

การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสีกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบด  
แบบหมุนเวียนโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREDICTION OF EROSION AND CORROSION RISK AREAS IN ECONOMIZER OF  
CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS  
SIMULATION



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 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนใน อีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนโดย การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
โดย	น.ส.ณัฐวรรณ แสงนวกิจ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุชลาธารา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

ณัฐวรรณ แสงนวกิจ : การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนใน  
อีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยการจำลองพลศาสตร์ของ  
ไหลเชิงคำนวณ. ( PREDICTION OF EROSION AND CORROSION RISK AREAS IN  
ECONOMIZER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER BY COMPUTATIONAL  
FLUID DYNAMICS SIMULATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.  
ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลของอีโคโนไมเซอร์ของ  
หม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยอาศัยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วย  
ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม ของของไหลหลายวัฏภาคด้วยวิธีการจำลองแบบ  
ออยเลอร์-ออยเลอร์ ในช่วงสภาวะการไหลคงตัว (steady state) เพื่อจำลอง  
อุทกพลศาสตร์และการถ่ายโอนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งจะช่วยในการทำนายพื้นที่เสี่ยง  
ต่อการสึกกร่อนและกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์ ผลการคำนวณอุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้  
ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลสภาวะการทำงานจริงจากบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์  
จำกัด จากการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการควบแน่นกรดกำมะถันพบว่า  
บริเวณผิวท่อใกล้กับทางเข้าน้ำป้อนเข้าสู่ระบบจะเป็นบริเวณที่อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จะมีค่า  
ต่ำที่สุด ในการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวของสารประกอบคลอไรด์  
พบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุทกพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายโอนความร้อนในแต่ละกรณีศึกษา  
ทำให้การกระจายของชั้นสะสมแตกต่างกัน ส่งผลให้พื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนด้วยสาเหตุนี้จะ  
แตกต่างกันในแต่ละกรณี การทำนายพื้นที่เสี่ยงจากความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนกับ  
อุณหภูมิผิวท่อ ผลจากการจำลองพบว่า บริเวณผิวท่อใกล้เคียงกับทางออกของน้ำป้อนจะเป็น  
บริเวณที่อุณหภูมิผิวท่อสูงที่สุด ซึ่งบริเวณนั้นจะมีความเสี่ยงต่ออัตราการกัดกร่อนเนื่องจาก  
การเหนียวของสารประกอบคลอไรด์มากที่สุด และการทำนายพื้นที่เสี่ยงการสึกกร่อนแบบ  
ขีดสีทางด้านเปลวไฟด้วยการชนของอนุภาคเถ้าลอยบนผิวท่อ ได้จากการศึกษาความเร็วสูงสุด  
โดยรอบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่า บริเวณใกล้ทางเข้าของน้ำป้อนเข้าสู่ระบบจะเสี่ยงต่อ  
การสึกกร่อนด้วยการชนของอนุภาคเถ้าด้วยความเร็วสูงที่สุด

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6470093023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Erosion rate, Corrosion rate, Economizer, Circulating fluidized bed boiler, Computational Fluid Dynamics simulation

Nutthawan Sangnawakit : PREDICTION OF EROSION AND CORROSION RISK AREAS IN ECONOMIZER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION. Advisor: Prof. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D.

In this work, an economizer model in circulating fluidized bed boiler has been developed based on computational fluid dynamics simulation in steady-state for analyzing hydrodynamics and heat transfer behavior which can help to predict risk areas of erosion and corrosion within the economizer. The outlet flue gas temperature in the base case has been compared with the data from the actual operating conditions from Integrated Research Center Co., Ltd. From the results of the prediction of corrosion risk areas due to sulfuric acid condensation, it was found that the tube surface near the feed water inlet is the area where the flue gas temperature is the lowest. To predict risk areas by chloride induced corrosion, it was found that the changes in fluid hydrodynamics and heat transfer behaviors in each case study resulted in different distributions of the ash deposition layer. To predict the risk area with the relationship between the corrosion rate and tube surface temperature, the simulation results showed that the risk areas of the tube surfaces are near the feed water outlet where the tube surface temperature is the highest. The areas at risk of fire side abrasive erosion are predicted by using the study of the maximum ash velocity around the heat exchanger tube. It was found that ash particle collisions at the highest speeds caused the erosion risk areas near the feed water inlet of the economizer.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ในโอกาสนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากความกรุณาของ ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจและความทุ่มเทของอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรุสศรีวิชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา กรรมการภายในมหาวิทยาลัย และ อาจารย์ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนการศึกษา เงินสนับสนุนประจำเดือนตลอดหลักสูตร และ สถานที่ในการทำงานวิจัย รวมทั้งบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ข้อมูลโครงสร้างและสถานะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ ขอขอบคุณพี่สุชาติ กรีแสง และ ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาด้านวิชาการ รวมถึงให้ความช่วยเหลือในการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ของห้องปฏิบัติการ Cybernetics ในการศึกษาวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และ ขอขอบคุณ สมาชิกทุกคนของห้องปฏิบัติการ Cybernetics และ Fluidization ที่ให้การสนับสนุนและความปรึกษาให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาว รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และ ให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ แก่ผู้จัดทำเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

## หน้า

.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	2
1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.8 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1.1 หม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed boiler).....	5
2.1.1.1 องค์ประกอบของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	5

2.1.1.2	ข้อดีและข้อเสียของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน .....	6
2.1.2	อีโคโนไมเซอร์ (Economizer).....	7
2.1.3	ฟลูอิดิเซชัน (fluidization) .....	8
2.1.3.1	กระบวนการฟลูอิดิเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง (gas-solid fluidization).....	9
2.1.3.2	ฟลูอิดิเซชันแบบเบาบาง (pneumatic transport fluidized bed).....	9
2.1.4	การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	10
2.1.4.1	การถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลสวนทาง (counter-current flow) ..	10
2.1.4.2	การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยรวม (overall heat transfer coefficient).....	10
2.1.5	กลไกการสะสมเถ้า (ash deposition).....	11
2.1.6	กลไกการสึกกร่อน (erosion) และการกัดกร่อน (corrosion) .....	12
2.1.6.1	การกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน (fireside sulfuric acid corrosion) .....	12
2.1.6.2	การกัดกร่อนจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์ (chloride – induced corrosion) .....	13
2.1.6.3	การสึกกร่อนแบบขัดสีทางด้านเปลวไฟ (fire side abrasive erosion) .....	17
2.1.7	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics).....	18
2.1.7.1	การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method).....	18
2.1.7.2	การจำลองพลศาสตร์ของไหลหลายวัฏภาคในรูปแบบออยเลอร์เรียน-ออยเลอร์เรียน (Eulerian-Eulerian) .....	20
2.1.7.3	การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม Ansys® Fluent.....	21
2.1.7.4	ตัวอย่างสมการการคำนวณ .....	22
2.2	การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ( $2^k$ factorial experiment design) .....	26
2.3	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	34
3.1 ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย.....	34
3.1.1 ลักษณะอีโคโนไมเซอร์ .....	34
3.1.2 สภาวะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ .....	35
3.1.3 คุณสมบัติของสารภายในระบบ .....	37
3.2 การสร้างแบบจำลอง.....	38
3.2.1 การเขียนแบบอีโคโนไมเซอร์ (drawing) .....	39
3.2.2 การสร้างกริด (grid generation).....	40
3.2.3 การเลือกแบบจำลองการคำนวณในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Modeling) .....	41
3.2.4 การตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริด (grid independence) .....	43
3.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model validation) .....	43
3.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ต่อการสีกกร่อนและการกัดกร่อน.....	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	47
4.1 ผลการตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริด .....	48
4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	49
4.2.1 อุทกพลศาสตร์ของไหลภายในอีโคโนไมเซอร์ (hydrodynamic behaviors) .....	51
4.2.2 การถ่ายโอนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ (heat transfer behaviors).....	58
4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ และทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสีกกร่อน และการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน .....	63
4.3.1 การศึกษาการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน.....	63
4.3.2 การศึกษาการกัดกร่อนจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์.....	70
4.3.3 การศึกษาการสีกกร่อนแบบขัดสีทางด้านเปลวไฟ.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	81

5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	91



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวและจุดยูเทคติกของสารประกอบแต่ละชนิดในถ้ำจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	16
ตารางที่ 3.1 สภาวะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน.....	36
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลคุณสมบัติของสารภายในระบบ.....	38
ตารางที่ 3.3 แบบจำลองการคำนวณสำหรับการพิจารณาอุทกพลศาสตร์ของไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน.....	42
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรดำเนินการในกรณีศึกษาต่าง ๆ .....	44
ตารางที่ 4.1 ความแตกต่างของผลการจำลองด้วยการสร้างกริดด้วยเซลล์ขนาดต่าง ๆ .....	48
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณอัตราการใช้พลังงานของภูมิภาคต่าง ๆ ในแต่ละกรณี .....	52
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิปลายของภูมิภาคต่าง ๆ ในแต่ละกรณี .....	58
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่ำสุดกับชั้นท่อน้ำตามระดับความสูงอีโคโนไมเซอร์ .....	66
ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันในแต่ละกรณี.....	69
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดกับชั้นท่อน้ำตามระดับความสูงอีโคโนไมเซอร์.....	71
ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนจากการเหนียวของสารประกอบคลอไรด์ในแต่ละกรณี.....	72
ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดบริเวณผนังท่อกับชั้นท่อน้ำตามระดับความสูงอีโคโนไมเซอร์.....	75
ตารางที่ 4.9 ผลการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการเร่งการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมในแต่ละกรณี.....	76
ตารางที่ 4.10 ผลการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนแบบขัดสีทางด้านเปลวไฟในแต่ละกรณี.....	79

## สารบัญรูป

### หน้า

รูปที่ 2.1 ภาพรวมขององค์ประกอบของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน (สีเทา) และตำแหน่งของอีโคโนไมเซอร์ที่สนใจในงานวิจัยนี้ (สีเขียว).....	7
รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงฟลูอิด์เบดแบบต่าง ๆ.....	9
รูปที่ 2.3 แนวโน้มอุณหภูมิของตัวกลางความร้อนตามทิศทางการไหลในรูปแบบการไหลสวนทาง... ..	10
รูปที่ 2.4 กลไกการสะสมเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน .....	12
รูปที่ 2.5 กลไกการถ่ายโอนแก๊สคลอรีนสู่ผิวโลหะรูปแบบต่าง ๆ โดยการกีดกันจากการเกิดออกซิเดชันและการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์ .....	15
รูปที่ 2.6 แผนผังกระบวนการคำนวณความดันและความเร็วร่วมกันแบบ SIMPLE ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม .....	20
รูปที่ 2.7 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกีดกันกับอุณหภูมิโลหะในหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงชีวมวลและขยะ .....	30
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเถ้ากับความหนาของชั้นกีดกันต่อเวลา.....	32
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับความเร็วกระแสแตกบนผิวโลหะเหล็กคาร์บอนที่อุณหภูมิ 303 K 573 K และ 873 K.....	33
รูปที่ 3.1 โครงสร้างด้านข้างของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน .....	35
รูปที่ 3.2 ระบายสมมาตรของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์.....	39
รูปที่ 3.3 แบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ที่ได้จากการวาดรูป.....	40
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างภาพถ่ายด้านข้างของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ แสดงบริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้และเถ้า (สีเทา) บริเวณการไหลของน้ำป้อน (สีฟ้า) และ บริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (สีเขียว) .....	40
รูปที่ 3.5 การสร้างกริดของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ .....	41
รูปที่ 4.1 การกำหนดระดับชั้นท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการวิเคราะห์.....	47

รูปที่ 4.2 ผลการคำนวณวนซ้ำแต่ละครั้งของอุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้ในกรณีพื้นฐาน.....	49
รูปที่ 4.3 ผลการคำนวณวนซ้ำแต่ละครั้งของอุณหภูมิปลายของน้ำป้อนในกรณีพื้นฐาน.....	50
รูปที่ 4.4 การกระจายของความเร็วของวงภาคแก๊สเผาไหม้ภายในแบบจำลอง.....	53
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ความเร็วแก๊สเผาไหม้กับความเร็วเข้าบริเวณพื้นที่หน้าตัดการไหลของ แก๊สเผาไหม้ตามระดับชั้นท่อน้ำของอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน.....	54
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสะสมเถ้าเฉลี่ยกับตำแหน่งบนผิวท่อน้ำตามระดับชั้น ท่อน้ำของอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน.....	55
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการสะสมเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากภาพด้านตัดขวางท่อ.....	56
รูปที่ 4.8 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของเถ้าบนผิวท่อ 1) กรณีไม่มีชั้นสะสมเถ้าบนผิวท่อ 2) กรณีมีชั้น สะสมเถ้าบนผิวท่อด้านด้านลม และ 3) กรณีมีชั้นสะสมเถ้าบนผิวท่อด้านใต้ลม.....	57
รูปที่ 4.9 การกระจายของอุณหภูมิของวงภาคแก๊สเผาไหม้ภายในแบบจำลอง.....	59
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้กับอุณหภูมิผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนตามระดับชั้น ท่อน้ำของอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน.....	60
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับระดับชั้นท่อน้ำตามความสูงอีโคโนไมเซอร์.....	62
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้กับระดับชั้นท่อน้ำตามความสูงอีโคโนไมเซอร์.....	62
รูปที่ 4.13 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้กับน้ำป้อนในแต่ละชั้นท่อน้ำในแต่ละกรณี.....	63
รูปที่ 4.14 การกระจายของอุณหภูมิในบริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้ บริเวณการไหลของ น้ำป้อนเข้า และ บริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ระดับชั้นที่ 1 และ 2 ในกรณีพื้นฐาน.....	65
รูปที่ 4.15 การกระจายของอุณหภูมิในท่อระดับชั้นที่ 1 ในกรณีพื้นฐาน.....	66
รูปที่ 4.16 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหล ป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่ออุณหภูมิต่ำสุดของผนังท่อในแต่ละกรณี.....	68
รูปที่ 4.17 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหล ป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อพื้นที่เสี่ยงในการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันใน แต่ละกรณี.....	69
รูปที่ 4.18 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหล ป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดในแต่ละกรณี.....	73

- รูปที่ 4.19 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหล  
ป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อพื้นที่เสี่ยงต่อการกักต่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบ  
คลอไรด์ในแต่ละกรณี ..... 73
- รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหล  
ป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่ออุณหภูมิสูงสุดบนผิวท่อระดับชั้นที่ 1 ในแต่ละกรณี ..... 76
- รูปที่ 4.21 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหล  
ป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อพื้นที่เสี่ยงต่อการกักต่อนเนื่องจากเกลือหลอมบนผิวท่อระดับชั้นที่ 1  
ในแต่ละกรณี ..... 77
- รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเข้าสูงสุดกับชั้นท่อน้ำตามระดับความสูงอีโคโนไมเซอร์  
ในแต่ละกรณี ..... 79
- รูปที่ 4.23 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของภูมิภาคเข้าบริเวณใกล้เคียงกับระดับชั้นท่อที่ 18 ในกรณีพื้นฐาน  
..... 80
- รูปที่ 4.24 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหล  
ป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อความเร็วเข้าสูงสุดในแต่ละกรณี ..... 80

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อไอน้ำฟลูอิดไคต์เบดแบบหมุนเวียนใช้ระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อการผลิตพลังงานสะอาดจากเชื้อเพลิงหลากหลายชนิด เช่น เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูง เชื้อเพลิงถ่านหินที่มีค่าความร้อนต่ำ โดยอาศัยการทำงานภายใต้สภาวะฟลูอิดเซชัน ซึ่งช่วยการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศและช่วยการกระจายความร้อน นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่หลีกเลี่ยงจากการเผาไหม้และวัสดุเบดที่เป็นตัวกลางนำความร้อนจะถูกแยกออกจากแก๊สเผาไหม้และวนกลับเข้าห้องเผาไหม้ใหม่ได้ด้วยไซโคลน และส่วนเชื่อมต่อบริเวณดาวเนอร์กับไโรเซอร์ ส่วนแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงจะถ่ายโอนความร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตไอน้ำและอากาศอุณหภูมิสูง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อไอน้ำฟลูอิดไคต์เบดแบบหมุนเวียน อาทิ เช่น ซุปเปอร์ฮีทเทอร์ รีฮีทเทอร์ อีโคโนไมเซอร์ ทำงานร่วมกับแก๊สเผาไหม้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง จึงต้องเผชิญกับสภาวะการทำงานที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การกัดกร่อนด้วยกลไกทางเคมี การสึกกร่อนโดยกลไกทางกายภาพ ซึ่งกลไกทางกายภาพนี้ขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของของไหลและลักษณะของอนุภาคของแข็งในระบบเป็นหลักการสึกกร่อนโดยกลไกทางกายภาพเกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างอนุภาคเถ้าลอยกับผิวท่อ ซึ่งจะทำให้ฟิล์มออกไซด์ที่ฉาบบนผิวท่อเพื่อป้องกันการกัดกร่อนบนผิวท่อจะถูกทำลายและสูญเสียเนื้อวัสดุบนผิวท่อได้ โดยบริเวณที่ฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายจะเกิดการกัดกร่อนด้วยกลไกทางเคมีรุนแรงมากกว่าบริเวณที่มีฟิล์มออกไซด์ป้องกันการกัดกร่อนปกคลุม นอกจากนี้การทำงานของหม้อไอน้ำซึ่งใช้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบคลอรีนสูงจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนด้วยคลอรีนที่อุณหภูมิสูงได้ โดยการกัดกร่อนนี้จะเกิดขึ้นร่วมกับการสะสมของเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากโลหะแอลคาไลน์ในอนุภาคเถ้าสามารถทำปฏิกิริยากับฟิล์มออกไซด์ป้องกันการกัดกร่อนบนผิวท่อทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ป้องกันการกัดกร่อนบนผิวท่อถูกทำลาย ซึ่งจะส่งเสริมให้แก๊สคลอรีนแพร่ไปยังเนื้อโลหะและทำปฏิกิริยาร่วมกับเหล็กและออกซิเจนก่อให้เกิดชั้นตะกอนออกไซด์และจะทำให้สูญเสียเนื้อโลหะบนผิวท่อมากขึ้น นอกจากนี้การทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ลดลง เมื่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะทำให้แก๊สควบแน่นเป็นของเหลวและกัดกร่อนผิวท่อได้เช่นกัน การสึกกร่อนและการกัดกร่อนก่อให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อไอน้ำและทำให้สูญเสียรายได้เนื่องจากต้องหยุดเดินเครื่องเพื่อทำการบำรุงรักษาและเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม งานวิจัยนี้มี

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาความเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรดำเนินการกับการเกิดการสึกกร่อนและการกัดกร่อนตลอดจนพื้นที่เสี่ยงต่อความเสียหายของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนภายใต้สภาวะการทำงานแบบต่าง ๆ โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะได้รับการจำลองกระบวนการโดยใช้วิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ผ่านการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ได้จากกระบวนการจริง การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายในประเด็นข้างต้นจะเป็นข้อมูลอีกส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์วางแผนซ่อมแซมและหลีกเลี่ยงการทำงานในสภาวะที่ก่อให้เกิดความเสียหายได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายในอีโคโนไมเซอร์ เพื่อทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อความเสียหายของอุปกรณ์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จำลองอุทกพลศาสตร์ภายในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน
3. วิเคราะห์และทำความเข้าใจถึงกลไกการสึกกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน
4. ทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนในสภาวะการทำงานต่าง ๆ

## 1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย

การจำลองจะพิจารณาการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ในสภาวะการไหลคงตัว (Steady state) แบบจำลองอีโคโนไมเซอร์จะเป็นแบบจำลองสามมิติร่วมกับระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) การจำลองไม่พิจารณาปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในอีโคโนไมเซอร์ รวมถึงไม่พิจารณาผลของความบกพร่องในการเชื่อม การขีด และ การเคลือบสเปรย์ปกป้องพื้นผิวท่อ แลกเปลี่ยนความร้อนต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อน โดยพิจารณาท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมี



ลักษณะเป็นผิวเรียบและเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous material) การพิจารณาลักษณะ  
 แก๊สลอยจะเป็นรูปแบบทรงกลมและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากันทุกอนุภาค นอกจากนี้ในงานวิจัย  
 นี้จะศึกษาผลของแก๊สเผาไหม้และแก๊สต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนบนผิวด้านนอกของท่อ  
 แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้น การสึกกร่อน การกัดกร่อน และ การเกิดตะกันภายในท่อแลกเปลี่ยน  
 ความร้อนจะไม่ถูกพิจารณาเป็นผลต่ออุทกพลศาสตร์ของไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนบนผิวท่อ  
 แลกเปลี่ยนความร้อนของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์

### 1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย

อัตราการสึกกร่อน อัตราการกัดกร่อน อีโคโนไมเซอร์ หม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดหมุนเวียน  
 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบ  
 หมุนเวียนซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนของอีโคโนไมเซอร์และได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการ  
 ต่าง ๆ กับการสึกกร่อนและการกัดกร่อนที่จะนำไปใช้ในการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและ  
 การกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ในสภาวะการทำงานแบบต่าง ๆ

### 1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การสึกกร่อนและการกัดกร่อนใน  
 อีโคโนไมเซอร์
2. สร้างแบบจำลองและจำลองพลศาสตร์ของไหลภายในอีโคโนไมเซอร์ระหว่างแก๊สเผาไหม้กับ  
 น้ำซึ่งอยู่ในส่วนหลังของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เพื่อปรับอุณหภูมิน้ำสำหรับ  
 การผลิตไอน้ำ โดยข้อมูลโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์ที่ศึกษาอ้างอิงจากข้อมูลของ  
 บริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด และเปรียบเทียบผลการจำลองกับ  
 ผลการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนจากอุณหภูมิ  
 แก๊สเผาไหม้ขาออก
3. วางแผนและออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบสองระดับ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อ  
 ลักษณะการกระจายการสะสมของเถ้า ความหนาชั้นสะสมเถ้า อัตราการสึกกร่อน และ  
 อัตราการกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดย  
 ตัวแปรต้นเป็นตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำ  
 ป้อนเข้า และ อัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า

4. ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้ เพื่อเก็บข้อมูลลักษณะการกระจายของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ ความเร็วของอนุภาคเถ้า ความเค้นเฉือนที่ผนัง และ ลักษณะการกระจายการสะสมของแก๊สเผาไหม้ต่าง ๆ และ เถ้า
5. วิเคราะห์ผลจากการจำลองและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ข้างต้นกับผลการทดลองที่ใช้ในการศึกษาความหนาชั้นสะสมเถ้า อัตราการสึกกร่อน และ อัตราการกัดกร่อนในอุปกรณ์ที่ศึกษา และ ทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์ในสภาวะการทำงานแบบต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ กับการสึกกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน
6. สรุปผลการทดลอง อภิปราย และจัดเตรียมวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

### 1.8 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยจะประกอบด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

- บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย
- บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหม้อไอน้ำฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน อีโคโนไมเซอร์ ฟลูอิดไชน์เบดแบบสองวัฏภาค ฟลูอิดไชน์เบดแบบเบาบาง การถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลสวนทาง กลไกการสึกกร่อนและการกัดกร่อน และ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
- บทที่ 3 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น การสร้างแบบจำลอง และ การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อน
- บทที่ 4 ผลการตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริด การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง พลศาสตร์ของไหลภายในอีโคโนไมเซอร์ การถ่ายโอนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ และ การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ และ ทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน
- บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ระบบหม้อไอน้ำทั่วไป ประกอบด้วย ตัวหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ ระบบเชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงาน ความร้อนสู่ไอน้ำ ระบบปรับสภาพน้ำและระบบป้อนน้ำสำหรับการผลิตไอน้ำเพื่อลดความเสียหายของอุปกรณ์จากสิ่งสกปรกจากน้ำ ระบบการใช้ไอน้ำเพื่อการนำไอน้ำไปใช้ประโยชน์และการนำไอน้ำที่กลั่นตัวกลับเข้าสู่หม้อไอน้ำ ระบบประหยัดพลังงานเพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนจากแก๊สเผาไหม้ เช่น อิโคโนไมเซอร์ เครื่องอุ่นอากาศ ระบบกำจัดมลพิษทางอากาศเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ไสโคลอน เครื่องจับอนุภาค และ ระบบลมช่วยการเผาไหม้และปล่องไฟเพื่อป้อนอากาศสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงและการปล่อยแก๊สเผาไหม้ที่เกิดขึ้นออกสู่บรรยากาศ ข้อควรระวังสำหรับการทำงานของหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรม เช่น การทำงานของห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้กับน้ำรับความร้อนในท่อ การทำงานของห้องเผาไหม้ อุณหภูมิสูงจะเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดและมีค่ามากกว่าอุณหภูมิไหลของเหล็ก จึงต้องมีน้ำรับความร้อนจากเหล็กอย่างเพียงพอ เพื่อป้องกันการหลอมละลายของเหล็กและความเสียหายของหม้อไอน้ำ นอกจากนี้การเกิดตะกรันหรือมีเขม่าเกาะบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ท่อน้ำหรือซูเปอร์ฮีทเทอร์สกปรก และส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงกับไอน้ำลดลง ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะอุณหภูมิสูงเกินไปทำให้โครงสร้างวัสดุของท่อเหล็กแลกเปลี่ยนความร้อนเสียหายได้ [1]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 2.1.1 หม้อไอน้ำฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed boiler)

##### 2.1.1.1 องค์ประกอบของหม้อไอน้ำฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียน

หม้อไอน้ำฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียนประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ส่วนการไหลเวียนของวัสดุนำความร้อน (circulating loop) และ 2) ส่วนหลังหรือส่วนการพาความร้อน (back-pass หรือ convection section)

1. ส่วนการไหลเวียนของวัสดุนำความร้อน (circulating loop) ของหม้อไอน้ำฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียน

ส่วนการไหลเวียนของวัสดุนำความร้อนจะประกอบด้วย ห้องเผาไหม้ (furnace) และไซโคลน (cyclone) ดังรูปที่ 2.1 บริเวณห้องเผาไหม้จะมีการฉีดอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ การผสมและเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ดีในสภาวะฟลูอิดิซ์เบด ซึ่งในบริเวณนี้

จะเกิดความปั่นป่วนสูงของแก๊สและวัสดุนำความร้อนและเป็นส่วนที่มีเบตหนาแน่น ห้องเผาไหม้จะถูก ล้อมรอบด้วยวัสดุทนไฟเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง บริเวณที่สูงขึ้นจากบริเวณที่ มีเบตหนาแน่นจะมีการป้อนอากาศทุติยภูมิเพื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ใน ส่วนแรก ซึ่งในบริเวณนี้ความหนาแน่นเบตจะลดลงตามความสูง การเผาไหม้เชื้อเพลิงภายใน ห้องเผาไหม้จะทำให้ได้พลังงานความร้อนสูง ในส่วนของห้องเผาไหม้จึงหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน และมีแผงท่อน้ำที่ผนังของห้องเผาไหม้ (water wall) ใช้ในการรับความร้อนจากแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิ สูง เพื่อลดการสูญเสียของพลังงานความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม จากนั้นแก๊สเผาไหม้ วัสดุนำความร้อนและ อนุภาคของแข็งที่เหลือจากการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ส่วนของไซโคลนที่ทางออกของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะ เกิดการแยกอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ เช่น วัสดุนำความร้อน เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ ออกจากแก๊สเผาไหม้ ออกจากอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก เช่น เถ้าลอย โดยเชื้อเพลิงที่เหลือจาก การเผาไหม้จะวนกลับสู่ห้องเผาไหม้ ส่วนแก๊สเผาไหม้และเถ้าลอยจะเข้าสู่ส่วนหลังหรือ ส่วนการพาความร้อนของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียน

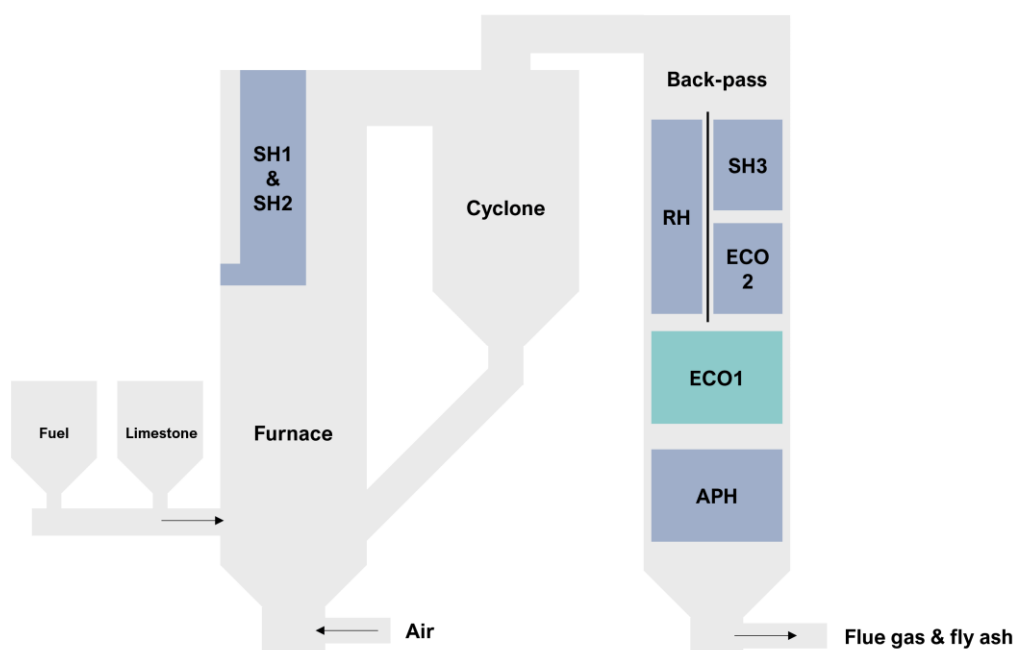
## 2. ส่วนหลังของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียน (back-pass หรือ convection section)

ส่วนหลังของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียนมีหน้าที่ในการรับความร้อนจากแก๊สเผาไหม้ อุณหภูมิสูงเพื่อผลิตไอน้ำและนำพลังงานร้อนที่เหลือจากแก๊สเผาไหม้กลับเข้ามาใช้ในระบบให้เกิด ประโยชน์สูงสุด โดยภายในส่วนหลังของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียนจะประกอบด้วย ซุปเปอร์ฮีทเตอร์ (superheater, SH) รีฮีทเตอร์ (reheater, RH) อีโคโนไมเซอร์ (economizer, ECO) และ เครื่องอุ่นอากาศ (air preheater, APH) ดังรูปที่ 2.1 การทำงานของอีโคโนไมเซอร์จะใช้ น้ำป้อนเข้าระบบเพื่อลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ โดยน้ำที่รับความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็น ประโยชน์ต่อการผลิตไอน้ำต่อไป ขณะที่การทำงานของเครื่องอุ่นอากาศจะมีหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับ อากาศสำหรับนำไปใช้ในการป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยดึงความร้อนที่เหลือจากแก๊สเผาไหม้กลับเข้าสู่ ระบบหม้อไอน้ำ ดังนั้น ในส่วนหลังของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียน แก๊สเผาไหม้จะถูกลด อุณหภูมิลงจนถึงค่าที่กำหนดก่อนจะเข้าสู่ระบบบำบัดแก๊สเผาไหม้ อันได้แก่ ระบบการดักจับฝุ่น ระบบการดักจับแก๊สเรือนกระจก ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม หรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป [2]

### 2.1.1.2 ข้อดีและข้อเสียของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียน

ข้อดีของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียนเปรียบเทียบกับหม้อไอน้ำทั่วไป ได้แก่ การเผาไหม้ ของของแข็งด้วยหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียนจะเกิดการเผาไหม้และการถ่ายโอนความร้อน ได้ดี เนื่องจากของแข็งจะสัมผัสกับแก๊สได้ดีกว่าในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบต อนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ที่ เหลือจากการเผาไหม้สามารถวนกลับเข้าสู่เตาเผาได้ด้วยการแยกอนุภาคของแข็งของไซโคลนก่อน การแลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สเผาไหม้และอนุภาคของแข็งขนาดเล็กในส่วนหลังของหม้อไอน้ำ

ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนจะช่วยลดการสะสมของเถ้าและการหลอมของเถ้าในระบบ ประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนจึงมีเสถียรภาพ [1] นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนสามารถทำงานร่วมกับเชื้อเพลิงหลากหลายชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทำงานร่วมกับสารดูดซับแคลเซียมคาร์บอเนตในหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนช่วยกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีกว่าหม้อไอน้ำทั่วไป เนื่องจากมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในห้องเผาไหม้เพียงพอ และเกิดกลุ่มแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ต่ำ โดยการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำและการแบ่งช่วงการป้อนอากาศสำหรับการเผาไหม้ภายในหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน [2] แต่อย่างไรก็ตาม หม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนจะมีขนาดใหญ่และราคาแพงกว่าหม้อไอน้ำทั่วไป เนื่องจากหม้อไอน้ำประเภทนี้ประกอบด้วยไซโคลน และการออกแบบและควบคุมการทำงานของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนจะมีความซับซ้อนมากขึ้น [1]



รูปที่ 2.1 ภาพรวมขององค์ประกอบของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน (สีเทา) และตำแหน่งของอีโคโนไมเซอร์ที่สนใจในงานวิจัยนี้ (สีเขียว) โดยบริษัท อินทีเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด

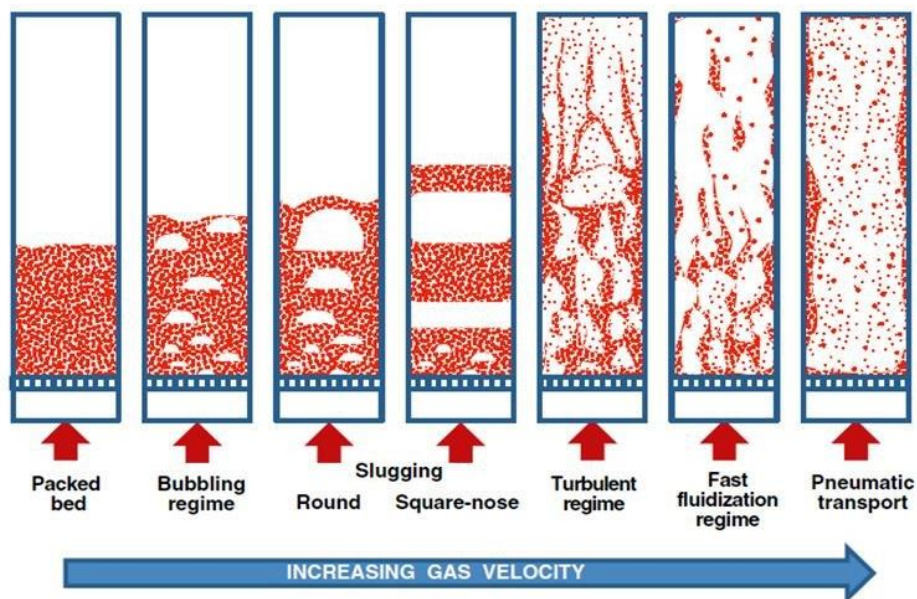
### 2.1.2 อีโคโนไมเซอร์ (Economizer)

อีโคโนไมเซอร์เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเป็นหนึ่งในหน่วยประหยัดพลังงานของหม้อไอน้ำ เพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการปล่อยแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงออกจากหม้อไอน้ำและมีส่วนช่วยเพิ่มอุณหภูมิน้ำรับความร้อนสำหรับการผลิตไอน้ำในกระบวนการการผลิต

ต่อไป อีโคโนไมเซอร์มีหน้าที่รับความร้อนที่เหลือจากแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงด้วยน้ำอุณหภูมิต่ำ โดยส่วนใหญ่อีโคโนไมเซอร์จะอาศัยการถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลสวนทาง การนำพลังงานจากแก๊สเผาไหม้ส่วนปลายกลับเข้าสู่ระบบจะอาศัยหลักการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากแรงขับเคลื่อนต่างระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับน้ำรับความร้อน เมื่อแก๊สเผาไหม้และน้ำรับความร้อนไหลผ่านอีโคโนไมเซอร์ ความร้อนจากแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิจะถ่ายโอนไปยังน้ำรับความร้อน ทำให้อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ต่ำลงและอุณหภูมิน้ำรับความร้อนสูงขึ้น การทำงานของอีโคโนไมเซอร์ร่วมกับแก๊สเผาไหม้จึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับช่วงอุณหภูมิการทำงานของแก๊สเผาไหม้กับตัวกลางรับความร้อน เนื่องจากแก๊สเผาไหม้ประกอบด้วยแก๊สที่มีฤทธิ์กัดกร่อนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ การลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จึงไม่ควรลดต่ำกว่าอุณหภูมิควบแน่นของแก๊สดังกล่าว [1] นอกจากนี้อนุภาคเถ้าลอยขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงโดยแก๊สเผาไหม้เป็นแก๊สตัวพา (carrier) เข้าสู่เครื่องอีโคโนไมเซอร์ในช่วงการไหลฟลูอิดิเซชันแบบเบาบาง (pneumatic transport fluidized bed) การชนของอนุภาคเถ้าลอยบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยความเร็วสูงภายในอีโคโนไมเซอร์จะทำให้พื้นผิวท่อเสี่ยงต่อการสึกกร่อนบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้อีกด้วย [3]

### 2.1.3 ฟลูอิดิเซชัน (fluidization)

กระบวนการฟลูอิดิเซชันสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบสองวัฏภาคและสามวัฏภาค อาทิ กระบวนการฟลูอิดิเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง กระบวนการฟลูอิดิเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง และ กระบวนการฟลูอิดิเซชันแบบแก๊ส-ของเหลว-ของแข็ง โดยกระบวนการฟลูอิดิเซชันจะเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมการไหลคล้ายของไหล เปรียบเทียบถึงกลุ่มก้อนของอนุภาคของแข็งที่ถูกบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ โดยผิวหน้าของเบดจะคล้ายผิวหน้าของเหลวซึ่งขนานกับระดับพื้นโลกเสมอ อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ออกจากกรูที่เจาะข้างเครื่องปฏิกรณ์ กระบวนการฟลูอิดิเซชันจะมีส่วนช่วยให้เกิดการสัมผัสและผสมระหว่างแก๊สหรือของเหลวกับของแข็งได้ดี ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและการถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์สม่ำเสมอ พฤติกรรมการไหลของอนุภาคของแข็งในกระบวนการฟลูอิดิเซชันจะขึ้นอยู่กับช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชัน เช่น ฟลูอิดิเซชันแบบเบดนิ่ง ฟลูอิดิเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิดิเซชันแบบปั่นป่วน ฟลูอิดิเซชันแบบความเร็วสูง และ ฟลูอิดิเซชันแบบเบาบาง โดยการทำงานของกระบวนการฟลูอิดิเซชันในแต่ละช่วงการไหลจะมีตัวกำหนดเป็นความเร็วของของไหล ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหลและอนุภาคของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงฟลูอิด์เบดแบบต่าง ๆ [4]

#### 2.1.3.1 กระบวนการฟลูอิด์เซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง (gas-solid fluidization)

กระบวนการฟลูอิด์เซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง (gas-solid fluidization) เป็นหนึ่งในการเกิดฟลูอิด์เซชันแบบสองวัฏภาค (two-phase fluidization) ระหว่างแก๊สกับของแข็ง การเคลื่อนที่ของของแข็งจะเป็นไปอย่างขรุขระไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous fluidization) แก๊สจะทำหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา ช่วยให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งและแก๊สบางส่วนจะก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สภายในระบบ

#### 2.1.3.2 ฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง (pneumatic transport fluidized bed)

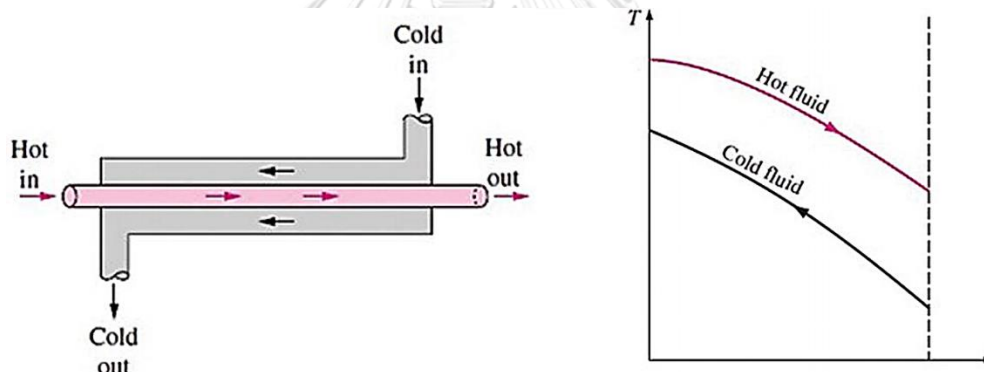
ในช่วงการไหลของฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง อนุภาคของแข็งทั้งหมดที่ป้อนเข้าจะถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ทั้งหมดด้วยแก๊สตัวพาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อรูปแบบการไหลของอนุภาคของแข็งประกอบด้วยของไหลเป็นส่วนใหญ่และอนุภาคของแข็งในปริมาณน้อยมาก และความเร็วของไหลป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำที่สุดที่จะทำให้เกิดการขนส่งอนุภาคของแข็งในลักษณะฟลูอิด์เบดแบบเบาบางได้ ในกระบวนการเกิดฟลูอิด์เซชัน ความเร็วแก๊สจะมากกว่าความเร็วของอนุภาคของแข็งในบริเวณเดียวกันเสมอ สาเหตุเกิดจากความหนาแน่นของแก๊สและของแข็งต่างกันและแรงจากความเร็วยังของไหลที่กระทำในระบบ เมื่อการเกิดฟลูอิด์เซชันอยู่ในช่วงการไหลของฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง ความเร็วของของไหลกับของแข็งจะมีค่าใกล้เคียงกัน [5]

ดังนั้น การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับแก๊สเผาไหม้ผสมไถ่ลอยในหม้อไอน้ำ ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน แก๊สเผาไหม้จะเป็นแก๊สตัวพาทำหน้าที่ขนส่งไถ่ลอยตามทิศทาง การไหลของแก๊สเผาไหม้ ซึ่งจะพบว่าความเร็วของไถ่ลอยจะใกล้เคียงกับความเร็วของแก๊สเผาไหม้

## 2.1.4 การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

### 2.1.4.1 การถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลสวนทาง (counter-current flow)

การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีรูปแบบการไหลสวนทาง เป็นที่นิยมในการออกแบบการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนมีค่าที่ไม่ขึ้นกับระยะทางของการไหล ซึ่งเป็นผลจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหล อุณหภูมิสูงกับของไหลอุณหภูมิต่ำสำหรับการไหลรูปแบบสวนทางจะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดแนว การเคลื่อนที่และรวมถึงปริมาณความร้อนถ่ายโอนระหว่างของไหลเมื่อระบบไม่เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แนวโน้มอุณหภูมิของตัวกลางความร้อนตามทิศทาง การไหลในรูปแบบการไหลสวนทาง [6]

### 2.1.4.2 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยรวม (overall heat transfer coefficient)

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยรวมเป็นตัวแปรหนึ่งที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้จากการพิจารณาถึงความต้านทานทางความร้อนของของไหลในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุท่อตัวกลางการถ่ายโอนความร้อน และ ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากการเกิดตะกรัน ซึ่งเป็นสิ่งสกปรกที่เกาะตามผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนลดลงตามระยะเวลาการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยรวมจะเป็นตัวแปรหนึ่งที่สะท้อนถึงพฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยน



ความร้อนได้ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.1) สำหรับการถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลสวนทาง [7]

$$Q = UA \left( \frac{((T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in}))}{\ln \left( \frac{(T_{h,in} - T_{c,out})}{(T_{h,out} - T_{c,in})} \right)} \right) \quad (2.1)$$

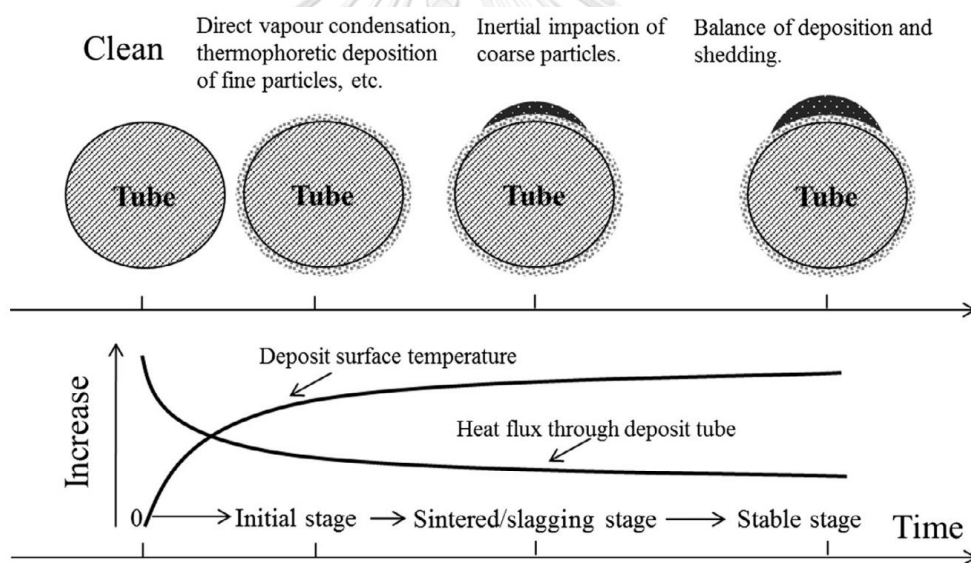
เมื่อ	Q	คือ	พลังงานความร้อน (W)
	U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยรวม (W/m <sup>2</sup> ·K)
	A	คือ	พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m <sup>2</sup> )
	T <sub>h,in</sub>	คือ	อุณหภูมิป้อนเข้าของของไหลอุณหภูมิสูง (K)
	T <sub>c,in</sub>	คือ	อุณหภูมิป้อนเข้าของของไหลอุณหภูมิต่ำ (K)
	T <sub>h,out</sub>	คือ	อุณหภูมิปลายของของไหลอุณหภูมิสูง (K)
	T <sub>c,out</sub>	คือ	อุณหภูมิปลายของของไหลอุณหภูมิต่ำ (K)

### 2.1.5 กลไกการสะสมเถ้า (ash deposition)

การสะสมเถ้าบนพื้นผิววัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนพื้นผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดจากการทำงานในระบบเผาไหม้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากเถ้ามีคุณสมบัติในการนำความร้อนต่ำ ความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนสูง และการสะสมของเถ้าบนผิวโลหะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อายุการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสั้นลงเนื่องจากการทำงานร่วมกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคเถ้าด้วยความเร็วสูงและการสะสมของเถ้าบนผิวโลหะทำให้เกิดการสึกกร่อนและการกัดกร่อนอย่างรุนแรงได้

กลไกการสะสมเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะขึ้นกับรูปแบบต่าง ๆ ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งรอบผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งด้วยการแพร่ (diffusion) และ การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งด้วยความเฉื่อย (inertia) ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งด้วยความเฉื่อยจะประกอบด้วยการชนกระแทก (inertia impaction) และการชนเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy impaction) ดังรูปที่ 2.4 [8] เมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำงานไประยะหนึ่ง ความหนาของชั้นเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลงจนกระทั่งถึงสภาวะคงตัว ความหนาของชั้นเถ้าและอัตราการถ่ายโอนความร้อนคงที่อยู่ในภาวะสมดุลระหว่างการสะสมเถ้าบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (deposition) กับการหลุดออกของอนุภาคเถ้าเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของของไหล (shedding)

ขนาดของอนุภาคเถ้าและอนุภาคน้ำมันในการทำงานในบริเวณต่าง ๆ จะเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้รูปแบบการสะสมและการยึดเกาะของอนุภาคเถ้าบนผิวท่อแตกต่างกัน ผลจากการลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้โดยอาศัยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อไอน้ำทำให้อุณหภูมิบริเวณผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิของกลุ่มแก๊สเผาไหม้ที่ไหลผ่าน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำและการควบแน่นของไอแอลคาไลน์เอิร์ธที่อยู่ในแก๊สเผาไหม้ในระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่ออุณหภูมิบริเวณผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดควบแน่นของไอน้ำหรือไอแอลคาไลน์เอิร์ธ การควบแน่นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในแก๊สเผาไหม้จะทำให้เกิดชั้นเถ้าและอนุภาคของแข็งที่ลอยมายึดเกาะเป็นกาวเหนียวและเกิดการสะสมเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้กับตัวกลางรับความร้อนต่ำลง ความดันลดของแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้น และการสะสมเถ้าบนผิวท่อเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนท่อเนื่องจากไอน้ำและสารประกอบแอลคาไลน์เอิร์ธ [2]



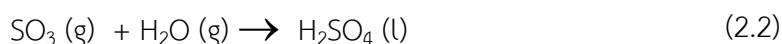
รูปที่ 2.4 กลไกการสะสมเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน [9]

## 2.1.6 กลไกการสึกกร่อน (erosion) และการกัดกร่อน (corrosion)

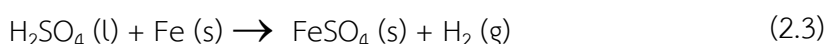
### 2.1.6.1 การกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน (fireside sulfuric acid corrosion)

เมื่อเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบจะสามารถเกิดการกัดกร่อนจากกรดกำมะถันได้ กำมะถันจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในการเผาไหม้ทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งบางส่วนสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอะตอมเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ได้ แก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นได้ เมื่ออุณหภูมิแก๊สต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของ

กรดกำมะถันจะทำให้แก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ทำปฏิกิริยากับความชื้นในแก๊สเผาไหม้เกิดเป็นกรดกำมะถัน ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



การควบแน่นของกรดกำมะถันบนผิวท่อเหล็กของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จะทำให้เกิดการเกาะของเถ้าเหนียวบนผิวท่อและกรดกำมะถันจะทำปฏิกิริยากับเหล็กจนท่อเหล็กเกิดความเสียหายได้ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



อีโคโนไมเซอร์จึงมีข้อจำกัดและต้องควบคุมช่วงอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้และน้ำรับความร้อนในการทำงานร่วมกับระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบให้ดี เพื่อป้องกันการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน การใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำ (water preheater) จะช่วยเพิ่มอุณหภูมิน้ำรับความร้อนก่อนเข้าเครื่องอีโคโนไมเซอร์จะทำให้การลดลงของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของกรดกำมะถัน โดยอุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของกรดกำมะถันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.4) [10] และ อีโคโนไมเซอร์จะไม่ควรทำงานในช่วงที่หม้อไอน้ำทำงานด้วยกำลังเดินเครื่องต่ำ หรือ หยุดเดินเครื่องบ่อย การทำงานของอีโคโนไมเซอร์ควรจะทำงานร่วมกับอุปกรณ์อุ่นน้ำรับความร้อน เพื่อยืดอายุการใช้งานของอีโคโนไมเซอร์ [1]

$$\begin{aligned} & \frac{1000}{T_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 273.15} \\ & = 1.784 + 0.027 \log(P_{\text{H}_2\text{O}}) - 0.103 \log(P_{\text{SO}_3}) \\ & \quad + 0.034 \log(P_{\text{H}_2\text{O}}) \log(P_{\text{SO}_3}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $T_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  คือ อุณหภูมิที่จุดหยดน้ำค้างของกรดกำมะถัน ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $P_{\text{H}_2\text{O}}$  คือ ความดันย่อยของไอน้ำ (atm)  
 $P_{\text{SO}_3}$  คือ ความดันย่อยของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (atm)

#### 2.1.6.2 การกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ (chloride – induced corrosion)

เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของโลหะแอลคาไลน์และคลอรีนสูง แก๊สเผาไหม้จะมีแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ ไอร์ระเหยของสารประกอบแอลคาไลน์คลอไรด์ และ สารประกอบของโลหะหนักคลอไรด์ เช่น สังกะสี (II) คลอไรด์ ตะกั่ว (II) คลอไรด์ เป็นองค์ประกอบที่มีฤทธิ์กัดกร่อนผิวท่อโลหะ [11] ดังนั้น การเผาไหม้ของชีวมวลอาจส่งผลให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนอุปกรณ์ภายในหม้อไอน้ำได้ เนื่องจากชีวมวลประกอบด้วยโลหะแอลคาไลน์ปริมาณสูง ซึ่งเป็นสาเหตุของ

การเกิดการหลอมของเบต การหลอมของแก้ว และ การสะสมตะกักรันบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้ นอกจากนี้สารประกอบคลอไรด์ปริมาณสูงจากการเผาไหม้ของชีวมวลจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวท่อโลหะได้อีกด้วย [2]

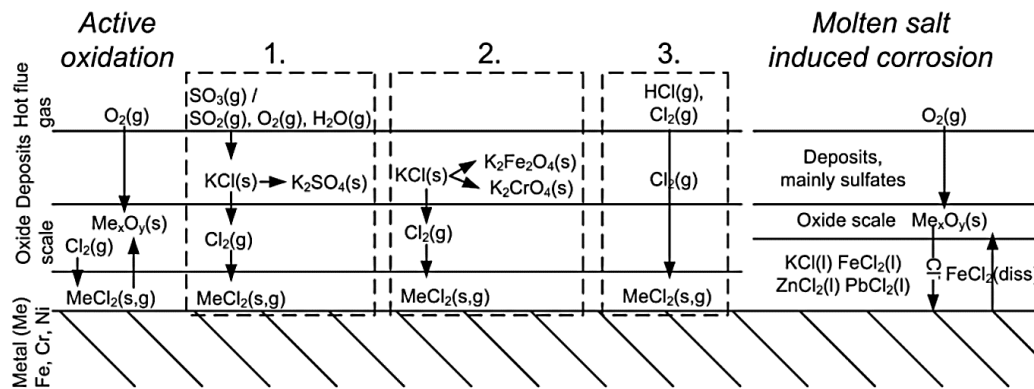
บริเวณเหนือผิวโลหะจะสามารถแบ่งออกได้เป็นชั้นผิวโลหะ ชั้นฟิล์มออกไซด์ ชั้นสะสมแก้ว และบริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้ เรียงจากชั้นในติดกับผิวโลหะสู่ชั้นนอกสุด ความเสียหายของผิวโลหะจะเกิดขึ้นในบริเวณชั้นการกัดกร่อนซึ่งจะอยู่ติดกับผิวโลหะ โดยปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้สูญเสียเนื้อวัสดุของท่อโลหะเนื่องจากแก๊สคลอรีนในบริเวณชั้นการกัดกร่อนจะสามารถแสดงได้ดังปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



เมื่อ M คือ เหล็ก โครเมียม และ นิกเกิล

กลไกการถ่ายโอนแก๊สคลอรีนสู่ผิวโลหะจะเกิดขึ้นในบริเวณเหนือผิวโลหะโดยการแพร่ของแก๊สคลอรีนและสารประกอบคลอไรด์ผ่านรูพรุนและรอยแตก และ กระบวนการเกิดคลอรีน (chlorination) ซึ่งเป็นกระบวนการที่จะช่วยในการขนส่งแก๊สคลอรีนเข้าใกล้ผิวโลหะจากการทำปฏิกิริยาของโลหะแอลคาไลน์คลอไรด์และโลหะคลอไรด์ทำให้เกิดแก๊สคลอรีนบริเวณชั้นสะสมแก้วและชั้นฟิล์มออกไซด์ ดังแสดงในตัวอย่างปฏิกิริยาที่ (2.6) ถึง ปฏิกิริยาที่ (2.10) แก๊สคลอรีนเหล่านั้นจะสามารถถูกขนส่งเข้าใกล้ผิวโลหะและเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็ก โครเมียม และ นิกเกิลบนผิวโลหะได้ดังตัวอย่างปฏิกิริยาที่ (2.5) และปฏิกิริยาที่ (2.11) จนเกิดการกัดกร่อนและความเสียหายของผิวเนื้อวัสดุของท่อโลหะอย่างรุนแรงได้ [12] ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในบริเวณเหนือผิวโลหะจนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การเกิดออกซิเดชัน (Active oxidation) และ การกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอม (Molten salt induced corrosion) ดังรูปที่ 2.5 [8] โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงาน เช่น อุณหภูมิ และ องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ แก้ว และ วัสดุท่อ

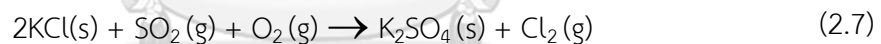
ความเสียหายของท่อโลหะอย่างรุนแรงเกิดจากการขนส่งไอออนเหล็กผ่านปฏิกิริยาต่าง ๆ ออกจากผิวท่อโลหะเข้าใกล้บริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้ที่มีความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนสูง ซึ่งจะทำให้โลหะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนได้ออกประกอบของชั้นฟิล์มออกไซด์และแก๊สคลอรีนมากขึ้นร่วมด้วยและทำให้แก๊สคลอรีนจะสามารถแพร่กระจายเข้าใกล้ทั้งบริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้และบริเวณผิวของท่อโลหะได้ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแก๊สคลอรีนและวัฏจักรการขนส่งแก๊สคลอรีนแพร่เข้าใกล้บริเวณผิวโลหะได้อย่างต่อเนื่อง [13]



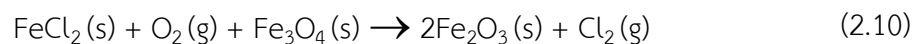
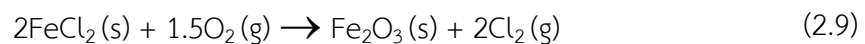
รูปที่ 2.5 กลไกการถ่ายโอนแก๊สคลอรีนสู่ผิวโลหะรูปแบบต่าง ๆ โดยการกัดกร่อนจากการเกิดออกซิเดชันและการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์ [8]

ตัวอย่าง การเกิดออกซิเดชันที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวท่อโลหะ เมื่อวัสดุท่อ ประกอบด้วย เหล็ก และ แก๊สเผาไหม้ ประกอบด้วย แก๊สออกซิเจน แก๊สโพแทสเซียมคลอไรด์ แก๊สโซเดียมคลอไรด์ แก๊สซิลเฟอร์ออกไซด์ แก๊สคลอรีน และ ไอ้ น้ำ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 1000°C [14] สามารถแสดงได้ ดังนี้

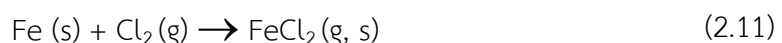
บริเวณชั้นสะสมแล้ว ได้แก่



บริเวณชั้นฟิล์มออกไซด์ ได้แก่

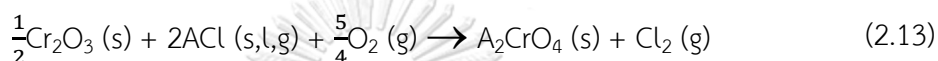
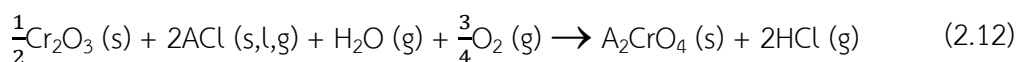


บริเวณชั้นการกัดกร่อน ได้แก่



จากตัวอย่างปฏิกิริยาที่ (2.8) ถึง ปฏิกิริยาที่ (2.9) นอกจากเหล็กที่จะทำปฏิกิริยากับคลอรีนทำให้ผิวท่อเสียหายได้แล้ว โครเมียมและนิกเกิลจะสามารถทำปฏิกิริยาได้เช่นกัน ทำให้องค์ประกอบของชั้นฟิล์มออกไซด์ จะประกอบด้วย โครเมียม (III) ออกไซด์ (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) นิกเกิล (II) ออกไซด์ (NiO)

เฮมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และ แมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) โดยชั้นฟิล์มออกไซด์หนาแน่นที่เกิดขึ้นดังตัวอย่าง ปฏิกิริยาการกัดกร่อนข้างต้นจะเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อความต้านทานต่อการกัดกร่อนบนผิวท่อ โลหะในสภาวะอุณหภูมิสูง ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นชั้นปกคลุมท่ออย่างหนาแน่นจะมีส่วนช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนจากการสัมผัสระหว่างแก๊สกับผิวท่อโลหะได้ดี ในสิ่งแวดล้อมที่มีองค์ประกอบของคลอรีนและสารประกอบคลอไรด์สูงจะเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบคลอไรด์ การสะสมตะกรัน และการทำลายชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวท่อมากขึ้นด้วยเช่นกัน [12] ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



เมื่อ A คือ โซเดียม และ โพแทสเซียม

การทำปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบของชั้นฟิล์มออกไซด์กับ สารประกอบของโลหะแอลคาไลน์คลอไรด์ จะทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายและยังผลิตกรดไฮโดรคลอริกและแก๊สคลอรีนที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งกรดไฮโดรคลอริกและแก๊สคลอรีนจะสามารถแพร่ผ่านชั้นเถ้าและทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผิวโลหะได้มากขึ้น นอกจากการกัดกร่อนในสถานะแก๊สแล้ว สารประกอบของคลอไรด์ยังสามารถกระตุ้นการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมได้โดยการสร้างสารประกอบยูเทคติกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น สารประกอบยูเทคติกของเหล็ก (II) คลอไรด์และโพแทสเซียมคลอไรด์ สารประกอบยูเทคติกของสังกะสี (II) คลอไรด์และโพแทสเซียมคลอไรด์ ซึ่งจะอยู่ในช่วง  $150\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$  ดังตารางที่ 2.1 การกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมจะเพิ่มอัตราการกัดกร่อนบนผิวโลหะเร็วมากขึ้น เนื่องจากไอออนเคลื่อนที่ในวัฏภาคของเหลวได้ดีมากกว่าในวัฏภาคของแข็ง ดังนั้นการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมจะส่งผลให้เกิดความเสียหายของท่อโลหะได้เร็วมากขึ้น [15]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวและจุดยูเทคติกของสารประกอบแต่ละชนิดในเถ้าจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล [16-18]

สารประกอบ	อุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว ( $^\circ\text{C}$ )	สารประกอบยูเทคติก	อุณหภูมิที่จุดยูเทคติก ( $^\circ\text{C}$ )
$\text{K}_2\text{SO}_4$	1076	$\text{KCl-CrCl}_2$	462
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	884	$\text{NaCl-CrCl}_2$	437
$\text{CrCl}_2$	821	$\text{K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4\text{-ZnSO}_4$	388
$\text{NaCl}$	801	$\text{NaCl-FeCl}_2$	370

สารประกอบ	อุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว (°C)	สารประกอบยูเทคติก	อุณหภูมิที่จุดยูเทคติก (°C)
KCl	775	KCl-FeCl <sub>2</sub>	355
ZnSO <sub>4</sub>	730	NaCl-ZnCl <sub>2</sub>	262
FeCl <sub>2</sub>	673	KCl-ZnCl <sub>2</sub>	230
FeCl <sub>3</sub>	310	KCl-FeCl <sub>3</sub>	202
ZnCl <sub>2</sub>	283	NaCl-FeCl <sub>3</sub>	151

### 2.1.6.3 การสึกกร่อนแบบขัดสีทางด้านเปลวไฟ (fire side abrasive erosion)

การกัดกร่อนภายนอกท่อเนื่องจากการถูกขัดสีโดยเถ้าและของแข็งจนทำให้โครงสร้างท่อน้ำเสียหาย ซึ่งอนุภาคของแข็งที่มีส่วนประกอบเป็นธาตุซิลิกาสูง เช่น ทราย หรือ ชี้เถ้าจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบ จะทำให้เกิดการขัดสีอย่างรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขัดสีด้วยทรายและชี้เถ้าในส่วนของกันตาของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบด การตรวจสอบความหนาของท่ออย่างสม่ำเสมอเมื่อหม้อไอน้ำหยุดเดินเครื่อง และ การใช้ท่อน้ำแบบครีบ (finned tube) บริเวณกันตาแทนการใช้ท่อน้ำแบบเปลือย (bare tube) จะช่วยลดการชนและการขัดสีของอนุภาคของแข็งบนผิวท่อน้ำ [1] ถึงแม้ว่าหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนจะมีไซโคลนช่วยในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊สเผาไหม้ก่อนการแลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สเผาไหม้ในส่วนหลังของหม้อไอน้ำ แต่อนุภาคของแข็งขนาดเล็กก็ยังคงเหลืออยู่และเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนหลังของหม้อไอน้ำโดยอาศัยแก๊สเผาไหม้เป็นแก๊สดำพา การชนของอนุภาคเถ้าลอยบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนหลังของหม้อไอน้ำจะส่งผลให้เกิดการขัดสีจนผิวท่อบางและโครงสร้างท่อเสียหายได้ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกกร่อน ได้แก่ ความเร็วกระแทกจากการชนของอนุภาคเถ้า มุมกระแทก ความหนาแน่นของซิลิกาในเถ้า ปริมาณซิลิกาในเถ้า ความหนาแน่นของวัสดุเป้าหมาย และความเค้นครากของวัสดุเป้าหมาย ดังสมการที่ (2.14) [19]

$$\varepsilon = K_e I_e(x) \rho_m \rho_p^{1/2} V^3 \sin^3 \theta / \sigma_y^{3/2} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$\varepsilon$	คือ	อัตราการสึกกร่อน (mg of metal/kg of erodent)
	$K_e$	คือ	ค่าคงที่ ( $s^3/cm^{3/2}$ )
	$I_e(x)$	คือ	ดัชนีของการสึกกร่อนตามปริมาณซิลิกาในเถ้า (-)
	$\rho_m$	คือ	ความหนาแน่นของวัสดุเป้าหมาย ( $kg/m^3$ )
	$\rho_p$	คือ	ความหนาแน่นของซิลิกาในเถ้า ( $kg/m^3$ )

$V$	คือ	ความเร็วกระแทกจากการชนของอนุภาคเข้า (m/s)
$\theta$	คือ	มุมกระแทก (degree)
$\sigma_y$	คือ	ความเค้นครากของวัสดุเป้าหมาย ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

### 2.1.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีส่วนช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมของของไหลต่าง ๆ เช่น รูปแบบการไหล เส้นทางการไหล การถ่ายโอนโมเมนตัม การถ่ายโอนมวล การถ่ายโอนความร้อน ในแต่ละตำแหน่งของระบบที่สนใจอย่างละเอียดด้วยระเบียบวิธีการต่าง ๆ เช่น ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) โดยอาศัยคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงในการคำนวณตามกฎการอนุรักษ์พื้นฐาน และ สมการการคำนวณอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมของของไหลที่สนใจ เช่น สมการสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน สมการแบบจำลองความปั่นป่วน สมการการถ่ายโอนขององค์ประกอบต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของของไหลต่าง ๆ ด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ กับตำแหน่งภายในระบบได้ ทั้งในรูปแบบตัวเลข เช่น ค่าตัวแปรที่สนใจ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักโดยพื้นที่ของตัวแปรที่สนใจ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักโดยปริมาตรของตัวแปรที่สนใจ และรูปแบบรูปภาพ เช่น ภาพเคลื่อนไหว ภาพกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่สนใจ การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงมีประโยชน์อย่างมากในการประยุกต์ใช้เพื่อการศึกษาและวิเคราะห์แก้ปัญหาของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมการไหลของไหลภายในระบบที่สนใจ [5, 20] เช่น พลศาสตร์ของอนุภาคของแข็งภายในหม้อไอน้ำฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน [21] พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในเตาเผา [22] การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้กับน้ำรับความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [23]

#### 2.1.7.1 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method)

ในกระบวนการคำนวณระบบสมการที่มีความซับซ้อน เนื่องจากระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) นั้นอยู่ในรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) สำหรับการหาผลลัพธ์ของความดัน อุณหภูมิ และ ความเร็ว แสดงดังสมการที่ (2.15) ถึง สมการที่ (2.18) กระบวนการทำซ้ำ (iteration technique) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เข้าสู่ผลลัพธ์ที่ถูกต้องที่สุด วิธีการคำนวณความดันและความเร็วร่วมกันแบบ SIMPLE (Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations) จะเป็นกระบวนการทำซ้ำรูปแบบหนึ่งจะช่วยแก้ระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเหมาะสมกับระบบที่โดเมนของการไหลประกอบด้วยเซลล์ที่ไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วิธีการคำนวณแบบ SIMPLE



จะอาศัยแนวคิดการใช้กริดเอียงในการคำนวณ (staggered grid) โดยกระบวนการคำนวณความดันและความเร็วร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 ค่าความผิดพลาดจะเป็นตัวชี้วัดว่าผลลัพธ์นั้นลู่เข้า (converged) สู่ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแท้จริงหรือไม่ โดยทั่วไปกระบวนการทำซ้ำอาจหยุดเมื่อการหมุนวนรอบใหญ่ทำให้ค่าความผิดพลาด (residual) น้อยกว่า 0.001 ในกรณีที่การหมุนวนรอบใหญ่ไม่ได้ทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าค่าที่กำหนดจะมีการปรับค่าความเร็ว และความดัน ด้วยวิธีการผ่อนปรนต่ำ (under-relaxation) [20, 24]

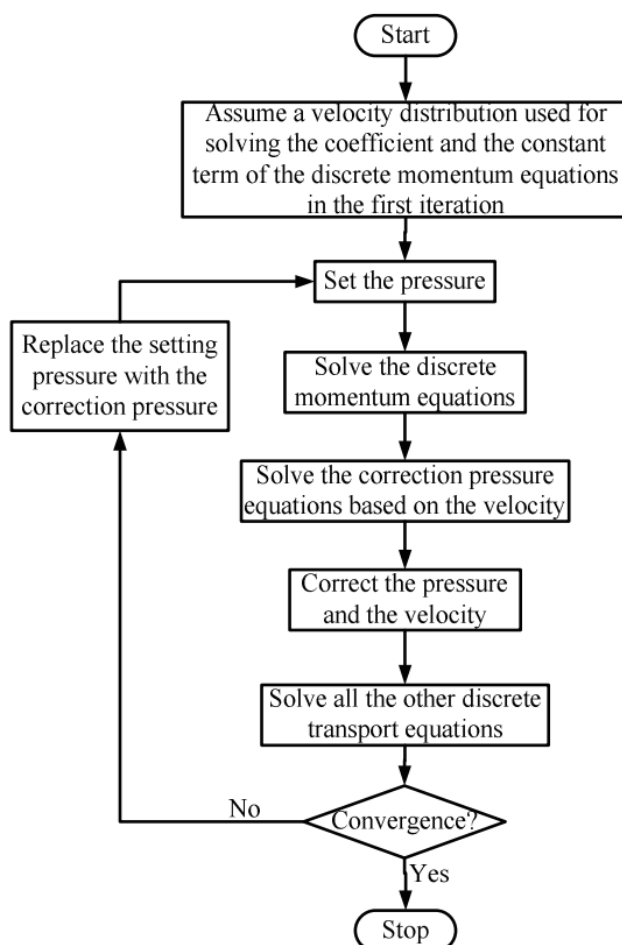
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ	t	คือ	เวลา (s)
	x	คือ	ระยะทางตามแกน x (m)
	y	คือ	ระยะทางตามแกน y (m)
	z	คือ	ระยะทางตามแกน z (m)
	u	คือ	ความเร็วในทิศแกน x (m/s)
	v	คือ	ความเร็วในทิศแกน y (m/s)
	w	คือ	ความเร็วในทิศแกน z (m/s)
	P	คือ	ความดัน (Pa)
	Re	คือ	ตัวเลขไร้นหน่วยเรย์โนลด์ของอนุภาคของแข็ง (-)



รูปที่ 2.6 แผนผังกระบวนการคำนวณความดันและความเร็วร่วมกันแบบ SIMPLE

ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม [25]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 2.1.7.2 การจำลองพลศาสตร์ของไหลหลายวัฏภาคในรูปแบบออยเลอร์เรียน-ออยเลอร์เรียน (Eulerian-Eulerian)

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในกระบวนการฟลูอิดไดเซชันในปัจจุบันสามารถทำได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การจำลองแบบออยเลอร์เรียน-ออยเลอร์เรียน และการจำลองแบบออยเลอร์เรียน-ลากรางเจียน (Eulerian-Lagrangian) การจำลองแบบออยเลอร์เรียน-ออยเลอร์เรียนจะเป็นการพิจารณาทั้งของไหลและอนุภาคของแข็งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง การจำลองการไหลหลายวัฏภาคแบบนี้ทำการแก้สมการของแต่ละวัฏภาคแยกออกจากกัน ซึ่งจะเหมาะกับกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชันของของไหลกับอนุภาคของแข็งที่ประกอบอนุภาคของแข็งจำนวนมาก ดังนั้น การจำลองการไหลหลายวัฏภาคแบบออยเลอร์เรียนจึงถูกพิจารณาในการใช้งานโดยจะแก้สมการอนุรักษ์ต่าง ๆ ร่วมกับทฤษฎีจลนศาสตร์การไหลของอนุภาคของแข็ง ขณะที่การจำลองแบบออยเลอร์เรียน-ลากรางเจียนจะเป็นการพิจารณาของไหลเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง แต่พิจารณาอนุภาคของแข็งเป็นแต่ละอนุภาคด้วย

สมการตัวแทนหนึ่งชุด การจำลองแบบบอยเลอร์เรียน-ลากรานเจียนจึงเหมาะกับระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคของแข็งจำนวนน้อย เนื่องจากการคำนวณสมการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ของอนุภาคที่ละอนุภาค ทำให้จะต้องใช้ระยะเวลาการคำนวณและปริมาณทรัพยากรคอมพิวเตอร์จำนวนมาก [5]

### 2.1.7.3 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม Ansys® Fluent

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่มด้วยโปรแกรม Ansys® Fluent จะเป็นโปรแกรมที่ช่วยให้สามารถสร้างโดเมนและกำหนดสภาวะขอบเขตได้ง่ายเพื่อใช้ในการคำนวณแก้ไขปัญหาที่สนใจด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) ขั้นตอนการสร้างโดเมนของการไหลและการกำหนดสภาวะค่าขอบ (pre-processing) 2) ขั้นตอนแก้ปัญหาในรูปแบบของสมการไม่ต่อเนื่อง (solver) และ 3) กระบวนการขั้นท้ายเพื่อการแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ (post-processing)

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลและการเลือกใช้สมการในการแก้ปัญหาในรูปแบบของสมการไม่ต่อเนื่อง จะประกอบด้วย การวาดรูปและสร้างโดเมนของแบบจำลอง (geometry) การสร้างกริด (grid) ในเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม (mesh) การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น และ การกำหนดค่าสภาวะขอบ (boundary conditions) เพื่อใช้ในการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลซึ่งจะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับระบบกายภาพ

การสร้างกริดในระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดจะเป็นการสร้างเซลล์ที่จะใช้ในการคำนวณแก้ปัญหาแต่ละตำแหน่งในแบบจำลอง โดยจะเป็นตำแหน่งในการคำนวณหาผลลัพธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความเร็ว ความดัน ความเข้มข้น ในบริเวณของโดเมนแบบจำลองที่ต้องการวิเคราะห์แก้ปัญหาจะประกอบด้วยเซลล์หลักและเซลล์ข้างเคียงสำหรับใช้ในการคำนวณแก้สมการไม่ต่อเนื่องภายในแบบจำลองครอบคลุมทั่วทั้งโดเมน โดยความถูกต้องของผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับจำนวนของชุดเชื่อมเซลล์และผลการคำนวณจะสามารถแสดงจากจุดกึ่งกลางของเซลล์แต่ละเซลล์ทั่วทั้งแบบจำลอง การคำนวณแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยโดเมนที่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมากขึ้นจะช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำในการคำนวณมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนการสร้างกริดในเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่มจะมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาอยู่เสมอ เนื่องจากการแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นเซลล์ขนาดเล็กมากเกินไปจะทำให้โดเมนประกอบด้วยจำนวนจุดเชื่อมเซลล์ที่ไม่รู้ค่าจำนวนมากและจะส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณและทรัพยากรคอมพิวเตอร์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมของโดเมนในการคำนวณจะช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำและระยะเวลาการคำนวณที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่มีลักษณะของโดเมนมีความสมมาตร การประยุกต์ใช้ความสมมาตรของแบบจำลอง (symmetry) ในการแก้ปัญหาก็มีส่วนช่วยใน

การลดขนาดโดเมนของการคำนวณและลดจำนวนเซลล์ที่ไม่รู้ค่า รวมถึงระยะเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณ และ ทรัพยากรคอมพิวเตอร์อีกด้วย

จากการกำหนดสมการควบคุม เงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะค่าขอบของปัญหาการไหลในขั้นตอนแรก ขั้นตอนการวิเคราะห์จะแปลงสมการควบคุม เงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะค่าขอบของปัญหาการไหลที่กำหนดในขั้นตอนแรกให้อยู่ในรูปแบบของพิกัด และใช้แนวคิดของความไม่ต่อเนื่อง (discretization) ในการแปลงสมการอนุพันธ์ย่อยมาเป็นสมการพีชคณิต และทำการแก้ไขระบบชุดสมการพีชคณิต การหาผลเฉลยของระบบสมการทางพีชคณิตจะอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่มทั้งในรูปแบบตรง (direct methods) และรูปแบบทำซ้ำ (iteration methods) โดยในปัจจุบันระเบียบวิธีเชิงตัวเลขรูปแบบทำซ้ำจะเป็นที่นิยมมากกว่ารูปแบบตรง เพราะระเบียบวิธีเชิงตัวเลขรูปแบบทำซ้ำจะใช้ปริมาณหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์น้อยกว่ารูปแบบตรง

การหาผลเฉลยของระบบสมการทางพีชคณิตจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ เช่น ความเร็วย่อยในทิศทางต่าง ๆ ความดัน และ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในโดเมนของการไหล เป็นผลลัพธ์ในเชิงตัวเลขจำนวนมาก ซึ่งยากที่จะเข้าใจในภาพรวมของผลการจำลอง ขั้นตอนการแสดงผลในรูปแบบกราฟิกจะเป็นขั้นตอนที่สร้างผลลัพธ์จากการคำนวณในเชิงตัวเลขเป็นรูปภาพที่จะทำให้เข้าใจภาพรวมของผลการจำลองได้ง่ายขึ้น เช่น การพล็อตเวกเตอร์ เพื่อแสดงทิศทางการไหลและสภาวะการหมุนวนในบริเวณต่าง ๆ การพล็อตเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการกับตำแหน่งใด ๆ การพล็อตค่าตัวแปรดำเนินการด้วยสี เพื่อแสดงการกระจายค่าของตัวแปรดำเนินการนั้น ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในโดเมนได้ [20, 24]

#### 2.1.7.4 ตัวอย่างสมการการคำนวณ

ตัวอย่างสมการการคำนวณ เช่น กฎการอนุรักษ์พื้นฐาน สมการสัมประสิทธิ์แรงต้าน การเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน สมการแบบจำลองความปั่นป่วน สมการการถ่ายโอนขององค์ประกอบต่าง ๆ [26] แสดงดังสมการต่อไป

1. กฎการอนุรักษ์พื้นฐาน (Equation of conservation) ประกอบด้วย กฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และ กฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังแสดงในสมการที่ (2.19) ถึง สมการที่ (2.21) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq}) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial P_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla \vec{v}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq}) \quad (2.21)$$

เมื่อ	q	คือ	วิภูภาคต่าง ๆ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส
	p	คือ	วิภูภาคต่าง ๆ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส ที่แตกต่างจากวิภูภาค q
	t	คือ	เวลา (s)
	$\alpha_q$	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของวิภูภาค q (-)
	$\rho_q$	คือ	ความหนาแน่นของวิภูภาค q ( $\text{kg/m}^3$ )
	$\vec{v}_q$	คือ	ความเร็วของวิภูภาค q (m/s)
	$P_q$	คือ	ความดันของวิภูภาค q (Pa)
	$\bar{\tau}_q$	คือ	เทนเซอร์ของความเค้นกับความเครียดของวิภูภาค q ( $\text{kg/m} \cdot \text{s}^2$ )
	$\vec{g}$	คือ	ความเร่งที่กระทำต่อวัตถุเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $\text{m/s}^2$ )
	$\vec{R}_{pq}$	คือ	แรงอันตรกิริยาระหว่างวิภูภาค p กับ q ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ )
	$Q_{pq}$	คือ	ความเข้มของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวิภูภาค p กับ q ( $\text{W/m}^3$ )
	$h_q$	คือ	เอนทาลปีเฉพาะของวิภูภาค q (J/kg)
	$\vec{q}_q$	คือ	ฟลักซ์การถ่ายโอนความร้อนของวิภูภาค q ( $\text{W/m}^2$ )

2. สมการสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลของ Wen and Yu (Wen and Yu drag coefficient)

การพิจารณาแรงอันตรกิริยาระหว่างวิภูภาค p กับ q ( $\vec{R}_{pq}$ ) ในกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ดังสมการที่ (2.20) การศึกษาการเคลื่อนที่ของเม็ดลอยในแก๊สเผาไหม้จะเป็นการพิจารณาแรงอันตรกิริยาระหว่างเม็ดลอยเป็นวิภูภาคของแข็ง (s) กับแก๊สเผาไหม้เป็นวิภูภาคของไหล (l) จากสมการที่ (2.22) ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล ( $K_{sl}$ ) โดยจะต้องพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ร่วมด้วย ดังสมการที่ (2.23) การพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ด้วยสมการสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลของ Wen and Yu ดังแสดงในสมการที่ (2.24) จะเหมาะสมกับระบบที่ประกอบด้วยของแข็งเจือจางในวิภูภาคของไหล

$$\vec{R}_{sl} = K_{sl}(\vec{v}_s - \vec{v}_l) \quad (2.22)$$

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_1 \rho_1 |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} \alpha_1^{-2.65} \quad (2.23)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_1 Re_s} [1 + 0.15(\alpha_1 Re_s)^{0.687}] \quad (2.24)$$

เมื่อ	$\vec{R}_s$	คือ	แรงอันตรกิริยาระหว่างวิถีภาคของแข็งกับของไหล ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ )
	$K_{sl}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหล ( $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$ )
	$\vec{v}_s$	คือ	ความเร็วของอนุภาคของแข็ง (m/s)
	$\vec{v}_l$	คือ	ความเร็วของของไหล (m/s)
	$C_D$	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ (-)
	$\alpha_s$	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (-)
	$\alpha_1$	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของของไหล (-)
	$\rho_1$	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว ( $\text{kg/m}^3$ )
	$d_s$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (m)
	$Re_s$	คือ	ตัวเลขไร้นหน่วยเรย์โนลด์ของอนุภาคของแข็ง (-)

### 3. สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของ Gunn (Gunn heat transfer coefficient)

การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำงานร่วมกับแก๊สเผาไหม้และไถ่ลอย การพิจารณาความเข้มของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวิถีภาค  $p$  กับ  $q$  ( $Q_{pq}$ ) ในกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังสมการที่ (2.21) ในงานวิจัยนี้จะเป็นการพิจารณาความเข้มของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างของแข็งกับของไหลจากสมการที่ (2.25) ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนระหว่างวิถีภาคของแข็งกับของไหล ( $h_{sl}$ ) โดยจะต้องพิจารณาถึงตัวเลขไร้นหน่วยนัสเซิลต์ของอนุภาคของแข็ง ( $Nu_s$ ) ร่วมด้วย ดังสมการที่ (2.26) การพิจารณาถึงตัวเลขไร้นหน่วยนัสเซิลต์ของอนุภาคของแข็งด้วยสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของ Gunn ดังแสดงในสมการที่ (2.27) จะเหมาะสมกับระบบที่ประกอบด้วยวิถีภาคของแข็งกับของไหล

$$Q_{sl} = h_{sl}(T_s - T_l) \quad (2.25)$$

$$h_{sl} = \frac{6\kappa_1 \alpha_s \alpha_1 Nu_s}{d_s^2} \quad (2.26)$$

$$\text{Nu}_s = (7 - 10\alpha_1 + 5\alpha_1^2) \left(1 + 0.7\text{Re}_s^{0.2}\text{Pr}^{\frac{1}{3}}\right) + (1.33 - 2.4\alpha_1 + 1.2\alpha_1^2)\text{Re}_s^{0.7}\text{Pr}^{1/3} \quad (2.27)$$

เมื่อ	$Q_{sl}$	คือ	ความเข้มของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัฏภาคของแข็งกับของไหล ( $\text{W}/\text{m}^3$ )
	$h_{sl}$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัฏภาคของแข็งกับของไหล ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ )
	$\kappa_l$	คือ	ค่าการนำความร้อนของวัฏภาคของไหล ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )
	$\alpha_s$	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (-)
	$\alpha_l$	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของของไหล (-)
	$d_s$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (m)
	$\text{Nu}_s$	คือ	ตัวเลขไร้มิติของอนุภาคของแข็ง (-)
	$\text{Re}_s$	คือ	ตัวเลขไร้มิติเรย์โนลด์ของอนุภาคของแข็ง (-)
	$\text{Pr}$	คือ	ตัวเลขไร้มิติพรันด์เทิล (-)

4. แบบจำลองความปั่นป่วนจากการเคลื่อนที่ของความเค้นเฉือน (Shear Stress Transport k-omega turbulence model) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (2.29)$$

เมื่อ	$t$	คือ	เวลา (s)
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่น ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	$k$	คือ	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $\text{J}/\text{kg}$ )
	$\Gamma_k$	คือ	ค่าคงที่ของการแพร่กระจายของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ )
	$\tilde{G}_k$	คือ	การเกิดพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉื่อย ( $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^3$ )
	$Y_k$	คือ	การกระจายของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^3$ )
	$x_i$	คือ	สัดส่วนโดยโมลของ $i$ (-)
	$u_i$	คือ	ความเร็วของ $i$ (m/s)

$x_j$	คือ	สัดส่วนโดยโมลของ $j$ (-)
$\omega$	คือ	อัตราการลดลงเฉพาะของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $s^{-1}$ )
$\Gamma_\omega$	คือ	ค่าคงที่ของการแพร่กระจายของอัตราการลดลงเฉพาะของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $kg/m \cdot s$ )
$G_\omega$	คือ	การเกิดอัตราการลดลงเฉพาะของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $kg/m^3 \cdot s^2$ )
$Y_\omega$	คือ	การกระจายของอัตราการลดลงเฉพาะของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ( $kg/m^3 \cdot s^2$ )
$D_\omega$	คือ	พจน์การแพร่สวนทาง ( $kg/m^3 \cdot s^2$ )

5. การถ่ายโอนขององค์ประกอบต่าง ๆ (Species transport model) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i \quad (2.30)$$

เมื่อ	$t$	คือ	เวลา (s)
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )
	$Y_i$	คือ	สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบต่าง ๆ (-)
	$\vec{v}$	คือ	ความเร็ว (m/s)
	$\vec{J}_i$	คือ	ฟลักซ์การแพร่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ( $kg/m^2 \cdot s$ )

## 2.2 การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ( $2^k$ factorial experiment design)

การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DoE) คือ วิธีการทางสถิติในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลองหลายปัจจัยร่วมกัน (main effects) เช่น อุณหภูมิ ปริมาณวัตถุดิบ เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ได้ค่าของตัวแปรตอบสนองต่าง ๆ ตามที่ต้องการ (Response) โดยมีทฤษฎีทางสถิติเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นตัวทดสอบทางสถิติเพื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองที่สนใจ

การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ( $2^k$  factorial experiment design) การออกแบบการทดลองเป็นการศึกษาเพื่อระบุปัจจัยที่คาดว่าจะสร้างผลกระทบต่อผลตอบสนองจากการทำการทดลอง ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับการทดลองจะถูกออกแบบเป็น  $2^k$  กรณี โดยเป็นการพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลองปัจจัยละ 2 ระดับ ประกอบด้วย ระดับต่ำสุด และ



ระดับสูงสุด เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบและวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (main factor) ที่ส่งผลต่อการทดลองและอิทธิพลร่วมกันระหว่างปัจจัยดำเนินการต่าง ๆ (Interaction) การใช้รหัสจะเป็นการปรับเปลี่ยนหน่วยสเกลของแต่ละปัจจัยให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน (Standardize) ดังนั้นในการทดลองจะมีการกำหนดค่าปัจจัยแต่ละปัจจัย โดยให้กรณีที่มีค่าระดับต่ำสุดถูกแทนค่าด้วย -1 และ ให้ 1 แทนกรณีที่ปัจจัยมีค่าเป็นระดับสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม ปัจจัยการออกแบบการทดลองที่เลือกควรแสดงถึงตัวแปรดำเนินการที่มีอิทธิพลสูงที่สุดต่อผลลัพธ์ของการทดลอง ตัวแปรดำเนินการที่มีขอบเขตจากค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุดควรสมเหตุสมผลและจำเป็นต้องครอบคลุมขอบเขตที่กว้างที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ด้วยรูปแบบการทดลองชุดเดียวกัน เนื่องจากผลการทดลองจะไม่สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่านอกช่วงตัวแปรดำเนินการที่ถูกพิจารณาในการออกแบบการทดลองได้ [27, 28]

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะช่วยให้สามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐาน (p-value) ใช้ในการเปรียบเทียบค่า p-value กับระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดเพื่อพิจารณาระดับนัยสำคัญในแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลการทดลอง โดยทั่วไประดับนัยสำคัญทางสถิติจะถูกกำหนดไว้ที่ 0.05 และเมื่อ p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะเป็นการปฏิเสธสมมติฐานว่างที่ตั้งไว้ เช่น เมื่อศึกษาผลของตัวแปรต้นหนึ่ง หากตั้งสมมติฐานให้สมมติฐานว่าง (null hypothesis) เป็นผลการทดลองไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งหมด ขณะที่สมมติฐานทางเลือก (alternative hypothesis) เป็นผลการทดลองทั้งหมดแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งหมด และ ระดับนัยสำคัญทางสถิติถูกกำหนดไว้ที่ 0.05 เมื่อ p-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะสรุปได้ว่าปัจจัยหลักนั้น ๆ มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ [29]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลองหลายปัจจัยร่วมกัน การแสดงผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) จะเป็นการแสดงด้วยภาพให้เห็นผลการตอบสนองที่ได้จากปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลองต่าง ๆ วิธีการพื้นผิวตอบสนองจะเป็นประโยชน์ต่อการทำแบบจำลองที่แม่นยำขึ้นและช่วยให้สร้างข้อมูลปริมาณมากจากจำนวนการทดลองน้อยและเวลาการศึกษาที่มีอยู่อย่างจำกัด วิธีการพื้นผิวตอบสนองจะช่วยให้การหาค่าตัวแปรดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดตามเป้าหมายที่ต้องการจากการทำทดลอง [27, 28]

### 2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

William Liu [3] ศึกษาสาเหตุการเกิดความเสียหายของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องไอโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำซึ่งภายในท่อน้ำอุณหภูมิประมาณ 109 °C และภายนอกท่อเป็นแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิ 150 °C จากการศึกษาพบว่า สาเหตุการเกิดความเสียหายของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งออกเป็น 2 สาเหตุ ได้แก่ การกัดกร่อนที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านใน และการสึกกร่อนและการกัดกร่อนที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านนอก การกัดกร่อนที่ผิว

ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านในเป็นการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนแบบหลุม เมื่อปริมาณออกซิเจนในน้ำมากขึ้น ส่งผลให้แมกนีไทด์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) เปลี่ยนเป็นเฮมาไทด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากขึ้นและสะสมอยู่ในหลุม ซึ่งเฮมาไทด์ไม่มีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน การกัดกร่อนแบบหลุมสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องทำให้เกิดความเสียหายของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านในได้ การสึกกร่อนและการกัดกร่อนที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านนอกเป็นสมดุลพลวัตระหว่างการเกิดออกซิเดชันกับการสึกกร่อนด้วยการเสียดสีของวัตถุ 2 ชิ้นระหว่างผิวท่อกับอนุภาคเถ้าลอย โดยอนุภาคซิลิกาที่ไม่ถูกปกคลุมด้วยแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดการสึกกร่อน ทำให้ความหนาของท่อบางลงแบบรูปตัววี จากการศึกษาองค์ประกอบของชั้นตะกอนที่ด้านข้างและด้านบนของท่อ พบว่า ชั้นตะกอนที่ด้านบนของท่อจะประกอบด้วยชั้นเหล็กออกไซด์และชั้นแมกนีไทด์ตามลำดับจากด้านในไปยังด้านนอก ขณะที่ชั้นตะกอนที่ด้านข้างของท่อมีเพียงชั้นเหล็กออกไซด์ เนื่องจากอัตราการสึกกร่อนที่ด้านข้างของท่อมากกว่าด้านบนของท่อ ซึ่งทางด้านข้างของท่อมีแก๊สเผาไหม้ความเร็วสูงไหลผ่านทำให้ไม่มีการสะสมของเถ้าลอยบนผิวท่อ ป้องกันการสึกกร่อนจากการเสียดสีระหว่างผิวท่อกับอนุภาคเถ้าลอย อย่างไรก็ตาม การสึกกร่อนและการกัดกร่อนที่ผิวท่อภายนอกทำให้ความหนาของผิวท่อด้านนอกบางลงมากกว่า 3 มิลลิเมตร ขณะที่การกัดกร่อนแบบหลุมที่ผิวท่อด้านในทำให้เกิดหลุมลึกประมาณ 60 ไมโครเมตร ในระยะเวลา 18,000 ชั่วโมง ดังนั้นการสึกกร่อนและการกัดกร่อนที่ผิวท่อภายนอกจึงสำคัญกว่าการกัดกร่อนแบบหลุมที่ผิวท่อด้านใน

Thomas Gruber และคณะ [30] ได้สร้างแบบจำลองการทำนายอัตราการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันภายในหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงชีวมวล การสร้างแบบจำลองการทำนายได้จากการตรวจวัดและเก็บข้อมูลอัตราการกัดกร่อนแบบออนไลน์นำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ กับอัตราการกัดกร่อนที่ซูเปอร์ฮีทเทอร์ของหม้อไอน้ำแบบเบดคงที่ที่ทำจากโลหะ 13CrMo4-5 ช่วงอุณหภูมิการทำงานของแก๊สเผาไหม้บริเวณซูเปอร์ฮีทเทอร์จะอยู่ในช่วง 625 °C ถึง 880 °C อุณหภูมิผิวโลหะอยู่ในช่วง 450 °C ถึง 550 °C และ ความเร็วแก๊สเผาไหม้อยู่ระหว่าง 2 m/s ถึง 8 m/s การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนที่ซูเปอร์ฮีทเทอร์ของหม้อไอน้ำแบบเบดคงที่ขนาด 38 MW โดยใช้ขั้นไม่เชิงเส้น ในงานวิจัยนี้ได้จากการสร้างแบบจำลองหม้อไอน้ำ 2 มิติ เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ของแก๊สเผาไหม้และการถ่ายโอนความร้อนภายในหม้อไอน้ำด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยผลจากการจำลอง เช่น การกระจายของความเร็วแก๊สเผาไหม้ ทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้ การกระจายของอุณหภูมิภายในหม้อไอน้ำจะถูกนำมาใช้ในการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันจากผลการพัฒนาแบบจำลองการทำนายอัตราการกัดกร่อนที่สอดคล้องกับข้อมูลอัตราการกัดกร่อนที่วัดได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้จะมีข้อจำกัด

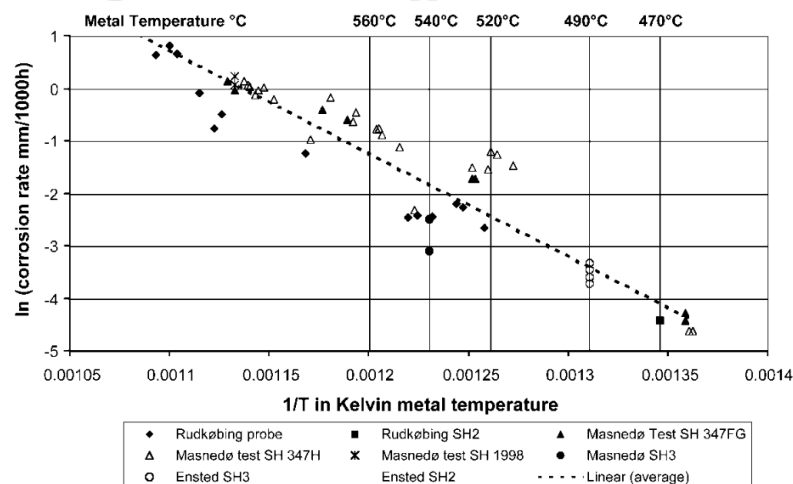
เกี่ยวกับความสามารถในการนำไปใช้ของแบบจำลอง คือ การกัดกร่อนหลักที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการเกิดออกซิเดชันของท่อเหล็กอัลลอยด์เกรดต่ำ 13 CrMo4-5 โดยมีปริมาณโครเมียมและนิกเกิลต่ำ การใช้วัสดุทำท่อแลกเปลี่ยนความร้อนอันประกอบด้วยโครเมียมหรือนิกเกิลปริมาณมากอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมกรรมการกัดกร่อน การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงสามารถนำไปสู่รูปแบบการเกิดการกัดกร่อนภายในระบบ เช่น การกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ หรือ การกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอม

Amrita Kumari และคณะ [31] สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงจากข้อมูลการทำงานของท่อรับความร้อนด้วยไอน้ำอิ่มตัวในหม้อไอน้ำระบบเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อทำนายอัตราการกัดกร่อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณสัดส่วนของอากาศส่วนเกินในเตาเผาเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปฏิกิริยาซัลไฟเดชันเกิดภายในโลหะ ทำให้ผิวท่อโลหะถูกกัดกร่อนและทำให้ท่อบางลงได้ เมื่อปริมาณสัดส่วนของถ่านหินเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของท่อด้านเปลวไฟเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์ในถ่านหิน เนื่องจากอนินทรีย์วัตถุในถ่านหินประกอบด้วย สารประกอบออกไซด์ของโลหะโซเดียมและโพแทสเซียมเป็นหลัก ซึ่งโลหะแอลคาไลน์จะอยู่ในรูปออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 540 °C ถึง 750 °C และสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบกำมะถันผลิตโลหะแอลคาไลน์ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูงเป็นผลิตภัณฑ์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ นอกจากนี้ปริมาณกำมะถันในถ่านหินและปริมาณสัดส่วนของสารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบแปรผันตรงกับอัตราการกัดกร่อน เนื่องจากการสะสมของเกลือแอลคาไลน์ซัลเฟตบนผิวท่อโลหะที่ถูกดูดซับด้วยถ่านหินที่สะสมอยู่บนผิวท่อ เกลือแอลคาไลน์ซัลเฟตในรูปหลอมเหลว ประกอบด้วยซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่เป็นอิสระในแก๊สเผาไหม้จะละลายฟิล์มออกไซด์ที่มีฤทธิ์ป้องกันการกัดกร่อนและสร้างสารประกอบซัลเฟตของเหล็กและโครเมียมทำให้ผิวท่อถูกกัดกร่อน

Chen Zong และคณะ [32] ศึกษาลักษณะการกัดกร่อนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อไอน้ำระบบเชื้อเพลิงชีวมวลที่ทำจากวัสดุเหล็กคาร์บอน 20G ทดสอบการกัดกร่อนในแก๊สเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 500 °C ถึง 650 °C ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า การกัดกร่อนในกรณีอุณหภูมิสูงรุนแรงกว่าการกัดกร่อนในกรณีอุณหภูมิต่ำ เมื่อทดสอบการกัดกร่อนในแก๊สเผาไหม้เทียบกับการกัดกร่อนในแก๊สไนโตรเจน พบว่า การกัดกร่อนในแก๊สไนโตรเจนน้อยกว่าเทียบกับการกัดกร่อนในแก๊สเผาไหม้ ดังนั้น แก๊สออกซิเจนมีความสำคัญต่อปฏิกิริยาการกัดกร่อน เมื่อทดสอบผลขององค์ประกอบแต่ละชนิดของแก๊สเผาไหม้ ได้แก่ เกลือแอลคาไลน์คลอไรด์ เกลือแอลคาไลน์ซัลเฟต แก๊สคลอรีน และ

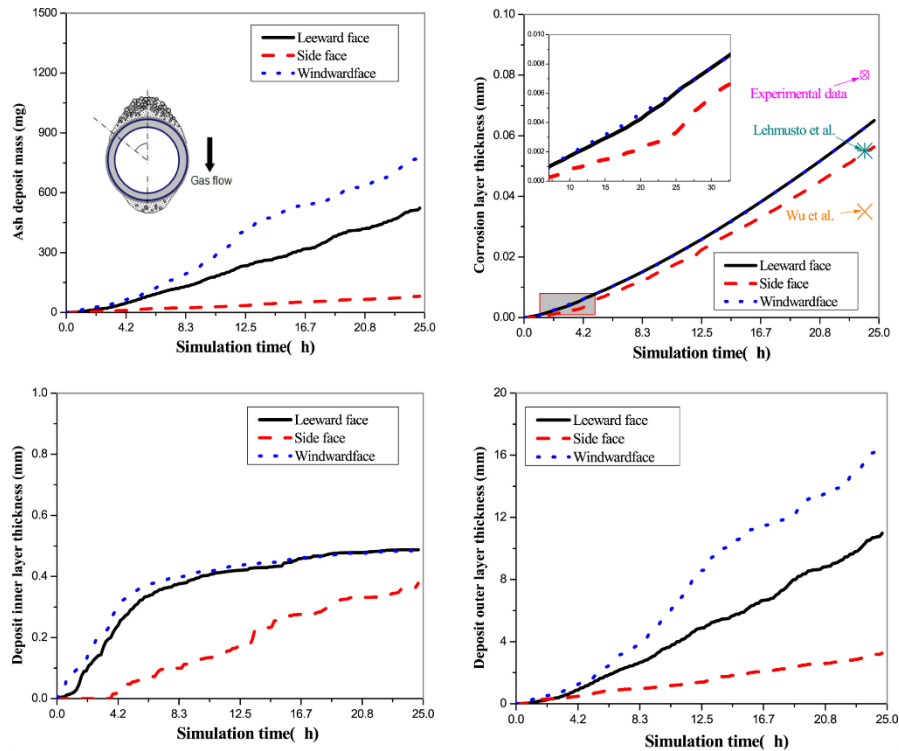
แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่า การกัดกร่อนในแก๊สเผาไหม้ที่ประกอบด้วยเกลือแอลคาไลน์คลอไรด์ รุนแรงที่สุด รองลงมา เกลือแอลคาไลน์ซัลเฟต แก๊สคลอรีน และ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ การกัดกร่อนอันเนื่องจากการสะสมของเถ้ามีผลต่ออัตราการกัดกร่อนมากกว่าการกัดกร่อนด้วย แก๊สเผาไหม้ การกัดกร่อนจากการสะสมของเถ้าร่วมกับการกัดกร่อนด้วยแก๊สเผาไหม้จะเร่งให้ การกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้น

Melanie Montgomery และคณะ [33] ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลหาความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิผิวโลหะกับอัตราการกัดกร่อนเนื่องจากการสะสมของเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใน ชูปเปอร์ฮีทเตอร์ของหม้อไอน้ำแบบตะแกรงเชื้อเพลิงชีวมวลและขยะ ซึ่งมีองค์ประกอบของเถ้า ประกอบด้วยสารประกอบคลอไรด์สูง จากการศึกษาการกัดกร่อนที่ชูปเปอร์ฮีทเตอร์ของหม้อไอน้ำใน โรงไฟฟ้า 3 แห่งที่เดนมาร์ก ได้แก่ โรงไฟฟ้า Rudkøbing โรงไฟฟ้า Masnedø และ โรงไฟฟ้า Ensted ที่ใช้ฟางข้าวและขี้เถ้าเป็นเชื้อเพลิงหลัก พบ การเกาะของเถ้าและเกิดการก่อตัวของชั้นฟิล์ม ออกไซด์บริเวณชูปเปอร์ฮีทเตอร์ โดยเถ้าประกอบด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลไฟด์ เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้พบการควบแน่นของโพแทสเซียมคลอไรด์บริเวณผิวหน้าปลายโพรบที่ ตรวจวัด ซึ่งโพแทสเซียมคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิด การปล่อยแก๊สคลอรีนที่กัดกร่อนบนผิวโลหะ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับอุณหภูมิผิวโลหะ ในช่วง 450 °C ถึง 600 °C ซึ่งถูกแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการความสัมพันธ์ค่าคงที่ ของปฏิกิริยาเคมีของ Arrhenius ดังรูปที่ 2.7 จึงสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิผิวโลหะเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ อัตราการกัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 2.7 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับอุณหภูมิโลหะในหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงชีวมวลและขยะ [33]

Hao Guo และคณะ [34] ศึกษาการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงด้วยการสะสมของเถ้าในรูปแบบ ตะกรัน โดยการทำการกระจายความหนาของชั้นกัดกร่อนและชั้นสะสมเถ้าด้วยการจำลองพลวัต แบบจำลองเกี่ยวข้องกับลักษณะการเผาไหม้ถ่านหินที่มีองค์ประกอบคลอรีนสูง การเกิดอนุภาคเถ้า ลอย การเคลื่อนที่ของอนุภาคเถ้าลอย การสะสมของอนุภาคเถ้าลอย และ การกัดกร่อนของอุปกรณ์ ทดสอบที่ทำจากโลหะผสม จากการศึกษาผลของระยะเวลาและอุณหภูมิต่อการสะสมของเถ้าพบว่า ปริมาณการสะสมของเถ้ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวลาและแปรผันตรงกัน อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ ต่อการสะสมของเถ้า ความดันไออิมิตัวแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ซึ่งพื้นผิวของอุปกรณ์ทดสอบมี อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้ จึงทำให้โซเดียมคลอไรด์ในรูปแก๊สจะควบแน่นและสะสมบน พื้นผิวของอุปกรณ์ทดสอบเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวของอุปกรณ์ทดสอบสูงขึ้น อัตราการควบแน่นของโลหะแอลคาไลน์คลอไรด์จะลดลง ในขณะที่เดียวกัน อนุภาคเฝ้ายาจำนวนมากที่ มีขนาดใหญ่ และ อุณหภูมิต่ำจะสะสมอยู่บนพื้นผิวมากขึ้น ซึ่งจะลดสัดส่วนของโลหะ แอลคาไลน์คลอไรด์ในชั้นสะสมเถ้าและลดความสามารถในการดักจับอนุภาคเถ้าลอย จนกระทั่ง ความหนาของชั้นสะสมเถ้าจะอยู่ในสภาวะสมดุล จากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของชั้นสะสม เถ้าและชั้นกัดกร่อนดังรูปที่ 2.8 พบว่า ความหนาของชั้นกัดกร่อนบางกว่าชั้นสะสมเถ้าและความหนา ของชั้นกัดกร่อนระหว่างด้านด้านลมกับด้านใต้ลมไม่มีความแตกต่างอย่างนัยสำคัญ ซึ่งการเกิด ชั้นกัดกร่อนมีลักษณะใกล้เคียงกับการเกิดชั้นสะสมเถ้าชั้นใน เนื่องจากชั้นสะสมเถ้าชั้นในยึดเกาะกับ พื้นผิวสัมผัสอย่างใกล้ชิด จึงทำให้การสะสมของเถ้าชั้นในมีผลต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงใน ชั้นกัดกร่อน

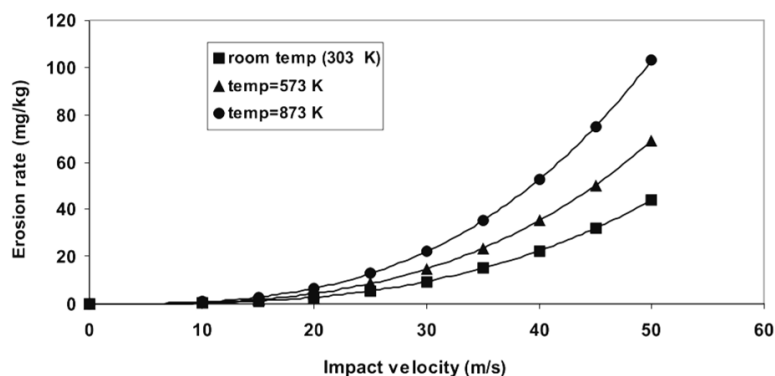


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเถ้ากับความหนาของชั้นกัดกร่อนต่อเวลา

[34]

S. K. Das และคณะ [19] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายกลไกการสึกกร่อนด้วยอนุภาคของแข็ง เพื่อทำนายอัตราการสึกกร่อนและน้ำหนักเนื้อวัสดุที่หลุดออกเนื่องจากการสึกกร่อนด้วยการชนของอนุภาคเถ้าลอยบนพื้นผิวสัมผัสของชิ้นส่วนภายในหม้อไอน้ำ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกกร่อน ได้แก่ ความเร็วกระแทกจากการชนของอนุภาคเถ้า มุมกระแทก ความหนาแน่นของซิลิกาในเถ้า ปริมาณซิลิกาในเถ้า ความหนาแน่นของวัสดุเป้าหมาย และ ความเค้นครากของวัสดุเป้าหมาย จากการศึกษพบว่า เมื่ออุณหภูมิโลหะเพิ่มขึ้นและมุมระหว่างการตกกระทบของอนุภาคกับระนาบแคบ จะทำให้อัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น แต่จะไม่ส่งผลต่ออัตราการสึกกร่อนเมื่อมุมระหว่างการตกกระทบของอนุภาคกับระนาบกว้าง อัตราการสึกกร่อนแปรผันตรงกับความเร็วกระแทก เมื่อความเร็วกระแทกจากการชนของอนุภาคเถ้าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อัตราการสึกกร่อนขึ้นอยู่กับมุมกระแทกจากการชนของอนุภาค พบว่าอัตราการสึกกร่อนมีค่าสูงสุด เมื่อมุมกระแทกมีค่าระหว่าง 25 องศา ถึง 30 องศา อัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อมุมกระแทกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด จากนั้นอัตราการสึกกร่อนจะลดลงเมื่อมุมกระแทกเพิ่มขึ้น อัตราการสึกกร่อนของโลหะแต่ละชนิดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเค้นครากของโลหะ จากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายกลไกการสึกกร่อนด้วยอนุภาคของแข็ง

บนผิวโลหะเหล็กคาร์บอน พบว่า อัตราการสึกกร่อนบนผิวโลหะเหล็กคาร์บอนแปรผันตรงกับความเร็วกระแทกและอุณหภูมิ เมื่อความเร็วกระแทกจากการชนของอนุภาคเถ้าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง จะทำให้อัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกกร่อนกับความเร็วกระแทกบนผิวโลหะเหล็กคาร์บอนที่อุณหภูมิ 303 K 573 K และ 873 K [19]

Mikilkumar B. Gandhi และคณะ [35] ได้พัฒนาการสร้างแบบจำลองการสึกกร่อนในหม้อไอน้ำเนื่องจากการชนอนุภาคเถ้าลอยในแก๊สเผาไหม้บนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงถ่านหิน โดยการเขียนแบบจำลองการคำนวณอัตราการสึกกร่อนที่จะถูกนำมาใช้ในการจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งบริเวณส่วนท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการพาความร้อนจะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงเนื่องจากการสึกกร่อนโดยการชนของอนุภาคเถ้าลอยและส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานอย่างมีนัยสำคัญ การพัฒนาแบบจำลองการคำนวณอัตราการสึกกร่อนเพื่อใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะช่วยให้สามารถทำความเข้าใจพฤติกรรมการไหลของแก๊สเผาไหม้และอนุภาคเถ้าลอยภายในแบบจำลองและสามารถระบุพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองพลศาสตร์ของไหลหลายวัฏภาคในรูปแบบออยเลอร์-ลากรางเจียน เพื่อวิเคราะห์แก๊สเผาไหม้เป็นวัฏภาคต่อเนื่องและติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคเถ้าลอยแต่ละอนุภาค จากผลการจำลอง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วและทิศทางการไหลของอนุภาคเถ้าลอยแต่ละอนุภาค ความเร็วและทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้ จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และทำนายหาพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนได้ การพัฒนาแบบจำลองการศึกษ้อัตราการสึกกร่อนและการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนจะมีส่วนช่วยในการศึกษาหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของหม้อไอน้ำที่เหมาะสม เพื่อลดความเสียหายของอุปกรณ์ภายในหม้อไอน้ำได้

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน โดยอาศัยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ของไหลภายในหม้อไอน้ำฟลูอิดเบดและการแลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สเผาไหม้ เถ้า และ น้ำป้อนหม้อไอน้ำเพื่อรับความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ โดยผลการจำลองอีโคโนไมเซอร์ด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะช่วยสร้างความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายในอีโคโนไมเซอร์ และ ทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อความเสียหายของอุปกรณ์

#### 3.1 ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย

ข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จะประกอบด้วย ลักษณะและขนาดของอีโคโนไมเซอร์ เพื่อใช้ในการวาดแบบจำลอง สภาวะค่าเริ่มต้น (initial condition) สภาวะค่าขอบ (boundary condition) และ คุณสมบัติของสารในระบบ เพื่อใช้ในการคำนวณแก้สมการต่าง ๆ สำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายโอนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่สนใจ

##### 3.1.1 ลักษณะอีโคโนไมเซอร์

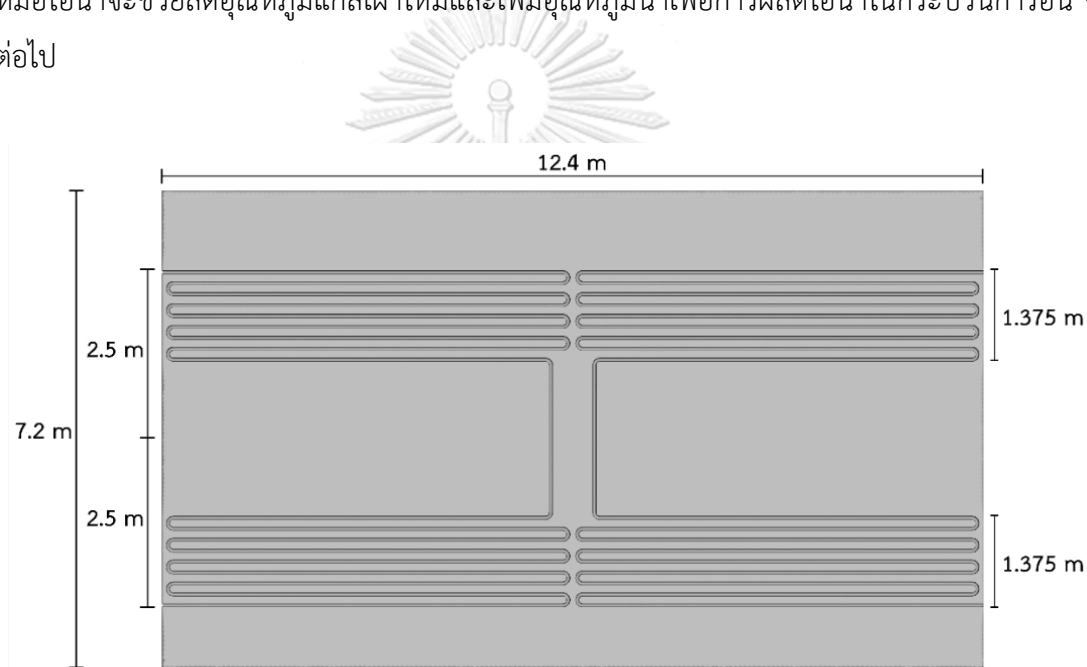
จากข้อมูลสภาพวาดอีโคโนไมเซอร์ของบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด พบว่าอีโคโนไมเซอร์โดยรวมมีความสูง 7.2 m ความกว้าง 7.02 m และความยาว 12.4 m ประกอบด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 200 ท่อ โดยท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 0.055 m และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 0.038 m ขนาดพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อ 1 ท่อเท่ากับ 19.407 m<sup>2</sup> โดยไม่มีครีปแลกเปลี่ยนความร้อน (Fin) ดังรูปที่ 3.1

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ที่ประกอบด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel) รหัส 20G ซึ่งถูกใช้เป็นตัวกลางการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้กับน้ำ หม้อไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่ศึกษาเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงชิ้นไม้ (wood chip) เป็นหลักในกรณีพื้นฐาน (base case) โดยการเผาไหม้เกิดขึ้นแบบไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิของแข็งขนาดใหญ่ที่เหลือหลังจากการเผาไหม้จะถูกนำกลับเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้โดยไซโคลน ขณะที่อุณหภูมิของแข็งขนาดเล็ก เช่น เถ้าลอย จะลอยตามแก๊สเผาไหม้ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา



และไหลผ่านอีโคโนไมเซอร์ซึ่งอยู่ในส่วนหลังของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน ดังนั้น วัสดุและสารในอีโคโนไมเซอร์ จะประกอบด้วย ท่อเหล็กกล้าคาร์บอน แก๊สเผาไหม้ เถ้า และน้ำป้อนหม้อไอน้ำ

ภายในอีโคโนไมเซอร์จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้กับน้ำป้อนหม้อไอน้ำในรูปแบบการไหลสวนทาง แก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงไหลเข้าด้านบนของอีโคโนไมเซอร์ แก๊สเผาไหม้จะแลกเปลี่ยนความร้อนและไหลลงตามแนวตั้งออกด้านล่างของเครื่อง ในขณะที่น้ำป้อนหม้อไอน้ำจะไหลเข้าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านล่าง และ น้ำที่ผ่านการรับความร้อนจะไหลออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านบน การถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงไปยังน้ำป้อนหม้อไอน้ำจะช่วยลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้และเพิ่มอุณหภูมิน้ำเพื่อการผลิตไอน้ำในกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 3.1 โครงสร้างด้านข้างของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

### 3.1.2 สถานะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์

ข้อมูลตัวอย่างการทำงานของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ศึกษาได้จากบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด ถูกนำมาใช้เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การจำลองอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน คือ การศึกษาภาวะแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ระหว่างน้ำป้อนหม้อไอน้ำกับแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชั้นไม้ เชื้อเพลิงชั้นไม้มีองค์ประกอบของความชื้นร้อยละ 43.68 และมีองค์ประกอบโดยประมาณของเชื้อเพลิงชั้นไม้ (ฐานแห้ง) ประกอบด้วย สารที่ระเหยได้ร้อยละ 80.3 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 17.51 และ เถ้าร้อยละ 2.19 และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ เชื้อเพลิงชั้นไม้ประกอบด้วย

คาร์บอนร้อยละ 47.97 ออกซิเจนร้อยละ 43.48 ไฮโดรเจนร้อยละ 5.83 ไนโตรเจนร้อยละ 0.34 คลอรีนร้อยละ 0.11 ซัลเฟอร์ร้อยละ 0.08 และ เถ้าร้อยละ 2.19 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงดังกล่าวในหม้อไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่ศึกษาจากฐานข้อมูลของโปรแกรม Aspen® Plus โดยบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด ประกอบด้วย อัตราการไหลโดยมวลของแก๊สเผาไหม้ อัตราการไหลโดยมวลของเถ้า อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ ความดันป้อนเข้าและความดันปลายของแก๊สเผาไหม้ ความดันป้อนเข้าและความดันปลายของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ องค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ ประกอบด้วย แก๊สไนโตรเจนร้อยละ 60.7 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 20.9 ไอน้ำร้อยละ 15.4 แก๊สออกซิเจนร้อยละ 2.8 แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ร้อยละ 0.2 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ  $2.7 \times 10^{-2}$  แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร้อยละ  $1.9 \times 10^{-2}$  แก๊สคลอรีนร้อยละ  $1.3 \times 10^{-2}$  แก๊สไฮโดรเจนร้อยละ  $8.8 \times 10^{-4}$  แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ร้อยละ  $1.8 \times 10^{-4}$  แก๊สไนตรัสออกไซด์ร้อยละ  $1.0 \times 10^{-5}$  แก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ร้อยละ  $4.0 \times 10^{-5}$  และ แก๊สซัลเฟอร์ร้อยละ  $1.0 \times 10^{-5}$

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน

สภาวะการทำงาน	ในกรณีพื้นฐาน
อัตราการไหลโดยมวลของแก๊สเผาไหม้ (kg/s)	201.484
อัตราการไหลโดยมวลของเถ้า (kg/s)	0.525
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ (kg/s)	116.800
ความเร็วป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (m/s)	2.203
ความเร็วป้อนเข้าของเถ้า (m/s)	2.203
ความเร็วป้อนเข้าของน้ำ (m/s)	0.875
สัดส่วนโดยปริมาตรของเถ้า	$2.7375 \times 10^{-6}$
ความดันป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้และเถ้า (Pa g)	-1.5
ความดันปลายของแก๊สเผาไหม้และเถ้า (Pa g)	-2.3
ความดันป้อนเข้าของน้ำ (Pa g)	14,560,000
ความดันปลายของน้ำ (Pa g)	14,460,000
อุณหภูมิป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (K)	763.15
อุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้ (K)	573.15 – 593.15
อุณหภูมิป้อนเข้าของน้ำ (K)	508.04
อุณหภูมิปลายของน้ำ (K)	508.04 – 573.15

ข้อมูลที่ใช้เป็นสภาวะค่าขอบของแบบจำลองจะใช้ ประกอบด้วย สัดส่วนโดยมวลของ องค์ประกอบแก๊สแต่ละชนิดตั้งที่กล่าวข้างต้น ความเร็วป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ ความเร็วป้อนเข้า ของอนุภาคเถ้า สัดส่วนโดยปริมาตรของเถ้า ความเร็วป้อนเข้าของน้ำ ความดันป้อนเข้าและความดัน ปลายของแก๊สเผาไหม้ ความดันป้อนเข้าและความดันปลายของเถ้า และ ความดันป้อนเข้าและ ความดันปลายของน้ำ ดังตารางที่ 3.1 โดยความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิป้อนเข้าของเถ้าจะถูกให้ ค่าเท่ากับความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ ตามลำดับ ขณะที่สัดส่วนโดย ปริมาตรของเถ้าจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งกับ อัตราการไหลโดยมวลของอนุภาคของแข็งกับความเร็วป้อนเข้าของแก๊ส ดังสมการที่ (3.1) นอกจากนี้ ผนังอีโคโนไมเซอร์และผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกำหนดให้เป็นผนังเรียบ อยู่นิ่ง และ ความเร็วของของไหลบนพื้นผิวผนังมีค่าเป็นศูนย์ (no slip condition) นอกจากนี้ผนังอีโคโนไมเซอร์ จะถูกกำหนดให้เป็นฉนวนกันความร้อน อัตราการถ่ายโอนความร้อนเป็นศูนย์ (insulation)

$$\alpha_s = \frac{G_s}{\rho_s U_g} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$\alpha_s$	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็ง
	$G_s$	คือ	ฟลักซ์การไหลอนุภาคของแข็ง ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )
	$\rho_s$	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	$U_g$	คือ	ความเร็วป้อนเข้าของแก๊ส ( $\text{m}/\text{s}$ )

### 3.1.3 คุณสมบัติของสารภายในระบบ

สารในอีโคโนไมเซอร์จะประกอบด้วย แก๊สเผาไหม้ เถ้า น้ำป้อนหม้อไอน้ำ และ ท่อเหล็กกล้า คาร์บอน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของแก๊สเผาไหม้ อนุภาคเถ้า และ น้ำป้อนหม้อไอน้ำภายใน อีโคโนไมเซอร์ และ การถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สเผาไหม้และเถ้าสู่น้ำป้อนหม้อไอน้ำผ่านท่อ เหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งฟลักซ์ความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามแรงขับของความแตกต่างของอุณหภูมิ และ พฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกันบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ การคำนวณคุณสมบัติเชิงกายภาพและความร้อนของแก๊สเผาไหม้ที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขึ้นไม้ที่ มีองค์ประกอบความชื้นร้อยละ 43.68 จากฐานข้อมูลของโปรแกรม Ansys® Fluent โดยอาศัย หลักการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักโดยปริมาตรของแต่ละองค์ประกอบแก๊สเผาไหม้ ขณะที่คุณสมบัติเชิง กายภาพและความร้อนของเถ้า ได้แก่ ความหนาแน่น ความจุความร้อน และ สัมประสิทธิ์การนำ ความร้อน จะใช้ข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้าที่มีการศึกษาเถ้าจากชีวมวลของ Domenico Borello และ คณะ [36] สำหรับขนาดอนุภาคเถ้าจะได้จากข้อมูลผลการวิเคราะห์ของบริษัท อินทิเกรทเต็ด

รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด พบว่า ในกรณีพื้นฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเถ้าลอยเฉลี่ย 22.224  $\mu\text{m}$  สำหรับคุณสมบัติเชิงกายภาพและความร้อนของน้ำป้อนหม้อไอน้ำจะใช้ข้อมูลจากตารางไอน้ำ [7] อ้างอิงข้อมูลที่ความดัน 14,560 kPa และอุณหภูมิ 613.15 K ส่วนคุณสมบัติเชิงกายภาพและความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในอีโคโนไมเซอร์ จะอ้างอิงจากข้อมูลของเหล็กกล้าคาร์บอน รหัส 20G ที่ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 5 [37] โดยข้อมูลคุณสมบัติเชิงกายภาพและความร้อนของสารแต่ละชนิดในอีโคโนไมเซอร์ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณในแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและตรวจสอบผลความถูกต้องของแบบจำลองต่อไป

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลคุณสมบัติของสารภายในระบบ

Material	Properties			
	Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Heat capacity ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	Thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )	Viscosity ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
Flue gas	1.051	1,248	0.044	$2.826 \times 10^{-5}$
Ash	1,000	800	0.100	-
Water	611	8,227	0.469	$7.010 \times 10^{-5}$
Carbon steel	7,833	465	54	-

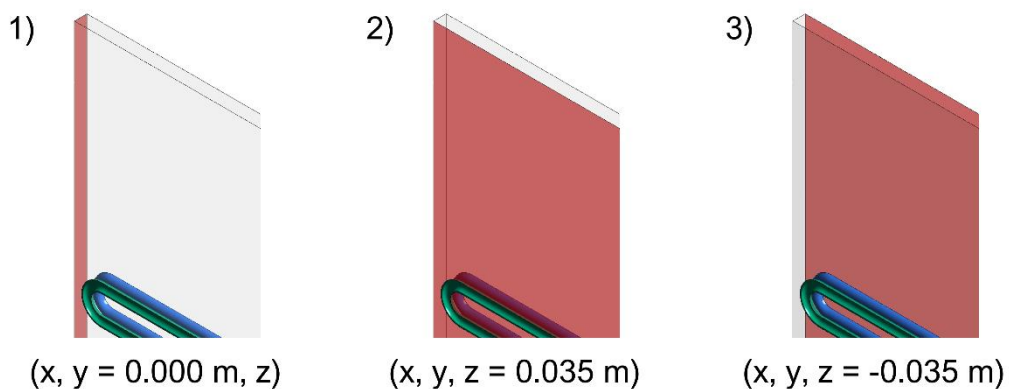
### 3.2 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองพลศาสตร์ของไหลภายในอีโคโนไมเซอร์ระหว่างแก๊สเผาไหม้กับน้ำซึ่งอยู่ในส่วนหลังของหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เพื่อปรับอุณหภูมิน้ำสำหรับการผลิตไอน้ำ โดยใช้ข้อมูลโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์ที่ศึกษาอ้างอิงจากข้อมูลของบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกับผลจากการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน ได้แก่ อุณหภูมิน้ำขาออก และอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ขาออก แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน 1) การเขียนแบบอีโคโนไมเซอร์ 2) การสร้างกริด 3) การแก้สมการในแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ 4) การตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริด และ 5) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

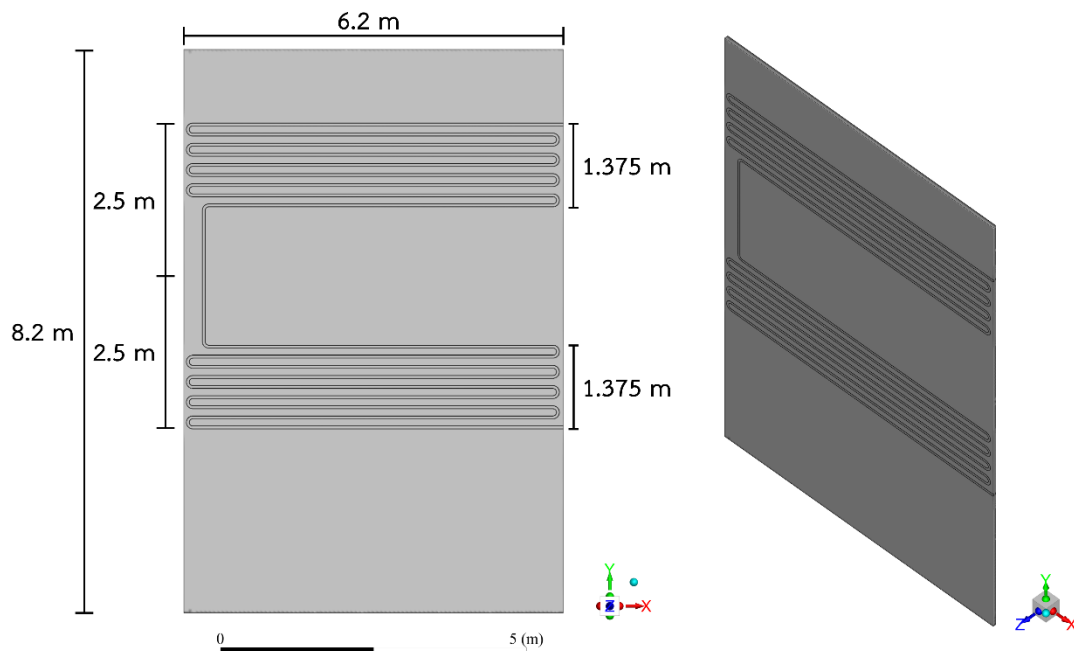
### 3.2.1 การเขียนแบบอีโคโนไมเซอร์ (drawing)

เนื่องจากอีโคโนไมเซอร์ประกอบด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งจะส่งผลให้ต้องแบ่งเซลล์การคำนวณของแบบจำลองอย่างละเอียดและใช้ทรัพยากรในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์จำนวนมาก ดังนั้น เพื่อลดจำนวนเซลล์การคำนวณ และ ปริมาณการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ การสร้างแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์จึงอาศัยหลักการระนาบสมมาตร (symmetric plane) ของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ 3 ระนาบ ได้แก่ 1) ระนาบแกน  $yz$  ณ จุด  $x = 0$  m 2) ระนาบแกน  $xy$  ณ จุด  $z = 0.035$  m และ 3) ระนาบแกน  $xy$  ณ จุด  $z = -0.035$  m ดังรูปที่ 3.2 ภายใต้สมมติฐาน คือ รูปแบบพลศาสตร์ของไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละท่อจะเป็นหน่วยซ้ำ ๆ กัน นอกจากนี้ แบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ถูกเพิ่มความสูงทางออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อจากบริเวณทางออกของแก๊สเผาไหม้จริงอีก 1 m เพื่อลดผลกระทบของการคำนวณการไหลย้อนกลับ (reverse flow) ต่อการคำนวณตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ บริเวณทางออกของแก๊สเผาไหม้จริง ดังนั้นแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ จึงมีความกว้าง 0.07 m ความยาว 6.2 m ความสูง 8.2 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผนังท่อด้านนอก 0.055 m และ

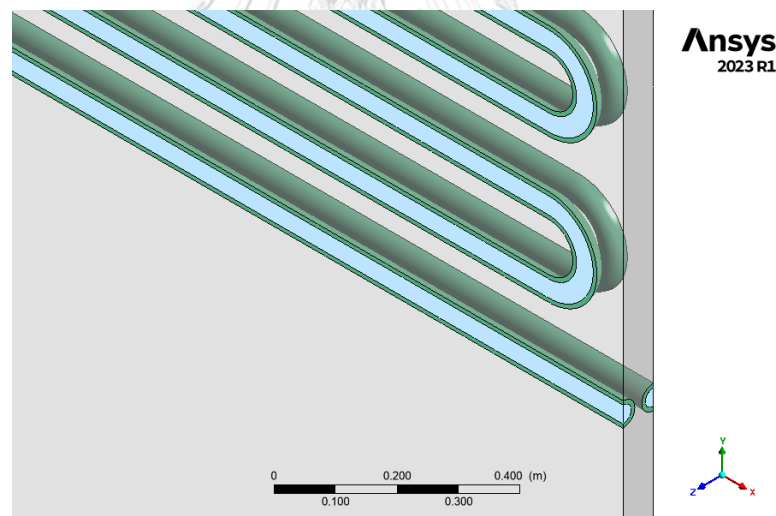
เส้นผ่านศูนย์กลางของผนังท่อด้านใน 0.038 m ดังรูปที่ 3.3 ถึง รูปที่ 3.4 โดยแบบจำลองจะประกอบด้วย บริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้และเถ้า บริเวณผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และ บริเวณการไหลของน้ำป้อนหม้อไอน้ำ



รูปที่ 3.2 ระนาบสมมาตรของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์



รูปที่ 3.3 แบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ที่ได้จากการวาดรูป

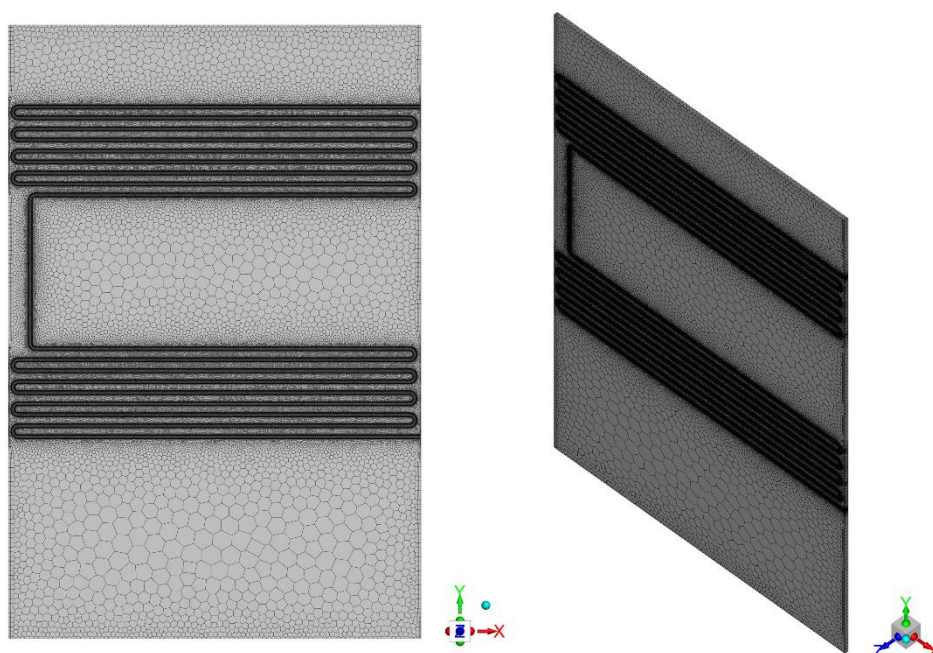


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างภาพขยายด้านข้างของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ แสดงบริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้และเถ้า (สีเขียว) บริเวณการไหลของน้ำป้อน (สีฟ้า) และ บริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (สีเขียวน)

### 3.2.2 การสร้างกริด (grid generation)

แบบจำลองในงานวิจัยนี้ถูกสร้างกริดด้วยเซลล์ลักษณะรูปทรงหกเหลี่ยม (polyhedral mesh) ด้วยโปรแกรม Ansys® Fluent mesher เนื่องจากโครงสร้างอีโคโนไมเซอร์มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ ประกอบด้วย ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กหลายชั้น ระยะห่างระหว่างท่อขนาดเล็กมากเทียบกับบริเวณการไหลของแก๊สทั้งหมด ทำให้ต้องใช้เซลล์การคำนวณ

จำนวนมาก ดังรูปที่ 3.5 โดยทั่วไปเซลล์ลักษณะรูปทรงสามเหลี่ยมจะเป็นรูปทรงที่โปรแกรมแนะนำให้ใช้เป็นหลัก แต่เซลล์ลักษณะรูปทรงหกเหลี่ยม จะประกอบด้วย หน้าเซลล์ที่ติดกับเซลล์อื่นจำนวนมาก ทำให้สามารถสร้างกริดด้วยเซลล์ลักษณะรูปทรงหกเหลี่ยม โดยเซลล์มีความบิดเบี้ยวน้อยกว่าเซลล์รูปทรงสามเหลี่ยม การสร้างกริดในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ด้วยเซลล์ลักษณะรูปทรงหกเหลี่ยมจึงจะช่วยให้คุณภาพการสร้างกริด Skewness มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่โปรแกรม Ansys® Fluent แนะนำ โดยใช้จำนวนเซลล์การคำนวณอย่างเหมาะสม ซึ่งทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในการคำนวณจะถูกใช้อย่างคุ้มค่า ระยะเวลาการคำนวณลดลง และ ความถูกต้องแม่นยำของการคำนวณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.5 การสร้างกริดของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์

### 3.2.3 การเลือกแบบจำลองการคำนวณในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Modeling)

แบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วย ภูมิภาคแก๊สเผาไหม้และภูมิภาคของอนุภาคเถ้าลอยภายนอกท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ภูมิภาคน้ำภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งแบบจำลองจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้และเถ้ากับน้ำป้อนหม้อไอน้ำผ่านผนังท่อที่ทำจากเหล็กคาร์บอน ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของไหลของแก๊สเผาไหม้และเถ้าและการถ่ายโอนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในช่วงสภาวะการไหลคงตัว (steady state flow) โดยอาศัยการคำนวณสมการไม่ต่อเนื่อง (discretized equation) ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) การจำลองอีโคโนไมเซอร์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะพิจารณาจากการแก้สมการอนุรักษ์ปริมาณ

พื้นฐานเป็นหลัก ประกอบด้วย กฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) และ กฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) โดยแบบจำลองนี้จะใช้แบบจำลองการคำนวณสำหรับการพิจารณาอุทกพลศาสตร์และการถ่ายโอนความร้อนภายในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ตามที่แสดงดังตารางที่ 3.3 การจำลองพลศาสตร์ของไหลของอนุภาคเถ้าร่วมกับแก๊สเผาไหม้จะอาศัยแบบจำลองหลายวัฏภาค (multiphase model) โดยใช้แบบจำลองของออยเลอร์-ออยเลอร์ (Eulerian-Eulerian model หรือ two-fluid model) สำหรับการพิจารณาการไหลของแก๊สเผาไหม้ร่วมกับอนุภาคเถ้า แรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับผนังจะถูกพิจารณาด้วยทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการไหลแบบละเอียด (kinetic theory of granular flow, KTGF) การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัฏภาคแก๊สเผาไหม้กับอนุภาคเถ้าจะใช้แบบจำลองของ Gunn (Gunn heat transfer coefficient model) และการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ของแก๊สเผาไหม้กับอนุภาคเถ้าจะใช้แบบจำลองของ Wen and Yu (Wen and Yu drag coefficient model) เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับแบบจำลองที่ประกอบด้วยของไหลและอนุภาคของแข็งเจือจาง การจำลองรูปแบบการไหลของของไหลจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนจากการเคลื่อนที่ของความเค้นเฉือน (Shear Stress Transport k-omega turbulence model) เนื่องจากการไหลภายในระบบเป็นรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนและแบบจำลองต้องการการคำนวณที่มีความแม่นยำสูงในบริเวณใกล้ผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อศึกษาการสะสมของชั้นเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน การศึกษาอุทกพลศาสตร์การไหลขององค์ประกอบต่าง ๆ ของแก๊สเผาไหม้จะถูกคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองการถ่ายโอนขององค์ประกอบต่าง ๆ (species transport model) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายขององค์ประกอบต่าง ๆ ของแก๊สเผาไหม้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.3 แบบจำลองการคำนวณสำหรับการพิจารณาอุทกพลศาสตร์ของไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน

Simulation model	Type
Energy equation	Enabled
Species transport model	Enabled
Viscous model	SST k-omega
Multiphase model	Eulerian-Eulerian
Fluid-solid drag coefficient	Wen and Yu
Fluid-solid heat transfer coefficient	Gunn



การแก้สมการจะใช้วิธีการทำซ้ำ (Iteration method) ด้วยวิธี SIMPLE (Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations) ซึ่งเป็นรูปแบบการคำนวณโดยอาศัยกริดเนื่องในการแก้ระบบสมการพีชคณิต การแก้สมการจะใช้วิธีการทำซ้ำจะทำการคำนวณจนได้ค่าที่ลู่ออกค่าที่เป็นผลเฉลยที่แท้จริงของสมการการคำนวณต่าง ๆ (convergence) ในงานวิจัยนี้การคำนวณในแต่ละกรณีผลลัพธ์การคำนวณจะวนซ้ำ 50,000 ครั้ง จนได้ผลลัพธ์ที่ลู่ออกค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่แท้จริงโดยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยผลลัพธ์การคำนวณวนซ้ำ 50,000 ครั้ง ทำให้ residual ของสมการต่อเนื่อง (continuity equation) มีค่าน้อยกว่า 0.001 ได้ตามที่โปรแกรมแนะนำในทุกกรณี

### 3.2.4 การตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริด (grid independence)

เนื่องจากอีโคโนไมเซอร์ประกอบด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองจะต้องแบ่งเซลล์การคำนวณของแบบจำลองจำนวนมาก และส่งผลต่อเนื่องต่อระยะเวลาการคำนวณและปริมาณทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่ต้องใช้ในการคำนวณจำนวนมากเช่นกัน การตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริดจะช่วยให้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำเพียงพอในการศึกษาทุกพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายโอนความร้อน โดยใช้ระยะเวลาในการคำนวณ รวมถึงปริมาณทรัพยากรคอมพิวเตอร์อย่างเหมาะสม การตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริดจะทำได้โดยการปรับขนาดเซลล์เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ประกอบด้วยจำนวนเซลล์แตกต่างกัน โดยการศึกษาจะใช้วิธีการจำลองและสภาวะค่าขอบการทำงานของอีโคโนไมเซอร์เหมือนกันทุกกรณีและการศึกษาจะเริ่มจากการแบ่งเซลล์การคำนวณด้วยเซลล์ขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองที่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนน้อยเป็นกรณีแรก แล้วการแบ่งเซลล์การคำนวณของแบบจำลองจะเพิ่มจำนวนเซลล์ขึ้นในแต่ละกรณี การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์จะเลือกใช้แบบจำลองที่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนน้อยที่สุดที่ทำให้การเพิ่มจำนวนเซลล์ส่งผลทำให้ความแตกต่างของผลการคำนวณสุดท้ายอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 ในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณความเร็วปลายของแก๊สเผาไหม้บริเวณรอบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากแบบจำลองที่ประกอบด้วยเซลล์ 2,484,229 เซลล์ 3,245,787 เซลล์ 4,086,693 เซลล์ และ 6,157,046 เซลล์

### 3.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model validation)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นหนึ่งในขั้นตอนการศึกษาที่จะช่วยตรวจสอบผลการจำลองของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ให้สามารถทำนายผลอุทกพลศาสตร์และการถ่ายโอนความร้อนได้สอดคล้องกับที่เกิดขึ้นจริงภายในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

ข้อมูลจากบริษัท อินทิเกรตเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน ซึ่งผลการคำนวณตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ในกรณีพื้นฐาน เช่น อัตราการไหลของวัฏภาคต่าง ๆ อุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้ ควรมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลสภาวะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

### 3.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อน

การวางแผนและออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ( $2^k$  factorial experiment design) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะการกระจายการสะสมของเถ้าความหนาชั้นสะสมเถ้า อัตราการสึกกร่อน และ อัตราการกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยตัวแปรต้นเป็นตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ อันได้แก่ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า และ อัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า การทดลองจะดำเนินการโดยกำหนดค่าตัวแปรต้นดังแสดงในตารางที่ 3.4

ช่วงที่อุณหภูมิป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้และอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้ามีค่าต่ำจะเป็นสภาวะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์เมื่อหม้อไอน้ำฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียนเดินเครื่องที่กำลังต่ำ และ อุณหภูมิป้อนเข้าของน้ำมีค่าต่ำเมื่อเครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำหยุดการทำงาน ซึ่งจะส่งผลต่อแรงขับของความแตกต่างของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเกาะของเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเริ่มต้น โดยอัตราการไหลโดยมวลจะส่งผลต่อความเร็วของอนุภาคเถ้า พฤติกรรมการไหลของอนุภาคเถ้า และ ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนภายในระบบด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรดำเนินการในกรณีศึกษาต่าง ๆ

กรณี ที่	ตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ		
	อุณหภูมิแก๊สป้อนเข้า (K)	อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (K)	ความเร็วแก๊ส (m/s)
1	763.15	508.04	2.203
2	763.15	508.04	1.640
3	763.15	453.15	2.203
4	763.15	453.15	1.640
5	573.15	508.04	2.203
6	573.15	508.04	1.640
7	573.15	453.15	2.203
8	573.15	453.15	1.640

การทดลองจะปรับเปลี่ยนตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ และเก็บข้อมูลลักษณะการกระจายของ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ความเร็วแก๊สเผาไหม้ ความเร็วเข้า ความเค้นเฉือนที่ผนัง และ ลักษณะการกระจายการสะสมของแก๊สเผาไหม้ต่าง ๆ และ เข้า การวิเคราะห์ผลจากการจำลองและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ข้างต้น กับผลการทดลองที่ใช้ในการศึกษาความหนาชั้นสะสมเข้า อัตราการสึกกร่อน และ อัตราการกัดกร่อน ในอุปกรณ์ที่ศึกษา เพื่อทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์ใน สถานะการทำงานแบบต่าง ๆ จากการศึกษากลไกการเกิดความเสียหายของผิวท่อโลหะสามารถ เกิดขึ้นได้หลายสาเหตุขึ้นอยู่กับสถานะการทำงานของหม้อไอน้ำ ในงานวิจัยนี้จะยึดหลักการวิเคราะห์ ตามแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสึกกร่อนและการกัดกร่อนข้างต้น โดยจะทำการแบ่ง พิจารณาการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ กับความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนและ การกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์เป็น 3 สาเหตุหลัก ได้แก่ การกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจาก กรดกำมะถัน การกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวน้ำของสารประกอบคลอไรด์ และ การสึกกร่อนแบบ ชัดสีทางด้านเปลวไฟ

จากการศึกษาในเชิงทฤษฎี เมื่อองค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้และความดันคงที่ จะพบว่า ปัจจัยที่สำคัญหลัก ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน คือ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้บริเวณใกล้ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่า อุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของกรดกำมะถันที่มีฤทธิ์กัดกร่อนจะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนทาง ด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน ซึ่งอุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของกรดกำมะถันสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (2.4) ยิ่งอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ต่ำจะยิ่งทำให้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนถูกกัดกร่อนได้จาก แก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรดและความชื้นที่ควบแน่นลงมาสัมผัสกับผิวท่อ [1]

การทำงานของหม้อไอน้ำร่วมกับเชื้อเพลิงชั้นไม้ที่มีองค์ประกอบคลอรีนสูงจะทำให้เสี่ยงต่อ การเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน การเหนียวน้ำของสารประกอบคลอไรด์ และ เถ้าหลอม ซึ่งการยึดเกาะของเถ้าที่ประกอบด้วยสารประกอบคลอไรด์และเกิดการทำปฏิกิริยา ของสารประกอบคลอไรด์บนผิวท่อทำให้เกิดแก๊สคลอรีนเพิ่มขึ้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อน อย่างรุนแรง ยิ่งเกิดการหลอมของเถ้าจะยิ่งทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาของสารประกอบคลอไรด์และ การทำปฏิกิริยาทำลายชั้นฟิล์มออกไซด์ที่จะปลดปล่อยแก๊สคลอรีนออกมาแพร่กระจายบนผิวท่อและ ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้มากขึ้น จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะสามารถสรุปได้ว่า ความรุนแรงของการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเถ้าและอุณหภูมิการทำงาน เมื่อการเกาะของ ชั้นเถ้าที่ประกอบด้วยสารประกอบคลอไรด์สูงหนาขึ้นจะพบชั้นการกัดกร่อนที่หนาขึ้น [34]

การกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์จะรุนแรงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [33] และถึงแม้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ หากอุณหภูมิมิบริเวณ การยึดเกาะของเถ้าสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่จุดยูเทคติกของสารประกอบคลอไรด์ ดังแสดงตาราง ที่ 2.1 จะยิ่งเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากเถ้าหลอมซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้นอีก ด้วย [15]

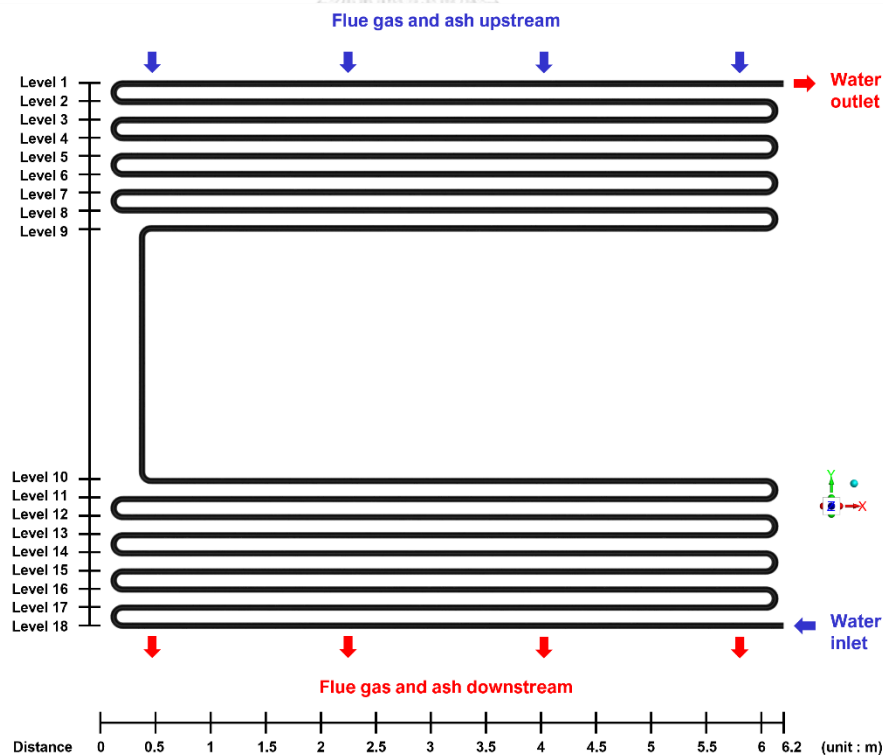
การสึกกร่อนเนื่องจากการชนของอนุภาคเถ้าลอยหรือการสึกกร่อนแบบขัดสีทางด้านเปลวไฟ จะยึดตามผลการศึกษาโดย S. K. Das และคณะ [19] ที่ทำการศึกษาผลการชนของอนุภาคเถ้าลอย บนผิวโลหะเหล็กคาร์บอนเช่นเดียวชนิดวัสดุของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ที่สนใจ โดยอัตราการการสึกกร่อนจะขึ้นอยู่กับความเร็วกระแทกของอนุภาคเถ้าลอยและอุณหภูมิที่ทำให้เกิด ความเสียหายของผิวท่อโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยอาศัยการพิจารณาจากอุทกพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายโอนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ที่จะได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม Ansys® Fluent ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะเป็นผลการคำนวณตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในโดเมนของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ที่สร้างขึ้น การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนอ้างอิงจากผลการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณตัวแปรดำเนินการดังกล่าวกับตำแหน่งภายในโดเมนจะช่วยให้สามารถนำมาใช้ในการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนบนพื้นผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการกำหนดระดับชั้นท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์และตำแหน่งตามแกน x เพื่อใช้ในการอ้างอิงถึงตำแหน่งบนพื้นผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกำหนดระดับชั้นท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการวิเคราะห์

#### 4.1 ผลการตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริด

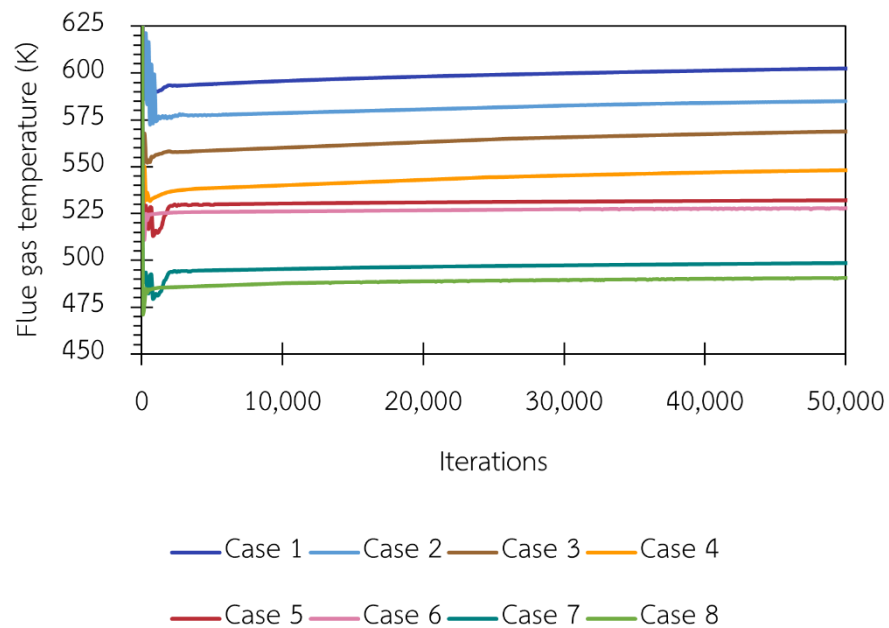
การตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริดจะช่วยให้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ได้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องแม่นยำ โดยการสร้างกริดในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ด้วยเซลล์ลักษณะรูปทรงหกเหลี่ยมจึงจะช่วยให้คุณภาพการสร้างกริด (Skewness) มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่โปรแกรม Ansys® Fluent แนะนำให้มีค่าไม่เกิน 0.85 เพื่อให้รูปทรงของกริดที่สร้างขึ้นมีรูปทรงใกล้เคียงกับรูปทรงของกริดในอุดมคติ ซึ่งจะช่วยให้การคำนวณระหว่างจุดมีความแม่นยำ และการใช้จำนวนเซลล์การคำนวณอย่างเหมาะสม จะช่วยลดระยะเวลาการคำนวณและประหยัดการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ได้อย่างคุ้มค่า ในงานวิจัยนี้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์จะเลือกใช้แบบจำลองที่ประกอบด้วยเซลล์การคำนวณจำนวนน้อยที่สุดที่ผลลัพธ์มีความถูกต้องอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 5) จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณความเร็วปลายของแก๊สเผาไหม้บริเวณรอบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนระดับชั้นท่อที่ 18 ซึ่งจะเป็นตัวแปรดำเนินการที่สำคัญต่อการศึกษาศักยภาพการถ่ายเทความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ โดยการตรวจสอบความเป็นอิสระจากการสร้างกริดดำเนินการโดยการจำลองแบบจำลองที่ประกอบด้วยจำนวนเซลล์ 2,048,521 เซลล์ 3,245,787 เซลล์ 4,086,693 เซลล์ และ 6,157,046 เซลล์ ตามลำดับ โดยคุณภาพกริด skewness ของทุกกรณีมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่โปรแกรมแนะนำ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้ผลการคำนวณจากแบบจำลองที่มีจำนวนเซลล์ต่าง ๆ โดยอาศัยการวิเคราะห์ความเร็วแก๊สเผาไหม้เฉลี่ยรอบบริเวณระดับชั้นท่อที่ 18 จะพบว่า เมื่อแบบจำลองประกอบด้วยจำนวนเซลล์มากขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณลดลง การเพิ่มจำนวนเซลล์ในแบบจำลองการคำนวณจาก 4,086,693 เซลล์ เป็น 6,157,046 เซลล์ ส่งผลให้ผลการคำนวณสุดท้ายจะมีการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณร้อยละ 3.3 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้น แบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ที่จะถูกใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อการศึกษาแก้ไขปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยเซลล์ 4,086,693 เซลล์

ตารางที่ 4.1 ความแตกต่างของผลการจำลองด้วยการสร้างกริดด้วยเซลล์ขนาดต่าง ๆ

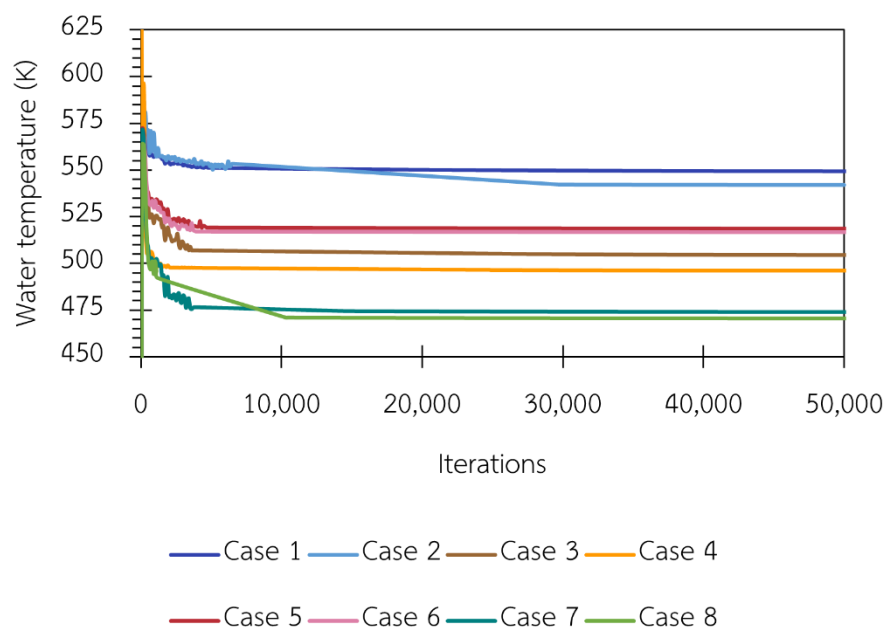
จำนวนเซลล์ (cells)	คุณภาพกริด Skewness	ความเร็วแก๊สเผาไหม้เฉลี่ยรอบบริเวณระดับชั้นท่อที่ 18 (m/s)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณ
2,484,229	0.81	4.851	-
3,245,787	0.80	3.704	23.6
4,086,693	0.80	4.327	16.8
6,157,046	0.79	4.183	3.3

#### 4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การพิจารณาพฤติกรรมของไหลและการถ่ายโอนความร้อนภายในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์จะพิจารณาเป็นแบบระบบของไหลหลายวัฏภาค ประกอบด้วย แก๊สไอเสียบกับแก๊สลอยภายนอกท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน และ น้ำป้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ในช่วงสภาวะการไหลคงตัวได้ (steady state) การแก้สมการจะใช้วิธีการทำซ้ำ (Iteration method) ด้วยวิธีการแก้สมการแบบ (Semi-implicit Method for Pressure Linked Equation, SIMPLE) โดยอาศัยกริดเชื่อมโยงในการแก้ระบบสมการพีชคณิต การแก้สมการจะใช้วิธีการทำซ้ำจะทำการคำนวณจนได้ค่าที่ลู่เข้าสู่ค่าผลเฉลยที่แท้จริงของสมการการคำนวณต่าง ๆ (convergence) จากผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 จะพบว่าผลการคำนวณหลังจากการคำนวณวนซ้ำ 40,000 ครั้ง ถึง 50,000 ครั้ง อุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้และอุณหภูมิปลายของน้ำมีผลการคำนวณเป็นแนวโน้มเดียวกันและเริ่มมีค่าคงที่ ดังนั้น ถึงแม้ว่าจะทำการคำนวณวนซ้ำด้วยจำนวนครั้งที่มากขึ้นและใช้ระยะเวลาการคำนวณนานขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงใกล้เคียงกัน residual ของสมการต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่า 0.001 ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่แท้จริงและค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ในงานวิจัยนี้การคำนวณจึงจะทำซ้ำ 50,000 ครั้งจนกระทั่งผลลัพธ์การคำนวณลู่เข้าสู่ค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่แท้จริงและค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จากนั้น แบบจำลองอีโคโนไมเซอร์นี้จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ต่อไป



รูปที่ 4.2 ผลการคำนวณวนซ้ำแต่ละครั้งของอุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้ในกรณีพื้นฐาน



รูปที่ 4.3 ผลการคำนวณซ้ำแต่ละครั้งของอุณหภูมิปลายของน้ำป้อนในกรณีพื้นฐาน

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นหนึ่งในขั้นตอนการศึกษาที่จะช่วยตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองว่าสามารถใช้เป็นตัวแทนอุปกรณ์ได้จริงหรือไม่ ข้อมูลจากบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน เช่น อัตราการไหลของวัฏภาคต่าง ๆ อุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้ ซึ่งผลที่ได้ควรมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลสถานะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ที่ได้จากบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด ผลการจำลองของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์สามารถทำนายผลอุทกพลศาสตร์และการถ่ายโอนความร้อนได้สอดคล้องกับที่เกิดขึ้นจริงภายในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

จากการเปรียบเทียบค่าระหว่างผลจากการจำลองอีโคโนไมเซอร์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในกรณีพื้นฐานซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 กับ ผลจากการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่แสดงค่าในตารางที่ 3.1 พบว่า ผลการคำนวณอัตราการไหลป้อนเข้าและอัตราการไหลปลายของแต่ละวัฏภาคมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการไหลโดยมวลของแต่ละวัฏภาค อุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้ 602 K มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้สูงสุด 593 K ของผลการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ โดยผลจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีค่าความผิดพลาดร้อยละ 1.48 ซึ่งค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 และอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้น จากการสร้างแบบจำลองและวิธีการจำลองดังที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 3 ทำให้ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้จะถูกนำมาใช้ใน



การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนต่อไป

นอกจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ จากข้อมูลสถานะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์จริงแล้ว ในงานวิจัยนี้การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองยังถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) อุทกพลศาสตร์ของไหลภายในอีโคโนไมเซอร์ และ 2) การถ่ายโอนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ โดยจะพิจารณาผลลัพธ์การจำลองที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์เปรียบเทียบกับทฤษฎีพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายโอนความร้อน และเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำในการศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นอย่างซับซ้อนในอีโคโนไมเซอร์ เช่น ระบบฟลูอิดเซชันแบบเบาบางของวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง การสะสมถ้ำบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และ การถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลสวนทางภายในอีโคโนไมเซอร์

#### 4.2.1 อุทกพลศาสตร์ของไหลภายในอีโคโนไมเซอร์ (hydrodynamic behaviors)

ผลการจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหลในแต่ละกรณี พบว่า แก๊สเผาไหม้และเถ้าลอยไหลจากด้านบนลงด้านล่างในบริเวณภายนอกของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่น้ำป้อนจะไหลภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าจากท่อระดับชั้นที่ 18 ไหลขึ้นสู่ท่อระดับชั้นที่ 1 และออกจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการไหลสวนทางของอีโคโนไมเซอร์ อัตราการไหลปลายโดยมวลของแต่ละวัฏภาคมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการไหลโดยมวลป้อนเข้าของแต่ละวัฏภาคในทุกกรณีศึกษา ผลการจำลองที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นไปตามกฎอนุรักษ์มวลในทุกกรณี ดังตารางที่ 4.2 แต่อย่างไรก็ตาม ผลของการคำนวณซ้ำแต่ละครั้งทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสมการการคำนวณ หรือค่า residual มีค่าลดลง กล่าวคือ ผลลัพธ์การคำนวณมีค่าเข้าสู่ผลลัพธ์การคำนวณสุดท้าย จากผลการจำลองในงานวิจัยนี้พบว่า ผลการคำนวณซ้ำที่ 50,000 ครั้งในทุกกรณี จะมีค่า residual น้อยกว่า  $10^{-3}$  เป็นผลให้อัตราการไหลปลายของวัฏภาคเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าอัตราการไหลขาเข้า  $1 \times 10^{-4}$  kg/s ซึ่งมีค่าเล็กน้อยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณอัตราการไหลปลายของวัฏภาคต่าง ๆ ในแต่ละกรณี

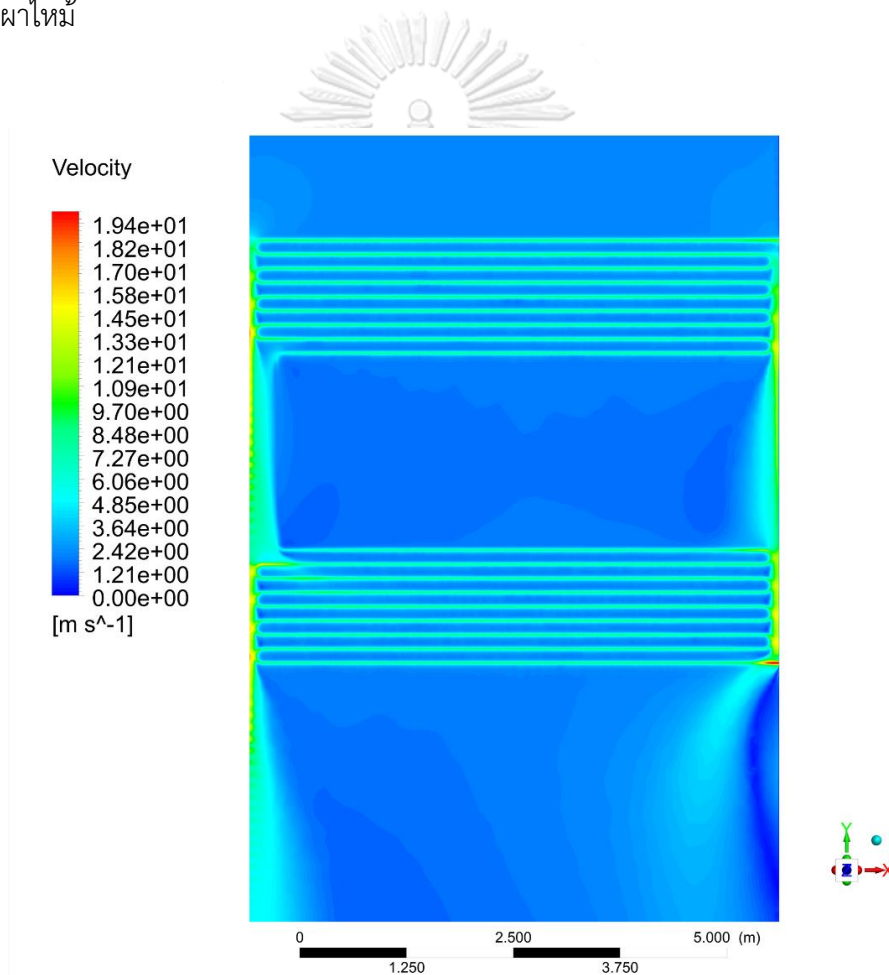
กรณีที่	อัตราการไหลป้อนเข้าของวัฏภาคต่าง ๆ (kg/s)			อัตราการไหลปลายของวัฏภาคต่าง ๆ (kg/s)		
	แก๊สเผาไหม้	เถ้า	น้ำป้อน	แก๊สเผาไหม้	เถ้า	น้ำป้อน
1	1.005	$2.618 \times 10^{-3}$	0.293	1.005	$2.617 \times 10^{-3}$	0.293
2	0.748	$2.618 \times 10^{-3}$	0.293	0.748	$2.617 \times 10^{-3}$	0.293
3	1.005	$2.618 \times 10^{-3}$	0.293	1.005	$2.617 \times 10^{-3}$	0.293
4	0.748	$2.618 \times 10^{-3}$	0.293	0.748	$2.617 \times 10^{-3}$	0.293
5	1.005	$2.618 \times 10^{-3}$	0.293	1.005	$2.617 \times 10^{-3}$	0.293
6	0.748	$2.618 \times 10^{-3}$	0.293	0.748	$2.617 \times 10^{-3}$	0.293
7	1.005	$2.618 \times 10^{-3}$	0.293	1.005	$2.617 \times 10^{-3}$	0.293
8	0.748	$2.618 \times 10^{-3}$	0.293	0.748	$2.617 \times 10^{-3}$	0.293

โดยทั่วไปความเร็วการเคลื่อนที่ของของไหลจะแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ความเร็วแก๊สสูงขึ้นเมื่อไหลผ่านบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง และการเปลี่ยนรูปร่างของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (pattern) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงวิธีการไหลและความเร็วของแก๊สเผาไหม้ได้เช่นกัน รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายของค่าความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่บริเวณข้อต่อรูปตัวยู ในรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการไหลของแก๊สเผาไหม้บริเวณใกล้ส่วนโค้งของข้อต่อรูปตัวยูถูกบังคับทิศทางการไหลตามรูปร่างของข้อต่อรูปตัวยู แก๊สเผาไหม้มีความเร็วสูงเมื่อวิ่งผ่านบริเวณท่อรูปตัวยูซึ่งเป็นบริเวณที่พื้นที่หน้าตัดสำหรับการไหลของแก๊สเผาไหม้เล็กลง ทำให้ความเร็วแก๊สเผาไหม้สูงขึ้น ขณะที่ผลของแรงอันตรกิริยาระหว่างผนังกับอนุภาคและอนุภาคกับอนุภาคทำให้แก๊สและอนุภาคเถ้าบางส่วนจะไหลตกลงตามแนวทิศ -y ดังเดิม และบางส่วนยังคงไหลด้วยความเร็วและทิศทางตามส่วนโค้งของข้อต่อรูปตัวยูเช่นเดิม ทำให้จะเห็นได้ว่า หลังจากผ่านส่วนโค้งของข้อต่อรูปตัวยูจะมีการกระจายของแก๊สเผาไหม้ไหลด้วยความเร็วสูงเป็นวงกว้าง นอกจากนี้กรณีที่การไหลของแก๊สผ่านบริเวณ ข้อต่อรูปยูที่มีพื้นที่หน้าตัดแคบลงทำให้ความเร็วแก๊สสูงขึ้นมากกว่ากรณีที่แก๊สไหลผ่านบริเวณ ระหว่างท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่วางในแนวระนาบของทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้เป็นระดับชั้นท่อต่าง ๆ

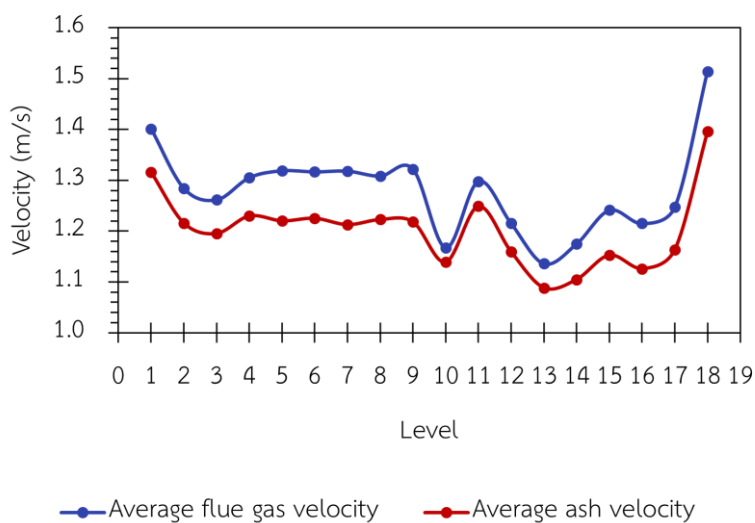
นอกจากนี้จากการพิจารณาการอนุรักษโมเมนตัมร่วมกับแรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับผนังด้วยทฤษฎีกลศาสตร์ของการไหลแบบละเอียดจะพบว่าเกิดการสูญเสียพลังงานของอนุภาคของแข็งบางส่วนเนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับอนุภาคของแข็งและการชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนัง และยังพบว่า การกระจายของ

ค่าความเร็วของอนุภาคแก๊สมีลักษณะคล้ายคลึงกับการกระจายของค่าความเร็วของแก๊สเผาไหม้ภายในแบบจำลอง

ความเร็วของแก๊สจึงใกล้เคียงกับความเร็วของแก๊สเผาไหม้ โดยความเร็วของแก๊สจะยังคงมีค่าน้อยกว่าความเร็วของแก๊สเผาไหม้เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการฟลูอิดไดเซนแบบแก๊ส-ของแข็งของแก๊สเผาไหม้กับเถ้าลอยภายในอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งจะอยู่ในช่วงฟลูอิดไดเซนแบบเบาบาง แก๊สเผาไหม้จะเป็นตัวพาการไหลของอนุภาคเถ้าลอยซึ่งจะกระจายเจือจางอยู่ในแก๊สตัวพาภายในอีโคโนไมเซอร์ ทำให้อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมการไหลคล้ายของไหลในแก๊สเผาไหม้



รูปที่ 4.4 การกระจายของความเร็วของอนุภาคแก๊สเผาไหม้ภายในแบบจำลอง

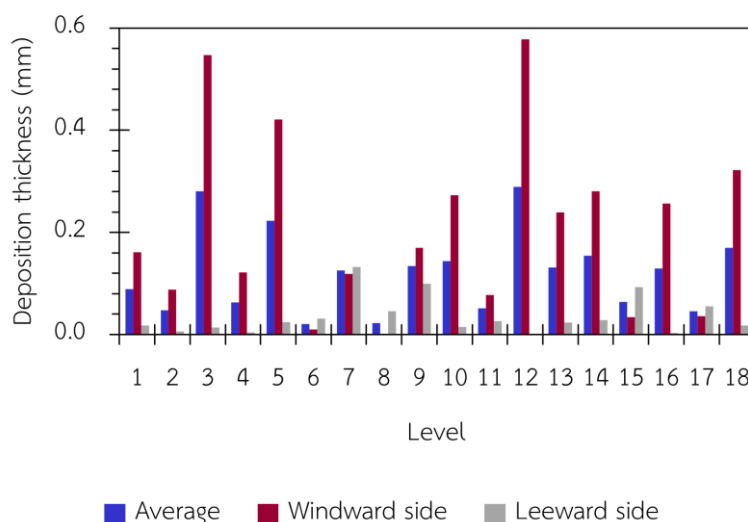


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ความเร็วแก๊สเผาไหม้กับความเร็วเข้าบริเวณพื้นที่หน้าตัดการไหลของแก๊สเผาไหม้ตามระดับชั้นท่อน้ำของอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน

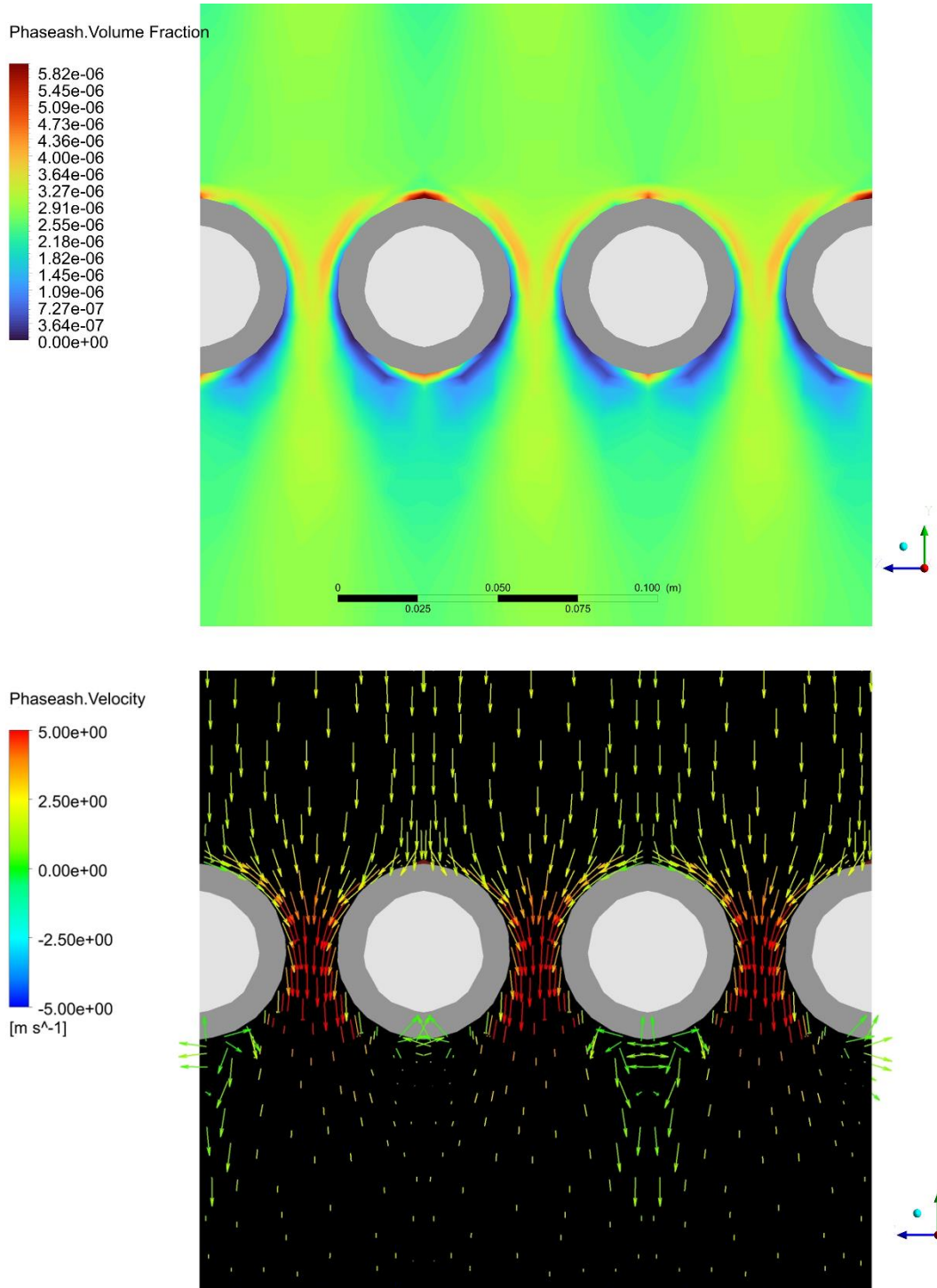
จากผลการจำลองการกระจายตัวของเถ้าบนผิวท่อและนำไปสู่การคำนวณความหนาของเถ้าสะสม ณ ตำแหน่งใด ๆ บนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนบนแต่ละระดับชั้น โดยอาศัยการพิจารณาสัดส่วนโดยปริมาตรของภูมิภาคเถ้าเหนือผิวท่อ ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในโดเมน ซึ่งจะแสดงไว้ในภาคผนวก

จากผลการศึกษาของ Hao Guo และคณะ [34] โดยการจำลองพลวัตการกระจายความหนาของชั้นสะสมของอนุภาคเถ้าบนท่อโปรบรูปทรงกระบอกขนาดเล็กบริเวณใกล้เคียงกับซูเปอร์ฮีทเทอร์ด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการสร้างสมการการคำนวณ (User Defined Function, UDF) สำหรับการสะสมของเถ้าและการกัดกร่อนที่ผิวท่อได้แสดงผลในรูปที่ 2.8 ซึ่งได้ศึกษาโดย Hao Guo และคณะ สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดการสะสมเถ้าและการกัดกร่อนผิวท่อได้อย่างละเอียดสำหรับช่วงเวลาใด ๆ จนถึงสภาวะการไหลคงตัว แต่เนื่องจากระบบอีโคโนไมเซอร์เป็นระบบโครงสร้างขนาดใหญ่และซับซ้อนจึงไม่สามารถทำการศึกษารวมเถ้าอย่างละเอียดได้ตามการศึกษาของ Hao Guo และคณะ เพราะต้องจำกัดทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่จะต้องใช้ในการคำนวณสมการพีชคณิตที่จำเป็นต่อแบบจำลอง แต่ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ในช่วงสภาวะการไหลคงตัวในงานวิจัยนี้พบว่า การสะสมเถ้าบนผิวท่อจะเกิดที่บริเวณด้านต้นลม (windward side) มากที่สุด รองลงมาจะเป็น ด้านใต้ลม (Leeward side) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ ด้านข้าง (side face) จะมีการสะสมเถ้าบนผิวท่อบางที่สุด เนื่องจากแก๊สเผาไหม้ไหลด้วยความเร็วสูงบริเวณผิวท่อด้านข้างทำให้เกิดการเสียดสีผิวท่อทำให้มีการสะสมเถ้าบนผิวท่อด้านข้างบางที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโดย Hao Guo และคณะ

โดยแบบจำลองสามารถแสดงถึงทิศทางการไหลของอนุภาคเถ้าและการสะสมเถ้าบนผิวท่อในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่มีการสะสมเถ้าบนผิวท่อ ความเร็วและทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคเถ้าจะเคลื่อนที่จากทางด้านบนลงด้านล่างตามทิศทางของแรงโน้มถ่วงในแนวแกน  $y$  ขณะที่ในกรณีที่เกิดการสะสมเถ้าบนผิวท่อด้านด้านบนและใต้ลมเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งด้วยการแพร่ การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งด้วยความเฉื่อยทำให้เกิดการชนกระแทกและการชนเนื่องจากกระแสไหลวน ส่งผลให้อนุภาคเถ้าลอยเคลื่อนที่หลุดออกจากแนวการไหลของแก๊สเผาไหม้ในกระแสหลัก (mainstream) และการไหลวนมายึดเกาะบริเวณผิวท่อได้ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการยึดเกาะของชั้นเถ้าทั่วไป [2] จากผลการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการสะสมเถ้าที่เกิดขึ้นบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากผลการจำลองกับผลการศึกษาโดย Hao Guo และคณะ ช่วยให้สามารถนำแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ที่สร้างขึ้นไปใช้ในการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสะสมเถ้าบนผิวท่อและนำไปสู่การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสะสมกับความหนาของชั้นการกัดกร่อน ดังรูปที่ 2.8 เมื่อความหนาของชั้นสะสมเถ้าบนผิวท่อหนาขึ้น สารประกอบคลอไรด์สามารถทำปฏิกิริยากับฟิล์มออกไซด์ป้องกันการกัดกร่อนบนผิวท่อ ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (2.12) และปฏิกิริยาที่ (2.13) ทำให้ความหนาของชั้นการกัดกร่อนจะหนาขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อฟิล์มออกไซด์ป้องกันการกัดกร่อนบนผิวท่อถูกทำลาย จะทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผิวท่อและทำให้ผิวท่อโลหะเกิดความเสียหายได้มากขึ้น

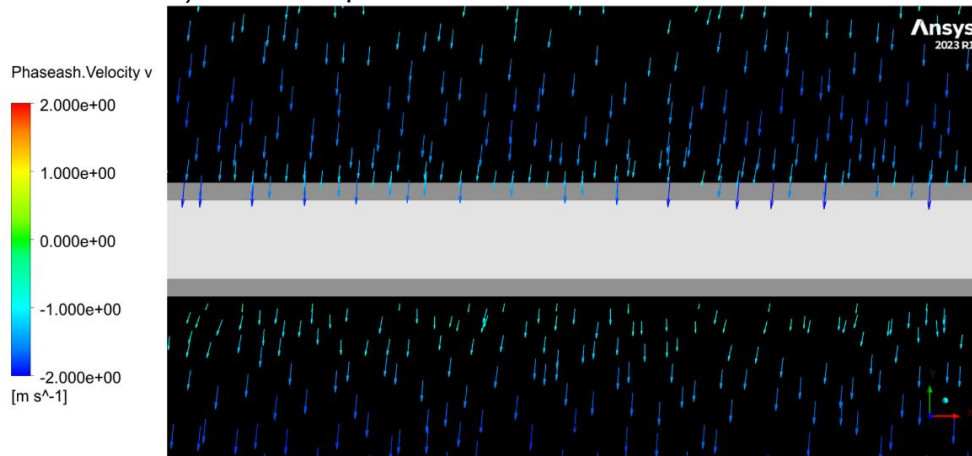


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสะสมเถ้าเฉลี่ยกับตำแหน่งบนผิวท่อน้ำตามระดับชั้นท่อน้ำของอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน

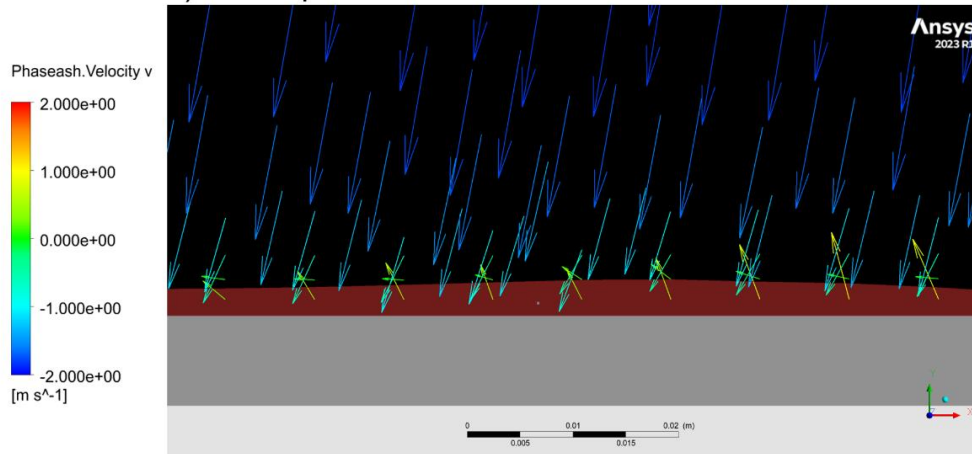


รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการสะสมฝ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากภาพด้านตัดขวางท่อ

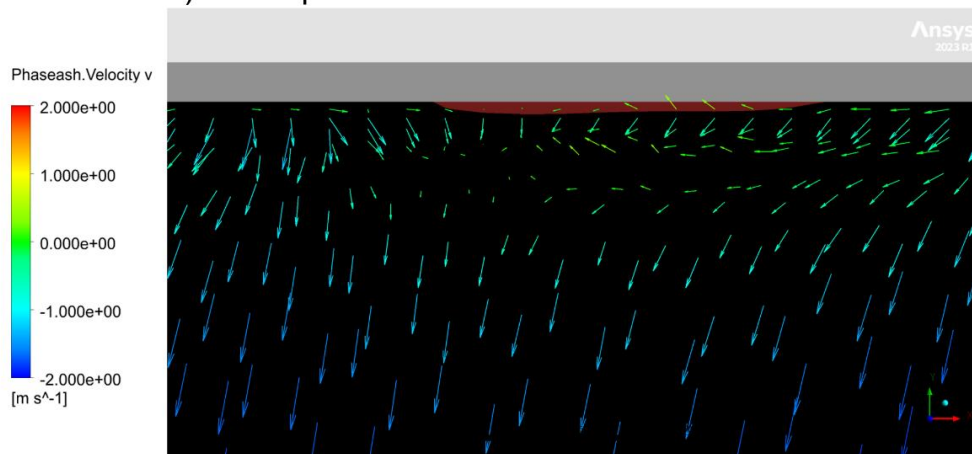
## 1) No ash deposition



## 2) Ash deposition on windward side



## 3) Ash deposition on leeward side



รูปที่ 4.8 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของเถ้าบนผิวท่อ 1) กรณีไม่มีชั้นสะสมเถ้าบนผิวท่อ 2) กรณีมีชั้นสะสมเถ้าบนผิวท่อด้านต้นลม และ 3) กรณีมีชั้นสะสมเถ้าบนผิวท่อด้านใต้ลม เมื่อแก๊สเผาไหม้ไหลจากด้านบนลงด้านล่างตามทิศ -y

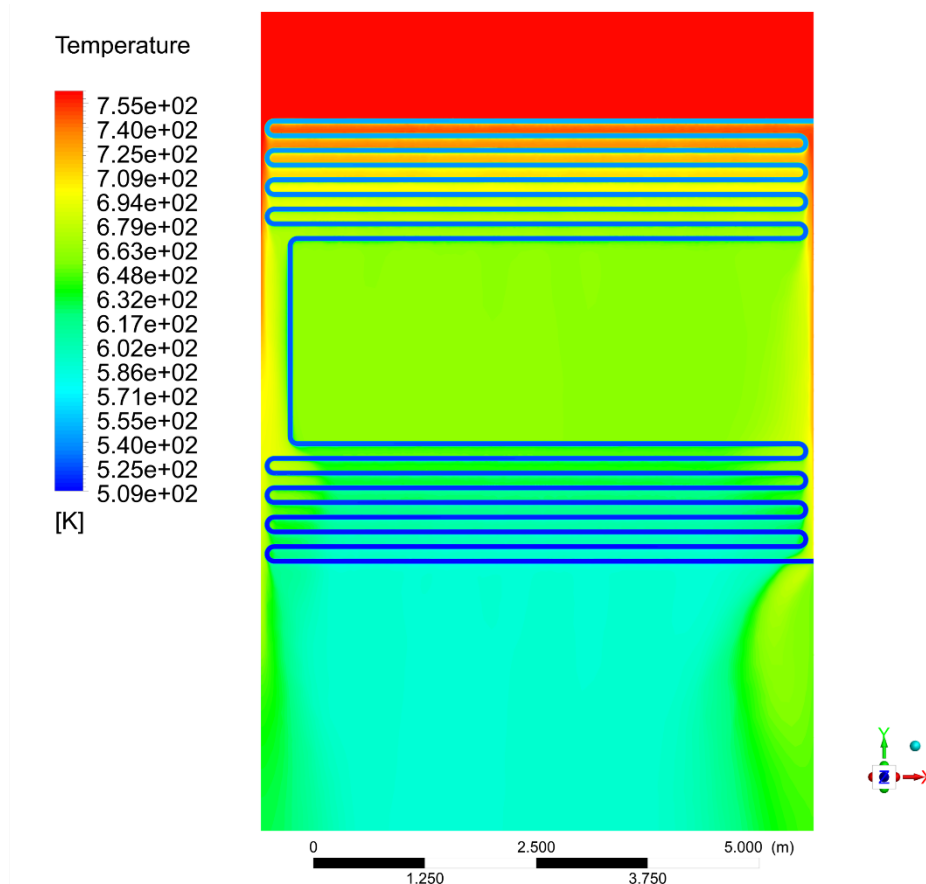
#### 4.2.2 การถ่ายโอนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ (heat transfer behaviors)

การถ่ายโอนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงกับน้ำป้อนอุณหภูมิต่ำ ทำให้อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ลดลงและอุณหภูมิน้ำรับความร้อนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พลังงานความร้อนถ่ายโอนจากแก๊สเผาไหม้ไปยังน้ำรับความร้อน ซึ่งอุณหภูมิของแต่ละวัฏภาคในแต่ละกรณีจะมีค่าแตกต่างกันเป็นผลของแรงขับจากผลต่างของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้กับน้ำป้อนและอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ในระบบอีโคโนไมเซอร์ที่สนใจ การไหลของน้ำป้อนจะถูกป้อนเข้าจากท่อระดับชั้นที่ 18 และไหลออกทางท่อระดับชั้นที่ 1 เป็นรูปแบบสวนทางการไหลกับแก๊สเผาไหม้ด้านนอกผิวท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน แก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงจะไหลเข้าสัมผัสกับท่อในชั้นที่ 1 ลงมายังท่อในชั้นที่ 18 ซึ่งเป็นชั้นสุดท้ายของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนออกจากระบบ จากรูปที่ 4.9 จะพบว่าแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามทิศทางการไหลจากด้านบนลงด้านล่างของอีโคโนไมเซอร์ โดยบริเวณข้อต่อรูปตัวยูจะพบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ ทำให้แก๊สเผาไหม้ยังคงมีอุณหภูมิสูงมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ขณะที่อุณหภูมิของน้ำป้อนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากท่อระดับชั้นที่ 18 ขึ้นระดับชั้นท่อที่ 1

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิปลายของวัฏภาคต่าง ๆ ในแต่ละกรณี

กรณีที่	อุณหภูมิป้อนเข้าของวัฏภาคต่าง ๆ (K)		อุณหภูมิปลายของวัฏภาคต่าง ๆ (K)		
	แก๊สเผาไหม้และเถา	น้ำป้อน	แก๊สเผาไหม้	เถา	น้ำป้อน
1	763.15	508.04	601.92	601.92	549.22
2	763.15	508.04	584.77	584.81	542.09
3	763.15	453.15	568.26	568.26	504.58
4	763.15	453.15	547.65	547.66	495.96
5	573.15	508.04	532.02	532.02	518.55
6	573.15	508.04	527.59	527.66	516.73
7	573.15	453.15	498.37	498.37	473.90
8	573.15	453.15	490.39	490.43	470.60

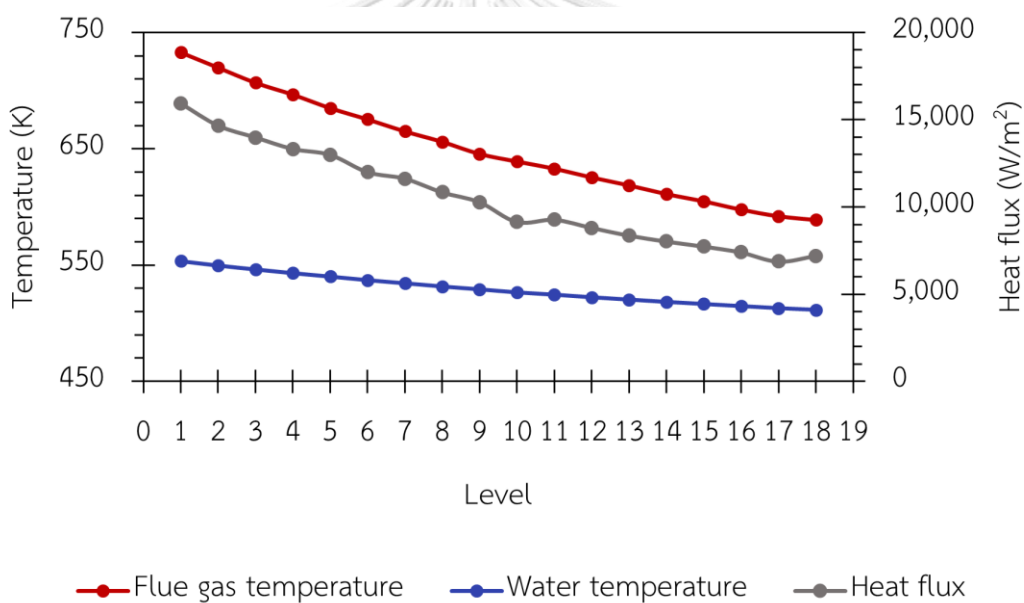




รูปที่ 4.9 การกระจายของอุณหภูมิของวัฏภาคแก๊สเผาไหม้ภายในแบบจำลอง

ตามทฤษฎีหลักการการถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลสวนทาง จะพบว่า เมื่อระบบไม่เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนคงที่ ไม่ขึ้นกับระยะทางของการไหล ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลอุณหภูมิสูงกับของไหลอุณหภูมิต่ำสำหรับการไหลรูปแบบการไหลแบบไหลข้ามและสวนทาง ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดแนวการเคลื่อนที่และรวมถึงปริมาณความร้อนถ่ายโอนระหว่างของไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากผลการจำลองการถ่ายโอนความร้อนภายในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ที่สร้างขึ้น พบว่า ถึงแม้ว่าอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ภายในระบบมีค่าเท่า ๆ กันตามกฎอนุรักษ์มวลทั้งระบบและพิจารณาแบบจำลองด้วยสมมติฐานว่า ระบบไม่เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้และอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าระบบเฉลี่ยในแต่ละชั้นท่อแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยตามทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้เป็นหลัก อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ลดลงและอุณหภูมิน้ำรับความร้อนจากชั้นท่อที่ 1 ถึง 18 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้กับอุณหภูมิน้ำรับความร้อนลดลงตามทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้ และ อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลง

ตามทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้ ผลการจำลองดังกล่าวเป็นผลจากค่าความจุความร้อนของน้ำมีค่าสูงกว่าค่าความจุความร้อนของแก๊สเผาไหม้มาก จากหลักการการถ่ายโอนความร้อน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ค่าความจุความร้อนของสาร และ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของสารกับอุณหภูมิอ้างอิง ตามสมการที่ (4.1) และ สมการที่ (4.2) เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนและอัตราการการไหลคงที่ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจะแปรผกผันกับค่าความจุความร้อน ทำให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ดังนั้น ภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้และน้ำจากรูปที่ 4.10 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้มากกว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำ ทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้กับอุณหภูมิน้ำในแต่ละชั้นท่อแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงตามทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้ และ อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สเผาไหม้ไปยังน้ำลดลง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้กับอุณหภูมิผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนตามระดับชั้นท่อน้ำของอีโคโนไมเซอร์ในกรณีพื้นฐาน

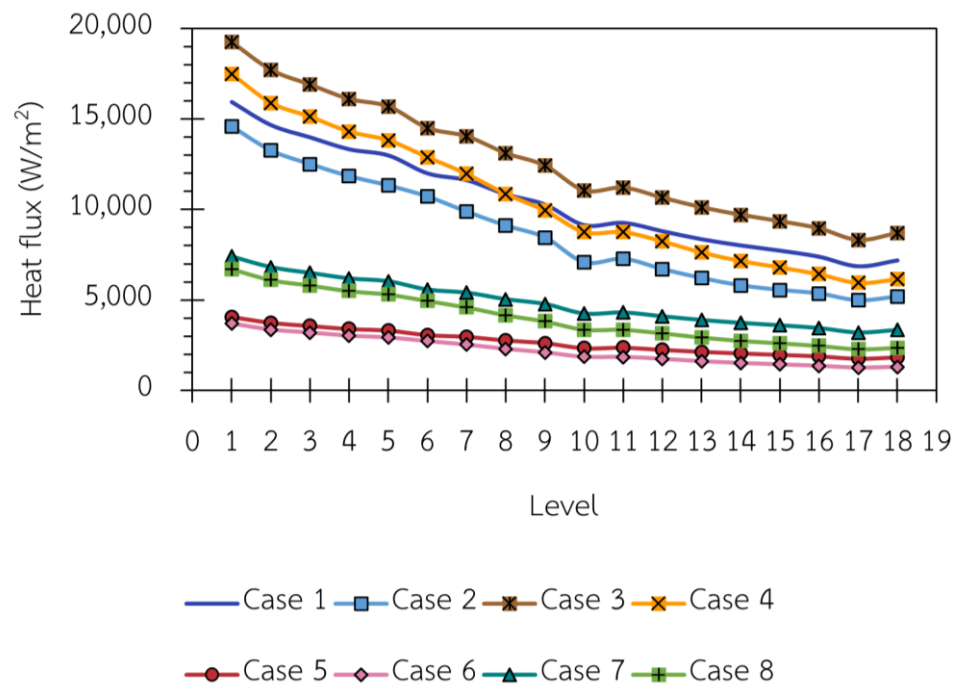
จากผลการจำลองอัตราการถ่ายโอนความร้อนในแต่ละกรณี ดังรูปที่ 4.11 พบว่า ทั้งอัตราการไหลและผลต่างของอุณหภูมิป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้และอุณหภูมิป้อนเข้าของน้ำมีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน ในกรณีที่มีอุณหภูมิป้อนแก๊สเผาไหม้และอุณหภูมิป้อนเข้าของน้ำป้อนเหมือนกัน จะพบว่า เมื่ออัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ต่ำ อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในระบบจะน้อยกว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนในกรณีที่อัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้สูง โดยการลดลงของ

อัตราการถ่ายโอนความร้อนตามทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้จะลดลงด้วยอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลงที่เท่า ๆ กันในแต่ละระดับชั้นของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะแปรผันตรงกับอัตราการไหล ดังสมการที่ (4.1) แต่ถ้าสังเกตจากรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 กรณีที่มีอุณหภูมิป้อนแก๊สเผาไหม้และอุณหภูมิป้อนเข้าของน้ำป้อนเหมือนกัน แต่อัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้และอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่า เช่น ในกรณีที่ 1 (อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า 763 K อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า 508 K และอัตราการป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ 1.0 kg/s) จะพบว่า การลดลงของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้น้อยกว่าในกรณีที่ 2 (อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า 763 K อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า 508 K และอัตราการป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ 0.7 kg/s) ที่มีอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้และอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.13 จะพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้กับน้ำป้อนในแต่ละชั้นท่อในกรณีที่ 1 จะมีค่ามากกว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้กับน้ำป้อนในแต่ละชั้นท่อในกรณีที่ 2 ซึ่งจะสอดคล้องหลักการการถ่ายโอนความร้อน อัตราการถ่ายโอนความร้อนจะแปรผันตรงกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้กับน้ำป้อน ดังนั้น แบบจำลองอีโคโนไมเซอร์สามารถแสดงผลการจำลองการถ่ายโอนความร้อนสอดคล้องกับหลักการการถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลแบบไหลข้ามและสวนทางและเป็นไปตามการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ที่สนใจ

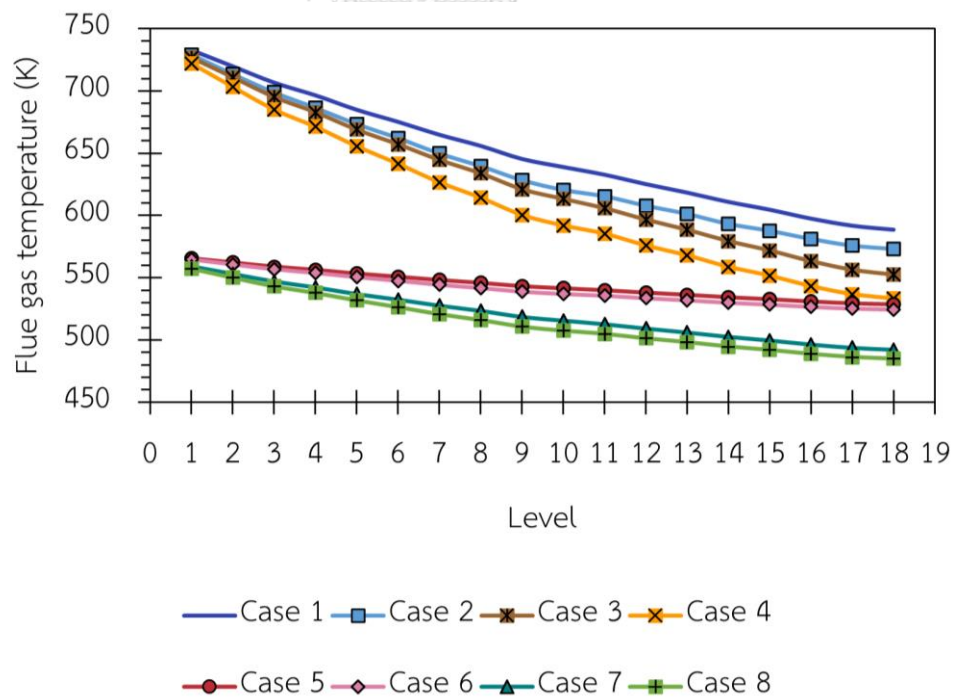
$$Q = mC_p\Delta T \quad (4.1)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (4.2)$$

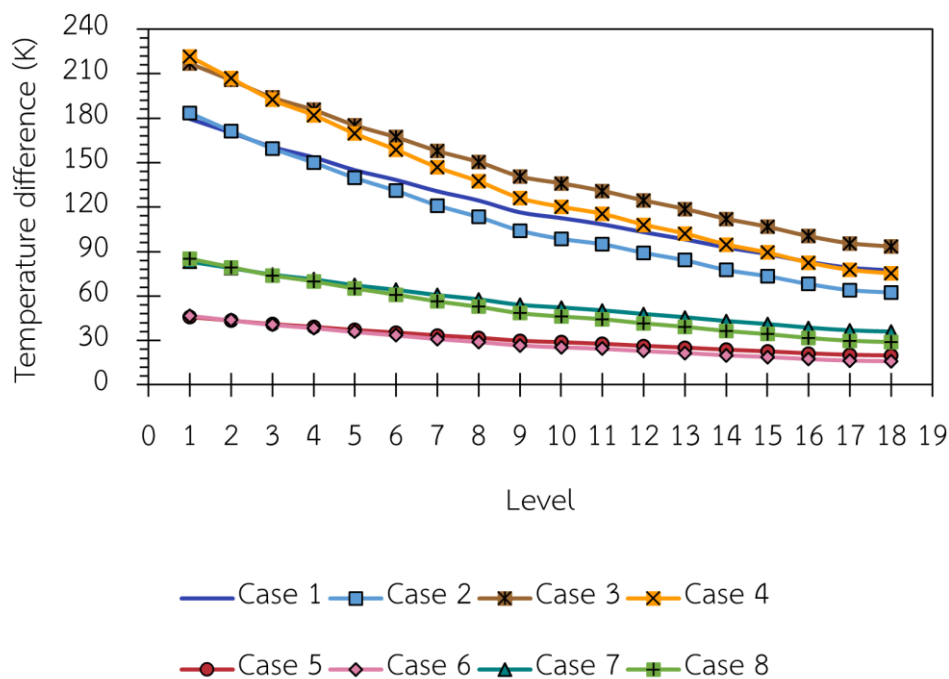
เมื่อ	Q	คือ	อัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)
	m	คือ	อัตราการไหลโดยมวล (kg/s)
	C <sub>p</sub>	คือ	ค่าความจุความร้อน (J/kg·K)
	ΔT	คือ	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสารกับอุณหภูมิอ้างอิง (K)
	T	คือ	อุณหภูมิสาร (K)
	T <sub>ref</sub>	คือ	อุณหภูมิอ้างอิง (K)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับระดับชั้นท่อน้ำตามความสูงอีโคโนไมเซอร์



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้กับระดับชั้นท่อน้ำตามความสูงอีโคโนไมเซอร์



รูปที่ 4.13 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้กับน้ำป้อนในแต่ละชั้นท่อในแต่ละกรณี

#### 4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ และทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนในอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

การเกิดความเสียหายของผิวท่อโลหะเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของหม้อไอน้ำ ในงานวิจัยนี้จะยึดหลักการวิเคราะห์ตามแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสึกกร่อนและการกัดกร่อนข้างต้น โดยจะทำการแบ่งพิจารณาการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ กับความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์เป็น 3 สาเหตุหลัก ได้แก่ การกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน การกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ และการสึกกร่อนแบบขีดสีทางด้านเปลวไฟ

##### 4.3.1 การศึกษาการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน

จากการศึกษาในเชิงทฤษฎี เมื่อองค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้และความดันคงที่ จะพบว่าปัจจัยสำคัญหลัก ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน คือ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้บริเวณใกล้ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดกำมะถันซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนจะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟ ซึ่งอุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของกรดกำมะถันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

ยิ่งอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ต่ำจะยิ่งทำให้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนถูกกัดกร่อนได้จากแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรด และความชื้นที่ควบแน่นลงมาสัมผัสกับผิวท่อ [1]

จากรูปที่ 4.14 พบว่าแก๊สเผาไหม้ที่ไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชั้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของชั้นท่อนั้น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ในบริเวณการไหลด้านนอกท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิสูง แต่อุณหภูมิผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำภายในท่อ ซึ่งเป็นผลของค่าการนำความร้อนได้ดีของท่อเหล็กกล้าคาร์บอน ความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนของท่อเหล็กกล้าคาร์บอนมีค่าต่ำ ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สเผาไหม้จากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านนอกมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านในไปสู่ น้ำป้อน เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าการนำความร้อนกับปริมาณความร้อนที่เท่ากัน ค่าการนำความร้อนของท่อเหล็กกล้าคาร์บอนมีค่าสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิท่อต่อระยะทางต่ำตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.3) ผลของการพาความร้อนจะมีนัยสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบที่มีการไหล ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (heat transfer coefficient) ดังแสดงในสมการที่ (4.4) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน จากผลการจำลองในกรณีพื้นฐาน จะพบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของน้ำป้อนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $62.52 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ซึ่งมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของแก๊สเผาไหม้เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $42.46 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำป้อนน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ในบริเวณใกล้ผิวท่อ อุณหภูมิผิวท่อมักมีค่าใกล้เคียงกับน้ำป้อนขณะที่แก๊สเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงบริเวณเหนือผิวท่อ สังเกตจากบริเวณที่ห่างจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิสูง  $763 \text{ K}$  แต่บริเวณเหนือผิวท่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จะมีค่า  $553 \text{ K}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สเผาไหม้ไปยังน้ำป้อนบริเวณผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขับเคลื่อนด้วยผลต่างของอุณหภูมิแก๊สและน้ำป้อนซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนด

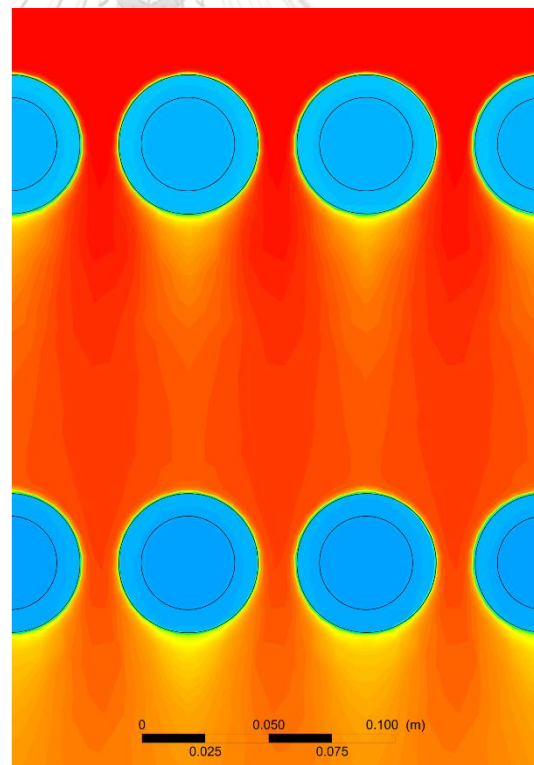
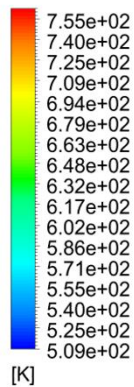
เนื่องจากการไหลของแก๊สเผาไหม้บนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้โดยรอบท่ออย่างมีนัยสำคัญ ถ้าบริเวณผิวท่อมียุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดควบแน่นของกรดกำมะถันจะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการควบแน่นของแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรดได้ ดังนั้น การพิจารณาการกัดกร่อนเนื่องจากการควบแน่นของกรดกำมะถันควรพิจารณาจากอุณหภูมิมิวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อความแม่นยำในการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน

$$Q = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.3)$$

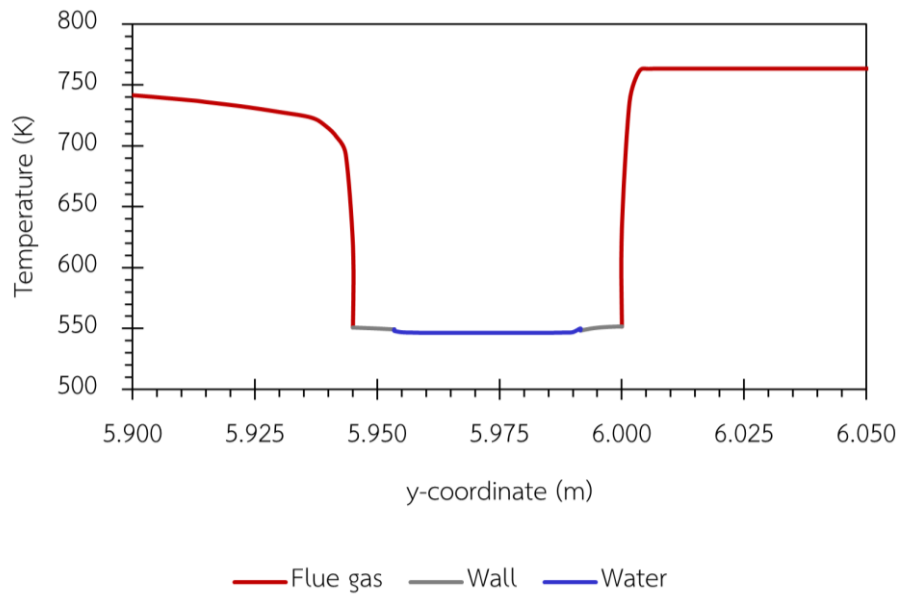
$$Q = hA(T_h - T_l) \quad (4.4)$$

เมื่อ	Q	คือ	อัตราการถ่ายโอนความร้อน (W/m <sup>2</sup> )
	k	คือ	ค่าการนำความร้อน (W/m·K)
	T	คือ	อุณหภูมิสาร (K)
	x	คือ	ระยะทาง (m)
	h	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (W/m <sup>2</sup> ·K)
	A	คือ	พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (W/m·K)
	T <sub>h</sub>	คือ	อุณหภูมิสารที่มีอุณหภูมิสูง (K)
	T <sub>l</sub>	คือ	อุณหภูมิสารที่มีอุณหภูมิต่ำ (K)

Temperature



รูปที่ 4.14 การกระจายของอุณหภูมิในบริเวณการไหลของแก๊สเผาไหม้ บริเวณการไหลของน้ำป้อนเข้า และ บริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ระดับชั้นที่ 1 และ 2 ในกรณีพื้นฐาน



รูปที่ 4.15 การกระจายของอุณหภูมิในท่อระดับชั้นที่ 1 ในกรณีพื้นฐาน

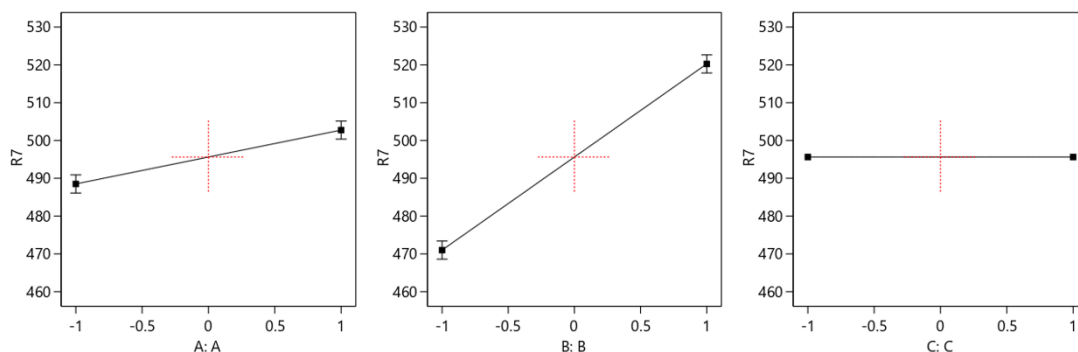
จากผลการคำนวณอุณหภูมิผิวท่อในแต่ละกรณีดังตารางที่ 4.4 จะพบว่า ถึงแม้ว่าในแต่ละกรณีจะมีความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า และอัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในระบบของแต่ละกรณีมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แต่จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของท่อตลอดทั้งชั้นที่ 18 จะมีค่าใกล้เคียงกันกับอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าของแต่ละกรณี

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่ำสุดของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเปลวไฟที่เกิดขึ้นบนท่อแต่ละชั้นเป็นตัวแปรสำคัญในการทำนายพื้นที่เสี่ยงที่มีอุณหภูมิของผนังท่อต่ำสุดจากตารางที่ 4.4 และข้อมูลผลการคำนวณอุณหภูมิต่ำสุดของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบจะช่วยให้สามารถนำมาใช้ในการระบุระดับชั้นท่อ และ ตำแหน่งตามแกน x ที่เป็นตำแหน่งซึ่งมีความเสี่ยงที่สุดต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันในแต่ละกรณีได้ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิ น้ำป้อนเข้า และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดขึ้นบนท่อในแต่ละกรณีได้โดยการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบสองระดับ จากรูปที่ 4.16 จะพบว่าอุณหภูมิต่ำสุดของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเปลวไฟของแต่ละกรณีจะไม่สัมพันธ์กับผลของอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า แต่อุณหภูมิต่ำสุดของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเปลวไฟจะแปรผันตรง อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้ากับอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าระบบเป็นหลัก

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่ำสุดกับชั้นท่อน้ำตามระดับความสูงอีโคโนไมเซอร์



ระดับชั้น ทอี่	อุณหภูมิต่ำสุดของผนังท่อรอบบริเวณระดับชั้นทอี่ต่าง ๆ (K)							
	กรณีทอี่ 1	กรณีทอี่ 2	กรณีทอี่ 3	กรณีทอี่ 4	กรณีทอี่ 5	กรณีทอี่ 6	กรณีทอี่ 7	กรณีทอี่ 8
1	551	543	506	497	519	517	475	471
2	547	540	502	494	518	516	473	470
3	544	537	498	490	517	516	472	468
4	541	534	495	487	516	515	470	467
5	538	532	491	484	516	514	469	466
6	535	529	488	480	515	513	467	465
7	532	527	484	478	514	513	466	464
8	530	525	481	475	514	512	465	463
9	526	522	477	472	513	512	463	461
10	526	521	476	471	513	511	463	461
11	523	519	473	469	512	511	462	460
12	521	518	471	467	511	511	461	459
13	519	516	469	465	511	510	460	459
14	517	515	466	463	510	510	459	458
15	516	513	464	461	510	509	458	457
16	514	512	462	460	510	509	457	457
17	512	511	460	458	509	509	457	456
18	511	510	458	457	509	509	456	456



R7 = The lowest wall temperature (K) on tube level 18

รูปที่ 4.16 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่ออุณหภูมิต่ำสุดของผนังท่อในแต่ละกรณี

ตารางที่ 4.5 แสดงพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันของแต่ละกรณี จะพบว่า จุดที่เสี่ยงจะไม่ใช่บริเวณใกล้ท่อทางเข้าของน้ำโดยตรง เนื่องจากเมื่อแก๊สไหลผ่านบริเวณข้อต่อรูปตัวยูเหนือชั้นท่อที่ 18 เป็นจุดที่แก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงไหลกระจายเนื่องจากการไหลตามแนวส่วนโค้งของข้อต่อรูปตัวยูและปะทะเข้ากับท่อตรงบริเวณใกล้ท่อทางเข้าของน้ำในท่อชั้นที่ 18 ทำให้การไหลของแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงกระจายบริเวณใกล้ท่อทางเข้าของน้ำที่ท่อชั้นที่ 18 และอุณหภูมิของผนังท่อในบริเวณนั้นจะได้รับอิทธิพลจากแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงที่ไหลผ่าน ผิวท่อจึงมีอุณหภูมิต่ำสุด ณ จุดที่ห่างจากบริเวณทางเข้าของน้ำป้อนที่มีการไหลกระจายของแก๊สเผาไหม้สูง ซึ่งอุณหภูมิของผิวท่อที่ต่ำที่สุดจะได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิน้ำป้อนเป็นหลัก

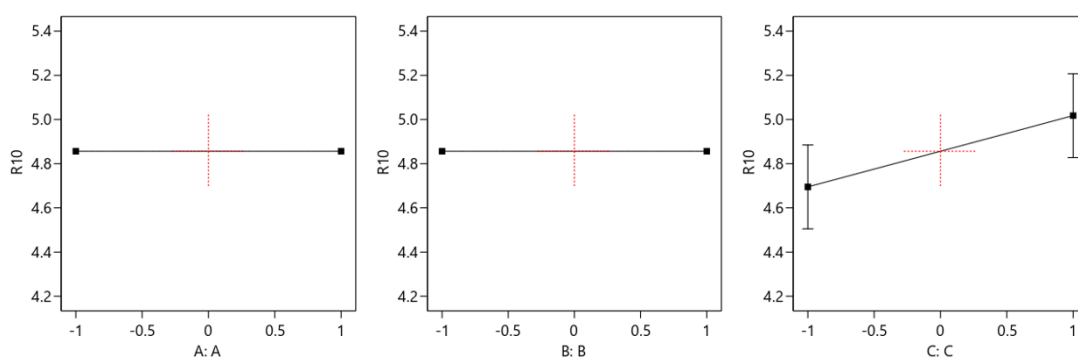
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ต่อพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีด้วยการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบสองระดับ รูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่า พื้นที่เสี่ยงในการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันไม่สัมพันธ์กับผลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า และ อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า แต่ตำแหน่งพื้นที่เสี่ยงของท่อตามแกน x ต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าระบบเป็นหลัก เมื่ออัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้น โดยตำแหน่งพื้นที่เสี่ยงจะเลื่อนเข้าใกล้ท่อทางเข้าของน้ำป้อนมากขึ้น เมื่ออัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้นจะพบว่าผลกระทบของการไหลกระจายของแก๊สเผาไหม้อุณหภูมิสูงบริเวณข้อต่อรูปตัวยูที่ระดับชั้นท่อที่ 18 ลดลง

อย่างไรก็ตาม การคำนวณอุณหภูมิแก๊สที่จุดน้ำค้าง จากสมการที่ (2.4) เพื่อศึกษาโอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการควบแน่นเป็นกรดกำมะถันที่มีฤทธิ์กัดกร่อนผิวท่ออย่างรุนแรง พบว่าอุณหภูมิแก๊สที่จุดน้ำค้างคือ  $108^{\circ}\text{C}$  หรือ  $381.15\text{ K}$  ดังนั้น การกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจาก

กรดกำมะถันในสภาวะการทำงานที่ศึกษาทั้ง 8 กรณี ไม่พบการควบแน่นของกรดกำมะถันบนผิวท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน ดังกล่าว การควบแน่นของกำมะถันในแก๊สเผาไหม้มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนเข้ามีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของกรดกำมะถัน

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันในแต่ละกรณี

กรณี	ระดับชั้นท่อ	ตำแหน่งตามแกน x (m)	อุณหภูมิต่ำสุดบริเวณผนังท่อ (K)
1	18	5.04	511
2	18	4.23	510
3	18	5.01	458
4	18	4.85	457
5	18	5.01	509
6	18	4.85	509
7	18	5.01	456
8	18	4.85	456



R10 = x-coordinate (m) occurring the lowest wall temperature on tube level 18

รูปที่ 4.17 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อพื้นที่เสี่ยงในการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันในแต่ละกรณี

#### 4.3.2 การศึกษาการกักต้อนจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์

การทำงานของหม้อไอน้ำร่วมกับเชื้อเพลิงขึ้นไม้ที่มีมีองค์ประกอบคลอรีนสูงจะทำให้เสี่ยงต่อการเกิดการกักต้อนอย่างรุนแรงเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน การเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์ และ เถ้าหลอม ซึ่งการยึดเกาะของเถ้าที่ประกอบด้วยสารประกอบคลอไรด์และเกิดการทำปฏิกิริยาของสารประกอบคลอไรด์บนผิวท่อทำให้เกิดแก๊สคลอรีนเพิ่มขึ้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดการกักต้อนอย่างรุนแรง ยิ่งเกิดการหลอมของเถ้าจะยิ่งทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาของสารประกอบคลอไรด์และ การทำปฏิกิริยาทำลายชั้นฟิล์มออกไซด์ที่จะปลดปล่อยแก๊สคลอรีนออกมาแพร่กระจายบนผิวท่อและทำให้เกิดการกักต้อนได้มากขึ้น การกักต้อนเนื่องจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์เกิดขึ้นมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการกักต้อนดังกล่าวบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในงานวิจัยนี้จึงทำการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกักต้อนจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์และการกักต้อนเนื่องจากการหลอมของเถ้าจากความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นสะสมเถ้ากับอุณหภูมิผนังท่อต่อการสึกกร่อนและการกักต้อนโดยอาศัยผลการศึกษาของ Hao Guo และคณะ [34] และ ผลการศึกษาของ Melanie Montgomery และคณะ [33]

1. การศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นสะสมเถ้าเป็นปัจจัยหลักต่อการสึกกร่อนและการกักต้อนโดยอาศัยผลการศึกษาของ Hao Guo และคณะ [34]

การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกักต้อนเนื่องจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบคลอไรด์จะอาศัยผลการศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้าที่มีการศึกษาชั้นสะสมเถ้าและการกักต้อนเนื่องจากการสะสมเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยสารประกอบคลอไรด์สูง ซึ่งจะเป็นการศึกษาโดยอาศัยความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นสะสมเถ้าต่อแนวโน้มของการเกิดการกักต้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากผลการศึกษาการสะสมเถ้าและการกักต้อนของ Hao Guo และคณะ [34] จะพบว่าเมื่อการเกาะของชั้นเถ้าที่ประกอบด้วยสารประกอบคลอไรด์สูงหนาขึ้นจะสามารถพบชั้นการกักต้อนที่หนาขึ้นจากผลของการทำปฏิกิริยาการกักต้อนบนผิวท่อ เช่น เหล็ก โครเมียม และ นิกเกิลบนผิวท่อและถ่ายโอนไอออนโลหะเหล่านั้นออกมาอยู่ในชั้นการกักต้อน ทำให้เกิดการสูญเสียโลหะ การสะสมเถ้าบนผิวท่อทำให้มีโอกาสที่จะทำให้เกิดแก๊สคลอรีนจากปฏิกิริยาต่าง ๆ และ วัฏจักรการขนส่งแก๊สคลอรีนแพร่เข้าไปใกล้บริเวณผิวโลหะได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งแก๊สคลอรีนจะเป็นสารตั้งต้นหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกักต้อนบนผิวท่อโลหะ ดังที่กล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 2

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแต่ละชั้นท่อดังตารางที่ 4.6 ได้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ต่อความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแต่ละชั้นท่อเฉลี่ยในแต่ละกรณีด้วยการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบสองระดับ จากรูปที่ 4.18 จะพบว่าความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดบนผนังท่อไม่สัมพันธ์กับผลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า และ

อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า แต่ความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดบนผนังท่อจะแปรผกผันกับอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าระบบเป็นหลัก

การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ในแต่ละกรณีในงานวิจัยนี้จะพิจารณาความหนาของชั้นสะสมเถ้าซึ่งจะแปรผันตรงกับชั้นการกัดกร่อนตามความสัมพันธ์ที่มีการศึกษาโดย Hao Guo และคณะ [34] เป็นตัวแปรสำคัญในการทำนายพื้นที่เสี่ยงที่มีชั้นสะสมเถ้าบนผิวท่อหนาที่สุดจากตารางที่ 4.6 และข้อมูลผลการคำนวณความหนาชั้นเถ้าบนผิวท่อ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบจะทำให้สามารถนำมาใช้ในการระบุระดับชั้นท่อ และ ตำแหน่งของท่อตามแกน x เป็นตำแหน่งที่มีความเสี่ยงที่สุดต่อการกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ในแต่ละกรณีได้ดังตารางที่ 4.7

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ด้วยความหนาของชั้นสะสมเถ้าเป็นตัวแปรหลักในการบ่งบอกความหนาของชั้นการกัดกร่อนบนผิวท่อในแต่ละกรณีได้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ต่อพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนจากสาเหตุนี้ในแต่ละกรณีด้วยการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบสองระดับจากรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 จะพบว่า ความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุด และ พื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ในแต่ละกรณีไม่สัมพันธ์กับผลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า และ อัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าระบบเป็นหลัก ดังนั้น การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์นี้ในสถานการณ์ทำงานอื่น ๆ จะต้องทำการจำลองพลศาสตร์เชิงคำนวณในสถานการณ์ทำงานที่สนใจนั้น ๆ เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

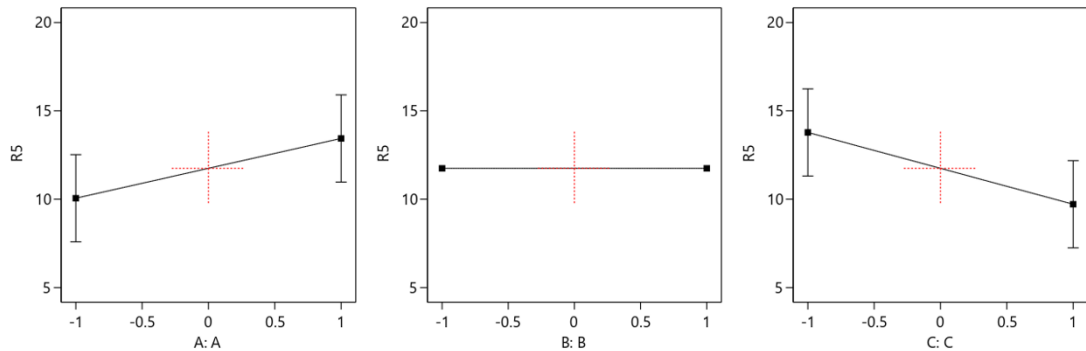
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดกับชั้นท่อน้ำตามระดับความสูงอีโคโนไมเซอร์

ระดับชั้นท่อที่	ความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดรอบบริเวณระดับชั้นท่อต่าง ๆ (mm)							
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6	กรณีที่ 7	กรณีที่ 8
1	3.457	10.990	3.501	10.111	5.888	5.861	3.457	11.347
2	5.917	5.917	5.917	5.912	5.917	5.917	5.917	11.815
3	10.342	5.537	10.342	10.342	5.851	10.761	10.342	10.761
4	1.593	9.786	1.593	5.958	1.593	5.958	1.593	5.958

ระดับชั้น ท่อที่	ความหนาของชั้นสะสมเก้าสูงสุดรอบบริเวณระดับชั้นท่อต่าง ๆ (mm)							
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6	กรณีที่ 7	กรณีที่ 8
5	5.935	9.311	5.935	5.788	5.935	9.214	5.935	11.337
6	5.922	16.024	10.250	12.045	5.863	12.045	5.863	11.298
7	5.902	19.209	5.852	11.405	5.780	11.647	5.780	11.771
8	12.158	11.425	6.026	5.898	6.026	5.880	6.026	10.858
9	10.108	11.538	5.793	11.010	5.763	5.763	5.793	5.861
10	5.673	3.488	5.681	5.543	5.681	5.543	5.673	5.543
11	5.723	5.841	3.361	5.768	5.575	5.808	5.575	5.808
12	5.642	5.857	5.642	5.824	5.642	5.839	5.642	5.621
13	5.634	3.474	3.488	5.715	3.488	5.326	5.669	5.715
14	5.739	5.887	5.462	3.551	5.551	5.651	5.551	5.975
15	9.394	5.522	5.777	5.818	3.449	3.441	3.399	3.451
16	5.507	5.515	5.507	5.711	5.795	11.812	5.507	5.507
17	5.785	5.815	5.817	5.699	5.788	5.668	5.817	5.775
18	5.875	5.881	3.512	5.540	5.955	5.540	3.434	5.540

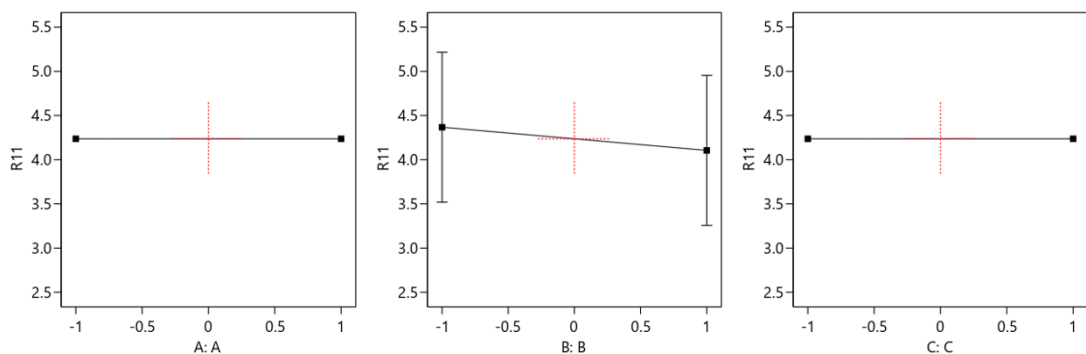
ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ในแต่ละกรณี

กรณีที่	ระดับชั้นท่อที่	ตำแหน่งตามแกน x (m)	ความหนาสูงสุดของชั้นสะสมเก้า (mm)
1	8	4.30	12.158
2	7	2.85	19.209
3	3	3.64	10.342
4	6	4.97	12.045
5	8	4.30	6.026
6	6	4.97	12.045
7	3	3.64	10.342
8	2	5.22	11.815



R5 = the thickest ash deposition (mm) on heat transfer tubes of the economizer

รูปที่ 4.18 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อความหนาของชั้นสะสมเถ้าสูงสุดในแต่ละกรณี



R11 = x-coordinate (m) occurring the thickest ash deposition on heat transfer tubes of the economizer

รูปที่ 4.19 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ในแต่ละกรณี

- การศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผนังท่อเป็นปัจจัยหลักต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนโดยอาศัยผลการศึกษาของ Melanie Montgomery และคณะ [33]

ถึงแม้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ หากอุณหภูมิบริเวณการยึดเกาะของเถ้าสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่จุดยูเทคติกของสารประกอบคลอไรด์ ดังแสดงตารางที่ 2.1 จะยิ่งเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้นอีกด้วย [15] ในงานวิจัยนี้จึงทำการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์โดยอาศัยผลการศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้าที่มีการศึกษาข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเก็บเป็นข้อมูลเชิงสถิติจากโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยสารประกอบคลอไรด์สูง ซึ่งจะเป็นการศึกษา

โดยอาศัยความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผนังท่อต่อแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดย Melanie Montgomery และคณะ [33] จะพบว่า ยิ่งอุณหภูมิสูงจะยิ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบโลหะแอลคาไลน์คลอไรด์อย่างรุนแรงในบริเวณที่มีการสะสมของเกลือที่มีองค์ประกอบของสารประกอบโลหะแอลคาไลน์คลอไรด์

ในการพิจารณาพื้นที่เสี่ยงต่อการเร่งการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมในแต่ละกรณีจากข้อมูลผลการคำนวณอุณหภูมิสูงสุดของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบดังตารางที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณอุณหภูมิต่ำสุดของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชั้น ดังตารางที่ 4.4 จะพบว่า ผลของการไหลของน้ำป้อนตามแนวแกน  $x$  และน้ำป้อนรับความร้อนจากแก๊สเผาไหม้ตลอดช่วงการไหล ทำให้อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละชั้นท่อมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละชั้นท่อจะแตกต่างกัน และจากผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่ศึกษาต่อพื้นที่เสี่ยงต่อการเร่งการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมในแต่ละกรณี โดยอาศัยผลศึกษาการทดลองเชิงแพทเทอร์เรียลแบบสองระดับ ดังตารางที่ 4.9 จะพบว่า อุณหภูมิสูงสุดบริเวณผนังท่อแปรผันตรงกับอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าและอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าเป็นหลัก แต่อุณหภูมิสูงสุดบริเวณผนังท่อจะไม่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าระบบ กรณีที่อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าและอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าสูงจะเสี่ยงที่อุณหภูมิผนังท่อจะยิ่งสูงขึ้นและทำให้เกิดการเร่งการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมรุนแรงมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.20

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 4.9 จะพบว่า อุณหภูมิผิวท่อด้านนอกสูงที่สุดเกิดขึ้นที่ท่อระดับชั้นที่ 1 และ พื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนในงานวิจัยนี้จะพบว่าพื้นที่เสี่ยงต่อการเร่งการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมเป็นจุดที่ใกล้เคียงกับทางออกของอุณหภูมิน้ำป้อน โดยยิ่งอัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้น ตำแหน่งพื้นที่เสี่ยงของท่อตามแกน  $x$  ต่อการเร่งการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าระบบเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ตำแหน่งของท่อตามแกน  $x$  จะมีค่ามากขึ้น โดยพื้นที่เสี่ยงจะเลื่อนเข้าใกล้ทางออกของน้ำป้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการสะสมเกลือบนผิวท่อ บริเวณติดกับทางออกของน้ำป้อน ถึงแม้ว่าบริเวณทางออกของน้ำป้อนจะเป็นบริเวณที่น้ำจะมีอุณหภูมิสูงที่สุดหลังจากผ่านการรับความร้อนจากแก๊สเผาไหม้ภายในไอโคโนไมเซอร์ แต่จากการศึกษา พบว่า เมื่ออัตราการไหลโดยมวลของแก๊สเผาไหม้มากขึ้น การสะสมของเกลือบริเวณติดกับทางออกของน้ำป้อนจะน้อยกว่าการสะสมของเกลือในบริเวณเดียวกันของกรณีที่อัตราการไหลโดยมวลของแก๊สเผาไหม้ต่ำกว่า เมื่อมีการสะสมเกลือบนผิวท่อ จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ต่ำกว่าเมื่อไม่มีการสะสมเกลือบนผิวท่อ อุณหภูมิผิวท่อด้านนอกที่มีการสะสมเกลือจะได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิน้ำป้อนมากกว่า แต่อุณหภูมिवิวท่อด้านนอกที่ไม่มีการสะสมเกลือจะได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้มากขึ้น ดังนั้น



เมื่ออัตราการไหลโดยมวลของแก๊สเผาไหม้น้อยลงและความหนาของชั้นสะสมเถ้าบริเวณติดกับทางออกของน้ำป้อนมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิผิวท่อด้านนอกที่สูงที่สุดในระบบจะอยู่ห่างจากทางออกของน้ำป้อนออกมา

ดังนั้นจากการพิจารณาความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันและการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ จะพบว่า การลดความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์และเกลือหลอม การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับแก๊สเผาไหม้จากเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบคลอไรด์ควรทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดยูเทคติกของสารประกอบคลอไรด์ชนิดต่าง ๆ ในเถ้า แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้บริเวณผิวผนังท่อจะต้องไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดควบแน่นของแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรด โดยการควบคุมอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าระบบไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดควบแน่นของแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรด เนื่องจากอุณหภูมิบริเวณผิวผนังท่อจะได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของน้ำป้อนเข้าระบบเป็นหลัก

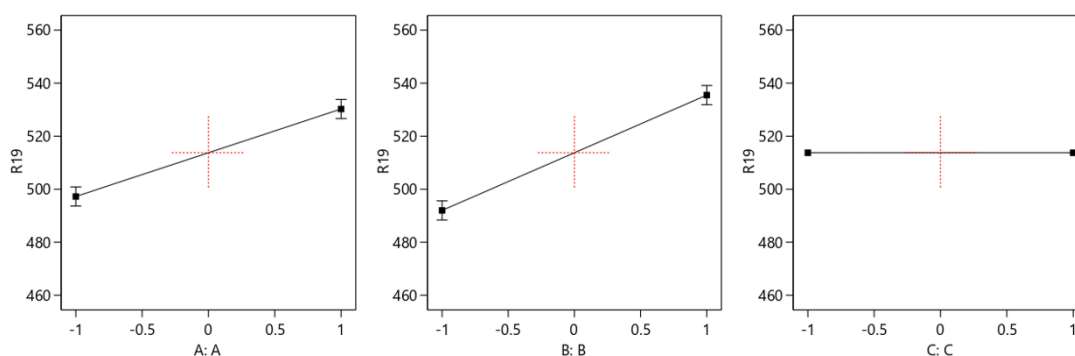
ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดบริเวณผนังท่อกับชั้นท่อน้ำตามระดับความสูงอีโคโนไมเซอร์

ระดับชั้นท่อที่	อุณหภูมิสูงสุดของผนังท่อรอบบริเวณระดับชั้นท่อต่าง ๆ (K)							
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6	กรณีที่ 7	กรณีที่ 8
1	556	548	513	504	520	518	477	474
2	551	544	507	498	519	517	475	472
3	548	541	503	495	518	516	473	470
4	545	538	499	492	517	516	472	469
5	542	536	496	489	517	515	471	468
6	538	533	492	484	516	514	469	466
7	536	530	488	482	515	514	468	465
8	533	528	485	479	514	513	467	464
9	530	525	482	475	514	512	465	463
10	527	523	478	473	513	512	464	462
11	527	523	478	473	513	512	464	462
12	525	521	475	470	512	511	463	461
13	522	518	471	467	511	511	461	460

ระดับชั้น ท่อที่	อุณหภูมิสูงสุดของผนังท่อรอบบริเวณระดับชั้นท่อต่าง ๆ (K)							
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6	กรณีที่ 7	กรณีที่ 8
14	520	517	469	466	511	510	460	459
15	518	515	466	463	510	510	459	458
16	516	514	465	462	510	510	459	458
17	514	513	462	460	510	509	458	457
18	516	514	464	462	510	510	458	458

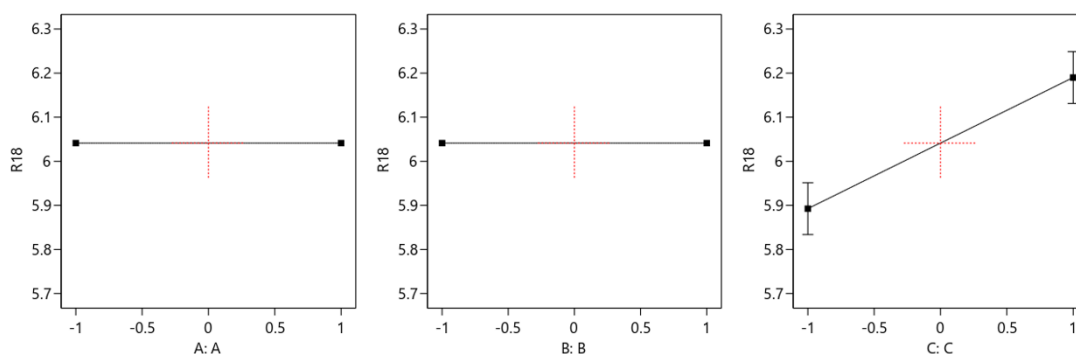
ตารางที่ 4.9 ผลการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการเร่งการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมในแต่ละกรณี

กรณีที่	ระดับชั้นท่อที่	ตำแหน่งตามแกน x (m)	อุณหภูมิสูงสุดบริเวณผิวท่อ (K)
1	1	6.19	556
2	1	5.75	548
3	1	6.19	513
4	1	5.93	504
5	1	6.19	520
6	1	5.96	518
7	1	6.19	477
8	1	5.93	474



R19 = the highest wall temperature (K) on tube level 1

รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่ออุณหภูมิสูงสุดบนผิวท่อระดับชั้นที่ 1 ในแต่ละกรณี



R18 = x-coordinate (m) occurring the highest wall temperature on tube level 1

รูปที่ 4.21 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากเกลือหลอมบนผิวท่อระดับชั้นที่ 1 ในแต่ละกรณี

#### 4.3.3 การศึกษาการสึกกร่อนแบบขดสีทางด้านเปลวไฟ

การสึกกร่อนเนื่องจากการชนของอนุภาคเถ้าลอยหรือการสึกกร่อนแบบขดสีทางด้านเปลวไฟจะยึดตามผลการศึกษาโดย S. K. Das และคณะ [19] ที่ทำการศึกษาผลการชนของอนุภาคเถ้าลอยบนผิวโลหะเหล็กคาร์บอนเช่นเดียวชนิดวัสดุของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ที่สนใจ โดยอัตราการการสึกกร่อนจะขึ้นอยู่กับความเร็วกระแสของอนุภาคเถ้าลอยและอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความเสียหายของผิวท่อโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ถึงแม้ว่าแบบจำลองในงานวิจัยนี้จะพิจารณาให้ผิวผนังท่อเป็นรูปแบบไม่ไถล (no-slip condition) ความเร็วของสารที่ผิวท่อจะมีค่าเป็นศูนย์ การทำนายการสึกกร่อนจึงจะพิจารณาจากความเร็วของอนุภาคเถ้าที่เคลื่อนที่ใกล้บริเวณผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะมีโอกาสที่อนุภาคเถ้าเหล่านั้นจะพุ่งเข้าชนกับบริเวณผนังท่อด้วยความเร็วสูงได้ และในการวิจัยนี้จะพิจารณาถึงความเร็วโดยรอบบริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่จะส่งผลต่อการสึกกร่อนบนท่อแนวตรงระนาบที่ขวางทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้และเถ้าเป็นหลัก

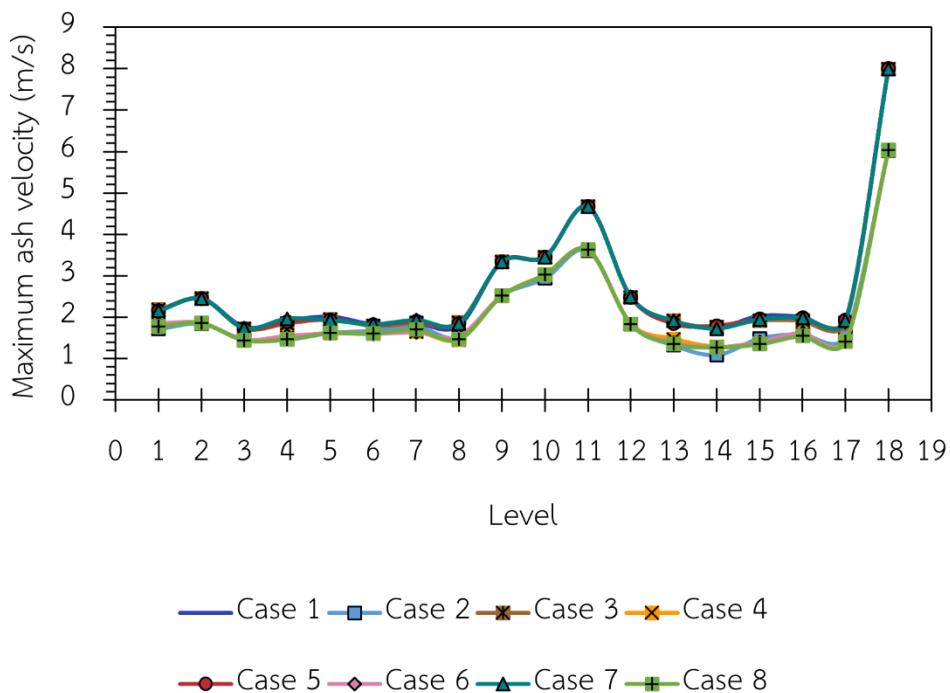
ในการพิจารณาพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนสูงสุดในแต่ละกรณีจากข้อมูลผลการคำนวณอุณหภูมิต่ำสุดของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบดังรูปที่ 4.22 จะทำให้สามารถนำมาใช้ในการระบุระดับชั้นท่อ และ ตำแหน่งของท่อตามแกน x จากผลการศึกษาดังตารางที่ 4.10 จะพบว่า ความเร็วแก๊สเผาไหม้สูงสุดเกิดขึ้นที่ท่อระดับชั้นที่ 18 ในบริเวณเหนือผิวท่อด้านต้นลมโดยระยะห่างจากผิวท่อประมาณ 0.001 m และ เกิดที่จุดเดียวกันในทุกกรณี และ พื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนในงานวิจัยนี้จะพบว่าพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 6.08 m

ในทุกกรณีศึกษา โดยไม่สัมพันธ์กับผลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้

การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเข้าสูงสุดในแต่ละชั้นของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนใหญ่จะได้รับอิทธิพลจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดและการเปลี่ยนแปลงวิธีการไหลของอนุภาคเข้าในบริเวณข้อต่อรูปตัวยูโค้ง ทำให้อนุภาคเข้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น ซึ่งจะสังเกตจากท่อชั้นที่ 2 ท่อชั้นที่ 9 ท่อชั้นที่ 10 ท่อชั้นที่ 11 และ ท่อชั้นที่ 18 จะเป็นท่อชั้นที่มีการเปลี่ยนรูปร่างของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากชั้นท่อก่อนหน้านี้เมื่อพิจารณาตามทิศทางการไหลของแก๊สเผาไหม้จากด้านบนลงด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทำให้ความเร็วเข้าสูงสุดของอนุภาคเข้าเพิ่มขึ้นในท่อชั้นที่ 2 ท่อชั้นที่ 9 ท่อชั้นที่ 10 ท่อชั้นที่ 11 และ ท่อชั้นที่ 18 ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยตำแหน่งที่เกิดการเพิ่มขึ้นของความเร็วเข้าสูงสุดของอนุภาคเข้าจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับบริเวณข้อต่อรูปตัวยู

เนื่องจากชั้นที่ 18 จะเป็นชั้นท่อที่มีการป้อนเข้าของน้ำป้อนเข้า ท่อชั้นที่ 18 จึงเป็นท่อชั้นที่ตัดขวางการไหลของแก๊สเผาไหม้สุดท้ายที่แก๊สเผาไหม้ไหลผ่านตามหลักการการถ่ายโอนความร้อนรูปแบบการไหลสวนทาง จากรูปที่ 4.23 จะพบว่าแก๊สเผาไหม้บริเวณใกล้ข้อต่อรูปตัวยูไหลด้วยความเร็วสูง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดการไหลแคบและความเร็วแก๊สจะแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด นอกจากนี้บริเวณนี้还将พบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ ทำให้แก๊สเผาไหม้ยังคงมีอุณหภูมิสูงมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.9 แก๊สเผาไหม้ในบริเวณนี้จึงมีความเร็วสูงและมีอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนแบบขัดสีทางด้านเปลวไฟอย่างรุนแรงได้

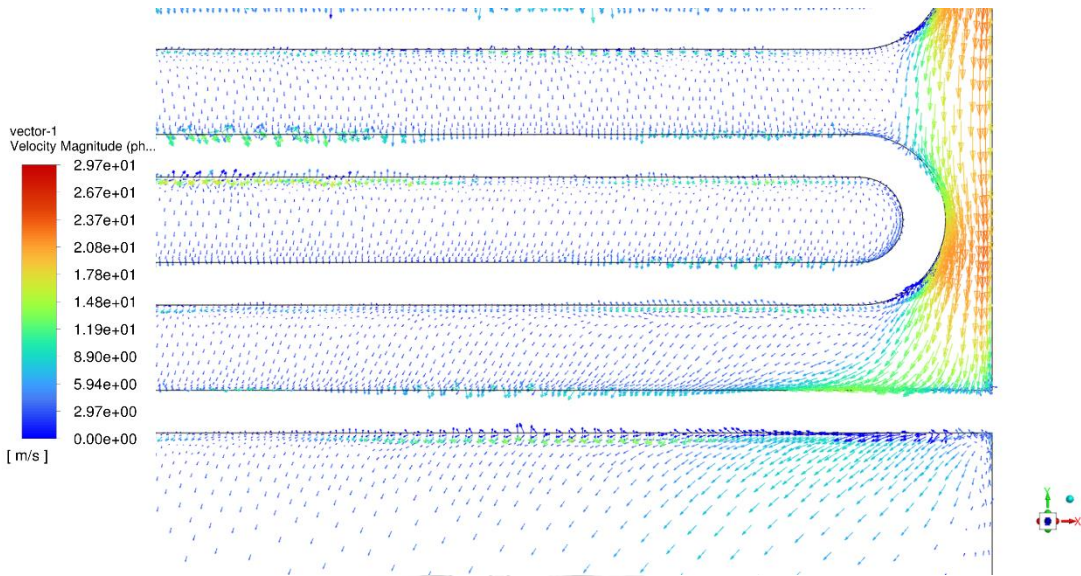
ในการพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ต่อความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแต่ละชั้นท่อในแต่ละกรณีได้ใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเข้าสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบสองระดับ ดังตารางที่ 4.10 จากผลการศึกษาในเชิงสถิติดังแสดงในรูปที่ 4.24 จะพบว่าสภาวะการทำงานทั้งอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าและอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าไม่ส่งผลต่อความเร็วสูงสุดของเข้าบริเวณผนังท่อความเร็วสูงสุดเข้าบริเวณผนังท่อไม่สัมพันธ์กับผลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า และ อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า แต่ความเร็วเข้าสูงสุดบริเวณผนังท่อจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าระบบเป็นหลัก กรณีที่อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้มีค่าสูงจะเสี่ยงต่อการชนของอนุภาคเข้าด้วยความเร็วสูงกว่าและทำให้เกิดการสึกกร่อนด้วยการขัดสีด้านเปลวไฟรุนแรงมากกว่าการสึกกร่อนจากการชนของอนุภาคเข้าที่มีความเร็วต่ำกว่าในกรณีที่อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้น้อยตามผลการศึกษาอัตราการสึกกร่อนโดย S. K. Das และคณะ [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.9



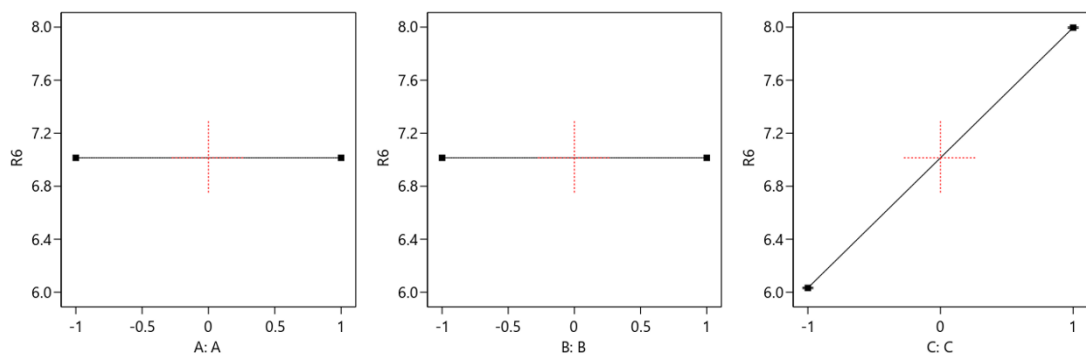
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเข้าสูงสุดกับชั้นท่อน้ำตามระดับความสูงอีโคโนไมเซอร์  
ในแต่ละกรณี

ตารางที่ 4.10 ผลการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนแบบขีดลึทางด้านเปลวไฟในแต่ละกรณี

กรณีที่	ระดับชั้นท่อน้ำ	ตำแหน่งตามแกน x (m)	ความเร็วสูงสุดเข้าบริเวณผนังท่อน้ำ (m/s)
1	18	6.08	7.994
2	18	6.08	6.021
3	18	6.08	7.996
4	18	6.08	6.036
5	18	6.08	7.998
6	18	6.08	6.036
7	18	6.08	7.997
8	18	6.08	6.036



รูปที่ 4.23 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของภูมิภาคเข้าบริเวณใกล้เคียงกับระดับชั้นท่อที่ 18 ในกรณีพื้นฐาน



R6 = the highest ash velocity (m/s) on tube level 18

รูปที่ 4.24 อิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า (A) อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า (B) และ อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ (C) ต่อความเร็วเข้าสูงสุดในแต่ละกรณี

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายโอนความร้อนภายในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ทำโดยการจำลองกระบวนการในระบบของไหลหลายวัฏภาคโดยใช้แบบจำลองแบบออยเลอร์-ออยเลอร์ ซึ่งประกอบด้วย วัฏภาคแก๊สไอเสีย วัฏภาคถ่านล่อยภายนอกท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และ วัฏภาคน้ำป้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ในช่วงสภาวะการไหลแบบคงตัว (steady state) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาให้แบบจำลองซึ่งพิจารณาการไหลของอนุภาคถ่านล่อยในแก๊สเผาไหม้ รวมถึงการถ่ายโอนความร้อนจากผลของความต่างระหว่างอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้และน้ำป้อนผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนตามรูปแบบการไหลแบบข้ามและสวนทางการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองสามมิติได้รวมการพิจารณาผลกระทบของการไหลระหว่างท่อแลกเปลี่ยนความร้อนอีกด้วย จากผลการพิจารณาอุทกพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายโอนความร้อนภายในแบบจำลอง พบว่า ภายในแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันของแก๊ส-ของแข็งในช่วงฟลูอิดไอเซชันแบบเบาบาง และ รูปแบบการถ่ายโอนความร้อนสอดคล้องกับการถ่ายโอนความร้อนในรูปแบบการไหลสวนทางซึ่งสอดคล้องตามสภาวะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียนจริง อัตราการไหลโดยมวลของวัฏภาคต่าง ๆ และอุณหภูมิปลายของแก๊สเผาไหม้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลสภาวะการทำงานจริงของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียน

จากการศึกษากลไกการเกิดความเสียหายของผิวท่อโลหะสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของหม้อไอน้ำ ในงานวิจัยนี้จะยึดหลักการวิเคราะห์ตามแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสึกกร่อนและการกัดกร่อนข้างต้น โดยพิจารณาทำการแบ่งการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ กับความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์ออกเป็น 3 สาเหตุหลัก ได้แก่

1) การกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถัน ผลการจำลองอุณหภูมิบริเวณผิวท่อต่ำกว่าอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ในบริเวณโดยรอบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในแต่ละชั้นท่อ การทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันด้วยการกระจายของอุณหภูมิผิวท่อจะช่วยให้สามารถทำนายผลได้แม่นยำมากขึ้น จากการศึกษาพบว่า ตำแหน่งที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นบริเวณผิวท่อใกล้ทางเข้าของน้ำป้อน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิผิวท่อต่ำที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าระบบ ความรุนแรงการกัดกร่อนจะได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ

น้ำป้อนเข้าระบบเป็นหลัก เมื่ออุณหภูมิ น้ำป้อนต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดกำมะถันจะทำให้กรดกำมะถันควบแน่นบนผิวท่อและเกิดการกัดกร่อนผิวท่ออย่างรุนแรงได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการคำนวณอุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดกำมะถัน จะพบว่า อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ภายในระบบมีค่ามากกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดกำมะถัน ดังนั้น การกัดกร่อนทางด้านเปลวไฟเนื่องจากกรดกำมะถันจะยังไม่เกิดขึ้นในสภาวะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ที่สนใจ

2) การกัดกร่อนอันเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์ พิจารณาพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์จากความหนาของชั้นการกัดกร่อนซึ่งแปรผันตรงกับความหนาของชั้นสะสมเถ้า จากผลของอุทกพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละกรณี ทำให้การกระจายการสะสมเถ้าบนผิวท่อในแต่ละชั้นแตกต่างกัน เมื่ออุณหภูมิผิวท่อสูงขึ้นจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบโลหะแอลคาไลน์คลอไรด์อย่างรุนแรงในบริเวณที่มีการสะสมของเถ้าที่มีองค์ประกอบของสารประกอบโลหะแอลคาไลน์คลอไรด์ เมื่อพิจารณาพื้นที่เสี่ยงจากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวท่อและบริเวณที่อุณหภูมิผนังท่อโลหะสูงที่สุดใกล้เคียงกับที่ท่อชั้นระดับที่ 1 บริเวณทางออกของน้ำป้อนในหม้อไอน้ำ

3) การสึกกร่อนแบบขีดสีทางด้านเปลวไฟ กรณีที่อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้มีค่าสูงจะเสี่ยงต่อการชนของอนุภาคเถ้าด้วยความเร็วสูงกว่าและทำให้เกิดการสึกกร่อนด้วยการขีดสีด้านเปลวไฟรุนแรงมากกว่าการสึกกร่อนจากการชนของความเร็วของอนุภาคเถ้าต่ำกว่าในกรณีที่อัตราการไหลป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้ต่ำกว่าตามผลการศึกษาอัตราการสึกกร่อน โดยพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนเนื่องจากการชนของอนุภาคเถ้าด้วยความเร็วเถ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นบนผิวท่อระดับชั้นที่ 18 ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับข้อต่อรูปตัวยูและทางเข้าของน้ำป้อน ทำให้เกิดความเสียหายของผิวท่อโลหะ

จากข้อมูลความเสียหายของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำให้ต้องมีการหยุดเดินเครื่องเพื่อซ่อมแซมท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จะพบว่า ความเสียหายอย่างรุนแรงเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ทางเข้าของน้ำป้อน ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนแบบขีดสีทางด้านเปลวไฟ ดังนั้นการสึกกร่อนแบบขีดสีทางด้านเปลวไฟเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณนั้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การบันทึกข้อมูลอย่างสม่ำเสมอ ทั้งรูปภาพลักษณะของการสึกกร่อนและการกัดกร่อนภายในอีโคโนไมเซอร์ ข้อมูลเชิงตัวเลขความหนาของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และ สภาวะการดำเนินการต่าง ๆ ของอีโคโนไมเซอร์ในหม้อไอน้ำฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน จะช่วยให้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดการสึกกร่อนและการกัดกร่อนที่เจาะจงได้ และ ทำนายพื้นที่เสี่ยงต่อการสึกกร่อนและการกัดกร่อนได้อย่างแม่นยำมากขึ้น



เพื่อลดความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์และเกลือหลอม การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับแก๊สเผาไหม้จากเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบคลอไรด์ควรทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารประกอบคลอไรด์ชนิดต่าง ๆ ในถ้ำ การวิเคราะห์ห้องประกอบของถ้ำลอยเพื่อให้รู้ช่วงอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้และน้ำป้อนเข้าระบบที่เหมาะสมของการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ เมื่อต้องการยืดอายุการใช้งานของอีโคโนไมเซอร์ โดยการลดความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์และเกลือหลอมอย่างรุนแรง แต่อย่างไรก็ตาม ปรดก่ามะถันจะควบแน่นเมื่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดควบแน่นของแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรด สำหรับองค์ประกอบแก๊สเผาไหม้และความดันที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อแก๊สเผาไหม้มีสัดส่วนเชิงโมลของแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และไอน้ำเท่ากับ  $4 \times 10^{-7}$  และ 0.15 ตามลำดับ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จะต้องไม่ต่ำกว่า 381.15 K จากการถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สเผาไหม้ไปยังน้ำป้อน อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้บริเวณผิวท่อจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จะยังคงสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำป้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณใกล้เคียงกัน ดังนั้น การควบคุมอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้บริเวณผิวท่อสามารถทำได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าระบบไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดควบแน่นของแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการควบแน่นของปรดก่ามะถัน นอกจากนี้เมื่อองค์ประกอบแก๊สเผาไหม้มีสัดส่วนเชิงโมลของแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์หรือไอน้ำมากขึ้นจะยิ่งทำให้อุณหภูมิที่จุดควบแน่นของปรดก่ามะถันสูงขึ้น การลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงจะยิ่งเสี่ยงทำให้อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดควบแน่นของปรดก่ามะถันที่สูงขึ้น ดังนั้น เชื้อเพลิงควรมีปริมาณซัลเฟอร์และความชื้นต่ำ ๆ เพื่อให้อุณหภูมิที่จุดควบแน่นของปรดก่ามะถันต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ดังนั้น การลดการกัดกร่อนเนื่องจากการเหนียวนำของสารประกอบคลอไรด์และเกลือหลอม และป้องกันไม่ให้เกิดการควบแน่นของปรดก่ามะถัน ทำได้โดยการลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ภายในอีโคโนไมเซอร์โดยไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดควบแน่นของปรดก่ามะถัน นอกจากนี้ แก๊สเผาไหม้หลังจากผ่านอีโคโนไมเซอร์แล้วอุณหภูมิจะลดลงในเครื่องอุ่นอากาศอีกด้วย ดังนั้น การทำงานของเครื่องอุ่นอากาศควรพิจารณาถึงการควบคุมของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากปรดก่ามะถันด้วยเช่นกัน ขณะที่การลดความเสี่ยงต่อการสึกกร่อนแบบขัดสีทางด้านเปลวไฟทำได้โดยการลดความเร็วของอนุภาคถ้ำด้วยการลดอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของหม้อไอน้ำโดยรวมจะลดลง ดังนั้น การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้สูงขึ้น หรือ การเพิ่มการดักจับอนุภาคถ้ำลอยจะช่วยลดปริมาณของอนุภาคถ้ำลอยก่อนเข้าสู่อีโคโนไมเซอร์ได้ แต่อาจแลกมาด้วยประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

### บรรณานุกรม

1. จรัล จีรวินบูลย์, หม้อไอน้ำ ฉบับใช้งานในโรงงาน. 2553, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
2. อนุสรณ์ ชินสุวรรณ, เครื่องกำเนิดไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. 2563, ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
3. Liu, W., *Failure analysis on the economisers of a biomass fuel boiler*. Engineering Failure Analysis, 2013. **31**: p. 101-117.
4. Adham, K. and G. Bowes, *Natural Graphite Purification Through Chlorination in Fluidized Bed Reactor: Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy*. 2018. p. 2505-2512.
5. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, ฟลูอิดเซชัน *Fluidization*. 2560, กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. Ezgi, C., *Basic Design Methods of Heat Exchanger*. 2017.
7. Ya, C., A. Ghajar, and H. Ma, *Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill, 2015.
8. Broström, M. *Aspects of alkali chloride chemistry on deposit formation and high temperature corrosion in biomass and waste fired boilers*. 2010.
9. Yang, X., et al., *Understanding the ash deposition formation in Zhundong lignite combustion through dynamic CFD modelling analysis*. Fuel, 2017. **194**.
10. Kiang, Y., *Predicting dewpoints of acid gases*. Chem. Eng. Prog., 1974. **70**.
11. Maj, I., et al., *High-temperature corrosion in a multifuel circulating fluidized bed (CFB) boiler co-firing refuse derived fuel (RDF) and hard coal*. Fuel, 2022. **324**: p. 124749.
12. Liu, S., et al., *A comparative study on the high temperature corrosion of TP347H stainless steel, C22 alloy and laser-cladding C22 coating in molten chloride salts*. Corrosion Science, 2014. **83**: p. 396-408.
13. Nielsen, H.P., et al., *The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers*. Progress in Energy and Combustion Science, 2000. **26**(3): p. 283-298.

14. Riedl, R., et al., *Corrosion in fire tube boilers of biomass combustion plants*. 1999.
15. Li, K. and Y. Zeng, *Corrosion of heat exchanger materials in co-combustion thermal power plants*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. **161**: p. 112328.
16. Wnorowska, J., W. Gądek, and S. Kalisz *Statistical Model for Prediction of Ash Fusion Temperatures from Additive Doped Biomass*. *Energies*, 2020. **13**, DOI: 10.3390/en13246543.
17. Karlsson, A., P.J. Møller, and V. Johansen, *Iron and steel corrosion in a system of O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and alkali chloride. The formation of low melting point salt mixtures*. *Corrosion Science*, 1990. **30**(2): p. 153-158.
18. Ledbetter, H., *Physical Properties Data Compilations Relevant to Energy Storage*. 1982: National Bureau of Standards.
19. Das, S.K., et al., *Analytical model for erosion behaviour of impacted fly-ash particles on coal-fired boiler components*. *Sadhana*, 2006. **31**: p. 583-595.
20. ชาศริต สุวรรณจำรัส, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยวิธีปริมาตรจำกัด. 2561, นครปฐม: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหิดล.
21. Zhang, N., et al., *3D CFD simulation of hydrodynamics of a 150MWe circulating fluidized bed boiler*. *Chemical Engineering Journal*, 2010. **162**(2): p. 821-828.
22. Xu, L., et al., *A comprehensive CFD combustion model for supercritical CFB boilers*. *Particuology*, 2019. **43**: p. 29-37.
23. Zhang, H., et al., *Numerical study on the erosion process of the low temperature economizer using computational fluid dynamics-discrete particle method*. *Wear*, 2020. **450-451**: p. 203269.
24. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไฟไนต์วอลุ่ม. 2559, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
25. Yu, H. and W. Ma, *Study on two different calculation methods for thrust aerostatic bearings with single supply hole at large gas film clearance*. 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2010, 2010.

26. ANSYS Inc. *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. 2009 [Accessed 30 May 2023]; Available from: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/>.
27. Mettler-Toledo International Inc. การออกแบบการทดลอง DoE. [Accessed 3 June 2023].
28. ฉลอง สี่แก้วสีว. *Full Factorial Design*. [Accessed 3 June 2023 ]; Available from: [http://www.geocities.ws/chalong\\_sri/Full\\_DOE.htm](http://www.geocities.ws/chalong_sri/Full_DOE.htm).
29. นิคม ถนอมเสียง. การทดสอบสมมุติฐาน (*Hypothesis Testing*). [Accessed 5 June 2023]; Available from: [https://home.kku.ac.th/nikom/hypothesis\\_nk\\_2558.pdf](https://home.kku.ac.th/nikom/hypothesis_nk_2558.pdf).
30. Gruber, T., R. Scharler, and I. Obernberger, *Application of an empirical model in CFD simulations to predict the local high temperature corrosion potential in biomass fired boilers*. *Biomass and Bioenergy*, 2015. **79**: p. 145-154.
31. Kumari, A., S.K. Das, and P. Srivastava, *Modeling fireside corrosion rate in a coal fired boiler using adaptive neural network formalism*. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 2016. **34**(1): p. 23-38.
32. Zong, C., Q. Wang, and X. Huang, *Corrosion Characteristics of 20G in the Environment of Heating Surface in Biomass Boilers*. *International Journal of Smart Home*, 2015. **9**: p. 1-8.
33. Montgomery, M., A. Karlsson, and O.H. Larsen, *Field test corrosion experiments in Denmark with biomass fuels. Part 1: Straw-firing*. *Materials and Corrosion*, 2002. **53**(2): p. 121-131.
34. Guo, H., et al., *Dynamic simulation on high-temperature corrosion behaviour of tube surface with fouling in utility boiler fired by high-chlorine coal*. *Journal of the Energy Institute*, 2021. **95**: p. 120-131.
35. Gandhi, M.B., et al., *CFD based prediction of erosion rate in large scale wall-fired boiler*. *Applied Thermal Engineering*, 2012. **42**: p. 90-100.
36. Borello, D., et al., *Prediction of multiphase combustion and ash deposition within a biomass furnace*. *Applied Energy*, 2013. **101**: p. 413-422.
37. Engineering ToolBox. *Metals, Metallic Elements and Alloys - Thermal Conductivities*. 2005 [Accessed 28 December 2022]; Available from: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d\\_858.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html).



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

### ภาคผนวก

#### วิธีการคำนวณอัตราการไหลต่อพื้นที่การไหลของแบบจำลองอีโคโนไมเซอร์ 1 หน่วยซ้ำ

1. การคำนวณอัตราการไหลโดยมวลของวัฏภาคแก๊สเผาไหม้ต่อพื้นที่การไหลของแบบจำลอง

$$m_{\text{flue gas}} = \frac{m_{\text{flue gas, total}}}{A_{\text{total, gas inlet}}} \times A_{\text{a repeating unit, gas inlet}}$$

$$m_{\text{flue gas}} = \frac{201.484 \text{ kg/s}}{12.4 \text{ m} \times [(0.07 \text{ m} \times 99) + (0.045 \text{ m} \times 2)]} \times (6.2 \text{ m} \times 0.07 \text{ m})$$

$$m_{\text{flue gas}} = 1.005 \text{ kg/s}$$

2. การคำนวณอัตราการไหลโดยมวลของวัฏภาคเถ้าลอยต่อพื้นที่การไหลของแบบจำลอง

$$m_{\text{fly ash}} = \frac{m_{\text{fly ash, total}}}{A_{\text{total, gas inlet}}} \times A_{\text{a repeating unit, gas inlet}}$$

$$m_{\text{fly ash}} = \frac{0.525 \text{ kg/s}}{12.4 \text{ m} \times [(0.07 \text{ m} \times 99) + (0.045 \text{ m} \times 2)]} \times (6.2 \text{ m} \times 0.07 \text{ m})$$

$$m_{\text{fly ash}} = 2.618 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

3. การคำนวณอัตราการไหลโดยมวลของวัฏภาคน้ำป้อนต่อพื้นที่การไหลของแบบจำลอง

$$m_{\text{water}} = \frac{m_{\text{water, total}}}{A_{\text{total, water inlet}}} \times A_{\text{a repeating unit, water inlet}}$$

$$m_{\text{water}} = \frac{116.8 \text{ kg/s}}{\frac{\pi}{4} \times (0.038 \text{ m})^2 \times 200} \times \frac{\pi}{4} \times (0.038 \text{ m})^2 \times 0.5$$

$$m_{\text{water}} = 0.292 \text{ kg/s}$$

เมื่อ	$m_p$	คือ	อัตราการไหลโดยมวลของวัฏภาค p ต่อพื้นที่การไหลของแบบจำลอง (kg/s)
	$m_{p, \text{total}}$	คือ	อัตราการไหลโดยมวลของวัฏภาค p ทั้งหมด (kg/s)
	$A_{\text{a repeating unit, p inlet}}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดบริเวณทางเข้าของวัฏภาค p ของแบบจำลอง ( $\text{m}^2$ )
	$A_{\text{total, p inlet}}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดบริเวณทางเข้าของวัฏภาค p ทั้งหมด ( $\text{m}^2$ )

วิธีการคำนวณสัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคเถ้า โดยอาศัยสมการที่ (3.1)

$$G_s = \frac{m_{\text{fly ash, total}}}{A_{\text{total, gas inlet}}}$$

$$G_s = \frac{0.525 \text{ kg/s}}{12.4 \text{ m} \times [(0.07 \text{ m} \times 99) + (0.045 \text{ m} \times 2)]}$$

$$G_s = 6.03 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\alpha_s = \frac{G_s}{\rho_s U_g}$$

$$\alpha_s = \frac{6.03 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2.203 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$\alpha_s = 2.7372 \times 10^{-6}$$

เมื่อ	$G_s$	คือ	ฟลักซ์การไหลอนุภาคของแข็ง ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )
	$m_{\text{fly ash, total}}$	คือ	อัตราการไหลโดยมวลของวัฏภาคเถ้าทั้งหมด ( $\text{kg}/\text{s}$ )
	$A_{\text{total, gas inlet}}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดบริเวณทางเข้าของวัฏภาคแก๊สเผาไหม้ทั้งหมด ( $\text{m}^2$ )
	$\alpha_s$	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็ง
	$\rho_s$	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	$U_g$	คือ	ความเร็วป้อนเข้าของแก๊ส ( $\text{m}/\text{s}$ )

วิธีการคำนวณความหนาชั้นเถ้า (Ash deposition thickness)

$$\text{Ash deposition thickness} = \sqrt{(y - y_{\text{tube axis}})^2 + (z - z_{\text{tube axis}})^2} - \text{outside tube radius}$$

$$\text{Ash deposition thickness} = \sqrt{(6.01 \text{ m} - 5.9725 \text{ m})^2 + (0.034 \text{ m} - 0.035 \text{ m})^2} - 0.0275 \text{ m}$$

$$\text{Ash deposition thickness} = 0.010 \text{ m}$$

เมื่อ	Ash deposition thickness	คือ	ความหนาของชั้นสะสมเถ้า (m)
-------	--------------------------	-----	----------------------------

$y$	คือ	ตำแหน่งตามแนวแกน $y$ (m)
$Y_{\text{tube axis}}$	คือ	ความสูงตามแนวแกน $y$ ของแกนท่อที่ใช้ในการคำนวณหา ความหนาของชั้นสะสมเก้้า ณ ระดับชั้นที่อนั้น (m)
$z$	คือ	ตำแหน่งตามแนวแกน $z$ (m)
$Z_{\text{tube axis}}$	คือ	ความสูงตามแนวแกน $z$ ของแกนท่อที่ใช้ในการคำนวณหา ความหนาของชั้นสะสมเก้้า ณ ระดับชั้นที่อนั้น (m)
<b>outside tube radius</b>		
	คือ	รัศมีของผนังท่อด้านนอก (m)





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐวรรณ แสงนวกิจ
วัน เดือน ปี เกิด	16 เมษายน 2541
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	100/443 ถนนศรีนครินทร์ ตำบลบางเมือง อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270
ผลงานตีพิมพ์	Sangnawakit, N., K. Phocharoen, P. Wises, B. Chalermssinsuwan and P. Piumsomboon (2023). Prediction of Ash Deposition Thickness on Tube Surfaces in Economizer of Circulating Fluid Bed Boiler by Computational Fluid Dynamics Simulation. The 32nd Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, Nakhon Pathom, Thailand, Thai Institute of Chemical Engineering.