของการดำเนินกระบวนการได้

กระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง	โครงสร้างที่การควบคุมแบบที่ 1	โครงสร้างที่การควบคุมแบบที่ 2
อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	210.10	211.16
อัตราการไหล ( $kmole/hr$ )	116.10	117.60

โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และ 2 สามารถเพิ่มกำลังการผลิตความร้อนจากปฏิกิริยาร้อนโดยการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงได้ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 สามารถเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงได้มากกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 เล็กน้อย ข้อจำกัดของโครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบอยู่ที่การควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ เนื่องจากโครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบเมื่อเพิ่มค่าเป้าหมายของวงควบคุมอุณหภูมิหรืออัตราการไหลของกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการไหลกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอเพิ่มขึ้นจนตัวแปรปรับกระบวนการได้แก่อัตราการไหลกระแสกันหอไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอได้ การที่โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 สามารถเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงได้มากกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรืออัตราการไหลในขนาดที่เท่ากัน การใช้อัตราการไหลกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง จะทำให้อัตราการไหลของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอและอัตราการไหลของแก๊สภายในกระบวนการเพิ่มขึ้นมากกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ซึ่งใช้พลังงานที่เข้าสู่กระบวนการทางเครื่องอัดไอเป็นตัวแปรปรับโดยอ้อม ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้ต้องเพิ่มอัตราการไหลของกระแสกันหอมากกว่าในการควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ ส่งผลให้วาล์วควบคุมอัตราการไหลกระแสกันหอของวงควบคุมความเข้มข้นไอโซโพรพานอลในโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 เปิดเต็มมาก่อนโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2

#### 4.4.2 ความเร็วในการปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย

ความเร็วในการปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายและความเร็วในการกำจัดผลของตัวแปรรบกวนของโครงสร้างการควบคุม สามารถพิจารณาได้จากค่าไอเอชอีรวมของวงควบคุมที่สำคัญ โครงสร้างการควบคุมที่ให้ค่าไอเอชอีน้อยแสดงถึงความสามารถในการปรับกระบวนการเข้า

สู่ค่าเป้าหมายและกำจัดผลของตัวแปรรบกวนได้อย่างรวดเร็ว ค่าไอเออีของแต่ละวงควบคุมและค่าไอเออีรวมของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และ 2 แสดงดังตารางที่ 4.3 –4.4

ตารางที่ 4.3 ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของการเพิ่มค่าเป้าหมายวงควบคุม อุณหภูมิของไอน้ำอุณหภูมิสูง 5 องศาเซลเซียส

ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (Integral of Absolute Value of Error, IAE)		
วงควบคุม	โครงสร้างการควบคุมแบบที่	
	1	2
อุณหภูมิกระแสไอน้ำอุณหภูมิสูง	4.24	5.82
อัตราการไหลกระแสไอน้ำอุณหภูมิสูง	0.36	0.36
การปนเปื้อนของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ	355.22	316.96
ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ	1.79	3.95
ความดันของหอกลิ้น	13.72	15.06
อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	5.34	5.90
ผลรวม	380.67	348.05

ตารางที่ 4.4 ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของการเพิ่มค่าเป้าหมายวงควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำอุณหภูมิสูง 9 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (Integral of Absolute Value of Error, IAE)		
วงควบคุม	โครงสร้างการควบคุมแบบที่	
	1	2
อุณหภูมิกระแสไอน้ำอุณหภูมิสูง	3.62	5.26
อัตราการไหลกระแสไอน้ำอุณหภูมิสูง	10.92	10.92
การปนเปื้อนของกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ	353.45	325.40
ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ	1.31	1.72
ความดันของหอกลิ้น	12.84	12.94
อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	4.95	4.80
ผลรวม	387.09	361.04

จากตารางที่ 4.3-4.4 พบว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 มีค่าไอเออีรวมน้อยกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ทั้งในแง่การเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง แต่ความ

แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ โดยเฉพาะวงควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดห่อมีค่าไอเอชสูงกว่วงควบคุมอื่นอย่างชัดเจน ดังนั้นวงควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดห่อจึงมีบทบาทสำคัญต่อการกำหนดความเร็วในการปรับกระบวนการ ความแตกต่างของค่าไอเอชรวมเพียงเล็กน้อยจึงไม่อาจเทียบเท่ากับเวลาในการปรับกระบวนการของวงควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดห่อ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าทั้งสองโครงสร้างการควบคุมมีความเร็วในการปรับกระบวนการใกล้เคียงกัน

#### 4.4.3 ค่าการตอบสนองสูงสุดของตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรควบคุม

โครงสร้างการควบคุมที่ดีควรมีค่าการตอบสนองสูงสุดต่ำ การที่ค่าการตอบสนองสูงสุดมีค่ามากแสดงถึงความเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายมาก ส่งผลให้การปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายเป็นไปได้ช้า รวมทั้งวาล์วควบคุมอาจเกิดสภาวะอิมิตัว จากกราฟการตอบสนองของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ต่อการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง พบว่าการปรับกระบวนการของวาล์วควบคุมและการตอบสนองของตัวแปรควบคุมแต่ละวงควบคุมเป็นไปอย่างรวดเร็ว และมีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน

#### 4.4.4 ประสิทธิภาพความร้อนและสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในกระบวนการจากภาวะพลวัต

พลังงาน (kW)	200 (°C)	205 (°C)		106 (kmol/hr)	
		โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
หม้อต้มซ้ำ	394.97	-1.32%	-0.84%	-1.54%	-1.17%
เครื่องควบแน่น	1119.67	14.34%	14.00%	14.47%	14.25%
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิต่ำ	749.10	12.90%	11.78%	13.34%	12.47%
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ	77.61	19.73%	13.97%	13.07%	8.53%
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง	65.78	7.21%	7.20%	9.27%	9.26%
เครื่องอัดไอ	20.99	17.92%	37.89%	15.39%	31.26%
ประสิทธิภาพความร้อน	5.75	5.71	5.75	5.81	5.84
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ	3.13	2.85	2.35	2.97	2.51

จากตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณภาระความร้อนของหม้อต้มฆ่าและเครื่องควบแน่นของ โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 มีค่ามากกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลภายในปั๊มความร้อนของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 เพิ่มขึ้นมากกว่าโครงสร้างการ ควบคุมแบบที่ 2 เนื่องจากโครงสร้างแบบที่ 2 ปรับอุณหภูมิของไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยใช้การ ปรับพลังงานจากเครื่องอัดไอแทนการปรับกระบวนการโดยใช้มวลสารโดยตรงดังโครงสร้างแบบที่ 1 จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของมวลสารภายในกระบวนการน้อยกว่า เมื่ออัตราการไหลที่ป้อนเข้าสู่ หอกถั่วน้อยกว่า ภาระความร้อนของหม้อต้มฆ่าและเครื่องควบแน่นที่จะใช้สำหรับปรับ กระบวนการจึงน้อยกว่าเช่นเดียวกับพลังงานจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิต่ำของ โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 มีค่ามากกว่าโครงสร้างแบบที่ 2 เนื่องจากอัตราการไหลกระแสกั้น หอทที่เพิ่มขึ้นมากกว่าสำหรับโครงสร้างแบบที่ 1 จึงทำให้ต้องใช้พลังงานจากกระแสไอน้ำด้าน อุณหภูมิต่ำมากกว่าในการรักษาอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน เมื่อพิจารณา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ โครงสร้างแบบที่ 1 มีการนำพลังงานย้อนกลับเข้าสู่ กระบวนการมากกว่าตามอัตราการไหลกระแสย้อนกลับที่เพิ่มขึ้นมากกว่า พลังงานที่เครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูงมีค่าเทียบเท่ากันเนื่องจากขนาดการเพิ่มของอุณหภูมิและอัตรา การไหลกระแสไอน้ำอุณหภูมิสูงควบคุมให้มีค่าคงที่ที่ค่าเดียวกัน ทั้งสองโครงสร้างการควบคุมให้ ประสิทธิภาพความร้อนใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของโครงสร้างแบบที่ 2 มี ค่าน้อยกว่าโครงสร้างแบบที่ 1 เนื่องจากโครงสร้างแบบที่ 2 ต้องใช้พลังงานจากเครื่องอัดไอในการ ควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงมากกว่าโครงสร้างแบบที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ในหัวข้อ 4.4.1-4.4.4 พบว่า โครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบมีสมรรถนะในการควบคุมใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาในแง่ของ ความทนทานของโครงสร้างการควบคุม ความเร็วในการปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ค่า การตอบสนองสูงสุดของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม และประสิทธิภาพความร้อน โดย โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 มีข้อได้เปรียบกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ตรงที่ใช้พลังงาน จากเครื่องอัดไอน้อยกว่าส่งผลดีต่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องอัดไอ ทำให้ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 สูงกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจนและออกแบบระบบควบคุม 2 โครงสร้างสำหรับปั๊มความร้อนโดยใช้หลักการออกแบบระบบควบคุมแบบแพลนท์ไวด์ที่นำเสนอโดยลูเบน (1999)

ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเริ่มดำเนินการที่ภาวะพลวัตพบว่า การควบคุมความดันของหอกลิ้นและความดันของแก๊สภายในกระบวนการมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อการดำเนินการปั๊มความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โครงสร้างการควบคุมสำหรับปั๊มความร้อน 2 โครงสร้างประกอบด้วยวงควบคุม 8 วงได้แก่ การควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง โดยปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง การควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยการปรับพลังงานของเครื่องอัดไอ การควบคุมความดันของหอกลิ้นโดยปรับภาระความร้อนของเครื่องควบแน่น การควบคุมความเข้มข้นของไอโซโพรพานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอดโดยการปรับอัตราการไหลกระแสกันหอด การควบคุมอุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนโดยปรับอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ การควบคุมระดับของเหลวยอดหอดและกันหอดโดยปรับอัตราการไหลกระแสรีฟลักซ์และภาระความร้อนของหม้อต้มซ้ำ โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 ทำการควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยการปรับอัตราการไหลกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ส่วนโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 ทำการควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยการควบคุมความดันของแก๊สภายในกระบวนการโดยปรับพลังงานของเครื่องอัดไอฟ้าวงควบคุมแบบขั้นลำดับ สมมติฐานของการออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 คือการควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงโดยปรับพลังงานจากเครื่องอัดไอโดยอ้อมนั้น น่าจะเพิ่มค่าเป้าหมายควบคุมอุณหภูมิหรืออัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงได้มากเนื่องจากใช้ตัวแปรปรับอิสระซึ่งสามารถปรับค่าได้ในช่วงกว้างกว่า

การเปรียบเทียบสมรรถนะของโครงสร้างการควบคุมทั้ง 2 แบบทำได้โดยเพิ่มค่าเป้าหมายวงควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น 5 องศาเซลเซียสและ 9 กิโลโมลต่อชั่วโมงตามลำดับ แล้วพิจารณาการตอบสนองของโครงสร้างการควบคุมดังนี้

1. ความทนทานของโครงสร้างการควบคุมต่อการเพิ่มอุณหภูมิหรืออัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง โครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิหรือ

- อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงได้ใกล้เคียงกัน โดยข้อจำกัดของการดำเนินการอยู่ที่วงควบคุมความเข้มข้นของไอโซโทปนอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ
2. ความเร็วในการปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายและกำจัดผลการรบกวนจากปัจจัยภายนอก โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 มีค่าไอเออี 380.67 และ 387.09 ส่วนโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 มีค่าไอเออี 348.05 และ 361.04 เมื่อเพิ่มค่าเป้าหมายวงควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงขึ้น 5 องศาเซลเซียสและ 9 กิโลโมลต่อชั่วโมงตามลำดับ โครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบมีค่าไอเออีรวมใกล้เคียงกัน แสดงว่ามีความเร็วในการปรับกระบวนการใกล้เคียงกัน
  3. ค่าการตอบสนองสูงสุดของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมของทั้งสองโครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกัน โครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบสามารถปรับกระบวนการได้อย่างราบเรียบ
  4. ประสิทธิภาพความร้อนและสัมประสิทธิ์สมรรถนะ โครงสร้างการควบคุมทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพความร้อนใกล้เคียงกัน ในขณะที่โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะต่ำกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1

#### ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาโครงสร้างการควบคุมหากลั่นแบบต่างๆ สำหรับป้อนความร้อน
2. หาภาวะที่เหมาะสมที่สุดทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการดำเนินการป้อนความร้อน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกริกชัย สุกาญจน์จที. 2538. อุณหพลศาสตร์สำหรับอุตสาหกรรมซีพีไอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยพลังงาน. 2545 การจำแนกความร้อนเหลือทิ้ง [Online]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยพลังงาน. แหล่งที่มา: <http://teenet.chula.ac.th>. [11 ธันวาคม 2545]
- พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์. 2543. พลศาสตร์กระบวนการ: การควบคุมกระบวนการ. กรุงเทพฯ: บริษัท ท. วัฒนาการพิมพ์ จำกัด.
- ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ. 2538. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มูลนิธิโลกสีเขียว. 2537. แร่ธาตุและพลังงาน. กรุงเทพฯ: บริษัท อมรินทร์ พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน).

### ภาษาอังกฤษ

- Brenner, S.S., and others. 2001. Hysys documentation suite. Canada: Hyprotech Ltd.
- Brodowicz, K., and Dyakowski, T. 1993. Heat pumps. Great Britain: Butterworth-Heinemann Ltd.
- Chung, Y., Kim, J.B., Yeo, K.Y. and Keun, H. 1997. Optimal design of a chemical heat pump using the 2-propanol/acetone/hydrogen system. Energy 22 no.5: 525-536.
- Gandia, L.M., and Montes, M. 1992. Effect of the design variables on the energy performance and size parameters of a heat transformer based on the system acetone/hydrogen/2-propanol. Int. J. Energy Res. 16: 851-864.
- Gaspillo, D.P.A., Abella, C.L., and Goto, S. 1998. Dehydrogenation of 2-propanol in reactive distillation column for chemical heat pump. Journal of Chemical Engineering of Japan. 31 no.3: 440-444.
- Gastauer, P., Kameyama, H., and Murata, K. 1995. Combination of the isopropanol/acetone/hydrogen cycle and the cyclohexane/benzene/hydrogen chemical heat pumps: Proposal and evaluation. Internation Symposium on Energy, Environment and Economics. Australia: The University of Melbourne.



- Herold, E.K., Radermacher, R., and Klein, A.S. 1996. Absorption chillers and heat pumps. United States of America: CRC Press, Inc.
- Kato, Y., Kameyama, H., and Saito, Y., 1986. Study of catalyst-assisted chemical heat pump with reaction couple of acetone hydrogenation 2-propanol dehydrogenation. Thermal Energy Storage. World Congress III of Chemical Engineering, Tokyo. 676-679.
- Kim, G.T., Yoo, K.Y., and Song, K.M. 1992. Chemical heat pump based on dehydrogenation and hydrogenation of i-propanol and acetone. Int. J. Energy Res. 16: 897-916.
- Luyben, L.W. 1999. Plantwide process control. United States of America: McGraw-Hill.
- Mooksuwan, W., and Kunar, S. 2000. Study on 2-propanol/acetone/hydrogen chemical heat pumps: endothermic dehydrogenation of 2-propanol. Int. J. Energy Res. 24: 1109-1122.
- Saito, Y., Yamashita, M., Ito, E., and Meng, N. 1994. Hydrogen production from 2-propanol as a key reaction for a chemical heat pump with reaction couple of 2-propanol dehydrogenation/acetone hydrogenation. Int. J. Hydrogen Energy. 19 no.3: 223-226.
- Sanders, R.D., Jr., Toth, W.J., Suci, D.F., and Wikoff, P.M. 1984. Survey and assessment of heat at reaction type chemical heat pumps. Informal Report EGG-PBS-6579. Idaho National Engineering Laboratory, USA.
- Seborg, D.E., Edgar, F.T., and Mellichamp, A.C. 1989. Process dynamics and control. New York: John Wiley.
- Stephanopoulos, G. 1984. Chemical process control: An introduction to theory and practice. United States of America: Prentice-Hall, Inc.
- Wentworth, W.E., and Chen, E. 1976. Simple thermal decomposition reactions for storage at solar thermal energy. Solar Energy. 18: 205-214.
- Wongsuwan, W., Kumar, S., Neveu, P., and Meunier, F. 2001. A review of chemical heat pump technology and application. Applied Thermal Engineering. 21: 1489-1519.
- Yu, Cheng-Ching. 1999. Autotuning of PID controllers: Relay feedback approach advances in industrial control. Great Britain: Springer.

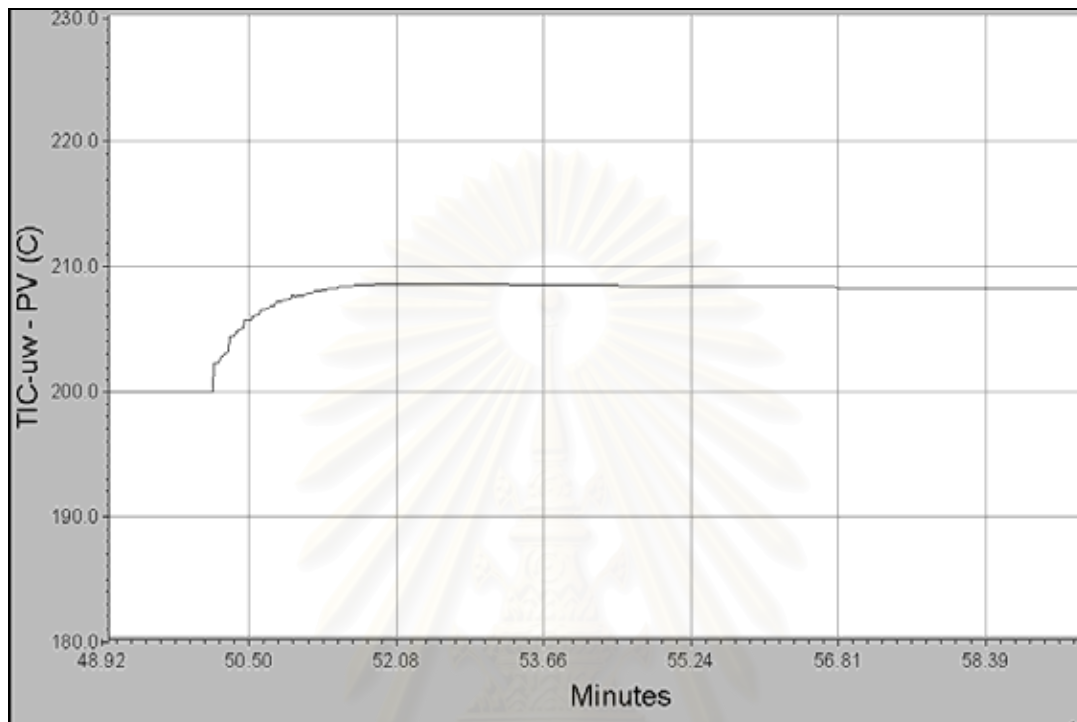


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ก1. ตัวอย่างการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมในหัวข้อ 3.6.1



รูปที่ ก1. กราฟการตอบสนองของอุณหภูมิไอน้ำ

ค่าอัตราขยายเชิงสถิติของอุณหภูมิไอน้ำและอัตราการไหลของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน,  $K_p$

$$K_p = \frac{(208.30 - 200.00)(^{\circ}C)}{(80.00 - 52.04)(\%OP)} = 0.297 \frac{(^{\circ}C)}{(\%OP)}$$

63.2% ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของอุณหภูมิไอน้ำคือ

$$0.632\Delta T = 205.246^{\circ}C$$

จากรูปที่ ก1. ค่าเวลาคงที่ของการตอบสนองของอุณหภูมิไอน้ำต่ออัตราการไหลของกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน,  $\tau_p$

$$\tau_p = 0.449 \text{ นาที}$$

ประมาณค่าเวลาหน่วงจาก

$$t_d = 0.25\tau_p = (0.25)(0.449) = 0.112 \text{ นาที}$$

จากสมการ 3.1-3.2

$$Kc = \frac{1}{0.279} \frac{0.449}{0.112} \left( 0.9 + \frac{0.112}{12(0.449)} \right) = 12.408$$

$$\tau_l = 0.112 \frac{30 + 3(0.112/0.449)}{9 + 20(0.112/0.449)} = 0.246$$

ก2. ตัวอย่างการคำนวณค่าไอเอชของวงควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1

ตารางที่ ก1. ตัวอย่างข้อมูลเชิงพลวัตของวงควบคุมอุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง

เวลา (วินาที)	ค่าเป้าหมาย ( $^{\circ}C$ )	ตัวแปรควบคุม ( $^{\circ}C$ )
180000	205.00	200.00
180020	205.00	201.41
180040	205.00	202.31
180060	205.00	202.68
180080	205.00	202.90

เริ่มการคำนวณที่เวลา 3000 นาที่ถึง 3400 นาที่ โดยทำการคำนวณทุกๆ 20 วินาที แล้วนำค่าทั้งหมดมารวมกันเป็นค่าไอเอชของวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงที่เวลา 180000-180020 วินาที

$$\text{ค่าไอเอช}_1 = \frac{|201.41 - 205.00|(20)}{205.00} = 0.35$$

ที่เวลา 180020-180040 วินาที

$$\text{ค่าไอเอช}_2 = \frac{|202.31 - 205.00|(20)}{205.00} = 0.26$$

นำค่าค่าไอเอช<sub>1</sub> และค่าไอเอช<sub>2</sub> รวมกันจนถึงเวลา 3400 นาที่จะได้ค่าไอเอชของวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง

### ก3. ลักษณะการทำงานของเครื่องควบคุม

ตารางที่ ก2. ลักษณะการทำงานของเครื่องควบคุม

วงควบคุม	ลักษณะการทำงานของเครื่องควบคุม
อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1)	กลับทิศ
อุณหภูมิกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (โครงสร้างการควบคุมแบบที่ 2)	กลับทิศ
อัตราการไหลกระแสไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง	กลับทิศ
ความดันของแก๊สภายในกระบวนการ	กลับทิศ
ความเข้มข้นของไอโซโทปฟานอลในกระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอ	ไปทางเดียวกัน
ความดันของหอกลั่น	ไปทางเดียวกัน
ระดับของของเหลวยอดหอ	ไปทางเดียวกัน
ระดับของของเหลวก้นหอ	ไปทางเดียวกัน
อุณหภูมิกระแสป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน	กลับทิศ

ภาคผนวก ข

ข1. ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ภาวะพลวัตที่เวลา 3000 นาทีของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เมื่อค่าเป้าหมายของวงควบคุมไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงมีค่า 200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ข1.1 หอกลับ

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ)		
— อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	74.27	74.15
— ความดัน ( $kPa$ )	105.23	105.22
— อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	51.13	51.09
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	6.03	6.02
— อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	22.68	22.67
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	22.43	22.38
ป้อน (จากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน)		
— อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	79.53	79.53
— ความดัน ( $kPa$ )	105.23	105.22
— อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	66.94	66.85
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	56.26	56.18
— อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	5.78	5.76
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	4.91	4.90
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ		
— อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	38.47	38.49
— ความดัน ( $kPa$ )	101.30	101.30
— อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	56.05	55.99
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	1.12	1.12
— อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	27.59	27.59
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	27.34	27.28

ตารางที่ ข1.1(ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
รีฟลักซ์		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	38.47	38.49
– ความดัน ( $kPa$ )	101.30	101.30
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	121.40	121.30
– อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	10.64	10.62
– อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	110.71	110.70
– อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ก้นหอ		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	83.07	83.07
– ความดัน ( $kPa$ )	108.28	108.28
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	62.03	61.95
– อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	61.17	61.08
– อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	0.87	0.86
– อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	0.00	0.00
ภาระความร้อนของเครื่องควบแน่น ( $kW$ )	1120.00	1119.00
ภาระความร้อนของหม้อต้มซ้ำ ( $kW$ )	395.00	394.70

ตารางที่ ข1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากหอกลั่น)		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	82.60	82.60
– ความดัน ( $kPa$ )	106.27	106.26
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	62.03	61.95
ไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ (ขาเข้า)		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	130.00	130.00
– ความดัน ( $kPa$ )	283.80	283.81
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	891.80	892.00

ตารางที่ ข1.2 (ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	120.53	120.49
– ความดัน ( $kPa$ )	106.11	106.10
ไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ (ขาออก)		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	90.19	90.18
– ความดัน ( $kPa$ )	283.50	283.51
พลังงาน ( $kW$ )	749.10	748.00

ตารางที่ ข1.3 เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	120.52	120.49
– ความดัน ( $kPa$ )	105.62	105.62
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	62.03	61.94
– อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	61.17	61.08
– อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	0.87	0.86
– อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	79.54	79.54
– ความดัน ( $kPa$ )	105.62	105.62
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	66.94	66.85
– อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	56.26	56.18
– อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	5.77	5.76
– อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	4.91	4.90
การเปลี่ยน (%)	8.03	8.03



ตารางที่ ข1.4 เครื่องอัดไอ

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	38.46	38.48
– ความดัน ( $kPa$ )	100.3	100.25
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	56.05	55.99
ขาออก		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	63.51	64.48
– ความดัน ( $kPa$ )	146.30	148.29
พลังงานของเครื่องอัดไอ ( $kW$ )	20.99	21.79

ตารางที่ ข1.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องอัดไอ)		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	63.50	64.48
– ความดัน ( $kPa$ )	145.24	147.30
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	56.05	55.99
ป้อน (จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง)		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	157.61	157.60
– ความดัน ( $kPa$ )	114.65	114.60
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	51.13	51.09
ป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	146.57	147.10
– ความดัน ( $kPa$ )	145.00	147.00
ป้อนหอกลับ		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	74.31	75.17
– ความดัน ( $kPa$ )	106.69	106.70
พลังงาน ( $kW$ )	77.61	76.82

ตารางที่ ข1.6 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	146.86	146.94
– ความดัน ( $kPa$ )	122.73	122.72
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	56.04	55.99
– อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	1.12	1.12
– อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	27.59	27.59
– อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	27.33	27.28
ผลิตภัณฑ์		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	221.34	221.35
– ความดัน ( $kPa$ )	122.73	122.72
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	51.13	51.09
– อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล ( $kmol/hr$ )	6.03	6.02
– อัตราการไหลของอะซีโตน ( $kmol/hr$ )	22.68	22.69
– อัตราการไหลของไฮโดรเจน ( $kmol/hr$ )	22.42	22.38
การเปลี่ยน (%)	17.79	17.77

ตารางที่ ข1.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน)		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	221.33	221.30
– ความดัน ( $kPa$ )	121.69	121.70
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	51.13	51.09
ไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (ขาเข้า)		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	129.93	129.90
– ความดัน ( $kPa$ )	96.29	96.29
– อัตราการไหล ( $kmol/hr$ )	97.00	97.00

ตารางที่ ข1.7 (ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	157.62	157.60
– ความดัน ( $kPa$ )	115.70	115.70
ไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (ขาออก)		
– อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	200.00	200.00
– ความดัน ( $kPa$ )	95.82	95.82
พลังงาน ( $kW$ )	65.78	65.79



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข2. ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ภาวะพลวัตที่เวลา 4000 นาทีของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เมื่อค่าเป้าหมายของวงควบคุมอุณหภูมิไอน้ำด้านอุณหภูมิสูงมีค่า 205 องศาเซลเซียสโดยนำเสนอในรูปร้อยละการเปลี่ยนจากภาวะดำเนินการปกติในหัวข้อ ข1.

ตารางที่ ข2.1 หกกลั่น

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ)		
— อุณหภูมิ	1.47	6.85
— ความดัน	0.44	0.45
— อัตราการไหล	18.68	18.02
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.08	11.27
— อัตราการไหลของอะซิโตน	5.46	5.44
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	33.82	32.58
ป้อน (จากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน)		
— อุณหภูมิ	0.96	0.84
— ความดัน	0.20	0.19
— อัตราการไหล	12.76	11.67
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.28	11.26
— อัตราการไหลของอะซิโตน	19.16	17.15
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	10.70	9.92
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ		
— อุณหภูมิ	-6.02	-5.77
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	17.96	17.30
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	17.94	17.30
— อัตราการไหลของอะซิโตน	6.38	6.23
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	29.66	28.48

ตารางที่ ข2.1(ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
รีฟลักซ์		
— คุณหมุมิ	-6.02	-5.77
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	6.51	6.38
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	23.54	22.65
— อัตราการไหลของอะซีโตน	4.87	4.82
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	11.86	11.56
ผลิตภัณฑ์กั้นหอ		
— คุณหมุมิ	-0.44	-0.38
— ความดัน	0.14	0.13
— อัตราการไหล	12.95	11.81
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.18	11.16
— อัตราการไหลของอะซีโตน	67.20	58.24
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	0.00	0.00
ภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น	14.34	14.00
ภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ	-1.32	-0.84

ตารางที่ ข2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากหอกลั่น)		
— คุณหมุมิ	-0.44	-0.38
— ความดัน	0.14	0.13
— อัตราการไหล	12.95	11.81
ไอน้ำด้านคุณหมุมิต่ำ (ขาเข้า)		
— คุณหมุมิ	0.00	0.00
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	18.42	16.42

ตารางที่ ข2.2 (ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน		
— อุณหภูมิ	-0.04	0.01
— ความดัน	0.20	0.19
ไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ (ขาออก)		
— อุณหภูมิ	1.98	1.81
— ความดัน	0.70	0.62
พลังงาน	12.90	11.78

ตารางที่ ข2.3 เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
— อุณหภูมิ	-0.04	-0.01
— ความดัน	0.20	0.19
— อัตราการไหล	12.93	11.81
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.17	11.16
— อัตราการไหลของอะซีโตน	67.19	58.24
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์		
— อุณหภูมิ	0.96	0.84
— ความดัน	0.20	0.19
— อัตราการไหล	12.76	11.67
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.28	11.26
— อัตราการไหลของอะซีโตน	19.16	17.15
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	10.70	9.92
การเปลี่ยนแปลง	-1.36	-1.18

ตารางที่ ข2.4 เครื่องอัดไอ

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
— อุณหภูมิ	-6.02	-5.77
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	17.96	17.30
ขาออก		
— อุณหภูมิ	-1.78	5.61
— ความดัน	0.01	6.91
พลังงานของเครื่องอัดไอ	17.92	37.89

ตารางที่ ข2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องอัดไอ)		
— อุณหภูมิ	-1.78	5.61
— ความดัน	0.00	6.91
— อัตราการไหล	17.96	17.30
ป้อน (จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง)		
— อุณหภูมิ	3.95	3.87
— ความดัน	2.24	2.18
— อัตราการไหล	18.68	18.02
ป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน		
— อุณหภูมิ	2.92	3.19
— ความดัน	3.31	3.21
ป้อนหอกถั่ว		
— อุณหภูมิ	1.47	6.85
— ความดัน	0.44	0.45
พลังงาน	19.73	13.97

ตารางที่ ข2.6 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
— อุณหภูมิ	2.92	3.19
— ความดัน	3.31	3.22
— อัตราการไหล	17.98	17.31
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	17.96	17.30
— อัตราการไหลของอะซีโตน	6.39	6.24
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	29.68	28.50
ผลิตภัณฑ์		
— อุณหภูมิ	1.49	1.53
— ความดัน	3.31	3.21
— อัตราการไหล	18.68	18.02
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.08	11.27
— อัตราการไหลของอะซีโตน	5.46	5.45
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	33.83	32.58
การเปลี่ยน	4.05	3.45

ตารางที่ ข2.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน)		
— อุณหภูมิ	1.49	1.53
— ความดัน	3.31	3.21
— อัตราการไหล	18.68	18.02
ไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (ขาเข้า)		
— อุณหภูมิ	0.00	0.00
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	0.00	0.00



ตารางที่ ข2.7 (ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ		
– อุณหภูมิ	3.95	3.87
– ความดัน	2.24	2.18
ไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (ขาออก)		
– อุณหภูมิ	2.50	2.50
– ความดัน	0.00	0.00
พลังงาน	7.21	7.20



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข3. ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ภาวะพลวัตเป็นเวลา 4000 นาทีของโครงสร้างการควบคุมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เมื่อค่าเป้าหมายของวงควบคุมอัตราการไหลได้น้ำด้านอุณหภูมิสูงมีค่า 106 กิโลโมลต่อชั่วโมงโดยนำเสนอในรูปร้อยละการเปลี่ยนจากภาวะดำเนินการปกติในหัวข้อ ข1.

ตารางที่ ข3.1 หอกถัน

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ)		
— อุณหภูมิ	0.46	4.83
— ความดัน	0.37	0.38
— อัตราการไหล	15.98	15.50
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.01	11.41
— อัตราการไหลของอะซิโตน	3.17	3.18
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	29.99	29.09
ป้อน (จากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน)		
— อุณหภูมิ	0.94	0.83
— ความดัน	0.19	0.19
— อัตราการไหล	13.20	12.35
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.74	11.94
— อัตราการไหลของอะซิโตน	19.42	17.88
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	11.20	10.59
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ		
— อุณหภูมิ	-5.81	-5.62
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	15.54	15.06
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	15.53	15.06
— อัตราการไหลของอะซิโตน	4.59	4.49
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	26.60	25.74

ตารางที่ ข3.1(ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
รีฟลักซ์		
— คุณหมุมิ	-5.81	-5.61
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	6.60	6.52
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	22.99	22.33
— อัตราการไหลของอะซีโตน	5.03	5.01
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	11.80	11.60
ผลิตภัณฑ์กั้นหอ		
— คุณหมุมิ	-0.43	-0.38
— ความดัน	0.13	0.13
— อัตราการไหล	13.35	12.51
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.61	11.85
— อัตราการไหลของอะซีโตน	66.04	59.32
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	0.00	0.00
ภาวะความร้อนของเครื่องควบแน่น	14.47	14.25
ภาวะความร้อนของหม้อต้มซ้ำ	-1.54	-1.17

ตารางที่ ข3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้ง

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากหอกลั่น)		
— คุณหมุมิ	-0.43	-0.38
— ความดัน	0.13	0.13
— อัตราการไหล	13.35	12.51
ไอน้ำด้านคุณหมุมิต่ำ (ขาเข้า)		
— คุณหมุมิ	0.00	0.00
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	18.94	17.63

ตารางที่ ข3.2 (ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อนเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน		
— อุณหภูมิ	0.00	-0.01
— ความดัน	0.19	0.19
ไอน้ำด้านอุณหภูมิต่ำ (ขาออก)		
— อุณหภูมิ	2.08	1.94
— ความดัน	0.72	0.66
พลังงาน	13.34	12.47

ตารางที่ ข3.3 เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
— อุณหภูมิ	0.00	-0.01
— ความดัน	0.19	0.19
— อัตราการไหล	13.35	12.51
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.61	11.84
— อัตราการไหลของอะซีโตน	66.05	59.32
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์		
— อุณหภูมิ	0.94	0.83
— ความดัน	0.19	0.19
— อัตราการไหล	13.20	12.35
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.74	11.94
— อัตราการไหลของอะซีโตน	19.42	17.88
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	11.20	10.59
การเปลี่ยนแปลง	-1.29	-1.13

ตารางที่ ข3.4 เครื่องอัดไอ

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
— อุณหภูมิ	-5.81	-5.62
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	15.54	15.06
ขาออก		
— อุณหภูมิ	-1.74	4.21
— ความดัน	0.01	5.56
พลังงานของเครื่องอัดไอ	15.39	31.26

ตารางที่ ข3.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องอัดไอ)		
— อุณหภูมิ	-1.74	4.21
— ความดัน	0.01	5.56
— อัตราการไหล	15.54	15.06
ป้อน (จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง)		
— อุณหภูมิ	1.56	1.50
— ความดัน	1.79	1.75
— อัตราการไหล	15.98	15.50
ป้อนเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน		
— อุณหภูมิ	0.79	1.01
— ความดัน	2.66	2.60
ป้อนหอกถัน		
— อุณหภูมิ	0.46	4.83
— ความดัน	0.37	0.38
พลังงาน	13.07	8.53

ตารางที่ ข3.6 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน		
— อุณหภูมิ	0.79	1.01
— ความดัน	2.66	2.60
— อัตราการไหล	15.56	15.07
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	15.54	15.06
— อัตราการไหลของอะซีโตน	4.60	4.50
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	26.62	25.76
ผลิตภัณฑ์		
— อุณหภูมิ	0.94	0.97
— ความดัน	2.66	2.60
— อัตราการไหล	15.98	15.50
— อัตราการไหลของไอโซโพรพานอล	12.01	11.41
— อัตราการไหลของอะซีโตน	3.17	3.19
— อัตราการไหลของไฮโดรเจน	30.00	29.09
การเปลี่ยน	6.30	5.82

ตารางที่ ข3.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอุณหภูมิสูง

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อน (จากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน)		
— อุณหภูมิ	0.94	0.97
— ความดัน	2.66	2.60
— อัตราการไหล	15.98	15.50
ไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (ขาเข้า)		
— อุณหภูมิ	0.00	0.00
— ความดัน	0.00	0.00
— อัตราการไหล	9.28	9.28

ตารางที่ ข3.7 (ต่อ)

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
ป้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในกระบวนการ		
– อุณหภูมิ	1.56	1.50
– ความดัน	1.79	1.75
ไอน้ำด้านอุณหภูมิสูง (ขาออก)		
– อุณหภูมิ	0.00	-0.01
– ความดัน	9.28	9.28
พลังงาน	9.27	9.26



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววราพร กิติเกียรติโสภณ เกิดที่กรุงเทพมหานคร วันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ. 2518  
สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลง-  
กรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย