การจำลองเชิงพลวัตและระบบควบคุมสำหรับการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

นายธนภัทร วโนทยาโรจน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DYNAMIC SIMULATION AND CONTROL SYSTEM FOR CHEMICAL LOOPING COMBUSTION

Mr. Thanapat Wanotayaroj

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองเชิงพลวัตและระบบควบคุมสำหรับการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง
โดย	นายธนภัทร วโนทยาโรจน์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

-- คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

-- ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

-- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

-- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

-- กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

-- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธนภัทร วโนทยาโรจน์ : การจำลองเชิงพลวัตและระบบควบคุมสำหรับการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง. (DYNAMIC SIMULATION AND CONTROL SYSTEM FOR CHEMICAL LOOPING COMBUSTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นวิธีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สหลังการเผาไหม้ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยสองส่วนคือเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงและโลหะออกไซด์ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นความร้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้อย่างง่ายด้วยวิธีการควบแน่น โลหะออกไซด์ที่ถูกทำปฏิกิริยาแล้วจะถูกหมุนเวียนไปยังเครื่องปฏิกรณ์อากาศเพื่อทำการฟื้นฟูสภาพโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยอากาศก่อนจะหมุนเวียนกลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงในระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและการพัฒนาแบบจำลองเชิงพลวัตสำหรับกระบวนการเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (ดาวน์เนอร์) ดำเนินการในช่วงการไหลฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ (ไรเซอร์) ดำเนินการในช่วงการไหลแบบฟลูอิไดเซชันความเร็วสูง โดยมีตัวแปรควบคุมภายในกระบวนการได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดทั้งสองเครื่อง ความดันและระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำ ทำงานร่วมกับตัวแปรปรับ ได้แก่ อัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการป้อนไหลของแก๊สและของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำเพื่อการควบคุมกระบวนการโดยใช้เครื่องควบคุมชนิดพีไอดี พารามิเตอร์เครื่องควบคุมจะถูกปรับแต่งและทดสอบสมรรถนะ ความทนทานต่อตัวแปรรบกวน ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนถูกใช้ในการตรวจสอบความสามารถของระบบควบคุม

สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	....

6071945423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORD: Chemical looping combustion, Fluidized bed reactors, Aspen Dynamics, Dynamic simulation

Thanapat Wanotayaroj : DYNAMIC SIMULATION AND CONTROL SYSTEM FOR CHEMICAL LOOPING COMBUSTION. Advisor: Prof. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D.

Chemical looping combustion (CLC) is a technique for separating carbon dioxide from flue gas. It consists of two main processes: a fuel reactor and an air reactor. In the fuel reactor, fuel reacts with solid metal oxide particles to produce heat, CO_2 and H_2O vapor which later can be easily separated by the condensation. The reacted solid metal is then sent to the air. The reacted solid metal is then sent to the air reactor for regenerating via an oxidation reaction with air before being returned to fuel reactor. In this study, these reactors in the CLC system are integrated as a circulating fluidized bed system and a dynamic model has been developed for the system. The fuel reactor (or downer) operates in bubbling fluidization regime where the air reactor (or riser) operates in fast fluidization regime. Using the developed dynamic model, the transient responses of various control variables such as the temperature of two fluidized bed reactors, pressure and the liquid level of a condenser have been controlled by manipulating variables such as heat transfer rates of the reactors, gas outlet flow rate and liquid outlet flow rate of the condenser. A proportional-integral-derivative (PID) controller was tuned for controlling purpose. The integral of absolute value of error (IAE) is used to evaluate the control system performance

Field of Study:	Chemical Technology	Student's Signature ....
Academic Year:	2018	Advisor's Signature ....
		Co-advisor's Signature ....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ สั่งสอน และอบรมรวมถึงแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานและการพัฒนาศักยภาพของผู้วิจัยจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ลงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการ รศ.ดร.ประพันธ์ คูชลธารา และรศ.ดร.ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการศึกษา ตลอดจนสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยและการนำเสนอผลงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ

ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อบรมสั่งสอนตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำงานและการใช้ชีวิตต่อไปในวันข้างหน้า

ขอขอบคุณ เพื่อนๆทุกคนในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่ได้ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่ง เป็นพลังและแรงกระตุ้นที่ผลักดันให้ผู้วิจัยได้ดีตลอดการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ธนภัทร วโนทยาโรจน์

สารบัญ

หน้า

....ค

บทคัดย่อภาษาไทย ....ค

....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...ง

กิตติกรรมประกาศ..จ

สารบัญ ....ฉ

สารบัญภาพ ....ฎ

สารบัญตาราง ....ณ

1 บทที่ 1 บทนำ...1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา...1

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย...3

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย 3

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย 4

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย...4

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนองานวิจัย...5

2 บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..7

2.1 ปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming) 7

2.2 เทคโนโลยีการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage technology)..7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง (Chemical looping combustion)....8

2.3.1 ส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์ 9

2.3.1.1 เตาปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Fuel reactor)....9

2.3.1.2 เตาปฏิกรณ์อากาศ (Air reactor)....9

2.3.2 ตัวพาออกซิเจน (Oxygen carrier)....10

2.4 ฟลูอิไดเซชัน (Fluidization) 10

2.5 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน 10

2.6 ลักษณะการไหลเฉพาะของการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด 12

2.7 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส 13

2.8 แบบจำลองของเดวิดสัน (Davidson model) 14

2.9 แบบจำลองสองวัฏภาคอย่างง่าย (The simple two-phase model)....14

2.10 แบบจำลองของ Kunii และ Levenspiel (K-L model)....14

2.11 การจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี 17

2.12 ระบบควบคุมกระบวนการ....18

2.13 องค์ประกอบของระบบควบคุม....18

2.14 กระบวนการควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable control) 19

2.15 เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array)....20

2.16 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม....21

2.17 วิธีการสัดส่วนลดทอนเศษหนึ่งส่วนสี่ (Quarter Decay Ratio) 22

2.18 การวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการควบคุมด้วยค่าไอเออี....24

2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....24

3 บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย....28

3.1 แบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงในภาวะคงตัว 28

3.2 เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 เครื่องปฏิกรณ์อากาศ 29
3.4 ปฏิกิริยารีดักชันและปฏิกิริยาออกซิเดชัน 30
3.5 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน 32
3.6 การจำลองฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส 33
3.7 การจำลองฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูง 35
3.8 เครื่องควบแน่นไอน้ำ 36
3.9 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงขนาด 65 เมกกะวัตต์ 36
3.10 กระบวนเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงที่ภาวะพลวัต 37
3.11 การหาขนาดของอุปกรณ์การผลิต 37
3.12 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ 39
3.13 ขั้นตอนการจำลองกระบวนการเชิงพลวัต 40
4 บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 41
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ 41
4.2 การวิเคราะห์การจำลองกระบวนการเชิงพลวัต 42
4.3 การศึกษาคู่ตัวแปรปรับ - ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม 46
4.4 การปรับแต่งค่าเครื่องควบคุม 48
4.5 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่อกระบวนการควบคุม 49
4.5.1 การจำลองสถานการณ์ปรับเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 50
4.5.2 การจำลองสถานการณ์ปรับลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 52
4.5.3 การจำลองสถานการณ์ปรับเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ 54
4.5.4 การจำลองสถานการณ์ปรับลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ 56
4.6 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง 58
4.6.1 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.6.2 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 61

4.6.3 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 63

4.6.4 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง....65

4.6.5 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ 67

4.6.6 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของ เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ....69

4.6.7 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ 71

4.6.8 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ....73

4.6.9 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ 75

4.6.10 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ 77

4.6.11 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ 79

4.6.12 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ 82

4.7 การวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการควบคุมด้วยค่าไอเออี (Integral of Absolute value of Error: IAE)....84

4.7.1 ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (TC1)....85

4.7.2 ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ (TC2)....86

4.7.3 ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ (LC1) 88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.7.4 ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ (PC1)......................89

4.7.5 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง.............91

5 บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย..92

5.1 สรุปผลงานวิจัย...92

5.2 ข้อเสนอแนะ..94

6 ภาคผนวก...96

ภาคผนวก ก...97

ภาคผนวก ข... 101

ภาคผนวก ค... 102

บรรณานุกรม.. 106

ประวัติผู้เขียน.. 110

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับและจัดเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 8

รูปที่ 2.2 กระบวนการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงแบบเคมิคอลลูปปิง 9

รูปที่ 2.3 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชันแบบต่างๆ...10

รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชันแบบต่างๆ 12

รูปที่ 2.5 ฟองแก๊สในกระบวนการตามแบบจำลอง K-L 15

รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบเบดหมุนเวียน...33

รูปที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ที่ภาวะพลวัต..39

รูปที่ 4.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทนในละชั้นของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 41

รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทนของแบบจำลองกระบวนการและการทดลอง 42

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์และแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีจากการทดลองของ Abad และคณะ 43

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยารีดักชันกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงของโลหะนิกเกิลออกไซด์และแก๊สมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง...44

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยารีดักชันกับร้อยละการเปลี่ยนแปลง ของโลหะนิกเกิลและแก๊สออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ..45

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ที่ปรับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีและแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีจากการทดลองของ Abad และคณะ 45

รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีซิกเลอร์-นิโคล และวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีไทเรียส-ลูเบน 50

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.1 51

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.1 51

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.1 52

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.1 52

รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.2 53

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.2 53

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.2 54

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.2 54

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.3 55

รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.3 55

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.3 56

รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.3 56

รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.4 57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.4 57

รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.4 58

รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.4 58

รูปที่ 4.24 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.1....................59

รูปที่ 4.25 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.1....................60

รูปที่ 4.26 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.1....................60

รูปที่ 4.27 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.1....................61

รูปที่ 4.28 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.2....................62

รูปที่ 4.29 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.2....................62

รูปที่ 4.30 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.2....................63

รูปที่ 4.31 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.2....................63

รูปที่ 4.32 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3....................64

รูปที่ 4.33 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3....................64

รูปที่ 4.34 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3....................65

รูปที่ 4.35 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3....................65

รูปที่ 4.36 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.4....................66

รูปที่ 4.37 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.4....................66

รูปที่ 4.38 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.4....................67

รูปที่ 4.39 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.4....................67

รูปที่ 4.40 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.5....................68

รูปที่ 4.41 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.5....................68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.42 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.5 69
รูปที่ 4.43 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.5 69
รูปที่ 4.44 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.6 70
รูปที่ 4.45 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.6 70
รูปที่ 4.46 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.6 71
รูปที่ 4.47 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.6 71
รูปที่ 4.48 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.7 72
รูปที่ 4.49 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.7 72
รูปที่ 4.50 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.7 73
รูปที่ 4.51 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.7 73
รูปที่ 4.52 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.8 74
รูปที่ 4.53 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.8 74
รูปที่ 4.54 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.8 75
รูปที่ 4.55 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.8 75
รูปที่ 4.56 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.9 76
รูปที่ 4.57 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.9 76
รูปที่ 4.58 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.9 77
รูปที่ 4.59 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.9 77
รูปที่ 4.60 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.10 78
รูปที่ 4.61 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.10 78
รูปที่ 4.62 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.10 79
รูปที่ 4.63 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.10 79
รูปที่ 4.64 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.11 80

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.65 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.11 81

รูปที่ 4.66 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.11 81

รูปที่ 4.67 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.11 82

รูปที่ 4.68 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.12 83

รูปที่ 4.69 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.12................83

รูปที่ 4.70 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.12 84

รูปที่ 4.71 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.12 84

รูปที่ 4.72 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12..86

รูปที่ 4.73 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12...87

รูปที่ 4.74 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12..89

รูปที่ 4.75 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12..90

รูปที่ 4.76 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมในการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12...91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สูตรในการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์หรือโดยวิธีทำวงควบคุมแบบปิดให้ได้สัดส่วนลดทอนเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ 23

ตารางที่ 2.2 สูตรในการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์หรือโดยวิธีทำวงควบคุมแบบปิดให้ได้สัดส่วนลดทอนเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ 23

ตารางที่ 2.3 สูตรในการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์หรือโดยวิธีทำวงควบคุมแบบเปิดให้ได้สัดส่วนลดทอนเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ 24

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 29

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์อากาศ 30

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรจลนศาสตร์ของปฏิกิริยารีดักชันและปฏิกิริยาออกซิเดชัน 32

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 32

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 35

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงขนาด 65 เมกกะวัตต์ 36

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์อากาศขนาด 65 เมกกะวัตต์ 36

ตารางที่ 3.8 อุปกรณ์ภายในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง 38

ตารางที่ 3.9 อุปกรณ์ภายในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงขนาด 65 เมกกะวัตต์ 38

ตารางที่ 4.1 วงควบคุมกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง 46

ตารางที่ 4.2 เกนสัมพัทธ์ของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง 47

ตารางที่ 4.3 ความหมายของรหัส C และ M ในตารางที่ 4.2 48

ตารางที่ 4.4 การหาค่าตัวแปรควบคุมด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคล 49

ตารางที่ 4.5 การหาค่าตัวแปรควบคุมด้วยวิธีของไทเรียส-ลูเบน 49

ตารางที่ 4.6 สรุปผลผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดระยะเวลาการดำเนินการในแต่ละเครื่องควบคุมเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ 4.6.1 – 4.6.12 85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming) ส่งผลกระทบต่อมนุษยชาติเป็นอย่างมาก ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล น้ำมัน ถ่านหินและแก๊สธรรมชาติ การขนส่ง และการผลิตจากภาคอุตสาหกรรม ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ

เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเทคนิคที่สามารถดักจับการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยการใช้พลังงานเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมาจากการผลิตกระแสไฟฟ้า และโรงงานอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของการเผาไหม้ที่สามารถแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้ได้โดยง่าย โดยจะศึกษาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด สำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ระหว่างโลหะออกไซด์กับเชื้อเพลิงฟอสซิลในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้ง่ายด้วยวิธีการควบแน่น และโลหะออกไซด์ที่สูญเสียออกซิเจนไปแล้ว จะถูกแยกออกจากวัฏภาคแก๊สด้วยไซโคลนโดยอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วง หลังจากนั้น โลหะออกไซด์จะถูกคืนสภาพด้วยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ทำให้ได้โลหะออกไซด์ที่สามารถนำกลับไปทำปฏิกิริยาเผาไหม้รอบใหม่ได้อีกครั้ง

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีความพยายามสร้างแบบจำลองระบบฟลูอิไดเซชันด้วยโปรแกรมต่างๆ เพื่อใช้ในการออกแบบกระบวนการ โดยแบ่งขอบเขตของการศึกษาออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การศึกษาในระดับมหภาค (Macro scale) และการศึกษาระดับจุลภาค (Micro scale) เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกันจะให้ผลที่สอดคล้องกัน [1, 2] แต่ไม่เหมือนกันทั้งหมด เนื่องจากว่าการศึกษาในระดับมหภาคมักละเลยผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) ภายในกระบวนการ [3] ซึ่งไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง และแตกต่างกับการศึกษาในระดับจุลภาค ที่เน้นศึกษาถึง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปรากฏการณ์การถ่ายโอนโมเมนตัม ความร้อนและมวลสารภายในระบบ ทำให้ระบบมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าในระดับมหภาค [3]

ในการศึกษาระดับมหภาค แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของกระบวนการ ทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency) และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [4] ซึ่งถือเป็นวัตถุประสงค์หลักในการสร้างแบบจำลองกระบวนการ แต่ในการจำลองระบบฟลูอิไดเซชันนั้น ผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์เป็นปัจจัยสำคัญที่ไม่ควรละเลย จึงมีการศึกษาการสร้างแบบจำลองระบบฟลูอิไดเซชัน โดยการแบ่งเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดเป็นส่วนย่อยๆ [5] เพื่อจำแนกระบบออกตามการเปลี่ยนแปลงของอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น

การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมแอสเพนพลัส เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัย ซึ่งใช้สมการดุลมวลสารและพลังงานในการคำนวณ โดยมีงานวิจัยที่ใช้โปรแกรมนี้ในการศึกษากระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ในระบบฟลูอิไดเซชัน [6] ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์อากาศที่ดำเนินการในภาวะฟลูอิไดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization) และเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่ดำเนินการในภาวะฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling bed) อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นนั้นเป็นแบบจำลองสำหรับภาวะคงตัว (Steady state) เท่านั้น

เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงภายในกระบวนการซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยภายนอก แบบจำลองกระบวนการเชิงพลวัตจึงมีความสำคัญมากในการออกแบบกระบวนการ เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวจะช่วยเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงภาวะต่างๆของระบบ และเริ่มมีผู้ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink [7] อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองกระบวนการเชิงพลวัตที่มีการติดตั้งระบบควบคุม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาแบบจำลองเชิงพลวัตด้วยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัตของระบบฟลูอิไดเซชันภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดและการกำหนดสถานการณ์จำลองต่างๆ ทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม จากนั้นจะได้นำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ผลตัวแปรเชิงลึกเพื่อปรับปรุงและออกแบบระบบควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์อากาศและเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตขององค์ประกอบแต่ละส่วนของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

2) เพื่อออกแบบและทดสอบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) พัฒนาแบบจำลองเชิงพลวัตสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

2) ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตขององค์ประกอบแต่ละส่วนของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยภายนอก

3) ออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง เพื่อให้ได้พลังงานขนาด 65 เมกกะวัตต์

4) เลือกชนิดและพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเครื่องควบคุมชนิดพีไอ และเครื่องควบคุมชนิดพีไอดี

5) ตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างควบคุม (Control Structure)

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1) งานวิจัยส่วนแรกเป็นการจำลองส่วนเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง และเครื่องปฏิกรณ์อากาศในภาวะคงตัว ที่มีผลของอุทกพลศาสตร์และจลนศาสตร์

2) งานวิจัยส่วนที่สองเป็นการจำลองส่วนเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง และเครื่องปฏิกรณ์อากาศในภาวะพลวัต เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ในการจำลองอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ในแบบจำลองเชิงพลวัตจึงศึกษาเฉพาะผลของจลนศาสตร์เท่านั้น

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

ฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูง การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ผลรวมค่าสมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน อัตราขยายเชิงสถิต ค่าคงที่เวลาอินทริกัล ค่าคงที่เวลาอนุพันธ์ อัตราขยายสัมพัทธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้แบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด สำหรับใช้ในการอธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งในภาวะคงตัวและภาวะพลวัต

2) ได้แนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง เพื่อช่วยในการเพิ่มสมรรถนะการดำเนินการของระบบ

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1) พัฒนาแบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแบบฟลูอิไดซ์เบดและเครื่องปฏิกรณ์อากาศแบบฟลูอิไดซ์เบด ด้วยโปรแกรมแอสเพนพลัส โดยใช้ข้อมูลของจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างแก๊สธรรมชาติ และนิกเกิลออกไซด์ (NiO) และข้อมูลจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการคืนสภาพของนิกเกิลออกไซด์ด้วยอากาศ ของ Abad และคณะ [8] มาดัดแปลงรูปแบบการจำลองกระบวนการจากแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดของ Porrazzo และคณะ [6] ให้สามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัต ด้วยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์

2) พัฒนาแบบจำลองพลวัตของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงต่อด้วยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ ด้วยการพัฒนาแบบจำลองต่อมาจากแบบจำลองในโปรแกรมแอสเพนพลัส โดยในแบบจำลองกระบวนการเชิงพลวัตนี้จะเพิ่มเติมการออกแบบระบบควบคุม

3) ออกแบบระบบควบคุมตามหลักการออกแบบระบบควบคุมสำหรับแพลนด์ไวด์ของ Seborg และคณะ [9] จากนั้นทำการเลือกชนิดของเครื่องควบคุมและปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของแต่ละวงควบคุม

4) ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมด้วยการสร้างสถานการณ์เพิ่มหรือลดค่าเป้าหมายของแต่ละวงควบคุม และการเพิ่มหรือลดค่าของตัวแปรรบกวนที่ส่งผลต่อระบบควบคุม และนำค่าความ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายของระบบควบคุมที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานการณ์มาทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม โดยหาค่าประสิทธิภาพของระบบควบคุมด้วยการหาผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนของระบบควบคุม ซึ่งในสถานการณ์ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายของแต่ละวงควบคุมมีค่าน้อยจะแสดงว่าระบบมีความว่องไวในการปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย และสามารถกำจัดผลของตัวแปรรบกวนได้อย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามสถานการณ์ที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายของแต่ละวงควบคุมมีค่ามาก แสดงว่าระบบต้องใช้เวลาที่นานในการปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายและกำจัดผลของตัวแปรรบกวน

5) ประมวลผล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง เขียนบทความวิจัย และวิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนองานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนองานวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ข้อจำกัดของการวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2 ปัญหาภาวะโลกร้อน เทคโนโลยีการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ฟลูอิไดเซชัน รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน ลักษณะการไหลเฉพาะของการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส แบบจำลองของเดวิดสัน แบบจำลองสองวัฏภาคอย่างง่าย แบบจำลองของ Kunii และ Levenspiel (K-L model) การจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี ระบบควบคุมกระบวนการ องค์ประกอบของระบบควบคุมกระบวนการควบคุมหลายตัวแปร เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน การปรับแต่งพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม วิธีการสัดส่วนลดทอนเศษหนึ่งส่วนสี่ การวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการควบคุมด้วยค่าไอเออี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 แบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงในภาวะคงตัว เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เครื่องปฏิกรณ์อากาศ ปฏิกิริยารีดักชันและปฏิกิริยาออกซิเดชัน แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน การจำลองฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส การจำลองฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูง เครื่องควบแน่นไอน้ำ กระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงขนาด 65 เมกกะวัตต์ กระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงที่ภาวะพลวัต การหาขนาดของอุปกรณ์การผลิต แบบจำลอง

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ แบบจำลองกระบวนการเชิงพลวัต ขั้นตอนการจำลองกระบวนการเชิงพลวัต

บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ การวิเคราะห์การจำลองกระบวนการเชิงพลวัต การปรับแต่งค่าเครื่องควบคุม การศึกษาคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม การปรับแต่งค่าเครื่องควบคุม การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง การวิเคราะห์สมรรถนะของการควบคุมด้วยค่าไอเออี

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming)

ภาวะโลกร้อน (Global Warming) หรือ ภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate Change) คือ การที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นจากผลของภาวะเรือนกระจก หรือที่เรารู้จักกันดีในชื่อว่า Greenhouse Effect โดยภาวะโลกร้อน มีต้นเหตุจากการที่มนุษย์ได้ปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ การขนส่ง และการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมออกสู่บรรยากาศ นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของแก๊สกลุ่มไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และคลอโรฟลูโรคาร์บอน (CFC) การตัดและทำลายป่าไม้จำนวนมหาศาลเพื่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ ทำให้กลไกในการดึงเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปจากระบบบรรยากาศถูกลดทอนประสิทธิภาพลงจนเกิดภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน [10]

คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือหน่วยงาน Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC) ซึ่งก่อตั้งโดยโครงการวิจัยสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (United Nations Environmental Programme – UNEP) และองค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organisation – WMO) รายงานว่า ภายในอีกหนึ่งร้อยปีข้างหน้าแนวโน้มอุณหภูมิโลกจะเพิ่มสูงขึ้นอีก 1.4 – 5.8 องศาเซลเซียส กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โลกกำลังร้อนขึ้นทุกวัน [11]

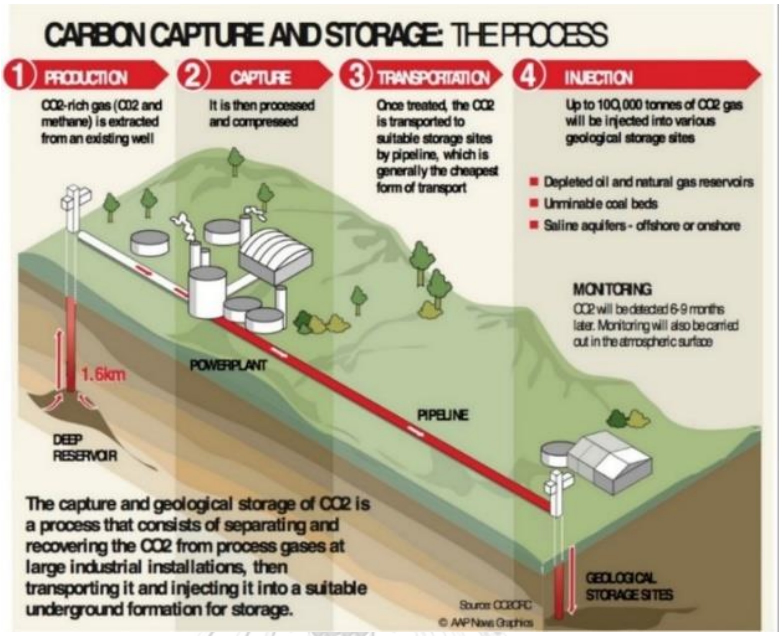
สืบเนื่องจากปัญหาภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้น จึงมีการพัฒนากระบวนการผลิตพลังงานในรูปแบบใหม่ๆ เพื่อแก้ปัญหาการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเรียกกระบวนการเหล่านี้ว่า กระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 เทคโนโลยีการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage technology)

การดักจับและการจัดเก็บคาร์บอน หรือ (Carbon Capture and Storage (CCS)) เป็นกระบวนการของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยทำการขนส่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปยังสถานที่จัดเก็บในแหล่งที่ไม่สามารถกลับเข้าสู่บรรยากาศได้ จุดมุ่งหมายคือการป้องกันไม่ให้มีการปล่อย CO_2 ในปริมาณมากเข้าสู่ชั้นบรรยากาศจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าและ

อุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งเป็นมาตรการที่มีศักยภาพเพื่อการบรรเทาการมีส่วนร่วมของการปล่อยแก๊สจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน [12] ดังรูปที่ 2.1

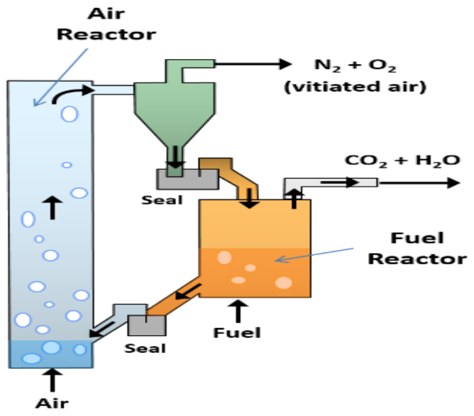


รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับและจัดเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [13]

2.3 การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง (Chemical looping combustion)

กระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง (Chemical looping combustion) เป็นวิธีหนึ่งของการดักจับและจัดเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งใช้โลหะออกไซด์เป็นตัวขนส่งออกซิเจน (Oxygen carrier) ในวัฏภาคของแข็ง อนุภาคโลหะออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็งหรือเหลวหรือแก๊สในเตาเผาปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Fuel reactor) เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เพื่อผลิตอนุภาคโลหะที่เป็นของแข็งและส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำ ไอน้ำจะถูกควบแน่น จนได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ จากนั้นจะสามารถนำไปแยกเก็บได้ อนุภาคโลหะแข็งจะถูกหมุนเวียนไปยังเตาปฏิกรณ์อากาศ (Air reactor) เพื่อทำปฏิกิริยากับอากาศ เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน รูปแบบของเตาปฏิกรณ์นิยมใช้เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดเพราะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น กระบวนการดังกล่าวผลิตความร้อนออกมาและฟื้นฟูสภาพโลหะออกไซด์เพื่อนำไปหมุนเวียนในกระบวนการรอบใหม่ ดังรูปที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.2 กระบวนการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงแบบเคมิคอลลูปปิง [13]

2.3.1 ส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์

2.3.1.1 เตาปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Fuel reactor)

เป็นเตาปฏิกรณ์ที่นำแก๊สเชื้อเพลิง เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สสังเคราะห์ ชีวมวล และถ่านหิน ทำปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่อยู่ในองค์ประกอบของโลหะออกไซด์ โลหะออกไซด์ในกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า ตัวพาออกซิเจน (Oxygen carrier) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ซึ่งสามารถคัดแยกได้ง่ายโดยวิธีการควบแน่นน้ำ ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความบริสุทธิ์สูง เพราะเชื้อเพลิงไม่ได้ทำปฏิกิริยากับอากาศโดยตรง ทำให้ในเตาปฏิกรณ์เชื้อเพลิงไม่มีแก๊สไนโตรเจนในระบบ จึงไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการแยกแก๊สระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สไนโตรเจน โดยตัวพาออกซิเจนจะสูญเสียออกซิเจนในโครงสร้างเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้โลหะออกไซด์กลายเป็นโลหะที่มีสัดส่วนออกซิเจนน้อยลง

$$(2n + m)Me_xO_y + C_nH_{2n} \rightarrow (2n + m)MeO_{y-1} + nCO_2 + mH_2O \qquad (2.1)$$

2.3.1.2 เตาปฏิกรณ์อากาศ (Air reactor)

เป็นเตาปฏิกรณ์ที่นำโลหะที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนเพื่อให้ได้โลหะออกไซด์ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในเตาปฏิกรณ์เชื้อเพลิงได้อีก ดังสมการที่ 2.2

$$2Me_xO_{y-1} + O_2 \rightarrow 2Me_xO_y \qquad (2.2)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.2 ตัวพาออกซิเจน (Oxygen carrier)

เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ต้องการนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม ดังนั้นการเลือกตัวพาออกซิเจนที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยตัวพาออกซิเจนที่เหมาะสมควรมีราคาถูก มีความคงทนต่อการขัดสีและการกระแทก มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับแก๊สเชื้อเพลิงได้ดี รวมไปถึงตัวพาออกซิเจนควรมีรอบของการใช้งานที่สูง เพื่อยืดอายุการใช้งาน สมบัติดังกล่าวขึ้นกับชนิดของวัสดุที่จะนำมาเป็นตัวพาออกซิเจน โดยปกติกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง นิยมทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800-1200 องศาเซลเซียส ดังนั้นอีกคุณสมบัติที่มีความสำคัญในการพิจารณาเลือกชนิดของตัวพาออกซิเจน คือ ต้องทนที่อุณหภูมิสูงโดยไม่สูญเสียสภาพการใช้งาน โดยโลหะที่ได้รับความนิยมในการเลือกใช้เป็นตัวพาออกซิเจนได้แก่ ทองแดง นิกเกิล แมงกานีส เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น

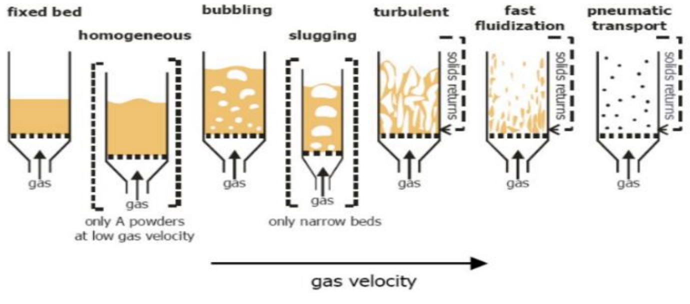
2.4 ฟลูอิไดเซชัน (Fluidization)

ฟลูอิไดเซชัน เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายของไหล โดยของไหลที่ใช้เป็นได้ทั้งแก๊ส และของเหลว หลักการคือ ของไหลจะไหลผ่านมาทางด้านล่างของหอทดลองที่บรรจุของแข็ง แล้วไหลผ่านบริเวณที่บรรจุของแข็งส่วนบนของหอทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลมากขึ้น ของแข็งจะเริ่มขยับ และลอยตัวขึ้นอย่างอิสระ ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติและพฤติกรรมคล้ายของไหล ส่งผลให้เกิดช่วงการไหลแบบต่างๆ ดังนี้ ฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิไดเซชันแบบปั่นป่วน ฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูง และฟลูอิไดเซชันแบบเบดเบาบาง [14]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน

พฤติกรรมการไหลหรือการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงรูป 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชันแบบต่างๆ [1]

2.5.1 เบดนิ่ง (Fixed bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ยังไม่ถือว่าเป็นรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน อัตราการป้อนหรือความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะยังไม่เพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัว หรือมีลักษณะเด่น คือ อนุภาคของแข็งในกระบวนการจะไม่มีการเคลื่อนที่

2.5.2 ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) พฤติกรรมการไหลแบบนี้ถือว่าเป็นรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน มีลักษณะเด่นคือ มีฟองแก๊สปรากฏขึ้น ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะผสมอยู่กับอนุภาคของแข็ง และเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนจนกระทั่งถึงผิวหน้าของเบด ดังนั้นลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วย 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคฟองแก๊ส (Bubble phase) และวัฏภาคอิมัลชัน (Emulsion phase)

2.5.3 ฟลูอิไดซ์เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed) มีลักษณะเด่นคือ ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแตกอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นจนเหมือนไม่มีฟองแก๊สในกระบวนการ โดยลักษณะการไหลจะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ชัดเจน คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งหนาแน่นที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ (Dense phase) และบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ (Lean phase)

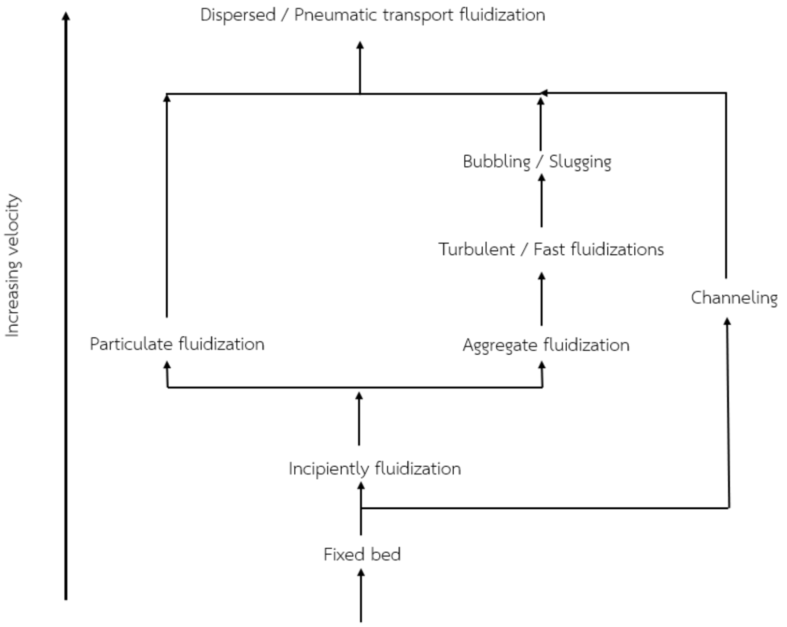
2.5.4 ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้เกิดขึ้นหลังจากความเร็วป้อนไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity) โดยเป็นช่วงการไหลที่อยู่ระหว่างการไหลฟลูอิไดซ์เบดแบบปั่นป่วนและฟลูอิไดซ์เบดแบบเบาบาง ที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางและเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของไหล แต่ที่บริเวณผนังเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น และเคลื่อนที่ลงสวนทิศทางการไหล รวมเรียกลักษณะการไหลเฉพาะแบบนี้ว่า การไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus flow)

2.5.5 ฟลูอิไดซ์เบดแบบเบดเบาบาง (Pneumatic transport fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม (Minimum pneumatic transport velocity) สำหรับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในช่วงการไหลนี้จะพบว่า อนุภาคของแข็งทั้งหมดจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์โดยจะเคลื่อนที่แยกจากกันเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหลซึ่งจะมีสัดส่วนระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลอยู่ที่ประมาณ 1 ต่อ 20 หรือมีปริมาณของไหลในเครื่องปฏิกรณ์อยู่สูงมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.6 ลักษณะการไหลเฉพาะของการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

รูปที่ 2.4 แสดงช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชันที่พบในการทำงานจริงทั้งในเครื่องปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชันแบบต่างๆ [15]

2.6.1 เบดนิ่ง (Fixed bed) จะเป็นช่วงก่อนการเกิดฟลูอิไดเซชันหรือความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการมีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิไดเซชัน

2.6.2 ฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (Fluidization at minimum fluidization velocity) จะเป็นช่วงที่ความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการมีค่าเท่ากับความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิไดเซชันพอดี อนุภาคของแข็งจะเริ่มมีการขยับตัวที่ความเร็วค่านี้ โดยจะมีการขยับตัวแบบสม่ำเสมอและมีการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยเท่านั้นเนื่องจากพื้นที่ช่วงว่างในกระบวนการมีค่าต่ำ

ฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วมากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี ตามประเภทของไหลที่ป้อนเข้ากระบวนการดังนี้

2.6.3 กรณีฟลูอิไดเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-solids fluidization) หลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันแล้ว

ฟลูอิไดเซชันแบบของเหลว-ของแข็งก็ยังคงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูงเบด (เครื่องปฏิกรณ์) จึงมีการเรียกกระบวนการฟลูอิไดเซชันแบบของเหลว-ของแข็งว่าเบดแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous bed) กล่าวคือค่าความหนาแน่นเบดเฉลี่ยตลอดทุกส่วนของอนุภาคจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดฟลูอิไดเซชันของเหลว-ของแข็ง

2.6.4 กรณีฟลูอิไดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง (Gas-solids fluidization) หลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันแล้ว อนุภาคในฟลูอิไดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็งจะเริ่มกระจายตัวตลอดความสูงของเบด (เครื่องปฏิกรณ์) ที่ไม่สม่ำเสมอ จึงมีการเรียกกระบวนการฟลูอิไดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็งว่าเบดแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous bed) กล่าวคืออนุภาคของแข็งจะมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า กลุ่มอนุภาคของแข็ง (Agglomerate หรือ Particle cluster) ช่วงการไหลที่พบฟลูอิไดซันแบบรวมกลุ่ม จะประกอบไปด้วยสามช่วงการไหลตามความเร็วของไหลเข้าสู่กระบวนการที่สูงขึ้น คือ ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส ฟลูอิไดซ์เบดแบบปั่นป่วน และฟลูอิไดซ์เบดแบบฟลูอิไดซันความเร็วสูง ตามลำดับ

2.6.5 ฟลูอิไดเซชันแบบสลัก จะเกิดขึ้นเมื่อเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเล็กและสูง ฟองแก๊สมีโอกาสที่จะรวมตัวกันเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ได้

2.6.6 ฟลูอิไดเซชันแบบเบดเบาบาง จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการมีค่าสูงเพียงพอและปริมาณอนุภาคของแข็งในกระบวนการมีค่าต่ำ อนุภาคของแข็งทั้งหมดในกระบวนการจะถูกไหลพาขึ้นไปตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์เป็นลักษณะอนุภาคเดี่ยวแยกจากกัน

2.7 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส

แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊สจะพิจารณาพฤติกรรมของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส (หลายฟอง) เป็นที่ทราบกันดีว่า สมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของฟองแก๊ส ดังนั้น ถ้าทราบพฤติกรรมของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นก็จะสามารถเข้าใจและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดได้

2.8 แบบจำลองของเดวิดสัน (Davidson model)

Davidson และ Harrison [16] เสนอแบบจำลองเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของแก๊สและอนุภาคของแข็ง รวมทั้งการกระจายตัวของความดันของฟองแก๊สที่ลอยขึ้นจากการตั้งสมมุติฐานสามข้อ ได้แก่

1) ในฟองแก๊สจะไม่มีอนุภาคของแข็งอยู่ โดยฟองแก๊สจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมในกรณีฟองแก๊สสามมิติ และมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกในกรณีฟองแก๊สสองมิติ

2) ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้น อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ตามกันไปด้วยคุณสมบัติเช่นเดียวกับของไหลที่ไม่สามารถกดอัดได้และไม่มีความหนืด

3) แก๊สที่ไหลในวัฏภาคอิมัลชันจะมีลักษณะเป็นของไหลที่ไม่สามารถอัดได้

สมมุติฐานทั้งสามข้อจะถูกนำมาพิจารณาร่วมกับภาวะขอบของกระบวนการในการสร้างแบบจำลอง ยกตัวอย่างเช่น ความดันภายในฟองแก๊สมีค่าคงที่ เป็นต้น โดยจากข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปใช้ในการอธิบายลักษณะการไหลของแข็งและอนุภาคฟองแก๊สที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่า ความดันที่ส่วนล่างของฟองแก๊สจะมีค่าต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ของเบด ในขณะที่ ความดันที่ส่วนบนของฟองแก๊สจะมีค่าสูงกว่าส่วนอื่นๆ ของเบด ดังนั้น การไหลของแก๊สที่จะเกิดขึ้นจากส่วนล่างของฟองแก๊สแล้วทะลุผ่านออกไปทางส่วนบนนอกจากนี้ ยังพบว่า รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างฟองแก๊สกับแก๊สในวัฏภาคอิมัลชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.9 แบบจำลองสองวัฏภาคอย่างง่าย (The simple two-phase model)

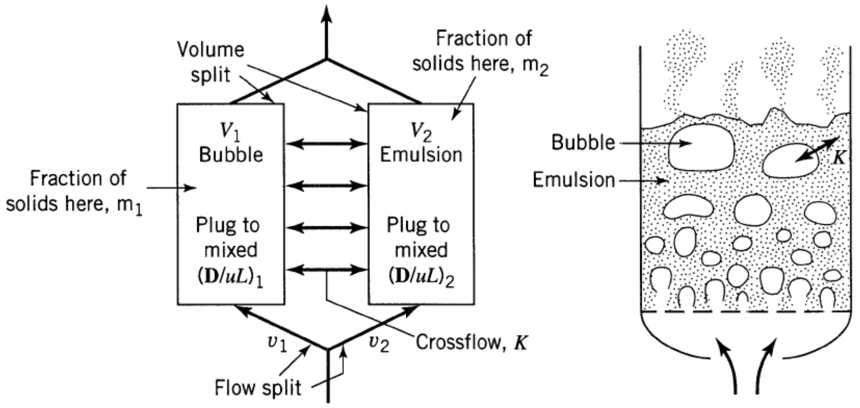
Toomey และ Johnstone [17] เสนอแบบจำลองโดยมีสมมุติฐานว่า แก๊สป้อนเข้ากระบวนการมากเกินพอ (ค่าความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน) จะไหลผ่านเบดในรูปแบบของฟองแก๊ส ในขณะที่แก๊สในวัฏภาคอิมัลชันจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน $(u_e = U_{mf})$

2.10 แบบจำลองของ Kunii และ Levenspiel (K-L model)

เมื่อพิจารณาความไม่เป็นเนื้อเดียวกันตามธรรมชาติของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แล้วนำมาสร้างเป็นแบบจำลองการถ่ายโอนมวลสาร นั่นคือ ภายในกระบวนการจะประกอบด้วย

วัฏภาคฟองแก๊สและวัฏภาคอิมัลชัน โดยวัฏภาคฟองแก๊สจะสมมุติให้ประกอบด้วยฟองแก๊สทรงกลมที่ล้อมรอบด้วยชั้นการวนกลับของแก๊ส

แบบจำลอง K-L [18] มีสมมุติฐานว่า ฟองแก๊สในกระบวนการมีลักษณะตามแบบจำลองของเดวิดสัน (Davidson model) ซึ่งแบ่งออกเป็นส่วนฟองแก๊ส (Bubble) ส่วนฐานของฟองแก๊ส (Wake) และส่วนชั้นการวนกลับของแก๊สในวัฏภาคอิมัลชัน (Cloud) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ฟองแก๊สเร็วและฟองแก๊สช้าจะมีการเคลื่อนที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ จากการนำส่วนฐานของฟองแก๊สมาร่วมพิจารณาในแบบจำลอง อนุภาคของแข็งในเบดจะถูกดึงเข้าไปในวัฏภาคฟองแก๊สและปล่อยออกในวัฏภาคอิมัลชัน



รูปที่ 2.5 ฟองแก๊สในกระบวนการตามแบบจำลอง K-L [14]

แบบจำลอง K-L จะพิจารณาการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคฟองแก๊สและวัฏภาคอิมัลชัน โดย Kunii และ Levenspiel ทำการทดลองด้วยการระเหยและการระเหิดของสารจากอนุภาคของแข็งในกระบวนการ จากผลการทดลองได้สมการการถ่ายโอนมวลที่มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างวัฏภาคฟองแก๊สและวัฏภาคอิมัลชัน (K_{GB})

$$\frac{dN_A}{dt} = u_b V_{bubble}\left(\frac{dC_{A,b}}{dz}\right) = K_{GB} V_{bubble}\left(C_{A,c} - C_{A,b}\right) \tag{2.3}$$

เมื่อ N_A คือ มวลสาร A (กิโลโมล)

t คือ ระยะเวลา (วินาที)

u_b คือ ความเร็วลอยขึ้นของฟองแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

V_{bubble} คือ ปริมาตรของฟองแก๊ส (ลูกบาศก์เมตร)

z คือ ระยะทาง (เมตร)

$C_{A,b}$ คือ ความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคฟองแก๊ส (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)

$C_{A,c}$ คือ ความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคส่วนชั้นการวนกลับ (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)

K_{GB} คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างวัฏภาคฟองแก๊สและวัฏภาคอิมัลชัน (วินาที $^{-1}$)

นอกจากนี้ ความเร็วลอยขึ้นของฟองแก๊สยังส่งผลต่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเบดในฟองแก๊ส โดยสามารถแบ่งออกเป็นกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

สำหรับฟองแก๊สที่ความเร็วช้า หรือ $u_b < u_e$ $\delta = \frac{U_o - U_{mf}}{u_b + 2U_{mf}}$ (2.4)

สำหรับฟองแก๊สที่ความเร็วปานกลางที่มีชั้นส่วนการวนกลับของแก๊ส หรือ $\frac{U_{mf}}{\varepsilon_{mf}} < u_b < \frac{5U_{mf}}{\varepsilon_{mf}}$

เมื่อ $u_b \cong \frac{U_{mf}}{\varepsilon_{mf}}$ $\delta = \frac{U_o - U_{mf}}{u_b + U_{mf}}$ (2.5)

เมื่อ $u_b \cong \frac{5U_{mf}}{\varepsilon_{mf}}$ $\delta = \frac{U_o - U_{mf}}{u_b}$ (2.6)

สำหรับฟองแก๊สที่ความเร็วเร็ว หรือ $u_b > \frac{5U_{mf}}{\varepsilon_{mf}}$ $\delta = \frac{U_o - U_{mf}}{u_b - U_{mf}}$ (2.7)

เมื่อ u_b คือ ความเร็วลอยขึ้นของฟองแก๊ส

u_e คือ ความเร็วแก๊สในวัฏภาคอิมัลชัน

U_{mf} คือ ความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน

ε_{mf} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่ภาวะความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน

U_o คือ ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ

δ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเบดในฟองแก๊ส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.11 การจำลองกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี

ปัจจุบัน มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากหลายบริษัทที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองภาวการณ์กระบวนการอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งถูกเรียกว่า การจำลองกระบวนการทางเคมี (Chemical Process Simulator) โปรแกรมเหล่านี้ได้แก่ ASPEN, CHEMCAD, Pro/II และ HYSYS โปรแกรมประเภทนี้จะเตรียมแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับอุปกรณ์หลักๆ ไว้ให้แก่ผู้ใช้ อาทิเช่น เครื่องปฏิกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถังแยกของเหลวจากไอ หอกลั่น หอดูดซับ ปั๊ม วาล์วและท่อ เป็นต้น ผู้ใช้จะนำแบบจำลองของอุปกรณ์เหล่านี้มาต่อเข้าด้วยกันตามสภาพที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการเพื่อจำลองสถานการณ์ในกระบวนการ ผู้ใช้จะต้องกำหนดภาวะของกระแสขาเข้าและภาวะบางประการที่จำเป็นในแต่ละหน่วยปฏิบัติการ เพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณภาวะที่ยังขาดอยู่ได้ อาทิเช่นปริมาณของผลิตภัณฑ์ ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ พลังงานที่ต้องป้อนเข้ากระบวนการ เป็นต้น

ในช่วงแรก การจำลองกระบวนเคมีสามารถหาคำตอบได้เฉพาะที่ภาวะคงตัวเท่านั้น ซอฟแวร์เหล่านี้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนในปัจจุบันโปรแกรมเหล่านี้ได้ถูกพัฒนาไปอีกขั้น เพื่อให้โปรแกรมสามารถจำลองกระบวนการภายใต้ภาวะพลวัตได้ เช่น Aspen Dynamics, Dynamic Modeller, PROVISION และ HYSYS.Plant เป็นต้น

การที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถจำลองภาวการณ์ที่ภาวะไม่คงตัวได้ทำให้วิศวกรสามารถนำโปรแกรมดังกล่าวเข้ามาช่วยในการออกแบบระบบควบคุมได้ ในอดีตการออกแบบกระบวนการจะพิจารณาแต่คำตอบจากการจำลองภาวการณ์ที่ภาวะคงตัวเท่านั้น การออกแบบในลักษณะนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากความแปรปรวนต่างๆที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการที่ออกแบบโดยปราศจากการพิจารณาถึงความแปรปรวนที่อาจเกิดขึ้นเหล่านี้จะส่งผลให้กระบวนการเบี่ยงเบนออกจากค่าเป้าหมายเป็นเวลานาน ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง การนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถจำลองภาวะพลวัตเข้ามาช่วยในการออกแบบทำให้วิศวกรควบคุมสามารถทดลองและทดสอบการตอบสนองของกระบวนการเพื่อพิจารณาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากความเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยภายนอกต่อกระบวนการ และผลดังกล่าวจะถูกส่งกลับไปให้วิศวกรกระบวนการพิจารณาเพื่อปรับปรุงกระบวนการ

โดยสรุปบทบาทของการจำลองกระบวนการในภาวะพลวัตมีความสำคัญสำหรับการออกแบบกระบวนการเพื่อเป็นเครื่องมือตรวจสอบความสามารถในการควบคุมและตรวจสอบความสามารถในการปรับกระบวนการคืนสู่เป้าหมายจากสิ่งรบกวนระบบ

2.12 ระบบควบคุมกระบวนการ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมมีการแข่งขันกันอย่างรุนแรงทั้งด้านคุณภาพและต้นทุนการผลิต ดังนั้น กระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องเป็นกระบวนการที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพสูง นั่นคือ กระบวนการควรจะดำเนินการภายใต้ภาวะที่ถูกออกแบบไว้ตลอดเวลา ใช้พลังงานน้อย ผลิตของเสียน้อย ผลิตภัณฑ์ได้คุณภาพตามข้อกำหนดโดยคุณภาพไม่สูงกว่าและไม่ต่ำกว่าข้อกำหนด (On-target) ในการทำงานจริงกระบวนการไม่ได้ดำเนินการไปอย่างราบเรียบ ทุกปัจจัยเป็นไปตามข้อกำหนดหรือตามที่ออกแบบไว้ บ่อยครั้งมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกกระบวนการ บางครั้งเกิดจากปัจจัยภายในกระบวนการ ไม่ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยในกรณีที่มีความเบี่ยงเบนหรือสิ่งรบกวนเข้ามาในกระบวนการ ผลกระทบอันเนื่องจากสิ่งรบกวนเหล่านี้ควรถูกกำจัดออกจากกระบวนการอย่างรวดเร็วที่สุด เพื่อให้กระบวนการมีสภาพเบี่ยงเบนไปจากภาวะที่ถูกออกแบบไว้ให้น้อยที่สุดและในระยะเวลาอันสั้นที่สุดด้วย ทั้งนี้เนื่องจากภาวะที่เบี่ยงเบนจากสภาพที่ออกแบบไว้สะท้อนถึงความเบี่ยงเบนของคุณภาพผลิตภัณฑ์ซึ่งมีผลต่อต้นทุนการผลิต และมีผลต่อราคาสินค้า

2.13 องค์ประกอบของระบบควบคุม

1) กระบวนการ (Process) โดยทั่วไปแล้วกระบวนการในอุตสาหกรรมเคมีจะหมายถึงอุปกรณ์ที่จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงวัตถุดิบที่ถูกป้อนเข้ามาในทางกายภาพหรือทางเคมีไปสู่ภาวะที่ออกแบบไว้ ซึ่งเรามักต้องการควบคุมให้การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นไปในทิศทางที่เราต้องการ เช่น เครื่องปฏิกรณ์เคมี เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หอกลั่นลำดับส่วน หอสกัดแยก หอดูดซับ เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) อุปกรณ์วัด (Measuring devices) ใช้วัดพารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถติดตามภาวะของกระบวนการได้ตลอดเวลา บ่อยครั้งที่ตัวแปรที่วัดค่าคือตัวแปรที่ต้องการควบคุมค่า หรือเรียกว่าตัวแปรควบคุม (Controlled variable)

3) เครื่องควบคุม (Controller) ทำหน้าที่ประมวลผลจากข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดส่งค่าเข้ามาเพื่อสั่งการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่ใช้ในการปรับกระบวนการ เพื่อให้เกิดผลกระทบในทิศทางที่ต้องการ

4) อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final control element) ทำหน้าที่รับคำสั่งจากเครื่องควบคุมมาปฏิบัติให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการ สำหรับในกระบวนการเคมีส่วนใหญ่ อุปกรณ์ดังกล่าวได้แก่วาล์วควบคุม (Control valve) หรือ ปั๊มปรับความเร็วรอบได้ เป็นต้น

โดยทั่วไปเครื่องควบคุมแบ่งออกเป็นหลายประเภท เช่น เครื่องควบคุม (P) พีไอ (PI) และพีไอดี (PID) ซึ่งเครื่องควบคุมแต่ละประเภทมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแนวคิดการควบคุม นอกจากนี้ เครื่องควบคุมบางชนิดยังมีความสามารถในการควบคุมกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear process) เช่น การควบคุมแบบคาดการณ์โดยแบบจำลอง MPC (Model Predictive Control)

2.14 กระบวนการควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable control)

Seborg และคณะ [19] ได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแบบหลายตัวแปร (Multivariable control) เพื่อทำความเข้าใจและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการ ดังนี้

1) ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมคู่ใดดีที่สุดในการควบคุมตัวแปรกระบวนการ

2) ผลของอันตรกิริยาของวงควบคุมมีผลต่อเสถียรภาพของระบบควบคุมอย่างไร

3) การยุติหรือลดผลกระทบอันเนื่องมาจากอันตรกิริยาจากวงควบคุม

โดยปกติ การควบคุมหลายตัวแปร วงควบคุมอาจมีอันตรกิริยาระหว่างกัน ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงในวงควบคุมหนึ่งๆ สามารถส่งผลกระทบให้อีกวงควบคุมได้ ในการศึกษาว่าวงควบคุมใดมีอันตรกิริยาต่อกันหรือไม่ สามารถทำได้โดยใช้ทฤษฎีของ Bristol ในการหาเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array: RGA) [2] ซึ่งสามารถหาค่าได้จากค่าเกนของกระบวนการที่สถานะคงตัว ดังแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำหรับ ระบบ 2x2 ; ค่าเกนของแต่ละชุดตัวแปรเขียนได้ดังชุดสมการที่ 2.3

$$K_{11} = \left.\frac{\Delta c_1}{\Delta m_1}\right|_{m2} \quad K_{12} = \left.\frac{\Delta c_1}{\Delta m_2}\right|_{m1}$$

$$K_{21} = \left.\frac{\Delta c_2}{\Delta m_1}\right|_{m_2} \quad K_{22} = \left.\frac{\Delta c_2}{\Delta m_2}\right|_{m_1} \tag{2.3}$$

โดยที่ K_{ij} คือ เกนของตัวแปรปรับ j ที่มีผลต่อตัวแปรควบคุม i

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.3 คู่ตัวแปรปรับกับตัวแปรควบคุมที่ดีสุด คือ คู่ที่มีค่าสัมพัทธ์ของค่าเกนในแต่ละแถวสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม การหาคู่ตัวแปรปรับกับตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมโดยอาศัยการพิจารณาค่าเกนโดยตรง แต่ทั้งนี้ค่าเกนมักมีข้อด้อยอยู่ 3 ประเด็น ดังนี้

1) ค่าเกนที่ได้จากสมการที่ 2 อาจส่งผลให้เลือกชุดตัวแปรปรับที่ซ้ำกัน

2) ค่าเกนมักเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญภายใต้การดำเนินการแบบวงปิด

3) ค่าเกนมีหลายหน่วยทำให้เกิดความยากลำบากในการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากหน่วยที่ต่างกัน

2.15 เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array)

Bristol [2] ได้พัฒนาวิธีการทำให้ระบบเมทริกซ์ของเกนกลายเป็นเมทริกซ์ที่เป็นอิสระจากหน่วย สามารถใช้ได้ภายใต้วงควบคุมแบบปิด และป้องกันปัญหาอันเนื่องมาจากตัวแปรที่ถูกเลือกซ้ำซ้อนกัน

เทคนิคนี้เรียกว่า เกนสัมพัทธ์หรือการวิเคราะห์อันตรกิริยา ผลได้อยู่ในรูปเมทริกซ์เรียกว่าเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array: RGA) โดยหาได้จากสมการที่ 2.4

$$\mu_{ij} = \frac{\left.\frac{\partial c_i}{\partial m_j}\right|_m}{\left.\frac{\partial c_i}{\partial m_j}\right|_c} = \frac{K_{ij}}{\acute{K}_{ij}} \qquad (2.4)$$

จำกัดความของ μ มีความสำคัญต่อคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุมสำหรับพิจารณาผลกระทบของระบบเมื่อวงควบคุมอื่นๆ ทั้งหมดเป็นวงควบคุมแบบปิด นั่นคือ

ถ้า $\mu_{ij} < 0$ แสดงว่า เมื่อวงควบคุมอื่นๆ เป็นวงปิด การปรับตัวแปรปรับ j จะส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ในทิศทางตรงข้ามต่อการควบคุมตัวแปรควบคุม i

ถ้า $\mu_{ij} = 0$ แสดงว่า เมื่อวงควบคุมอื่นๆ เป็นวงปิด การปรับตัวแปรปรับ j จะไม่ส่งผลต่อการควบคุมตัวแปรควบคุม i

ถ้า $0 < \mu_{ij} < 1$ แสดงว่า เมื่อวงควบคุมอื่นๆ เป็นวงปิด การปรับตัวแปรปรับ j จะเกิดผลกระทบหรืออันตรกิริยากับวงควบคุมอื่นๆ เพื่อการควบคุมตัวแปรควบคุม i

ถ้า $\mu_{ij} = 1$ แสดงว่า เมื่อวงควบคุมอื่นๆ เป็นวงปิด การปรับตัวแปรปรับ j จะไม่เกิดผลกระทบหรืออันตรกิริยากับวงควบคุมอื่นๆ ในการปรับตัวแปรปรับ j เพื่อควบคุมตัวแปรควบคุม i

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

ถ้า $\mu_{ij} > 1$ แสดงว่า เมื่อวงควบคุมอื่นๆเป็นวงปิด การปรับตัวแปรปรับ j จะเกิดผลกระทบหรืออันตรกิริยากับวงควบคุมอื่นๆ เพื่อการควบคุมตัวแปรควบคุม i

ดังนั้น ในการเลือกคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุมควรเลือกคู่ตัวแปรที่ให้ผลของ μ_{ij} ใกล้เคียงหรือเข้าใกล้ 1 มากที่สุด

การพิจารณาผลของอันตรกิริยาจากค่าเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน สังเกตจากแต่ละแถวของเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนที่มีค่าเกนสัมพัทธ์เบี่ยงเบนไปจากหนึ่ง ซึ่งตามกฎของเมทริกซ์สัมพัทธ์กล่าวไว้ว่า เกนสัมพัทธ์ของแต่ละแถวแต่ละหลักต้องรวมกันได้เท่ากับ 1 ตัวอย่างเช่นเมทริกซ์เกนสัมพัทธ์ที่มีอันตรกิริยา [0.75,0.25;0.25,0.75] จะเห็นได้ว่า ในแต่ละแถวค่าเกนสัมพัทธ์เบี่ยงเบนไปจากหนึ่ง แต่กระนั้นผลรวมของเกนสัมพัทธ์ในแถวๆนั้นก็ต้องเท่ากับ 1 ในขณะเดียวกันผลรวมของค่าเกนสัมพัทธ์ในแต่ละหลักก็ต้องเท่ากับ 1 เช่นกัน ลักษณะเมทริกซ์ดังตัวอย่างแสดงให้เห็นว่า ตรงตามหลักการของเมทริกซ์เกนสัมพัทธ์และมีอันตรกิริยา ดังนั้นวิธีการกำจัดหรือลดอันตรกิริยา คือ การทำให้ค่าของเกนสัมพัทธ์ในแนวทแยงเป็น 1 หรือใกล้เคียง 1 ทั้งหมด เช่น [1,0;0,1] ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าไม่มีอันตรกิริยาเกิดขึ้นระหว่างวงควบคุมของคู่ตัวแปรปรับกับตัวแปรควบคุมนั้นๆ

2.16 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม

ในการปรับแต่งเครื่องควบคุมจำเป็นจะต้องมีเกณฑ์เชิงปริมาณในการวัดความสามารถการทำงานของเครื่องควบคุมเพื่อใช้ในการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องควบคุม จึงจะสามารถนำมาเปรียบเทียบกันและหาข้อสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมชุดใดที่ให้ผลการทำงานสอดคล้องตรงความต้องการมากที่สุด เกณฑ์วัดเชิงปริมาณที่ใช้มีหลายเกณฑ์ แบ่งได้เป็นสองลักษณะคือเกณฑ์พิจารณาสำหรับภาวะคงตัวและเกณฑ์พิจารณาสำหรับภาวะพลวัต โดยเกณฑ์พิจารณาแบบแรกได้แก่ รักษาให้ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำที่สุด กำหนดสัดส่วนลดทอนตามต้องการและกำหนดค่าตอบสนองสูงที่สุดตามต้องการ กำหนดเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนกระบวนการไปสู่ภาวะใหม่ เป็นต้น วิศวกรที่ออกแบบระบบควบคุมจะต้องเลือกใช้เกณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้นในการวัดสมรรถนะการทำงานของเครื่องควบคุม เพื่อการตัดสินใจว่าเครื่องควบคุมประเภทใดหรือค่าพารามิเตอร์เครื่องควบคุมมีค่าเท่าไร จึงจะทำให้การทำงานของเครื่องควบคุมมีผลให้กระบวนการมีการตอบสนองในลักษณะตามที่ต้องการ

ในบรรดาเกณฑ์จำนวนมากมายที่กล่าวมาข้างต้น เกณฑ์ที่วิศวกรนิยมนำมาใช้ในทางปฏิบัติอย่างแพร่หลายคือ เกณฑ์สัดส่วนลดทอนเศษหนึ่งส่วนสี่ ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่พิจารณาทั้งการตอบสนองอย่างรวดเร็ว และประเด็นการเคลื่อนกระบวนการเข้าสู่สมดุลใหม่ในระยะเวลาอันสั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.17 วิธีการสัดส่วนลดทอนเศษหนึ่งส่วนสี่ (Quarter Decay Ratio)

$$\text{สัดส่วนลดทอน} = \mathrm{expo}\left(\frac{-2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) = \frac{1}{4} \tag{2.5}$$

สมการที่ 2.5 แสดงสัดส่วนลดทอนเป็นฟังก์ชันอยู่กับค่าปัจจัยหน่วง (ζ) และส่งผลต่อทรานส์ฟังก์ชันสำหรับระบบควบคุม $G_{sp}(s)$ ดังแสดงในสมการที่ 2.6 จากสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8 จะเห็นว่าค่าเวลาคงที่ (τ) และค่าปัจจัยหน่วง เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่าเกนของกระบวนการ (K_P) เวลาคงที่ของกระบวนการ (τ_P) อัตราขยายเชิงสถิตของเครื่องควบคุม (K_C) ค่าเวลาคงที่อินทิกรัล (τ_I) ของเครื่องควบคุม

$$G_{sp}(s) = \frac{\bar{y}(s)}{\bar{y}_{sp}(s)} = \frac{1}{\tau^2 s^2 + 2\tau\zeta s + 1} \tag{2.6}$$

$$\tau = \sqrt{\frac{\tau_P\, \tau_I}{K_P K_C}} \tag{2.7}$$

$$\zeta = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\tau_I}{\tau_P K_P K_C}} \tag{2.8}$$

ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์เครื่องควบคุมจึงมีผลกระทบต่อการตอบสนองของระบบควบคุมวิธีการนี้มีสองรูปแบบ รูปแบบแรกใช้ในขณะที่กระบวนการต่ออยู่กับเครื่องควบคุม (ออนไลน์) อีกรูปแบบหนึ่งคือรูปแบบที่ใช้กับกระบวนการที่ไม่ได้ต่ออยู่กับเครื่องควบคุม (ออฟไลน์) ทั้งสองวิธีการนี้นำเสนอโดย Ziegler และ Nichols [20] ในปี พ.ศ. 1942

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.17.1 วิธีการปรับแต่งวงควบคุมแบบปิดหรือปรับแต่งแบบออนไลน์ สำหรับวิธีการนี้ลักษณะเฉพาะเชิงพลวัตของวงควบคุมถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าอัตราขยายเชิงสถิตสูงสุดของเครื่องควบคุม (K_{cu}) และค่าความถี่สูงสุดของการแกว่งก่อนกระบวนการไม่เสถียร โดยสามารถหาได้จากวิธีการดังต่อไปนี้

1) ตั้งเครื่องควบคุมให้เป็นเครื่องควบคุมแบบพีเท่านั้น

2) ภายในวงควบคุมแบบปิดของระบบควบคุม ทำการเพิ่มค่าอัตราขยายเชิงสถิตเครื่องควบคุมอย่างช้าๆ จนกระทั่งการตอบสนองมีลักษณะแกว่งด้วยแอมพลิจูดคงที่ ณ ค่าอัตราขยายเชิงสถิตเครื่องควบคุมค่านี้คือค่าอัตราการขยายเชิงสถิตสูงสุด จดบันทึกการแกว่งของค่าการตอบสนอง จะสามารถวัดคาบการแกว่งและบันทึกคาบการแกว่งสูงสุด (T_u)

เมื่อพิจารณาลักษณะการตอบสนองที่ต้องการ Ziegler และ Nichols ได้กำหนดสัดส่วนลดทอนเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ ดังนั้นเมื่อทราบค่าอัตราการขยายเชิงสถิตสูงสุด เราสามารถใช้ตารางที่ 2.1 ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องควบคุมเพื่อทำให้การตอบสนองของกระบวนการมีสัดส่วนลดทอนเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่

ตารางที่ 2.1 สูตรในการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์หรือโดยวิธีทำวงควบคุมแบบปิดให้ได้สัดส่วนลดทอนเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ [20]

ชนิดของเครื่องควบคุม	K_C	τ_I	τ_D
แบบพี	$K_{cu}/2$	$-$	$-$
แบบพีไอ	$K_{cu}/2.2$	$T_u/1.2$	$-$
แบบพีไอดี	$K_{cu}/1.2$	$T_u/2$	$T_u/8$

ไทเรียส-ลูเบน (Tyreus-Luyben) ได้ทำการแนะนำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมที่มีผลให้เกิดการแกว่งน้อยลงและมีความไวต่อการตอบสนองต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยลง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [20]

ตารางที่ 2.2 สูตรในการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์หรือโดยวิธีทำวงควบคุมแบบปิดให้ได้สัดส่วนลดทอนเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่

ชนิดของเครื่องควบคุม	K_C	τ_I	τ_D
แบบพีไอ	$K_{cu}/3.2$	$T_u * 2.2$	$-$
แบบพีไอดี	$K_{cu}/2.2$	$T_u * 2.2$	$T_u/6.3$

2.17.2 วิธีการปรับแต่งวงควบคุมแบบเปิดหรือปรับแต่งแบบออฟไลน์ สำหรับวิธีการนี้จะทำการสร้างทรานเฟอร์ฟังก์ชันสำหรับกระบวนการโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง โดยทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ได้จะเป็น ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการอันดับที่หนึ่งซึ่งรวมค่าหน่วงเวลาดังสมการที่ 2.9 โดยพารามิเตอร์ของกระบวนการได้แก่ อัตราขยายเชิงสถิต ค่าหน่วงเวลา และค่าเวลาคงที่กระบวนการ จากการที่ทราบค่ากระบวนการเหล่านี้ Ziegler และ Nichols ได้เสนอสูตรในการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมเพื่อให้ลักษณะการตอบสนองเป็นแบบสัดส่วนลดทอนแบบเศษหนึ่งส่วนสี่ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

$$G_{prc}(s) = \frac{Ke^{-t_d s}}{\tau S+1} \tag{2.9}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.3 สูตรในการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์หรือโดยวิธีทำวงควบคุมแบบเปิดให้ได้สัดส่วนลดทอนเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ [20]

ชนิดของเครื่องควบคุม	K_C	τ_I	τ_D
แบบพี	$\left(\frac{1}{K}\right)\left(\frac{\tau}{t_d}\right)$	–	–
แบบพีไอ	$\left(\frac{1}{K}\right)\left(\frac{\tau}{t_d}\right)$	$3.33\ t_d$	–
แบบพีไอดี	$\left(\frac{1}{k}\right)\left(\frac{\tau}{t_d}\right)$	$2.0\ t_d$	$0.5\ t_d$

2.18 การวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการควบคุมด้วยค่าไอเออี

Smith และคณะ [21] ได้เสนอวิธีในการวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการควบคุมด้วยค่าไอเออี (Integral of Absolute value of Error; IAE) เป็นการวิเคราะห์ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดระยะเวลาของการดำเนินการเพื่อประเมินสมรรถนะของการควบคุม โดยหาได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 2.10

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (2.10)$$

กระบวนการควบคุมที่มีค่าไอเออีที่ต่ำกว่าอีกกระบวนการหนึ่ง สะท้อนให้เห็นถึงสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการที่ดีกว่า เนื่องจากมีผลรวมสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดทั้งกระบวนการเริ่มเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งกลับสู่สภาพปกติมีค่าต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Porrazzo และคณะ [1] สร้างแบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดใช้เชื้อเพลิงคือ แก๊สธรรมชาติ และตัวพาออกซิเจนคือนิกเกิลออกไซด์ (NiO) โดยการใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ด้วยโปรแกรม MFIX ทำให้สามารถศึกษาถึงรูปแบบการไหลและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบสองมิติ (2D) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม แอสเพนพลัส [6] ซึ่งเป็นการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดในรูปแบบหนึ่งมิติ (1D) พบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สามารถสร้างแบบจำลองของเครื่องฟลูอิไดซ์เบดในระดับมหภาค (Macro scale) ที่ลดช่องว่างระหว่างระดับมหภาคและระดับจุลภาค (Micro scale) ลงได้

Zhang และคณะ [3] สร้างแบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงโดยใช้เชื้อเพลิง คือ ถ่านหินโคลัมเบียน ถ่านหินบิทูมินัส ถ่านหินแอนทราไซต์ และถ่านหินลิกไนต์ ตัวพาออกซิเจน คือ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยการนำถ่านหินไปทำปฏิกิริยากับไอน้ำเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) แล้วนำแก๊สสังเคราะห์มาทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับเฟอร์ริกออกไซด์ ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนในการป้อน ถ่านหิน : อากาศ : ตัวพาออกซิเจนที่ดีที่สุดของถ่านหินแต่ละชนิด เมื่อนำผลการทดลองมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและพลังงานที่ได้จากระบบทำให้สามารถหาสัดส่วนที่สุดของ อัตราส่วนในการป้อน ถ่านหิน : อากาศ : ตัวพาออกซิเจน แต่ว่าในงานวิจัยชิ้นนี้ก็ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบอุดมคติในการจำลองกระบวนการ ทำให้ละเลยผลของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์

Porrazzo และคณะ [4] ทำการสร้างแบบจำลองกระบวนการกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงคือ แก๊สธรรมชาติและตัวพาออกซิเจน คือนิกเกิลออกไซด์ (NiO) โดยการนำแบบจำลองขนาดเล็ก [6] มาขยายขนาด (Scale up) เป็นโรงงานผลิตไฟฟ้า กำลังการผลิต ขนาด 500 เมกกะวัตต์ และได้ค่าประสิทธิภาพความร้อน (Thermal efficiency) ของระบบเท่ากับ 52.04% และสามารถประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้ในการหาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยไฟฟ้าปรับเฉลี่ย (Levelized cost of electricity; LCOE) ซึ่งพบว่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยไฟฟ้าปรับเฉลี่ยของนิกเกิลออกไซด์จะมีค่าลดลง เมื่อสามารถเพิ่มอายุการใช้งาน (Life time) ซึ่งจากการทดลองอายุการใช้งานของโลหะออกไซด์ที่ใช้จริงจะประมาณ 4,000 ชั่วโมง [22] และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการหาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยไฟฟ้าปรับเฉลี่ยของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซึมโมโนเอทาโนลามีน (MEA) [23] พบว่า ถ้าอายุการใช้งานของอนุภาคประมาณ 4,000 ชั่วโมง ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยไฟฟ้าปรับเฉลี่ยของเมื่อใช้นิกเกิลออกไซด์ในการเผาไหม้จะมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้โมโนเอทาโนลามีนเป็น ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Jafari และคณะ [5] สร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด ในช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling bed) ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่เป็นอุดมคติ ด้วยโปรแกรมแอสเพนพลัส ซึ่งใช้วิธีการต่อเครื่องปฏิกรณ์แบบลำดับขั้น (Sequential modular) โดยการนำเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTR) มาต่ออนุกรมกัน เพื่อแทนวัฏภาคอิมัลชัน (Emulsion phase) และใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (PFR) มาต่ออนุกรมกัน เพื่อแทนวัฏภาคฟองแก๊ส (Bubble phase) และเชื่อมการถ่ายโอนมวลสารของสองวัฏภาคเข้าด้วยกันด้วยการเขียนโปรแกรมย่อย (Subroutine) เมื่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นำวิธีการนี้ไปสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

Porrazzo และคณะ [6] สร้างแบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแบบฟลูอิไดซ์เบด โดยใช้เชื้อเพลิงคือ แก๊สธรรมชาติ และตัวพาออกซิเจน คือ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) โดยการใช้โปรแกรมแอสเพนพลัส พบว่าแบบจำลองกระบวนการที่ได้มีความแตกต่างกับแบบจำลองกระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบอุดมคติ เนื่องจากว่าการดำเนินการของระบบฟลูอิไดเซชันในช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling bed) จะทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แล้วส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิง และนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ซึ่งใช้เป็นตัวพาออกซิเจนลดลง เนื่องจากการเกิดฟองแก๊สขึ้นในระบบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้แบบจำลองช่วยในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์อากาศแบบฟลูอิไดซ์เบดที่ดำเนินการของระบบฟลูอิไดเซชันในการช่วงไหลแบบฟลูอิไดเซชันความเร็วสูง (Fast Fluidization) เพื่อนำผลของการทำแบบจำลอง ไปใช้ในการออกแบบหาขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ ปริมาณของเบดที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ และอัตราส่วนการป้อนอากาศต่อการป้อนเชื้อเพลิง ความสูงของเบดที่เหมาะสม

Petola และคณะ[7] สร้างแบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด โดยใช้เชื้อเพลิงคือแก๊สธรรมชาติ และตัวพาออกซิเจน คือ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ซึ่งใช้ข้อมูลอ้างอิงจากแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดขนาด 120 kW ของ Kolbitsch และคณะ [24] โดยการเขียนโปรแกรมจากสมการดุลมวลสารและพลังงานซึ่งรวมผลของการถ่ายโอนความร้อนและผลของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) ในภาวะพลวัตด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำให้ได้ผลการจำลองกระบวนการที่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับการทดลองจริง และหารูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราการไหลของอนุภาคของแข็ง ค่าการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิง และองค์ประกอบของแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง และเครื่องปฏิกรณ์อากาศ โดยการปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิความหนาแน่นของแข็ง สัดส่วนองค์ประกอบของแก๊สที่ป้อนเข้า และอัตราการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าควรทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด เนื่องจากเป็นการสร้างแบบจำลองที่ทำการศึกษาผลของอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น ทำให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองกระบวนการที่ละเลยผลของอุทกพลศาสตร์ นอกจากนี้ การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตที่ติดตั้งระบบควบคุมจะทำให้งานวิจัยนี้มีความน่าสนใจมากยิ่งขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันการศึกษาแบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงยังไม่มีผู้ทำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การศึกษาวิธีการออกแบบและสร้างระบบควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาแบบจำลองกระบวนการให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง กระบวนการสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวนจากปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อกระบวนการ อีกทั้งสามารถปรับค่าเป้าหมายของแต่ละหน่วยปฏิบัติการเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือแบบจำลองกระบวนการในภาวะคงตัว และแบบจำลองในภาวะพลวัต ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงในภาวะคงตัว

งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงด้วยโปรแกรมจำลองกระบวนการแอสเพนพลัส ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงดำเนินการในภาวะฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊สจะเกิดปฏิกิริยาในส่วนท่อดาวเนอร์ ส่วนที่สองคือเครื่องปฏิกรณ์อากาศดำเนินการในภาวะฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูงจะเกิดปฏิกิริยาในส่วนท่อไรเซอร์ ชุดสมการต่างๆ นำมาจากงานวิจัยของ Porrazzo และคณะ [6]

3.2 เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่ดำเนินการในภาวะฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊สประกอบด้วยสองวัฏภาคตามแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส [18] ได้แก่ วัฏภาคฟองแก๊ส (Bubble phase) และวัฏภาคอิมัลชัน (Emulsion phase) ซึ่งเป็นช่วงการไหลที่ความเร็วป้อนเข้า (Superficial gas velocity) มีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum fluidization gas velocity) แต่มีค่าต่ำกว่าความเร็วปลายของอนุภาค (Particle terminal velocity) ซึ่งทำให้สองวัฏภาคมีความแตกต่างกันตรงที่สัดส่วนโดยปริมาตรแก๊สต่อปริมาณของแข็ง โดยในวัฏภาคฟองแก๊สนั้น จะมีสัดส่วนโดยปริมาตรแก๊สต่อปริมาณของแข็งที่สูงกว่าในวัฏภาคอิมัลชัน กำหนดให้ในวัฏภาคฟองแก๊สมีการเปลี่ยนแปลงของมวลสารตามแนวแกนความสูงของเบดและวัฏภาคอิมัลชันเกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Perfect mixing) ตามสมมุติฐานของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊สที่อ้างอิงจากแบบจำลองของ Davidson และคณะ [25] ดังต่อไปนี้

1) เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊สมีขนาดคงที่ตลอดทั้งความสูงเบด

2) เครื่องปฏิกรณ์ดำเนินการในภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal condition)

3) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลสารตามแนวแกนรัศมีของเบด

ในงานวิจัยได้ใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.1 ในการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

ชื่อตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (T)	750	^{o}C
ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ (P)	1	atm
อัตราการป้อนเข้าของอนุภาคของแข็ง (F_s)	0.277	kg/s
สัดส่วนโดยน้ำหนักของโลหะนิกเกิลออกไซด์ขาเข้า (NiO)	98	%w/w
สัดส่วนโดยน้ำหนักของโลหะนิกเกิลขาเข้า (Ni)	2	%w/w
เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (d_p)	8.0E-05	m
ความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (U_{mf})	0.0096	m/s
สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (ε_{mf})	0.5	-
เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊ส (d_b)	0.03	m
ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ (U_o)	0.096	m/s
ความเร็วปลาย (U_t)	0.654	m/s
สัดส่วนโดยปริมาตรของเบดในวัฏภาคฟองแก๊ส (σ)	0.191	-
ความเร็วของฟองแก๊ส (U_b)	0.463	m/s
ความเร็วของแก๊สผ่านเบดในวัฏภาคอิมัลชัน (U_e)	0.019	m/s
ความสูงเบดของอนุภาคของแข็ง (L_m)	1	m
สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สในวัฏภาคฟองแก๊ส (ε_b)	0.9	-
สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สในวัฏภาคอิมัลชัน (ε_e)	0.5	-

3.3เครื่องปฏิกรณ์อากาศ

เครื่องปฏิกรณ์อากาศดำเนินการในภาวะฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูงประกอบด้วยสองวัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคส่วนหนาแน่น (Dense phase) และวัฏภาคส่วนเบาบาง (Lean phase)

ซึ่งเป็นช่วงการไหลที่มีความเร็วป้อนเข้ามากกว่าความเร็วปลายของอนุภาค โดยกำหนดให้เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Perfect mixing) ในแต่ละวัฏภาค และสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (Solid volume fraction) ในวัฏภาคที่ปริมาณเบดหนาแน่นคงที่ ในขณะที่วัฏภาคที่ปริมาณเบดเบาบางเกิดการลดลงของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.2 ในการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์อากาศ

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์อากาศ

ชื่อตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (T)	750	^oC
ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ (P)	1	atm
เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (d_p)	8.00E-05	m
ความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (U_{mf})	0.0204	m/s
ความเร็วแก๊สในกระบวนการ (U_o)	1.873	m/s
ความเร็วปลาย (U_t)	0.345	m/s
ดัชนีการสลายตัว (a)	9	s^{-1}
สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งในวัฏภาคเบดหนาแน่น (ε_{sd})	0.16	-
ความสูงของเบดของอนุภาคของแข็ง (L_m)	0.25	m
ความสูงของไรเซอร์ (H_R)	3.5	m
เส้นผ่านศูนย์กลางของไรเซอร์ (D_R)	0.8	m
สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาเคมี (k_s)	7.0E+07	m/s

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4ปฏิกิริยารีดักชันและปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์อากาศเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) ระหว่างวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคแก๊ส โดยปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นระหว่างโลหะนิกเกิลออกไซด์ (NiO) กับ แก๊สมีเทน (CH_4) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำ (H_2O) และโลหะนิกเกิล ดังสมการที่ 3.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นระหว่างโลหะนิกเกิล (Ni) กับแก๊สออกซิเจนในอากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นโลหะนิกเกิลออกไซด์ ดังสมการที่ 3.2

$$\mathrm{CH_4 + 4\,NiO \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O + 4\,Ni} \qquad (3.1)$$

$$O_2 + 2\,Ni \rightarrow 2\,NiO \tag{3.2}$$

จากแบบจำลองแกนหดตัว (Shrinking core model) [26] จะสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ดังสมการที่ 3.3 - 3.5

$$r = \frac{4*\pi*r_c^2*V_{tot}*(1-\varepsilon)*k_s*C_A}{\frac{4}{3}*\pi*R^3*V_{tot}*\varepsilon} \tag{3.3}$$

$$r_c = R*(1-X_B)^{\frac{1}{3}} \tag{3.4}$$

$$r = \frac{6*(1-\varepsilon)*k_s*C_A*(1-X_B)^{\frac{2}{3}}}{d_p*\varepsilon} = k_o*C_A*(1-X_B)^{\frac{2}{3}} \tag{3.5}$$

โดยที่ r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (kmol/(m^3*s)) r_c คือ รัศมีแกนกลางของอนุภาค (m) V_{tot} คือ ปริมาตรทั้งหมดของระบบ (m^3) C_A คือ ความเข้มข้นโดยโมลของแก๊สชนิด A (kmol/m^3) ε คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส (-) R คือ รัศมีภายนอกของอนุภาค (m) X_B คือ สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคของแข็งชนิด B (-) k_s คือ สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยา (m/s) d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m) และ k_o คือ สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาที่จุดอ้างอิง (s^{-1})

โดยมีสมมุติฐานของการเกิดปฏิกิริยาจากงานวิจัยของ Kunii และ Levenspiel [18] ดังต่อไปนี้

1) อนุภาคเป็นทรงกลมและขนาดคงที่

2) การถ่ายโอนมวลสารภายนอก (External mass transfer) มีความเร็วมากกว่าการถ่ายโอนมวลสารภายใน (Internal mass transfer)

3) ปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal)

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าจลนศาสตร์ เพื่อใช้ในการหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา และกฎทางกำลังจลนศาสตร์ (Power law kinetics model) ที่ใช้ในแบบจำลองกระบวนการ ดังแสดงในสมการที่ 3.6 และ 3.7 โดยอ้างอิงค่าจากการทดลองของ Abad และคณะ [27]

$$k = k_o T^n\, e^{\frac{-E_a}{RT}} \tag{3.6}$$

$$r = k_o T^n e^{\frac{-Ea}{RT}} \prod_{i=1}^{N} C_i^{\alpha_i} \tag{3.7}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ k_o คือ สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาที่จุดอ้างอิง (s^{-1}) k คือ สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยา (s^{-1}) T คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (K) E_a คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/kmol) R คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของแก๊ส(kJ/(kmol*K)) n คือ อันดับรวมของปฏิกิริยา (-) C_i คือ ความเข้มข้นโดยโมลของสาร (kmol/s) α_i คือ อันดับของปฏิกิริยา (-)

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรจลนศาสตร์ของปฏิกิริยารีดักชันและปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ตัวแปร	ปฏิกิริยาออกรีดักชัน	ปฏิกิริยาออกซิเดชัน	หน่วย
พลังงานกระตุ้น (E_a)	78,000	7,000	kJ/kmol
อันดับของปฏิกิริยา (n)	0.8	0.2	-

สมการที่ 3.6 และ 3.7 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยา ในแต่ละวัฏภาคได้ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.4 จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ปฏิกิริยาเคมีในวัฏภาคฟองแก๊สจะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ปฏิกิริยาเคมีในวัฏภาคอิมัลชัน เนื่องจากทั้งสองวัฏภาคมีค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส (ε) ไม่เท่ากัน โดยค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สในวัฏภาคฟองแก๊สมีค่าสูงกว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สในวัฏภาคอิมัลชัน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ปฏิกิริยาเคมีในวัฏภาคฟองแก๊สจะมีค่าน้อยกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ปฏิกิริยาเคมีในวัฏภาคอิมัลชัน (จากสมการที่ 3.5)

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

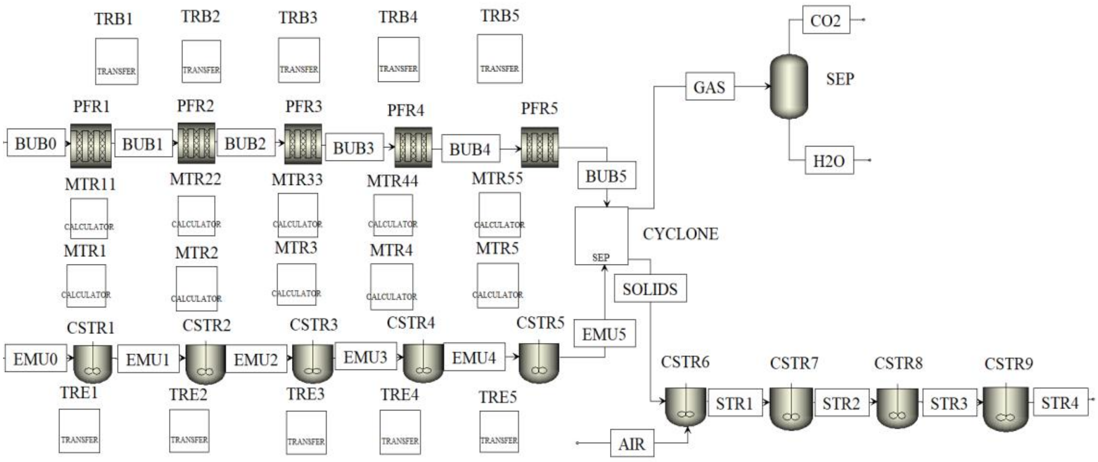
ตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
สัมประสิทธิ์ปฏิกิริยาเคมีในวัฏภาคฟองแก๊ส ($k_{o(PFR)}$)	3.68	s^{-1}
สัมประสิทธิ์ปฏิกิริยาเคมีในวัฏภาคอิมัลชัน ($k_{o(CSTR)}$)	33.08	s^{-1}

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

แบบจำลองกระบวนเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน เลือกใช้คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์แบบ NRTL จากรูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดหมุนเวียนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เครื่องปฏิกรณ์อากาศและเครื่องควบแน่นไอน้ำ เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง จากการศึกษางานวิจัยของที่ผ่านมา [6] พบว่าวิธีการจำลองอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด จะต้องใช้วิธีการต่ออนุกรมกันของเครื่องปฏิกรณ์ และจำลองสถานการณ์ในแต่ละวัฏภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นส่วนย่อยๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงด้วยการใช้ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank

Reactor; CSTR) ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 เครื่อง และเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug Flow Reactor; PFR) ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 เครื่อง เชื่อมต่อกับไซโคลน เพื่อคัดแยกอนุภาคของแข็งไปยังเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ต่ออนุกรมกันจำนวน 4 เครื่อง และป้อนแก๊สหลังการเผาไหม้เข้าสู่เครื่องควบแน่นไอน้ำ



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบเบดหมุนเวียน

3.6 การจำลองฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส

การจำลองฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊สจะประกอบด้วย 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคฟองแก๊ส และวัฏภาคอิมัลชัน ในงานวิจัยนี้ ใช้การต่ออนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR) สำหรับวัฏภาคอิมัลชัน และใช้การต่ออนุกรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug Flow Reactor; PFR) สำหรับวัฏภาคฟองแก๊ส และเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองแบบต่อแบบคู่ขนานกันไปดังแสดงในรูปภาพที่ 3.1 โดยที่สมการที่ 3.8 และ 3.9 แสดงค่าความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองแบบในแต่ละขั้นตอน สมการที่ 3.8 และ 3.9 ถูกป้อนลงในโปรแกรมแอสเพนพลัสด้วยการเขียนรหัสในภาษาฟอร์แทรน (Fortran) ลงในกล่องการคำนวณ (Calculator block) เพื่อระบุค่าการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสองวัฏภาค ในกรณีนี้สนใจการถ่ายโอนมวลสารเฉพาะแก๊สมีเทนเท่านั้นเนื่องจากว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่ได้ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และใช้กล่องการถ่ายโอนข้อมูล (Transfer block) เพื่อให้การดุลมวลสารมีความต่อเนื่อง

$$C_{CH4b(i+1)} = C_{CH4bi} - K_{be}(C_{CH4bi} - C_{CH4ei})\,V_{bi} \tag{3.8}$$

$$C_{CH4e(i+1)} = C_{CH4ei} + K_{be}(C_{CH4bi} - C_{CH4ei})\,V_{ei}\left(\frac{\sigma}{1-\sigma}\right) \tag{3.9}$$

$$V_{bi} = V_{tot} * \sigma \tag{3.10}$$

$$V_{ei} = V_{tot} * (1 - \sigma) \tag{3.11}$$

ใช้สมการที่ 3.12 และ 3.13 เมื่อค่าอัตราการป้อนไหลของแก๊สมีเทนที่คำนวณจากสมการที่ 3.8 และ 3.9 มีค่าติดลบ

$$C_{CH4b(i+1)} = \frac{1}{2} * \left(C_{CH4bi} + C_{CH4ei} * \frac{Q_e}{Q_b}\right) \tag{3.12}$$

$$C_{CH4e(i+1)} = \frac{1}{2} * \left(C_{CH4ei} + C_{CH4bi} * \frac{Q_b}{Q_e}\right) \tag{3.13}$$

โดยที่ $C_{CH4b(i+1)}$ คือ ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนในวัฏภาคฟองแก๊สของระดับชั้นที่ i+1 (kmol/m^3) $C_{CH4e(i+1)}$ คือ ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนในวัฏภาคอิมัลชันของระดับชั้นที่ i+1 (kmol/m^3) C_{CH4bi} คือ ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนในวัฏภาคฟองแก๊สของระดับชั้นที่ i (kmol/m^3) C_{CH4ei} คือ ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนในวัฏภาคอิมัลชันของระดับชั้นที่ i (kmol/m^3) K_{be} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคฟองแก๊สและวัฏภาคอิมัลชัน (s^{-1}) V_{bi} คือ ปริมาตรของแก๊สฟองเดี่ยวของระดับชั้นที่ i (m^3) V_{ei} คือ ปริมาตรในวัฏภาคอิมัลชันของระดับชั้นที่ i (m^3) σ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคฟองแก๊ส (-) Q_b คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวัฏภาคฟองแก๊ส (m^3/s) และ Q_e คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวัฏภาคฟองแก๊ส (m^3/s)

เมื่อใช้สมการที่ 3.14 – 3.16 ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคอิมัลชัน และแสดงค่าของตัวแปรต่างๆ ในตารางที่ 3.5

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$K_{bc} = 4.5 \left(\frac{U_e}{d_b}\right) + 5.85 \left(\frac{\delta^{0.5}\, g^{0.25}}{d_b^{\frac{5}{4}}}\right) \tag{3.14}$$

$$K_{ce} = 6.77 \left(\frac{\delta\, \varepsilon_{mf}\, 0.711\, (g\, d_b)^{0.5}}{d_b^3}\right)^{0.5} \tag{3.15}$$

$$\frac{1}{K_{be}} = \frac{1}{K_{bc}} + \frac{1}{K_{ce}} \tag{3.16}$$

โดยที่ K_{bc} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคฟองแก๊สและวัฏภาคคลาวน์ (s^{-1}) K_{ce} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคคลาวน์และวัฏภาคอิมัลชัน (s^{-1}) K_{be} คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคฟองแก๊สและ

วัฏภาคอิมัลชัน (s^{-1}) U_e คือ ความเร็วของแก๊สในวัฏภาคอิมัลชัน (m/s) δ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s) g คือ ความเร่งแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) d_b คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊ส (m) และ ε_{mf} คือสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (-)

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

ตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคฟองแก๊สและวัฏภาคคลาวน์ (K_{bc})	9.57	s^{-1}
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคคลาวน์และวัฏภาคอิมัลชัน (K_{ce})	4.61	s^{-1}
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคฟองแก๊สและวัฏภาคอิมัลชัน (K_{be})	3.11	s^{-1}

3.7 การจำลองฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูง

การจำลองฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูงประกอบด้วย 2 สองวัฏภาคย่อย ได้แก่วัฏภาคเบดหนาแน่น (Dense phase) และวัฏภาคเบดเบาบาง (Lean phase) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งตลอดความสูงของเบด และมีค่าลดลงตามความสูงปลดปล่อยอิสระในท่อขนส่ง (Transport Disengaging Height ; TDH) [14] เครื่องปฏิกรณ์ถูกแบ่งเป็น 4 ช่วง จำลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR) จำนวน 4 เครื่องต่อกันแบบอนุกรมดังแสดงในรูปที่ 3.1 ช่องว่างตามความสูงเบดภายในเครื่องปฏิกรณ์คำนวณจากสมการที่ 3.17 และ 3.18 ถังกวนสมบูรณ์เครื่องแรกแทนวัฏภาคเบดหนาแน่น ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ที่เหลือแทนวัฏภาคของเบดเบาบาง โดยที่ z_i คือความสูงแต่ละช่วงของเครื่องปฏิกรณ์

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_s^* - \frac{(\varepsilon_{sd} - \varepsilon_s^*)}{a\,(z_i - z_{i-1})}\left(e^{-az_i} - e^{-az_{i-1}}\right) \tag{3.17}$$

$$\Delta z = z_2 - z_1 = z_3 - z_2 = z_4 - z_3 \text{ และ } z_4 = z_3 - 3 * \Delta z \tag{3.18}$$

โดย ε_{si} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งในวัฏภาคเบดเบาบางของระดับที่ i (-) ε_s^* คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ (-) ε_{sd} คือ

สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งในวัฏภาคเบดหนาแน่น (-) Δz คือ ผลต่างของความสูงของแต่ละระดับชั้น (m) และ z_i คือ ความสูงของแต่ละระดับชั้นที่ i (m)

3.8 เครื่องควบแน่นไอน้ำ

แก๊สที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้ภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำและแก๊สมีเทนปริมาณเล็กน้อยที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งดำเนินการที่อุณหภูมิ 30 ^{o}Cความดัน 1 บรรยากาศ เพื่อแยกได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.9 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงขนาด 65 เมกกะวัตต์

งานวิจัยข้างต้นเป็นการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ได้ใช้ข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยของ Porrazzo และคณะ [6] ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาต่อยอดด้วยการเพิ่มขนาดของกระบวนการให้เป็น 65 เมกกะวัตต์ โดยใช้ชุดสมการในการออกแบบกระบวนการเช่นเดียวกันกับงานวิจัยข้างต้น ตารางที่ 3.6 และ 3.7 แสดงค่าของตัวที่ใช้ในการออกแบบกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงขนาด 65 เมกกะวัตต์

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงขนาด 65 เมกกะวัตต์

ชื่อตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
พลังงานจากเชื้อเพลิง	P_{fuel}	65	MW
อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์	T	1350	^{o}C
ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์	P	10	atm
อัตราการป้อนเข้าของอนุภาคของแข็ง	F_s	25	kg/s
ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ	U_o	0.36	m/s

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์อากาศขนาด 65 เมกกะวัตต์

ชื่อตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์	T	1350	^{o}C
ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์	P	10	atm
อัตราการป้อนเข้าของอากาศ	F_{air}	22	kg/s
ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ	U_o	7.7	m/s

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.10 กระบวนเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงที่ภาวะพลวัต

การสร้างแบบจำลองกระบวนการที่ภาวะพลวัต ด้วยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์จะใช้หลักการในการสร้างแบบจำลองด้วยการใช้แบบจำลองกระบวนการที่ภาวะคงตัวจากโปรแกรมแอสเพนพลัสมาเป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองกระบวนการที่ภาวะพลวัต โดยการกำหนดข้อมูลของอุปกรณ์การผลิต เช่น ชนิดของอุปกรณ์การผลิต การติดตั้งอุปกรณ์การผลิตในแนวระนาบหรือแนวตั้ง การกำหนดขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์การผลิต

3.11 การหาขนาดของอุปกรณ์การผลิต

3.11.1 การหาขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ จะออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดตามวิธีการของ Porrazzo และคณะ [6] ดังสมการที่ 3.19 – 3.21

$$L_f = \frac{L_m\,(1-\varepsilon_m)}{(1-\varepsilon_{mf})} \tag{3.19}$$

$$A_R = \frac{F_g}{U_o \rho_g} \tag{3.20}$$

$$V_{tot} = L_f\, A_R \tag{3.21}$$

โดย L_f คือ ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ (m) L_m คือ ความสูงของเบด (m) ε_m คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ภาวะเบดนิ่ง (-) ε_{mf} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สที่ภาวะความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (-) A_R คือ พื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์ (m^2) F_G คือ อัตราการป้อนเข้าของแก๊ส (kg/s) ρ_G คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3) U_o คือ ความเร็วแก๊สในกระบวนการ (m/s) และ V_{tot} คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ (m^3)

3.11.2 การหาขนาดของเครื่องควบแน่นไอน้ำ ใช้สมการในการออกแบบเครื่องควบแน่นไอน้ำตามวิธีการของ Couper และคณะ [28] ดังสมการที่ 3.22 - 3.26 โดยกำหนดให้มีใช้เวลาที่สารอยู่ในอุปกรณ์เท่ากับ 5 นาที และ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ในสมการ 3.22 เท่ากับ 0.0305

$$u = k * \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1} \tag{3.22}$$

$$u_{act} = 0.75 * u \tag{3.23}$$

$$D = \sqrt{\frac{4F_g}{\pi * u_{act} * \rho_g}} \qquad (3.24)$$

$$A_s = \frac{\pi D^2}{4} \qquad (3.25)$$

$$L = \frac{F_l * \tau}{\rho_l * A_S} \qquad (3.26)$$

โดยที่ u คือ ความเร็วอุดมคติของแก๊สในเครื่องควบแน่นไอน้ำ (m/s) u_{act} คือ ความเร็วจริงของแก๊สในเครื่องควบแน่นไอน้ำ (m/s) D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องควบแน่นไอน้ำ (m) F_g คือ อัตราการป้อนขาออกของแก๊สในเครื่องควบแน่นไอน้ำ (kg/s) ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3) A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเครื่องควบแน่นไอน้ำ (m^2) F_l คือ อัตราการป้อนขาออกของเหลวในเครื่องควบแน่นไอน้ำ (kg/s) ρ_l คือ ความหนาแน่นของเหลว (kg/m^3) และ τ คือ เวลาที่สารอยู่ในอุปกรณ์ (s)

จากสมการที่ 3.22 ถึง 3.26 ทำให้สามารถหาค่าความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์การผลิตได้ดังตารางที่ 3.8 และ 3.9

ตารางที่ 3.8 อุปกรณ์ภายในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	ความสูง (m)	ปริมาตร (m^3)	ลักษณะการติดตั้ง
เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง	2.20	1.3	5	แนวตั้ง
เครื่องปฏิกรณ์อากาศ	0.8	3.5	1.76	แนวตั้ง
เครื่องควบแน่นไอน้ำ	0.17	0.48	0.01	แนวตั้ง

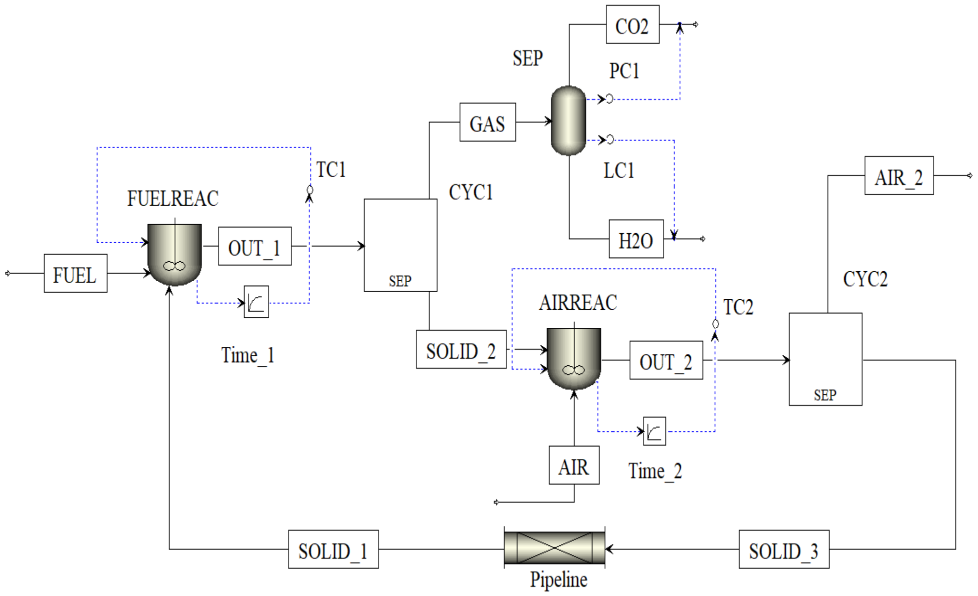
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.9 อุปกรณ์ภายในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงขนาด 65 เมกกะวัตต์

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	ความสูง (m)	ปริมาตร (m^3)	ลักษณะการติดตั้ง
เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง	6.08	4.57	133	แนวตั้ง
เครื่องปฏิกรณ์อากาศ	3.90	15.67	187.4	แนวตั้ง
เครื่องควบแน่นไอน้ำ	2.02	0.77	1.24	แนวตั้ง

3.12 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์

เนื่องจากในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดในการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดด้วยโปรแกรมจำลองแอสเพนไดนามิกส์ โดยกล่องการคำนวณ (Calculator block) และกล่องการถ่ายโอน (Transfer block) ยังไม่รองรับสำหรับโปแกรมจำลอง แอสเพนไดนามิกส์ ดังนั้นในแบบจำลองเชิงพลวัตจึงใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ (CSTR) แทนเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ที่ภาวะพลวัต

แบบจำลองเชิงพลวัตสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เครื่องปฏิกรณ์อากาศ และเครื่องควบแน่นไอน้ำ และเครื่องควบคุม 4 เครื่อง ได้แก่ เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ เครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ และเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ

ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองกระบวนการเชิงพลวัตด้วยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยการปรับค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน แบบจำลองกระบวนการโดยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ละเลยพลวัตของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final control element) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงกำหนดค่าเวลาคงที่ของตัวดึงความร้อนออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายของระบบควบคุม

อุณหภูมิ โดยกำหนดให้ค่าเวลาคงที่ของตัวดึงความร้อนออกจากเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเท่ากับ 15 นาที ในขณะที่ค่าเวลาคงที่ของตัวดึงความร้อนออกจากเครื่องปฏิกรณ์อากาศเท่ากับ 20 นาที

3.13 ขั้นตอนการจำลองกระบวนการเชิงพลวัต

1) เริ่มต้นการคำนวณค่าตั้งต้น (Initialization) ของข้อมูลจากแบบจำลองที่สถานะคงตัว เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าข้อมูลยังคงลู่เข้า และไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นก่อนการทำแบบจำลองเชิงพลวัต

2) ติดตั้งระบบควบคุมในแบบจำลองกระบวนการ โดยอิงตำแหน่งและชนิดของเครื่องควบคุมตามกระบวนการผลิตจริง และทำการตั้งโหมดของเครื่องควบคุมเป็นแบบปรับเอง (Manual mode)

3) ศึกษาและวิเคราะห์ผลของอันตรกิริยาระหว่างวงควบคุมโดยการวิเคราะห์เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกน (Relative Gain Array) โดยการหาค่าเกนของคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุมทุกคู่ ซึ่งทำได้โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับที่สนใจและเฝ้าติดตามขนาดของความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับตัวแปรควบคุมทุกตัวในระบบ ซึ่งค่าเกนหาได้จากสมการที่ 2.3 ด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้ค่าเกนหนึ่งชุดที่มีตัวแปรปรับเดียวกัน ปรับค่าของตัวแปรปรับคืนให้เท่ากับตอนเริ่มต้น จากนั้น ทำการปรับตัวแปรปรับตัวใหม่เพื่อหาค่าเกนชุดใหม่จนครบตามจำนวนของตัวแปรปรับที่มีในกระบวนการ นำชุดของค่าเกนที่ได้มาหาเมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนตามสมการที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4) เปรียบเทียบคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมต่อการควบคุมที่ได้จากการวิเคราะห์เมทริกซ์สัมพัทธ์ของเกนกับวงควบคุมของกระบวนการจริง

5) ติดตั้งวงควบคุมลงในแบบจำลองกระบวนการ และป้อนค่าพารามิเตอร์จริงลงในเครื่องควบคุม ทำการรันแบบจำลองกระบวนการและเปรียบเทียบผลได้กับกระบวนการจริง

6) ศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองกระบวนการเชิงพลวัตตามวัตถุประสงค์งานวิจัย

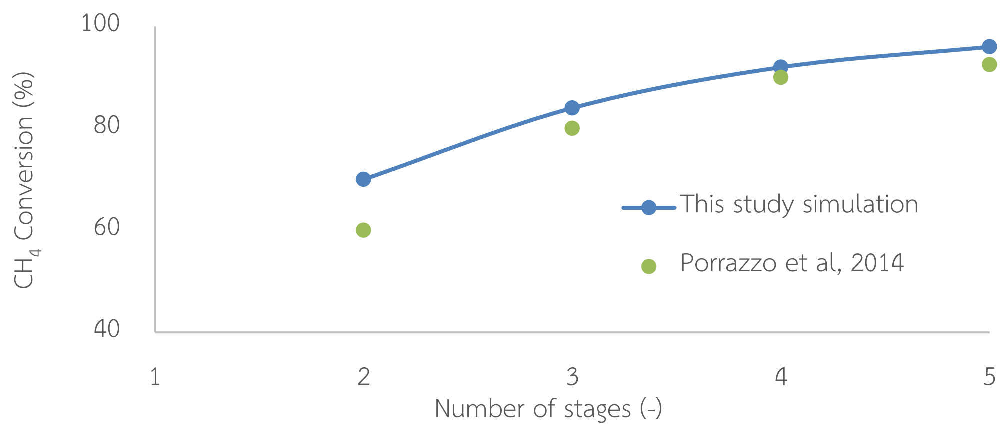
บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกเช่น การเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมรอบกระบวนการ ส่งผลให้กระบวนการไม่อาจดำเนินไปภายใต้ภาวะที่ได้รับการออกแบบตลอดเวลา ความเบี่ยงเบนของภาวะการดำเนินการต่อปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งอาจส่งผลต่อความปลอดภัยของการดำเนินกระบวนการ ด้วยเหตุผลนี้การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของกระบวนการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยภายนอกจึงมีความสำคัญเพื่อให้เกิดความเข้าใจต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการและจัดการกับการเปลี่ยนแปลงนั้นได้อย่างรวดเร็ว โดยอาศัยการรักษาภาวะดำเนินการของกระบวนการให้เป็นไปตามเป้าหมายและสามารถดำเนินกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง และทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม ด้วยการปรับค่าเป้าหมายและค่าตัวแปรรบกวนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ความดันภายในเครื่องควบแน่นไอน้ำ และระดับความสูงของเหลวภายในเครื่องควบแน่นไอน้ำ

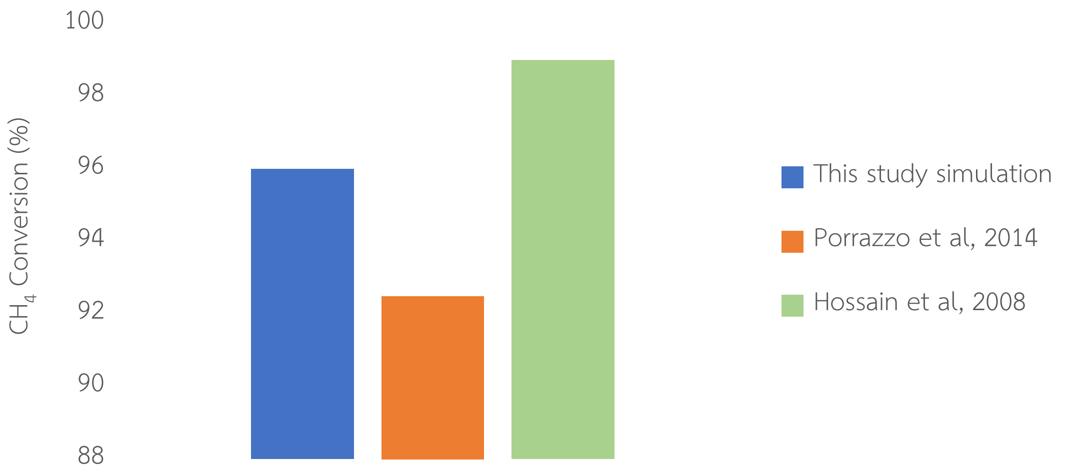
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระบวนการ

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (Conversion) ของแก๊สมีเทนที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ถูกนำมาเปรียบเทียบกับงานแบบจำลองกระบวนการของ Porrazzo และคณะ [6] ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทนในละชั้นของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทนภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงของแบบจำลองกระบวนการในงานวิจัยนี้ แบบจำลองกระบวนการของ Porrazzo และคณะ [6] และจากการทดลองของ Hossain และคณะ [29] ซึ่งใช้การดำเนินการเดียวกัน จากผลการเปรียบเทียบพบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน



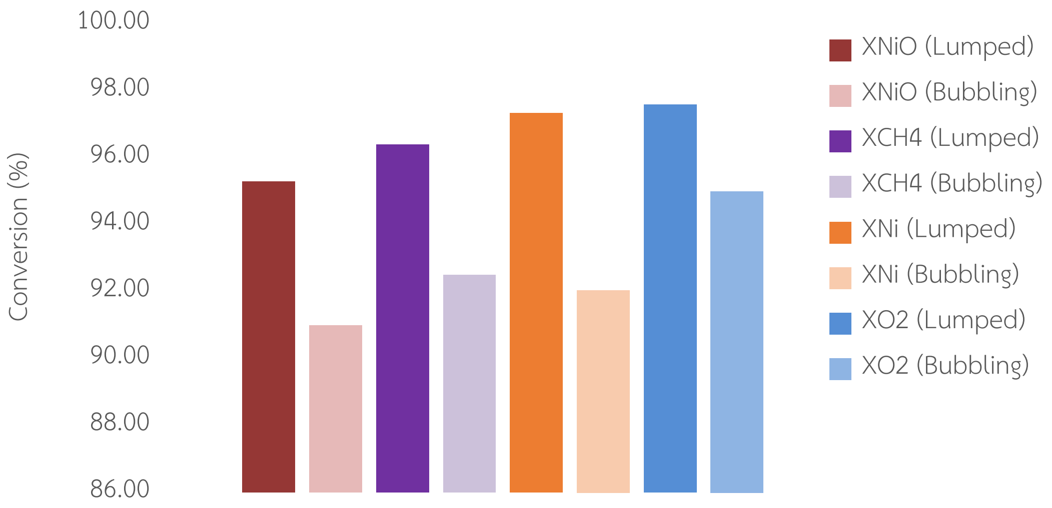
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทนของแบบจำลองกระบวนการและการทดลอง

4.2 การวิเคราะห์การจำลองกระบวนการเชิงพลวัต

เมื่อได้แบบจำลองกระบวนการข้างต้นที่สอดคล้องกับผลการทดลอง จากนั้นได้ทำการศึกษาต่อยอดเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงขนาด 65 เมกกะวัตต์ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดดังที่อธิบายไว้ข้างต้นในบทที่แล้ว (หัวข้อที่ 3.12) จึงได้นำแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ (รูปที่ 3.2) มาใช้เป็นตัวแทนของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (รูปที่ 3.1)

ดังรูปที่ 4.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงของโลหะนิกเกิลออกไซด์ แก๊สมีเทน โลหะนิกเกิล และร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สออกซิเจนระหว่างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนสมบูรณ์ที่ภาวะคงตัว พบว่ามีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันมากโดยเฉพาะภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ซึ่งค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของโลหะนิกเกิลออกไซด์และแก๊สมีเทนของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์มีค่าสูงกว่าแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเนื่องจากใน

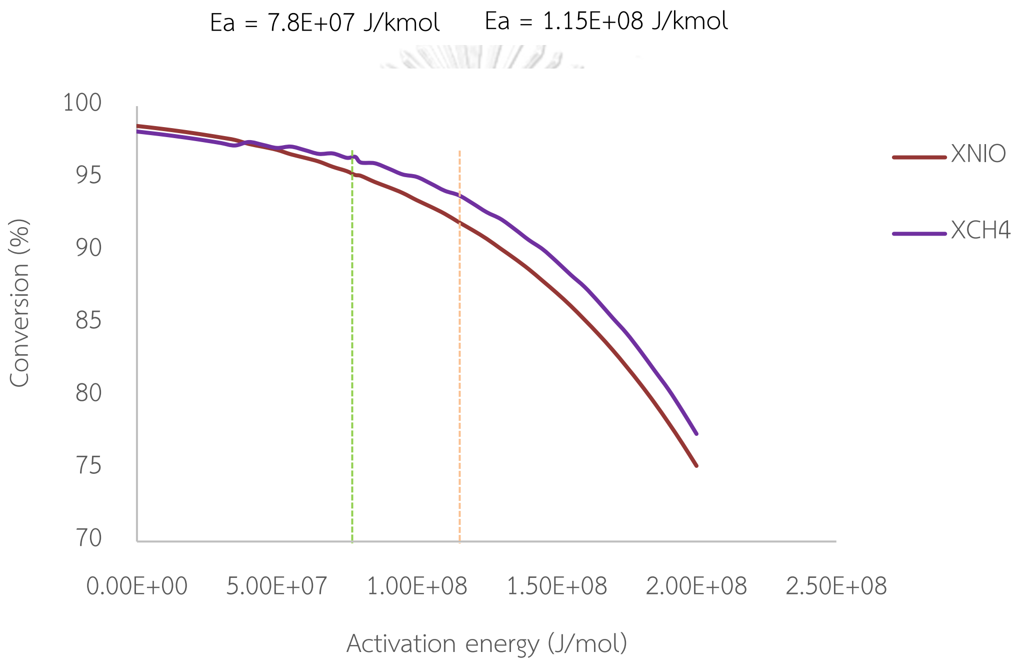
แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์เกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ภายในระบบ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ทั่วทั้งระบบ ในขณะที่แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ภายในระบบ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่ทั่วทั้งระบบ เนื่องจากในวัฏภาคฟองแก๊สเป็นส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์และแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีจากการทดลองของ Abad และคณะ [8]

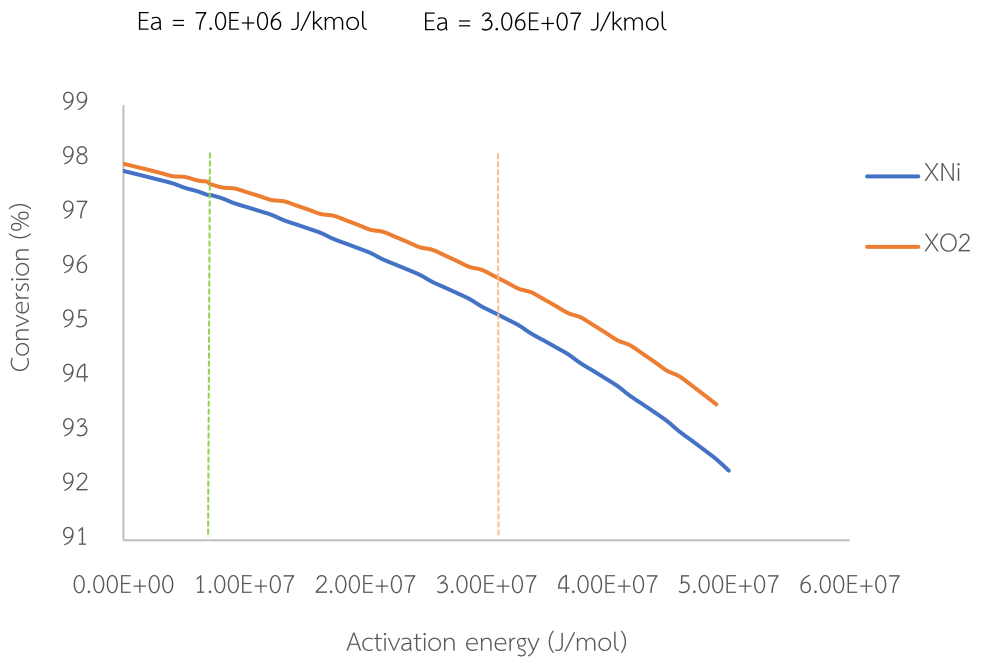
เพื่อแก้ไขความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการปรับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมี โดยในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้เลือกใช้ค่าจลนพลศาสตร์ที่อ้างอิงจากการทดลอง [8] ในขณะที่แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์นั้นได้ปรับเพิ่มค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมี จากรูปที่ 4.4 เป็นการปรับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยารีดักชันภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์โดยการปรับค่าจาก 7.8E+07 จูลต่อกิโลโมล (เส้นประสีเขียว) ที่เป็นค่าจากการทดลองของ Abad และคณะ [8] มาเป็นค่า 1.15 E+08 จูลต่อกิโลโมล (เส้นประสีส้ม) เพื่อทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์มีค่าใกล้เคียงกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงของแบบจำลองฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน รูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการปรับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในเครื่องปฏิกรณ์อากาศของแบบจำลองเครื่องปฏิกิรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ โดยปรับค่าจาก 7.00E+06 จูลต่อกิโลโมล (เส้นประสีเขียว) ที่เป็นค่าจากการทดลองของ Abad และคณะ มาเป็นค่า 2.84E+07 จูลต่อกิโลโมล

(เส้นประสีส้ม) เพื่อทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์อากาศของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ค่าใกล้เคียงกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์อากาศของแบบจำลองฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองแบบจำลอง โดยแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ที่ปรับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีและแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนใช้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีจากการทดลองของ Abad และคณะ [8]

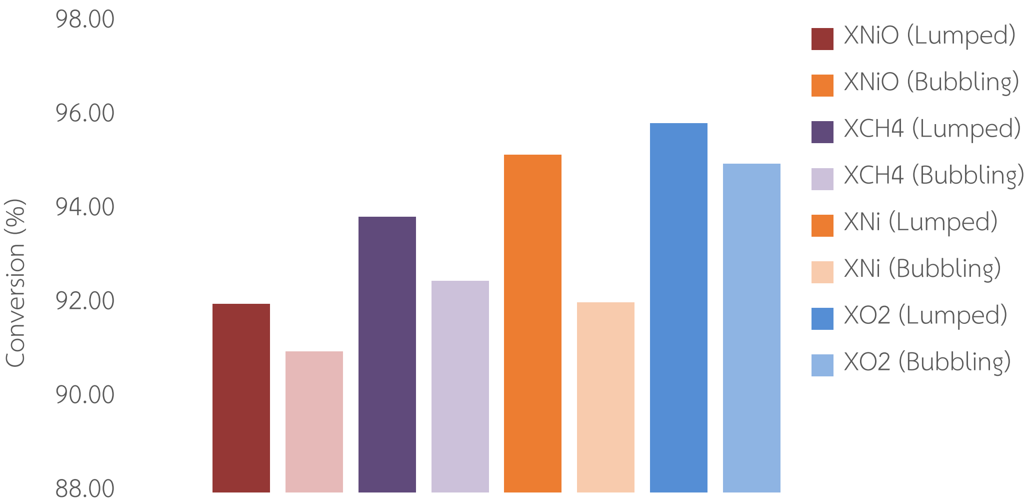


CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยารีดักชันกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงของโลหะนิกเกิลออกไซด์และแก๊สมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยารีดักชันกับร้อยละการเปลี่ยนแปลงของโลหะนิกเกิลและแก๊สออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ที่ปรับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีและแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีจากการทดลองของ Abad และคณะ [8]

การจำลองกระบวนการเชิงพลวัตด้วยโปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์ เป็นการนำข้อมูลที่ภาวะคงตัวที่ได้จากโปรแกรมแอสเพนพลัสมาเป็นค่าตั้งต้นในการจำลองกระบวนการเชิงพลวัต โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบควบคุมทั้งสิ้น 4 วงควบคุม ดังตารางที่ 4.1 โดยประกอบด้วยตัวแปรควบคุมทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ และความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรดังกล่าวส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องควบแน่นไอน้ำ และประกอบด้วยตัวแปรปรับทั้งหมด 4 ตัวแปรได้แก่ อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ ซึ่งเป็นการปรับอัตราการถ่ายโอนความร้อนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศ อัตราการป้อนของเหลวขาออกที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ และอัตราการป้อนของแก๊สขาออกที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ

ตารางที่ 4.1 วงควบคุมกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

วงควบคุม	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรปรับ
TC1	อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง	อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง
TC2	อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ	อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ
LC1	ระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ	อัตราการป้อนของเหลวขาออกที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ
PC1	ความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ	อัตราการป้อนของแก๊สขาออกที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ

4.3 การศึกษาคู่ตัวแปรปรับ - ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม

การควบคุมกระบวนการอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องทำการเลือกตัวแปรปรับที่ให้ผลการควบคุมตัวแปรควบคุมที่ดีที่สุด กล่าวคือ ตัวแปรปรับจะต้องมีประสิทธิภาพในการควบคุมตัวแปรควบคุมนั้นๆ วิธีการซึ่งเป็นที่นิยมในการเลือกคู่ตัวแปรปรับ-ตัวแปรควบคุม คือ วิธีการวิเคราะห์เกน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สัมพัทธ์ (Relative Gain Array; RGA) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วย สามารถใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างตัวแปรต่างๆได้โดยไม่ขึ้นกับความแตกต่างของหน่วยของตัวแปรนั้นๆ

การหาเมทริกซ์เกนสัมพันธ์สามารถหาได้ด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

1) หาค่าเกนของแต่ละวงควบคุมด้วยการตั้งเครื่องควบคุมให้อยู่ในโหมดปรับค่าเอง (Manual mode) จากนั้นทำการเพิ่มค่าตัวแปรปรับของแต่ละวงควบคุม 10% ทีละค่า จนทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมของแต่ละวงควบคุม ที่ใช้ในการหาค่าเกน
2) หาค่าเมทริกซ์เกนสัมพัทธ์ของระบบโดยการใช้วิธีการคำนวณของ Bristol [2] ซึ่งให้ความสัมพันธ์ว่า

$$\mu = \frac{K}{\acute{K}} = K \otimes (K^{-1})^{t} \qquad (4.1)$$

โดยที่ μ คือ เกนสัมพัทธ์

K คือ ค่าเกนของวงควบคุมแบบเปิด

K^{-1} คือ ค่าอินเวอร์สของค่าเกนของวงควบคุมแบบเปิด

$\otimes$ คือ การดำเนินการคูณกันระหว่างเมทริกซ์ที่ตำแหน่งเดียวกัน,

t คือ การดำเนินการเมทริกซ์สับเปลี่ยน

จากวิธีการข้างต้น สามารถหาค่าเมทริกซ์เกนสัมพัทธ์ได้ดังตารางที่ 4.3 โดยแสดงเป็นค่ารหัสดังนี้
C<u>X</u> โดยที่ C แทน ตัวแปรควบคุม และ X แทนลำดับหน้าที่ของตัวแปรควบคุม
M<u>Y</u> โดยที่ M แทน ตัวแปรปรับ และ Y แทนลำดับที่ของตัวแปรปรับ M

ตารางที่ 4.2 เกนสัมพัทธ์ของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

RGA	C1	C2	C3	C4
M1	9.997E-01	8.756E-09	3.066E-04	-1.565E-07
M2	-1.299E-09	9.999E-01	1.060E-04	-1.498E-09
M3	3.064E-04	1.060E-04	1.002E+00	-2.401E-03
M4	-1.522E-10	-6.645E-11	-2.402E-03	1.002E+00

ตารางที่ 4.3 ความหมายของรหัส C และ M ในตารางที่ 4.2

X&Y	ตัวแปรควบคุม C	ตัวแปรปรับ M
1	อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง	อัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง
2	อุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ	อัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ
3	ระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ	อัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ
4	ความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ	อัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ

ตารางที่ 4.3 ค่าของเกนสัมพัทธ์ที่มีค่าใกล้เคียงหนึ่งหรือเท่ากับหนึ่งของแต่ละแถวจะถูกเลือกเป็นตัวแปรปรับ จากนั้นเลื่อนค่าเกนสัมพัทธ์ในแถวนั้นขึ้นไปด้านบนพบตัวแปรใด ตัวแปรนั้นจะเป็นตัวแปรควบคุม กล่าวคือ เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 ควบคู่กับแผนผังกระบวนการ เมื่อทำการติดตั้งเครื่องควบคุม พบว่าการเลือกจับคู่ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมต่างๆมีความเหมาะสมอยู่แล้ว โดยสังเกตได้จาก การปรับตัวแปรปรับของแต่ละวงควบคุมนั้นๆ ส่งผลให้ค่าเกนสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งแสดงว่าตัวแปรปรับมีความสามารถในการควบคุมตัวแปรควบคุมได้ดีที่สุดในขณะที่ไม่สามารถควบคุมหรือมีความสามารถในการควบคุมตัวแปรอื่นๆได้น้อยมากหรืออาจจะไม่มีเลย โดยสังเกตได้จากค่าเกนสัมพัทธ์ที่มีค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์)

4.4 การปรับแต่งค่าเครื่องควบคุม

การปรับแต่งเครื่องควบคุม ได้เลือกใช้การปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์ ซึ่งเป็นการปรับแต่งพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมด้วยการหาค่าเกนสูงสุดและคาบสูงสุด โดยการตั้งค่าเครื่องควบคุมให้อยู่ในโหมดการทำงานอัตโนมัติ จากนั้นเพิ่มค่าอัตราขยายเชิงสถิตขึ้นอย่างช้าๆจนกระทั่งการตอบสนองของตัวแปรควบคุมแกว่งด้วยแอมพลิจูดคงที่ ค่าอัตราขยายเชิงสถิตสูงสุดและค่าคาบของการแกว่งนั้นคือ ค่าคาบสูงสุดผลที่ได้จากการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบวงปิดสามารถนำไปคำนวณโดยสูตรของ ซิกเลอร์-นิโคล ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และคำนวณโดยสูตรของไทเรียส-ลูเบน ดังตารางที่ 4.5

Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.4 การหาค่าตัวแปรควบคุมด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคล

วงควบคุม	ทดสอบแบบวงปิด		ซิกเลอร์-นิโคล		
	K_{cu}	T_u	K_c	τ_I	τ_d
TC1	31.929	0.24	23.477	0.150	0.024
TC2	51.770	0.240	38.066	0.150	0.024
LC1	558.804	0.120	410.885	0.075	0.012
PC1	34.851	0.120	25.626	0.075	0.012

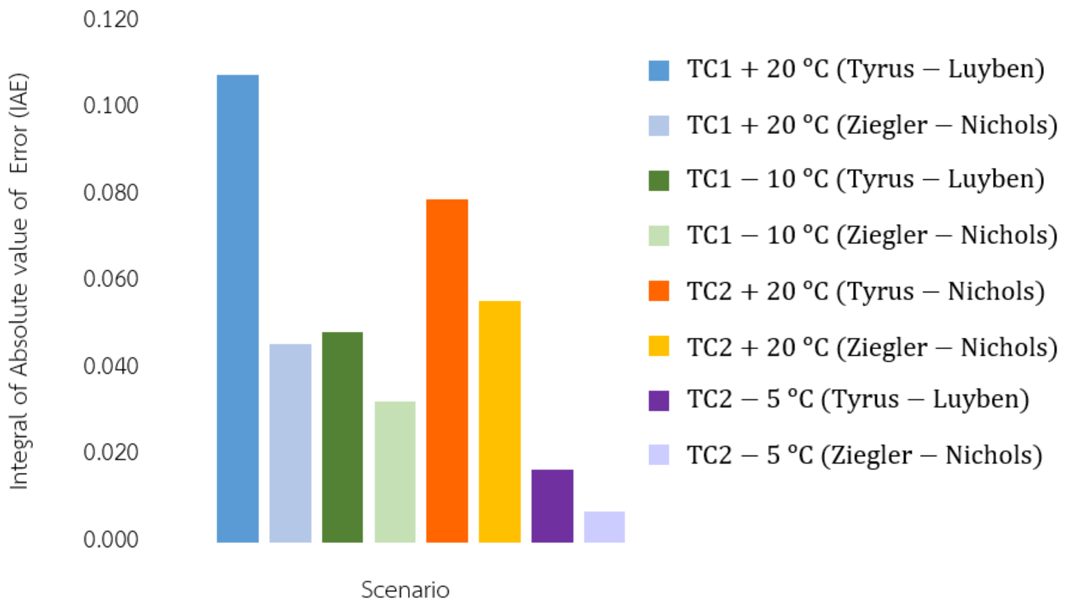
ตารางที่ 4.5 การหาค่าตัวแปรควบคุมด้วยวิธีของไทเรียส-ลูเบน

วงควบคุม	ทดสอบแบบวงปิด		ไทเรียส-ลูเบน		
	K_{cu}	T_u	K_c	τ_I	τ_d
TC1	31.332	0.240	9.791	0.528	-
TC2	46.788	0.240	14.621	0.528	-
LC1	519.268	0.120	162.271	0.264	-
PC1	31.751	0.120	9.922	0.264	-

4.5 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่อกระบวนการควบคุม

การปรับแต่งค่าเครื่องควบคุมด้วยวิธีที่ต่างกันทำให้ได้พารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมที่แตกต่างกัน ทำให้ผลของการควบคุมกระบวนการจึงแตกต่างกันด้วย การเปรียบเทียบผลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการสามารถเปรียบเทียบได้จากผลรวมของค่าสมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (Integral of Absolute value of Error; IAE) ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการสร้างสถานการณ์จำลองการปรับค่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ดังรูปที่ 4.7

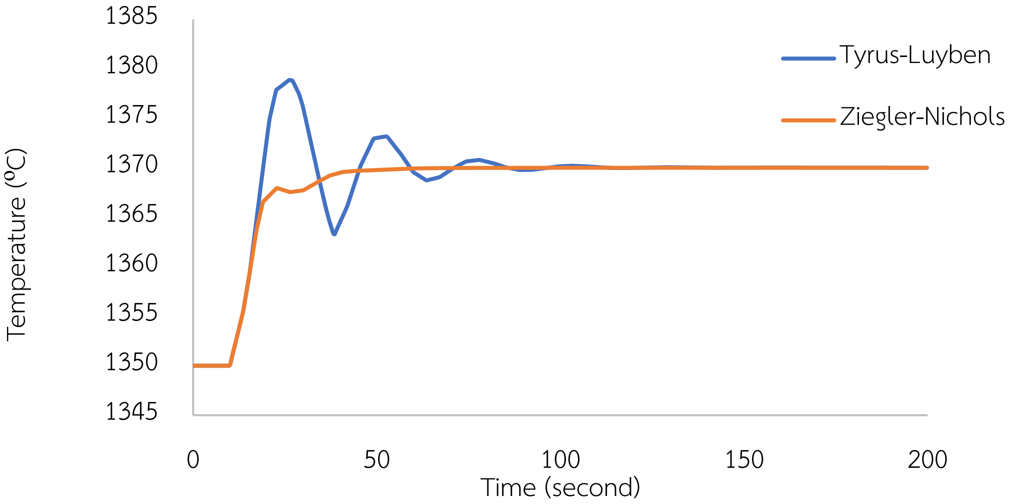
จากรูปที่ 4.7 พบว่าวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าวิธีของไทรัส-ลูเบน จากการให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าเนื่องจาก K_C ของการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบซิกเลอร์-นิโคลสูงกว่าการปรับแต่งเครื่องควบคุมของไทเรียส-ลูเบน ในขณะที่ τ_I ของการปรับแต่งด้วยวิธีการของซิกเลอร์-นิโคลสั้นกว่า ทำให้พฤติกรรมการตอบสนองต่อการควบคุมกระบวนการเมื่อปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบซิกเลอร์-นิโคลเร็วกว่าวิธีการปรับแต่งเครื่องควบคุมของไทเรียส-ลูเบน



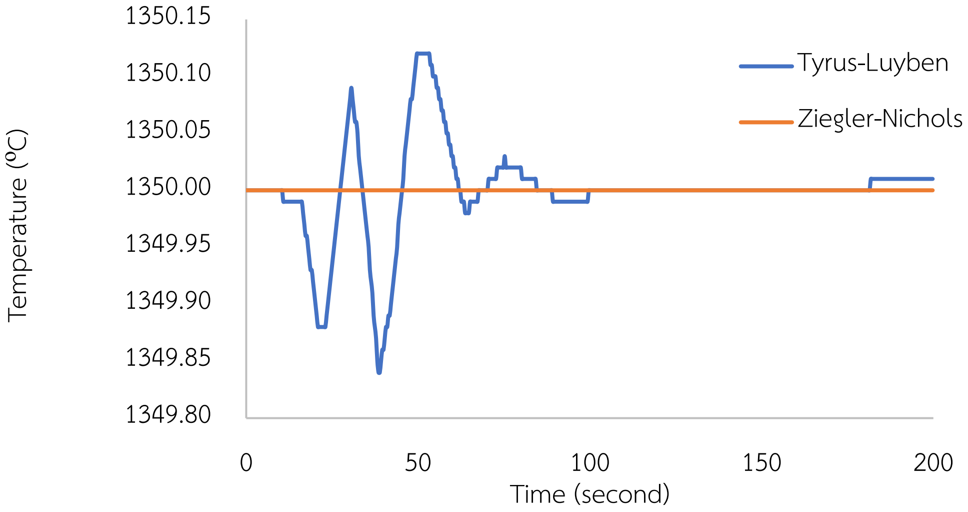
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีซิกเลอร์-นิโคล และวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีไทเรียส-ลูเบน

4.5.1 การจำลองสถานการณ์ปรับเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

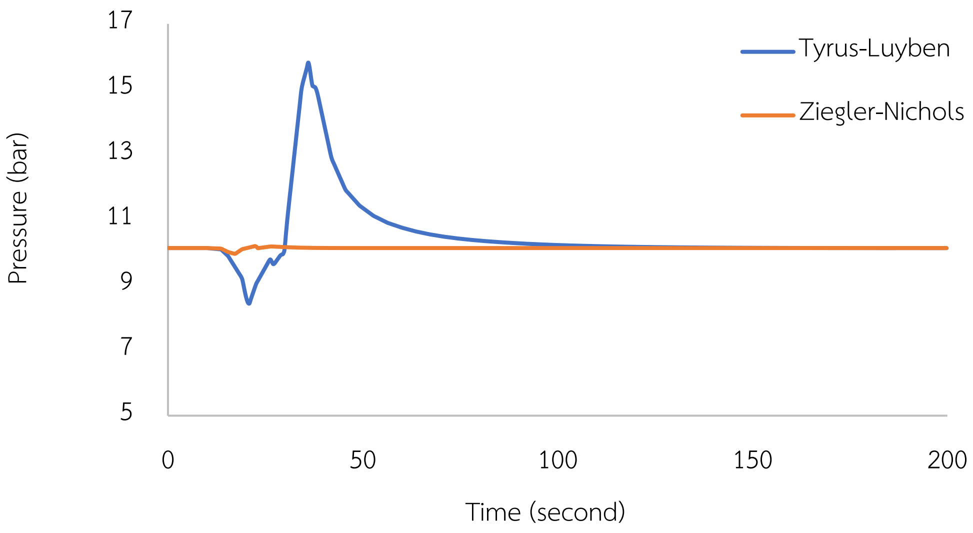
ในสถานการณ์จำลองการปรับเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 20 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง จะสังเกตได้ว่าผลการตอบสนองเชิงพลวัตของแบบจำลองที่ใช้การปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรควบคุมน้อยกว่าการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของไทเรียส-ลูเบน จากรูปที่ 4.8 – 4.11 เมื่อปรับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจาก 1350 องศาเซลเซียส เป็น 1370 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมที่ใช้วิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบซิกเลอร์-นิโคลมีการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบไทเรียส-ลูเบน โดยแต่ละวงควบคุมเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรควบคุมต่ำกว่า จึงส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า



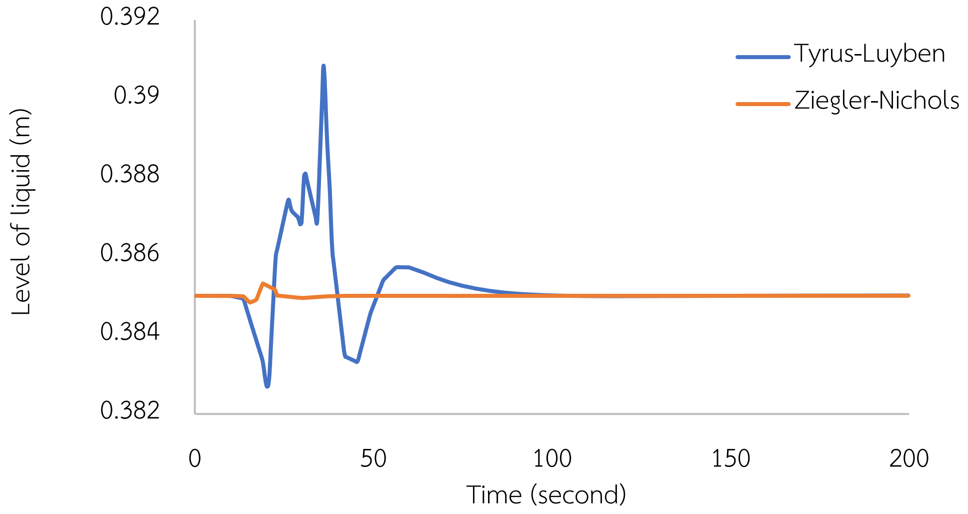
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.1



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.1



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.1

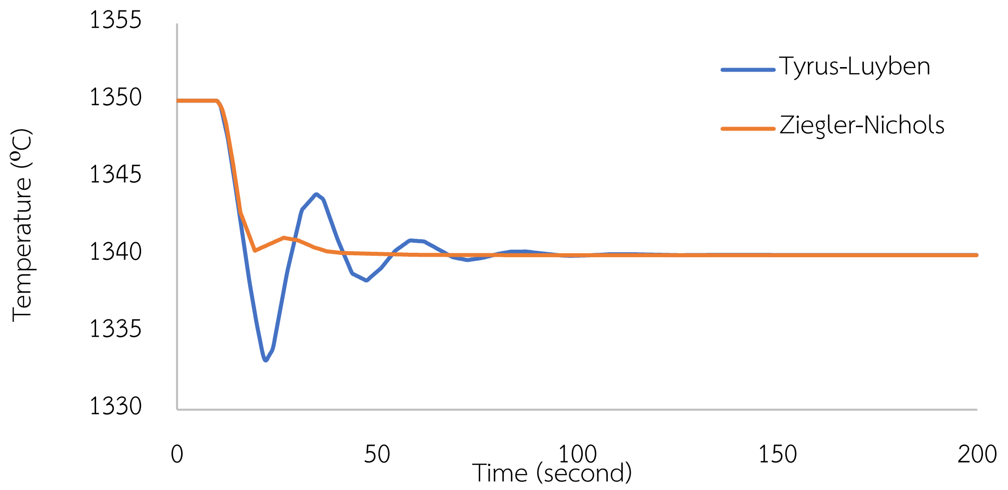


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.1

4.5.2 การจำลองสถานการณ์ปรับลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

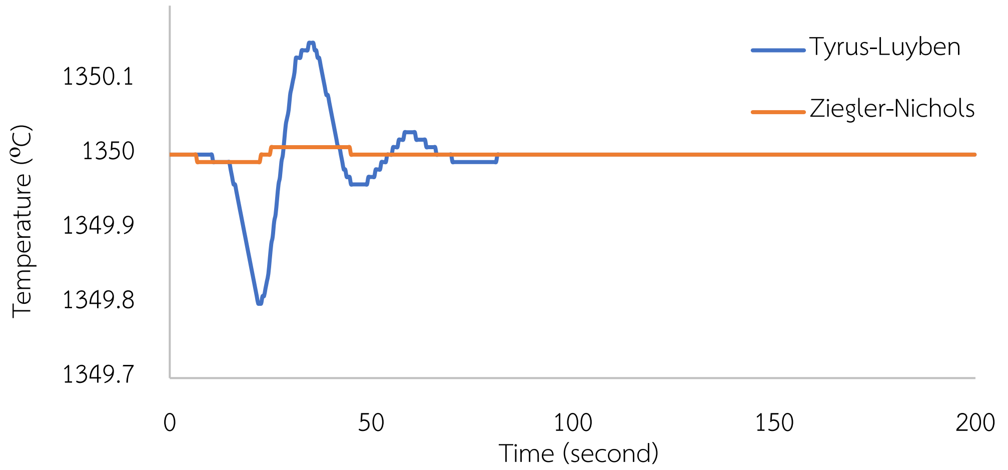
ในสถานการณ์จำลองการปรับลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 10 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง จะสังเกตได้ว่าผลการตอบสนองเชิงพลวัตของแบบจำลองที่ใช้การปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรควบคุมน้อยกว่าการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของไทเรียส-ลูเบน จากรูปที่ 4.12 – 4.15 เมื่อปรับ

อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจาก 1350 องศาเซลเซียส เป็น 1340 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมที่ใช้วิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบซิกเลอร์-นิโคลมีการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบไทเรียส-ลูเบน โดยแต่ละวงควบคุมเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรควบคุมต่ำกว่า ยกเว้นวงควบคุมความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ เมื่อใช้วิธีปรับแต่งพารามิเตอร์แบบซิกเลอร์-นิโคล ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำเพิ่มสูงขึ้นถึง 16 บาร์ ก่อนจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายในภาวะคงตัว ในขณะที่ใช้วิธีการปรับพารามิเตอร์แบบไทเรียส-ลูเบน ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำเพิ่มขึ้นเพียง 12 บาร์ ก่อนจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ภาวะคงตัว

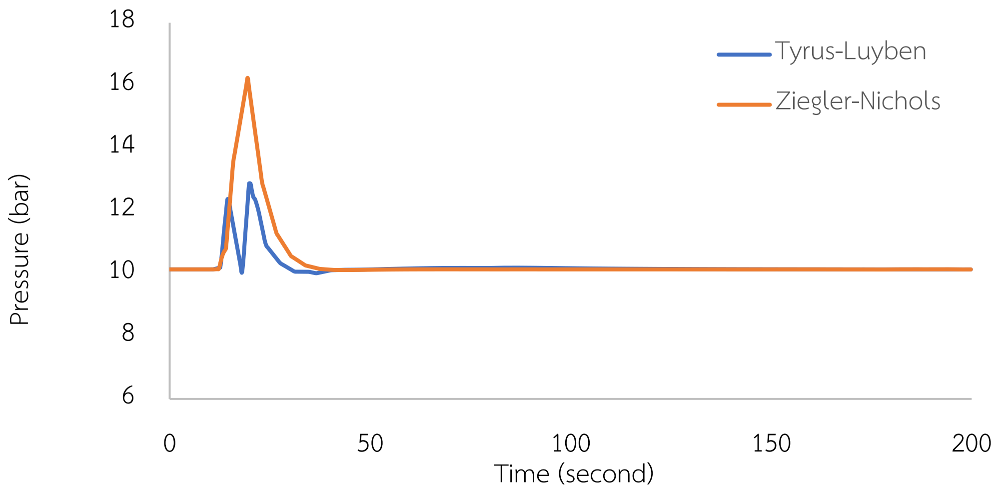


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.2

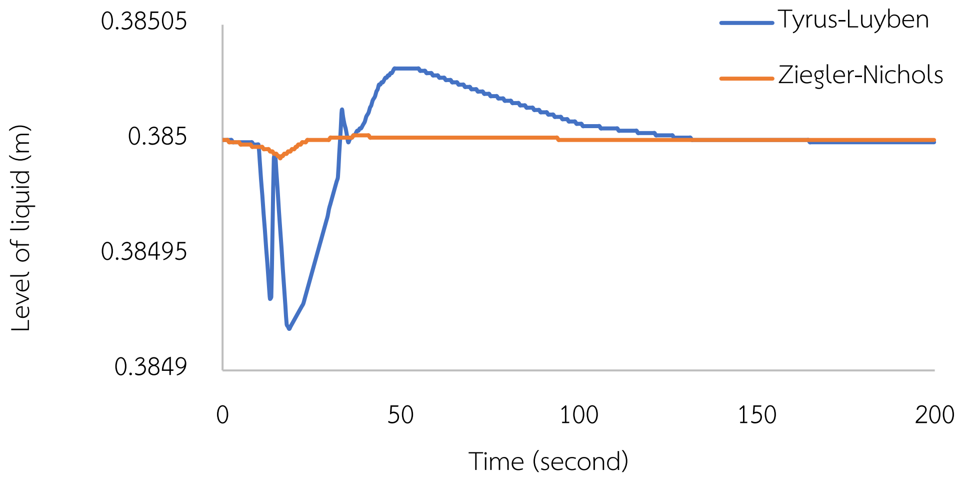
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.2



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.2

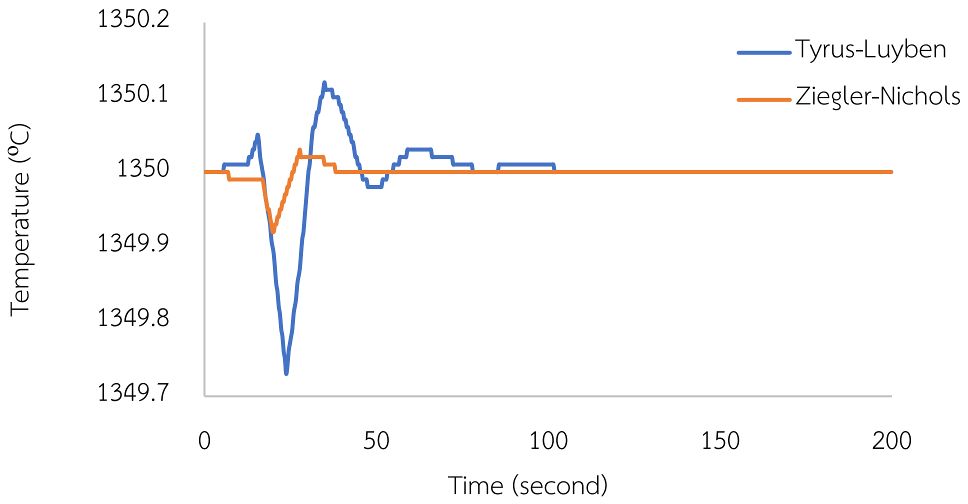


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.2

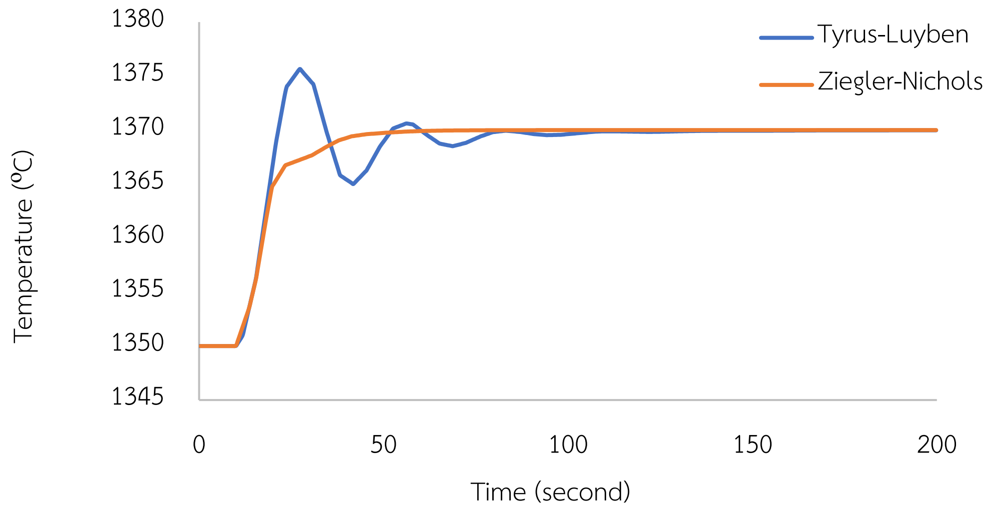
4.5.3 การจำลองสถานการณ์ปรับเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ

ในสถานการณ์จำลองการปรับเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ 20 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง จะสังเกตได้ว่าผลการตอบสนองเชิงพลวัตของแบบจำลองที่ใช้การปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรควบคุมน้อยกว่าการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของไทเรียส-ลูเบน จากรูปที่ 4.16 – 4.19 เมื่อปรับ

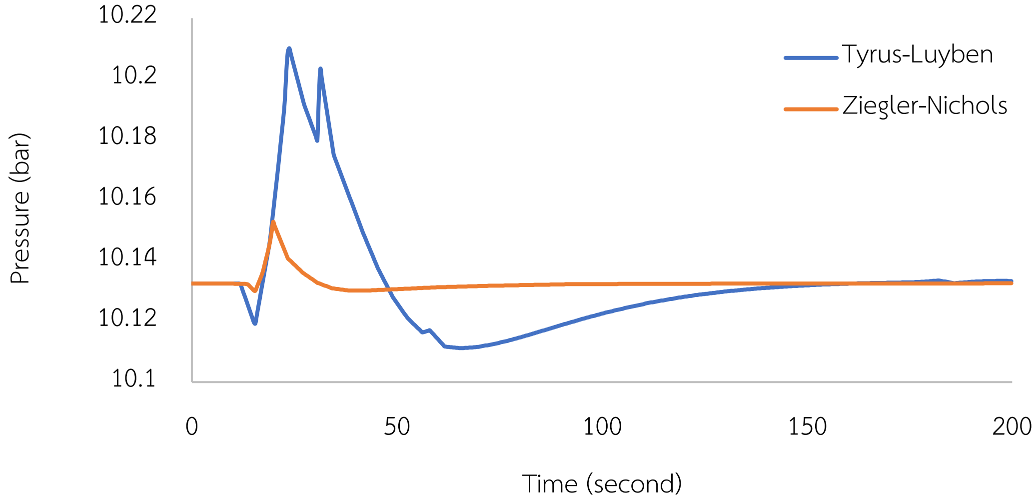
อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศจาก 1350 องศาเซลเซียส เป็น 1370 องศาเซลเซียส จะสังเกตได้ว่าผลกระทบต่อการปรับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศส่งผลกระทบต่อวงควบคุมระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำ และความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำน้อยกว่าการปรับเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เนื่องจากการปรับอุณหภูมิดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงโดยตรง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้น้อยกว่าการปรับเพิ่มค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง



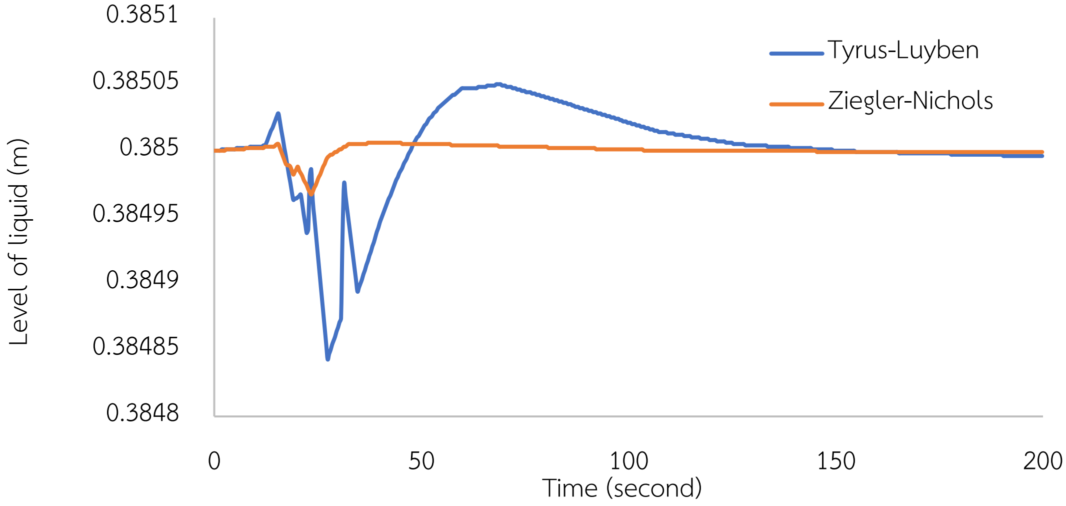
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.3



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.3



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.3

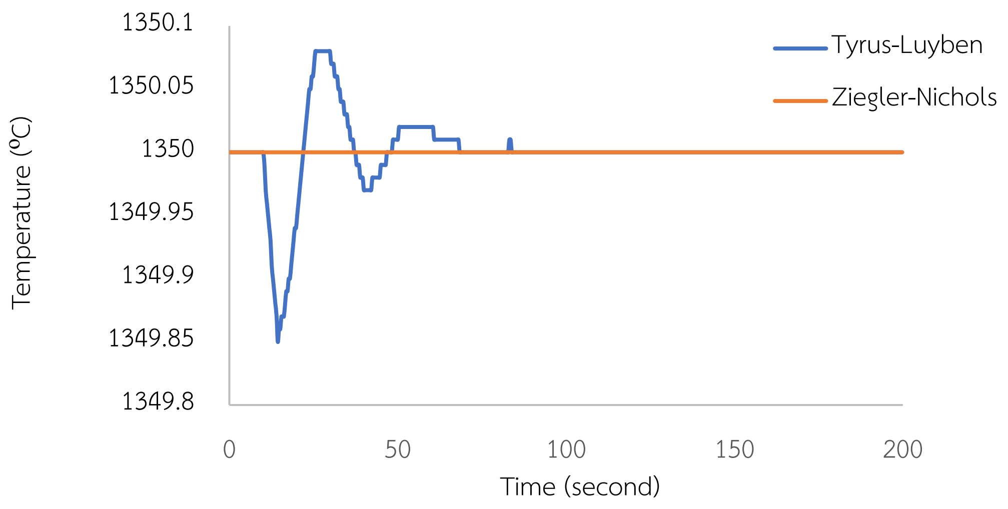


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.3

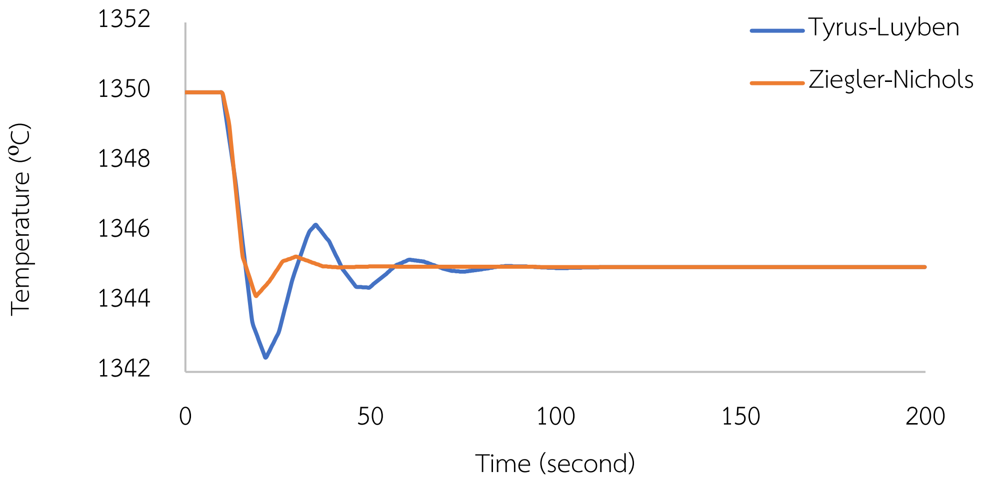
4.5.4 การจำลองสถานการณ์ปรับลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ

ในสถานการณ์จำลองการปรับลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ 20 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง จะสังเกตได้ว่าผลการตอบสนองเชิงพลวัตของแบบจำลองที่ใช้การปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลเกิดการแกว่งของค่าตัวแปรควบคุมน้อยกว่าการปรับแต่งพารามิเตอร์เครื่องควบคุมด้วยวิธีของไทเรียส-ลูเบน จากรูปที่ 4.20 – 4.23 เมื่อปรับ

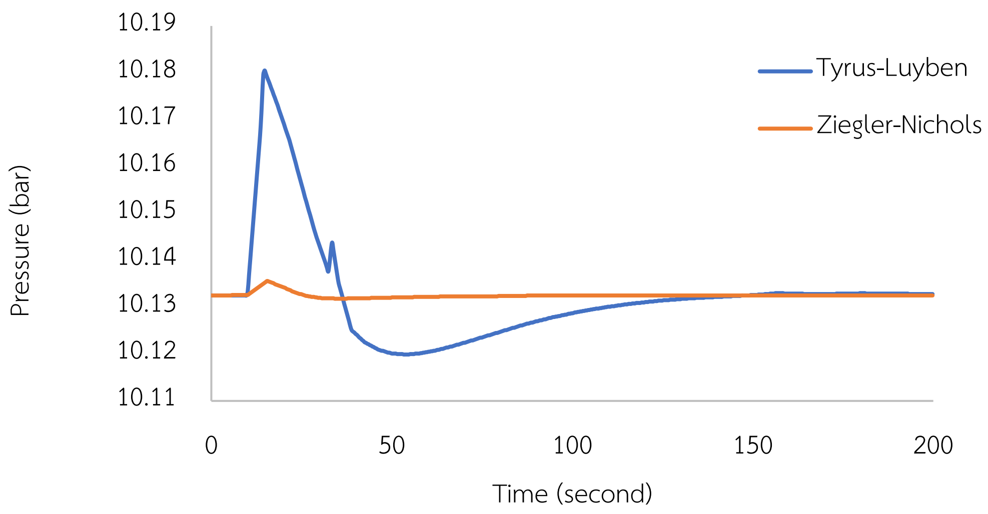
อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศจาก 1350 องศาเซลเซียส เป็น 1345 องศาเซลเซียส จะสังเกตได้ว่าผลกระทบต่อการปรับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศส่งผลกระทบต่อวงควบคุมระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำ และความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำน้อยกว่าการปรับลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเช่นเดียวกัน



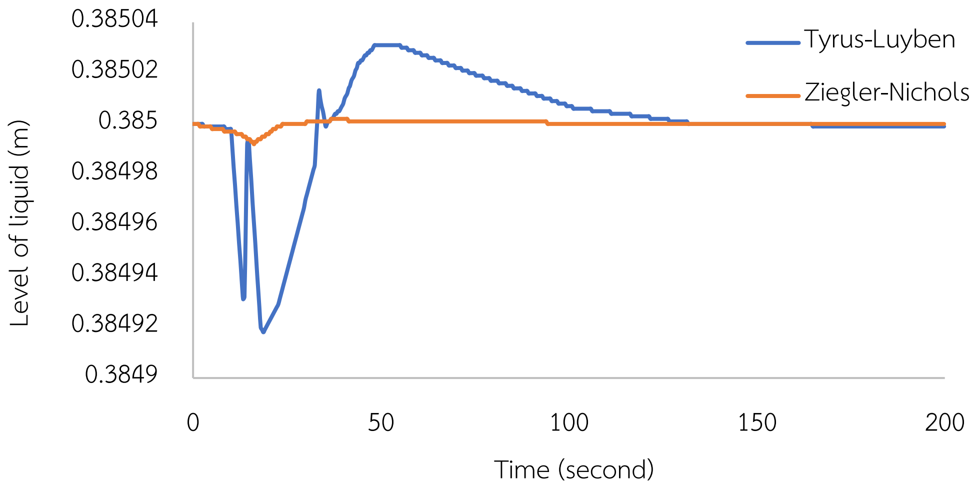
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.4



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.4



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.4



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ที่ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมต่างกัน ในสถานการณ์จำลองที่ 4.5.4

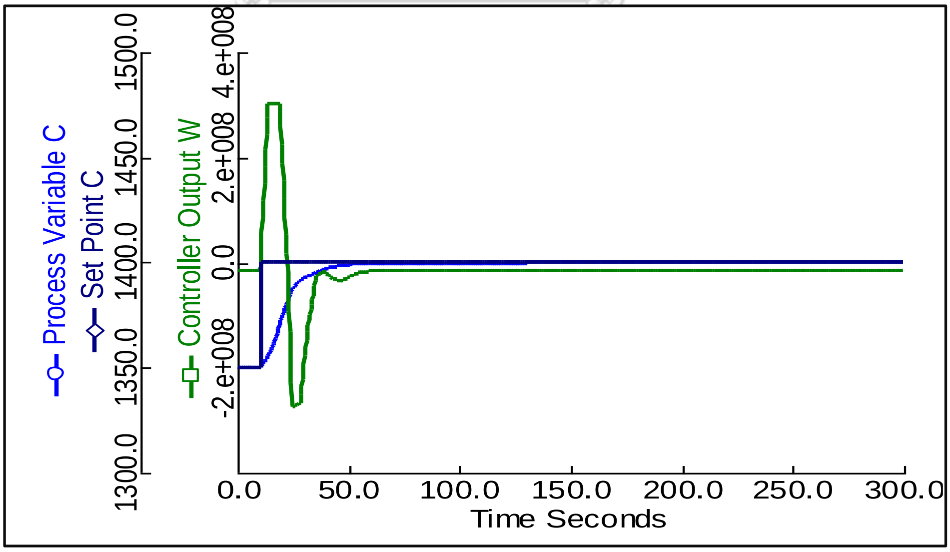
4.6 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

กระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงจะถูกจำลองสถานการณ์ที่ภาวะคงตัวก่อน เพื่อนำค่าเหล่านี้มาใช้เป็นภาวะเริ่มต้นสำหรับการจำลองกระบวนการที่ภาวะพลวัต โดยในการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การเปลี่ยนค่าเป้าหมาย (Set point change) และการเปลี่ยนค่าตัวแปรรบกวน (Disturbance change) ของระบบ โดยลักษณะของ

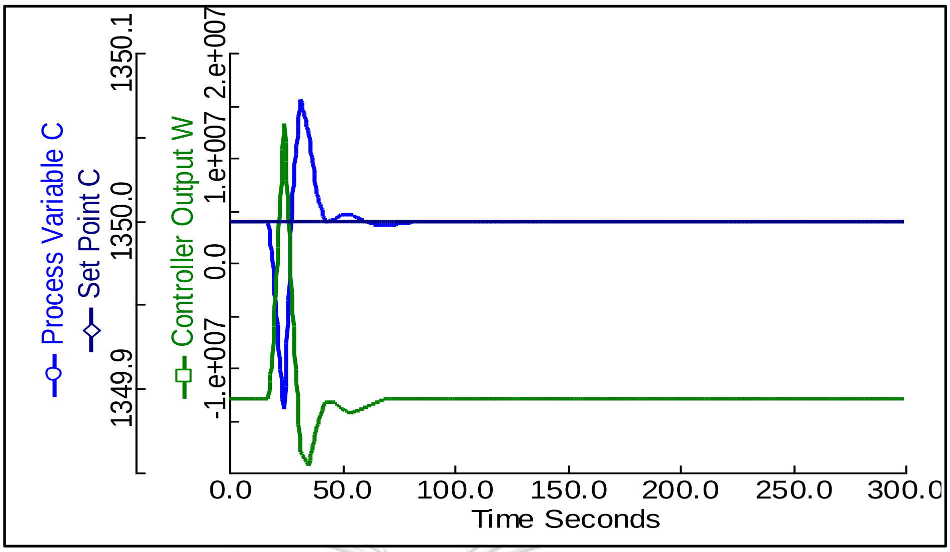
โครงสร้างควบคุมที่ดีต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรควบคุมสู่ค่าเป้าหมายหรือทนทานต่อการรบกวนจากปัจจัยภายนอกได้ในช่วงกว้างที่ระบบควบคุมสามารถรักษาเสถียรภาพของกระบวนการได้

4.6.1 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

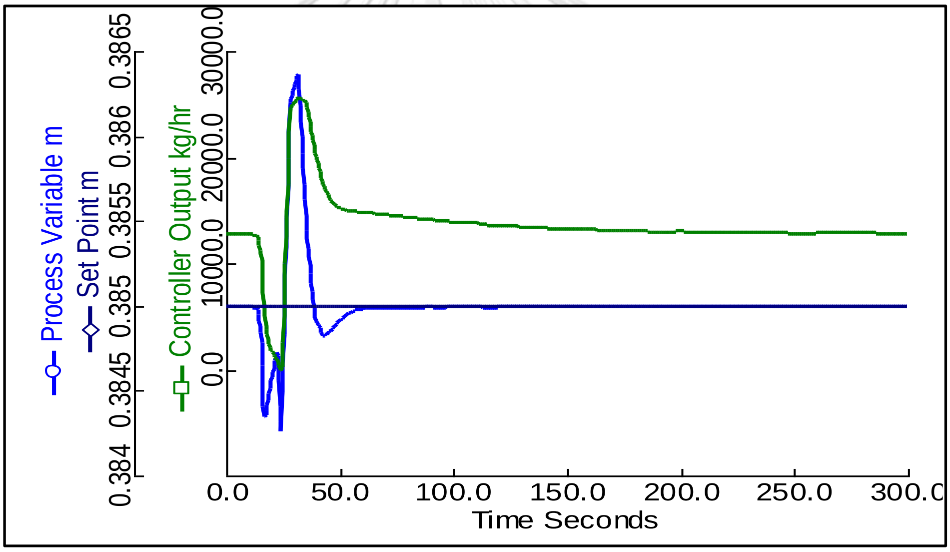
จำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 300 วินาที เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (TC1) จากรูปที่ 4.24 พบว่าควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ โดยการปรับอัตโนมัติของอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.25 โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์อากาศอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่ค่าที่ภาวะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวภายในเครื่องควบแน่นไอน้ำเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.26 เกิดการแกว่งของระดับของเหลวที่± 0.005 เมตร และกลับเข้าสู่ระดับเดิมที่ภาวะคงตัว เมื่อเกิดการปรับอัตราการไหลของเหลวออกจากเครื่องควบแน่นไอน้ำเป็น 12,806 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เกิดการลดลงของความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเหลือ 7.5 บาร์ ก่อนที่เครื่องควบคุมความดันจะปรับอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ ทำให้ค่าความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมดังรูปที่ 4.27



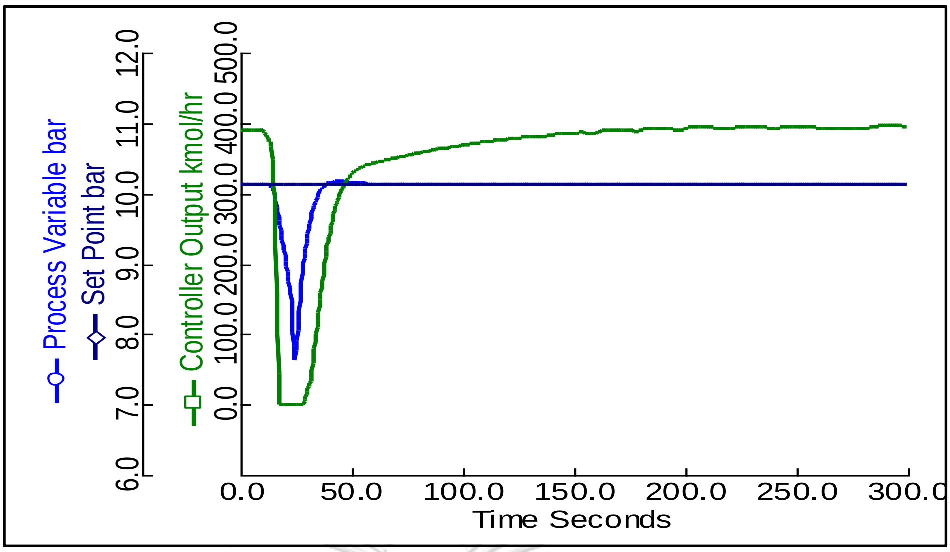
รูปที่ 4.24 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.1



รูปที่ 4.25 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.1



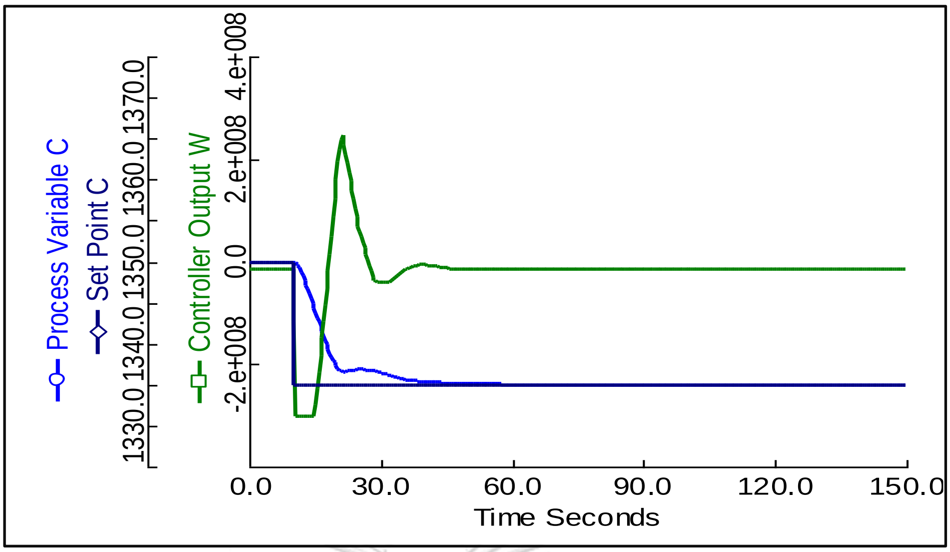
รูปที่ 4.26 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.1



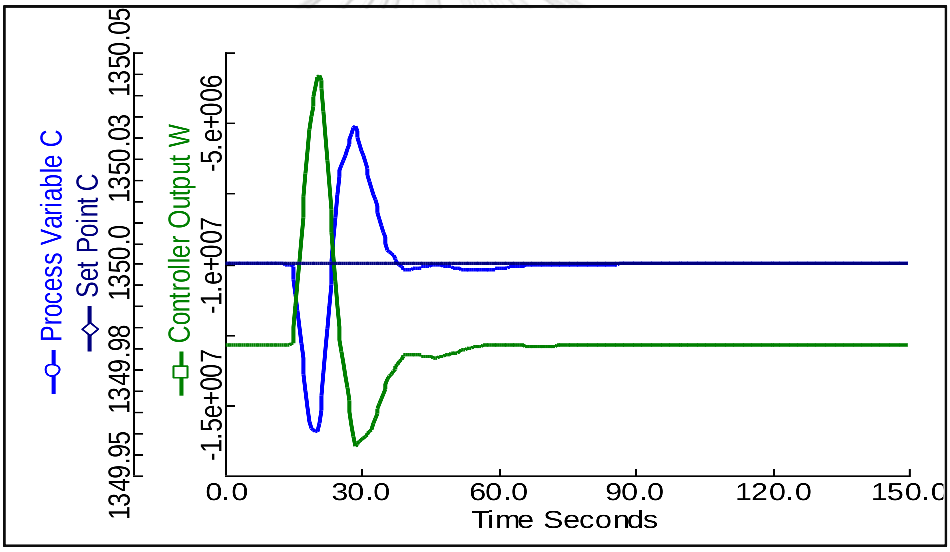
รูปที่ 4.27 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.1

4.6.2 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

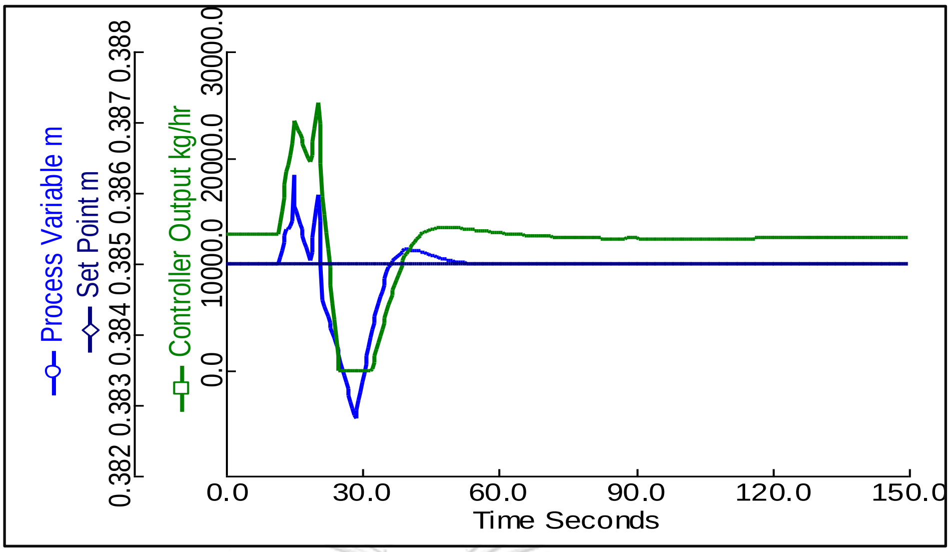
ทำการจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 150 วินาที โดยการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (TC1) ดังรูปที่ 4.28 พบว่าการลดปรับค่าเป้าหมายจะกระทำได้ในช่วงที่จำกัดกว่าการเพิ่มค่าเป้าหมายจากข้อจำกัดของการปรับค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.29 ก่อนจะกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมาย เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ $\pm$0.002 เมตร ดังรูปที่ 4.30 ทำให้เครื่องควบคุมระดับของเหลวทำการปรับค่าอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ เพื่อให้ระดับของเหลวสามารถกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ดังเดิม เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำดังรูปที่ 4.31 โดยความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเพิ่มสูงขึ้นสูงสุดถึง 17 บาร์ ก่อนที่เครื่องควบคุมความดันจะปรับอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำให้เพิ่มขึ้น เพื่อให้ความดันกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนดได้ที่ภาวะคงตัว



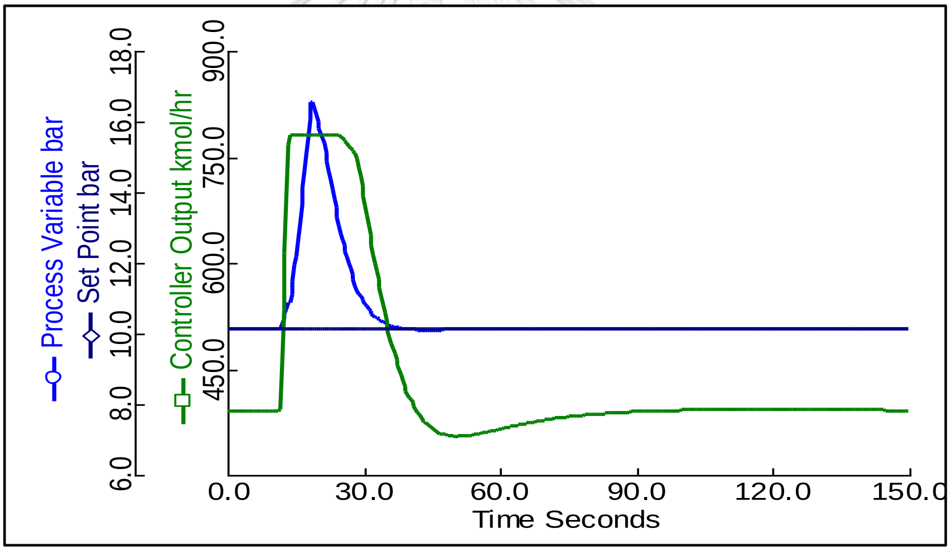
รูปที่ 4.28 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.2



รูปที่ 4.29 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.2



รูปที่ 4.30 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.2

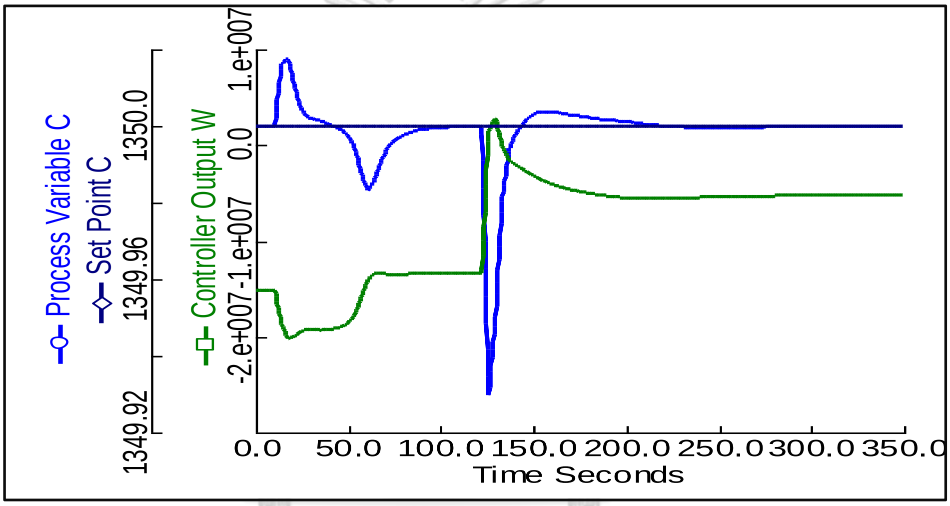


รูปที่ 4.31 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.2

4.6.3 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

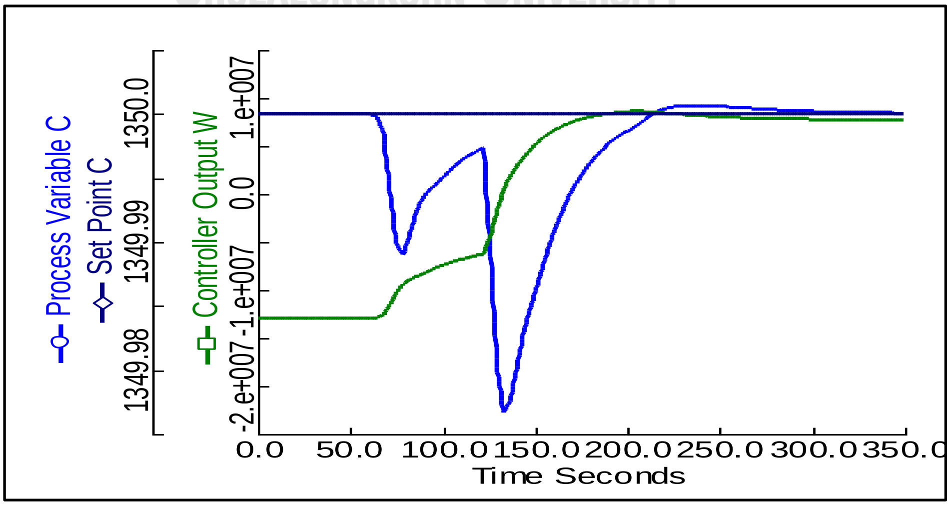
ทำการจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 350 วินาที โดยการปรับเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจาก 449 กิโลโมลต่อชั่วโมงเป็น 673 กิโลโมลต่อชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงดังกล่าวส่งผลให้เกิดการแกว่งของอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเล็กน้อย แต่เกิดการปรับอัตรการถ่ายโอนความร้อนออกจาก

เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเป็นจากค่าเดิม ดังแสดงที่รูป 4.32 เช่นเดียวกับการการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศดังรูปที่ 4.33 เกิดการแกว่งของอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศเพียงเล็กน้อย แต่เกิดการปรับค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์อากาศ เป็นการค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศแทนระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำเกิดการลดลงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.34 ดังนั้นเครื่องควบคุมจึงปรับลดค่าอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ เพื่อให้ระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิม ความดันภายในเครื่องควบแน่นไอน้ำลดลงเหลือ 7.3บาร์ ก่อนที่ระบบควบคุมความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำจะปรับลดอัตราการไหลของแก๊สจากที่เครื่องควบเพื่อให้ความดันเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ดังรูปที่ 4.35

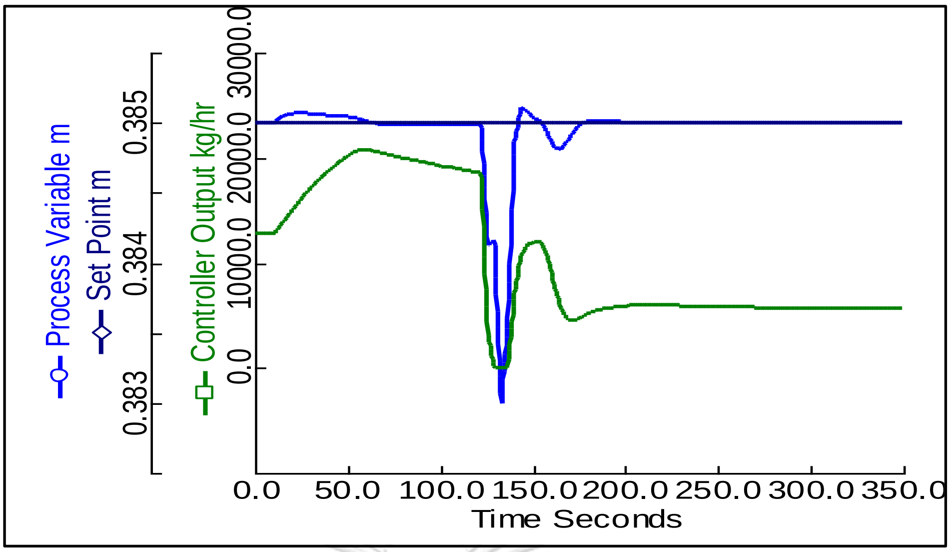


รูปที่ 4.32 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3

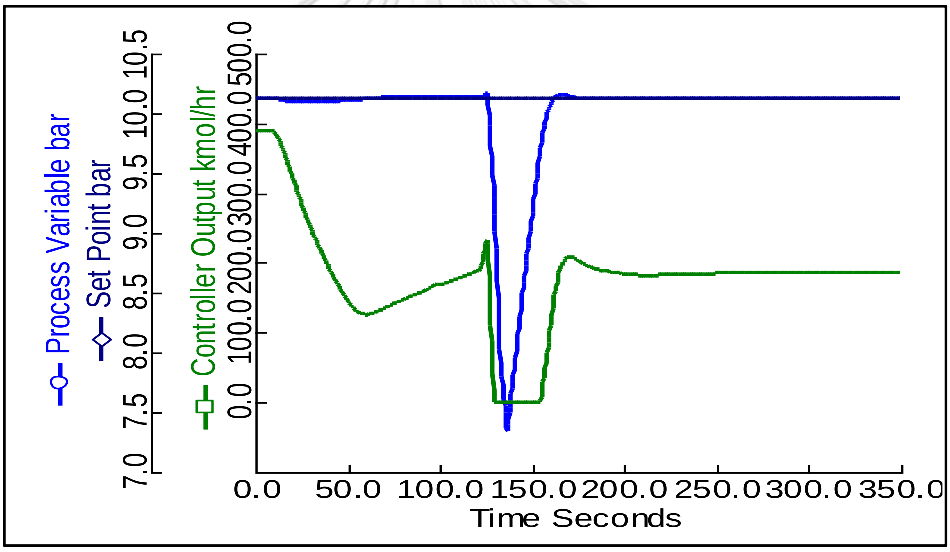
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.33 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3



รูปที่ 4.34 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3

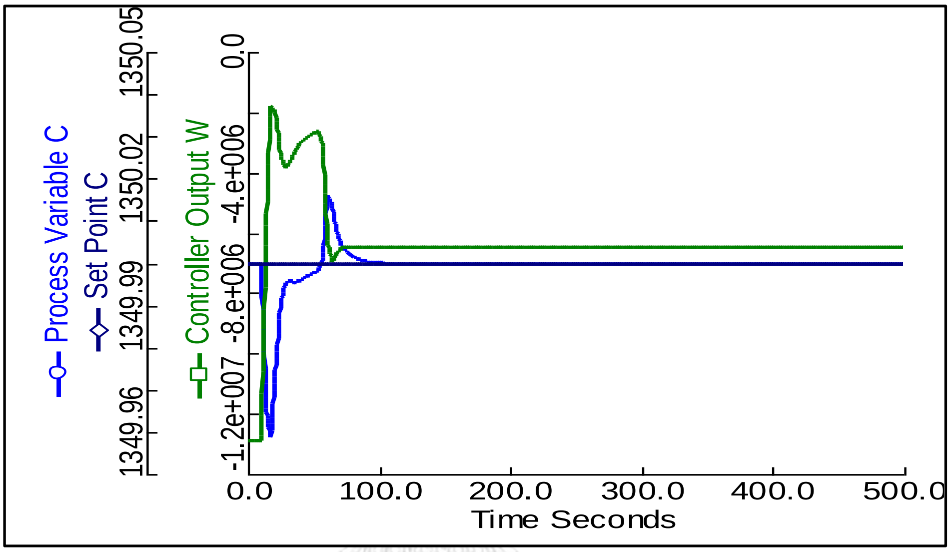


รูปที่ 4.35 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3

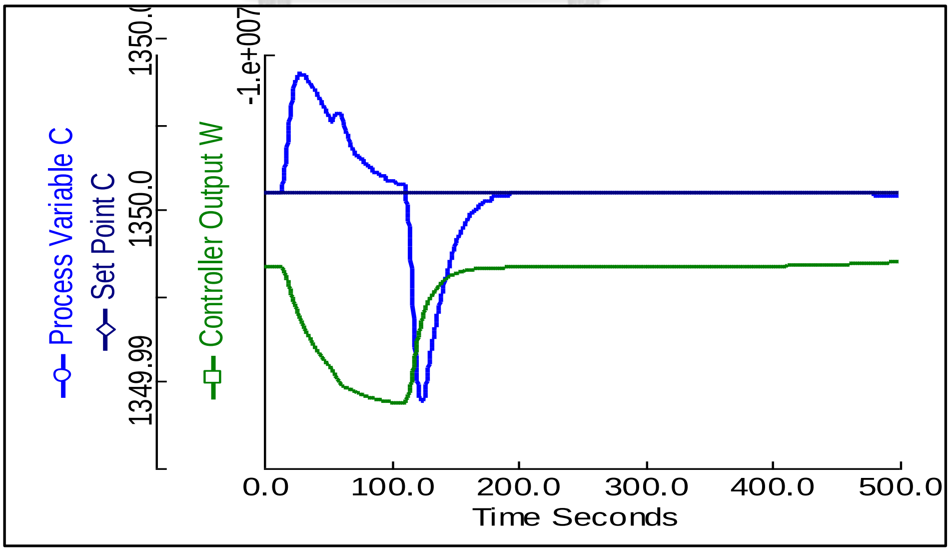
4.6.4 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

ทำการจำลองสถานการณ์เคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 500 วินาที โดยทำการปรับลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจาก 449 กิโลโมลต่อชั่วโมงเป็น 224.5 กิโลโมลต่อชั่วโมง ผลกระทบของตัวแปรรบกวนดังกล่าวทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเกิดการแกว่งเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.36 เช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ซึ่งเกิดการแกว่งของอุณหภูมิของ

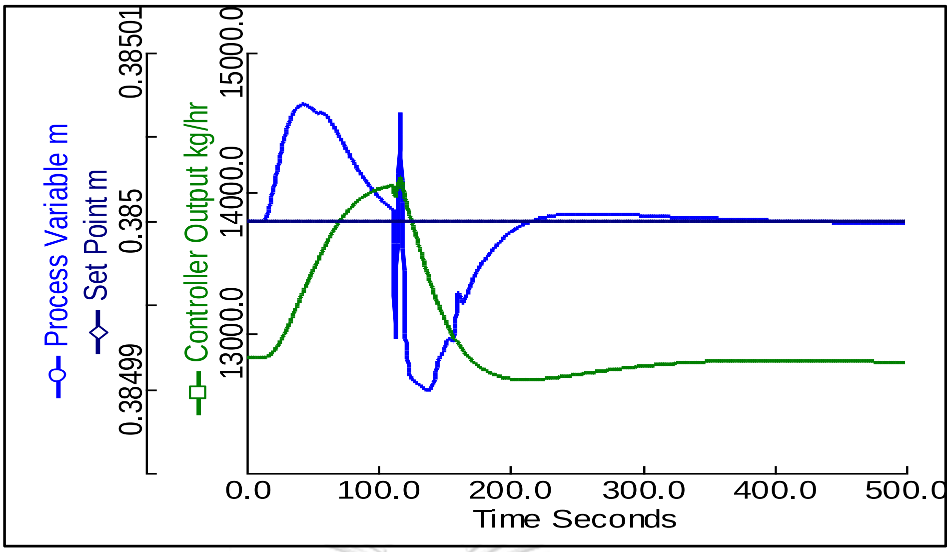
เครื่องปฏิกรณ์อากาศเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่พบว่าเกิดการปรับอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์อากาศดังรูปที่ 4.37 เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยก่อนระดับของเหลวจะเข้าสู่เข้าเป้าหมายเดิมที่ภาวะคงตัว ดังรูปที่ 4.38 เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ ส่งผลให้เกิดการปรับอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำลดลงชั่วขณะหนึ่ง ก่อนจะเข้าสู่ค่าเดิม และความดันกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.39



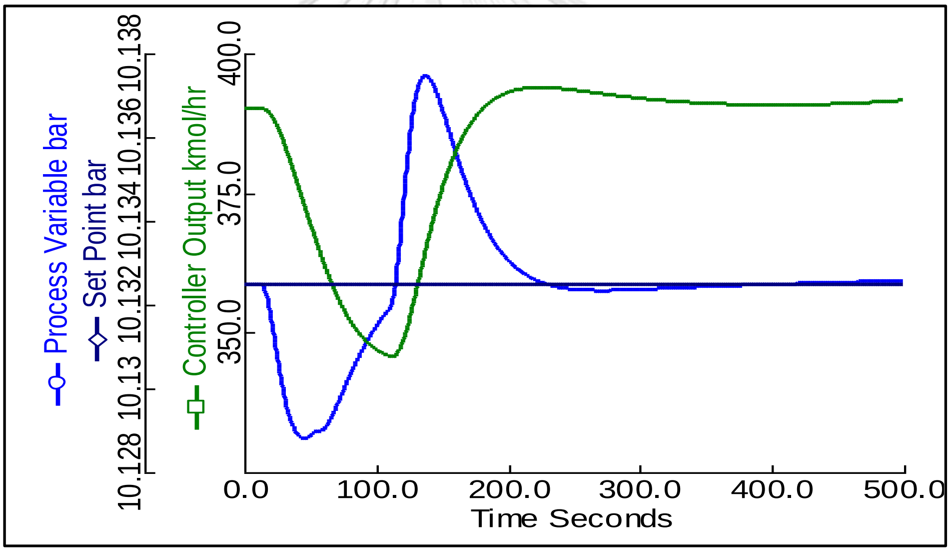
รูปที่ 4.36 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.4



รูปที่ 4.37 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.4



รูปที่ 4.38 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.4

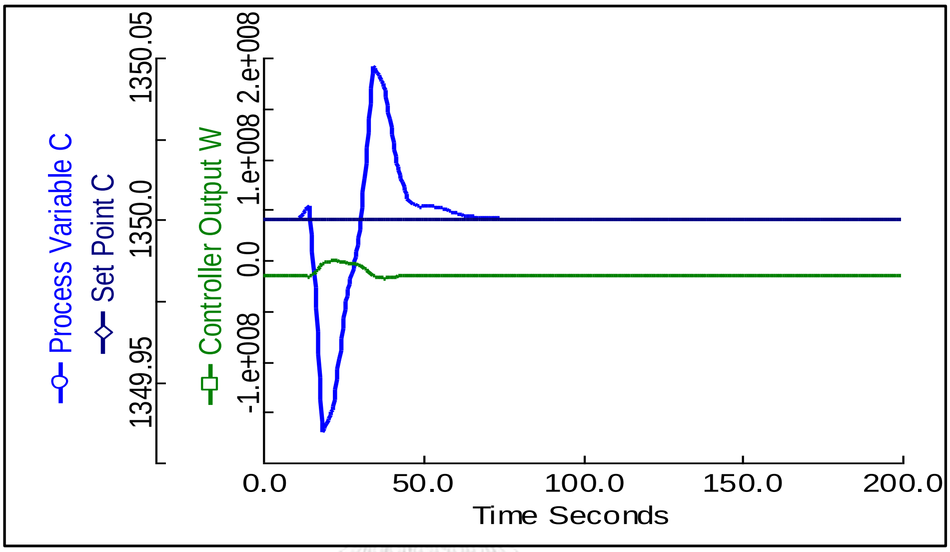


รูปที่ 4.39 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.4

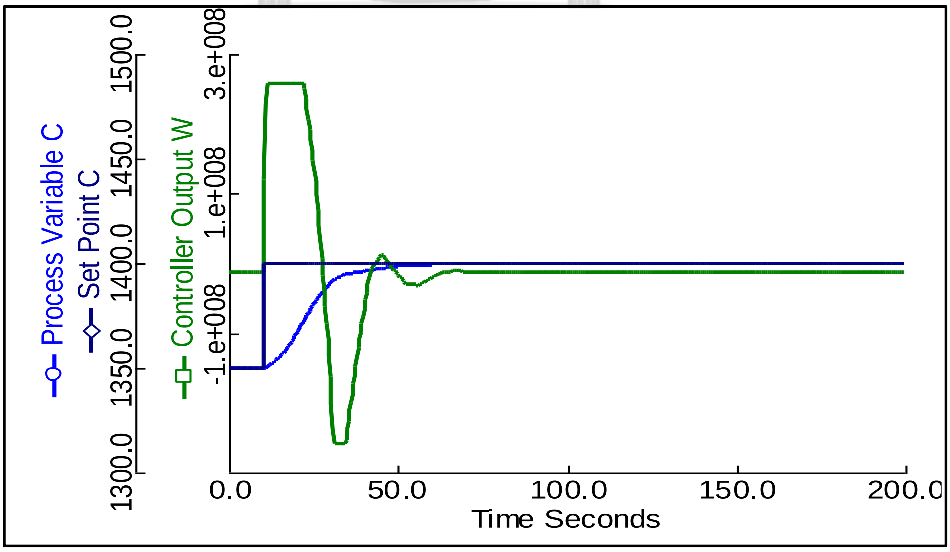
4.6.5 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ

ทำการจำลองสถานการณ์เผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 200 วินาที โดยทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ การปรับค่าเป้าหมายดังกล่าวส่งผลให้เกิดการแกว่งของอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.40 เกิดการปรับพอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์อากาศ โดยเกิดการใส่พลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ ก่อนจะกลับเข้า

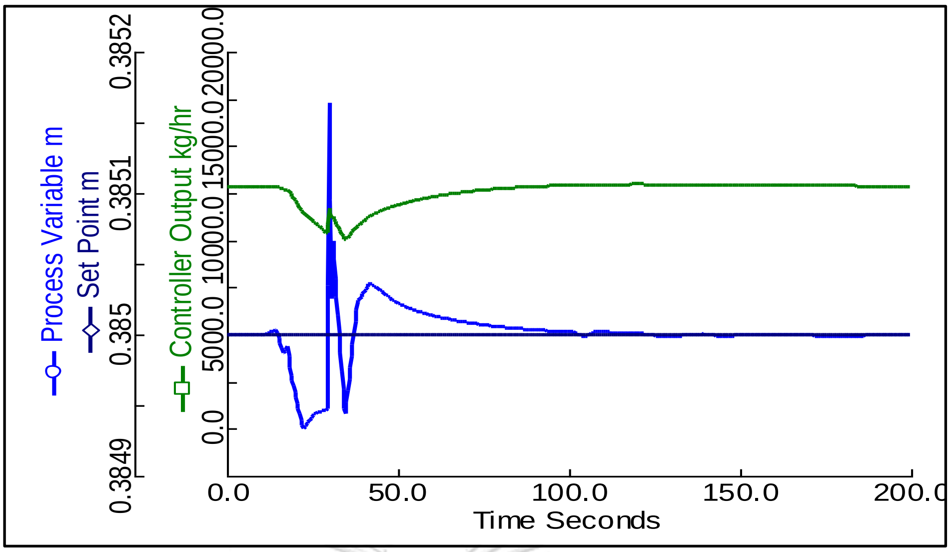
สู่ค่าเดิม เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการแล้ว ดังรูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเกิดการแกว่งเพียงเล็กน้อย เครื่องควบคุมระดับของเหลวจึงปรับอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ เพื่อให้ระดับของเหลวเข้าสู่ค่าปรับเข้าสู่ภาวะคงตัว ดังรูปที่ 4.42 เกิดการเพิ่มขึ้นของความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเล็กน้อย ทำให้เครื่องควบคุมความดันปรับอัตราการไหลของแก๊สออกจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ ก่อนจะกลับเข้าสู่ภาวะคงตัว ดังรูปที่ 4.43



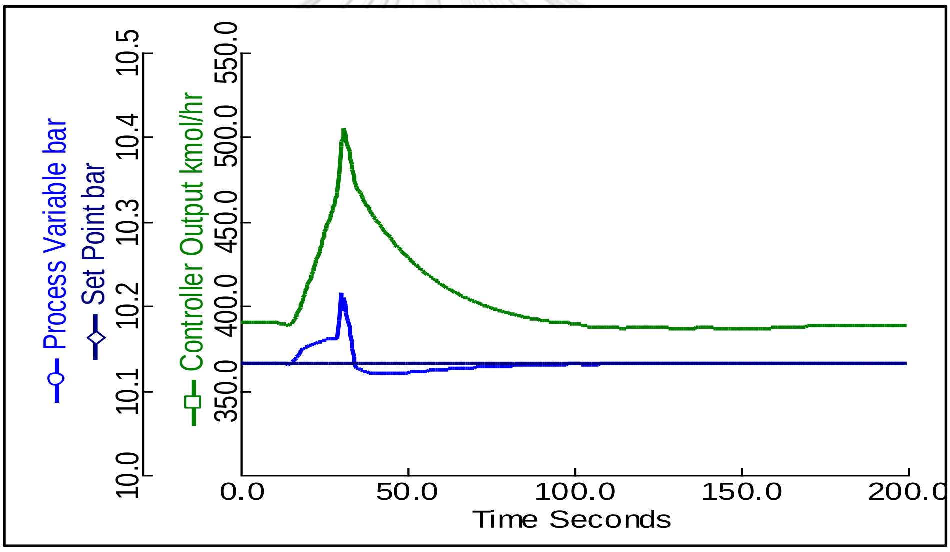
รูปที่ 4.40 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.5



รูปที่ 4.41 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.5



รูปที่ 4.42 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.5

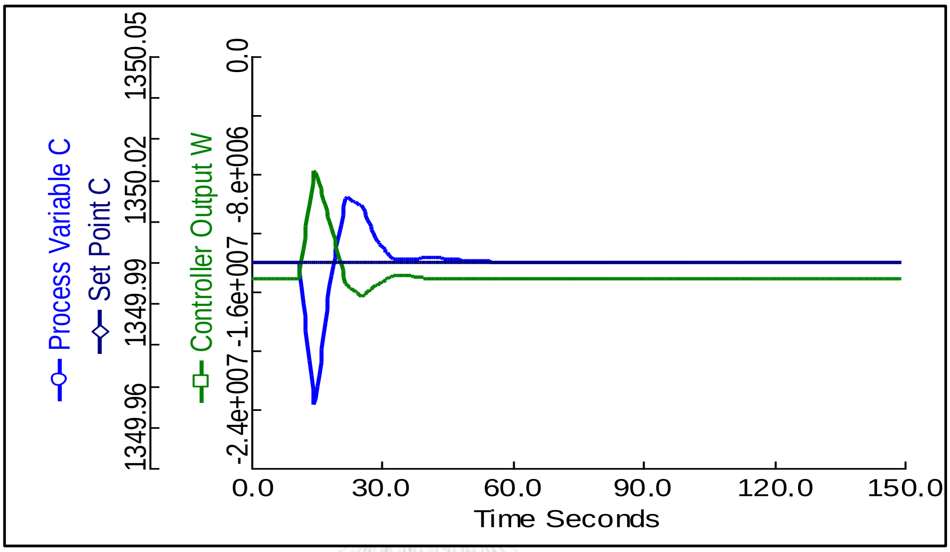


รูปที่ 4.43 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.5

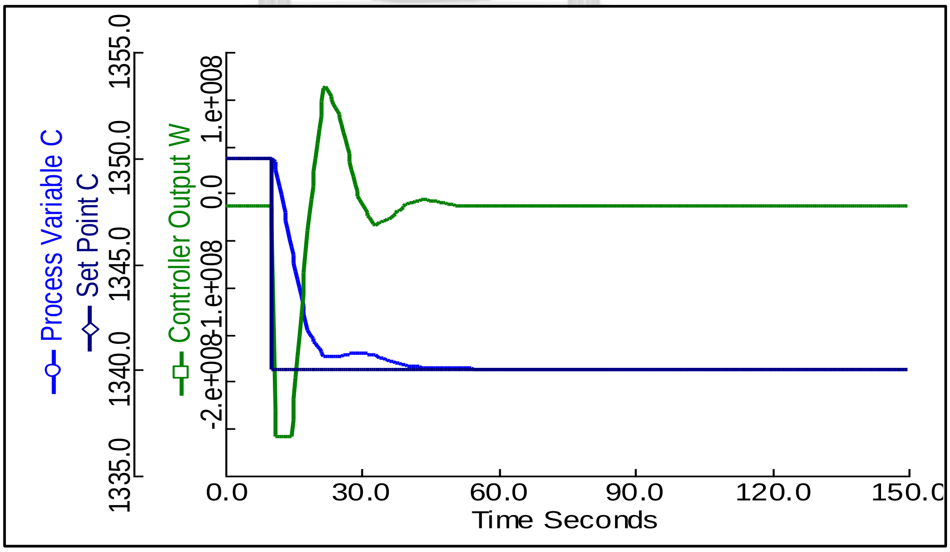
4.6.6 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ

ทำการจำลองการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 150 วินาที โดยทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ พบว่าช่วงในการปรับลดค่าเป้าหมายแคบกว่าการปรับเพิ่มเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เนื่องจากข้อจำกัดในการปรับอัตราการถ่ายโอนความร้อนของของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ การปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องปฏิกรณ์อากาศทำให้เกิดการแกว่งของ

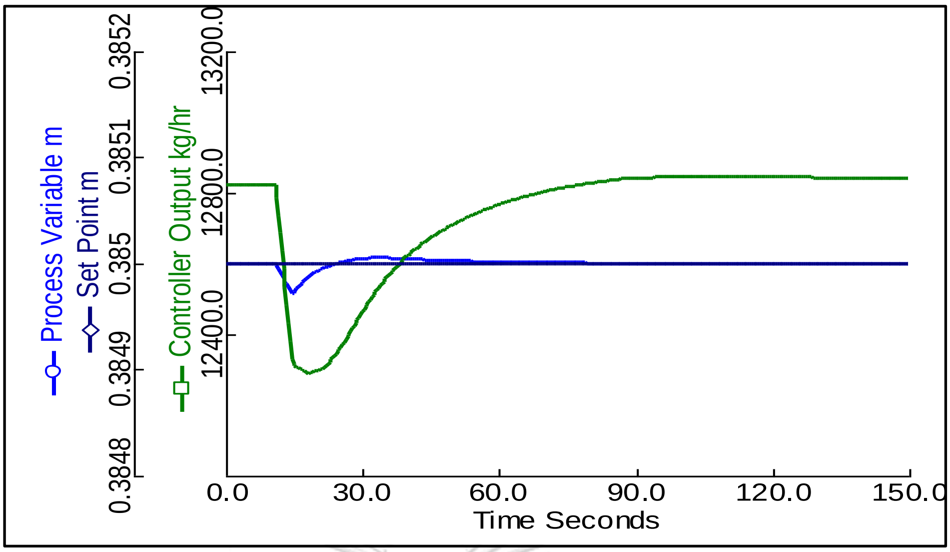
อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.44 อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศสามารถที่จะปรับลดเข้าสู่ค่าเป้าหมายใหม่ได้อย่างรวดเร็วดังรูปที่ 4.45 การปรับค่าเป้าหมายดังกล่าวส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเพียงเล็กน้อยก่อนจะกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ค่าเป้าหมายเดิม ดังรูปที่ 4.46 ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำเพิ่มขึ้น จึงทำให้ระบบควบคุมปรับอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ ก่อนจะกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิมที่ภาวะคงตัว ดังรูปที่ 4.47



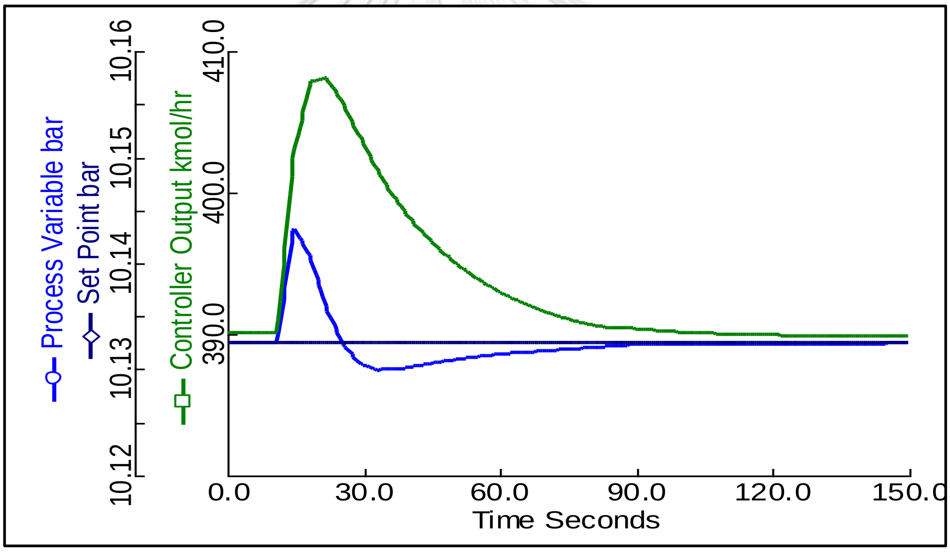
รูปที่ 4.44 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.6



รูปที่ 4.45 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.6



รูปที่ 4.46 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.6

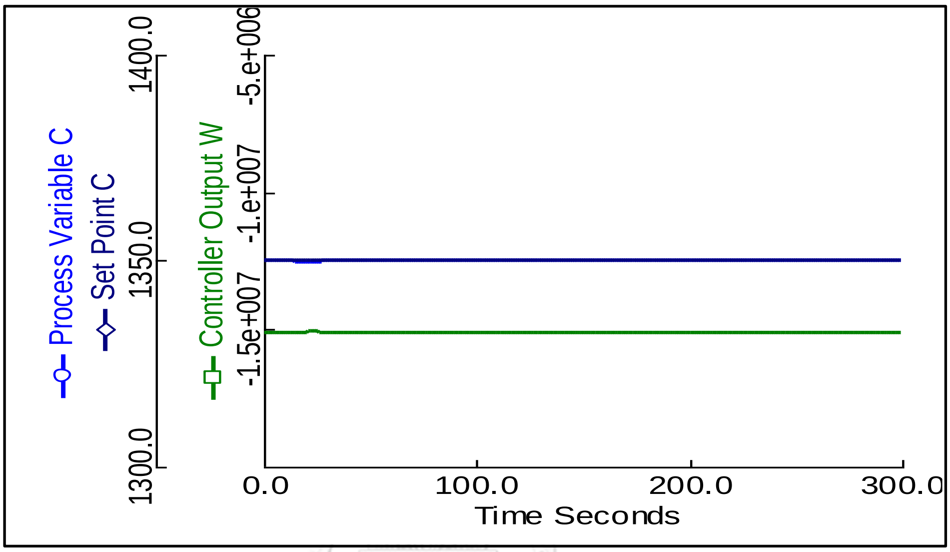


รูปที่ 4.47 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.6

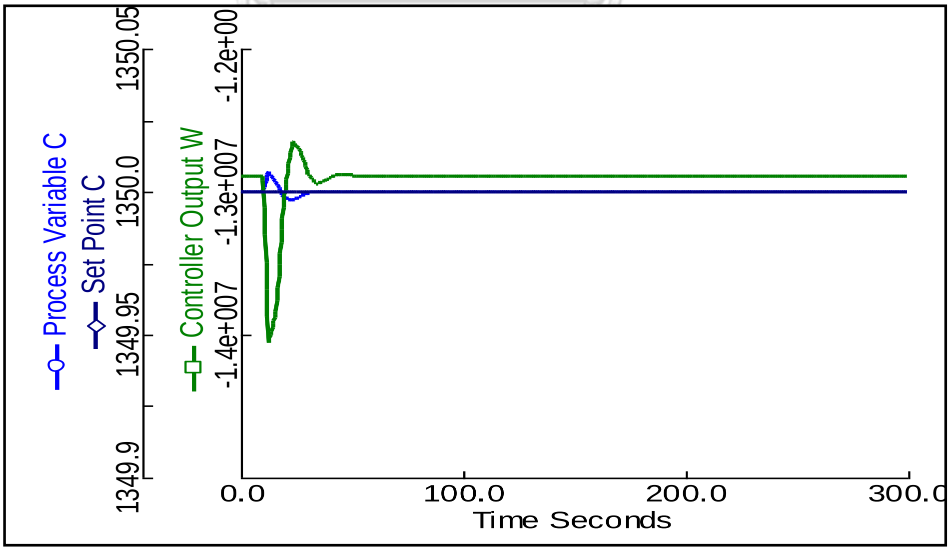
4.6.7 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ

ทำการจำลองการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 300 วินาที โดยทำการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศจาก 2,059 กิโลโมลต่อชั่วโมงเป็น 4,117 กิโลโมลต่อชั่วโมง พบว่าผลการเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ดังรูปที่ 4.48 แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ

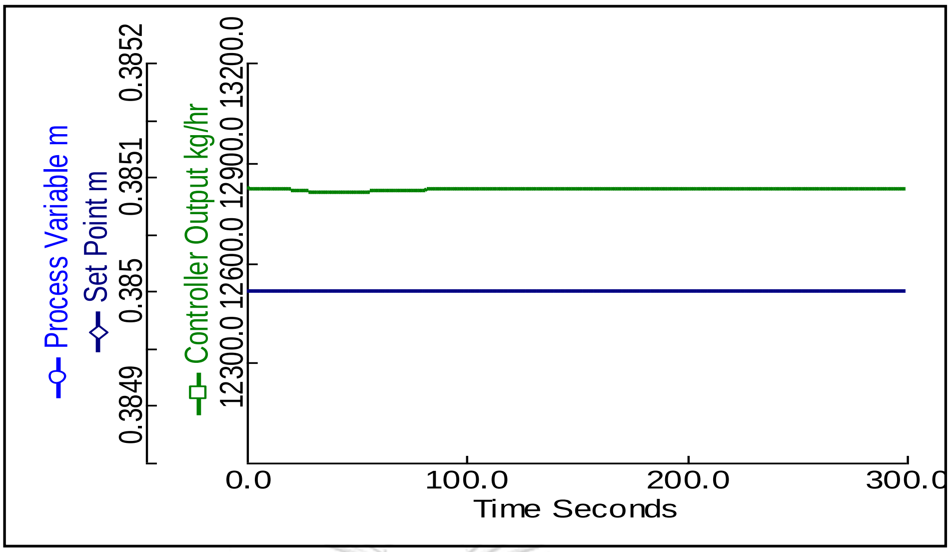
โดยเกิดการแกว่งของอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.49 นอกจากนี้ยังพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำ ดังรูปที่ 4.50 แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ โดยความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เครื่องควบคุมความดันจึงปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ ก่อนค่าความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำจะกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ภาวะคงตัว ดังรูป 4.51



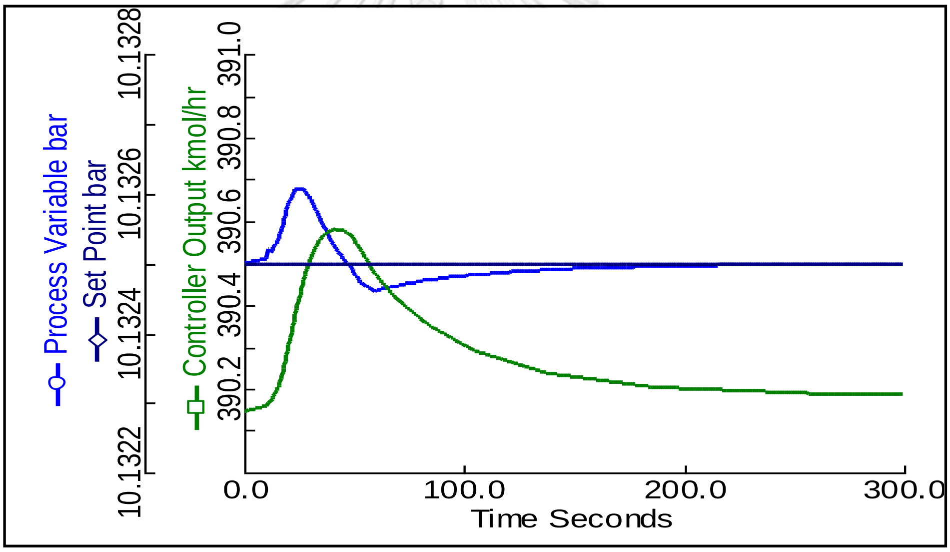
รูปที่ 4.48 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.7



รูปที่ 4.49 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.7



รูปที่ 4.50 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.7

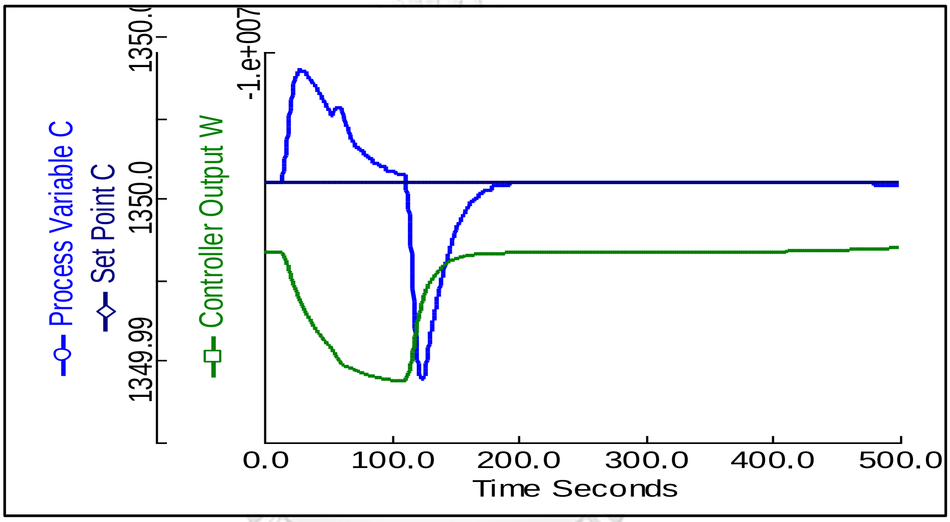


รูปที่ 4.51 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.7

4.6.8 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ

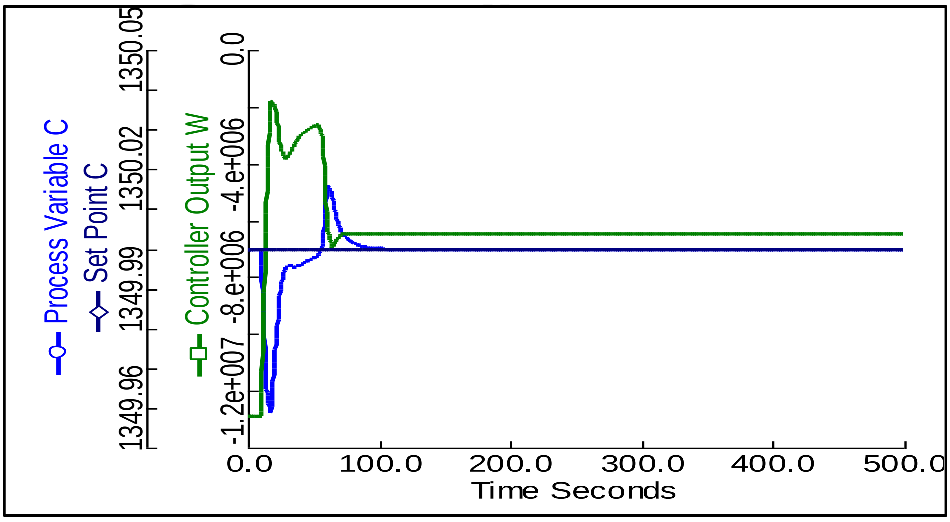
ทำการจำลองการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 500 วินาที โดยทำการลดอัตราการป้อนของอากาศ 2,058 กิโลโมลต่อชั่วโมงเป็น 1,372 กิโลโมลต่อชั่วโมง พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงการป้อนอากาศดังกล่าวทำให้เกิดการแกว่งของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.52 เช่นเดียวกันกับเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ

เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังรูปที่ 4.53 เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำในช่วงต้นเกิดการเพิ่มของระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำ เมื่อเครื่องควบคุมระดับของเหลวปรับอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำให้เพิ่มขึ้น ทำให้ระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำลดลง จนกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิม ดังรูปที่ 4.54 เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ โดยความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำลดลง ส่งผลให้เครื่องควบคุมความดันปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ ผลการปรับค่าดังกล่าวทำให้ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำสูงกว่าค่าเป้าหมายเล็กน้อย ก่อนจะกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.55

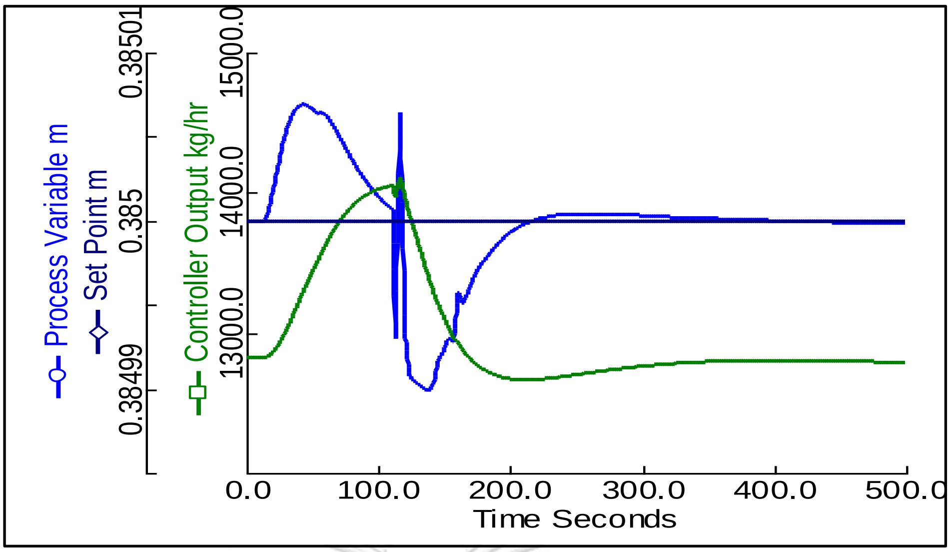


รูปที่ 4.52 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.8

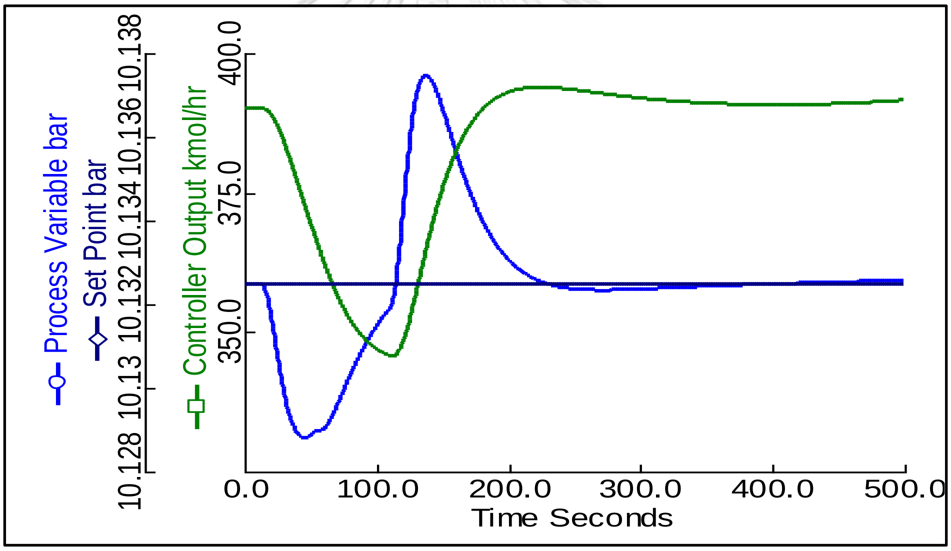
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.53 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.8



รูปที่ 4.54 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.8

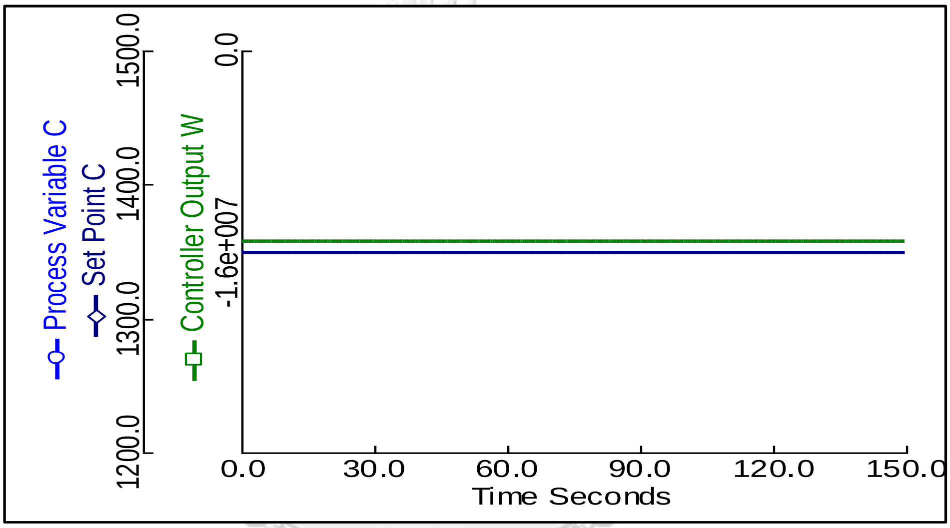


รูปที่ 4.55 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.8

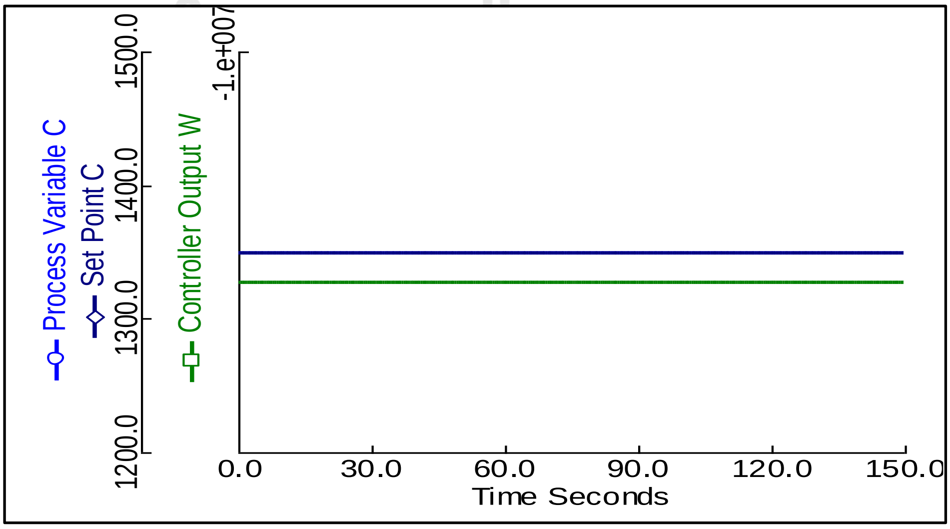
4.6.9 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ

ทำการจำลองการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 150 วินาที โดยทำการเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ พบว่าการปรับค่าเป้าหมายดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อการควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและตัวแปรปรับคืออัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์คงที่ ดังรูป

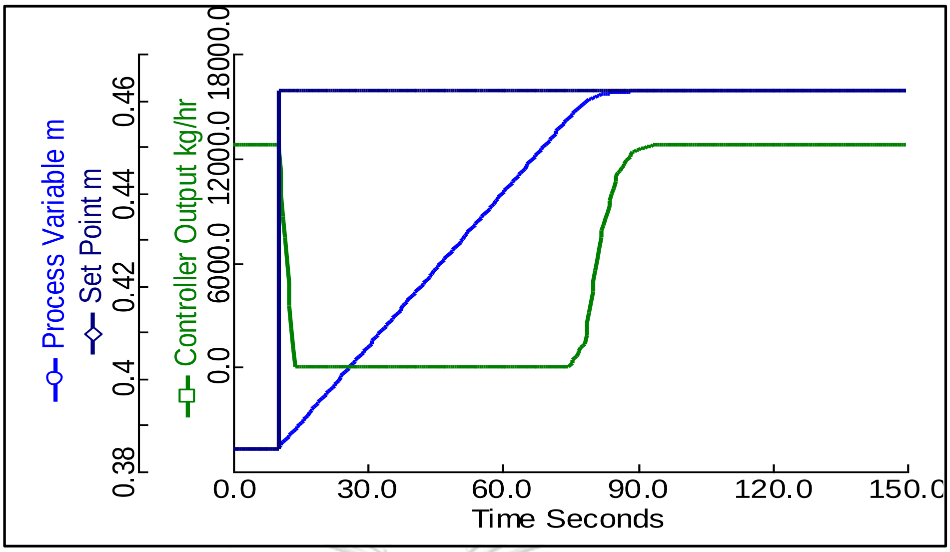
ที่ 4.56 เช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์อากาศ พบว่าค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศและค่าตัวแปรปรับอัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์อากาศคงที่ ดังรูปที่ 4.57 เมื่อทำการเปลี่ยนเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลว ทำให้เครื่องควบคุมระดับของเหลวปรับค่าอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจนเป็นศูนย์ เมื่อระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำเพิ่มขึ้นสู่ค่าเป้าหมายแล้ว จึงทำการปรับอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำเข้าสู่ค่าเดิม ดังรูปที่ 4.58 เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ โดยความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้เครื่องควบคุมปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ ทำให้ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิม ดังรูปที่ 4.59



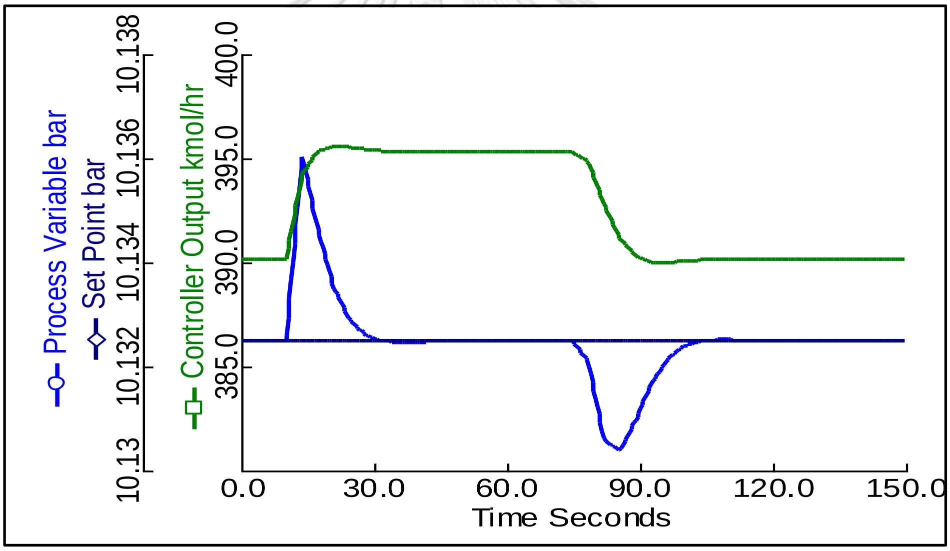
รูปที่ 4.56 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.9



รูปที่ 4.57 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.9



รูปที่ 4.58 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.9

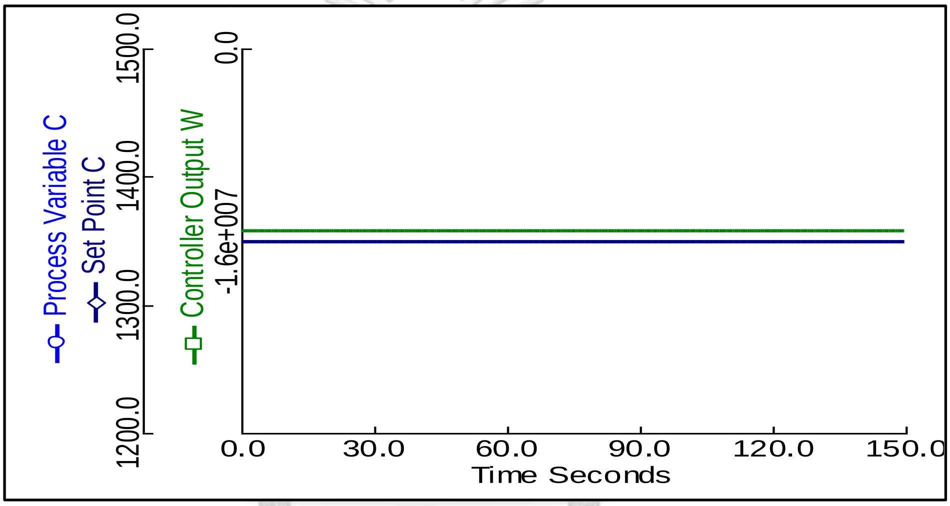


รูปที่ 4.59 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.9

4.6.10 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ

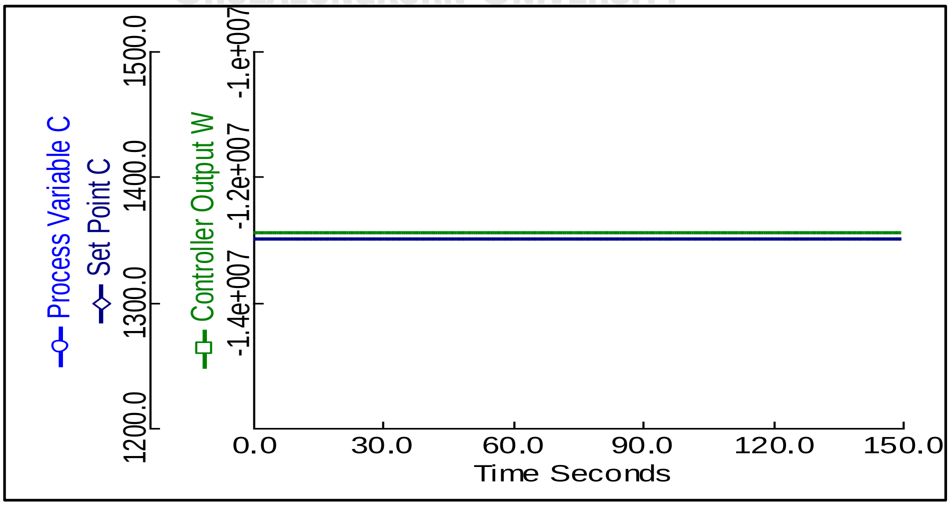
ทำการจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 150 วินาที โดยทำการลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ พบว่าการปรับค่าเป้าหมายดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและตัวแปรปรับอัตราการถ่าญโอนความร้อนคงที่ ดังรูปที่ 4.60 เช่นเดียวกันกับ

เครื่องปฏิกรณ์อากาศ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศและตัวแปรปรับอัตราการถ่ายโอนความร้อนคงที่ ดังรูปที่ 4.61 เมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ เครื่องควบคุมระดับของเหลวจึงปรับอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นจาก 12,824 กิโลโมลต่อชั่วโมง เป็น 25,649 กิโลโมลต่อชั่วโมง ผลการเพิ่มอัตราการไหลดังกล่าวทำให้ระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำลดลง จนกระทั่งเข้าสู่ค่าเป้าหมายแล้ว จึงทำการปรับอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำเข้าสู่ค่าเดิม ดังรูปที่ 4.62 เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ โดยความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำลดลงเล็กน้อย ทำให้เครื่องควบคุมปรับลดอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ ทำให้ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิม ดังรูปที่ 4.63

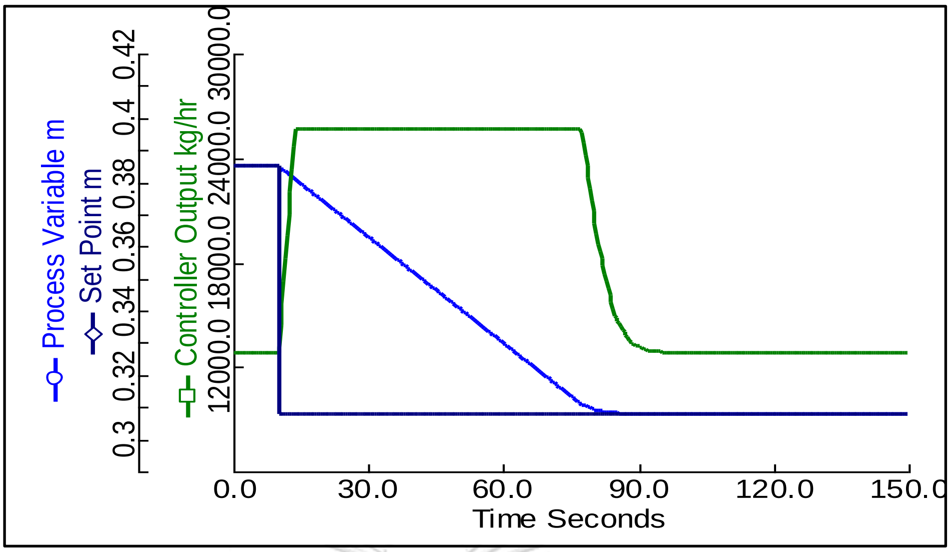


รูปที่ 4.60 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.10

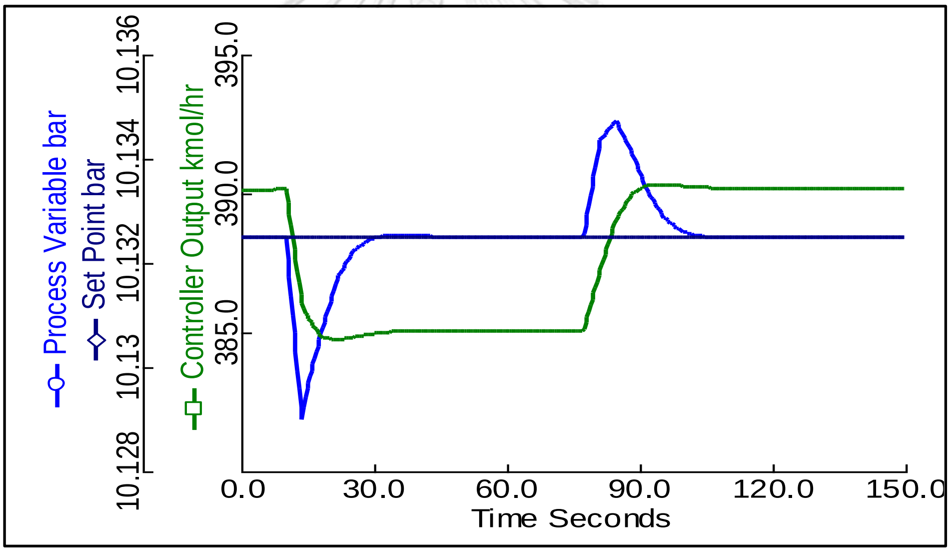
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.61 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.10



รูปที่ 4.62 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.10

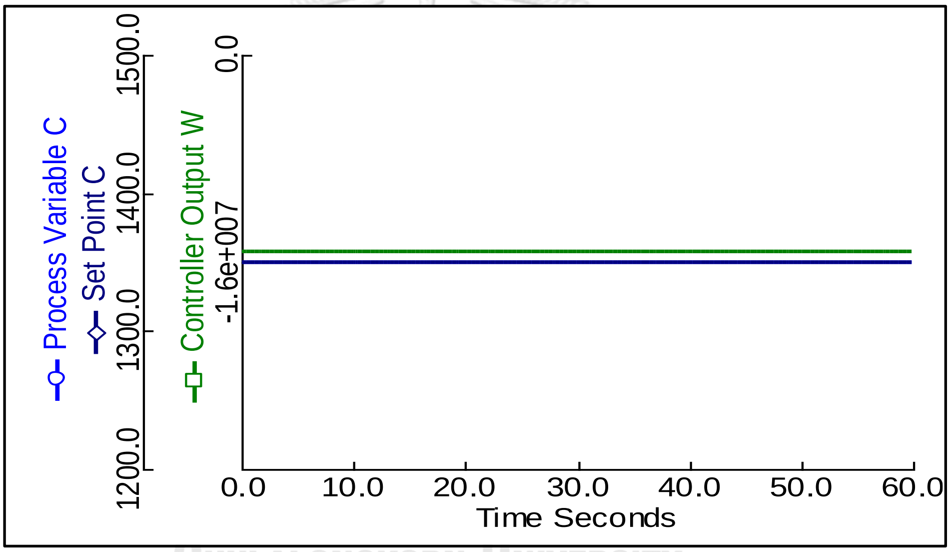


รูปที่ 4.63 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.10

4.6.11 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ

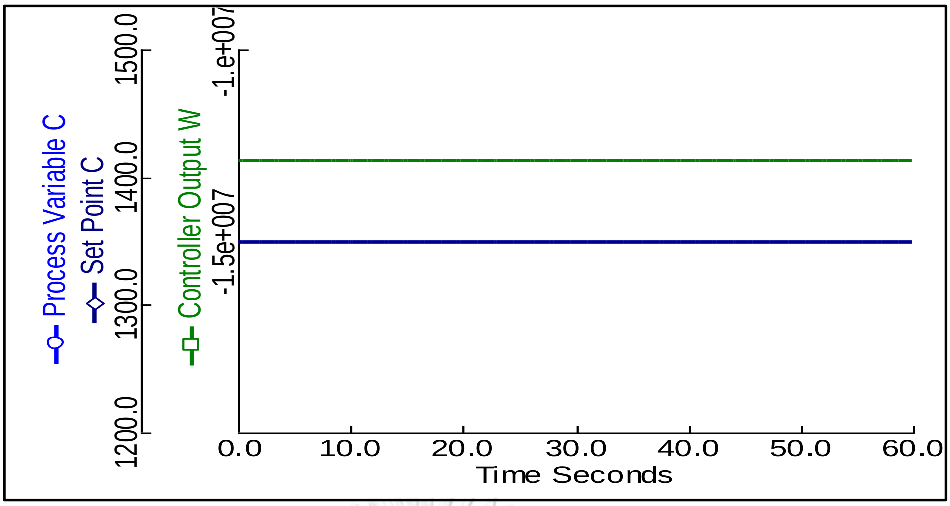
ทำการจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 60 วินาที โดยการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ จากค่าความดัน 10.013 บาร์ เป็น 12 บาร์ พบว่า ผลการปรับค่าความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ดังรูปที่ 4.64 และรูป

ที่4.65 เกิดการลดลงของระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ โดยระดับของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เครื่องควบคุมทำการปรับเพิ่มค่าอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจาก 12,825กิโลโมลต่อชั่วโมง จนขึ้นไปสูงสุดที่ค่า 25,137 กิโลโมลต่อชั่วโมง เมื่อระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายแล้ว จึงปรับเพิ่มค่าอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำเข้าสู่ค่าเดิม ดังรูปที่ 4.66 เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำส่งผลให้เครื่องควบคุมความดันปรับลดค่าอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจาก 390 กิโลโมลต่อชั่วโมง จนค่าต่ำสุดถึง 2.24 กิโลโมลต่อชั่วโมง ผลการเพิ่มอัตราการไหลดังกล่าว ทำให้ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำสูงขึ้น จนกระทั่งค่าความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำเข้าสู่ค่าเป้าหมาย เครื่องควบคุมความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำจึงปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจนเป็น 368 กิโลโมลต่อชั่วโมงที่ภาวะคงตัว ดังรูปที่ 4.67

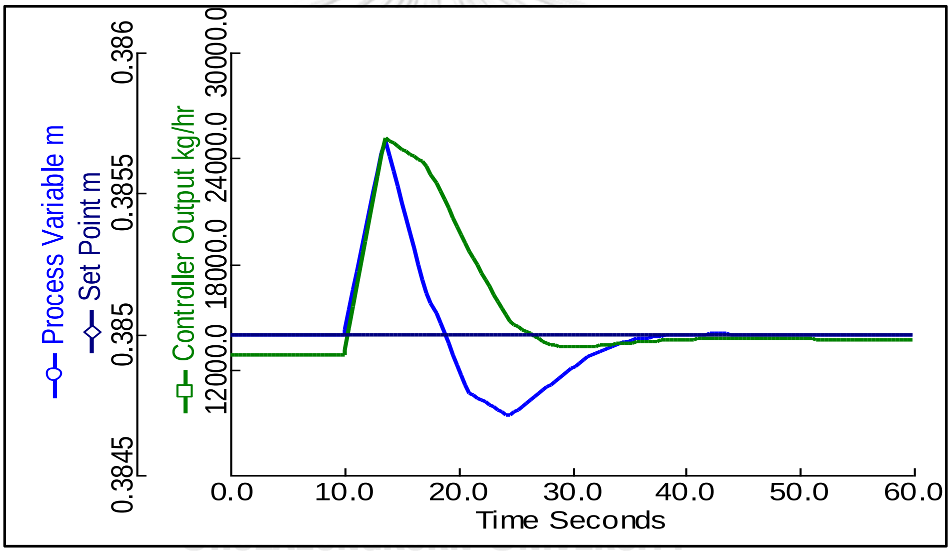


CHULALONGKORN UNIVERSITY

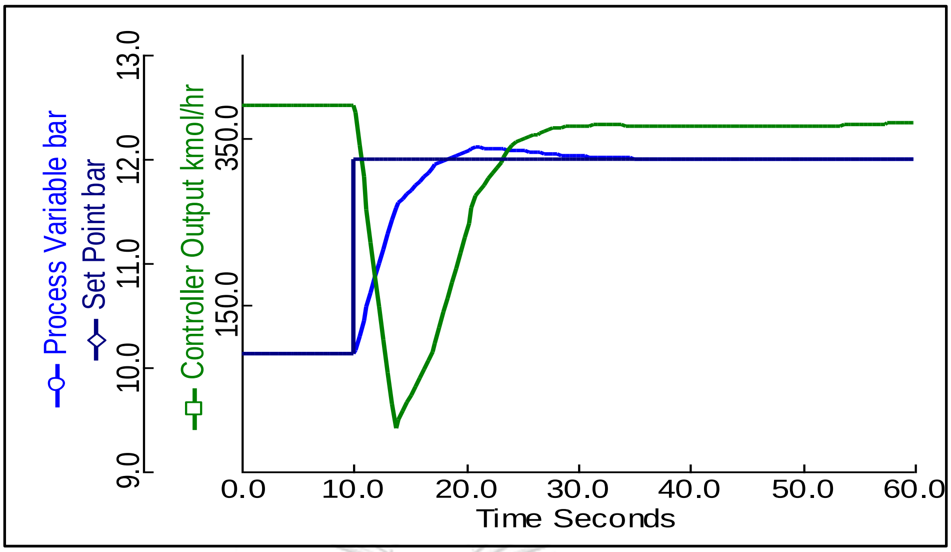
รูปที่ 4.64 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.11



รูปที่ 4.65 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.11



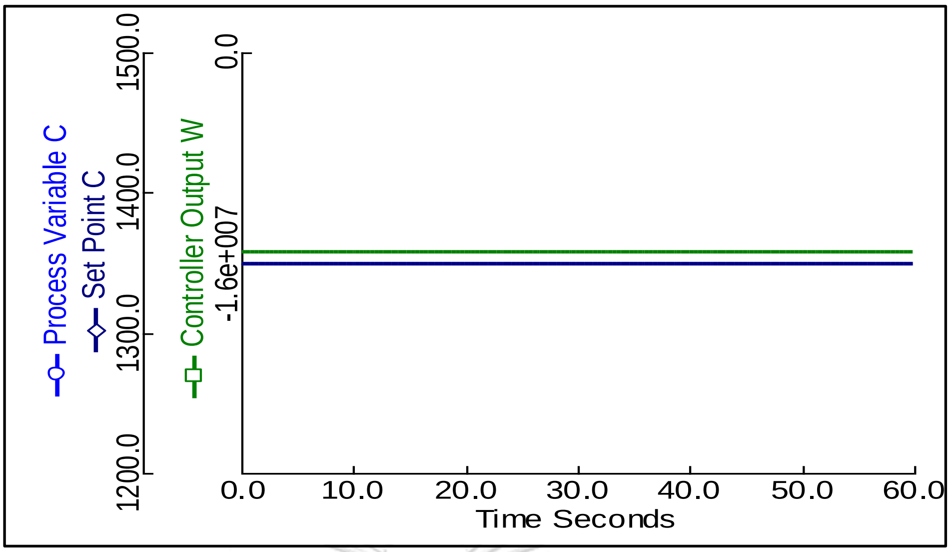
รูปที่ 4.66 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.11



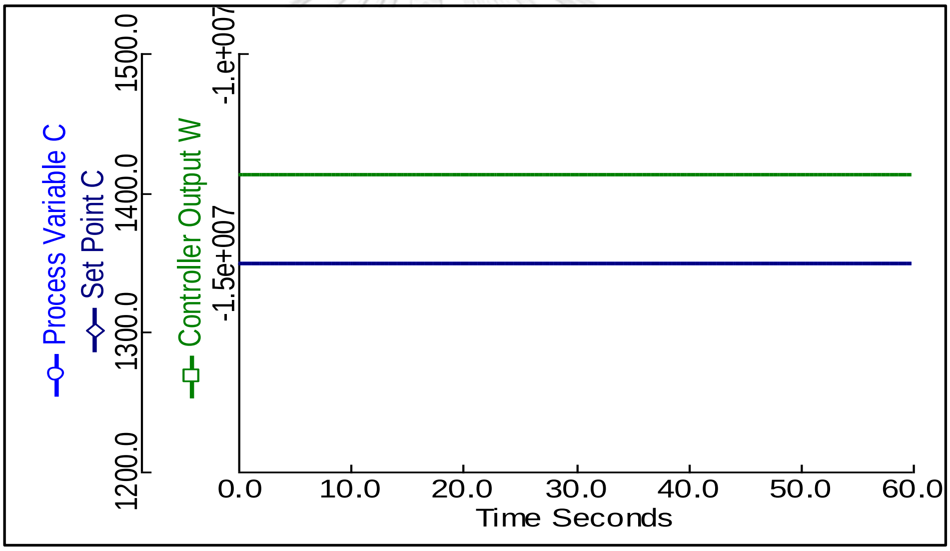
รูปที่ 4.67 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.11

4.6.12 การจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ

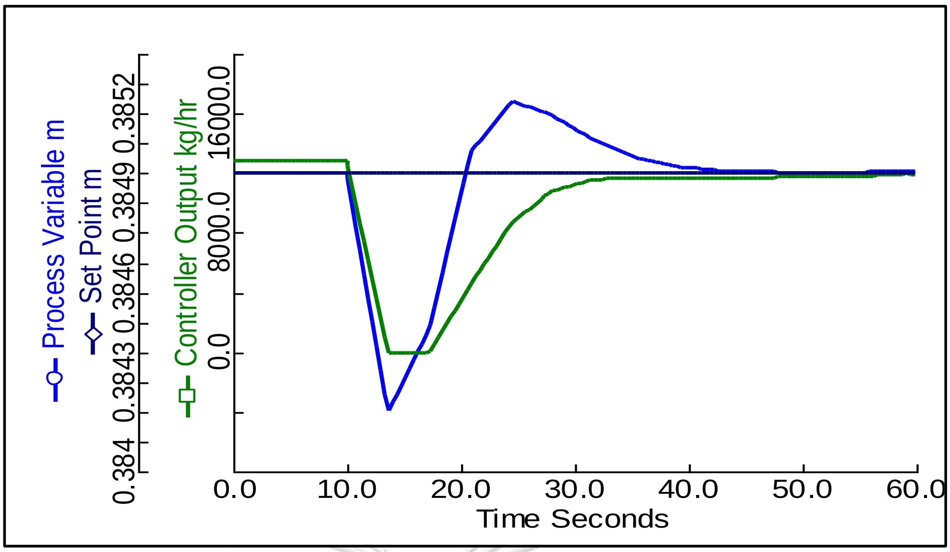
ทำการจำลองสถานการณ์การเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงเป็นเวลา 60 วินาที โดยการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ จากค่าความดัน 10.013 บาร์ เป็น 12 บาร์ พบว่า ผลการปรับค่าความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ดังรูปที่ 4.68 และรูปที่ 4.69 เกิดการลดลงของระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ โดยระดับของเหลวมีค่าลดลงทำให้เครื่องควบคุมทำการปรับลดค่าอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจนกลายเป็นศูนย์ เมื่อระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายแล้ว จึงปรับเพิ่มค่าอัตราการไหลของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำเข้าสู่ค่าเดิม ดังรูปที่ 4.70 เมื่อทำการปรับลดค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ ส่งผลให้เครื่องควบคุมความดันปรับเพิ่มค่าอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจาก 390 กิโลโมลต่อชั่วโมง จนค่าสูงสุดถึง 778 กิโลโมลต่อชั่วโมง ผลการเพิ่มอัตราการไหลดังกล่าว ทำให้ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำลดลง จนกระทั่งค่าความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำเข้าสู่ค่าเป้าหมาย เครื่องควบคุมความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำจึงปรับลดอัตราการไหลของแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจนเป็น 418 กิโลโมลต่อชั่วโมงที่ภาวะคงตัว ดังรูปที่ 4.71



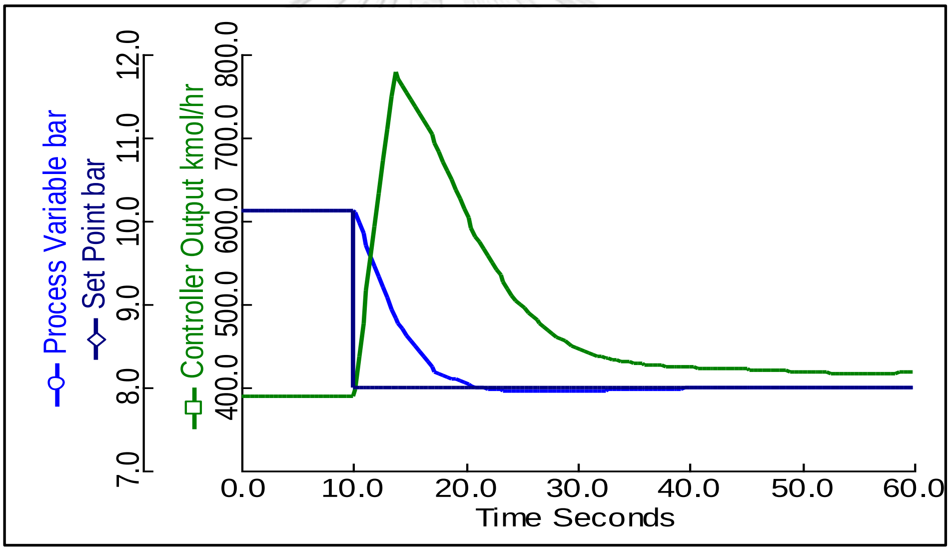
รูปที่ 4.68 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.12



รูปที่ 4.69 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม TC2 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.12



รูปที่ 4.70 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม LC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.12



รูปที่ 4.71 การตอบสนองเชิงพลวัตของวงควบคุม PC1 ในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.12

4.7 การวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการควบคุมด้วยค่าไอเออี (Integral of Absolute value of Error: IAE)

เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4.24 – 4.71 มาวิเคราะห์ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดระยะเวลาการดำเนินการตามสมการที่ 2.10 ทำให้สามารถหาผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดระยะเวลาการดำเนินการในแต่ละเครื่องควบคุมเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12 ตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.6

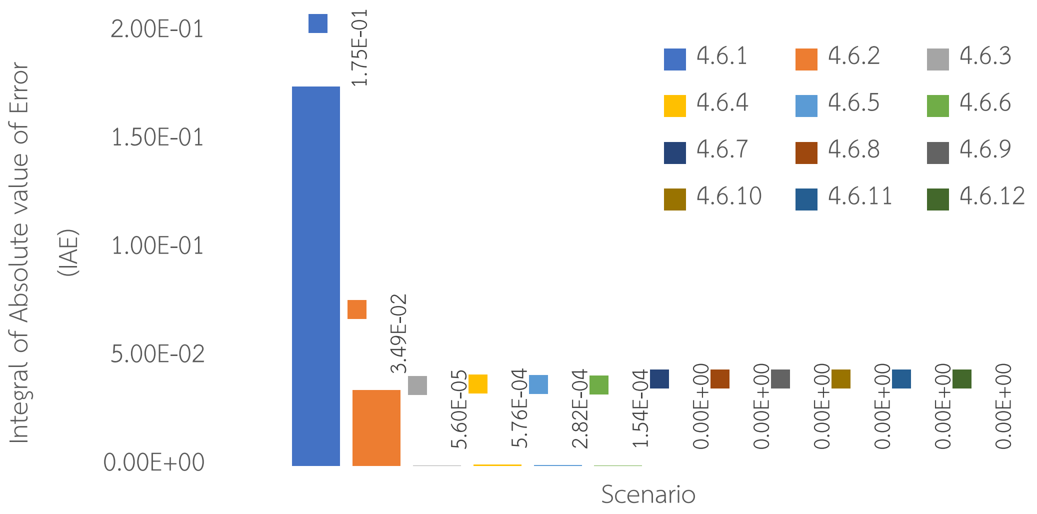
ตารางที่ 4.6 สรุปผลผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดระยะเวลาการดำเนินการในแต่ละเครื่องควบคุมเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ 4.6.1 – 4.6.12

Number	Scenario	Integral of Absolute value of Error (IAE)				
		TC1	TC2	LC1	PC1	Total
4.6.1	+50 ^{o}C T_{FR}	1.75E-01	3.30E-04	4.91E-06	6.01E-03	1.82E-01
4.6.2	-15 ^{o}C T_{FR}	3.49E-02	1.51E-04	6.55E-02	1.63E-02	5.14E-02
4.6.3	+50% F_{fuel}	5.60E-05	0.00E-00	1.60E-07	7.35E-05	1.30E-04
4.6.4	-50% F_{fuel}	5.76E-04	6.65E-04	7.11E-06	1.31E-02	1.44E-02
4.6.5	+50 ^{o}C T_{AR}	2.82E-04	2.08E-01	5.18E-07	2.74E-04	2.08E-01
4.6.6	-10 ^{o}C T_{AR}	1.54E-04	2.01E-02	1.31E-07	4.52E-05	2.03E-02
4.6.7	+50% F_{air}	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.13E-08	3.13E-08
4.6.8	-50% F_{air}	0.00E+00	2.57E-04	2.46E-07	1.34E-04	3.92E-04
4.6.9	+20% H_{SEP}	0.00E+00	0.00E+00	7.60E-04	1.53E-05	7.75E-04
4.6.10	-20% H_{SEP}	0.00E+00	0.00E+00	7.60E-04	1.43E-05	7.74E-04
4.6.11	+2 bar P_{SEP}	0.00E+00	0.00E+00	1.54E-06	1.94E-03	1.94E-03
4.6.12	-2 bar P_{SEP}	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-06	2.57E-03	2.57E-03

4.7.1 ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (TC1)

จากรูปที่ 4.72 เป็นการแสดงผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 - 4.6.12 จากผลการทดลองพบว่าในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.2 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นมากเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าเป้าหมายอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เนื่องจากในการปรับเพิ่มอุณหภูมิสามารถปรับค่าได้กว้างกว่าการปรับอุณหภูมิลง ทำให้การปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มากกว่าการลดอุณหภูมิลงในสถานการณ์จำลองที่ 4.6.3 -4.6.4 เมื่อทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ทำให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงขึ้น ดังนั้นการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจึงส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เช่นเดียวกันกับในสถานการณ์ที่ 4.6.5 – 4.6.6 การปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ พบว่าส่งผลให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

ที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงขึ้น เนื่องจากในระบบมีการหมุนเวียนของเบดระหว่างทั้งสองเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง แต่จะสังเกตได้ว่าในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.7 –4.6.12 จะพบว่าไม่เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงขึ้นเลยแสดงว่าเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเป็นอิสระจากการปรับค่าตัวแปรนั้นๆ เนื่องจากการปรับตัวแปรในสถานการณ์ดังกล่าวเป็นการปรับตัวแปรที่เครื่องควบแน่นไอน้ำที่อยู่ปลายทาง จึงไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงซึ่งอยู่ต้นทาง



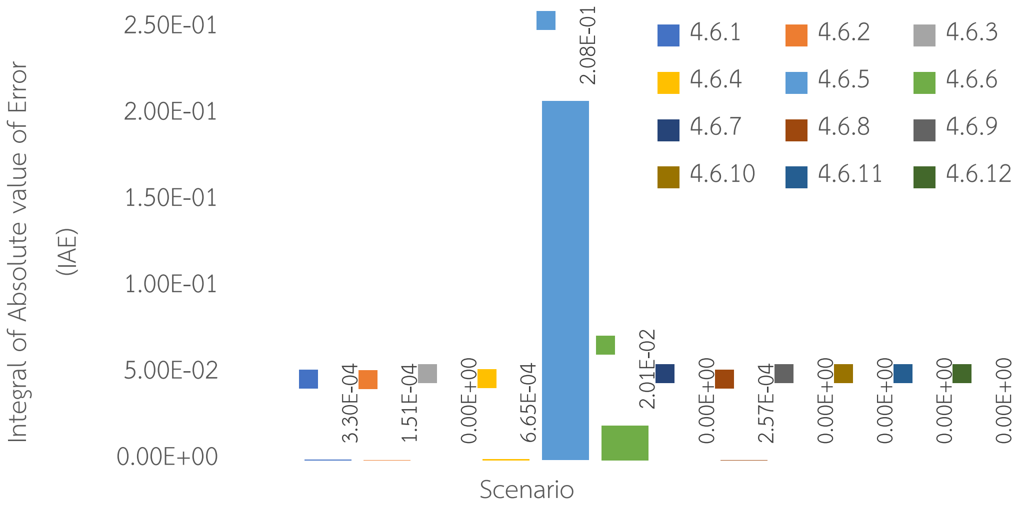
รูปที่ 4.72 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.7.2 ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ (TC2)

จากรูปที่ 4.73 เป็นการแสดงผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 - 4.6.12 จากผลการทดลองพบว่าในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.2 เมื่อปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศส่งผลให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ แสดงว่าการปรับค่าตัวแปรดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ เนื่องจากผลของการหมุนเวียนเบดระหว่างทั้งสองเครื่องปฏิกรณ์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจึงส่งผลต่ออุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศด้วยเช่นกัน ในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.3 – 4.6.4 เมื่อทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงของที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงกลับไม่ส่งผลกระทบต่อ

เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ แต่ในทางกลับกันเมื่อลดการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงกลับส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ ในสถานการณ์นี้จึงสรุปได้ว่าการลดการป้อนเชื้อเพลิงจึงเป็นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงมากกว่าการเพิ่มการป้อนเชื้อเพลิง เพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศคงที่ ในการจำลองสถานการณ์ที่4.6.5 – 4.6.6 ซึ่งเป็นการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ จากการศึกษาจึงพบว่าการปรับค่าตัวแปรดังกล่าวส่งผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศมากที่สุด ในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.7 – 4.6.8 เป็นการปรับอัตราการป้อนของอากาศ ซึ่งการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศไม่ทำให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ ในขณะที่การลดอัตราการป้อนอากาศกลับทำให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศขึ้น ปัจจัยการลดการป้อนอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ สถานการณ์ที่ 4.6.7 – 4.6.12 จะพบว่าไม่เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศขึ้นเลยแสดงว่าเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศเป็นอิสระจากการปรับค่าตัวแปรนั้นๆ เนื่องจากการปรับตัวแปรในสถานการณ์ดังกล่าวเป็นการปรับตัวแปรที่เครื่องควบแน่นไอน้ำที่อยู่ปลายทาง จึงไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องปฏิกรณ์อากาศซึ่งอยู่ต้นทาง

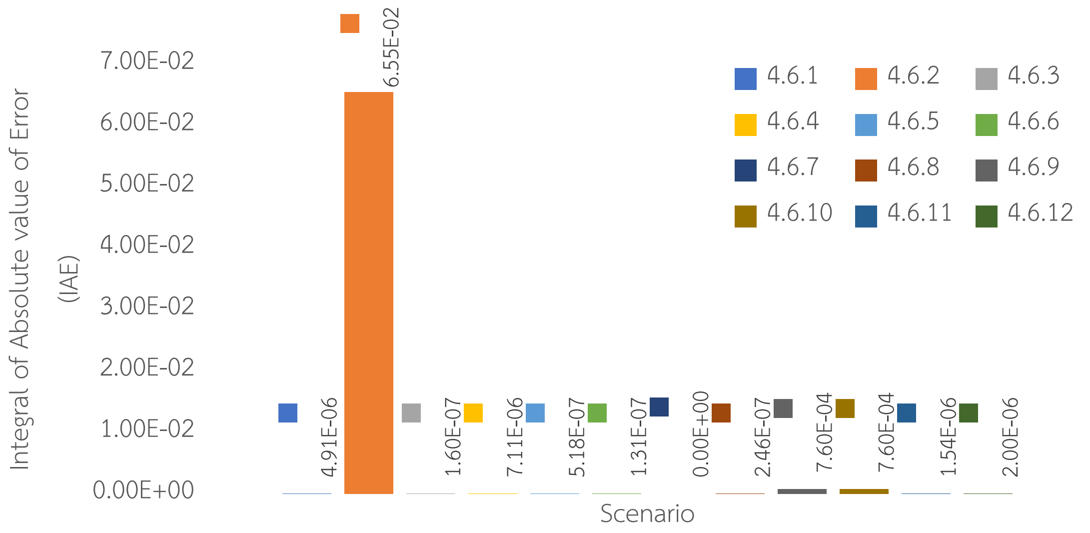


รูปที่ 4.73 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12

4.7.3 ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ (LC1)

จากรูปที่ 4.74 เป็นการแสดงผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 - 4.6.12 จากผลการทดลองพบว่าในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.2 เมื่อปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ส่งผลให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ แสดงว่าการปรับค่าตัวแปรดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ จะสังเกตได้ว่าการลดอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ทำให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เมื่อเข้าสู่เครื่องควบแน่นไอน้ำจึงทำให้ปริมาณไอน้ำที่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลต่อระดับของเหลวภายในเครื่องควบแน่นไอน้ำ ในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.3 – 4.6.4 เมื่อทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงของที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงส่งผลต่อผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเพียงเล็กน้อย เนื่องจากว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงส่งผลต่อปริมาณไอน้ำจากการเผาไหม้เพียงเล็กน้อย ทำให้ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นไอน้ำไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.5 – 4.6.6 ซึ่งเป็นการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ จากการศึกษาพบว่าการปรับค่าตัวแปรดังกล่าวส่งผลกระทบต่อผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะส่งผลต่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น จนกระทั่งส่งผลต่อปริมาณไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้ในที่สุด ในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.7 – 4.6.8 เป็นการปรับอัตราการป้อนของอากาศซึ่งการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศไม่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ ในขณะที่การลดอัตราการป้อนอากาศกลับทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเพียงเล็กน้อย สถานการณ์ที่ 4.6.9 - 4.6.10 เป็นการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ ผลการปรับค่าดังกล่าวทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำขึ้น แต่พบว่าค่ากลับไม่สูงเหมือนกับการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเครื่องควบแน่นไอน้ำมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดของเครื่องปฏิกรณ์มาก ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเพียงเล็กน้อย สถานการณ์ที่ 4.6.11 - 4.6.12 เป็นการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ การปรับความดันของ

เครื่องควบแน่นไอน้ำส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันส่งผลต่อการควบแน่นของไอน้ำ

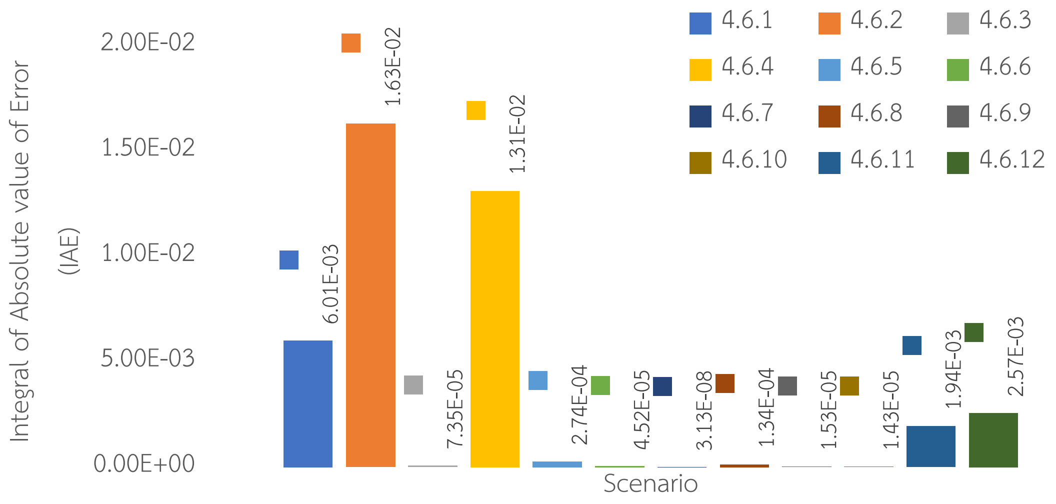


รูปที่ 4.74 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12

4.7.4 ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ (PC1)

จากรูปที่ 4.75 เป็นการแสดงผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 - 4.6.12 จากผลการทดลองพบว่าในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.2 เมื่อปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ส่งผลให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ แสดงว่าการปรับค่าตัวแปรดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ จะสังเกตได้ว่าการลดอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ทำให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เมื่อเข้าสู่เครื่องควบแน่นไอน้ำจึงทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งส่งผลต่อความดันภายในเครื่องควบแน่นไอน้ำ ในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.3 – 4.6.4 เมื่อทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงของที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงส่งผลต่อผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำโดยการลดอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงมีผลต่อปริมาณการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ซึ่งส่งผลกระทบต่อความดันในเครื่องควบแน่นไอน้ำ ในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.5 –4.6.6 ซึ่งเป็น

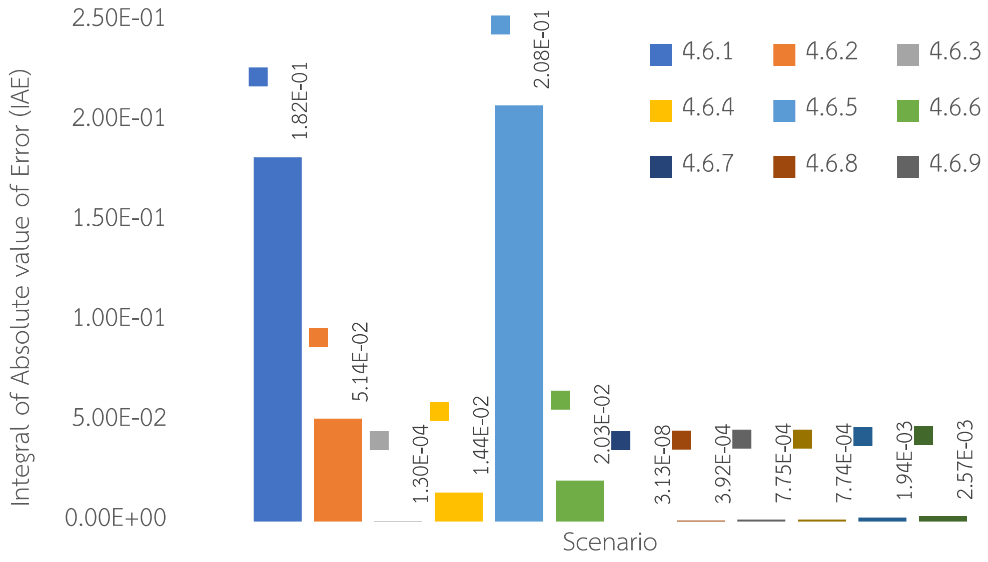
การปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ จากการศึกษาพบว่าการปรับค่าตัวแปรดังกล่าวส่งผลกระทบต่อผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะส่งผลต่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น จนกระทั่งส่งผลต่อปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ในที่สุด และส่งผลต่อความดันภายในเครื่องควบแน่นไอน้ำในที่สุด ในการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.7 – 4.6.8 เป็นการปรับอัตราการป้อนของอากาศ ซึ่งการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศไม่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ ในขณะที่การลดอัตราการป้อนอากาศกลับทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเพียงเล็กน้อย สถานการณ์ที่ 4.6.9 - 4.6.10 เป็นการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ ผลการปรับค่าดังกล่าวส่งผลกระทบต่อความดันในเครื่องควบแน่นไอน้ำเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของแก๊ส ในที่สุดจึงกระทบต่อความดันภายในเครื่องควบแน่นไอน้ำ สถานการณ์ที่ 4.6.11 - 4.6.12 เป็นการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ ผลการปรับค่าดังกล่าวทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำขึ้น แต่พบว่าค่ากลับไม่สูงเหมือนกับการปรับค่าเป้าหมายของเครื่องควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเครื่องควบแน่นไอน้ำมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดของเครื่องปฏิกรณ์มาก ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.75 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12

4.7.5 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง

จากรูปที่ 4.76 เป็นการแสดงผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง จากการศึกษาจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมจะขึ้นอยู่กับสองปัจจัยได้แก่ ปัจจัยแรกคือขนาดของหน่วยปฏิบัติการที่ถูกควบคุม จะสังเกตได้ว่าผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องปฏิกรณ์จะมากกว่าผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบแน่นไอน้ำอย่างชัดเจน เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายหรือค่าตัวแปรรบกวน เครื่องควบคุมต้องใช้ระยะเวลานานในการปรับค่ากลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการแตกต่างกับเครื่องควบแน่นไอน้ำที่มีขนาดที่เล็กกว่ามาก เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายหรือค่าตัวแปรรบกวนจึงใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า ส่งผลให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า ปัจจัยที่สองคือประเภทของการควบคุม โดยการควบคุมแต่ละประเภทจะใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกัน เช่น เครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำจะพบว่าแม้จะติดตั้งเครื่องควบคุมกับหน่วยปฏิบัติการเดียวกัน แต่การตอบสนองของเครื่องควบคุมระดับของเหลวกับตอบสนองได้ช้ากว่าการตอบสนองของเครื่องควบคุมความดัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวที่ใช้การปรับอัตราการป้อนของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจะใช้ระยะเวลาที่นานกว่าการเปลี่ยนแปลงของความดันที่ใช้การปรับอัตราการป้อนแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ



รูปที่ 4.76 ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมในการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง เมื่อทำการจำลองสถานการณ์ที่ 4.6.1 – 4.6.12

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตสำหรับการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงและออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงที่รวมผลของทั้งจลนศาสตร์และอุทกพลศาสตร์ ส่วนที่สองจะใช้แบบจำลองดังกล่าวในการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์อย่างง่ายเพื่อที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตสำหรับการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง พร้อมทั้งออกแบบระบบควบคุมตามหลักการออกแบบระบบควบคุมแบบแพลนท์ไวด์แล้วทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์ปรับค่าเป้าหมายและปรับค่าตัวแปรรบกวนภายในกระบวนการ โดยสามารถแบ่งหัวข้อที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1) การศึกษาวิธีการออกแบบเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิงที่สถานะคงตัว โดยแบบจำลองที่ศึกษาแบบจำลองที่แตกต่างจากแบบจำลองในงานวิจัยอื่นๆ ที่มักใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสำเร็จรูป ซึ่งใช้พื้นฐานในการคำนวณจากกฎทางเทอร์โมไดนามิกส์ สมการดุลมวลสารและพลังงานเท่านั้น แต่แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดได้ใช้ข้อมูลทางจลนศาสตร์จากการทดลอง รวมถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งทำให้แบบจำลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ผลจากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Porrazzo และคณะ [6] ซึ่งเป็นงานวิจัยต้นแบบการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง จากนั้นจึงปรับช่วงภาวะการดำเนินการของหน่วยปฏิบัติการ และขยายแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดเป็นขนาด 65 เมกกะวัตต์

2) การศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง พบว่ายังไม่สามารถที่จะสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดได้ เนื่องจากโปรแกรมยังไม่รองรับการใช้งานกล่องการคำนวณและกล่องการถ่ายโอนข้อมูลซึ่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการจำลองวัฏภาคต่างๆภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายแทน เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงระหว่างทั้งสองแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนสมบูรณ์มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์

ฟลูอิไดซ์เบดเนื่องจากแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนสมบูรณ์ได้ใช้สมมุติฐานว่าเกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและแก๊สทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์ในขณะที่แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดได้จำลองวัฏภาคที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งผลของการแบ่งวัฏภาคดังกล่าวทำให้ไม่เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงไม่เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและแก๊สทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นจึงได้ทำการปรับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยารีดักชันที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศของแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ โดยเลือกปรับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากค่าตัวแปรดังกล่าวเป็นค่าที่ไม่สามารถหาได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้ตัวแปรดังกล่าวมีโอกาสทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นจึงปรับเพิ่มค่าพลังงานกระตุ้นเพื่อลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้มีความใกล้เคียงกับแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

3) การศึกษาวิธีการออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง โดยได้ศึกษาวิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบแพลนท์ไวด์ด้วยวิธีการเลือกวิธีการจับคู่ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม ซึ่งได้เลือกวิธีการหาค่าเมทริกซ์เกนสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นวิธีในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมจากการหาค่าเกนของระบบ จากผลการหาค่าเมทริกซ์สัมพัทธ์พบว่าการปรับค่าตัวแปรปรับมีความเป็นอิสระ กล่าวคือการปรับค่าตัวแปรปรับไม่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรควบคุมของวงควบคุมอื่นๆ ทำให้ง่ายต่อการควบคุม

4) การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมที่มีผลต่อการควบคุมกระบวนการ ผลที่ได้จากการศึกษาโดยการเปรียบเทียบผลรวมของค่าสมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อนพบว่าเครื่องควบคุมที่ใช้ค่าพารามิเตอร์โดยวิธีการปรับแต่งของซิกเลอร์-นิโคลมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้รวมเร็วกว่า ระบบควบคุมสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับแต่งของไทเรียส-ลูเบน ส่งผลให้ค่าผลรวมของค่าสมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมที่ใช้ค่าพารามิเตอร์โดยวิธีการปรับแต่งของซิกเลอร์-นิโคลมีค่าน้อยกว่าวิธีการปรับแต่งของไทเรียส-ลูเบน

5) การศึกษาวิธีการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม โดยได้ศึกษาวิธีการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมด้วยการสร้างสถานการณ์เปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและค่าตัวแปรรบกวน นำข้อมูลที่ได้มาหาผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของระบบซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำคัญของการเกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของระบบควบคุมประกอบด้วยสองปัจจัยหลัก จากการศึกษาจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมจะขึ้นอยู่กับสองปัจจัยได้แก่ ปัจจัยแรกคือขนาดของหน่วยปฏิบัติการที่ถูกควบคุม จะสังเกตได้ว่าผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องปฏิกรณ์จะมากกว่าผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบแน่นไอน้ำอย่างชัดเจน เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายหรือค่าตัวแปรรบกวนเครื่องควบคุมต้องใช้ระยะเวลานานในการปรับค่ากลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการแตกต่างกับเครื่องควบแน่นไอน้ำที่มีขนาดที่เล็กกว่ามาก เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายหรือค่าตัวแปรรบกวนจึงใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า ส่งผลให้เกิดผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า ปัจจัยที่สองคือประเภทของการควบคุม โดยการควบคุมแต่ละประเภทจะใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกัน เช่น เครื่องควบคุมระดับของเหลวที่เครื่องควบแน่นไอน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องควบคุมความดันที่เครื่องควบแน่นไอน้ำจะพบว่าแม้จะติดตั้งเครื่องควบคุมกับหน่วยปฏิบัติการเดียวกัน แต่การตอบสนองของเครื่องควบคุมระดับของเหลวกับตอบสนองได้ช้ากว่าการตอบสนองของเครื่องควบคุมความดัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวที่ใช้การปรับอัตราการป้อนของเหลวจากเครื่องควบแน่นไอน้ำจะใช้ระยะเวลาที่นานกว่าการเปลี่ยนแปลงของความดันที่ใช้การปรับอัตราการป้อนแก๊สจากเครื่องควบแน่นไอน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเป็นเวลานานกว่า 50 ปีแล้ว เมื่อใช้ในกระบวนการที่มีลักษณะเป็นอินพุท-เอาท์พุทเดียว (Single Input-Single Output, SISO) มักจะให้ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ในการควบคุมระบบแบบที่มีตัวแปรหลายตัว (Multivariable Systems) ความสามารถในการควบคุมก็จะถูกจำกัดลง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในช่วง 40 ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเกิดขึ้นทั้งด้านความเร็วในการคำนวณและประสิทธิภาพการทำงานของดิจิตอลคอมพิวเตอร์ ทำให้การควบคุมกระบวนการขั้นสูงเริ่มมีความสำคัญมากขึ้น โดยตัวควบคุมชนิดหนึ่งซึ่งได้ชื่อว่าเป็นตัวควบคุมกระบวนการขั้นสูงที่ดีมาก คือ โมเดลพรีดิคทีฟคอนโทรลเลอร์ (Model Predictive Controller; MPC) ซึ่งเป็นตัวควบคุมชนิดอาศัยแบบจำลอง (Model Based) โดยจะใช้แบบจำลองของกระบวนการในการคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ และสามารถที่จะใช้กับ

ระบบที่มีขอบเขตจำกัดต่างๆ (Constrains) นอกจากนี้ยังสามารถที่จะกำหนดฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์เพื่อให้การควบคุมเป็นไปได้อย่างราบรื่นและเหมาะสมที่สุด โดยในปัจจุบันสามารถที่จะสร้างตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิคทีฟคอนโทรลเลอร์ได้ด้วยการสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วย เมทริกซ์ของตัวแปรสถานะ เมทริกซ์ของตังแปรขาเข้า และเมทริกซ์ของตัวแปรวัด โดยใช้ข้อมูลของแบบจำลองกระบวนการที่มีค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์จากโปรแกรมแอสเพนพลัส และแอสเพนไดนามิกส์ เข้าสู่โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อสร้างตัวควบคุมแบบ โมเดลพรีดิคทีฟคอนโทรลเลอร์

2) งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอแบบจำลองกระบวนการเคมิคอลลูปปิงเฉพาะส่วนเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเท่านั้น เนื่องจากว่าการขยายระบบออกเป็นโรงไฟฟ้า จำเป็นที่จะต้องอาศัยข้อมูลในของออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ตัวอย่างเช่น เมื่อจะสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องอัดอากาศและแก๊สเทอร์ไบน์ จะต้องมีข้อมูลของกราฟผลการทำงานของเครื่องอัดอากาศและแก๊สเทอร์ไบน์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมเชิงพลวัตของอุปกรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ก1. ตัวอย่างการปรับพารามิเตอร์เครื่องควบคุมในตารางที่ 4.4 และ 4.5 โดยใช้โปรแกรมแอสเพนไดนามิกส์

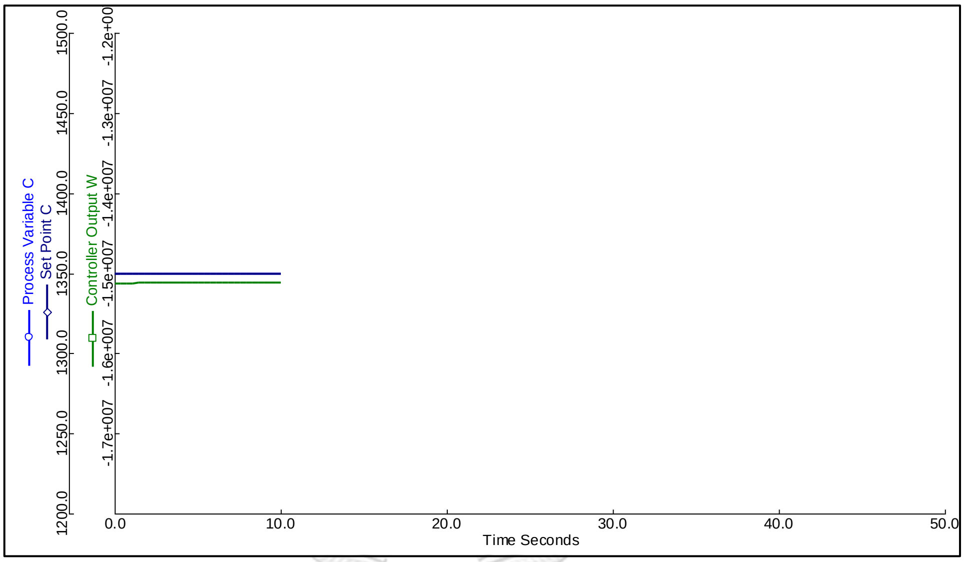
1) การเริ่มต้นการคำนวณค่าตั้งต้นโดยการปรับเข้าสู่โหมด Initialization ให้โปรแกรมดึงข้อมูลจากแบบจำลองที่สถานะคงตัว เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าข้อมูลยังคงลู่เข้า และไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นก่อนการทำแบบจำลองเชิงพลวัต

2) ปรับโปรแกรมเข้าสู่โหมด Dynamic จากนั้นรันโปรแกรมเป็นระยะเวลา 10 วินาที เพื่อให้แน่ใจว่าระบบอยู่ในภาวะคงตัวดังรูปที่ ก1. จากนั้นทำการสั่งการโปรแกรมให้ทำการเลือกวิธีการปรับแต่งวงควบคุมแบบปิดหรือปรับแต่งแบบออนไลน์ (Closed loop ATV) กำหนดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณขาออกเท่ากับ 5% จากนั้นจึงคลิกเลือกเริ่มการทดสอบดังรูปที่ ก2.

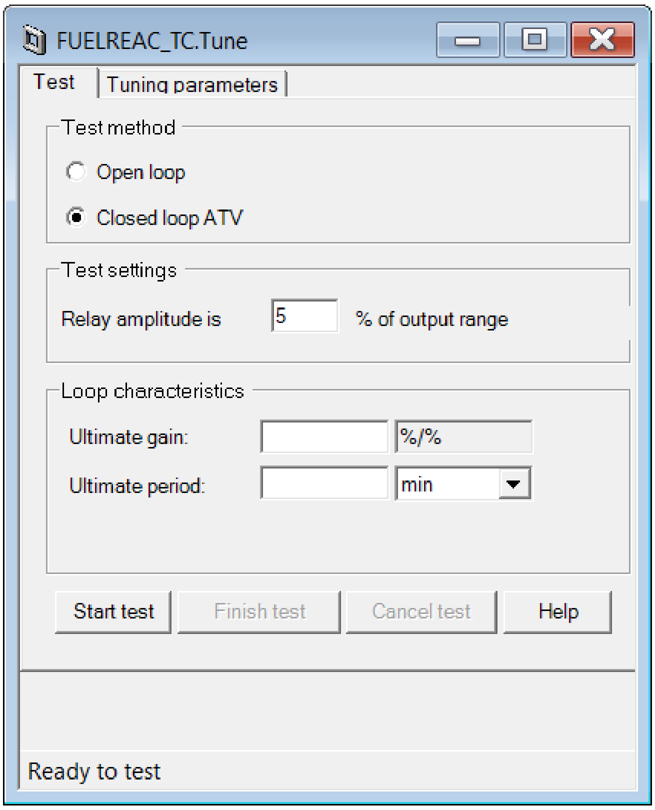
3) จะพบว่าโปรแกรมทำการเพิ่มค่าอัตราขยายเชิงสถิตเครื่องควบคุมอย่างช้าๆ จนกระทั่งการตอบสนองมีลักษณะแกว่งด้วยแอมพลิจูดคงที่ดังรูปที่ ก3. จากนั้นเมื่อผู้ใช้โปรแกรมทำการคลิกเลือกจบการทดสอบ โปรแกรมจะแสดงค่าอัตราขยายเชิงสถิตสูงสุด (K_{cu}) และคาบการแกว่งสูงสุด (T_u) ที่บันทึกได้ดังรูปที่ ก4.

4) เลือกชนิดของเครื่องควบคุมได้แก่เช่น เครื่องควบคุมชนิดพีไอ และเครื่องควบคุมชนิดพีไอดีเป็นต้น จากนั้นทำการเลือกสูตรในการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์ โดยจะมีทั้งหมดสองวิธีคือ วิธีการปรับแต่งแบบซิกเลอร์-นิโคล และไทเรียส-ลูเบน

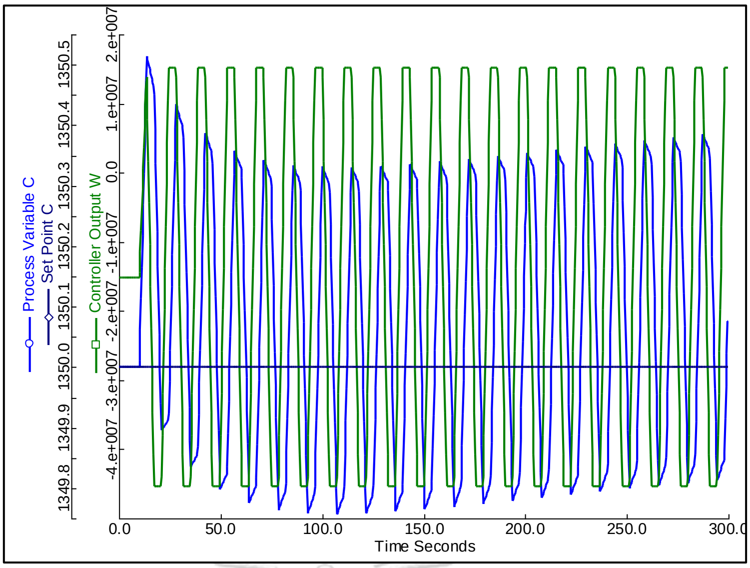
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



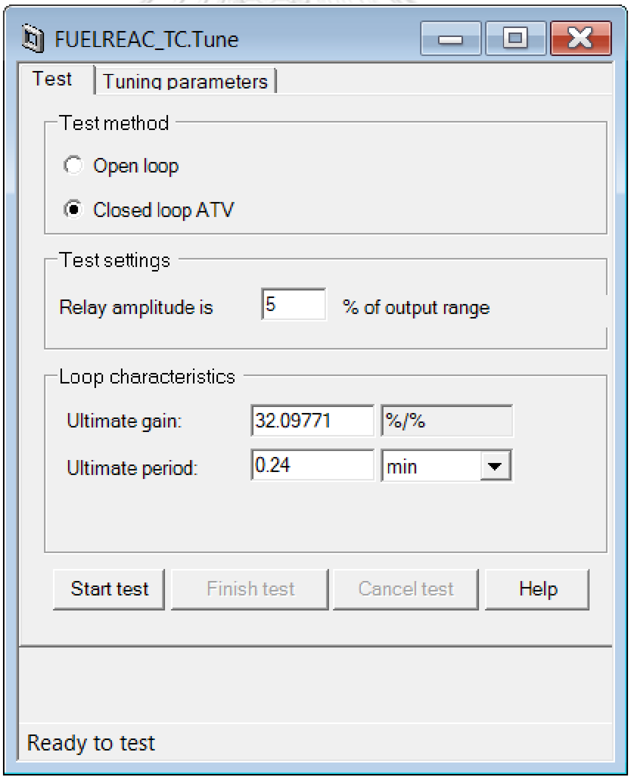
รูปที่ ก1. การตอบสนองของเครื่องควบคุมก่อนเริ่มการปรับแต่งวงควบคุมแบบออนไลน์



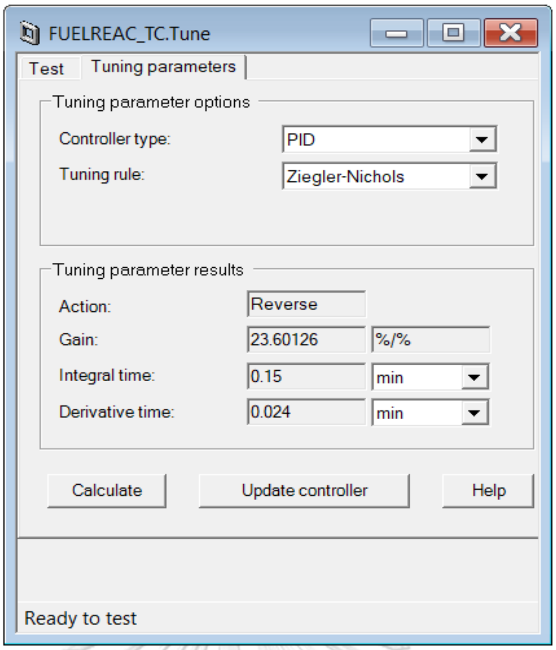
รูปที่ ก2. หน้าต่างการปรับแต่งพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม



รูปที่ ก3. กราฟแสดงการตอบสนองของวงควบคุมที่แอมพลิจูดคงที่



รูปที่ ก4. หน้าต่างการป้อนพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม



รูปที่ ก5. หน้าต่างแสดงผลของการปรับแต่งพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุม

จากการใช้สูตรในการปรับแต่งเครื่องควบคุมแบบออนไลน์ข้างต้น ทำให้สามารถหาลักษณะการทำงานของเครื่องควบคุมได้ดังตารางที่ ก1.

ตารางที่ ก1. ลักษณะการทำงานของเครื่องควบคุม

วงควบคุม	ลักษณะการทำงานของเครื่องควบคุม
อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง	กลับทิศ
อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ	กลับทิศ
ระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำ	ทิศเดียวกัน
ความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำ	ทิศเดียวกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก2. ตัวอย่างการคำนวณค่าไอเออีของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

ตารางที่ ก2. ตัวอย่างข้อมูลเชิงพลวัตของวงควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

เวลา (วินาที)	ตัวแปรควบคุม (^{o}C)	ตัวแปรควบคุม (^{o}C)
9.72	1350.00	1400
10.08	1350.12	1400
10.44	1350.66	1400
10.80	1351.21	1400

เริ่มการคำนวณที่เวลา 9.72 วินาทีถึง 10.80 วินาที โดยทำการคำนวณทุกๆ 0.36 วินาที แล้วนำค่าทั้งหมดมารวมค่าไอเออีของวงควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เมื่อนำค่าไอเออี$_1$, ไอเออี$_2$ และไอเออี$_3$ รวมกันจะได้ค่าไอเออีรวมของวงควบคุมตั้งแต่เวลา 9.72 – 10.80 วินาที

ที่เวลา 9.72 – 10.08 วินาที

ค่าไอเออี$_1$ = $\frac{\mathbf{|1350.12-1400|*0.36}}{\mathbf{1400}}$ = 0.01282

ที่เวลา 10.08 – 10.44 วินาที

ค่าไอเออี$_2$ = $\frac{\mathbf{|1350.66-1400|*0.36}}{\mathbf{1400}}$ = 0.01269

ที่เวลา 10.44 – 10.80 วินาที

ค่าไอเออี$_3$ = $\frac{\mathbf{|1350.21-1400|*0.36}}{\mathbf{1400}}$ = 0.01280

ภาคผนวก ข

ข1. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าเกนในรูปแบบเมทริกซ์

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าเกนของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เมื่อทำการปรับค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น 10%

ข้อมูลตั้งต้น :

1) ค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่สถานะคงตัวเดิม 1,350.00 องศาเซลเซียส อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง -15.119 เมกกะวัตต์
2) ปรับเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเป็น -16.631 เมกกะวัตต์ ในขณะที่ปิดการทำงานของระบบควบคุม เมื่อวัดค่าอุณหภูมิเมื่อกระบวนการเข้าสู่สถานะคงตัวใหม่ วัดค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงได้ 1,288.39 องศาเซลเซียส นำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณหาค่าเกน ดังสมการที่ ข1.

$$K_{11} = \frac{\Delta output}{\Delta input} = \frac{\Delta C_1}{\Delta M_1} = \frac{1,288.39-1,350.00}{-16.631-(-15.119)} = 4.07 \times 10^{-5}\ \frac{^{o}C}{MW} \qquad (ข1.)$$

3) เนื่องจากตัวการควบคุมกระบวนการหลายตัวแปร (Multivariable control) กระบวนการจะมีตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมหลายตัวแปร ดังนั้นการปรับตัวแปรปรับที่อาจจะส่งผลกระทบต่อตัวแปรควบคุมอื่นๆ เช่นการปรับอัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง นอกจากจะส่งผลต่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแล้ว ยังส่งผลต่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ระดับของเหลวของเครื่องควบแน่นไอน้ำและความดันของเครื่องควบแน่นไอน้ำอีกด้วย ดังนั้นการแสดงค่าเกนในรูปแบบเมทริกซ์จึงเป็นประโยชน์ต่อการเลือกคู่ตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม

ภาคผนวก ค

ค1. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน

1) คำนวณหาค่าอาร์คิมิดิส ตามสมการที่ ค1.
2) คำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ความเร็วที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน ตามสมการที่ ค2.
3) คำนวณหาค่าความเร็วที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน ตามสมการที่ ค3.

$$Ar = \frac{d_p^3\ \rho_s\,(\rho_s - \rho_g)\,g}{\mu_g^2} \qquad (ค1.)$$

$$= \frac{(8 * 10^{-5}\mathrm{m})^3\left(6820\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)\left(6820 - 0.191\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)(9.81\ \mathrm{m/s}^2)}{\left(2.75 * 10^{-5}\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m} * \mathrm{s}}\right)^2}$$

$$= 8.975$$

$$Re_{mf} = [(33.7)^2 + 0.0408\ Ar\,]^{0.5} - 33.7 \qquad (ค2.)$$

$$= [(33.7)^2 + 0.0408 * 8.975\,]^{0.5} - 33.7$$

$$= 0.054$$

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf}\mu_g}{d_p\ \rho_g} \qquad (ค3.)$$

$$= \frac{0.054 * \left(2.75 * 10^{-5}\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m} * \mathrm{s}}\right)}{(8 * 10^{-5}\ \mathrm{m})\ \left(0.191\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)}$$

$$= 0.0096 \text{ m/s}$$

ค2. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความเร็วปลาย

คำนวณความเร็วปลาย โดยใช้สมการที่ ค4. – ค6. ตามลำดับ

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)}{\mu_g^2}\right]^{0.33} \quad (ค4.)$$

$$= (8 * 10^{-5} \text{ m}) * \left[\frac{\left(0.191 \frac{kg}{m^3}\right)\left(6820 - 0.191 \frac{kg}{m^3}\right)}{\left(2.75 * 10^{-5} \frac{kg}{m * s}\right)^2}\right]^{0.33}$$

$$= 1.877 \text{ m}$$

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{0.5}}\right]^{-1} \quad (ค5.)$$

$$= \left[\frac{18}{(1.877 \text{ m})^2} + \frac{0.591}{(1.877 \text{ m})^{0.5}}\right]^{-1}$$

$$= 0.18 \text{ m/s}$$

$$U_t = U_t^* \left[\frac{\mu_g(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g^2}\right]^{0.33} \quad (ค6.)$$

$$= (0.18 \text{ m/s}) \left[\frac{\left(2.75 * 10^{-5} \frac{kg}{m * s}\right)\left(6820 - 0.191 \frac{kg}{m^3}\right)}{\left(0.191 \frac{kg}{m^3}\right)^2}\right]^{0.33}$$

$$= 0.65 \text{ m/s}$$

ค3. ตัวอย่างการคำนวณ

1) คำนวณหาค่าความเร็วป้อนเข้าของแก๊สในกระบวนการ ตามสมการที่ ค7.
2) คำนวณหาค่าความเร็วของแก๊สของวัฏภาคอิมัลชัน ตามสมการที่ ค8.
3) คำนวณหาค่าความเร็วลอยขึ้นของฟองแก๊สในกระบวนการ ตามสมการที่ ค9.
4) คำนวณหาค่าความเร็วป้อนเข้าของแก๊สของวัฏภาคฟองแก๊ส ตามสมการที่ ค10.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5) คำนวณหาค่าสัดส่วนของเบดในฟองแก๊ส ตามสมการที่ ค11.

6) คำนวณหาค่าปริมาตรป้อนเข้าของแก๊สของวัฏภาคฟองแก๊ส ตามสมการที่ ค12.

7) คำนวณหาค่าปริมาตรป้อนเข้าของแก๊สของวัฏภาคอิมัลชัน ตามสมการที่ ค13.

8) คำนวณหาค่าอัตราการป้อนเข้าของอนุภาคของแข็งของวัฏภาคฟองแก๊ส ตามสมการที่ ค14.

9) คำนวณหาค่าอัตราการป้อนเข้าของอนุภาคของแข็งของวัฏภาคอิมัลชัน ตามสมการที่ ค15.

$$U_o \approx 10 * U_{mf} \qquad (ค7.)$$

$$\approx 10 * 0.0096\ m/s$$

$$\approx 0.096\ m/s$$

$$U_e \approx \frac{U_{mf}}{\varepsilon_{mf}} \qquad (ค8.)$$

$$\approx \frac{0.0096\ m/s}{0.5}$$

$$\approx 0.019\ m/s$$

$$U_{br} = 0.711 * (g * d_b)^{0.5} \qquad (ค9.)$$

$$= 0.711 * \left[\left(9.81\ \frac{kg}{m^2}\right)(0.03\ m)\right]^{0.5}$$

$$= 0.3857\ m/s$$

$$U_b = U_o - U_e + U_{br} \qquad (ค10.)$$

$$U_b = 0.096 - 0.019 - 0.3857\ m/s$$

$$U_b = 0.4625\ m/s$$

$$\sigma = \frac{U_o - U_{mf}}{U_b - U_{mf}} \qquad (ค11.)$$

$$= \frac{(0.096 - 0.0096\frac{m}{s})}{(0.4625 - 0.0096\frac{m}{s})}$$

$$= 0.191$$

$$Q_b = U_b * A_{FR} * \sigma \quad (ค12.)$$

$$= (0.4625\ \mathrm{m/s}) * (3.8\ \mathrm{m^2}) * (0.191)$$

$$= 0.3368\ \frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}}$$

$$Q_e = U_{mf} * A_{FR} * (1 - \sigma) \quad (ค13.)$$

$$= (0.0096\ \mathrm{m/s}) * (3.8\ \mathrm{m^2}) * (1 - 0.191)$$

$$= 0.0297\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}}$$

$$F_{sb} = F_s * \sigma * (1 - \varepsilon_b) \quad (ค14.)$$

$$= \left(0.277\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}\right) * (0.191) * (1 - 0.9)$$

$$= 0.0053\ \mathrm{kg/s}$$

$$F_{sb} = F_s - F_{sb} \quad (ค15.)$$

$$= 0.277 - 0.0643\ \mathrm{kg/s}$$

$$= 0.2717\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

[1] R. Porrazzo, G. White, R. Ocone, Fuel reactor modelling for chemical looping combustion: From micro-scale to macro-scale, Fuel 175 (2016) 87-98.

[2] E.H. Bristol, On a new measure of interaction for multivariable process control, IEEE Transactions on Automatic Control 11(1) (1966) 133-134.

[3] X. Zhang, S. Banerjee, L. Zhou, R.K. Agarwal, Process simulation and maximization of energy output in chemical-looping combustion using ASPEN plus, Int. J. Energy Environ 6(2) (2015) 201-226.

[4] R. Porrazzo, G. White, R. Ocone, Techno-economic investigation of a chemical looping combustion based power plant, Faraday Discussions 192 (2016) 437-457.

[5] R. Jafari, R. Sotudeh-Gharebagh, N. Mostoufi, Modular simulation of fluidized bed reactors, Chemical Engineering and Technology 27(2) (2004) 123-129.

[6] R. Porrazzo, G. White, R. Ocone, Aspen Plus simulations of fluidised beds for chemical looping combustion, Fuel 136 (2014) 46-56.

[7] P. Peltola, J. Ritvanen, T. Tynjälä, T. Pröll, T. Hyppänen, One-dimensional modelling of chemical looping combustion in dual fluidized bed reactor system, International Journal of Greenhouse Gas Control 16 (2013) 72-82.

[8] A. Abad, J. Adánez, F. García-Labiano, L.F. de Diego, P. Gayán, J. Celaya, Mapping of the range of operational conditions for Cu-, Fe-, and Ni-based oxygen carriers in chemical-looping combustion, Chemical Engineering Science 62(1) (2007) 533-549.

[9] D.E. Seborg, T.F. Edgar, D.A. Mellichamp, Process Dynamics and Control, Wiley2004.

[10] กรมอุตุวิทยา, ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect). https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=20.

[11] G. Sanook., ปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming), 2013. https://guru.sanook.com/2923/.

[12] C.C.S. Association, WHAT IS CCS? http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/capture/.

[13] R. Aldous, Carbon capture and storage – a vital part of our climate change response, 2011. http://theconversation.com/carbon-capture-and-storage-a-vital-part-of-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

our-climate-change-response-3972.

[14] D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidization engineering, Elsevier2013.

[15] เ. เฉลิมสินสุวรรณ, ฟลูอิไดเซชัน (Fluidization), กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560

[16] M.J. Lockett, J.F. Davidson, D. Harrison, On the two-phase theory of fluidisation, Chemical Engineering Science 22(8) (1967) 1059-1066.

[17] R. Toomey, H. Johnstone, Gaseous Fluidization of Solid Particles, Chem. Eng. Progr. (1952) 220-226.

[18] D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidized reactor models. 1. For bubbling beds of fine, intermediate, and large particles. 2. For the lean phase: freeboard and fast fluidization, Industrial & Engineering Chemistry Research 29(7) (1990) 1226-1234.

[19] D.E. Seborg, D.A. Mellichamp, T.F. Edgar, F.J. Doyle III, Process dynamics and control, John Wiley & Sons2010.

[20] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, Optimum Setting for Automatic Controllers, Trans ASME (1942) 759-768.

[21] C.A. Smith, A.B. Corripio, Principles and practice of automatic process control, J. Wiley1997.

[22] A. Lyngfelt, H. Thunman, Chapter 36 - Construction and 100 h of Operational Experience of A 10-kW Chemical-Looping Combustor A2 - Thomas, David C, Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations, Elsevier Science, Amsterdam, 2005, pp. 625-645.

[23] P.L. Mores, E. Godoy, S.F. Mussati, N.J. Scenna, A NGCC power plant with a CO2 post-combustion capture option. Optimal economics for different generation/capture goals, Chemical Engineering Research and Design 92(7) (2014) 1329-1353.

[24] P. Kolbitsch, T. Pröll, H. Hofbauer, Modeling of a 120kW chemical looping combustion reactor system using a Ni-based oxygen carrier, Chemical Engineering Science 64(1) (2009) 99-108.

[25] J. Davidson, D. Harrison, R. Jackson, Fluidized particles: Cambridge University Press, 1963. 155 pp. 35s, Pergamon, 1964.

[26] O. Levenspiel, Chemical reaction engineering, Wiley1999.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[27] K.I.M. Al-Malah, Aspen Plus: Chemical Engineering Applications, Wiley2016.

[28] J.R. Couper, W.R. Penney, J.R. Fair, S.M. Walas, 18 - Process Vessels, in: J.R. Couper, W.R. Penney, J.R. Fair, S.M. Walas (Eds.), Chemical Process Equipment (Third Edition), Butterworth-Heinemann, Boston, 2012, pp. 655-675.

[29] M.M. Hossain, H.I. de Lasa, Chemical-looping combustion (CLC) for inherent CO2 separations—a review, Chemical Engineering Science 63(18) (2008) 4433-4451.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธนภัทร วโนทยาโรจน์
วัน เดือน ปี เกิด	17 มกราคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	99/414 หมู่ที่ 8 ต.บางกระสอ อ.เมืองนนทบุรี จ.นนทบุรี
ผลงานตีพิมพ์	Wanotayaroj, T., Chalermsinsuwan, B., and Piumsomboon, P. Dynamic simulation and control system for chemical looping combustion. Energy Reports (2019). ธนภัทร วโนทยาโรจน์, เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ และ พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์. “การจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปปิง ด้วยโปรแกรมจำลองกระบวนการแอสเพนพลัส”. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (2561): T-PRO-O-129-03.
รางวัลที่ได้รับ	INSEE Scholarship 2018 for engineering students. Siam City Cement Public Company Limited, Saraburi, Thailand (2019). Outstanding paper award certificate from Wanotayaroj, T., Chalermsinsuwan, B., and Piumsomboon, P. Circulating fluidized bed simulation for chemical looping combustion process by using Aspen Plus. The 28th TIChE Conference, Chonburi, Thailand (2018).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY