

การจำลองการถ่ายโอนความร้อนในไรเซอร์ของเตาเผาฟลูอิดไอดีส์แบบหมุนเวียน



นายนพพล มังกรานนท์ชัย

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-7073-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN RISER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR



Mr.Noppon Manggaranochai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-7073-1

นพพล มังกรานนท์ชัย : การจำลองการถ่ายโอนความร้อนในไรเซอร์ของเตาเผา
ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน (SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN RISER
OF CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR) อ . ที่ ป ร ี ก ษ า :
รศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, จำนวนหน้า 91 หน้า. ISBN 974-17-7073-1.

ปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ มีการใช้งานเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนมากขึ้น เนื่องจากเป็นเตาเผาที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิด เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล หรือเชื้อเพลิงผสม เพื่อปรับปรุงการทำงานของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ความเข้าใจในอุทกพลศาสตร์และการถ่ายโอนความร้อนเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในงานวิจัยนี้สนใจกระบวนการถ่ายโอนความร้อนในไรเซอร์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาเผาชนิดนี้ การจำลองภาวะในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองภาวะของระบบการไหลต่างๆ เพื่อศึกษาผลตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ความเร็ว ปริมาณของแข็งที่ป้อนเข้าสู่ระบบ และรูปแบบช่องทางออกที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในระบบ ซึ่งจากผลการจำลองภาวะพบว่า รูปแบบของช่องทางออกมีผลต่อการไหลเวียนของของแข็งและความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยในไรเซอร์ ซึ่งส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย และการเพิ่มความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยในระบบจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย



สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต..... นพพล มังกรานนท์ชัย
สาขาวิชา..... เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา..... 2547.....

4572328323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : HEAT TRANSFER/CFBC/SIMULATION/HYDRODYNAMIC/FLUENT

NOPPON MANGGARANOCHAI : SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN RISER
OF CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTOR. THESIS ADVISOR:
ASSOC.PROF.PORNPOTE PIUMSOMBOON, 91 pp. ISBN 974-17-7073-1.

A circulating fluidized bed combustor (CFBC) has been widely used since it has high efficiency and can handle various kinds of fuels such as coal, biomass, or mixed feed. To improve its operation, the understanding of the hydrodynamics and heat transfer inside the unit is very important. This study was focused on heat transfer in the riser. A model was developed and simulated its hydrodynamics and heat transfer in the riser of a CFBC by using CFD simulator, Fluent. Solid mass flux, gas velocity and top-end design were changed to observe the response in the riser. It also studied the effect of the top-end design on heat transfer coefficient. It was found that the design of the top-end had affected the solid circulation and solid density in the riser. The increase in solid density has increased the heat transfer coefficient.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DepartmentChemical Technology ... Student's signature *Noppon Manggaranochai*
Field of studyChemical Technology ... Advisor's signature *[Signature]*
Academic year 2004.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้มอบ แนวทางคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด โดยแนวทางข้อคิดอันเป็น ประโยชน์เหล่านั้นสามารถปรับปรุงนำมาใช้กับการดำเนินชีวิตได้อีกด้วย ตลอดจนคุณอาจารย์ ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค และ ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ต่อการทำงานวิจัยนี้ด้วย

งานวิจัยเรื่อง “การจำลองการถ่ายโอนความร้อนในไรเซอร์ของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบ หมุนเวียน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัย ด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการ อนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ทั้งนี้ผู้ทำการวิจัยขอกราบ ขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณทุกๆ ข้อเสนอแนะและกำลังใจจากพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน ในเวลาที่ท้อแท้และมี ปัญหา คำแนะนำและกำลังใจเหล่านั้นได้เป็นแรงผลักดันข้าพเจ้าจนมาเย็นที่จุดตรงนี้ได้ ขอขอบคุณ ความรู้สึกดีๆ และความอบอุ่นจากการทำงานในห้องวิจัยไซเบอร์เนติกส์ ที่ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของทุก อย่างในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกๆ คนในครอบครัว มังกรานนท์ชัย ที่ได้ให้ความเข้าใจและกำลังใจ แก่ข้าพเจ้าเสมอมาตั้งแต่เกิดจนกระทั่งทุกวันนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฏ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ฟลูอิดไดเซชัน.....	3
2.1.1 นิยาม	3
2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	3
2.1.2.1 ฟลูอิดไดเซชันแบบสองสถานะ.....	3
2.1.2.2 ฟลูอิดไดเซชันแบบสามสถานะ	4
2.1.3 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด	4
2.1.4 แก๊สฟลูอิดไดเซชัน	5
2.1.4.1 เบดนิ่ง.....	5
2.1.4.2 เบดแบบฟองแก๊ส	5
2.1.4.3 เบดแบบสลัก	6
2.1.4.4 เบดแบบปั่นป่วน	7
2.1.4.5 เบดแบบฟาส	9
2.1.4.6 Dilute-Phase Transport	9

บทที่	หน้า
2.1.5	ลักษณะคล้ายของฟลูอิดิติกเบด..... 10
2.1.6	ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดิติกเซชัน..... 11
2.1.7	การถ่ายโอนความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดิติกเบดแบบหมุนเวียน..... 12
2.1.7.1	การถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สสู่อนุภาค 12
2.1.7.2	การถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่ผนัง..... 13
2.1.7.3	การถ่ายโอนความร้อนไปสู่ท่อที่จมอยู่ภายในเบด..... 17
2.2	การคำนวณเชิงพลวัตของของไหล 18
2.2.1	วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม 19
2.2.2	วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์..... 22
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 25
3	วิธีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 28
3.1	แบบจำลองการไหลหลายวัฏภาคของแก๊สและของแข็ง..... 28
3.1.1	สมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง..... 29
3.1.2	สมการอนุรักษ์พื้นฐาน 29
3.1.2.1	สมการอนุรักษ์มวล..... 29
3.1.2.2	สมการอนุรักษ์โมเมนตัม 30
3.1.2.3	สมการอนุรักษ์พลังงาน 33
3.2	ส่วนการจำลองโดยโปรแกรม..... 37
3.2.1	การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Gambit และรายละเอียด ของระบบ..... 38
3.2.2	สภาวะขอบเขต 40
3.2.3	การจำลองภาวะภายในโปรแกรม Fluent 40
3.2.3.1	การกำหนดชนิดของตัวแก้ปัญหา..... 40
3.2.3.2	การกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัฏภาค..... 41
3.2.3.3	การกำหนดค่าขอบเขตและสภาวะที่ใช้ในการจำลองภาวะ 42
3.2.3.4	การกำหนดขั้นเวลาและการจำลองภาวะ 44

บทที่	หน้า
4 ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล	45
4.1 ผลการจำลองภาวะในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อน...45	45
4.2 ผลการจำลองภาวะในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีการถ่ายโอนความร้อน.....49	49
4.2.1 ผลของความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน.....	49
4.2.2 ผลของความเร็วขาเข้าของอากาศที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน	51
4.2.3 ผลของรูปแบบช่องทางออกที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน.....	54
5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลงานวิจัย	67
5.1.1 การจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อน	67
5.1.2 การจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีการถ่ายโอนความร้อน	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
รายการอ้างอิง	69
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการจำลองภาวะ	72
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	85
ภาคผนวก ค โปรแกรมเพิ่มเติมที่ใช้ประกอบกับแบบจำลองบนโปรแกรม Fluent 6.1	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัสดุภาคที่ใช้ในการจำลองภาวะ	42
3.2 การกำหนดค่าขอบเขตเริ่มต้นในการจำลองภาวะ	43
4.1 ค่าสัดส่วนปริมาตรของของแข็งเริ่มต้นและค่าฟลักซ์ของของแข็งที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	50
4.2 ผลของค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน.....	50
4.3 ผลของรูปแบบของช่องทางออกที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน	57
4.4 ผลของความยาวของช่องว่างเหนือช่องทางออกที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน	61
4.5 ค่าพิกัดของจุดที่ใช้วัดค่าความดันของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์	61
ก1 ข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์ที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ.....	72
ก2 ข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์ที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน	74
ก3 ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์แบบ S. Benyahia ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน.....	76

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดบีตแก๊ส-ของแข็ง	4
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน.....	7
2.3 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดบีต.....	10
2.4 ผลของเลขเรย์โนลด์ส์ที่มีต่อเลขนัสเซลล์ต์ภายในเบดแบบต่างๆ	12
2.5 ภาพแสดงกลไกการถ่ายเทความร้อนจากเบดสู่ผนังภายในฟลูอิดไอเซชันแบบ หมุนเวียน	13
2.6 ผลของความหนาแน่นของของแข็งต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย.....	14
2.7 ผลของค่าความเร็วฟลูอิดไอเซชันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย.....	15
2.8 ผลของความยาวของพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน ความร้อนเฉลี่ย	16
2.9 ผลของอุณหภูมิของเบดที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่ความ หนาแน่นของของแข็งคงที่.....	16
2.10 แผ่นโลหะที่มีขอบโค้งลักษณะต่างๆ และการหาผลเฉลยด้วยวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม	18
2.11 การหาผลเฉลยบนแผ่นโลหะด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	19
2.12 รูปร่างลักษณะทั่วไปของขอบเขตของปัญหา	20
2.13 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นตารางสี่เหลี่ยม	20
2.14 การแบ่งรูปร่างลักษณะออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ.....	22
2.15 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง.....	23
3.1 แบบจำลองไรเซอร์สองมิติพร้อมด้วยค่าสภาวะเริ่มต้น.....	39
3.2 รูปทรงของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์ที่สร้างขึ้นภายในโปรแกรม Gambit.....	39
3.3 แผนภาพกระบวนการแก้ปัญหาโดยรวมของวิธีแก้ปัญหาแบบ Segregated.....	40
3.4 ขอบเขตของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์และค่าสภาวะแวดล้อม.....	43
4.1 การกระจายตัวของความหนาแน่นของของแข็งภายในไรเซอร์ที่ความสูง 3.9 เมตร โดย เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองภาวะที่ได้ในงานวิจัยของ S. Benyahia และผลการ จำลองภาวะในงานวิจัยนี้	46
4.2 การกระจายตัวของความหนาแน่นของของแข็งภายในไรเซอร์ที่ความสูง 3.9 เมตร โดย เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองภาวะที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบและ แบบปั่นป่วน ตามลำดับ	47

4.3ก	คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตร และเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่ได้จากการจำลองภาวะที่บริเวณส่วนทางเข้าของแก๊สและของแข็ง	48
4.3ข	คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตร และเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่ได้จากการจำลองภาวะที่บริเวณส่วนกลางของโรเตอร์.....	48
4.3ข	คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตร และเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่ได้จากการจำลองภาวะที่บริเวณส่วนทางออกของแก๊สและของแข็ง.....	48
4.4	การกระจายตัวของฟลักซ์ของของแข็งภายในโรเตอร์ที่ความสูง 3.9 เมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองภาวะที่ได้ในงานวิจัยของ S. Benyahia และผลการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้	48
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในโรเตอร์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่นำเสนอในงานวิจัยของ Dogan และ Uysal, 1999	51
4.6ก	คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็งภายในระบบบริเวณด้านล่างของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศขาเข้าค่าเท่ากับ 2.6 เมตรต่อวินาที.....	52
4.6ข	คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็งภายในระบบบริเวณด้านล่างของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศขาเข้าค่าเท่ากับ 3.9 เมตรต่อวินาที.....	52
4.6ค	คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็งภายในระบบบริเวณด้านล่างของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศขาเข้าค่าเท่ากับ 5.2 เมตรต่อวินาที.....	52
4.7	แผนภาพแสดงค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยที่เวลา 5 วินาที กับค่าความเร็วอากาศขาเข้า	53
4.8	แผนภาพแสดงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ กับความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยที่เวลา 5 วินาที.....	53
4.9	แผนภาพแสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่เวลา 5 วินาที กับค่าความเร็วอากาศขาเข้า	54
4.10	รูปแบบช่องทางออกที่ใช้ในการศึกษาผลของรูปแบบของช่องทางออกที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย.....	55
4.11	คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่บริเวณช่องทางออกของรูปแบบช่องทางออกของจำลองการไหลของโรเตอร์ทั้งสามแบบ.....	56
4.12	คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่บริเวณช่องทางเข้าทางด้านล่างของโรเตอร์ ของรูปแบบช่องทางออกทั้งสามแบบ	56

ภาพประกอบ	หน้า
4.13 สัดส่วนปริมาตรของของแข็งในระบบตลอดความสูงของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์ ทั้งสามแบบ	57
4.14 แผนภาพแสดงสัดส่วนของความยาวของช่องว่างเหนือทางออกของแบบจำลองการไหล ของไรเซอร์	58
4.15 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งของแบบจำลองไรเซอร์ ที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่าง 0.0D	58
4.16 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งของแบบจำลองไรเซอร์ ที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่าง 0.5D	59
4.17 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งของแบบจำลองไรเซอร์ ที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่าง 1.0D	60
4.18 ตำแหน่งของจุดที่ใช้วัดค่าความดันของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์	62
4.19 ค่าความดันที่จุดต่างๆ ของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์	62
4.20 รูปแบบของการเกิดฟลูอิดไอเซชันประเภทต่างๆ กับค่าความเร็วของอากาศและค่าเลข อาร์คิมิดีสยกกำลังหนึ่งส่วนสาม	63
4.21 รูปแบบของการเกิดฟลูอิดไอเซชันของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์ในงานวิจัยนี้	64
4.22 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยจาก ผลการจำลองภาวะทั้งหมด	64
4.23 ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยของรูปแบบช่องทางออกของไรเซอร์แบบต่างๆ ในงานวิจัยนี้	65

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัดของเบด
ΔP	=	ความดันตกคร่อม
d_p	=	ขนาดของอนุภาค
e	=	สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง
ε	=	สัดส่วนช่องว่าง
ε_{ch}	=	สัดส่วนช่องว่างขณะที่แก๊สมีความเร็วเท่ากับ U_{ch}
ε_{mf}	=	สัดส่วนช่องว่างขณะที่แก๊สมีความเร็วเท่ากับ U_{mf}
F_D	=	แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
g_0	=	ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมี
J_j	=	ฟลักซ์การแพร่ของสาร j
k_{eff}	=	ค่าการนำความร้อนยังผล
K_s	=	การกระจายตัวของพลังงาน
L	=	ความสูงของเบด
L_{mf}	=	ความสูงของเบดขณะเริ่มเกิดฟลูอิไดเซชัน
P	=	ความดัน
Re_p	=	เลขเรย์โนลด์ส์ของอนุภาคของแข็ง
S_h	=	แหล่งความร้อนเชิงปริมาตร
T	=	ความเค้นเทนเซอร์
U_{ch}	=	ความเร็วโชคกึ่ง
U_i	=	ความเร็วของวัญภาค i
U_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน
U_t	=	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง
β	=	สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัญภาค
γ	=	การสูญเสียพลังงานแกว่ง
μ_i	=	สัมประสิทธิ์ความหนืดของวัญภาค i
ρ_i	=	ความหนาแน่นของวัญภาค i

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ มีการใช้งานเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustor: CFBC) มากขึ้น เนื่องจากเป็นเตาเผาที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิด เช่น ถ่านหิน เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ซึ่งในที่นี่ได้แก่ ขุยมั้ย (Pith), เปลือกไม้ (Bark), กากมั้ย (Bagasse) และกากตะกอน (Sludge) หรือเชื้อเพลิงผสม และมีการถ่ายโอนความร้อนที่ดี เพราะมีการนำเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดกลับมาเผาไหม้อีก และยังช่วยลดปริมาณ SO_x และ NO_x อีกด้วย เตาเผาประเภทนี้ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าหรือผลิตไอน้ำในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ ในการที่จะพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจึงต้องมีความเข้าใจในกระบวนการพลวัต และกระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมากขึ้น ดังนั้นการจำลองภาวะทางพลวัตและกระบวนการการถ่ายโอนความร้อนในโรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาเผาชนิดนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญ ที่จะนำมาซึ่งความเข้าใจในพฤติกรรมทางพลวัตและกระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะนำผลการจำลองภาวะที่ได้มาปรับปรุงและพัฒนากระบวนการถ่ายโอนความร้อนของเตาเผา หรือใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาออกแบบเตาเผาในอนาคตต่อไป

การจำลองภาวะในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Fluent รุ่น 6.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองภาวะของระบบการไหลต่างๆ โดยใช้วิธีการพลวัตของไหลเชิงการคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองเชิงพลวัตของของไหลและกระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ของเตาเผา เพื่อที่จะหาภาวะและรูปแบบช่องทางออกที่เหมาะสมในการทำงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาแบบจำลองภาวะการณโดยใช้โปรแกรม Fluent เพื่อใช้ในการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนภายในโรเตอร์ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
2. ศึกษาผลกระทบจากการออกแบบช่องทางออกต่อการถ่ายโอนความร้อนภายในโรเตอร์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ทำการพัฒนาแบบจำลองการไหลสองมิติของโรเซออร์ โดยไม่มีการถ่ายโอนความร้อนที่ภาวะอุณหภูมิคงที่ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในโรเซออร์ของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน
2. เพิ่มสมการการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในแบบจำลองที่พัฒนาได้นำผลที่ได้จากการจำลองภาวะมาวิเคราะห์ เพื่อที่จะหาภาวะและช่องทางออกที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้การถ่ายโอนความร้อนสูงสุด

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม Fluent
3. ออกแบบแบบจำลองของโรเซออร์ที่ใช้ในการจำลองภาวะในโปรแกรม Fluent
4. จำลองภาวะของโรเซออร์ในแบบที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อน
5. จำลองภาวะของโรเซออร์ในแบบที่มีการถ่ายโอนความร้อน
6. ศึกษาภาวะการทำงานและรูปแบบช่องทางออกที่เหมาะสม และทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในโรเซออร์ของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน
2. เป็นแนวทางในการออกแบบ เตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนให้มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟลูอิดิเซชัน

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มีการนำเทคนิคฟลูอิดิเซชันมาใช้ในกระบวนการผลิตกันมากขึ้น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถตอบสนองความต้องการในทางอุตสาหกรรมในด้าน การลดต้นทุนการผลิต และการเพิ่มผลผลิตได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงมีการสร้างเครื่องมือต่างใน กระบวนการอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มากขึ้น และมีการพัฒนากระบวนการเหล่านี้ไปอย่างรวดเร็ว ทั้งในยุโรปและอเมริกา ยกตัวอย่างเช่น เตาเผาฟลูอิดิเซชันแบบหมุนเวียน เครื่องอบแห้งแบบ ฟลูอิดิเซชัน เป็นต้น

2.1.1 นิยาม

ฟลูอิดิเซชัน คือกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือ ชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้น เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่ง มาวางไว้บนตะแกรงในหอคอดลงแล้วให้ของไหล (แก๊ส, ของเหลว) ไหลผ่านจากด้านล่างของ ตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็ง และไหลออกทางส่วนบนของ หอคอดลง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้น เป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดิเซชัน และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดิเซชัน

2.1.2 ประเภทของฟลูอิดิเซชัน

จากรูปแบบการใช้งานของฟลูอิดิเซชันสามารถแบ่ง ฟลูอิดิเซชันเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ ฟลูอิดิเซชันแบบสองสถานะและฟลูอิดิเซชันแบบสามสถานะ

2.1.2.1 ฟลูอิดิเซชันแบบสองสถานะ (Two-phase Fluidization)

เป็นกระบวนการฟลูอิดิเซชันที่เบดใช้งานภายในกระบวนการประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลนั้นจะเป็นแก๊สหรือเป็นของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้น ฟลูอิดิเซชันแบบสองสถานะ จึงสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีกสองแบบคือ

- แก๊สฟลูอิดิเซชัน (Gas Fluidization)
- ฟลูอิดิเซชันของเหลว (Liquid Fluidization)

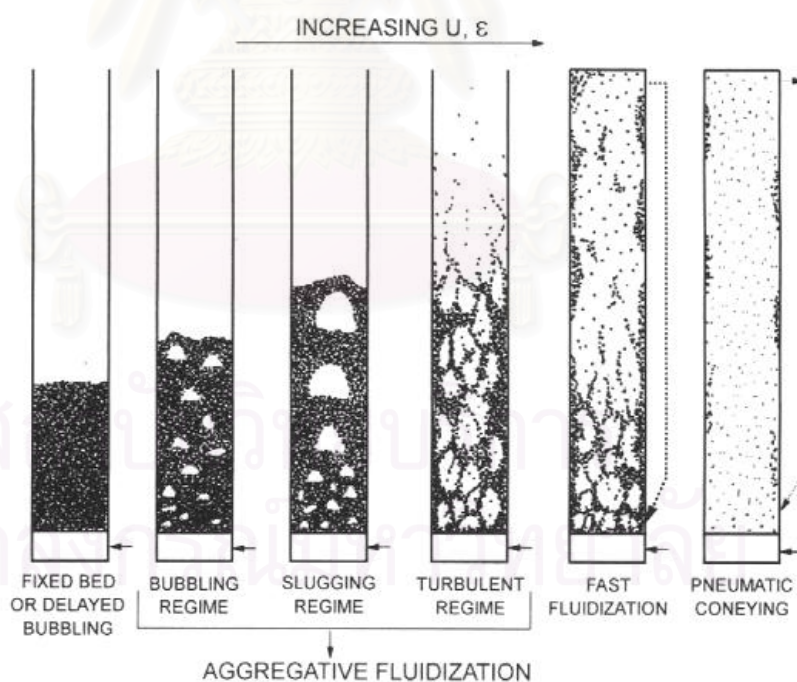
2.1.2.2 ฟลูอิดไอเซชันแบบสามสถานะ (Three-phase Fluidization)

เป็นกระบวนการฟลูอิดไอเซชันที่เบดใช้งานภายในกระบวนการประกอบด้วยสามสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และ แก๊ส กระบวนการฟลูอิดไอเซชันแบบสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นจากฟลูอิดไอเซชันแบบสองสถานะ เช่น หอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed Bed) ดังนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อนมากกว่า และการคำนวณต้องอาศัยหลักคณิตศาสตร์ขั้นสูง

2.1.3 ลักษณะของฟลูอิดไอซ์เบด

ฟลูอิดไอเซชัน สามารถแบ่งได้เป็นหลายลักษณะตามรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วของของไหลที่ใช้ที่เพิ่มขึ้นในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน ในแต่ละชนิดของการไหลจะมีรูปแบบการสัมผัสกันของของแข็งและของไหลต่างกัน ซึ่งรูปแบบการสัมผัสกันของของแข็งและของไหลเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาเลือกฟลูอิดไอเซชันลักษณะต่างๆ ไปใช้งาน

โดยที่ เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลภายในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายแก๊ส (Gas Distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด



รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไอซ์เบดแก๊ส-ของแข็ง (Grace, J. R. 1997)

2.1.4 แก๊สฟลูอิดไอเซชัน

แก๊สฟลูอิดไอเซชันเป็นการเกิดฟลูอิดไอซ์เบดสองสถานะระหว่างของไหลที่เป็นแก๊สกับของแข็งดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ขอบเขตของฟลูอิดไอซ์เบด (Regime of Fluidization) จะสามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 2.1

เมื่อเบตวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายแก๊สและมีแก๊สเคลื่อนที่ผ่านขึ้นมาซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้น และ อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้

2.1.4.1 เบตนิ่ง (Fixed bed) เมื่อแก๊สไหลผ่านเบตขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบต เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบตที่วางนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure Drop) ตกคร่อมเบตไว้

ความดันตกคร่อมเบตตลอดความสูงของเบตนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun Equation ดังนี้ (Kunii and Levenspiel, 1991)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U (1-\varepsilon)^2}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g U^2 (1-\varepsilon)}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} \quad (2.1)$$

2.1.4.2 เบตแบบฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed) เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่งอนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วจุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (Minimum Fluidization Velocity; U_{mf}) และเรียกเบต ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประทุติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบต ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบต ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_D = \Delta P \cdot A = AL(1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.2)$$

เมื่อ

A = พื้นที่หน้าตัดของเบต

L = ความสูงของเบต

นำสมการที่ (2.2) มาจัดรูปแบบใหม่จะได้เป็นสมการแสดงภาวะต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชัน (Minimum Fluidization Condition) ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.3)$$

โดยที่ ตัวห้อย mf แทนภาวะต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดเซชัน

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

- $Re_p < 20$

$$U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{150 \mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.4)$$

- $Re_p > 1,000$

$$U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.5)$$

ส่วนความเร็วของแก๊สที่ทำให้เริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด (Minimum Bubbling Fluidization Velocity, U_{mb}) ในกรณีของอนุภาคของแข็งกลุ่ม A ของ Geldart U_{mb} จะมีค่ามากกว่า U_{mf} ส่วนในกรณีของกลุ่ม B และ D U_{mb} จะเท่ากับ U_{mf} ดังนั้น รูปแบบการเกิดฟลูอิดเซชันแบบสม่ำเสมอ หรือแบบไม่มีฟองแก๊ส (Bubble-free fluidization) จึงเกิดเฉพาะในกรณีที่อนุภาคของแข็งเป็นกลุ่ม A เท่านั้น ซึ่งในปี ค.ศ. 1978 Geldart และ Abrahamsen ได้ประมาณไว้ในหน่วย SI เป็น

$$U_{mb} = 33 d_p \left(\frac{\rho_g}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2.6)$$

2.1.4.3 เบดแบบสลัก (Slugging Bed) ดังกล่าวมาแล้วว่าขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบด ถ้าเบดบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลัก และที่ความเร็วของแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดหรือหอทดลอง ก็คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการสลัก (Minimum Slugging Velocity : U_{ms}) ซึ่งในปี ค.ศ. 1967 Stewart และ Davidson ได้ประมาณไว้ ดังนี้

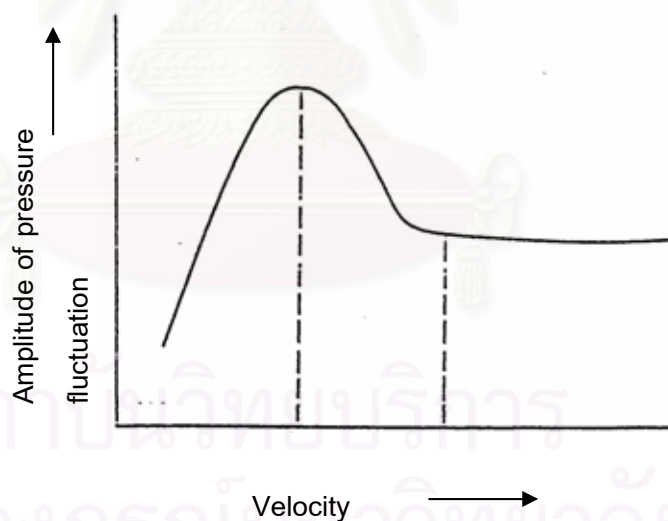
$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07 \sqrt{gD} \quad (2.7)$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอทดลอง

2.1.4.4 เบริดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed) เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบริดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนมากกว่า U_{mf} เบริดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส) การเคลื่อนไหวภายในเบริดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบริดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

- Dense Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น
- Dilute Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบริดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบริดแบบปั่นป่วนนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่านพบว่า การเปลี่ยนภาวะจากเบริดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบริดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบริดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบริดแบบฟองแก๊สนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบริดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบริดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเบริดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังนี้ รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วจนถึงการเกิดเบริดแบบปั่นป่วน

Terminal Velocity คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอคอดลงไป โดย Haider และ Levenspiel ได้เสนอไว้ในปี ค.ศ. 1989 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง

กรณีอนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม (Kunii and Levenspiel, 1991)

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.8)$$

หรือ เมื่อ $Re_p < 0.4$

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad (2.9)$$

เมื่อ $0.4 < Re_p < 500$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad (2.10)$$

เมื่อ $500 < Re_p < 200,000$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

และสำหรับกรณีที่อนุภาคของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.8) และ (2.12) จะติดอยู่ในตัวแปร U_t^* และ d_p^* ซึ่งเป็นพจน์ของตัวแปรไร้มิติ โดยที่

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.13)$$

$$U_t^* = U_t \left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจาก U_t^* ที่ได้จากสมการที่ (2.8) และ (2.12) นำมาหา U_t โดยอาศัยสมการที่ (2.14) ได้

$$U_t = U_t^* \left[\frac{\mu(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (2.15)$$

2.1.4.5 เบดแบบฟาส (Fast Fluidized Bed) ไม่สามารถระบุพื้นผิวด้านบนของเบดได้อณูภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกทางด้านบนหรือตกลงและต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการป้อนอนุภาคเข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างหรือตกลง อนุภาคของแข็งจะรวมกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผังของหอตกลง ขณะที่แก๊สและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งในหอตกลงเจือจางมากขึ้น

จากรูปที่ 2.1 ในภาวะที่เป็น Fast Fluidization ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดหรือหอตกลงกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของหอตกลง ระบบแบบนี้จะเรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

หมายเหตุ ฟลูอิไดเซชันที่ผ่านมาทั้งหมด (ยกเว้น Fast Fluidized Bed) อาจเรียกรวมกันว่า Captive Fluidized Bed เพราะว่า อนุภาคของแข็งทั้งหมดซึ่งสัมผัสกับแก๊สจะถูกจำกัดบริเวณอยู่ภายในระยะความสูงหนึ่งจากตัวกระจายแก๊สเท่านั้น หรือในบางกรณีที่มีการพัดพาเกิดขึ้นก็มีอนุภาคของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกพัดพาไป

2.1.4.6 Dilute-Phase Transport หรือ Pneumatic Conveying เป็นการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยแก๊ส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่อนุภาคของแข็งมีความเร่ง และอนุภาคของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผังของหอตกลง ความเร็วแก๊สที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดโชคกิ้ง (Choking Velocity, U_{ch}) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วแก๊สในระบบที่เป็นเฟสเจือจางและมีปริมาณอนุภาคของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเฟสเจือจางเป็นเฟสหนาแน่น ซึ่งความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือ ความเร็วในการเกิดโชคกิ้งนั่นเอง ปริมาณของแข็งที่ไหลออกจากเบดในตอนนี Zenz ได้เสนอความสัมพันธ์ไว้ว่า

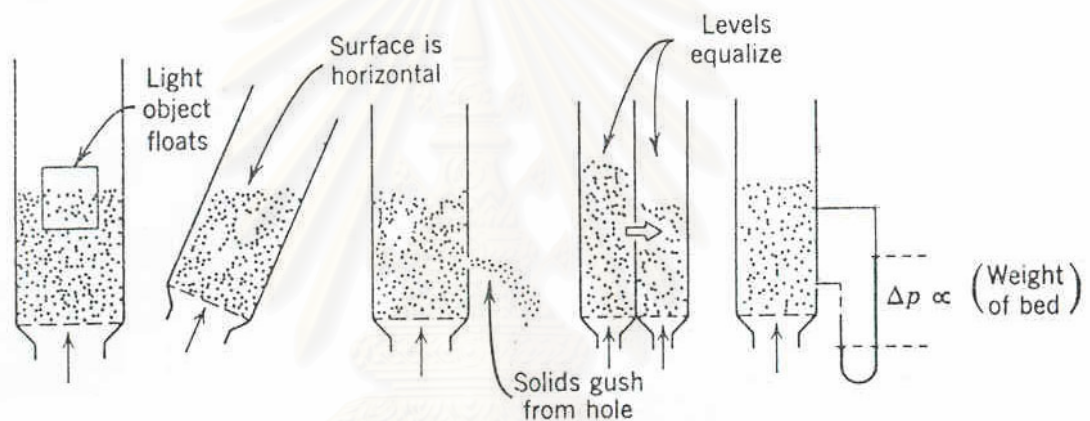
$$G_{s,ch} = \rho_S (1 - \varepsilon_{ch}) (U_{ch} - U_t) \quad (2.16)$$

เมื่อ

$G_{s,ch}$ คือ อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบตต่อพื้นที่หน้าตัดของหลอดลง

ε_{ch} คือ อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบตในภาวะ Choking พบว่าค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.943 ถึง 0.987

2.1.5 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดซ์เบต



รูปที่ 2.3 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดซ์เบต (Kunii and Levenspiel, 1991)

ในขณะที่เม็ดของแข็งลอยตัวอยู่ในลักษณะฟลูอิดซ์แบบหนาแน่นนั้น ผิวหน้าของเบตจะเรียบสม่ำเสมอเหมือนผิวหน้าของของไหลที่ใสอยู่ในภาชนะ โดยเฉพาะถ้าเป็นฟลูอิดซ์เบตแบบเดียวกัน หรือว่าจัดหลอดลงเอนไปทางซ้ายหรือขวาก็ตาม ผิวหน้าก็ยังเรียบอยู่อย่างเดิม ดังรูปที่ 2.3 ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบตใส่ลงไปในเบตวัตถุของแข็งนั้นจะลอยอยู่บนผิวหน้าของเบต นอกจากนี้ถ้าเจาะรูด้านข้างของเบต เม็ดของแข็งจะไหลออกทางรูนั้นได้เหมือนของเหลว หรือถ้านำเอาเบต 2 เบตมาต่อท่อถึงกัน เม็ดของแข็งจากเบตสูงกว่าจะไหลไปยังเบตที่มีเม็ดของแข็งต่ำกว่า

2.1.6 ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคทางฟลูอิดเซชันกับเทคนิคอื่นๆ พอสรุปได้ดังนี้

ข้อดี

- เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบตคงที่ตลอด
- มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักร้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
- จากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบตและไหลเติมเข้ามาในเบตได้
- การที่เม็ดของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบต เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วของไหลค่าเดียวกัน ฟลูอิดเบตจึงเหมาะสมกับกระบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ
- อัตราการถ่ายเทมวลสารและพลังงานสูง เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลมีมากเมื่อเทียบกับเบตนิ่ง
- ที่ความเร็วของของไหลสูงๆ การทำงานของฟลูอิดเบตจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบตที่อยู่กับที่มาก เพราะแรงเสียดทานและความดันลดมีค่าน้อยกว่า
- สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่อง
- สามารถใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสีย

- เนื่องจากมีการผสมกันของเม็ดของแข็งอย่างรวดเร็ว อาจทำให้ระยะเวลาที่เม็ดของแข็งสัมผัสและผสมกับของไหลสั้นเกินไป เบตอาจจะไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวโดยตลอด แต่อาจแก้ไขได้โดยใช้เบตหลายชั้น
- เกิดการขัดสีระหว่างของแข็งและภาชนะทำให้เกิดการสึกกร่อน เม็ดของแข็งมีขนาดเล็กกลง

2.1.7 การถ่ายโอนความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน

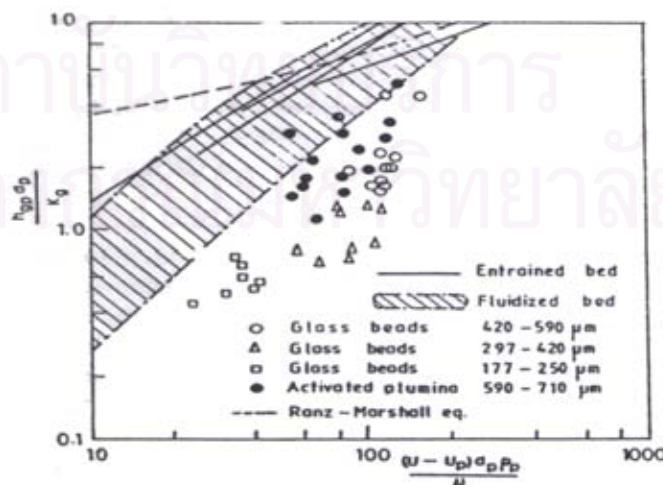
กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียนเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นกระบวนการปลดปล่อยความร้อน (Exothermic Reaction) ทำให้มีการถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นภายในเตาเผา โดยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นตัวช่วยควบคุมอุณหภูมิของเบด และถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ เช่นการผลิตไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของของแข็งตามแนวรัศมีของเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับความสูงของตัวเตาเผา ซึ่งนับตั้งแต่บริเวณตัวกระจายแก๊สด้านล่างไปจนถึงบริเวณทางออกด้านบนของเตาเผา ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนภายในตำแหน่งต่างๆ ของเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียนจึงมีค่าต่างกันไปด้วย

การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียนสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภทดังนี้

2.1.7.1 การถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สสู่ออนุภาค (Gas-to-particle Heat Transfer)

การถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สสู่ออนุภาคเป็นการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโรเซออร์ของเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน โดยความร้อนจากการเผาไหม้ถ่ายโอนจากแก๊สไปสู่ออนุภาคที่อยู่ภายในโรเซออร์ ค่าการถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สสู่ออนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีค่าสูงเมื่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของแก๊สและของอนุภาคมีค่าสูง และเมื่อค่าความเร็วสลลิป (Slip Velocity) มีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามค่าการถ่ายโอนความร้อนดังกล่าวจะลดลงเนื่องจากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของแก๊สและของอนุภาคมีค่าน้อย นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Coefficient) หรือเลขนัสเซลต์ (Nusselt Number) มีค่าสูงขึ้นตามค่าความเร็วสลลิปหรือเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds Number) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

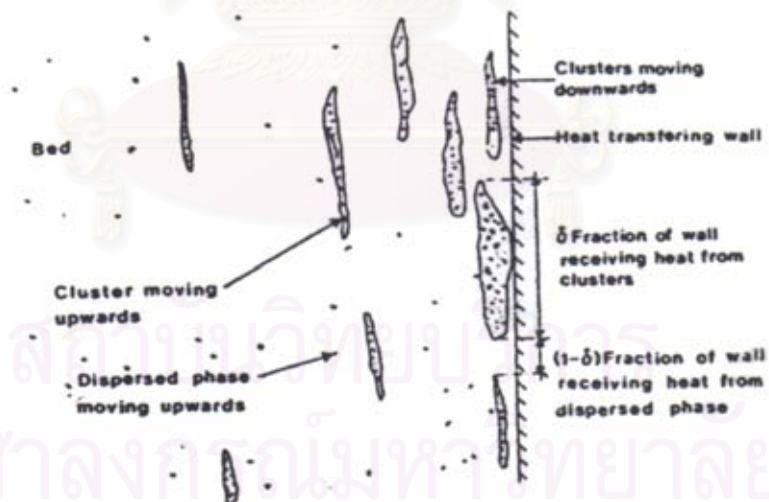


รูปที่ 2.4 ผลของเลขเรย์โนลด์ส์ที่มีต่อเลขนัสเซลต์ภายในเบดแบบต่างๆ (Prabir Basu and Scott A. Fraser, 1991)

2.1.7.2 การถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่ผนัง (Bed-to-wall Heat Transfer)

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อนประเภทนี้ยังมีไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามเรายังสามารถทำความเข้าใจในปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่ผนังได้ โดยการศึกษาผลจากการทดลองการถ่ายโอนความร้อนกับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

กลไกการถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่ผนัง อนุภาคของแข็งขนาดเล็กภายในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะมีการจับตัวกันในรูปแบบของคลัสเตอร์ (Cluster) หรือไปปะปนอยู่ในแก๊สที่ไหลในลักษณะเจือจาง เรียกว่า Dispersed Phase อนุภาคของแข็งภายในเบดส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ขึ้นภายในบริเวณตรงแกนกลางของเบด และจะมีการเคลื่อนที่ลงในรูปแบบของคลัสเตอร์ที่บริเวณใกล้ผนัง รูปแบบของคลัสเตอร์ที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่คงตัว จะเกิดขึ้น หายไป และมีการเกิดขึ้นใหม่อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่ผนังที่เกิดขึ้นจึงเกิดขึ้นจากการนำความร้อนภายในคลัสเตอร์ การพาความร้อนไปยัง Dispersed Phase และจากการแผ่รังสีจากทั้งสองคลัสเตอร์ของของแข็งที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ลงมาตามแนวผนัง ทำให้สภาวะความร้อนที่บริเวณผนังไม่คงที่ เนื่องจากคลัสเตอร์เย็นตัวลงและสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน โดยที่ในปัจจุบันยังไม่มีแบบจำลองของกลไกการถ่ายโอนความร้อนของเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่สามารถอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้

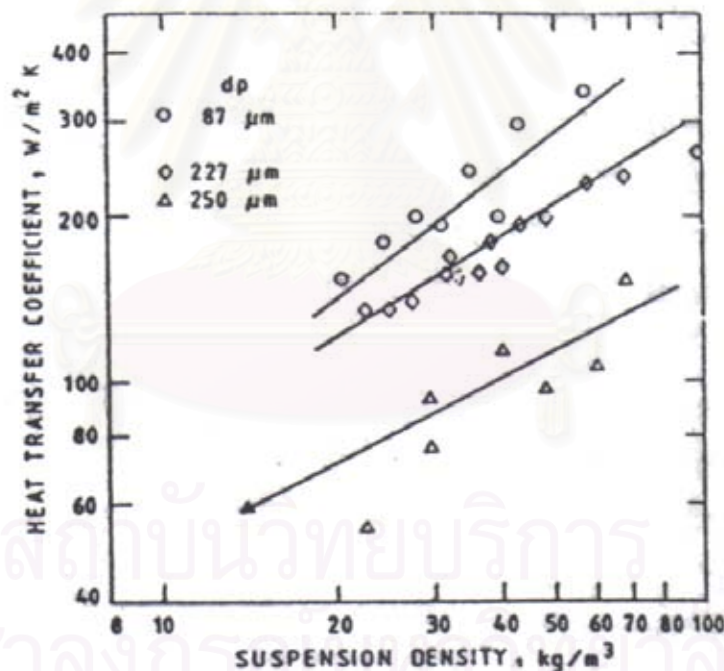


รูปที่ 2.5 ภาพแสดงกลไกการถ่ายเทความร้อนจากเบดสู่ผนังภายในฟลูอิไดเซชันแบบหมุนเวียน (Prabir Basu and Scott A. Fraser, 1991)

การถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่อผนังภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการออกแบบและปัจจัยต่างๆ ในการทำงานของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ดังนี้

- ผลของความหนาแน่นของของแข็ง (Effect of Suspension Density)

ค่าความหนาแน่นของของแข็งกับเวลาที่ผนังเป็นค่าที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่อผนังมากที่สุด รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงผลของค่าความหนาแน่นของของแข็งที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย จากรูปพบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของของแข็งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามด้วย การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นโดยของแข็งที่เคลื่อนที่ลงบริเวณแนวผนังและจากของแข็งที่อยู่ในเฟสแก๊ส ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจากของแข็งในรูปของคลัสเตอร์จะมากกว่าการถ่ายโอนความร้อนจากของแข็งในเฟสแก๊ส โดยที่ภายในเบดหนาแน่นจะมีสัดส่วนของผนังที่ถูกปกคลุมโดยคลัสเตอร์ของของแข็งมากกว่าภายในเบดแบบเจือจาง ดังนั้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าในเบดแบบเจือจาง

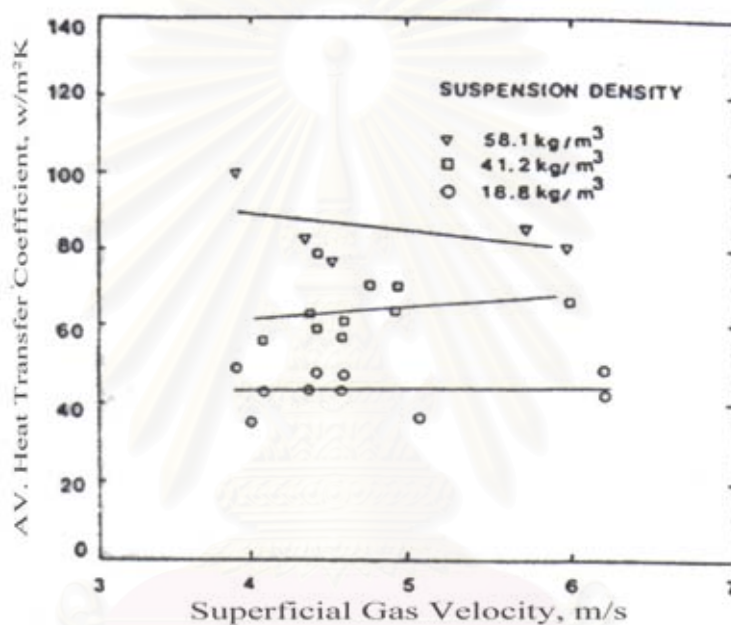


รูปที่ 2.6 ผลของความหนาแน่นของของแข็งต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย (Prabir Basu and Scott A. Fraser, 1991)

- ผลของความเร็วฟลูอิดไอเซชัน (Effect of Fluidization Velocity)

การถ่ายโอนความร้อนภายใน Fast Fluidized Bed ให้ผลเช่นเดียวกับการถ่ายโอนความร้อนภายในฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed) คือความเร็วของของไหลที่ทำ

ให้เกิดฟลูอิดไอเซชันไม่มีผลโดยตรงกับการถ่ายโอนความร้อนภายในเบด ยกเว้นส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของของแข็ง จึงเป็นสาเหตุที่ว่าทำไมเมื่อเปลี่ยนค่าความเร็วฟลูอิดไอเซชัน โดยรักษาค่าความหนาแน่นของของแข็งภายในเบดให้คงที่แล้วมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มความเร็วฟลูอิดไอเซชัน และให้อัตราการหมุนเวียนของของแข็ง (Solid Circulation Rate) คงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยจะลดลง เนื่องจากค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถ้าเป็นเบดที่เจือจางมาก ๆ ค่าความเร็วฟลูอิดไอเซชันจะมีผลมากขึ้นต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย

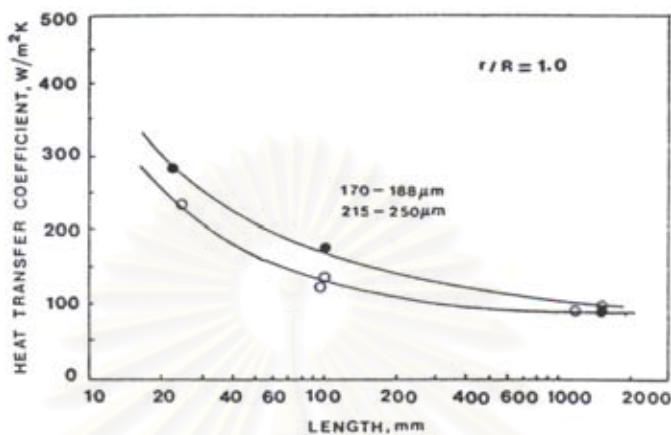


รูปที่ 2.7 ผลของค่าความเร็วฟลูอิดไอเซชันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย (Prabir Basu and Scott A. Fraser, 1991)

- ผลของความยาวของพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อน (Effect of Vertical Length of Heat Transfer Surface)

จากผลการทดลองเมื่อทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนตลอดแนวความยาวของผนังที่เป็นพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อนของไรเซอร์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าลดลงเมื่อความยาวของผนังการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.8 เนื่องจากชั้นแรกของของแข็งชั้นแรกสุด (First Layer of Particles) ของคลัสเตอร์ของแข็งเกิดการสูญเสียความร้อนเมื่อเคลื่อนลงมาตามพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อน ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิของคลัสเตอร์ของของแข็งกับผนังมีค่าน้อยลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนลดลง แต่อย่างไรก็ตามคลัสเตอร์ของของแข็งดังกล่าวสามารถเคลื่อนลงมาตามพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อน

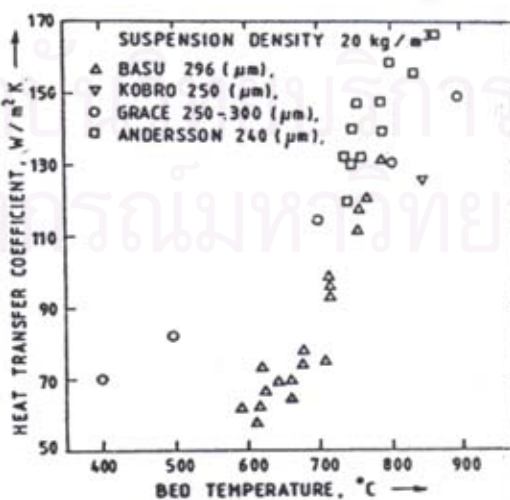
ร้อนได้เพียงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น หลังจากนั้นจะสลายไปสู่แกนกลางของโรเซอรัลแล้วคลัสเตอร์ของของแข็งใหม่ก็เกิดขึ้นแทน ดังนั้นจากรูป 2.8 จึงเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจึงมีค่าลดลงน้อยเมื่อความยาวของพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อนมีค่ามากกว่า 700 มิลลิเมตร เนื่องจากบริเวณนั้นเป็นบริเวณที่มีปริมาณของแข็งเบาบาง



รูปที่ 2.8 ผลของความยาวของพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย (Prabir Basu and Scott A. Fraser, 1991)

- ผลของอุณหภูมิของเบด (Effect of Bed Temperature)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเบดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่ออุณหภูมิภายในเบดสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานเชิงความร้อน (Thermal Resistant) ของพื้นผิวชั้นแรกของอนุภาคมีค่าลดลง เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุภาคแก๊สกับค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นยังมีผลมาจากการแผ่รังสีความร้อนอีกด้วย



รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิของเบดที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่ความหนาแน่นของของแข็งคงที่ (Prabir Basu and Scott A. Fraser, 1991)

- ผลของขนาดของอนุภาค (Effect of Particle Size)

ในกรณีที่ความยาวของพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อนของไรเซอร์มีค่าน้อยมีผลทำให้อนุภาคของของแข็งที่มีขนาดเล็กมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าอนุภาคของของแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบการพาความร้อนของการถ่ายโอนความร้อน (Convective Component of Heat Transfer) เมื่อขนาดของอนุภาคของของแข็งลดลง ลักษณะเด่นของเบดแบบฟาสต์นี้เป็นเหมือนกับในกรณีเบดแบบฟองแก๊ส แต่อย่างไรก็ตามผลของขนาดอนุภาคของของแข็งนี้จะมีความสำคัญน้อยลงเมื่อความยาวของพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นของแข็งชั้นแรกสุดมีเวลาพอเพียงที่สัมผัสกับผนังการถ่ายโอนความร้อน ดังนั้นค่าความต้านทานเชิงความร้อน (Thermal Resistance) ของของแข็งจึงมีบทบาทลดลงในการถ่ายโอนความร้อน สำหรับในเตาเผาในระดับอุตสาหกรรมผลของขนาดของอนุภาคของของแข็งจะไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

2.1.7.3 การถ่ายโอนความร้อนไปสู่ท่อที่จมอยู่ภายในเบด (Heat Transfer to Tubes Immersed in Fast Beds)

การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดภายในท่อที่อยู่ในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะมีความแตกต่างจากการถ่ายโอนความร้อนบริเวณผนังเนื่องจากมีอุทกพลศาสตร์ที่แตกต่างกัน เตาเผาที่มีความจุมากๆ มักจะมีท่อภายในเตาเผาเพื่อช่วยในการดูดซับความร้อน โดยท่อเหล่านี้จะอยู่ในรูปของผนังแบบปีก (Wing Wall) หรือท่อในแนวขวาง (Cross Tubes) ผนังแบบปีกจะเข้ามาสู่เตาเผาทางด้านข้างของผนังแล้วออกจากเตาเผาไปทางด้านบนของเตาเผา โดยผนังแบบปีกนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวนำพาความร้อนออกจากเตาเผา

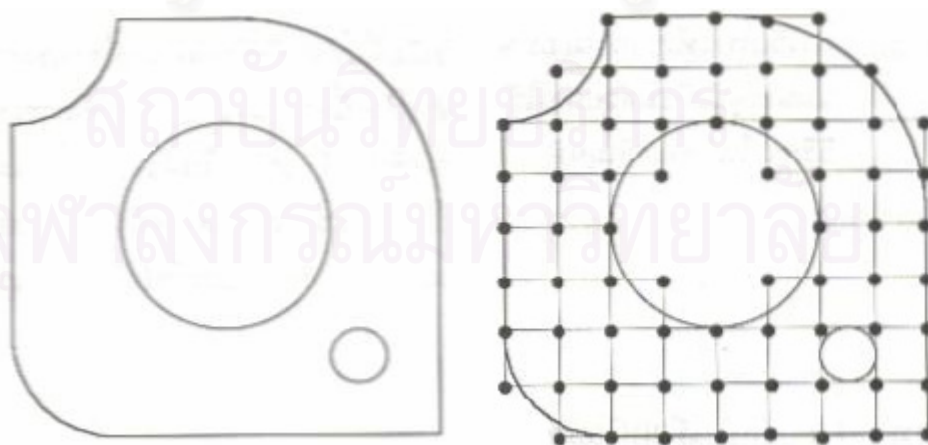
ภายในบริเวณกลางของเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะเป็นที่อยู่ของกลุ่มของท่อในแนวขวาง (Cross-tube Banks) โดยกลุ่มของท่อในแนวขวางที่ตำแหน่งนั้นจะเป็นจุดที่สัมผัสโดนกับของแข็งที่อยู่ภายในแก๊สที่ไหลขึ้น และผนังแบบปีกจะอยู่ในบริเวณใกล้ทางออกของเตาเผาของผสมระหว่างแก๊สและของแข็งบริเวณด้านบนของเตาเผาจะมีอุทกพลศาสตร์ที่แตกต่างจากบริเวณตรงกลางของเตาเผา ถ้าทางออกของเตาเผาที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดของเบดจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้ความหนาแน่นของของแข็งที่บริเวณนั้นเพิ่มขึ้นอย่างมาก ความหนาแน่นของของแข็งที่เพิ่มขึ้นและการไหลในแนวขวางของของแข็งจะทำให้การถ่ายโอนความร้อนบริเวณนั้นสูงมากกว่าผนังบริเวณอื่น

2.2 การคำนวณเชิงพลวัตของของไหล

การคำนวณเชิงพลวัตของของไหลจะเริ่มต้นจากการกำหนดสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ที่อธิบายสถานะของความสมดุลของการไหล สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่างๆ นั้น ปกติจะประดิษฐ์ขึ้นมาได้โดยไม่ยากนัก หากแต่ว่าในบางกรณีที่สมการเชิงอนุพันธ์มีความสลับซับซ้อน ทำให้การหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ที่ต้องการนั้นทำได้ยากลำบากมากหรืออาจจะหาไม่ได้เลยก็ได้ เหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ขึ้น วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีการที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมา คือ วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

หลักการที่สำคัญของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็คือการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณโดยเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสี่เหลี่ยม ข้อดีของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมนี้ก็คือ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้นๆ แต่ข้อเสียที่สำคัญที่สุดของการใช้วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมก็คือความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อน ซึ่งการออกแบบสิ่งที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนในปัจจุบันนี้ ได้กลายเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพสิ่งของนั้นๆ ให้ดีขึ้น

รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของแผ่นโลหะลักษณะหนึ่ง การวิเคราะห์หาการกระจายของความเค้น (Stress distribution) โดยการใช้วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมจะเริ่มจากการแบ่งแผ่นโลหะนี้ออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อ (Grid Points) ตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่างๆ ซึ่งจำนวนของตัวแปรไม่ทราบค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง



รูปที่ 2.10 แผ่นโลหะที่มีขอบโค้งลักษณะต่างๆ และการหาผลเฉลยด้วยวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

เห็นได้ว่าตารางสี่เหลี่ยมที่ใช้ในวิธีการผลต่างสี่บเนื่องไม่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงของแผ่นโลหะได้เที่ยงตรง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นก็จะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน จำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่บเนื่องมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาจำเป็นต้องการหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นรวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย

สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) วิธีการนี้สามารถนำมาใช้ในการคำนวณเชิงพลวัตของของไหลกับแบบจำลองที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนเช่นใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงของแบบจำลองได้ใกล้เคียงเที่ยงตรงสูงกว่าวิธีการผลต่างสี่บเนื่อง กล่าวคือ ใน ตัวอย่างของแผ่นโลหะ จะสามารถแบ่งแผ่นโลหะออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดต่างๆ กันโดยเอลิเมนต์ต่างๆ นี้จะอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



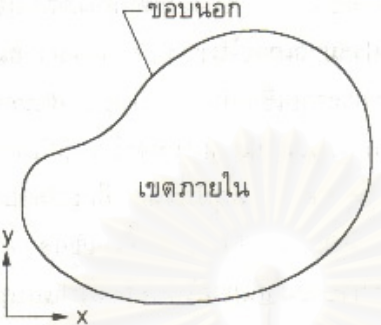
รูปที่ 2.11 การหาผลเฉลยบนแผ่นโลหะด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

ผลที่เห็นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการผลต่างสี่บเนื่องในรูปที่ 2.10 ก็คือ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของแผ่นโลหะได้เป็นอย่างดี ซึ่งหมายถึงการหาผลเฉลยโดยประมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากที่สุด ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณได้จะมีความแม่นยำมากขึ้นตามไปด้วย

2.2.1 วิธีการผลต่างสี่บเนื่อง (Finite Difference Method)

วิธีที่จะทำให้เกิดความเข้าใจของลำดับขั้นตอนในการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณโดยวิธีการผลต่างสี่บเนื่องสามารถทำได้ไม่ยากนักด้วยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของ

สมการลาปลาซ (Laplace's equation) อาทิเช่น สมการสมดุลของโครงสร้าง สมการสมดุลของการถ่ายเทความร้อน รวมไปถึงสมการสมดุลของการไหล สมการลาปลาซดังกล่าวสำหรับปัญหาใน 2 มิติบนระนาบ x และ y สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้



The diagram shows a 2D Cartesian coordinate system with x and y axes. An irregular closed shape is drawn, representing a domain. The interior of the shape is labeled 'เขตภายใน' (Interior Region). The boundary of the shape is labeled 'ขอบนอก' (Outer Boundary). To the right of the diagram, the Laplace equation is written as $\nabla^2 \phi = 0$ with the reference number (2.17).

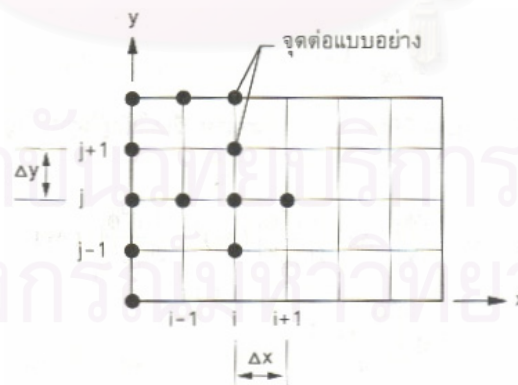
รูปที่ 2.12 รูปร่างลักษณะทั่วไปของขอบเขตของปัญหา (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

โดย $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ เป็นสัญกรณ์ของตัวดำเนินการ (Operator Notation)

$\phi = \phi(x, y)$ เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าซึ่งต้องการหาในเขตภายใน ϕ (เช่น อาจแทนการกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x, y ต่างๆ)

หลักการในการใช้วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณสามารถทำได้อย่างง่ายๆ โดยใช้ขั้นตอนเพียง 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการสร้างตารางสี่เหลี่ยมลงในรูปร่างลักษณะของปัญหาที่กำหนด สมมติว่ารูปร่างลักษณะของปัญหาเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งอยู่ในระนาบ $x - y$ ดังแสดงในรูป 2.13



รูปที่ 2.13 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นตารางสี่เหลี่ยม (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

สี่เหลี่ยมเล็กๆ ทั้งหมดที่สร้างขึ้นนี้มีขนาด Δx และ Δy ในทางแกน x และ y ตามลำดับ และต่อกันที่จุดต่อ (grid points) ที่อยู่ในตำแหน่งต่างๆ กัน เช่น จุดต่อ ณ ตำแหน่ง

i, j ดังแสดงในรูปที่ 2.13 นี้แสดงถึงจุดต่อที่ $x = i$ และ $y = j$ เป็นต้น และที่จุดต่อนี้เอง เป็นตำแหน่งที่จะหาค่าของผลเฉลยโดยประมาณ นั่นคือเป็นตำแหน่งของตัวไม่ทราบค่า เช่น สมมติว่ากำลังแก้ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน ตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อเหล่านี้ก็คืออุณหภูมิที่ต้องการ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 ทำการแปลงสมการอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อต่างๆ

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.18)$$

โดยที่เราสามารถเขียนสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปของตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้ด้วยการใช้ออนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) เช่น ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ $i + 1$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิที่จุดต่อ i ได้ดังนี้

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_i \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_i (\Delta x)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \Big|_i (\Delta x)^3 + \dots \quad (2.19)$$

ในทำนองเดียวกันค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ $i - 1$ ก็สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิที่จุดต่อ i ได้ดังนี้

$$\phi_{i-1} = \phi_i - \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_i \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_i (\Delta x)^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \Big|_i (\Delta x)^3 + \dots \quad (2.20)$$

หากนำสมการ 2.19 และ 2.20 นี้มารวมกัน จะได้

$$\phi_{i+1} + \phi_{i-1} = 2\phi_i + \frac{2}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_i (\Delta x)^2 + \frac{2}{4!} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} \Big|_i (\Delta x)^4 + \dots \quad (2.21)$$

เนื่องจากเราต้องการพจน์อนุพันธ์อันดับสอง (Second order term) ซึ่งคือพจน์ $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$ เพื่อที่จะแทนลงในสมการ 2.2 เราจึงตัดพจน์อนุพันธ์ที่มีอันดับที่สูงๆ ขึ้นไปในสมการ 2.21 ทิ้ง ซึ่งจะทำให้เกิดค่าของพจน์อนุพันธ์อันดับสองโดยประมาณ คือ

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \cong \frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (2.22)$$

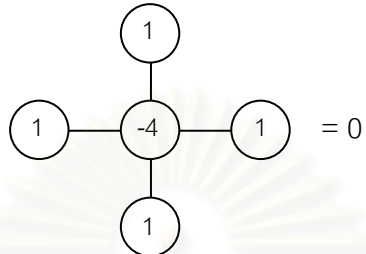
ในทำนองเดียวกัน หากเราดำเนินการเช่นเดียวกันในทางแกน y เราจะได้

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \cong \frac{\phi_{j+1} - 2\phi_j + \phi_{j-1}}{(\Delta y)^2} \quad (2.23)$$

หลังจากแทนพจน์อนุพันธ์อันดับสองจากสมการ 2.22 และ 2.23 ลงในสมการ 2.18 และหากใช้ Δx เท่ากับ Δy เราจะได้

$$\phi_{i+1} + \phi_{i-1} + \phi_{j+1} + \phi_{j-1} - 4\phi_j = 0 \quad (2.24)$$

ซึ่งอาจเขียนให้อยู่ในรูปแบบของแผนภาพสมการ (Stencil Form) เพื่อสะดวกในการประยุกต์ใช้ได้ ดังนี้



$$\begin{array}{c} \textcircled{1} \\ | \\ \textcircled{1} - \textcircled{-4} \textcircled{1} \\ | \\ \textcircled{1} \end{array} = 0 \quad (2.25)$$

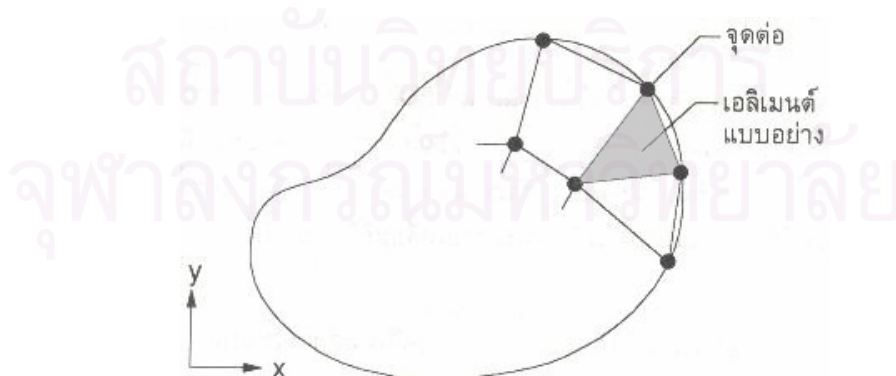
ขั้นตอนที่ 3 ทำการประยุกต์รูปแบบของแผนภาพสมการ 2.25 ลงในทุกๆ จุดต่อที่อยู่ในขอบเขตภายในของปัญหานั้น จะก่อให้เกิดระบบของสมการพร้อมกัน (A Set of Simultaneous Equations) ขึ้น โดยมีตัวไม่ทราบค่าเช่น ϕ_i, ϕ_{i+1} ณ จุดต่อต่างๆ ภายในขอบเขตของปัญหานั้น

ขั้นตอนที่ 4 ทำการแก้ระบบสมการที่เกิดขึ้นมานั้น เพื่อหาค่าโดยประมาณของตัวไม่ทราบค่า (Unknowns) ณ จุดต่อนั้นๆ

2.2.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

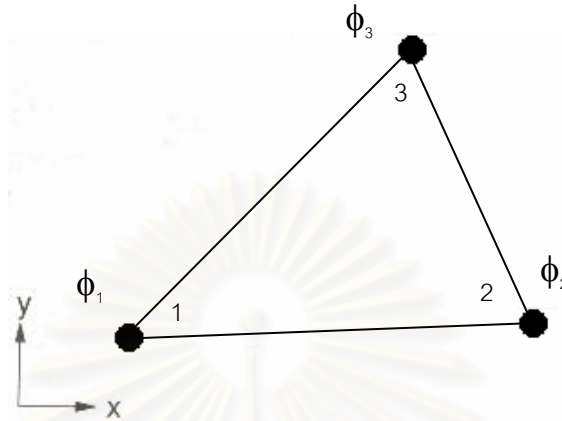
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่จะหาค่าผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid problem)



รูปที่ 2.14 การแบ่งรูปร่างลักษณะออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณในเอลิเมนต์ (Element interpolation functions) เช่น เอลิเมนต์แบบอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูป 2.15 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

โดยที่จุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่ทราบค่า (Nodal unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการยืดหรือหดตัว (Displacement) ถ้าเป็นปัญหาการยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิสำหรับปัญหาของการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นความเร็วของของไหลเมื่อเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่ทราบค่าบนเอลิเมนต์ อาจเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.26)$$

โดย $N_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ คือฟังก์ชันของการประมาณค่าภายในเอลิเมนต์

สมการ 2.26 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N] \{\phi\} \end{aligned} \quad (2.27)$$

$(1 \times 3) \quad (3 \times 1)$

โดย $[N]$ คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้นๆ สัญลักษณ์ $[]$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวอน (Row matrix) และ $\{ \}$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวตั้ง (column matrix)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element equation) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.28)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.29)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ถือเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการ 2.28 สามารถทำได้โดย

- ก. วิธีการโดยตรง (Direct Approach)
- ข. วิธีการแปรผัน (Variational Approach)
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำเอาสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (\text{element equation}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.30)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในสมการที่ 2.30 แล้วทำการแก้สมการเพื่อหาค่า $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง หรือค่าของความเร็วของของไหลหากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อได้ผลการคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อแล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่นเมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ เราสามารถนำไปใช้ในการหาค่าความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อรู้คุณสมบัติที่จุดต่างๆ ก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้งหมดจะเห็นว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่มีระเบียบแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C. Breitholtz, B. Leckner, A. และ P. Baskakov (2001) ทำการหาความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน จากข้อมูลความหนาแน่นของของแข็งและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของที่ได้จากหม้อต้มแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนหกแห่งมีขนาดตั้งแต่ 12 - 30 เมกกะวัตต์ นำมาเฉลี่ยกันเพื่อลดความไม่แน่นอนของข้อมูล พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มตามการเพิ่มความหนาแน่นของของแข็งโดยไม่ขึ้นอยู่กับความสูง

C. M. Hrenya และ J. L. Sinclair (1997) ได้อธิบายความสำคัญในการพิจารณาสัดส่วนของปริมาตรของอนุภาคของแข็งในระบบเมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน การดูโมเมนต์สำหรับการไหลแบบ Fully-Developed ในระบบแก๊ส-ของแข็งจะพิจารณาการแพร่ซึ่งรวมเอาความดันใน Laminar และ Turbulent ความดันลด และ Drag Force สำหรับการไหลแบบเจือจาง (Dilute Flow) Drag Force จะมีค่าน้อยกว่าแรงชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคของแข็งอยู่น้อย ดังนั้น Hrenya และคณะ ได้สรุปว่ารายละเอียดของเทอร์บิวเลนซ์ในพจน์การแพร่มีความสำคัญ แต่ในกรณีของการไหลแบบหนาแน่น (Dense Flow) จะแตกต่างจากการไหลแบบเจือจาง เพราะว่ามีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่มาก อิทธิพลของ Drag Force มีผลมากดังนั้นแรงที่มีอิทธิพลมากในกระบวนการก็คือ ความดันลดและ Drag Force ในขณะที่พจน์การแพร่มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ โดยทั่วไปสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน พจน์การแพร่จะมีความสำคัญเมื่อเป็นการไหลแบบเจือจางมากๆ และไม่สำคัญสำหรับการไหลแบบหนาแน่น

D. Shi, R. Nicolai และ L. Reh (1998) ได้ทำการทดลองศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของแข็ง และความหนาแน่นของของแข็ง ที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่ผนัง (Bed-to-wall heat transfer) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนขนาดกึ่งอุตสาหกรรม โดยมีอุปกรณ์วัดความเข้มข้นของของแข็ง ความเร็ว และการถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่ผนัง พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของแข็ง และความหนาแน่นของของแข็ง มีผลมากกับค่าการถ่ายโอนความร้อนจากเบดสู่ผนัง คือค่าการถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของของแข็ง ที่เพิ่มขึ้น และค่าการถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของขนาดของของแข็ง

J. A. M. Kuipers, W. Prins และ W. P. M. van Swaaij (1992) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการไหลของฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีความร้อนโดยอาศัยพื้นฐานแนวคิดของแบบจำลองของไหลสองชนิด (Two-fluid Model, TFM) คือทั้งวัฏภาคแก๊สและของแข็งจะถูกพิจารณาว่าเป็นวัฏภาคเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากเบดสู่ผนังถูกคำนวณโดยการจำลองภาวะที่อาศัยแนวคิดดังกล่าวในสมการอนุพันธ์ไม่เมมตัม มวล และพลังงาน ค่าที่ได้ในการคำนวณ

เบื้องต้นในแบบจำลองที่ไม่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนใกล้เคียงกับที่มีรายงานในงานวิจัยอื่นๆ นอกจากนั้นผลจากการคำนวณยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากเบดตู้ผนังเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขึ้นไปตามแนวผนังทำให้ปริมาณของแข็งที่ผนังไม่เท่ากัน โดยบริเวณที่มีของแข็งมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากเบดตู้ผนังสูง

P.D. Noymer, M.R. Hyre และ L.R. Glicksman (2000) ทำการศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนต่ออุทกพลศาสตร์บริเวณผนังภายใน เพื่อดูผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไรเซอร์ซึ่งมีผลกับการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากบริเวณผนังในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนจะมีการถ่ายโอนความร้อนของอนุภาคกับผนัง โดยทำการทดลองเครื่องปฏิกรณ์สองขนาดที่แตกต่างกันเพียงเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้นภายใต้ภาวะเดียวกัน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไรเซอร์ 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สัดส่วนของผนังที่ถูกปกคลุมด้วยอนุภาคเพิ่มขึ้นเกือบเป็นสองเท่าของไรเซอร์เดิม

S.A. Logtenberg และ A.G. Dixon (1998) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสามมิติของการถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่เป็นทรงกลมแปดลูกทับซ้อนกันภายในทรงกระบอกโดยใช้โปรแกรม ANSYS: FLOTTRAN เช่นเดียวกับการทดลองที่ทำโดยปล่อยลมร้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง จากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองที่พัฒนาได้ผลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการจำลองภาวะของการถ่ายโอนความร้อนได้

Benyahia และคณะ (2000) ได้สร้างแบบจำลองการไหลของอนุภาคของแข็งและแก๊สของฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้ทฤษฎีจลน์สำหรับอนุภาคของแข็ง แบบจำลองถูกจำลองขึ้นโดยใช้โปรแกรม Fluent โดยมีอนุภาคของ FCC (Fluid Catalytic Cracking) เป็นวัสดุของแข็งและอากาศเป็นวัสดุแก๊ส ซึ่งจำลองในรูปแบบการไหล 2 มิติ ภาวะไม่คงตัว และอุณหภูมิคงที่ การแก๊สมีการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมของแต่ละวัสดุภาคทำโดยใช้เทคนิค Finite Volume Numerical โดยแก๊สมีการของแต่ละวัสดุภาคแยกกันแต่มีสมการแรงต้านทานการเคลื่อนที่เป็นสมการโยงความสัมพันธ์กันระหว่างวัสดุภาคของแข็งกับวัสดุภาคแก๊ส ในการทดลองทำการศึกษารูปแบบความเร็วสัดส่วนปริมาตร ความดัน และ พารามิเตอร์ของความปั่นป่วนของแต่ละวัสดุภาค ผลการคำนวณพบว่า ปริมาตร พลั๊กซ์ของแข็งและค่าความดันลดภายในไรเซอร์สอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ผลจากการคำนวณให้ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง(Solid Density) บริเวณผนังเบี่ยงเบนไปมากเมื่อเทียบกับการทดลอง

T. A. Ebert, L. R. Glicksman และ M. Lints (1993) ศึกษาองค์ประกอบของการถ่ายโอนความร้อนด้วยการพาความร้อนของอนุภาคและแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นกับปริมาณของแข็งหรือความหนาแน่นของของแข็งในระบบ (Suspension density) ที่เพิ่มขึ้น ความเร็วของแก๊สมีผลน้อยกับการถ่ายโอนความร้อนบริเวณผนังของระบบที่มีความหนาแน่นของแข็งในระบบมากเนื่องจากการไหลลงของของแข็งบริเวณผนัง แต่จะมีผลมากขึ้นในระบบที่มีความหนาแน่นของแข็งในระบบน้อย

V. Mathiesen, T. Solberg และ B.H. Hjertager (2000) ได้ทำการศึกษาการไหลแบบหลายวัฏภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อน โดยสร้างแบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาค เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือ Laser Doppler Anemometry ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเบดขนาดกลาง แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้เป็นแบบจำลองสำหรับ วัฏภาคแก๊สหนึ่งวัฏภาคและวัฏภาคของแข็งหลายวัฏภาคเพื่อให้ผลที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับการทดลองจริงที่มีการกระจายขนาดของอนุภาคมากที่สุด ซึ่งผลการคำนวณที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกับผลการทดลองเป็นอย่างดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการแบบจำลอง

3.1 แบบจำลองการไหลหลายวัฏภาคของแก๊สและของแข็ง

การสร้างแบบจำลองการไหลหลายวัฏภาค (Multiphase Flow Model) ในงานวิจัยนี้ใช้แนวคิดแบบออยเลอร์เลียน (Eulerian Approach) ซึ่งเป็นการสนใจลักษณะการไหลแบบต่อเนื่อง ไม่ได้ทำการติดตามการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค ในการนำแนวคิดแบบออยเลอร์เลียนมาใช้สำหรับระบบแก๊สและของแข็งนั้นใช้ได้เมื่อ วัฏภาคของแข็งมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้นจึงได้มีการนำแบบจำลองทฤษฎีจลน์ของการไหลของของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow: KTGF) มาใช้ร่วมด้วย เพื่อกำหนดค่าความดันและความหนืดในวัฏภาคของแข็งโดยสมมติว่าอนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายโมเลกุลแก๊ส จากทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Kinetic Theory of Gas) โดยปกติแต่ละโมเลกุลของแก๊สมีการเคลื่อนที่อย่างไม่มีระเบียบ (Random Motion) ด้วยความเร็วไม่เท่ากันและไม่คงที่ เนื่องจากโมเลกุลอาจจะกระทบผนัง ปะทะหรือชนกัน ความเร็วและทิศทางจึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทุกครั้งที่มีการชนกัน และมีการถ่ายโอนโมเมนตัมเกิดขึ้น การเปลี่ยนทิศทางขึ้นอยู่กับลักษณะการชนของโมเลกุล ในสภาพที่แท้จริงนั้นแก๊สย่อมมีโอกาสชนกันหลายลักษณะ ไม่เป็นระเบียบแล้วแต่ทิศทางและความเร็วของการชน แต่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์ของโมเลกุลทั้งหมดในแก๊สจำนวนหนึ่งนั้นมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่อุณหภูมิคงที่ การชนในลักษณะที่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์เฉลี่ยมีค่าคงที่เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) แต่สำหรับอนุภาคของแข็งถือว่าการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision) เพราะขณะที่ชนนอกจากมีการถ่ายโอนโมเมนตัมให้กันและกันแล้ว ยังมีการสูญเสียทั้งความเร็วและพลังงานจลน์ พลังงานจลน์ที่เสียไปจะกลายเป็นความร้อน

เนื่องจากความซับซ้อนของการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่ได้จากการพัฒนาสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ทำให้การหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์เป็นไปได้ยาก เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) จึงถูกนำมาใช้เพื่อเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของระบบสมการพีชคณิต เพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลข (Numerical Solution) สมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้แนวคิดของออยเลอร์เลียน ซึ่งทำการแก้ปัญหาในแต่ละวัฏภาคไปพร้อมๆ กันโดยไม่ขึ้นแก่กัน แต่ทำการเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างวัฏภาคผ่านทางพจน์ของแรงต้าน ในสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

3.1.1 สมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

- ระบบ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคแก๊สและของแข็ง
- แบบจำลองการไหลในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองการไหล 2 มิติ
- ในการจำลองส่วนแรกของงานวิจัย ทำการจำลองกระบวนการในระบบภาวะอุณหภูมิคงที่
- จำลองกระบวนการที่ภาวะพลวัต
- ที่บริเวณผนังความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวปกติของแก๊สและของแข็งถูกกำหนดให้มีความเท่ากับศูนย์ คือเป็นสภาวะที่ไม่มีการไถล (Non-slip)
- ที่บริเวณผนังของแบบจำลองไม่มีผลของไฟฟ้าสถิตมาเกี่ยวข้อง
- ของแข็งที่ใช้ในการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสมบัติต่างๆ ทางกายภาพเท่ากัน
- ค่าความหนาแน่น ความหนืด ของแก๊สและของแข็งที่ใช้ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
- การถ่ายโอนความร้อนภายในแบบจำลองมาจากการนำความร้อนและการพาความร้อนเท่านั้น

3.1.2 สมการอนุรักษ์พื้นฐาน (Gidaspow, 1994)

3.1.2.1 สมการอนุรักษ์มวล

ภูมิภาคแก๊ส

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g U_g) = 0 \quad (3.1)$$

ภูมิภาคของแข็ง

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s U_s) = 0 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1 \quad (3.3)$$

เมื่อ

- ε_s คือ สัดส่วนของปริมาตรในภูมิภาคของแข็ง
- ε_g คือ สัดส่วนของปริมาตรในภูมิภาคแก๊ส
- ρ_i คือ ความหนาแน่นของภูมิภาค i (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

- U คือ ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
 t คือ เวลา (วินาที)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

3.1.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g U_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g U_g U_g) = \nabla \cdot T_g - \varepsilon_g \nabla P + \varepsilon_g \rho_g \bar{g} - \beta(U_g - U_s) \quad (3.4)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s U_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s U_s U_s) = \nabla \cdot T_s - \varepsilon_s \nabla P + \varepsilon_s \rho_s \bar{g} - \beta(U_s - U_g) \quad (3.5)$$

- เมื่อ T คือ ความเค้นเทนเซอร์ (Tensor Stress)
 β คือ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (Interphase Drag Coefficient)
 P คือ ความดัน (พาสคัล)

สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการแกว่งจากความปั่นป่วน (Turbulent Fluctuating Energy)

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s U_s \Theta_s) = T_s : \nabla U_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \Theta_s) - \gamma_s - 3\beta \Theta_s \quad (3.6)$$

- เมื่อ พจน์ทางซ้ายมือของสมการคืออัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานแกว่งสุทธิ
 พจน์แรกทางขวามือของสมการคือพลังงานแกว่งเนื่องจากการเค้น
 พจน์ที่สองทางขวามือของสมการคือการนำพลังงานแกว่ง

พจน์ที่สามทางขวามือของสมการคือการสูญเสียพลังงานแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

พจน์ที่สี่ทางขวามือของสมการคือการสูญเสียพลังงานแกว่งเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของแข็งกับแก๊ส

$$\Theta_s = \frac{1}{3} \langle U_s'^2 \rangle \quad (3.7)$$

U_s' คือ ความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ย (Fluctuating Velocity)

- สมการเสริม ที่จะนำไปใช้ในสมการหลักมีดังนี้

Arastoopour ใช้ค่า β ที่ให้ความต่อเนื่องตลอดช่วงของสัดส่วนของปริมาตร (Benyahia, 2000)

$$\beta = \left(\frac{17.3}{\text{Re}} + 0.336 \right) \frac{\rho_g}{d_p} |U_g - U_s| (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_g^{-2.8} \quad (3.8)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_g d_p |U_g - U_s|}{\mu_g} \quad (3.9)$$

ความเค้นเทนเซอร์ของวิฤภาคของแก๊ส

$$T_g = 2\varepsilon_g \mu_g \left[\frac{1}{2} [\nabla \cdot U_g + (\nabla \cdot U_g)^T] - \frac{1}{3} (\nabla \cdot U_g) \mathbf{I} \right] \quad (3.10)$$

เมื่อ \mathbf{I} คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์

ความเค้นเทนเซอร์ของวิฤภาคของแข็ง

$$T_s = (\varepsilon_s \mu_b \nabla \cdot U_s - P_s) \mathbf{I} + 2\varepsilon_s \mu_s \left[\frac{1}{2} [\nabla \cdot U_s + (\nabla \cdot U_s)^T] - \frac{1}{3} (\nabla \cdot U_s) \mathbf{I} \right] \quad (3.11)$$

เมื่อ P_s คือ ความดันในวิฤภาคของแข็ง

μ_b คือ ความหนืดบัลก์

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น

ในความเค้นเทนเซอร์ของวัสดุของแข็งจะมีพจน์ของ P_s , μ_b และ μ_s เพิ่มเข้ามาซึ่งในความเค้นเทนเซอร์ในวัสดุแก๊สไม่มี ตัวแปร P_s , μ_b และ μ_s เป็นฟังก์ชันกับ θ_s

$$P_s = \varepsilon_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s (1+e)\varepsilon_s^2 g_o \Theta_s \quad (3.12)$$

$$g_o = \frac{3}{5} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.13)$$

e คือ สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (Restitution Coefficient)

$e = 1$ เป็นการชนแบบยืดหยุ่นไม่มีการสูญเสียพลังงาน

$e = 0$ เป็นการชนที่จะสูญเสียพลังงานทั้งหมดระหว่างการชน

$0 < e < 1$ เป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่นที่จะสูญเสียพลังงานระหว่างการชน

g_o คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมีซึ่งจะมีค่ามาก เมื่อสัดส่วนปริมาตรของแข็ง มีค่าเข้าใกล้สัดส่วนปริมาตรของแข็งขณะที่อัดตัวแน่น ($\varepsilon_{s,\max} = 0.6$)

ความหนืดเนื่องจากความเค้น μ_s

$$\mu_s = \frac{2\mu_{s,dil}}{(1+e)g_o} \left[1 + \frac{4}{5} g_o \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p (1+e) g_o \left(\frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.14)$$

$$\mu_{s,dil} = \frac{5\rho_s d_p \sqrt{\Theta\pi}}{96} \quad (3.15)$$

ความหนืดบัลก์ (μ_b) เป็นตัววัดความต้านทานต่อการอัดและการขยายตัวของอนุภาค

$$\mu_b = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p (1+e) \left(\frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

การกระจายตัวของพลังงาน (K_s)

$$K_s = \frac{150\rho_s d_p \sqrt{\Theta_s T_s}}{384(1+e)g_o} \left[1 + \frac{6}{5} g_o \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + 2\varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_o (1+e) \left(\frac{\Theta}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.17)$$

การสูญเสียพลังงานแกว่ง (γ_s)

$$\gamma_s = 3\varepsilon_s^2 \rho_s g_o \Theta_s (1-e^2) \left[\frac{4}{d_p} \left(\frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} - \nabla \cdot U_s \right] \quad (3.18)$$

3.1.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Fluent 6.1 User's Guide)

ในงานวิจัยนี้จะใช้สมการอนุรักษ์พลังงานต่อไปนี้ในการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบจำลองการไหล

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{T}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (3.19)$$

เมื่อ k_{eff} คือ ค่าการนำความร้อนยังผล (Effective Conductivity)
 \vec{J}_j คือ ฟลักซ์การแพร่ของสาร j

สามพจน์แรกทางขวามือของสมการที่ (3.19) เป็นตัวแทนของการถ่ายเทพลังงานเนื่องจากการนำความร้อน การแพร่ของสาร (Species Diffusion) และการกระจายตัวของความหนืด (Viscous Dissipation) ตามลำดับ สำหรับค่า S_h เป็นตัวแทนความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาและแหล่งความร้อนเชิงปริมาตรต่างๆ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะไม่รวมการถ่ายเทพลังงานที่เป็นผลมาจากการแพร่ของสาร การกระจายความหนืด เนื่องจากเป็นระบบการไหลแบบแก๊สและของแข็งซึ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงทำให้สามารถตัดผลของการแพร่และการกระจายความหนืดออกได้ และไม่มีแหล่งความร้อนเชิงปริมาตรอื่นๆ

จากสมการที่ (3.19)

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.20)$$

เมื่อเซ็นซิเบิลเอนทัลปี (Sensible Enthalpy) h ถูกนิยามสำหรับแก๊สอุดมคติดังนี้

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (3.21)$$

และสำหรับการไหลแบบบีบอัดไม่ได้

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (3.22)$$

ในสมการที่ (3.21) และ (3.22) ค่า Y_j คือค่าเศษส่วนมวลของสาร j และ

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (3.23)$$

เมื่อ T_{ref} เท่ากับ 298.15 K.

สมการอนุรักษ์พลังงานภายในขอบเขตที่เป็นของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\bar{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (3.24)$$

เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่น
	h	คือ เซ็นซิเบิลเอนทัลปี $\int_{T_{ref}}^T c_p dT$
	k	คือ ค่าการนำความร้อน
	T	คือ อุณหภูมิ
	S_h	คือ แหล่งความร้อนเชิงปริมาตร

พจน์ที่สองทางซ้ายมือของสมการที่ (3.24) แทนค่าการถ่ายเทพลังงานแบบการพา (Convective Energy transfer) เนื่องจากการหมุน การเคลื่อนที่ของของแข็ง สำหรับพจน์ทางขวามือของสมการแทนค่าฟลักซ์ความร้อนเนื่องจากการพา และแหล่งความร้อนเชิงปริมาตรตามลำดับ

- สมการเสริม ที่จะนำไปใช้ในสมการหลักมีดังนี้

ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

ค่าการนำความร้อนของของไหล (k_f) และของแข็ง (k_s) ถูกคำนวณขึ้นจากแนวคิดแบบจำลองของไหลสองชนิดเช่นเดียวกับในงานวิจัยของ J.A.M. Kuipers, 2003 ซึ่งเป็นแนวคิดที่มองวิถึภาคของแข็งและของไหลในระบบฟลูอิดเซชันเป็นของไหลชนิดเดียวกัน ในกรณีของการคำนวณค่าการนำความร้อนของของไหลและของแข็งนี้จำเป็นต้องถูกแปลความหมายให้เป็นสมบัติยังผลของการเคลื่อนที่ (Effective Transport Properties) ซึ่งหมายความว่าค่าสมบัติต่างๆ ระดับจุลภาค $k_{f,0}$ และ $k_{s,0}$ ไม่สามารถนำไปใช้ได้ แต่ค่า k_f และค่า k_s ถูกคาดหมายว่าจะขึ้นกับค่า ε , $k_{f,0}$, $k_{s,0}$ และรูปร่างของอนุภาค

ค่าฟลักซ์การนำความร้อนของของไหล (ϕ_f) และของแข็ง (ϕ_s) ควรจะถูกสร้างขึ้นจากสมการ

$$\bar{\phi}_f = -\varepsilon k_f \nabla T_f \quad (3.25)$$

และ

$$\bar{\phi}_s = -(1-\varepsilon)k_s \nabla T_s \quad (3.26)$$

ในเทอมของแบบจำลองทางทฤษฎี ค่าฟลักซ์การนำความร้อนรวม ($\bar{\phi}$) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{\phi} = \bar{\phi}_s + \bar{\phi}_f = -\{\varepsilon k_f \nabla T_f + (1-\varepsilon)k_s \nabla T_s\} \quad (3.27)$$

ซึ่งถูกลดรูปลง

$$\bar{\phi} = -\{\varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s\} \nabla T = -k_m \nabla T \quad (3.28)$$

ในกรณีของระบบที่มีความสมดุลทางอุณหภูมิมิระหว่างวิถึภาค ($T_f = T_s = T$) และจากสมการที่ (3.28) ค่าการนำความร้อนของของผสม (Mixture Conductivity, k_m) ถูกนิยามดังนี้

$$k_m = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s \quad (3.29)$$

ค่าการนำความร้อนของของผสม, k_m เป็นค่าเดียวกับค่าการนำความร้อนยังผลของเบด (Effective Bed Conductivity, k_b) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองของ Zehner และ Schlünder

(1970) ในการประมาณค่าการนำความร้อนยังผลของเบต ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการประมาณค่าการนำความร้อนของยังผลในแนวรัศมีของเบตหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบของฟลูอิดเบตที่หนาแน่นได้ ค่า k_b ประกอบด้วยค่า $k_{b,f}$ ที่เป็นผลมาจากวิฤภาคของไหล และค่า $k_{b,s}$ ที่เป็นผลมาจากวิฤภาคของแข็ง

$$k_b = k_{b,f} + k_{b,s} \quad (3.30)$$

เมื่อ

$$k_{b,f} = (1 - \sqrt{1 - \varepsilon})k_{f,0} \quad (3.31)$$

$$k_{b,s} = \sqrt{1 - \varepsilon} \{ \omega A + (1 - \omega) \Gamma \} k_{f,0} \quad (3.32)$$

และ

$$\Gamma = \frac{2}{\left(1 - \frac{B}{A}\right)} \left\{ \frac{(A-1)}{\left(1 - \frac{A}{B}\right)^2} \frac{B}{A} \ln\left(\frac{A}{B}\right) - \frac{(B-1)}{\left(1 - \frac{B}{A}\right)} - \frac{1}{2}(B+1) \right\} \quad (3.33)$$

$$B = 1.25 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{\frac{10}{9}} \quad (3.34)$$

สำหรับอนุภาคทรงกลม

$$A = \frac{k_{s,0}}{k_{f,0}} \quad (3.35)$$

$$\omega = 7.26 \times 10^{-3} \quad (3.36)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.29) และสมการที่ (3.30) ทำให้ได้สมการสุดท้ายที่ใช้ในการคำนวณค่า k_f และ k_s ดังนี้

$$k_f = \frac{k_{b,f}}{\varepsilon} \quad (3.37)$$

$$k_s = \frac{k_{b,s}}{(1-\varepsilon)} \quad (3.38)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient, h)

ในงานวิจัยนี้ใช้ความสัมพันธ์ของ Gnielinski ดังสมการที่ (3.39) และสมการที่ (3.40) ในการหาค่า Nusselt number (Nu) เพื่อที่จะนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อไป

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (3.39)$$

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (3.40)$$

ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถใช้ได้ในช่วง $0.5 < Pr < 2000$ และ $2300 < Re < 5 \times 10^6$

เมื่อ

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.41)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.42)$$

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad (3.43)$$

โดยที่ค่าการนำความร้อน (k) ความเร็ว (v) ความจุความร้อน (c_p) ความหนาแน่น (ρ) และค่าความหนืด (μ) ที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของของไหลและของแข็งโดยคำนวณโดยใช้สัดส่วนช่องว่างมาคำนวณค่าเฉลี่ยด้วย

3.2 ส่วนการสร้างแบบจำลองการไหลโดยโปรแกรม Gambit 2.1.6 และ Fluent 6.1

การจำลองการไหลหลายวัฏภาคของแก๊สและของแข็งภายในงานวิจัยนี้เป็น การจำลองภาวะการไหลของโรเตอร์ที่มีขนาดเดียวกันกับในงานวิจัยของ Benyahia โดยในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ดังกล่าว เป็นแบบจำลองการไหลหลายวัฏภาคของแก๊สและของแข็งแบบสองมิติ ในการสร้างแบบจำลองการไหลเพื่อไปคำนวณในโปรแกรม Fluent นั้น

จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองที่เป็นขอบเขตการไหลในโรเตอร์ขึ้นมาด้วยโปรแกรม Gambit ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วาดแบบจำลองในรูปของเรขาคณิต โดยขอบเขตการไหลดังกล่าวจะใช้เป็นตัวกำหนดค่าต่างๆ สำหรับคำนวณในโปรแกรม Fluent ยกตัวอย่างเช่น กำหนดว่าผนังด้านไหนเป็นกำแพง หรือ ด้านไหนเป็นทางเข้าของอากาศ หรือ ทางเข้าของของแข็ง และยังใช้ในการแบ่งโดเมนการไหลทั้งหมดให้เป็นพื้นที่เล็กๆ เพื่อที่โปรแกรม Fluent จะทำการคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในแต่ละพื้นที่เล็กๆ นั้นด้วย ดังนั้นเราจึงแบ่งขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองการไหลและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลอง เป็น 3 ขั้นตอนคือ

- การสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่เป็นขอบเขตการไหลด้วยโปรแกรม Gambit ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิต (Pre-processing)
- การส่งแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม Gambit ไปทำการคำนวณภายในโปรแกรม Fluent (Solver Execution)
- วิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองการไหล (Post-processing)

โดยที่งานวิจัยนี้จะทำการจำลองภาวะการไหลของโรเตอร์จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยทำการจำลองภาวะเป็นสองส่วน คือในส่วนแรกจะเป็นการจำลองภาวะอุทกพลศาสตร์ของการไหลภายในโรเตอร์โดยไม่มีการถ่ายโอนความร้อนมาเกี่ยวข้อง และในส่วนที่สองคือการจำลองภาวะโดยมีการถ่ายโอนความร้อนมาเกี่ยวข้อง

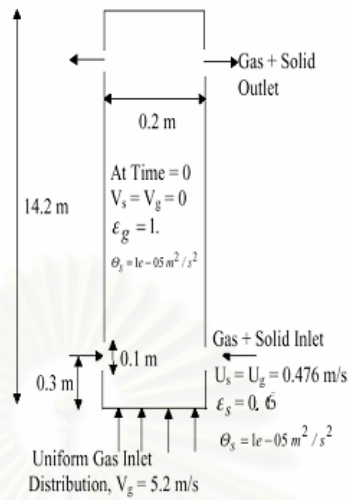
3.2.1 การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Gambit และรายละเอียดของระบบ

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงส่วนโรเตอร์ของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้ โดยเป็นโรเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร กำหนด พลั๊กซ์ของแข็งเท่ากับ 489 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ของแข็งจะถูกป้อนเข้าทั้งสองทางของโรเตอร์เนื่องจากในความเป็นจริงโรเตอร์เป็นรูปทรงกระบอกเพื่อให้แบบจำลองสองมิติให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องสภาพจริง จึงต้องกำหนดทางเข้าสองทางเพื่อทำให้เกิดการสมมาตรในการไหลของของแข็งในระบบ

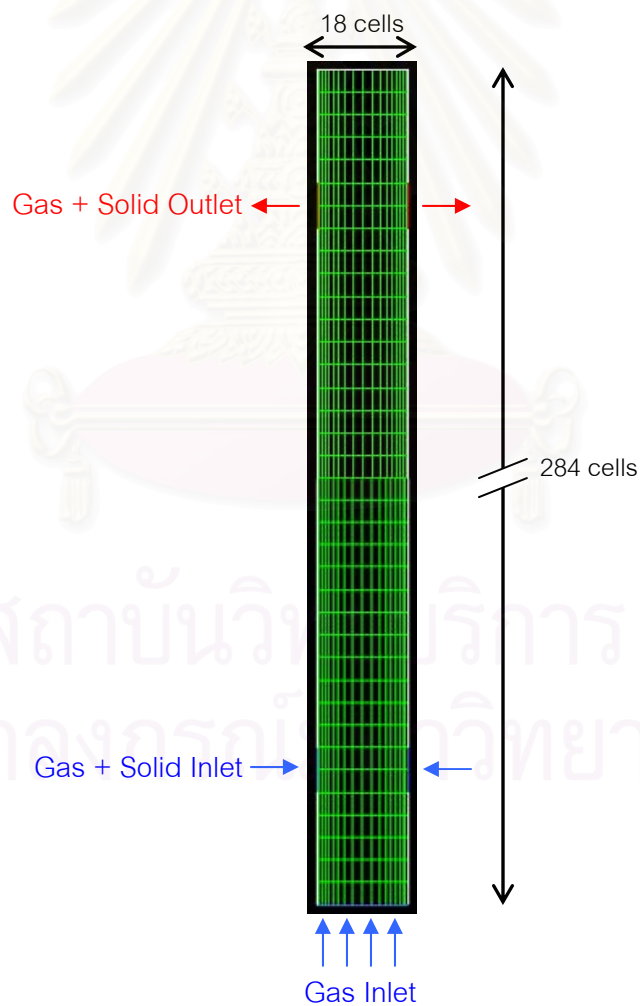
ในเบื้องต้นความเร็วของทั้งสองวัฏภาคถูกกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ของแข็งและแก๊สจะออกไปในทางออกที่สมมาตรกันที่ตำแหน่ง 0.3 เมตรจากด้านบนของโรเตอร์ที่มีความกว้าง 0.1 เมตร (เช่นเดียวกับทางเข้า) โดยโรเตอร์มีความสูง 14.2 เมตร

ในการจำลองภาวะนี้สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Gambit โดยที่แบบจำลองการไหลที่สร้างขึ้นมีขอบเขตการไหลที่ใช้ในการคำนวณขนาด 18 เซลล์แบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) ในแนวรัศมี และ 284 เซลล์แบบสม่ำเสมอ (Uniform) ในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีจำนวนเซลล์ทั้งหมดในขอบเขตการไหลที่ทำการศึกษาเท่ากับ 5112 เซลล์ และกำหนดให้ค่าช่วงเวลา

(Time Step) ในการคำนวณคงที่เท่ากับ 0.001 วินาที เพื่อที่จะทำการจำลองให้ได้เวลาจริง 20 วินาที



รูปที่ 3.1 แบบจำลองโรเซออร์สองมิติพร้อมด้วยค่าสถานะเริ่มต้น



รูปที่ 3.2 รูปทรงของแบบจำลองการไหลของโรเซออร์ที่สร้างขึ้นภายในโปรแกรม Gambit

3.2.2 สภาวะขอบเขต

บริเวณทางเข้ากำหนดค่าความเร็วและสัดส่วนปริมาตรของทั้งสองวัฏภาคยกเว้นค่าความดัน เนื่องจากภายใต้สมมุติฐานของความไม่บีบอัดตัวของแก๊สในระบบโดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของแต่ละวัฏภาคคงที่ทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าต่ำ บริเวณทางออกจึงมีการกำหนดเพียงค่าความดันให้เท่ากับบรรยากาศ

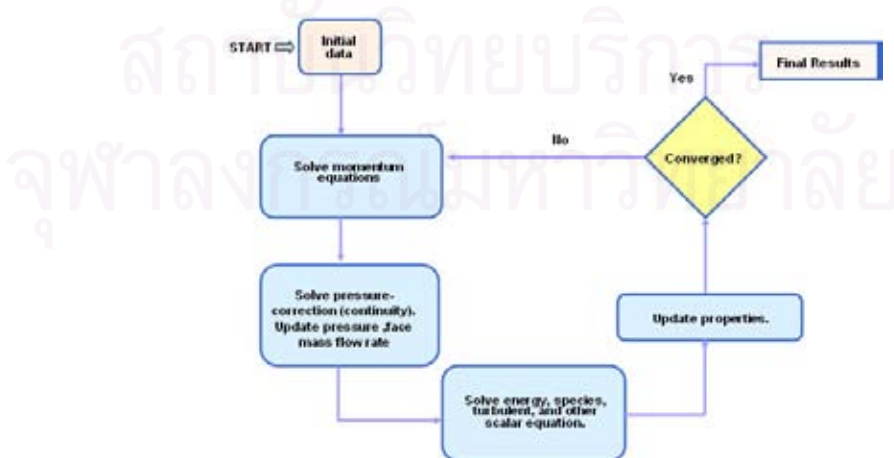
บริเวณผนังความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวปกติของแก๊สและของแข็งถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ คือเป็นสภาวะที่ไม่มี การไถล (Non-slip) เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของโปรแกรม Fluent โดยถ้าต้องการกำหนดให้เป็นสภาวะที่มีการไถลจำเป็นต้องเขียนฟังก์ชันเพิ่มเติมลงไป แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการเขียนฟังก์ชันเพิ่มเติม

3.2.3 การจำลองภาวะโดยโปรแกรม Fluent

การจำลองภาวะการไหลของแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Fluent เริ่มต้นด้วยการนำเข้าเพิ่มขอบเขตการไหลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม Gambit เข้าสู่โปรแกรม Fluent หลังจากนั้นทำการกำหนดรูปแบบของการคำนวณที่ใช้ โดยทำการเลือกแบบจำลองการไหลที่จะใช้คำนวณในการจำลองภาวะ และทำการกำหนดค่าขอบเขต และค่าเริ่มต้นในการจำลองภาวะ โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.3.1 การกำหนดชนิดของตัวแก้ปัญห (Solver)

ในขั้นตอนแรกของการจำลองภาวะ การไหลของแบบจำลองโรเซอร์ต้องทำการกำหนดชนิดของตัวแก้ปัญห โดยทำการเลือกในเมนู Solver ภายในโปรแกรม Fluent โดยเราจะเลือกตัวแก้ปัญหแบบ Segregated มาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยวิธีการแก้ปัญหแบบ Segregated นี้จะทำการแก้ปัญหสมการหลัก (Governing Equation) ไปเป็นลำดับที่ละสมการ ดังแสดงรูปที่ 3.3 เป็นแผนภาพแสดงกระบวนการแก้ปัญหโดยรวมของวิธีการแก้ปัญหแบบ Segregated



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการแก้ปัญหโดยรวมของวิธีการแก้ปัญหแบบ Segregated (Fluent 6.1 User's Guide, 2003)

จากรูปที่ 3.3 กระบวนการแก้ปัญหาจะเริ่มที่โปรแกรมทำการรับค่าคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัสดุภาคที่ต้องใช้ในการคำนวณ โดยในขั้นตอนนี้ถ้าเป็นขั้นแรกของการคำนวณจะเป็นการรับค่าตั้งต้นที่ผู้ใช้งานกำหนดเข้ามาเพื่อที่จะใช้เป็นค่าตั้งต้นของการคำนวณ แต่ถ้าเป็นระหว่างขั้นตอนการคำนวณจะเป็นการรับค่าจากการคำนวณรอบก่อนหน้าที่ยังไม่ลู่เข้า เมื่อโปรแกรมรับค่าเข้ามาแล้วจะทำการคำนวณสมการโมเมนตัมเพื่อที่จะหาค่าความเร็ว หลังจากนั้นจะนำค่าความเร็วที่ได้ไปทำการตรวจสอบและปรับค่ากับค่าความดัน (Pressure-correction) เมื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขเสร็จแล้วจะทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณด้วยค่าที่คำนวณได้ใหม่ และทำการแก้ปัญหาสมการพลังงาน สมการรูปแบบการไหล และสมการเชิงสเกลาร์ (Scalar Equation) และในขั้นตอนสุดท้ายของขั้นตอนการคำนวณจะทำการตรวจสอบค่าที่ได้จากการคำนวณว่าลู่เข้าหรือไม่โดยตรวจสอบกับค่าตกค้าง (Residual) ถ้าผลลัพธ์การคำนวณที่ได้ในรอบนั้นยังไม่ลู่เข้าจะทำการนำค่าที่ได้กลับไปคำนวณอีกรอบ (Iteration) จนกว่าค่าที่ได้จะลู่เข้า หรือเกินจำนวนรอบมากที่สุด (Max Iteration) ที่กำหนดไว้ โดยค่าที่ลู่เข้าแล้วจะนำไปทำการปรับค่าสมบัติต่างๆต่อไปเพื่อที่จะใช้ในการคำนวณของขั้นเวลา (Time Step) ต่อไป โดยในงานวิจัยนี้จะทำการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ Segregated ของแบบจำลองสองมิติ และขึ้นกับเวลา (Unsteady)

สำหรับการแก้ปัญหาหลายวัสดุภาคใช้แบบจำลองหลายวัสดุภาคแบบออยเลเลียน (Eulerian Multiphase Model) เนื่องจากเป็นแบบจำลองในการคำนวณที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการภายในฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน เพราะสามารถกำหนดให้วัสดุภาคของแข็งมีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) ในส่วนของสมการการคำนวณเกี่ยวกับรูปแบบการไหล ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ทั้งแบบปั่นป่วนและแบบราบเรียบในการจำลองภาวะ เนื่องจากสมการทั้งสองแบบใช้เวลาในการคำนวณไม่เท่ากันโดยสมการรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าแบบราบเรียบ

3.2.3.2 การกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัสดุภาค

ในงานวิจัยนี้จะใช้คุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัสดุภาคเช่นเดียวกันกับที่ใช้ในงานวิจัยของ Benyahia และทำการเพิ่มเติมในส่วนของคุณสมบัติที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับความร้อนเข้าไปสำหรับคุณสมบัติของวัสดุภาคของแข็งจะอ้างอิงกับค่าคุณสมบัติของ CaO ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลพื้นฐานของโปรแกรม Fluent ยกเว้นค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) จะถูกคำนวณโดยโปรแกรมที่เขียนเพิ่มเข้าไปให้โปรแกรม Fluent คำนวณ (รายละเอียดในภาคผนวก ค.) โดยรายละเอียดของคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัสดุภาคถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 หลังจากนั้นทำการกำหนดให้ วัสดุภาคแก๊สเป็นวัสดุภาคหลัก (Primary Phase) และวัสดุภาคของแข็งเป็นวัสดุภาครอง (Secondary Phase) และกำหนดให้ใช้สมการของ Gidaspow ในการคำนวณอันตรกิริยา

ระหว่างวัฏภาคของแรงต้านการเคลื่อนที่ (Interphase Drag Coefficient) และสมการของ Gunn ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนระหว่างวัฏภาคของการถ่ายโอนความร้อน

ตารางที่ 3.1 ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัฏภาคที่ใช้ในการจำลองภาวะ

Properties	Gas	Solid
Density $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	1.20	1712.00
Cp $\left(\frac{j}{kg \cdot K}\right)$	1006.43	783.00
Thermal Conductivity $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	conduct_gas*	conduct_solid**
Viscosity $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$	2.00×10^{-5}	1.72×10^{-5}
Molecular Weight $\left(\frac{kg}{kgmol}\right)$	28.966	56.08
Reference Temperature (K)	298	298
Diameter (m)	-	76×10^{-6}
Packing Limit***	-	0.6

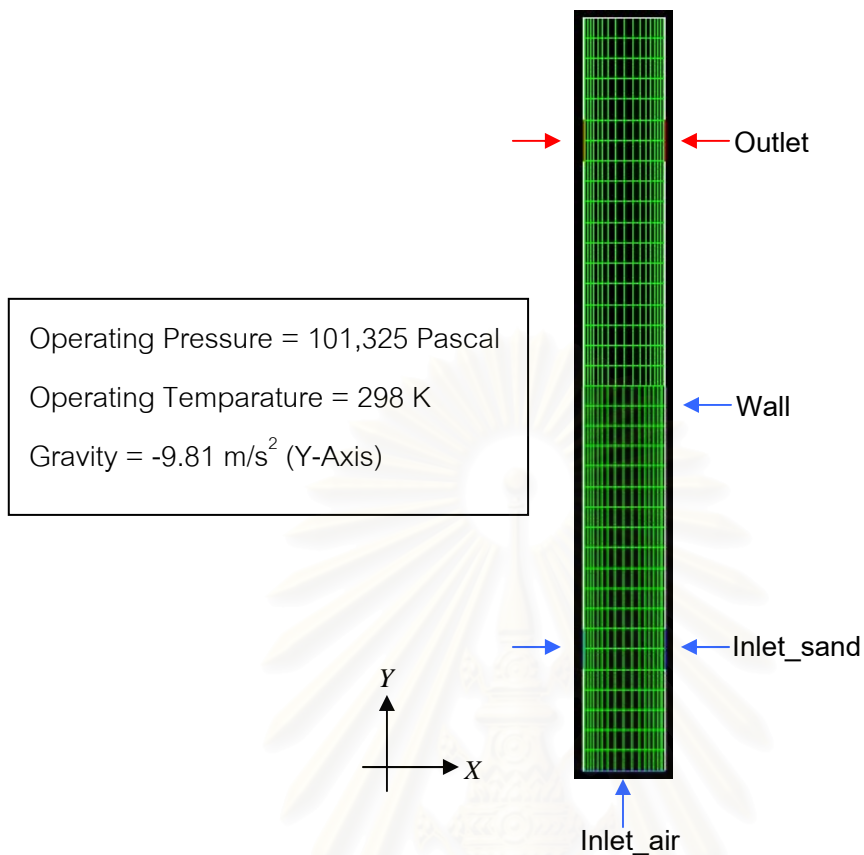
หมายเหตุ * ฟังก์ชันสำหรับคำนวณค่าการนำความร้อนของแก๊ส

** ฟังก์ชันสำหรับคำนวณค่าการนำความร้อนของของแข็ง

***ค่ามากที่สุดที่โปรแกรม Fluent ยอมให้กำหนดเนื่องจากเป็นค่ามากที่สุดที่อนุภาคจะชิดกันได้มากที่สุด

3.2.3.3 การกำหนดค่าขอบเขตและสภาวะที่ใช้ในการจำลองภาวะ

ในการจำลองภาวะในโปรแกรม Fluent ผู้ใช้งานจะต้องทำการกำหนดค่าสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการจำลองโดยในงานวิจัยนี้ทำการกำหนดให้มีค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ในทิศทางติดลบของแกนเว้า (กำหนดให้แกนเว้าทำมุมตั้งฉากกับพื้นโลก) ค่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเท่ากับ 298 องศาเซลเซียส และค่าความดันแวดล้อมเท่ากับ 101,325 ปาสคาล โดยค่าขอบเขตของแต่ละขอบเขตของแบบจำลองการไหลจะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานเพื่อที่เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองภาวะ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ที่แสดงรายละเอียดของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์และขอบเขตของแบบจำลองการไหล



รูปที่ 3.4 ขอบเขตของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์และค่าสภาวะแวดล้อม

ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าขอบเขตเริ่มต้นในการจำลองภาวะ

	Inlet_air	Inlet_sand	Outlet	Wall
Boundary Type	velocity-inlet	velocity-inlet	pressure-outlet	wall
Solid Temperature (K)	298	298	298	-
Gas Temperature (K)	298	298	298	-
Solid Velocity (m/s)	5.200	5.200	-	-
Gas Velocity (m/s)	0.476	0.476	-	-
Solid Volume Fraction	0	0.600	-	-
Wall Temperature (K)	-	-	-	1123
Gauge Pressure (Pa)	-	-	0	-

จากตารางที่ 3.2 แสดงค่าขอบเขตเริ่มต้นของขอบเขตต่างๆ ของแบบจำลองการไหลของไหลของโรเซออร์ โดยผู้ใช้งานจะต้องทำการกำหนดค่าขอบเขตเริ่มต้นเหล่านี้ก่อนที่จะทำการจำลองภาวะเพื่อที่เป็นการบอกให้โปรแกรม Fluent รู้ว่าค่าต่างๆ เหล่านี้จะถูกกำหนดให้ขอบเขตใดบ้างในการคำนวณ

3.2.3.4 การกำหนดชั้นเวลาและการจำลองภาวะ

ก่อนที่จะเริ่มทำการคำนวณผู้ใช้งานจะต้องไปทำการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialize) ที่ใช้สำหรับการคำนวณก่อนเสมอ และต้องทำการกำหนดค่า Under-Relaxation ที่ใช้ในการคำนวณแต่ละรอบของการคำนวณ (Iteration) โดยทั่วไปจะใช้ค่าตามปกติที่ Fluent กำหนดมาให้ก่อนแล้วสำหรับการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้จะใช้ชั้นเวลา (Time Step) เท่ากับ 0.001 วินาที เช่นการจำลองภาวะให้เป็นเวลาการไหล (Flow Time) เท่ากับ 40 วินาที ต้องกำหนดให้โปรแกรมทำการคำนวณเท่ากับ 40,000 ชั้นเวลา โดยกำหนดให้ทำการคำนวณไม่เกิน 50 รอบต่อหนึ่งชั้นเวลา ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางรุ่น Pentium IV ที่มีสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 3.00 กิกะเฮิรตซ์ มีหน่วยความจำแรม เท่ากับ 1 กิกะไบต์ ใช้เวลาคำนวณประมาณ 48 ชั่วโมงสำหรับเวลา 40 วินาทีในการจำลองสภาวะการณ

บทที่ 4

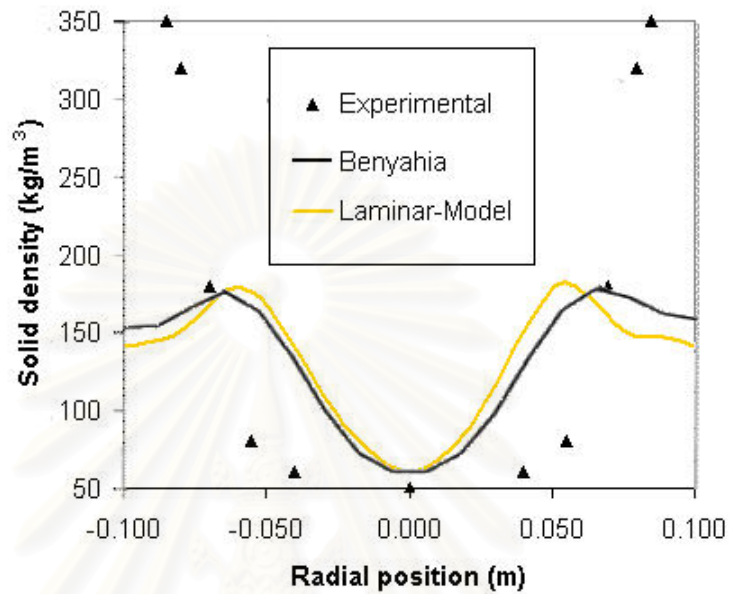
ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ผลจากการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแบบจำลองการไหลหลายวัฏภาคของแก๊ส และของแข็งภายในโรเตอร์ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมไหลที่เกิดขึ้นได้ในระดับหนึ่ง โดยในส่วนของวิเคราะห์ผลนั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนการจำลองภาวะอุทกพลศาสตร์ของการไหลภายในโรเตอร์โดยไม่มีถ่ายโอนความร้อน และส่วนที่สองคือการจำลองภาวะอุทกพลศาสตร์ของการไหลภายในโรเตอร์โดยมีการถ่ายโอนความร้อนด้วย ผลจากการจำลองภาวะในส่วนแรกจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อที่ตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลองที่รายงานในงานวิจัยของ Benyahia โดยที่จะทำการจำลองภาวะโดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ที่ภาวะเดียวกันกับงานวิจัยของ Benyahia ของเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองภาวะ และถ้าผลจากการจำลองภาวะในส่วนนี้มี ความถูกต้องมากพอ แบบจำลองการไหลที่ทำการพัฒนาขึ้นจะถูกนำมาเพิ่มแบบจำลองทางการถ่ายโอนความร้อนเข้าไป เพื่อที่จะใช้ในการศึกษากระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโรเตอร์ของเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนต่อไป

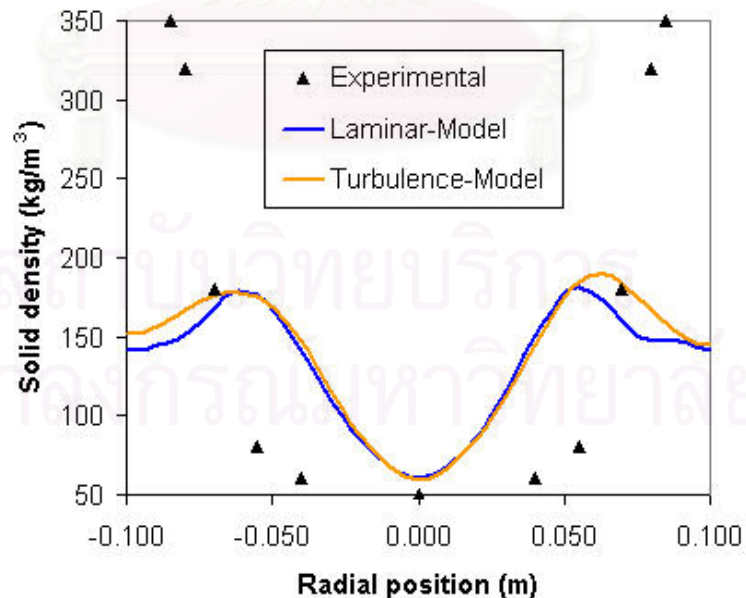
4.1 ผลการจำลองภาวะในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่ไม่มีถ่ายโอนความร้อน

การจำลองภาวะในส่วนนี้จะทำการจำลองภาวะอุทกพลศาสตร์ของการไหลภายในโรเตอร์ที่ภาวะอุณหภูมิคงที่ที่ 300 องศาเซลเซียส และใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบในการจำลองภาวะการไหล เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการไหลที่พัฒนาขึ้น ผลที่ได้จากการจำลองภาวะจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่รายงานในงานวิจัยของ Benyahia ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ย จากการจำลองภาวะที่เวลา 10 ถึง 20 วินาที ที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ของโรเตอร์ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลของ Benyahia จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของผลที่ได้จากการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้ กับผลที่ได้จากการจำลองภาวะในงานวิจัยของ Benyahia ดังนั้นแสดงว่าผลของอุทกพลศาสตร์ของการไหลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เชื่อถือได้ และจากรูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่าความหนาแน่นของของแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีของโรเตอร์ ซึ่งความหนาแน่นของของแข็งจะมีความหนาแน่นมากที่บริเวณผนัง แต่จะมีค่าน้อยที่บริเวณตรงกลางของโรเตอร์ นอกจากนี้แบบจำลองภาวะการไหลยังทำนายค่าความหนาแน่นของของแข็งที่บริเวณผนังต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริง จากงานวิจัยของ Benyahia ได้ให้เหตุผลไว้ว่า การที่ผลของแบบจำลองภาวะให้ผลที่ได้ต่ำกว่าในความเป็นจริงเนื่องมาจาก การลดความซับซ้อนของแบบจำลองการไหลที่พัฒนาขึ้น

โดยได้ทำการตั้งสมมุติฐานว่าของแข็งที่ใช้ในการจำลองภาชนะนั้นเป็นของแข็งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันหมด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วของแข็งที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของความหนาแน่นของของแข็งภายในโรเตอร์ที่ความสูง 3.9 เมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองภาชนะที่ได้ในงานวิจัยของ Benyahia และผลการจำลองภาชนะในงานวิจัยนี้

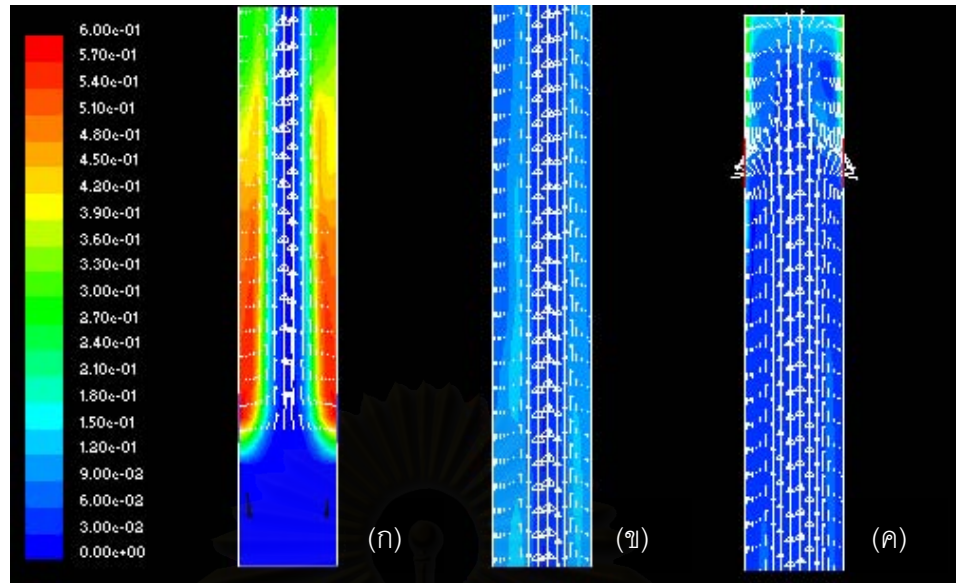


รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของความหนาแน่นของของแข็งภายในโรเตอร์ที่ความสูง 3.9 เมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองภาชนะที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ตามลำดับ

นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังทำการศึกษาผลการจำลองภาวะจากแบบจำลองการไหลที่แตกต่างกัน ว่าแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบและแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจะให้ผลการจำลองภาวะที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากกว่ากัน จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการไหลทั้งสองประเภท ให้ผลการจำลองความหนาแน่นของของแข็งที่มีความแม่นยำในระดับเดียวกัน ถึงแม้ว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน จะให้ผลการจำลองภาวะของความหนาแน่นของของแข็งที่บริเวณผนังได้ดีกว่าแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ แต่เนื่องจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้เวลาในการจำลองภาวะของคอมพิวเตอร์ มากกว่าแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบในการจำลองภาวะการไหลของไรเซอร์

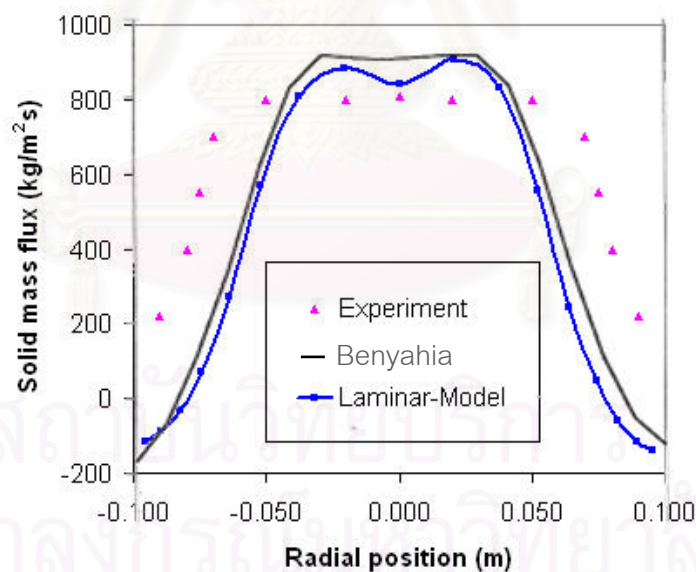
เพื่อที่จะทำความเข้าใจภาวะที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองของไรเซอร์ได้อย่างชัดเจน ผลจากการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้จึงถูกนำเสนอในรูปแบบของ เวกเตอร์ความเร็วของของแข็ง (Solid Velocity Vector) และรหัสสี (Color Code) ของคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง (Contours of Solid Volume Fraction) จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการจำลองภาวะที่ได้ ทำให้เห็นถึงรูปแบบการไหลภายในแบบจำลองการไหลของไรเซอร์ว่าเป็นรูปแบบการไหลแบบแกนและวงแหวน (Core-annulus) เมื่อพิจารณาความยาวของเวกเตอร์ความเร็วของของแข็ง พบว่าความเร็วของของแข็งมีค่าสูงที่บริเวณแกนกลางของไรเซอร์ และจะมีค่าลดลงไปตามแนวรัศมีของไรเซอร์สู่ผนัง นอกจากนี้ความเร็วของของแข็งที่บริเวณผนังยังมีค่ากลับทิศทางกับความเร็วบริเวณตรงแกนกลางของไรเซอร์อีกด้วย ในทางตรงกันข้ามเมื่อพิจารณาถึงรหัสสีของคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็งจะพบว่าความหนาแน่นของของแข็งจะมีค่ามากที่บริเวณผนังและจะมีค่าลดลงไปตามแนวรัศมีของไรเซอร์สู่แกนกลาง

จากรูปที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของฟลักซ์ของของแข็งกับตำแหน่งตามแนวรัศมีของไรเซอร์ จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงฟลักซ์ของของแข็งมีค่ามากบริเวณแกนกลางของไรเซอร์ และมีค่าลดลงไปตามแนวรัศมีของไรเซอร์สู่ผนัง จากผลการจำลองภาวะที่ได้พบว่าแบบจำลองการไหลให้ผลการจำลองภาวะบริเวณแกนกลางของไรเซอร์สูงกว่าความเป็นจริง และให้ผลการจำลองภาวะที่บริเวณใกล้กับผนังต่ำกว่าความเป็นจริง โดยค่าฟลักซ์ของของแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้ตลอดแนวรัศมีของไรเซอร์มีค่าเท่ากับ 302.34 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในขณะที่ฟลักซ์ของของแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 487.33 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 62.04 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.3 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตร และเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่ได้จากการจำลองภาวะที่บริเวณต่างๆ ภายในโรเตอร์

- (ก) บริเวณส่วนทางเข้าของแก๊สและของแข็ง
- (ข) บริเวณส่วนกลางของโรเตอร์
- (ค) บริเวณส่วนทางออกของแก๊สและของแข็ง



รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของฟลักซ์ของของแข็งภายในโรเตอร์ที่ความสูง 3.9 เมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองภาวะที่ได้ในงานวิจัยของ Benyahia และผลการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้

ทั้งนี้การที่ผลที่ได้การจำลองภาวะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลองตรงบริเวณผนังของโรเตอร์ เนื่องจากแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่พัฒนาขึ้นไม่สามารถทำนายผลการจำลองภาวะที่แม่นยำบริเวณผนัง เพราะในการพัฒนาแบบจำลองการไหลดังกล่าว ได้ทำการละเว้นผล

ของไฟฟ้าสถิต การใช้ของแข็งที่มีขนาดเดียวกัน เนื่องจากการลดความซับซ้อนของตัวแบบจำลองเอง ดังนั้นเมื่อปริมาณของแข็งที่มีในระบบมีค่าคงที่แต่ปริมาณของแข็งที่ได้จากการจำลองภาวะบริเวณผนังมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ทำให้ปริมาณของแข็งที่เหลือจึงไปอยู่ที่บริเวณแกนกลางของโรเตอร์ ส่งผลทำให้ปริมาณของแข็งที่บริเวณแกนกลางของโรเตอร์จึงมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองภาวะที่ได้จากงานวิจัยนี้ กับผลการจำลองภาวะในงานวิจัยของ Benyahia พบว่าแบบจำลองการไหลของโรเตอร์แบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ โดยในแบบจำลองการไหลในงานวิจัยของ Benyahia ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน แต่แบบจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ เนื่องจากแบบจำลองการไหลทั้งสองแบบมีความสามารถในการจำลองภาวะการไหลที่เกิดขึ้นภายในโรเตอร์ในระดับความแม่นยำที่ใกล้เคียงกัน แต่ด้วยเหตุผลทางด้านเวลาที่ใช้ในการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์ งานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบแทนแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองของโรเตอร์แบบไม่มีการถ่ายโอนความร้อนที่พัฒนาขึ้นในส่วนแรกของงานวิจัยนี้ สามารถที่จะนำไปเพิ่มสมการที่ใช้ในการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนเข้าไปเพื่อนำไปใช้ในการจำลองภาวะการไหลภายในโรเตอร์ที่มีการถ่ายโอนความร้อนมาเกี่ยวข้องในส่วนหลังของงานวิจัยนี้ได้

4.2 ผลการจำลองภาวะในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีการถ่ายโอนความร้อน

ในส่วนที่สองของงานวิจัยนี้จะทำการจำลองภาวะการไหลภายในโรเตอร์ที่มีการถ่ายโอนความร้อนมาเกี่ยวข้อง โดยนำแบบจำลองของโรเตอร์ที่ใช้ในส่วนแรกของงานวิจัยมาเพิ่มเติมผนังที่ให้ความร้อนเข้าไปเพื่อศึกษาผลของการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้น โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้น และทำการเปรียบเทียบการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้น โดยการดูค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่คำนวณได้จากการจำลองภาวะ

4.2.1 ผลของความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความหนาแน่นเฉลี่ยของของแข็งที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อน โดยทำการเปลี่ยนค่าสัดส่วนปริมาตรของของแข็งเริ่มต้นที่ป้อนเข้าสู่โรเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้ค่าพลักซ์ของของแข็งที่เข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพลักซ์ของของแข็งที่ป้อนเข้ามีค่าเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ได้จากการจำลองภาวะจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน

ในส่วนนี้จะทำการติดตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าความหนาแน่นของของแข็ง ที่เส้นสมมุติที่อยู่ห่างจากผนังของโรเตอร์ทั้งสองด้านเท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยจะทำการเก็บผลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าความหนาแน่นของของแข็งที่ได้จากการจำลองภาวะตลอดความสูงของโรเตอร์แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.2 หลังจากนั้นนำค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง

ตารางที่ 4.1 ค่าสัดส่วนปริมาตรของของแข็งเริ่มต้นและค่าฟลักซ์ของของแข็งที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

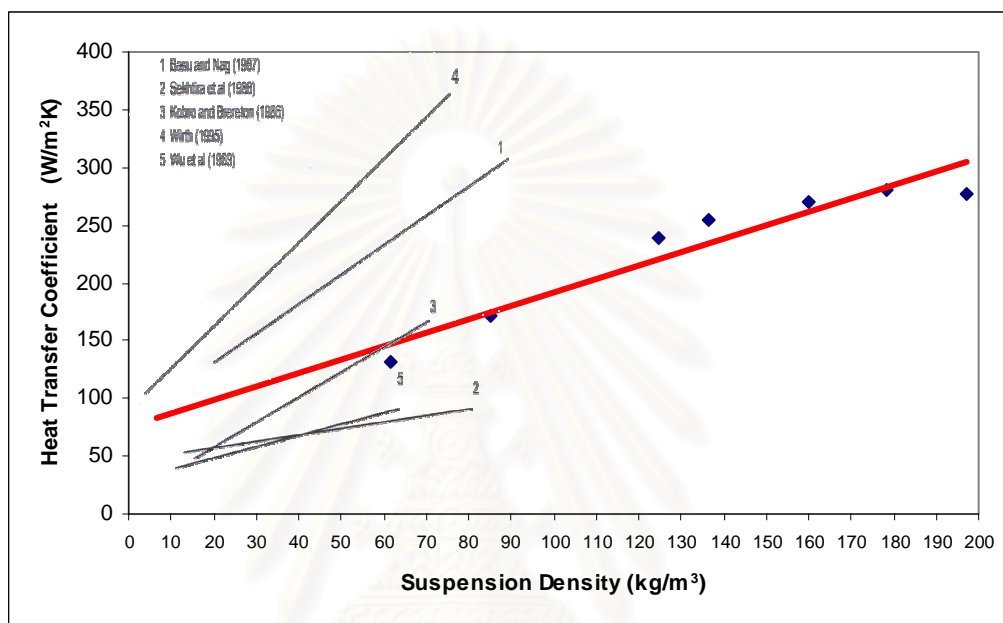
Case	Initial solid volume fraction	Solid mass flux (kg/m ² s)
1	0.20	162.98
2	0.30	244.47
3	0.40	325.96
4	0.45	366.71
5	0.50	407.46
6	0.55	448.20
7	0.60	487.32

ตารางที่ 4.2 ผลของค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

Case	Average solid suspension density (kg/m ³)	Average heat transfer coefficient (W/m ² K)
1	61.79	132.16
2	85.15	172.20
3	124.57	239.70
4	136.41	255.34
5	160.21	269.46
6	178.28	279.98
7	197.32	276.42

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองภาวะภายในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความหนาแน่นของ

ของแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรงคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นไปกับค่าความหนาแน่นของแข็งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น และใกล้เคียงกับผลการทดลองที่มีผู้ทำการทดลองมาแล้ว จากผลการจำลองภาวะที่ได้ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้พบว่าความหนาแน่นของของแข็งมีค่ามากกว่าบริเวณผนัง ดังนั้นที่บริเวณผนังของโรเตอร์จะมีการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าบริเวณแกนกลางของโรเตอร์

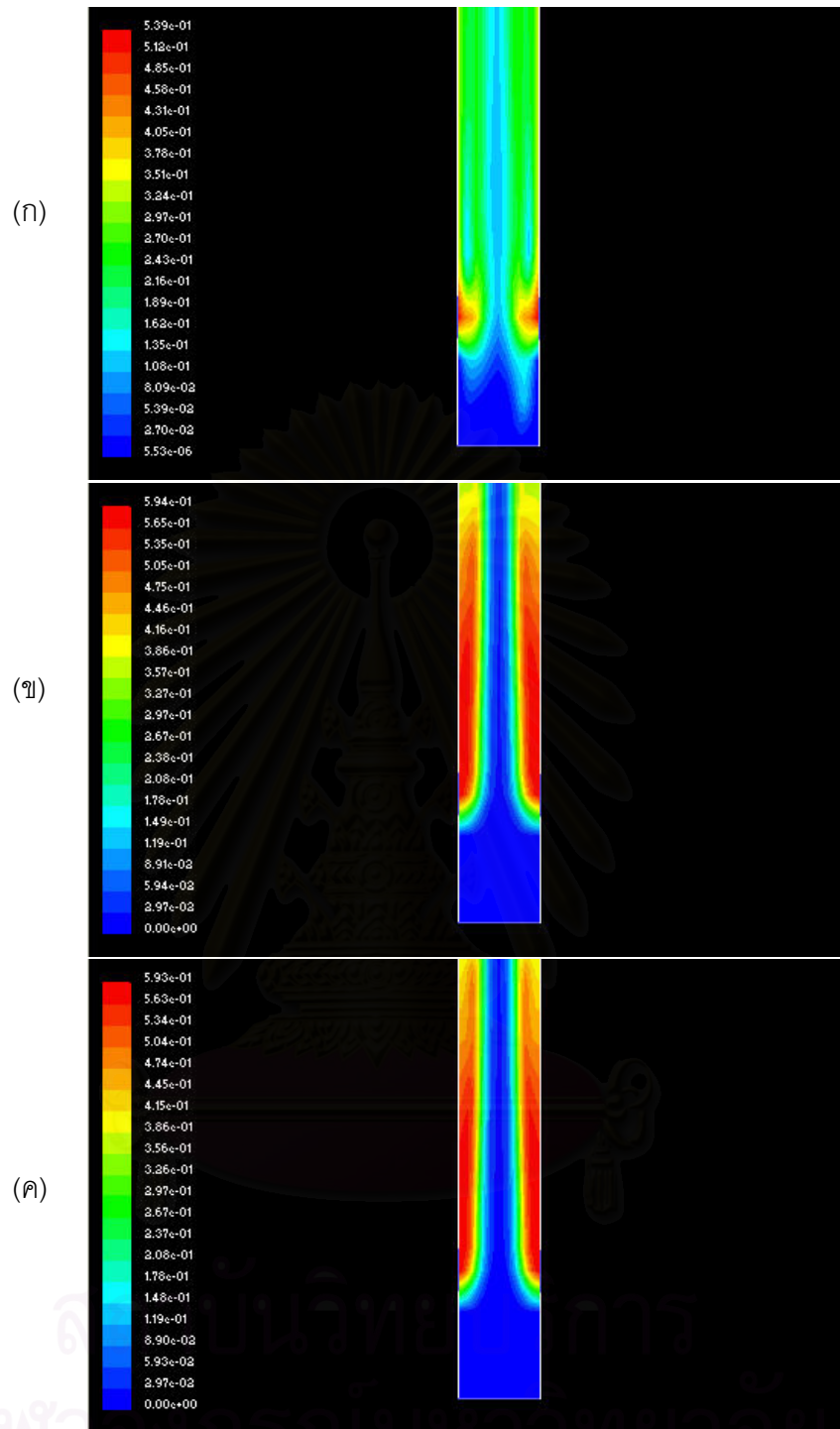


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในโรเตอร์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่นำเสนอในงานวิจัยของ Dogan และ Uysal, 1999

4.2.2 ผลของความเร็วขาเข้าของอากาศที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

ในส่วนนี้ของงานวิจัยได้ทำการศึกษาผลของความเร็วจาเข้าของอากาศที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในระบบ โดยทำการเปลี่ยนค่าความเร็วขาเข้าของอากาศที่เข้าสู่ระบบเป็นค่าต่างๆ ดังนี้

- 2.6 เมตรต่อวินาที
- 3.9 เมตรต่อวินาที
- 5.2 เมตรต่อวินาที

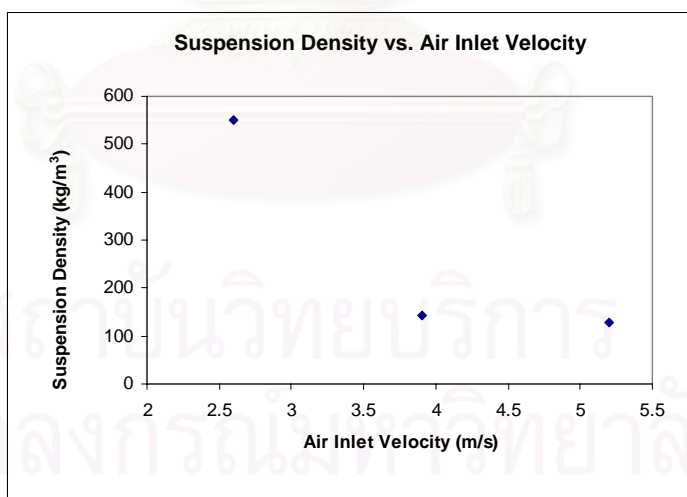


รูปที่ 4.6 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็งภายในระบบบริเวณด้านล่างของโรเตอร์ ที่ความเร็วอากาศเข้าค่าต่างๆ ดังนี้

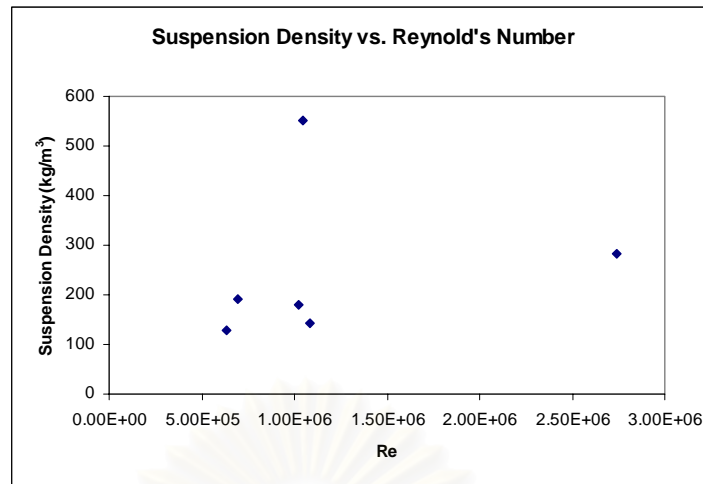
- (ก) ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 2.6 เมตรต่อวินาที
- (ข) ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 3.9 เมตรต่อวินาที
- (ค) ความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 5.2 เมตรต่อวินาที

โดยทำการรักษาค่าสภาวะอื่นๆ ไว้คงที่คือ ค่าความเร็วขาเข้าของของแข็งเท่ากับ 0.476 เมตรต่อวินาที ค่าสัดส่วนปริมาตรของของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 0.6 และมีความเร็วปลายเท่ากับ 0.58 เมตรต่อวินาที เพื่อที่จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่มีผลมากจากการเปลี่ยนค่าความเร็วขาเข้าของอากาศเท่านั้น ซึ่งในส่วนนี้จะทำการจำลองภาวะการณ์ไหลของแบบจำลองโรเตอร์จนเป็นเวลาการไหล 5 วินาที หลังจากนั้นจะทำการพิจารณาค่าสัดส่วนปริมาตรของของแข็งภายในระบบ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเพื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น

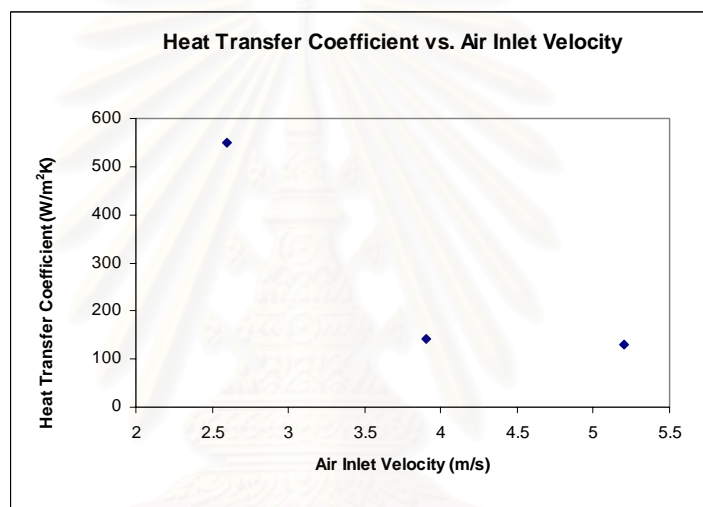
จากรูปที่ 4.6 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็งที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์ ซึ่งเป็นบริเวณทางเข้าของของแข็งและ และทางเข้าของอากาศ จากรูปที่ 4.6 ก เป็นสภาวะภายในโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2.6 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วอากาศที่ต่ำสุดที่ใช้ในการวิจัยนี้ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วอากาศค่านี้จะทำให้มีสัดส่วนปริมาตรของของแข็งมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะภายในโรเตอร์อีกสองสภาวะ คือที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 3.9 และ 5.2 เมตรต่อวินาทีที่มีผลทำให้ค่าสัดส่วนปริมาตรของของแข็งต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วอากาศ 2.6 เมตรต่อวินาทีให้ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบมีค่าสูงสุด ส่วนที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 3.9 และ 5.2 เมตรต่อวินาทีจะให้ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบที่ต่ำกว่าและมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยที่เวลา 5 วินาที กับค่าความเร็วอากาศขาเข้า



รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ กับความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยที่เวลา 5 วินาที



รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่เวลา 5 วินาที กับค่าความเร็วอากาศขาเข้า

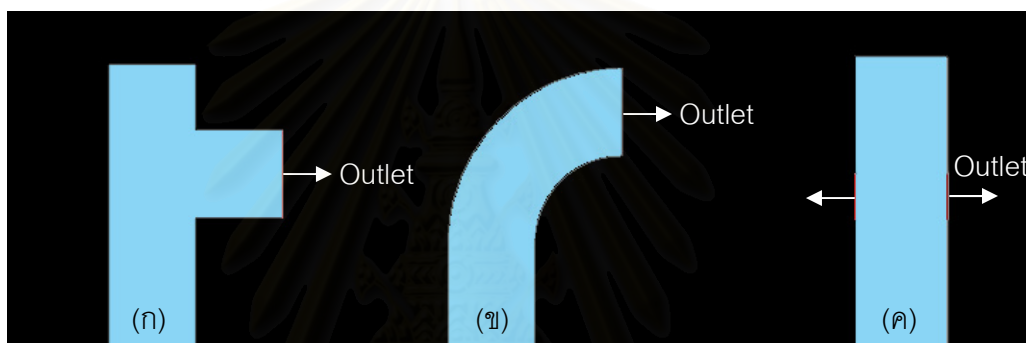
จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าเลขเรย์โนลด์ส์เฉลี่ยภายในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศขาเข้าค่าต่างๆ กับค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยที่ความเร็วอากาศนั้นๆ พบว่าค่าเลขเรย์โนลด์ส์กับค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยไม่มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าเลขเรย์โนลด์ส์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนกับค่าความเร็วอากาศขาเข้าที่มีค่าต่างๆ จะเห็นว่าที่ค่าความเร็วอากาศขาเข้าเท่ากับ 2.6 เมตรต่อวินาที จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูงที่สุดเนื่องจากที่ความเร็วอากาศ 2.6 เมตรต่อวินาที มีค่าสัดส่วนปริมาตรของของแข็งและค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยมากที่สุด เนื่องจากที่ความเร็วอากาศค่านี้ทำให้มีการสะสมของของแข็งภายในระบบมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องไปกับผลการวิจัยในส่วนแรก ที่แสดงผล

ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นกับค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบที่เพิ่มขึ้น

4.2.3 ผลของรูปแบบช่องทางออกที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

ในงานวิจัยยังทำการศึกษาผลของรูปแบบของช่องทางออกที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในระบบ โดยในงานวิจัยส่วนนี้ได้ทำการออกแบบช่องทางออกขึ้นมาอีกสองแบบเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับช่องทางออกของแบบจำลองของ Benyahia ที่ได้ทำการจำลองภาวะไปในส่วนที่แล้วของงานวิจัย โดยรูปแบบของช่องทางออกที่ออกแบบเพิ่มขึ้น แสดงในรูปแบบที่ 4.10 โดยในรูปแบบที่ 4.10 ก. เป็นช่องทางออกแบบที่ รูปที่ 4.10 ข. เป็นช่องทางออกแบบแอล และรูปที่ 4.10 ค. เป็นช่องทางออกแบบ Benyahia

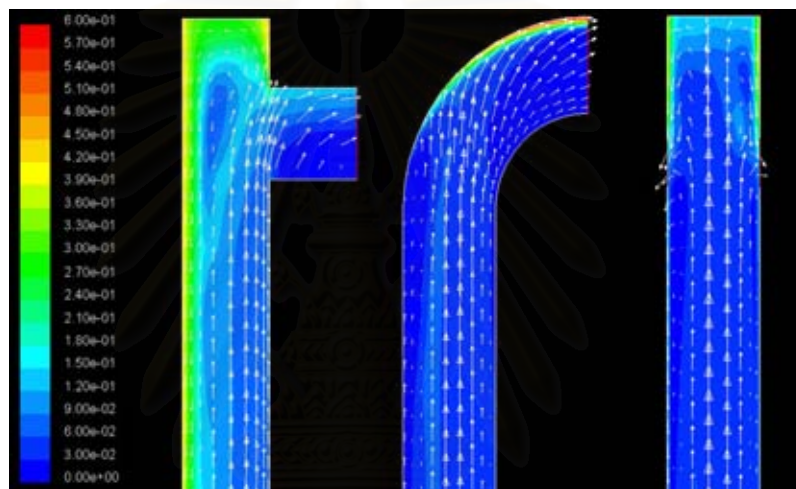


รูปที่ 4.10 รูปแบบช่องทางออกที่ใช้ในการศึกษาผลของรูปแบบของช่องทางออกที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย

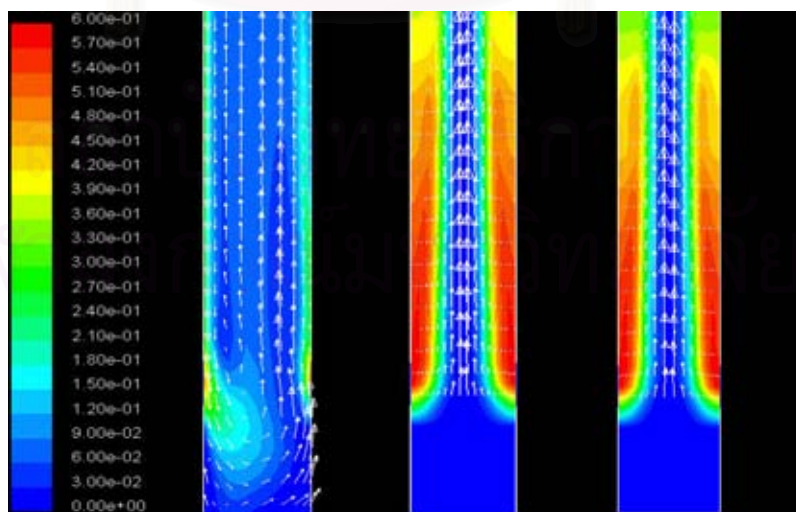
- (ก) ทางออกแบบที่
- (ข) ทางออกแบบแอล
- (ค) ทางออกแบบจำลองของ Benyahia

ผลที่ได้จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซอร์ที่มีช่องทางออกแบบต่างๆ ถูกนำเสนอในรูปแบบของคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง และเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งภายในระบบที่เวลา 20 วินาที โดยในรูปแบบที่ 4.11 จะแสดงปริมาณของของแข็งและความเร็วของของแข็งที่บริเวณด้านบนซึ่งเป็นทางออกของแก๊สและของแข็งจากไรเซอร์ จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองการไหลที่มีช่องทางออกแบบที่ จะมีของแข็งสะสมอยู่เป็นปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่มีรูปแบบของช่องทางออกอีกสองแบบ เนื่องจากรูปแบบของช่องทางออกแบบที่นั้นทำให้ของแข็งสามารถไปสะสมกันบริเวณช่องว่างเหนือทางออกของแก๊สและของแข็งได้ นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของของแข็งจากทิศทางของเวกเตอร์ความเร็ว

ของของแข็งยังพบว่าของแข็งที่ขึ้นไปสะสมในบริเวณดังกล่าวไหลย้อนกลับลงมาสู่ภายในโรเซออร์ด้วยผลของแรงโน้มถ่วงอีกด้วย ส่งผลทำให้ของแข็งภายในโรเซออร์มีปริมาณมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามสำหรับแบบจำลองการไหลของโรเซออร์ที่มีช่องทางออกแบบแอลนั้น ของแข็งสามารถเคลื่อนตัวออกจากโรเซออร์ได้โดยง่ายดังนั้นทำให้ปริมาณของแข็งภายในโรเซออร์มีปริมาณน้อยที่สุดในรูปแบบของช่องทางออกทั้งสามแบบ สำหรับแบบจำลองการไหลที่มีรูปแบบของช่องทางออกแบบ Benyahia นั้นของแข็งสามารถขึ้นไปสะสมกันที่บริเวณเหนือช่องทางออกของโรเซออร์ได้เช่นเดียวกับช่องทางออกแบบที่ แต่ของแข็งที่ขึ้นไปสะสมอยู่นั้นไม่สามารถที่จะไหลย้อนกลับลงมาสู่โรเซออร์ได้ ทำให้ปริมาณของแข็งภายในโรเซออร์จึงมีน้อยกว่าช่องทางออกแบบที่แต่มีมากกว่าช่องทางออกแบบแอล



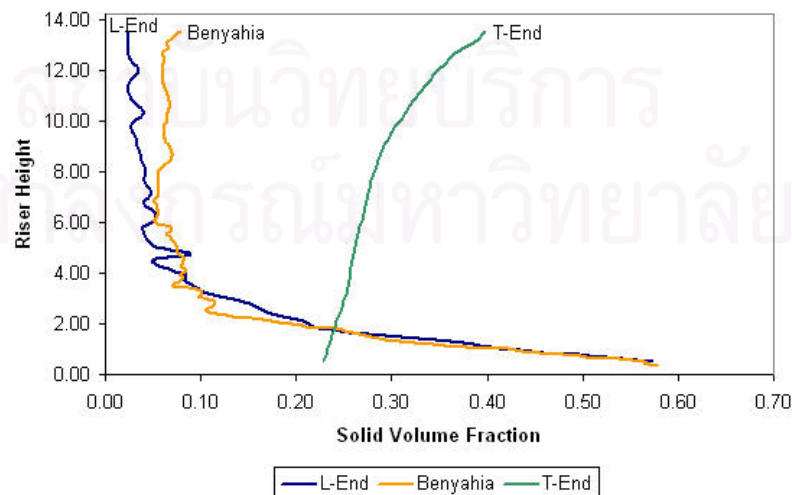
รูปที่ 4.11 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่บริเวณช่องทางออกของรูปแบบช่องทางออกของจำลองการไหลของโรเซออร์ทั้งสามแบบ



รูปที่ 4.12 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่บริเวณช่องทางเข้าทางด้านล่างของโรเซออร์ ของรูปแบบช่องทางออกทั้งสามแบบ

จากรูปที่ 4.12 แสดงปริมาณของแข็งและความเร็วของของแข็งภายในระบบที่บริเวณด้านล่างตรงทางเข้าของโรเตอร์ทั้งสามแบบ (จากซ้ายไปขวา ช่องทางออกแบบที่ ช่องทางออกแบบ แอล และช่องทางออกแบบ Benyahia ตามลำดับ) จากรูปดังกล่าวแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีช่องทางออกแบบที่นั้นจะเห็นได้ว่ามีของแข็งจำนวนหนึ่งที่ไหลลงมาบริเวณด้านล่างของโรเตอร์ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องมาจากรูปที่ 4.11 ที่ของแข็งที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนเหนือทางออกของโรเตอร์เคลื่อนลงมาจนถึงบริเวณด้านล่างแล้วถูกอากาศดันกลับขึ้นไปภายในโรเตอร์อีกครั้ง ดังที่แสดงให้เห็นในรูปของทิศทางของเวกเตอร์ของความเร็วของของแข็งที่มีทิศทางไหลย้อนกลับขึ้นไป

จากรูปที่ 4.13 แสดงสัดส่วนปริมาตรของของแข็งในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีช่องทางออกทั้งสามแบบที่ความสูงต่างๆ จากรูปดังกล่าวพบว่าแบบจำลองของโรเตอร์ที่มีช่องทางออกแบบที่นั้นส่งผลทำให้สัดส่วนปริมาตรของของแข็งภายในระบบมีค่าสูงขึ้นตามความสูงของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แบบจำลองของโรเตอร์ที่มีรูปแบบช่องทางออกแบบแอลและแบบ Benyahia นั้น ค่าสัดส่วนปริมาตรของของแข็งมีค่าลดลงเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้การกระจายตัวของของแข็งภายในระบบของโรเตอร์ที่มีช่องทางออกแบบที่นั้นดีที่สุด ในทั้งสามแบบเนื่องจากมีปริมาณของของแข็งเท่าๆ กันทั้งระบบ ซึ่งอีกสองแบบนี้จะมีปริมาณของของแข็งมากที่บริเวณด้านล่างเท่านั้น สำหรับส่วนที่เหลือของโรเตอร์จะมีปริมาณของของแข็งน้อย ดังนั้นแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีช่องทางออกแบบที่นั้น จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของแบบจำลองโรเตอร์ทั้งสามแบบ พบว่าแบบจำลองโรเตอร์ที่มีช่องทางออกแบบที่นั้นมีความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยสูงที่สุด และช่องทางออกแบบแอลนั้นมีความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยต่ำที่สุดเนื่องจากมีค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยในระบบน้อยที่สุด

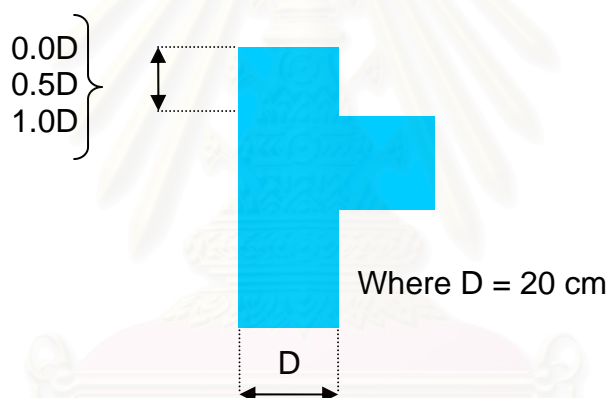


รูปที่ 4.13 สัดส่วนปริมาตรของของแข็งในระบบตลอดความสูงของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ทั้งสามแบบ

ตารางที่ 4.3 ผลของรูปแบบของช่องทางออกที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

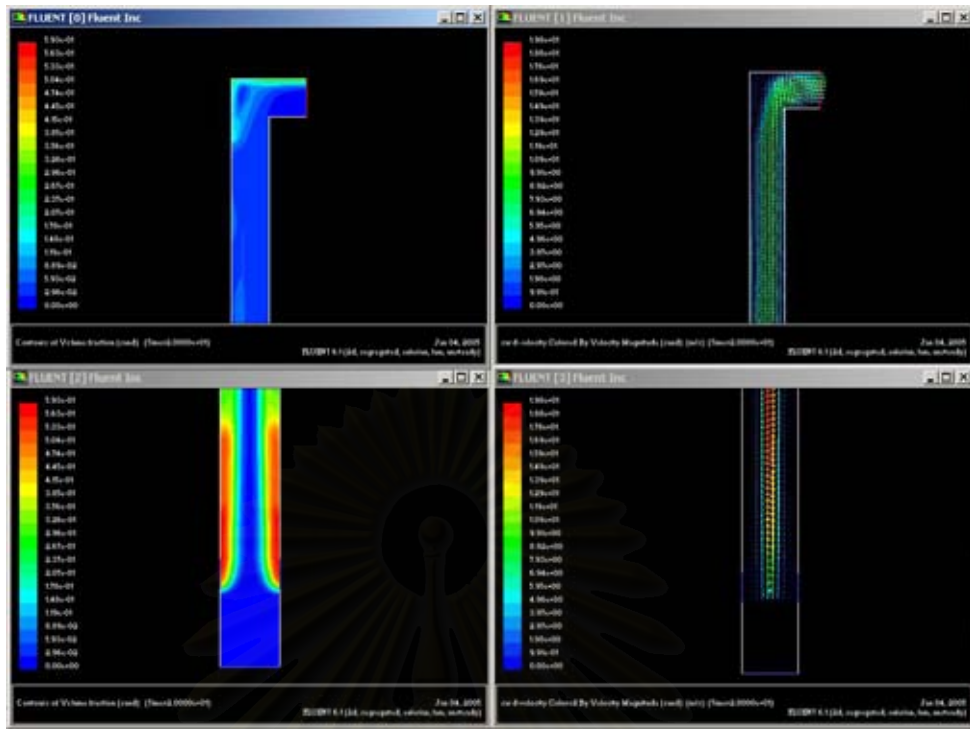
Exit Type	Average solid suspension density (kg/m^3)	Average solid volume fraction	Average heat transfer coefficient ($\text{W/m}^2\text{K}$)
T - E n d	334.52	0.19	1279.46
L - E n d	165.85	0.10	151.95
Benyahia	197.32	0.11	276.42

นอกจากนั้นในงานวิจัยส่วนนี้ยังได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของสัดส่วนความยาวของช่องว่างเหนือทางออกของช่องทางออกแบบที่ ว่ามีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนภายในแบบจำลองการไหลของโรเซอร้อย่างไรอีกด้วย โดยทำการออกแบบแบบจำลองการไหลของโรเซอรที่มีช่องทางออกแบบที่ที่มีความยาวของช่องว่างเหนือทางออกแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยทำการเปรียบเทียบความยาวของช่องว่างเหนือทางออกให้เป็นสัดส่วนกันเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเซอร

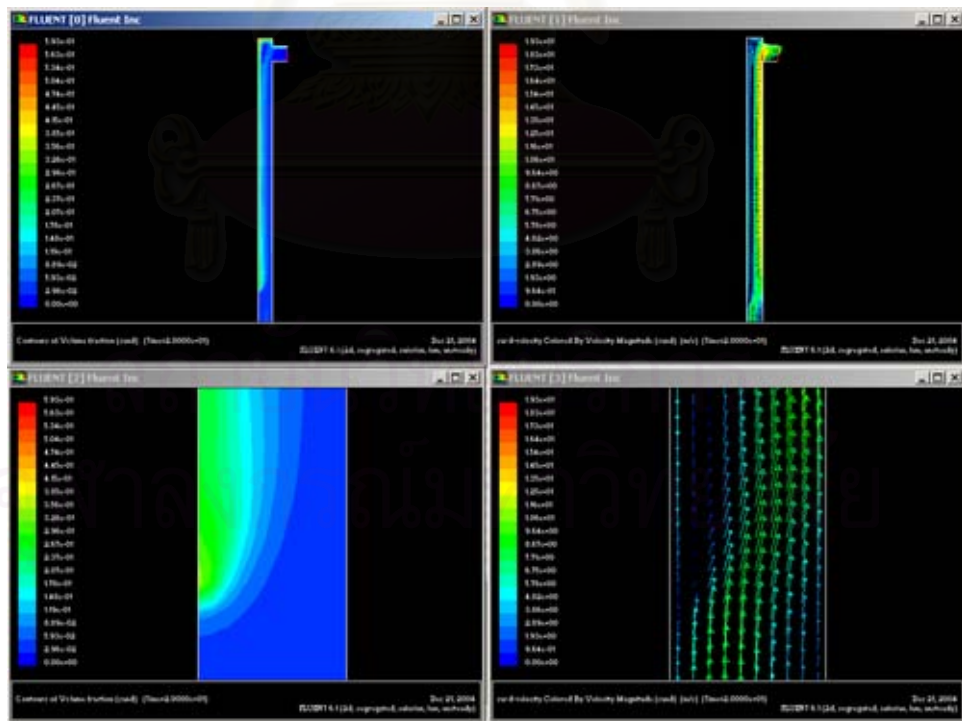


รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงสัดส่วนของความยาวของช่องว่างเหนือทางออกของแบบจำลองการไหลของโรเซอร

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 แสดงคอนทัวร์และเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งภายในแบบจำลองการไหลของโรเซอรที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่างเท่ากับ 0.0D นั้นทางสภาวะด้านบนจะมีลักษณะการตอบสนองใกล้เคียงกับช่องทางออกแบบแอดในการทดลองที่ผ่านมาพบว่าของแข็งปริมาณเล็กน้อยขึ้นไปสะสมบริเวณผนังด้านบนของโรเซอร แต่ของแข็งที่สะสมนั้นจะมีปริมาณมากกว่าของช่องทางออกแบบแอด เนื่องจากช่องทางออกแบบแอดนั้นของแข็งสามารถเคลื่อนตัวออกจากโรเซอรได้ดีกว่าเพราะว่ารูปแบบทางออกที่มีลักษณะโค้งมนแต่ในช่องทางออกแบบที่เป็นแบบเหลี่ยม และเมื่อพิจารณาทางด้านล่างของแบบจำลองพบว่ายังคงแสดงรูปแบบการไหลแบบแกนและวงแหวน

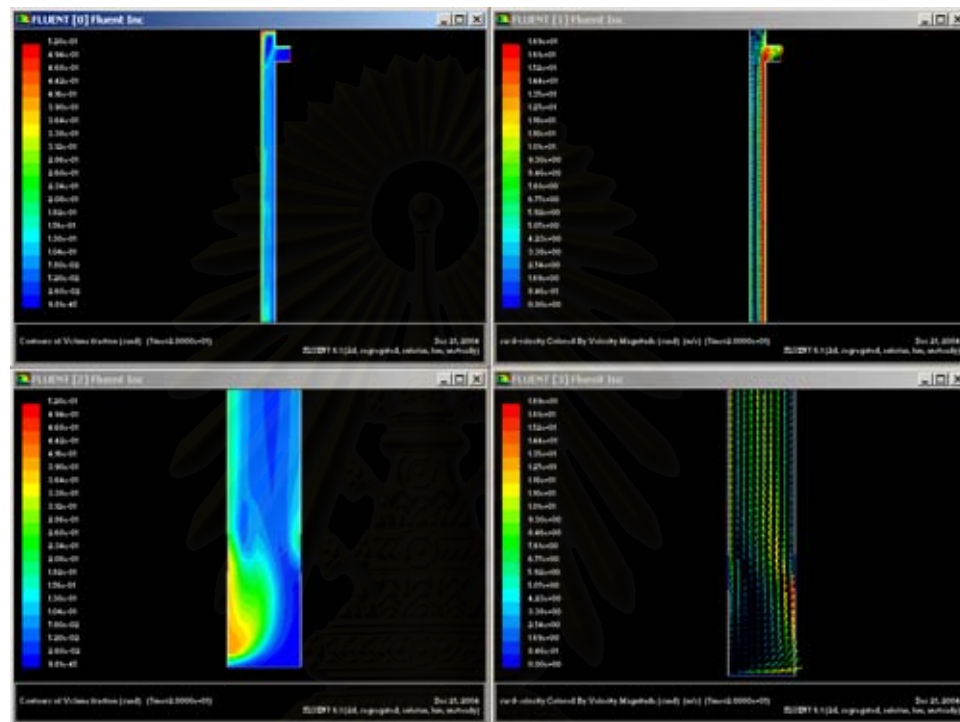


รูปที่ 4.15 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งของแบบจำลองโรเตอร์ที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่าง 0.0D



รูปที่ 4.16 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งของแบบจำลองโรเตอร์ที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่าง 0.5D

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 พบว่าบริเวณช่องว่างด้านบนบนของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์มีของแข็งปริมาณไปสะสมอยู่ ซึ่งของแข็งเหล่านั้นจะไหลย้อนกลับลงมาสู่โรเตอร์ โดยจะเคลื่อนที่ลงมาจนถึงประมาณเกือบถึงกึ่งกลางของโรเตอร์แล้วถูกอากาศดันกลับขึ้นไปดังแสดงในรูปทางด้านล่างของรูปที่ 4.16 ดังนั้นปริมาณของแข็งบริเวณส่วนบนของโรเตอร์จึงมีค่าสูงกว่าบริเวณด้านล่างของโรเตอร์



รูปที่ 4.17 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งของแบบจำลองโรเตอร์ที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่าง 1.0D

จากรูปที่ 4.17 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรและเวกเตอร์ความเร็วของของแข็งที่บริเวณช่องทางออกด้านบน และช่องทางเข้าทางด้านล่างของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ ที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่างเท่ากับ 1.0D พบว่าบริเวณด้านช่องว่างด้านบนเหนือช่องทางออกขึ้นไปมีการสะสมของของแข็งปริมาณมากและของแข็งเหล่านั้นจะไหลย้อนกลับลงมาตลอดตามแนวความสูงของโรเตอร์ จนกระทั่งลงมาถึงด้านล่างบริเวณทางเข้าของของแข็งและแก๊สของโรเตอร์ ส่งผลทำให้ปริมาณของแข็งในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์นี้มีมากที่สุดที่แบบจำลองการไหลของโรเตอร์ทั้งสามแบบในการทดลองนี้

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการจำลองภาวะของแบบจำลองทั้งสามแบบดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าแบบจำลองที่มีสัดส่วนความยาวของช่องว่างเหนือช่องทางออกเท่ากับ 1.0D ให้ผลการจำลองภาวะที่มีค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบสูงที่สุด ทั้งนี้

เนื่องมาจากการที่ช่องว่างเหนือช่องทางออกมีขนาดใหญ่ทำให้ของแข็งสามารถขึ้นไปสะสมตรงบริเวณนั้นได้มากที่สุดระหว่างแบบจำลองทั้งสามแบบ และของแข็งที่ขึ้นไปสะสมตรงบริเวณดังกล่าวมีมากพอที่จะไหลย้อนกลับลงมาตลอดแนวความสูงของโรเตอร์จนกระทั่งมาถึงบริเวณทางเข้าทางด้านล่างของโรเตอร์ ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวทำให้แบบจำลองโรเตอร์แบบนี้ให้ค่าความหนาแน่นของแข็งเฉลี่ยสูงสุด แต่จากค่าการจำลองภาวะที่ได้ในงานวิจัยตอนนี้มีข้อสังเกตว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีความยาวของช่องว่างเหนือช่องทางออกเท่ากับ 1.0D มีค่าสูงมากกว่าปกติ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการจำลองภาวะของแบบจำลองดังกล่าวมีสถานะที่ปั่นป่วนมากเนื่องจากการไหลย้อนกลับลงมาของของแข็งปริมาณมากภายในระบบจนทำให้การคำนวณได้ค่าที่สูงผิดปกติ

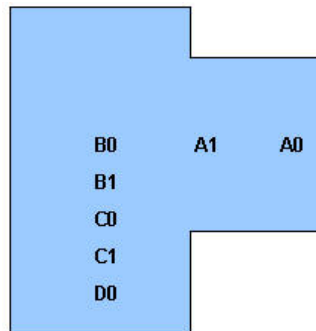
ตารางที่ 4.4 ผลของความยาวของช่องว่างเหนือช่องทางออกที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

T-End Type	Average solid suspension density (kg/m ³)	Average solid volume fraction	Average heat transfer coefficient (W/m ² K)
0.00D	181.09	0.11	325.25
0.50D	261.33	0.15	641.15
0.75D*	334.52	0.19	1279.46
1.00D	410.90	0.24	2187.09

หมายเหตุ * จากผลการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่ทางออกแบบที่ ในตารางที่ 4.3

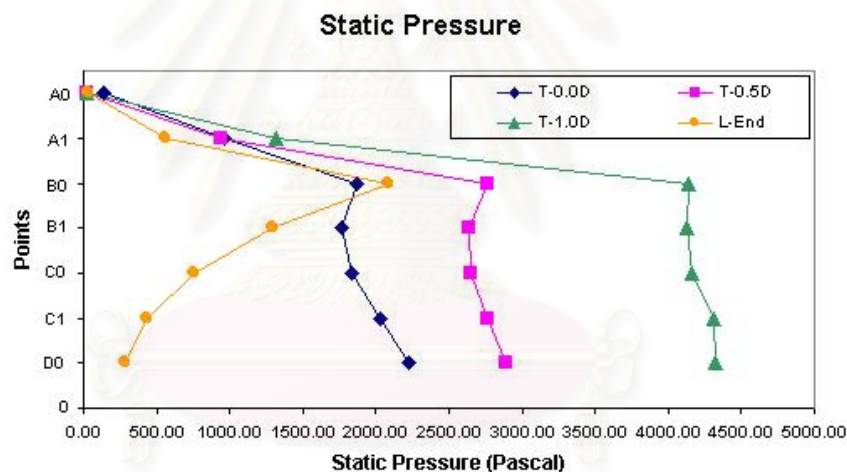
ตารางที่ 4.5 ค่าพิกัดของจุดที่ใช้วัดค่าความดันของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์

Points	X0	Y0
A0	0.3	14.10
A1	0.2	14.10
B0	0.1	14.10
B1	0.1	14.05
C0	0.1	14.00
C1	0.1	13.95
D0	0.1	13.90



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งของจุดที่ใช้วัดค่าความดันของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์

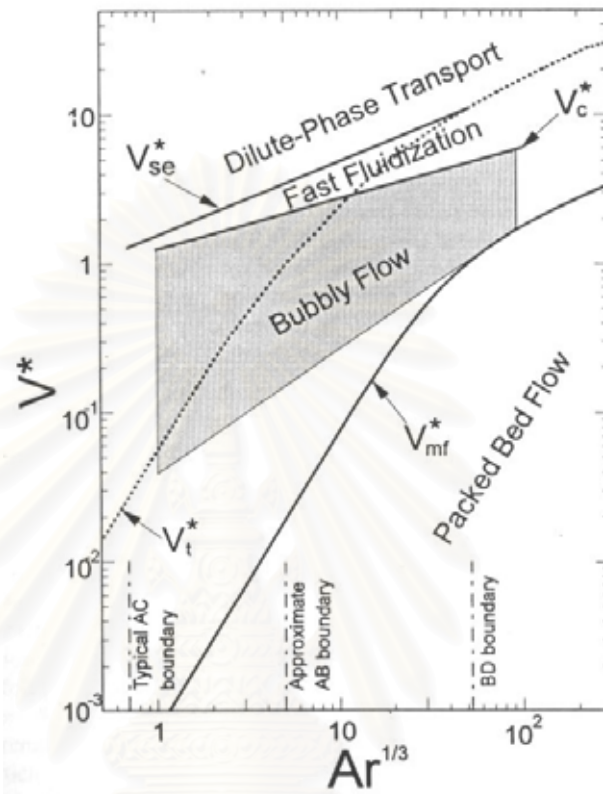
นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังศึกษาผลของรูปแบบของช่องทางออกที่มีผลต่อค่าความดันภายในระบบ (Gauge Pressure) โดยทำการติดตามค่าความดันที่จุดต่างๆ บริเวณด้านบนใกล้ช่องทางออกของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดของตำแหน่งของแต่ละจุดดังแสดงในตารางที่ 4.5 ในรูปแบบค่าพิกัดแนวอน และค่าพิกัดแนวตั้ง และแสดงเป็นแผนภาพอย่างง่าย ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19 ค่าความดันที่จุดต่างๆ ของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์

ค่าความดันที่จุดต่างๆ ที่ได้จากการจำลองภาวะถูกนำมาแสดงในรูปที่ 4.19 จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีที่มีความยาวของช่องว่างเหนือช่องทางออกเท่ากับ 1.0D จะมีค่าความดันภายในระบบสูงที่สุดเนื่องจากการสะสมกันของของแข็งภายในบริเวณช่องว่างเหนือช่องทางออก และเกิดการไหลย้อนกลับลงมาของของแข็งและแก๊ส ทำให้รูปแบบของช่องทางออกแบบนี้มีความดันภายในระบบสูงที่สุดในทางกลับกันแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีช่องทางออกแบบแอล แก๊สและของแข็งสามารถเคลื่อนตัวออกจากแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ได้ง่าย ทำให้มีความดันภายในระบบน้อยที่สุดในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่นำมาเปรียบเทียบ และที่จุด B0 ของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์แบบแอลมีความดันสูงกว่าปกติเนื่องจากเป็นบริเวณที่ใกล้กับผนังของโรเตอร์

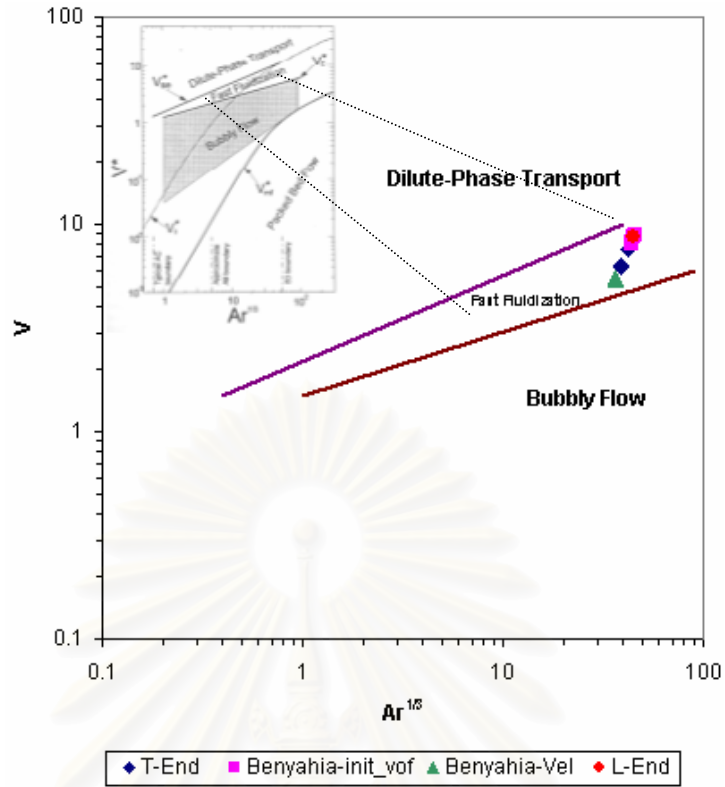
เมื่อนำค่าที่ได้จากการจำลองภาวะการไหลของแบบจำลองการไหลของโรเซอร์ที่ทำในงานวิจัยนี้ทั้งหมด มาพิจารณาหารูปแบบของการเกิดฟลูอิดไอเซชันที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองการไหลของโรเซอร์ โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.20 และสมการที่ 4.1



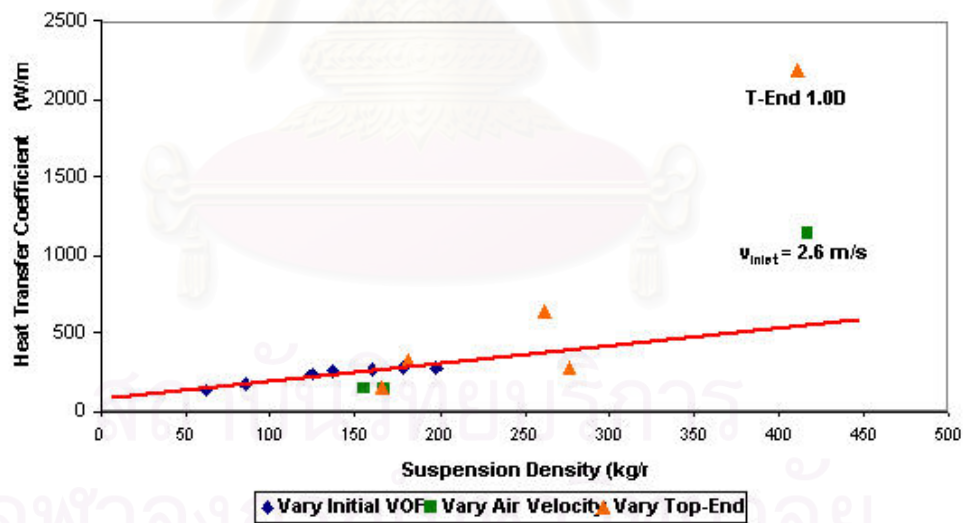
รูปที่ 4.20 รูปแบบของการเกิดฟลูอิดไอเซชันประเภทต่างๆ กับค่าความเร็วของอากาศและค่าเลขอาร์คิมิดีสยกกำลังหนึ่งส่วนสาม (Grace, 1997)

$$\frac{d_p V \rho_g}{\mu} = [27.2^2 + 0.0408 Ar]^{0.5} - 27.2 \quad (4.1)$$

โดยที่เราสามารถคำนวณค่าเลขอาร์คิมิดีสจากสมการที่ 4.1 เนื่องจากเราทราบค่าขนาดของอนุภาค ความหนืดของแก๊ส ความหนาแน่นของแก๊ส และความเร็วของแก๊ส โดยความเร็วที่นำมาใช้ในการคำนวณเป็นความเร็วเฉลี่ยของแบบจำลองการไหลของโรเซอร์แบบต่างๆ ที่ทำการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.21 รูปแบบของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของแบบจำลองการไหลของไรเซอริในงานวิจัยนี้

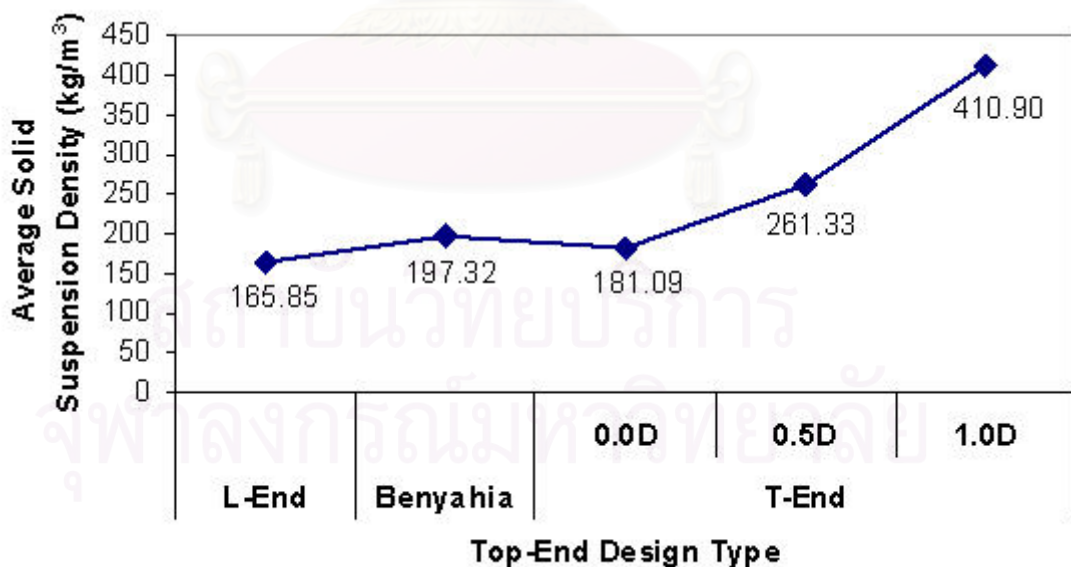


รูปที่ 4.22 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยจากผลการจำลองภาวะทั้งหมด

จากรูป 4.21 แสดงผลการตรวจสอบรูปแบบของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของแบบจำลองการไหลของไรเซอริในงานวิจัยนี้ จากรูปดังกล่าวพบว่า ชนิดของฟลูอิดไดเซชันที่เกิดขึ้นในแบบจำลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ เป็นฟลูอิดไดเซชันแบบฟาสต์ทั้งสิ้น แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในแบบจำลองการไหลของไรเซอริแบบต่างๆ มีผลมาจากค่าความหนาแน่น

ของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบอย่างเดียวนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในการจำลองภาวะที่เกิดขึ้นที่รูปแบบของพลูอิไดเซชันชนิดเดียวกัน

เมื่อนำผลการจำลองภาวะที่ได้ทั้งหมดในงานวิจัยนี้มาพิจารณารวมกันทั้งหมด โดยนำมาแสดงในรูปของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยกับค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองภาวะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงไปกับค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่มีค่าต่างไปจากเส้นแนวโน้มมากคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ของแบบจำลองการไหลของโรเซออร์ที่มีความเร็วอากาศเข้าเท่ากับ 2.6 เมตรต่อวินาที และแบบจำลองการไหลของโรเซออร์ที่มีความยาวของช่องว่างเหนือช่องทางออกเท่ากับ 1.0D ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าทั้งสองจุดนั้นมีค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่สูงมากกว่า 1.75×10^6 และค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของการจำลองภาวะที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่อยู่บนเส้นแนวโน้มมีค่าเลขเรย์โนลด์ส์ไม่เกิน 1.75×10^6 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซออร์ที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ส์มากกว่า 1.75×10^6 น่าจะเป็นค่าที่ผิดพลาด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิดพลาดของสมการการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่สูงไม่มีผลต่อความแม่นยำของการคำนวณค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในระบบ



รูปที่ 4.23 ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยของรูปแบบช่องทางออกของโรเซออร์แบบต่างๆ ในงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบของช่องทางออกของโรเตอร์มีผลโดยรวมต่อการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบ เนื่องจากช่องทางออกแบบต่างๆ จะทำให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของของแข็งในระบบมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยภายในระบบ จากการจำลองภาวะในงานวิจัยนี้พบว่ารูปแบบช่องทางออกแบบที่ให้ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยสูงที่สุดในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ทั้งหมด และพบว่ารูปแบบช่องทางออกแบบที่มีความยาวของช่องว่างเหนือช่องทางออกมากจะทำให้ของแข็งไปสะสมบริเวณช่องว่างดังกล่าวได้มาก และทำให้ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยในระบบมีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีรูปแบบช่องทางออกแบบแอลนั้นจะให้ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยในระบบน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ที่แสดงค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีรูปแบบของช่องทางออกต่างๆ กัน ดังนั้นแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีรูปแบบของช่องทางออกต่างๆ กันจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนต่างกัน คือแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่มีค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยในระบบสูงก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในระบบสูงตามไปด้วยเช่นกัน

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลอง

จากงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอริในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยในงานวิจัยนี้แบ่งการจำลองภาวะออกเป็นสองส่วนคือส่วนการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอริที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อน คือไม่มีการคำนวณสมการถ่ายโอนความร้อนในแบบจำลอง และส่วนการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอริที่มีการถ่ายโอนความร้อน คือมีการคำนวณสมการการถ่ายโอนความร้อนในแบบจำลองด้วย

5.1.1 การจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอริที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อน

ผลการจำลองภาวะที่ได้จากแบบจำลองการไหลของโรเซอริที่พัฒนาด้วยโปรแกรม Fluent ในงานวิจัยนี้ ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองภาวะที่ได้ในงานวิจัยของ Benyahia เพื่อที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองภาวะที่ได้ในแบบจำลองการไหลที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับผลการจำลองภาวะที่ได้ในงานวิจัยของ Benyahia และแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบสามารถให้ผลการจำลองภาวะได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเลือกแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบมาใช้ในการจำลองภาวะเพื่อที่จะลดเวลาที่ใช้ในการจำลองภาวะ จากการเปรียบเทียบกับผลการจำลองภาวะที่ได้ในงานวิจัยนี้กับของ Benyahia สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการไหลที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ สามารถที่จะนำไปเพิ่มชุดสมการการถ่ายโอนความร้อนเพื่อที่จะนำไปใช้ในการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอริที่มีการถ่ายโอนความร้อนในงานวิจัยส่วนต่อไปได้

5.1.2 การจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอริที่มีการถ่ายโอนความร้อน

แบบจำลองการไหลของโรเซอริที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยตอนที่แล้วถูกนำมาเพิ่มชุดสมการการถ่ายโอนความร้อนเข้าไป เพื่อที่จะใช้ในการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอริที่มีการถ่ายโอนความร้อน โดยในงานวิจัยส่วนนี้ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ และผลของรูปแบบของช่องทางออกของโรเซอริที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในโรเซอริ

จากผลการจำลองภาวะพบว่าค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในโรเซออร์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยภายในโรเซออร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยมีค่ามากขึ้นตามค่าความหนาแน่นของของแข็งที่เพิ่มขึ้น จากผลการจำลองภาวะพบด้วยว่าลักษณะของช่องทางออกมีความสำคัญต่อค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยภายในโรเซออร์ สำหรับรูปแบบของช่องทางออกที่ให้ค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยสูงสุดคือช่องทางออกแบบที่ โดยที่แบบจำลองการไหลของโรเซออร์ที่มีช่องทางออกแบบที่นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดในแบบจำลองการไหลของโรเซออร์ที่มีช่องทางออกแบบอื่นๆ ดังนั้นจึงกล่าวโดยสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยจะมีค่าสูงเมื่อค่าความหนาแน่นของของแข็งเฉลี่ยมีค่าสูง และเมื่อจำลองภาวะช่องทางออกแบบที่โดยปรับค่าความยาวของช่องว่างเหนือช่องทางออกพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยมีค่าสูงผิดปกติ เนื่องมาจากในแบบจำลองโรเซออร์นั้นมีภาวะที่ปั่นป่วนมากทำให้บริเวณบางช่วงภายในแบบจำลองมีค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่มากเกินไปขอบเขตของสมการที่ใช้คำนวณจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยดังกล่าวมีค่าสูงผิดปกติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ต้องการจำลองภาวะที่เกิดขึ้นในโรเซออร์ของเตาเผาฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนซึ่งเป็นสภาวะที่มีความซับซ้อนมาก แบบจำลองการไหลของโรเซออร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการลดความยุ่งยากของแบบจำลองเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยการตัดผลของไฟฟ้าสถิตและขนาดที่ต่างกันของอนุภาคของแข็ง และจากการใช้เซลล์ในการคำนวณที่มีขนาดใหญ่ทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำที่น้อยลง ดังนั้นแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองการไหลของโรเซออร์เพิ่มเติม ได้แก่

- เพิ่มสมการการคำนวณผลของไฟฟ้าสถิตเข้าไปในแบบจำลอง
- ใช้ของแข็งที่มีขนาดต่างๆ กันในการจำลองภาวะ
- เพิ่มความละเอียดของเซลล์ที่ใช้คำนวณของแบบจำลอง
- ปรับปรุงสมการการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนให้มีความครอบคลุมขอบเขตของเลขเรย์โนลด์ส์ให้มากขึ้น
- พัฒนาแบบจำลองสามมิติเพื่อที่จะศึกษาสภาวะที่ใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

สมบัติ กীরติพรานนท์. การจำลองอุทกพลวัตของอนุภาคในโรเตอร์ของกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดซ์เบด. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.

ภาษาอังกฤษ

C. Breitholtz., B. Leckner and A. P. Baskakov. Wall average heat transfer in CFB boilers, Power Technology, 120, (2001): 41 – 48.

C.M. Hrenya., and J. L. Sinclair. Effects of Particle-phase Turbulence in Gas-solid Flows, AIChE Journal, 43(4), (1997): 853 – 869

D. Gidaspow. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description, New York: Academic Press, 1994.

D. Kunii., and O. Levenspiel. Fluidization Engineering 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, Stoneham, 1991.

D. Shi, R. Nicolai and L. Reh. Wall-to-bed Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds, Chemical Engineering and Processing, 37, 1998: 287 – 293.

Fluent 6.1 User's Guide [Electronic Documentation], Fluent, 2003.

F.P. Incopera., and D. P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer Third Edition, New York: Wiley, 1990.

- J. A. M. Kuipers., W. Prins., and W. P. M. van Swaij. Numerical Calculation of Wall-to-Bed Heat Transfer Coefficients in Gas-Fluidized Beds, AIChE Journal, Vol. 38, No. 7, July 1992: 1079 – 1091.
- J. R. Grace., A. A. Avidan, and T. M. Knowlton. Circulating Fluidized Beds. London; New York: Blackie Academic & Professional, 1997.
- O. Bucak., O.M. Dogan., and B.Z. Uysal. Heat Transfer in Circulating Fluidized Bed Combustor. Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Savannah, Georgia, 1999.
- P. Basu., and S. A. Fraser. Circulating Fluidized Bed Boilers: Design and Operations, Reed Publishing (USA), 1991.
- P.D. Noymer., M.R. Hyre., and L.R. Glicksman. The effect of bed diameter on near-wall hydrodynamics in scale-model circulating fluidized beds, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, (2000): 3641 – 3649.
- S.A. Logtenberg., and A.G. Dixon. Computational fluid dynamics studies of fixed bed heat transfer, Chemical Engineering and Processing, 37, 1998: 7 – 21.
- S. Benyahia., and others. Simulation of Particles and Gas Flow Behavior in The Riser Section of a Circulating Fluidized Bed Using The Kinetic Theory Approach for the Particulate Phase, Powder Technology, 112, (2000): 24 – 33.
- T.A. Ebert., L.R. Glicksman., and M. Lints. Determination of particle and gas convective heat transfer component in a circulating fluidized bed, Chemical Engineering Science, 48, (1993): 2179 – 2188.
- V. Mathiesen., T. Solberg., and B.H. Hjertager. An Experimental and Computational Study of Multiphase Flow Behavior in a Circulating Fluidized Bed, International Journal of Multiphase Flow, 26, (2000): 387 – 419.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการจำลองภาวะ

ตารางที่ ก1 ข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเตอร์ที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ

- ที่เวลา 10 – 20 วินาที
- สัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 0.59

Radial Position	Solid volume fraction at time											Average	Solid density (kg/m ³)
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
-0.10	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.11	0.08	0.08	141.59
-0.10	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.10	0.08	0.08	141.82
-0.09	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	144.65
-0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.11	0.08	0.10	0.08	0.09	0.09	148.47
-0.07	0.10	0.09	0.09	0.10	0.08	0.10	0.10	0.09	0.11	0.08	0.09	0.09	160.02
-0.06	0.10	0.09	0.11	0.11	0.09	0.11	0.10	0.11	0.12	0.09	0.10	0.10	177.28
-0.05	0.09	0.06	0.11	0.10	0.11	0.11	0.09	0.12	0.11	0.10	0.10	0.10	171.99
-0.04	0.06	0.04	0.08	0.07	0.10	0.10	0.07	0.09	0.09	0.10	0.07	0.08	135.33
-0.02	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.04	0.05	85.94
0.00	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	60.73
0.02	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	87.38
0.04	0.09	0.10	0.08	0.09	0.10	0.07	0.08	0.06	0.06	0.10	0.08	0.08	144.85
0.05	0.12	0.11	0.11	0.11	0.13	0.10	0.11	0.08	0.08	0.12	0.10	0.11	180.55
0.06	0.11	0.08	0.10	0.11	0.10	0.12	0.10	0.10	0.09	0.11	0.09	0.10	171.62
0.07	0.09	0.07	0.08	0.10	0.08	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09	0.07	0.09	152.34
0.08	0.07	0.07	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10	0.08	0.07	0.09	147.15
0.09	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.08	0.07	0.09	147.30
0.10	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	143.97
0.10	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	141.63

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอร์ที่ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ

- ที่เวลา 10 – 20 วินาที
- สัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 0.59

Radial Position	Solid Y-velocity (m/s) at time											Average	Solid Mass Flux (kg/m ² s)	
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
-0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.10	-1.07	-0.73	-1.80	-0.74	-1.16	-0.08	-1.90	-1.43	-0.86	-1.54	-1.08	-1.13	-162.89	
-0.09	-1.27	-0.27	-1.38	-0.33	-1.04	0.07	-1.48	-0.96	-0.61	-0.87	-0.89	-0.82	-121.82	
-0.08	-0.78	0.53	-0.72	0.16	-0.37	0.15	-0.98	-0.27	-0.39	0.03	-0.40	-0.28	-44.17	
-0.07	0.53	1.74	0.42	0.72	0.51	-0.01	0.24	0.12	-0.20	0.98	0.34	0.49	86.85	
-0.06	2.11	3.50	1.95	1.69	1.17	0.27	2.01	0.77	0.34	1.54	1.42	1.53	262.39	
-0.05	4.01	5.72	4.31	3.66	2.64	1.89	3.75	2.51	2.18	2.56	3.50	3.34	451.69	
-0.04	6.83	8.22	8.41	6.86	5.76	5.06	6.42	5.67	5.54	5.27	7.39	6.49	558.14	
-0.02	11.55	11.73	13.57	11.85	12.19	10.24	11.15	10.75	10.35	10.38	12.95	11.52	699.62	
0.00	15.40	13.35	14.98	15.26	17.24	14.45	15.16	14.83	14.11	15.44	15.47	15.06	1316.17	
0.02	11.91	9.74	9.83	11.41	11.91	12.27	12.29	12.29	12.25	12.72	11.14	11.61	1682.24	
0.04	6.10	5.43	4.89	5.88	5.13	7.82	6.92	7.43	8.35	6.70	5.67	6.39	1154.37	
0.05	2.52	2.57	2.34	2.66	2.03	4.55	3.37	4.42	5.44	3.07	2.34	3.21	550.87	
0.06	0.58	1.21	0.99	1.27	0.84	2.28	1.16	2.57	3.34	1.31	0.64	1.47	224.12	
0.07	-0.02	0.64	-0.03	0.71	0.28	0.75	-0.15	1.29	1.60	0.45	-0.12	0.49	72.00	
0.08	-0.31	0.04	-0.88	0.09	-0.62	-0.04	-0.92	0.08	0.12	-0.28	-0.50	-0.29	-43.20	
0.09	-0.90	-0.42	-1.51	-0.47	-1.31	-0.27	-1.41	-0.94	-0.77	-0.82	-1.14	-0.91	-130.30	
0.10	-1.48	-0.64	-1.97	-0.60	-1.62	-0.17	-1.72	-1.50	-1.11	-1.15	-1.71	-1.24	-176.10	
0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก2 ข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอร์ที่¹ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

- ที่เวลา 10 – 20 วินาที
- สัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 0.59

Radial Position	Solid volume fraction at time											Average	Solid density (kg/m ³)
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
-0.10	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	152.17
-0.10	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	152.31
-0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	156.13
-0.08	0.09	0.10	0.08	0.09	0.09	0.09	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	164.01
-0.07	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.13	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	173.36
-0.06	0.09	0.10	0.11	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11	0.10	0.12	0.11	0.10	178.17
-0.05	0.09	0.09	0.10	0.13	0.10	0.12	0.09	0.09	0.08	0.12	0.09	0.10	171.57
-0.04	0.07	0.09	0.08	0.11	0.09	0.10	0.07	0.07	0.07	0.10	0.07	0.08	142.02
-0.02	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.07	0.05	0.05	89.20
0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	59.07
0.02	0.04	0.06	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	85.96
0.04	0.07	0.10	0.07	0.11	0.09	0.07	0.07	0.09	0.09	0.06	0.08	0.08	139.60
0.05	0.11	0.10	0.10	0.12	0.12	0.10	0.09	0.11	0.13	0.08	0.10	0.11	180.59
0.06	0.11	0.10	0.12	0.10	0.12	0.11	0.10	0.12	0.14	0.10	0.11	0.11	188.94
0.07	0.10	0.10	0.11	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.10	0.11	0.10	176.26
0.08	0.09	0.09	0.10	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	162.28
0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	151.73
0.10	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	146.33
0.10	0.06	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	145.37

ตารางที่ ก2 (ต่อ) ข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซอรัที่¹ไม่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

- ที่เวลา 10 – 20 วินาที
- สัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 0.59

Radial Position	Sand Y-velocity (m/s) at time											Average	Solid Mass Flux (kg/m ² s)
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
-0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.10	-1.56	-1.21	-0.47	-0.55	-1.27	-1.58	-0.60	-1.42	-1.21	0.27	-1.70	-1.03	-160.30
-0.09	-1.23	-1.14	-0.49	-0.60	-0.83	-1.22	-0.33	-1.14	-0.89	0.08	-1.24	-0.82	-134.64
-0.08	-0.69	-0.76	-0.30	-0.23	-0.35	-0.78	0.07	-0.64	-0.33	-0.04	-0.77	-0.44	-75.85
-0.07	0.23	0.13	0.10	0.57	0.32	-0.39	0.67	0.16	0.50	-0.02	0.14	0.22	39.17
-0.06	1.63	1.50	1.01	1.43	1.40	0.23	1.79	1.36	1.86	0.76	1.79	1.34	230.10
-0.05	3.37	3.14	2.58	2.90	3.13	2.02	3.80	3.27	3.95	2.63	3.90	3.15	447.60
-0.04	6.23	5.67	4.97	6.37	6.11	5.22	7.05	6.23	7.20	5.41	6.80	6.11	545.33
-0.02	11.87	12.67	10.03	12.66	11.66	11.25	12.14	11.94	12.77	9.53	11.44	11.63	687.14
0.00	15.89	17.17	15.14	16.04	16.16	16.15	15.54	16.80	16.11	12.80	15.14	15.72	1351.55
0.02	12.13	10.94	12.61	10.68	12.07	12.37	11.69	12.13	11.82	11.56	12.00	11.82	1649.71
0.04	6.82	5.13	7.45	4.64	6.10	7.29	5.96	5.81	5.85	8.29	6.75	6.37	1150.75
0.05	3.42	2.34	4.20	1.85	2.83	4.28	2.73	2.75	1.98	5.47	3.45	3.21	606.26
0.06	0.97	0.64	2.00	0.86	0.58	2.06	1.10	0.80	0.18	3.42	1.25	1.26	222.03
0.07	-0.58	-0.42	0.70	0.44	-0.22	0.56	0.13	-0.50	-0.61	2.00	-0.36	0.10	16.81
0.08	-1.23	-0.85	0.23	-0.11	-0.52	-0.45	-0.49	-1.11	-0.96	0.97	-1.40	-0.54	-81.63
0.09	-1.46	-0.95	0.09	-0.68	-0.98	-0.97	-0.93	-1.24	-0.95	0.31	-1.76	-0.87	-126.62
0.10	-1.36	-1.02	-0.10	-0.97	-1.06	-1.14	-1.21	-1.18	-0.78	-0.34	-1.69	-0.99	-143.63
0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก3 ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอร์แบบ S. Benyahia ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

- ที่เวลา 20 วินาที

- เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเซอร์กลางเท่ากับ 0.2 เมตร

- สัดส่วนปริมาตรของของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 0.2

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
0.00	6.24E+04	6.24E+04	0.78	0.78	0.0257	0.0257	0.0199	0.0199	124.77	124.77	16.03	16.03	0.00	0.00	1.20	1.20
0.05	5.66E+04	5.66E+04	0.78	0.78	0.0257	0.0257	0.0203	0.0203	115.84	115.88	14.89	14.89	0.00	0.00	1.20	1.20
0.10	4.93E+04	4.93E+04	0.78	0.78	0.0257	0.0257	0.0210	0.0210	104.18	104.26	13.39	13.40	0.00	0.00	1.20	1.20
0.15	3.88E+04	3.88E+04	0.78	0.78	0.0257	0.0257	0.0222	0.0222	86.90	87.01	11.17	11.18	0.00	0.00	1.20	1.20
0.20	2.37E+04	2.37E+04	0.78	0.78	0.0257	0.0257	0.0250	0.0250	60.18	60.30	7.73	7.75	0.00	0.00	1.20	1.20
0.25	1.66E+06	1.66E+06	0.72	0.72	0.0320	0.0320	0.0107	0.0107	1634.15	1637.08	261.77	262.16	0.15	0.15	249.55	249.35
0.30	1.55E+06	1.50E+06	0.47	0.49	0.0685	0.0685	0.0108	0.0108	1107.22	1108.31	379.43	379.65	0.30	0.29	505.97	505.76
0.35	1.43E+06	1.33E+06	0.40	0.43	0.0625	0.0624	0.0109	0.0111	916.11	919.03	286.29	286.80	0.27	0.26	455.04	454.27
0.40	1.12E+06	9.92E+05	0.41	0.46	0.0560	0.0559	0.0114	0.0116	761.31	759.57	213.10	212.16	0.23	0.23	398.07	396.89
0.45	1.10E+06	9.51E+05	0.47	0.54	0.0558	0.0557	0.0114	0.0117	839.43	829.10	234.11	230.77	0.23	0.23	396.67	395.56
0.50	1.01E+06	8.64E+05	0.56	0.64	0.0551	0.0552	0.0116	0.0119	887.17	866.99	244.47	239.34	0.23	0.23	390.84	391.71
0.55	9.17E+05	7.82E+05	0.64	0.73	0.0544	0.0547	0.0118	0.0121	913.81	885.35	248.44	242.22	0.22	0.23	384.23	387.33
0.60	8.47E+05	7.21E+05	0.71	0.81	0.0534	0.0537	0.0119	0.0123	924.72	892.56	247.01	239.55	0.22	0.22	375.49	377.80
0.65	8.11E+05	6.84E+05	0.75	0.86	0.0524	0.0526	0.0120	0.0124	927.22	893.27	242.97	235.03	0.21	0.21	365.89	367.90
0.70	8.09E+05	6.68E+05	0.74	0.88	0.0513	0.0520	0.0120	0.0125	920.73	886.60	236.32	230.34	0.21	0.21	355.52	361.59
0.75	8.06E+05	6.64E+05	0.71	0.86	0.0504	0.0514	0.0121	0.0125	890.37	870.69	224.29	223.59	0.20	0.21	346.14	355.78
0.80	7.63E+05	6.59E+05	0.67	0.83	0.0498	0.0507	0.0122	0.0125	818.01	843.19	203.82	213.67	0.20	0.20	340.66	349.14
0.85	6.74E+05	6.32E+05	0.62	0.81	0.0495	0.0503	0.0124	0.0126	692.43	798.77	171.54	200.79	0.20	0.20	337.79	345.13
0.90	5.10E+05	5.78E+05	0.55	0.79	0.0494	0.0500	0.0131	0.0128	505.35	730.89	124.92	182.66	0.20	0.20	336.67	342.19
0.95	2.65E+05	4.99E+05	0.51	0.79	0.0499	0.0506	0.0148	0.0131	285.43	650.66	71.18	164.54	0.20	0.20	341.09	348.13
1.00	3.01E+05	4.45E+05	0.51	0.77	0.0466	0.0493	0.0144	0.0134	317.66	582.61	74.04	143.61	0.18	0.20	306.17	335.02
1.05	6.11E+05	4.36E+05	0.57	0.72	0.0399	0.0450	0.0127	0.0134	606.20	542.91	120.93	122.22	0.13	0.17	228.12	289.48
1.10	8.18E+05	4.54E+05	0.66	0.69	0.0354	0.0415	0.0120	0.0133	855.58	545.13	151.27	113.25	0.10	0.15	169.34	249.87
1.15	9.43E+05	4.99E+05	0.74	0.68	0.0334	0.0394	0.0117	0.0131	1038.97	585.19	173.50	115.34	0.08	0.13	141.42	223.95
1.20	1.01E+06	5.55E+05	0.80	0.68	0.0327	0.0378	0.0116	0.0129	1171.06	637.28	191.22	120.34	0.08	0.12	130.14	202.79

ตารางที่ ก3 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซออร์ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
1.25	1.04E+06	6.07E+05	0.87	0.68	0.0324	0.0364	0.0115	0.0127	1260.62	687.57	204.17	125.14	0.07	0.11	125.99	184.57
1.30	1.03E+06	6.57E+05	0.93	0.69	0.0323	0.0355	0.0116	0.0125	1320.97	739.35	213.29	131.22	0.07	0.10	124.46	172.16
1.35	1.02E+06	7.11E+05	0.98	0.70	0.0322	0.0351	0.0116	0.0123	1364.01	796.09	219.77	139.55	0.07	0.10	123.41	166.01
1.40	1.02E+06	7.66E+05	1.03	0.71	0.0321	0.0347	0.0116	0.0122	1401.13	849.78	225.20	147.47	0.07	0.09	122.16	160.95
1.45	1.03E+06	8.15E+05	1.06	0.70	0.0321	0.0341	0.0116	0.0120	1442.50	888.13	231.27	151.28	0.07	0.09	120.91	151.53
1.50	1.05E+06	8.50E+05	1.09	0.69	0.0320	0.0333	0.0115	0.0119	1493.05	907.70	238.92	151.01	0.07	0.08	119.95	139.60
1.55	1.08E+06	8.66E+05	1.11	0.68	0.0320	0.0327	0.0115	0.0119	1551.75	911.09	248.04	149.16	0.07	0.08	119.36	131.48
1.60	1.11E+06	8.33E+05	1.13	0.67	0.0320	0.0324	0.0114	0.0120	1614.23	874.24	257.87	141.82	0.07	0.07	119.00	126.80
1.65	1.15E+06	7.07E+05	1.14	0.66	0.0319	0.0322	0.0113	0.0123	1676.13	759.39	267.63	122.43	0.07	0.07	118.67	123.66
1.70	1.21E+06	4.74E+05	1.13	0.66	0.0319	0.0323	0.0112	0.0132	1734.98	546.68	276.80	88.30	0.07	0.07	118.17	124.51
1.75	1.28E+06	3.24E+05	1.11	0.66	0.0319	0.0321	0.0111	0.0142	1789.72	404.96	285.12	65.00	0.07	0.07	117.38	121.27
1.80	1.35E+06	3.82E+05	1.08	0.69	0.0318	0.0312	0.0110	0.0138	1840.07	473.01	292.51	73.73	0.07	0.06	116.26	105.82
1.85	1.43E+06	4.60E+05	1.04	0.72	0.0317	0.0301	0.0109	0.0133	1886.49	568.37	299.04	85.68	0.07	0.05	114.86	88.26
1.90	1.51E+06	5.03E+05	1.01	0.75	0.0316	0.0295	0.0108	0.0131	1929.74	628.83	304.94	92.69	0.07	0.04	113.30	76.35
1.95	1.58E+06	5.31E+05	0.99	0.77	0.0315	0.0291	0.0108	0.0130	1969.08	672.19	310.23	97.76	0.06	0.04	111.83	69.09
2.00	1.64E+06	5.52E+05	0.97	0.79	0.0314	0.0289	0.0107	0.0129	2001.98	706.22	314.66	101.90	0.06	0.04	110.64	64.74
2.05	1.70E+06	5.73E+05	0.94	0.81	0.0314	0.0287	0.0106	0.0128	2026.82	738.92	318.03	106.11	0.06	0.04	109.79	62.03
2.10	1.77E+06	5.96E+05	0.91	0.82	0.0314	0.0286	0.0106	0.0127	2042.96	771.32	320.26	110.40	0.06	0.03	109.30	60.20
2.15	1.83E+06	6.22E+05	0.88	0.82	0.0313	0.0286	0.0105	0.0126	2051.42	800.87	321.50	114.35	0.06	0.03	109.12	58.81
2.20	1.89E+06	6.53E+05	0.85	0.82	0.0314	0.0285	0.0104	0.0125	2057.08	829.58	322.47	118.20	0.06	0.03	109.20	57.59
2.25	1.94E+06	6.89E+05	0.83	0.81	0.0314	0.0284	0.0104	0.0124	2064.37	860.89	323.81	122.44	0.06	0.03	109.48	56.58
2.30	1.97E+06	7.32E+05	0.82	0.80	0.0314	0.0284	0.0104	0.0123	2072.84	898.29	325.40	127.63	0.06	0.03	109.87	55.96
2.35	1.97E+06	7.82E+05	0.83	0.79	0.0314	0.0284	0.0104	0.0121	2076.92	940.48	326.33	133.56	0.06	0.03	110.31	55.71
2.40	1.93E+06	8.35E+05	0.84	0.78	0.0315	0.0284	0.0104	0.0120	2068.95	984.63	325.40	139.83	0.06	0.03	110.81	55.72
2.45	1.86E+06	8.90E+05	0.86	0.78	0.0315	0.0284	0.0105	0.0118	2045.19	1029.96	321.98	146.32	0.06	0.03	111.34	55.92
2.50	1.79E+06	9.46E+05	0.88	0.77	0.0315	0.0284	0.0105	0.0117	2008.21	1077.18	316.44	153.13	0.06	0.03	111.81	56.28
2.55	1.71E+06	1.00E+06	0.90	0.77	0.0315	0.0285	0.0106	0.0116	1963.41	1124.13	309.55	159.94	0.06	0.03	112.11	56.78
2.60	1.64E+06	1.06E+06	0.91	0.77	0.0315	0.0285	0.0107	0.0115	1915.87	1177.94	302.13	167.78	0.06	0.03	112.26	57.43
2.65	1.57E+06	1.11E+06	0.93	0.77	0.0315	0.0285	0.0108	0.0114	1869.58	1223.27	294.84	174.48	0.06	0.03	112.29	58.23
2.70	1.50E+06	1.17E+06	0.95	0.77	0.0315	0.0286	0.0109	0.0113	1826.61	1278.38	288.03	182.65	0.06	0.03	112.25	59.20
2.75	1.44E+06	1.22E+06	0.96	0.77	0.0315	0.0286	0.0109	0.0112	1788.08	1326.79	281.93	189.95	0.06	0.03	112.22	60.34
2.80	1.39E+06	1.27E+06	0.98	0.78	0.0315	0.0287	0.0110	0.0112	1755.40	1378.80	276.79	197.81	0.06	0.04	112.28	61.54
2.85	1.35E+06	1.31E+06	0.99	0.78	0.0315	0.0287	0.0110	0.0111	1728.83	1425.59	272.63	204.90	0.06	0.04	112.36	62.58

ตารางที่ ก3 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซออร์ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
2.90	1.31E+06	1.35E+06	1.01	0.79	0.0315	0.0288	0.0111	0.0110	1707.63	1475.63	269.25	212.40	0.06	0.04	112.32	63.39
2.95	1.29E+06	1.39E+06	1.01	0.81	0.0315	0.0288	0.0111	0.0110	1690.95	1526.64	266.48	220.00	0.06	0.04	112.04	64.04
3.00	1.27E+06	1.43E+06	1.02	0.81	0.0315	0.0289	0.0112	0.0109	1678.38	1573.09	264.29	226.95	0.06	0.04	111.63	64.63
3.05	1.26E+06	1.48E+06	1.02	0.82	0.0315	0.0289	0.0112	0.0109	1669.61	1623.18	262.68	234.43	0.06	0.04	111.18	65.22
3.10	1.25E+06	1.53E+06	1.03	0.82	0.0314	0.0289	0.0112	0.0108	1664.32	1672.06	261.64	241.75	0.06	0.04	110.77	65.79
3.15	1.25E+06	1.57E+06	1.03	0.82	0.0314	0.0289	0.0112	0.0108	1662.60	1711.69	261.20	247.74	0.06	0.04	110.44	66.34
3.20	1.25E+06	1.60E+06	1.03	0.82	0.0314	0.0290	0.0112	0.0107	1664.90	1738.78	261.48	251.91	0.06	0.04	110.26	66.85
3.25	1.26E+06	1.63E+06	1.03	0.82	0.0314	0.0290	0.0112	0.0107	1670.87	1759.44	262.41	255.12	0.06	0.04	110.23	67.28
3.30	1.27E+06	1.66E+06	1.02	0.81	0.0314	0.0290	0.0112	0.0107	1679.02	1776.31	263.67	257.76	0.06	0.04	110.16	67.63
3.35	1.29E+06	1.69E+06	1.01	0.80	0.0314	0.0290	0.0111	0.0106	1688.83	1792.58	265.09	260.30	0.06	0.04	109.87	67.93
3.40	1.32E+06	1.71E+06	1.00	0.80	0.0314	0.0291	0.0111	0.0106	1703.32	1800.62	267.14	261.64	0.06	0.04	109.39	68.21
3.45	1.35E+06	1.75E+06	0.99	0.79	0.0313	0.0291	0.0110	0.0106	1727.34	1827.37	270.64	265.72	0.06	0.04	108.83	68.50
3.50	1.40E+06	1.79E+06	0.98	0.79	0.0313	0.0291	0.0110	0.0105	1763.83	1855.37	276.03	270.02	0.06	0.04	108.19	68.84
3.55	1.45E+06	1.83E+06	0.98	0.79	0.0312	0.0291	0.0109	0.0105	1813.37	1884.78	283.23	274.56	0.06	0.04	107.14	69.24
3.60	1.50E+06	1.87E+06	0.98	0.78	0.0311	0.0292	0.0109	0.0105	1873.46	1915.63	291.77	279.35	0.06	0.04	105.59	69.69
3.65	1.53E+06	1.91E+06	1.00	0.78	0.0310	0.0292	0.0108	0.0104	1932.99	1947.63	299.97	284.33	0.06	0.04	103.64	70.16
3.70	1.54E+06	1.95E+06	1.02	0.78	0.0309	0.0292	0.0108	0.0104	1979.03	1980.32	305.65	289.43	0.06	0.04	101.10	70.63
3.75	1.56E+06	1.98E+06	1.03	0.78	0.0307	0.0293	0.0108	0.0104	2012.32	2004.67	308.97	293.32	0.06	0.04	97.96	71.09
3.80	1.59E+06	2.02E+06	1.03	0.78	0.0305	0.0293	0.0107	0.0103	2041.83	2036.92	311.61	298.37	0.05	0.04	94.70	71.52
3.85	1.64E+06	2.06E+06	1.02	0.78	0.0304	0.0293	0.0107	0.0103	2072.78	2068.31	314.58	303.29	0.05	0.04	91.63	71.94
3.90	1.70E+06	2.10E+06	1.00	0.78	0.0302	0.0294	0.0106	0.0103	2105.78	2099.25	318.02	308.15	0.05	0.04	88.85	72.35
3.95	1.76E+06	2.14E+06	0.97	0.78	0.0301	0.0294	0.0106	0.0102	2136.83	2130.68	321.27	313.06	0.05	0.04	86.28	72.78
4.00	1.84E+06	2.18E+06	0.94	0.78	0.0299	0.0294	0.0105	0.0102	2159.89	2163.74	323.29	318.18	0.05	0.04	83.75	73.20
4.05	1.90E+06	2.21E+06	0.91	0.78	0.0298	0.0294	0.0104	0.0102	2170.22	2191.32	323.26	322.43	0.05	0.04	81.06	73.59
4.10	1.95E+06	2.22E+06	0.88	0.78	0.0296	0.0294	0.0104	0.0102	2164.20	2206.18	320.58	324.72	0.04	0.04	78.10	73.90
4.15	1.98E+06	2.21E+06	0.85	0.79	0.0294	0.0294	0.0104	0.0102	2139.50	2208.16	314.96	325.01	0.04	0.04	74.86	74.10
4.20	1.98E+06	2.19E+06	0.83	0.79	0.0292	0.0294	0.0104	0.0102	2095.70	2203.34	306.47	324.20	0.04	0.04	71.42	74.21
4.25	1.96E+06	2.17E+06	0.81	0.80	0.0291	0.0294	0.0104	0.0102	2035.06	2197.06	295.62	323.11	0.04	0.04	67.94	74.23
4.30	1.91E+06	2.14E+06	0.79	0.80	0.0289	0.0294	0.0104	0.0102	1962.76	2179.27	283.32	320.31	0.04	0.04	64.62	74.25
4.35	1.84E+06	2.13E+06	0.78	0.80	0.0287	0.0294	0.0105	0.0102	1886.47	2175.80	270.80	319.69	0.04	0.04	61.66	74.36
4.40	1.77E+06	2.13E+06	0.77	0.81	0.0286	0.0294	0.0106	0.0102	1812.97	2178.79	259.07	320.16	0.03	0.04	59.16	74.68
4.45	1.71E+06	2.15E+06	0.77	0.81	0.0285	0.0294	0.0106	0.0102	1745.18	2196.11	248.45	322.97	0.03	0.04	57.07	75.26
4.50	1.64E+06	2.18E+06	0.76	0.80	0.0284	0.0295	0.0107	0.0102	1683.48	2218.45	238.92	326.79	0.03	0.04	55.30	76.12

ตารางที่ ก3 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซออร์ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
4.55	1.58E+06	2.23E+06	0.76	0.80	0.0283	0.0295	0.0108	0.0102	1627.94	2254.54	230.43	332.93	0.03	0.04	53.79	77.26
4.60	1.53E+06	2.29E+06	0.76	0.80	0.0282	0.0296	0.0108	0.0101	1579.19	2295.28	223.05	340.00	0.03	0.05	52.54	78.60
4.65	1.49E+06	2.35E+06	0.75	0.79	0.0282	0.0297	0.0109	0.0101	1538.20	2331.64	216.90	346.51	0.03	0.05	51.55	79.95
4.70	1.46E+06	2.42E+06	0.75	0.78	0.0282	0.0298	0.0109	0.0100	1506.02	2374.13	212.11	353.81	0.03	0.05	50.84	81.10
4.75	1.43E+06	2.47E+06	0.75	0.78	0.0281	0.0299	0.0109	0.0100	1483.57	2402.49	208.79	358.70	0.03	0.05	50.39	81.87
4.80	1.42E+06	2.50E+06	0.75	0.77	0.0281	0.0299	0.0109	0.0100	1471.23	2420.05	206.99	361.54	0.03	0.05	50.20	82.15
4.85	1.42E+06	2.50E+06	0.74	0.77	0.0281	0.0299	0.0109	0.0100	1468.62	2418.63	206.63	361.07	0.03	0.05	50.25	81.91
4.90	1.43E+06	2.49E+06	0.74	0.78	0.0281	0.0298	0.0109	0.0100	1474.52	2412.39	207.52	359.48	0.03	0.05	50.47	81.18
4.95	1.45E+06	2.45E+06	0.74	0.78	0.0282	0.0297	0.0109	0.0100	1486.77	2382.63	209.34	354.14	0.03	0.05	50.78	80.11
5.00	1.47E+06	2.41E+06	0.74	0.78	0.0282	0.0296	0.0109	0.0100	1502.97	2351.52	211.72	348.56	0.03	0.05	51.09	78.90
5.05	1.49E+06	2.36E+06	0.74	0.78	0.0282	0.0296	0.0109	0.0101	1520.96	2309.29	214.35	341.44	0.03	0.04	51.37	77.74
5.10	1.51E+06	2.32E+06	0.74	0.77	0.0282	0.0295	0.0108	0.0101	1539.00	2271.44	216.96	335.10	0.03	0.04	51.58	76.68
5.15	1.54E+06	2.28E+06	0.74	0.77	0.0282	0.0294	0.0108	0.0101	1555.49	2231.09	219.35	328.52	0.03	0.04	51.75	75.73
5.20	1.55E+06	2.24E+06	0.74	0.77	0.0282	0.0294	0.0108	0.0102	1568.03	2190.75	221.16	322.03	0.03	0.04	51.87	74.85
5.25	1.56E+06	2.20E+06	0.74	0.76	0.0282	0.0294	0.0108	0.0102	1573.66	2151.65	222.00	315.79	0.03	0.04	51.99	74.04
5.30	1.56E+06	2.16E+06	0.74	0.76	0.0282	0.0293	0.0108	0.0102	1571.51	2113.44	221.74	309.75	0.03	0.04	52.10	73.29
5.35	1.55E+06	2.12E+06	0.73	0.76	0.0282	0.0293	0.0108	0.0103	1563.66	2075.53	220.67	303.79	0.03	0.04	52.20	72.58
5.40	1.54E+06	2.08E+06	0.73	0.76	0.0282	0.0292	0.0108	0.0103	1553.37	2037.43	219.25	297.85	0.03	0.04	52.30	71.90
5.45	1.54E+06	2.05E+06	0.73	0.75	0.0282	0.0292	0.0108	0.0103	1543.79	2007.12	217.94	293.08	0.03	0.04	52.40	71.25
5.50	1.53E+06	2.01E+06	0.73	0.75	0.0282	0.0292	0.0108	0.0103	1537.62	1968.90	217.13	287.19	0.03	0.04	52.55	70.64
5.55	1.53E+06	1.98E+06	0.73	0.75	0.0283	0.0291	0.0108	0.0104	1535.36	1940.20	216.89	282.72	0.03	0.04	52.76	70.07
5.60	1.53E+06	1.94E+06	0.73	0.75	0.0283	0.0291	0.0108	0.0104	1533.49	1905.09	216.72	277.35	0.03	0.04	53.02	69.55
5.65	1.53E+06	1.91E+06	0.72	0.75	0.0283	0.0291	0.0108	0.0104	1527.03	1879.45	215.90	273.41	0.03	0.04	53.27	69.07
5.70	1.51E+06	1.88E+06	0.72	0.75	0.0283	0.0291	0.0108	0.0105	1514.21	1854.72	214.18	269.61	0.03	0.04	53.50	68.62
5.75	1.49E+06	1.84E+06	0.72	0.75	0.0283	0.0291	0.0109	0.0105	1497.05	1822.54	211.82	264.76	0.03	0.04	53.70	68.19
5.80	1.47E+06	1.81E+06	0.72	0.75	0.0283	0.0290	0.0109	0.0105	1479.10	1798.92	209.35	261.16	0.03	0.04	53.88	67.77
5.85	1.46E+06	1.77E+06	0.72	0.75	0.0283	0.0290	0.0109	0.0106	1463.69	1766.54	207.24	256.29	0.03	0.04	54.07	67.35
5.90	1.45E+06	1.73E+06	0.72	0.75	0.0283	0.0290	0.0109	0.0106	1452.60	1732.94	205.75	251.24	0.03	0.04	54.31	66.90
5.95	1.44E+06	1.69E+06	0.72	0.75	0.0283	0.0290	0.0109	0.0106	1445.06	1698.00	204.79	245.97	0.03	0.04	54.62	66.37
6.00	1.43E+06	1.66E+06	0.72	0.74	0.0284	0.0289	0.0109	0.0107	1438.68	1670.41	204.01	241.71	0.03	0.04	54.97	65.72
6.05	1.42E+06	1.62E+06	0.72	0.74	0.0284	0.0289	0.0109	0.0107	1431.57	1634.07	203.12	236.13	0.03	0.04	55.30	64.92
6.10	1.41E+06	1.58E+06	0.72	0.74	0.0284	0.0289	0.0110	0.0108	1423.45	1597.76	202.07	230.49	0.03	0.04	55.58	63.97
6.15	1.40E+06	1.54E+06	0.72	0.74	0.0284	0.0288	0.0110	0.0108	1414.73	1561.49	200.90	224.83	0.03	0.04	55.79	62.92

ตารางที่ ก3 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซออร์ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
6.20	1.39E+06	1.51E+06	0.72	0.74	0.0284	0.0287	0.0110	0.0108	1405.42	1533.60	199.63	220.40	0.03	0.04	55.91	61.88
6.25	1.37E+06	1.47E+06	0.72	0.74	0.0284	0.0287	0.0110	0.0109	1395.01	1497.19	198.16	214.81	0.03	0.03	55.95	60.97
6.30	1.36E+06	1.45E+06	0.72	0.73	0.0284	0.0287	0.0110	0.0109	1382.97	1477.36	196.44	211.69	0.03	0.03	55.92	60.25
6.35	1.34E+06	1.42E+06	0.72	0.73	0.0284	0.0286	0.0111	0.0109	1369.08	1448.95	194.45	207.43	0.03	0.03	55.86	59.72
6.40	1.32E+06	1.41E+06	0.73	0.73	0.0284	0.0286	0.0111	0.0110	1353.39	1437.59	192.19	205.66	0.03	0.03	55.77	59.30
6.45	1.29E+06	1.39E+06	0.73	0.73	0.0284	0.0286	0.0111	0.0110	1335.92	1418.11	189.68	202.72	0.03	0.03	55.67	58.86
6.50	1.27E+06	1.37E+06	0.73	0.73	0.0284	0.0286	0.0112	0.0110	1316.58	1398.89	186.91	199.74	0.03	0.03	55.59	58.26
6.55	1.24E+06	1.34E+06	0.73	0.73	0.0284	0.0285	0.0112	0.0111	1295.43	1371.57	183.88	195.52	0.03	0.03	55.51	57.42
6.60	1.22E+06	1.31E+06	0.73	0.72	0.0284	0.0285	0.0112	0.0111	1272.86	1344.63	180.66	191.28	0.03	0.03	55.44	56.36
6.65	1.19E+06	1.27E+06	0.73	0.72	0.0284	0.0284	0.0113	0.0112	1249.38	1309.40	177.31	185.84	0.03	0.03	55.41	55.16
6.70	1.16E+06	1.23E+06	0.73	0.72	0.0284	0.0283	0.0113	0.0112	1225.46	1274.08	173.93	180.42	0.03	0.03	55.44	53.96
6.75	1.13E+06	1.18E+06	0.73	0.72	0.0284	0.0283	0.0114	0.0113	1201.51	1230.00	170.56	173.82	0.03	0.03	55.55	52.84
6.80	1.11E+06	1.14E+06	0.73	0.72	0.0284	0.0282	0.0114	0.0114	1177.74	1194.23	167.25	168.48	0.03	0.03	55.77	51.90
6.85	1.08E+06	1.10E+06	0.73	0.72	0.0284	0.0282	0.0115	0.0114	1154.22	1158.30	164.00	163.19	0.03	0.03	56.08	51.15
6.90	1.05E+06	1.06E+06	0.73	0.72	0.0284	0.0282	0.0115	0.0115	1130.85	1122.34	160.79	157.98	0.03	0.03	56.48	50.61
6.95	1.03E+06	1.02E+06	0.73	0.72	0.0285	0.0281	0.0116	0.0116	1107.38	1086.42	157.57	152.82	0.03	0.03	56.91	50.27
7.00	9.99E+05	9.85E+05	0.73	0.72	0.0285	0.0281	0.0116	0.0116	1083.63	1054.84	154.30	148.33	0.03	0.03	57.32	50.07
7.05	9.71E+05	9.53E+05	0.73	0.72	0.0285	0.0281	0.0117	0.0117	1059.69	1026.58	150.97	144.33	0.03	0.03	57.63	49.97
7.10	9.44E+05	9.27E+05	0.73	0.72	0.0285	0.0281	0.0117	0.0118	1036.25	1003.08	147.70	141.02	0.03	0.03	57.89	49.96
7.15	9.19E+05	9.08E+05	0.73	0.72	0.0285	0.0281	0.0118	0.0118	1013.75	985.56	144.56	138.57	0.03	0.03	58.15	50.02
7.20	8.94E+05	8.97E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0281	0.0118	0.0118	991.87	974.98	141.51	137.12	0.03	0.03	58.39	50.20
7.25	8.70E+05	8.94E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0281	0.0119	0.0118	970.06	971.74	138.44	136.75	0.03	0.03	58.55	50.54
7.30	8.47E+05	8.99E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0282	0.0119	0.0118	948.02	974.94	135.31	137.35	0.03	0.03	58.60	51.10
7.35	8.23E+05	9.09E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0282	0.0120	0.0118	925.82	981.91	132.14	138.52	0.03	0.03	58.55	51.79
7.40	8.00E+05	9.19E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0283	0.0121	0.0118	903.39	989.26	128.91	139.75	0.03	0.03	58.41	52.47
7.45	7.76E+05	9.27E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0283	0.0121	0.0118	880.17	994.64	125.56	140.63	0.03	0.03	58.20	52.93
7.50	7.50E+05	9.31E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0283	0.0122	0.0118	855.09	997.74	121.92	141.10	0.03	0.03	57.88	53.07
7.55	7.21E+05	9.34E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0283	0.0123	0.0117	827.03	999.56	117.83	141.30	0.03	0.03	57.43	52.94
7.60	6.89E+05	9.35E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0283	0.0124	0.0117	795.16	1000.76	113.17	141.37	0.03	0.03	56.84	52.64
7.65	6.52E+05	9.33E+05	0.72	0.71	0.0284	0.0282	0.0125	0.0117	759.22	1000.86	107.92	141.27	0.03	0.03	56.14	52.26
7.70	6.12E+05	9.30E+05	0.72	0.71	0.0284	0.0282	0.0126	0.0118	719.44	998.86	102.12	140.88	0.03	0.03	55.36	51.85
7.75	5.68E+05	9.23E+05	0.72	0.71	0.0283	0.0282	0.0128	0.0118	676.24	993.92	95.85	140.09	0.03	0.03	54.52	51.49
7.80	5.21E+05	9.14E+05	0.72	0.71	0.0283	0.0282	0.0130	0.0118	629.99	985.90	89.16	138.92	0.03	0.03	53.68	51.30

ตารางที่ ก3 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซออร์ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
7.85	4.71E+05	9.05E+05	0.72	0.71	0.0283	0.0282	0.0133	0.0118	580.88	977.35	82.09	137.73	0.03	0.03	52.91	51.38
7.90	4.20E+05	9.04E+05	0.72	0.71	0.0282	0.0282	0.0135	0.0118	529.11	974.46	74.69	137.43	0.03	0.03	52.31	51.79
7.95	3.67E+05	9.17E+05	0.72	0.71	0.0282	0.0282	0.0139	0.0118	474.96	983.84	67.01	138.95	0.03	0.03	51.96	52.59
8.00	3.14E+05	9.48E+05	0.72	0.70	0.0282	0.0283	0.0143	0.0117	418.85	1008.80	59.08	142.79	0.03	0.03	51.90	53.82
8.05	2.61E+05	9.96E+05	0.72	0.70	0.0282	0.0284	0.0148	0.0116	361.26	1047.82	50.98	148.73	0.03	0.03	52.06	55.34
8.10	2.13E+05	1.05E+06	0.72	0.70	0.0282	0.0285	0.0154	0.0115	306.53	1092.02	43.28	155.43	0.03	0.03	52.36	56.87
8.15	1.85E+05	1.11E+06	0.72	0.70	0.0283	0.0285	0.0158	0.0114	273.78	1142.63	38.67	162.98	0.03	0.03	52.67	58.04
8.20	1.74E+05	1.15E+06	0.71	0.70	0.0283	0.0286	0.0160	0.0113	259.87	1178.54	36.72	168.28	0.03	0.03	52.85	58.68
8.25	1.61E+05	1.18E+06	0.71	0.70	0.0283	0.0286	0.0163	0.0113	244.59	1208.40	34.56	172.57	0.03	0.03	52.90	58.79
8.30	1.46E+05	1.20E+06	0.71	0.71	0.0283	0.0285	0.0166	0.0113	226.53	1231.51	32.01	175.78	0.03	0.03	52.85	58.53
8.35	1.29E+05	1.21E+06	0.71	0.71	0.0283	0.0285	0.0170	0.0112	205.21	1246.83	28.99	177.83	0.03	0.03	52.73	58.10
8.40	1.10E+05	1.21E+06	0.71	0.72	0.0282	0.0285	0.0176	0.0112	180.59	1253.53	25.51	178.63	0.03	0.03	52.52	57.64
8.45	9.09E+04	1.21E+06	0.71	0.72	0.0282	0.0285	0.0183	0.0112	155.83	1259.64	22.00	179.36	0.03	0.03	52.19	57.22
8.50	8.12E+04	1.22E+06	0.71	0.73	0.0282	0.0285	0.0188	0.0112	142.88	1273.73	20.16	181.25	0.03	0.03	52.00	56.86
8.55	7.37E+04	1.22E+06	0.71	0.73	0.0282	0.0284	0.0192	0.0112	132.52	1278.80	18.71	181.86	0.03	0.03	52.18	56.51
8.60	5.35E+04	1.21E+06	0.71	0.74	0.0282	0.0284	0.0206	0.0112	103.80	1275.16	14.64	181.23	0.03	0.03	51.75	56.14
8.65	3.69E+04	1.20E+06	0.71	0.74	0.0282	0.0284	0.0225	0.0113	78.62	1271.72	11.07	180.61	0.03	0.03	50.84	55.69
8.70	5.58E+04	1.18E+06	0.71	0.74	0.0282	0.0284	0.0204	0.0113	107.38	1259.59	15.12	178.73	0.03	0.03	50.88	55.15
8.75	1.07E+05	1.15E+06	0.71	0.75	0.0282	0.0284	0.0177	0.0113	177.72	1238.14	25.06	175.52	0.03	0.03	51.57	54.59
8.80	1.65E+05	1.12E+06	0.71	0.75	0.0282	0.0283	0.0162	0.0114	248.31	1215.48	35.06	172.18	0.03	0.03	52.19	54.12
8.85	2.15E+05	1.09E+06	0.71	0.75	0.0283	0.0283	0.0154	0.0114	307.30	1191.27	43.41	168.65	0.03	0.03	52.51	53.76
8.90	2.54E+05	1.06E+06	0.72	0.76	0.0282	0.0283	0.0149	0.0115	351.82	1165.91	49.69	164.98	0.03	0.03	52.37	53.48
8.95	2.80E+05	1.03E+06	0.72	0.76	0.0282	0.0283	0.0146	0.0116	381.58	1140.17	53.84	161.27	0.03	0.03	51.84	53.26
9.00	2.93E+05	1.01E+06	0.72	0.76	0.0282	0.0283	0.0145	0.0116	396.72	1123.84	55.88	158.91	0.03	0.03	50.90	53.11
9.05	2.93E+05	9.80E+05	0.72	0.76	0.0281	0.0283	0.0145	0.0117	397.08	1098.93	55.79	155.38	0.03	0.03	49.54	53.11
9.10	2.80E+05	9.55E+05	0.72	0.77	0.0280	0.0283	0.0146	0.0117	383.86	1079.71	53.78	152.70	0.03	0.03	47.95	53.30
9.15	2.60E+05	9.32E+05	0.72	0.77	0.0279	0.0283	0.0148	0.0118	361.19	1062.00	50.48	150.30	0.03	0.03	46.50	53.74
9.20	2.35E+05	9.10E+05	0.72	0.77	0.0279	0.0283	0.0151	0.0118	332.94	1043.89	46.44	147.89	0.03	0.03	45.35	54.38
9.25	2.07E+05	8.85E+05	0.72	0.77	0.0279	0.0284	0.0155	0.0119	300.53	1022.86	41.85	145.07	0.03	0.03	44.44	55.05
9.30	1.76E+05	8.58E+05	0.72	0.78	0.0278	0.0284	0.0160	0.0119	264.48	997.61	36.79	141.62	0.02	0.03	43.77	55.59
9.35	1.43E+05	8.26E+05	0.72	0.78	0.0278	0.0284	0.0167	0.0120	224.67	968.51	31.23	137.59	0.02	0.03	43.36	55.96
9.40	1.08E+05	7.93E+05	0.72	0.78	0.0278	0.0284	0.0177	0.0121	180.38	936.68	25.06	133.13	0.02	0.03	43.17	56.23
9.45	7.15E+04	7.57E+05	0.72	0.78	0.0278	0.0284	0.0193	0.0122	130.63	903.01	18.16	128.40	0.02	0.03	43.29	56.43

ตารางที่ ก3 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซออร์ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
9.50	3.27E+04	7.20E+05	0.71	0.78	0.0278	0.0284	0.0231	0.0123	72.22	867.83	10.05	123.43	0.02	0.03	43.95	56.56
9.55	2.72E+04	6.83E+05	0.71	0.78	0.0279	0.0284	0.0242	0.0124	62.92	831.16	8.78	118.23	0.03	0.03	45.33	56.55
9.60	6.83E+04	6.45E+05	0.70	0.78	0.0281	0.0284	0.0195	0.0125	124.79	793.24	17.53	112.80	0.03	0.03	49.01	56.35
9.65	1.24E+05	6.08E+05	0.70	0.78	0.0283	0.0284	0.0172	0.0127	196.32	754.72	27.81	107.25	0.03	0.03	53.45	55.93
9.70	1.65E+05	5.72E+05	0.70	0.78	0.0283	0.0284	0.0162	0.0128	245.41	716.63	34.66	101.73	0.03	0.03	51.80	55.32
9.75	1.84E+05	5.38E+05	0.71	0.77	0.0280	0.0284	0.0159	0.0129	269.47	680.12	37.67	96.43	0.03	0.03	46.36	54.65
9.80	2.01E+05	5.07E+05	0.71	0.77	0.0278	0.0283	0.0156	0.0131	290.67	645.93	40.39	91.48	0.02	0.03	43.08	54.03
9.85	2.13E+05	4.78E+05	0.71	0.77	0.0277	0.0283	0.0154	0.0132	304.94	613.98	42.24	86.88	0.02	0.03	41.23	53.53
9.90	2.14E+05	4.50E+05	0.71	0.76	0.0277	0.0283	0.0154	0.0134	306.04	583.53	42.35	82.51	0.02	0.03	40.78	53.12
9.95	2.07E+05	4.23E+05	0.71	0.76	0.0278	0.0283	0.0155	0.0135	297.33	553.81	41.33	78.25	0.02	0.03	43.27	52.71
10.00	1.89E+05	3.97E+05	0.70	0.76	0.0280	0.0282	0.0158	0.0137	274.99	524.47	38.54	74.05	0.03	0.03	47.95	52.22
10.05	1.51E+05	3.72E+05	0.70	0.75	0.0281	0.0282	0.0165	0.0138	229.55	495.82	32.23	69.93	0.03	0.03	49.12	51.63
10.10	1.32E+05	3.48E+05	0.70	0.75	0.0280	0.0282	0.0170	0.0140	207.64	468.56	29.05	66.00	0.03	0.03	47.17	50.95
10.15	1.47E+05	3.26E+05	0.71	0.75	0.0279	0.0281	0.0166	0.0142	226.17	443.53	31.59	62.40	0.03	0.03	46.24	50.23
10.20	1.63E+05	3.06E+05	0.71	0.75	0.0279	0.0281	0.0162	0.0144	245.95	421.24	34.34	59.19	0.03	0.03	45.90	49.55
10.25	1.70E+05	2.89E+05	0.71	0.75	0.0279	0.0281	0.0161	0.0145	254.58	401.61	35.53	56.37	0.03	0.03	45.70	48.96
10.30	1.69E+05	2.74E+05	0.71	0.74	0.0279	0.0281	0.0161	0.0147	253.44	384.13	35.35	53.87	0.03	0.03	45.48	48.49
10.35	1.61E+05	2.60E+05	0.71	0.74	0.0279	0.0280	0.0163	0.0148	243.99	368.37	34.04	51.64	0.03	0.03	45.48	48.21
10.40	1.47E+05	2.48E+05	0.71	0.74	0.0279	0.0280	0.0166	0.0149	227.49	354.04	31.77	49.63	0.03	0.03	46.05	48.25
10.45	1.30E+05	2.38E+05	0.71	0.74	0.0280	0.0281	0.0170	0.0151	205.70	340.67	28.76	47.80	0.03	0.03	46.79	48.79
10.50	1.12E+05	2.28E+05	0.71	0.73	0.0280	0.0281	0.0175	0.0152	184.16	327.44	25.76	46.05	0.03	0.03	47.14	50.13
10.55	1.22E+05	2.18E+05	0.71	0.72	0.0280	0.0283	0.0172	0.0153	196.58	314.70	27.52	44.45	0.03	0.03	47.47	52.56
10.60	1.57E+05	2.12E+05	0.71	0.72	0.0281	0.0284	0.0164	0.0154	240.95	304.82	33.80	43.24	0.03	0.03	48.66	55.04
10.65	1.97E+05	2.11E+05	0.72	0.71	0.0282	0.0284	0.0156	0.0154	288.43	303.08	40.64	43.03	0.03	0.03	51.09	55.53
10.70	2.43E+05	2.21E+05	0.72	0.71	0.0283	0.0284	0.0150	0.0153	340.61	314.57	48.20	44.64	0.03	0.03	53.63	55.23
10.75	2.98E+05	2.38E+05	0.72	0.71	0.0284	0.0284	0.0144	0.0151	401.43	333.97	57.02	47.44	0.03	0.03	55.81	55.64
10.80	3.62E+05	2.61E+05	0.72	0.71	0.0285	0.0284	0.0139	0.0148	469.97	358.89	66.96	50.99	0.03	0.03	57.64	55.88
10.85	4.19E+05	2.84E+05	0.73	0.71	0.0285	0.0284	0.0135	0.0146	531.17	383.50	75.73	54.45	0.03	0.03	57.91	55.50
10.90	4.56E+05	2.96E+05	0.73	0.71	0.0284	0.0283	0.0133	0.0145	572.91	397.57	81.48	56.34	0.03	0.03	56.37	54.50
10.95	4.73E+05	3.01E+05	0.74	0.72	0.0283	0.0283	0.0132	0.0144	594.46	403.44	84.21	57.01	0.03	0.03	53.99	52.92
11.00	4.74E+05	3.12E+05	0.75	0.72	0.0282	0.0282	0.0132	0.0143	599.22	416.19	84.54	58.61	0.03	0.03	51.65	50.92
11.05	4.61E+05	3.32E+05	0.75	0.72	0.0281	0.0281	0.0133	0.0141	589.38	439.40	82.88	61.68	0.03	0.03	49.68	49.15
11.10	4.39E+05	3.53E+05	0.76	0.73	0.0281	0.0280	0.0134	0.0140	568.22	462.69	79.70	64.87	0.03	0.03	48.16	48.40

ตารางที่ ก3 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซออร์ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
11.15	4.26E+05	3.74E+05	0.76	0.73	0.0280	0.0281	0.0135	0.0138	555.71	484.88	77.79	68.04	0.03	0.03	47.05	48.83
11.20	4.26E+05	3.97E+05	0.76	0.73	0.0280	0.0281	0.0135	0.0137	555.32	508.07	77.63	71.45	0.03	0.03	46.32	50.01
11.25	4.24E+05	4.25E+05	0.76	0.73	0.0279	0.0282	0.0135	0.0135	553.41	536.58	77.32	75.57	0.03	0.03	46.09	50.82
11.30	4.22E+05	4.65E+05	0.76	0.73	0.0280	0.0282	0.0135	0.0133	550.56	577.77	76.95	81.36	0.03	0.03	46.38	50.79
11.35	4.20E+05	5.18E+05	0.76	0.73	0.0280	0.0281	0.0135	0.0130	547.39	631.64	76.58	88.87	0.03	0.03	47.04	50.44
11.40	4.16E+05	5.73E+05	0.75	0.73	0.0280	0.0281	0.0136	0.0128	541.75	687.11	75.86	96.59	0.03	0.03	47.66	49.94
11.45	4.07E+05	6.20E+05	0.75	0.73	0.0280	0.0281	0.0136	0.0126	531.00	734.57	74.37	103.14	0.03	0.03	47.80	49.21
11.50	4.01E+05	6.54E+05	0.75	0.74	0.0280	0.0280	0.0137	0.0125	523.47	771.17	73.29	108.12	0.03	0.03	47.62	48.33
11.55	4.09E+05	6.78E+05	0.74	0.74	0.0280	0.0280	0.0136	0.0124	529.85	797.97	74.17	111.72	0.03	0.03	47.53	47.40
11.60	4.25E+05	6.93E+05	0.74	0.75	0.0280	0.0280	0.0135	0.0124	546.12	817.43	76.44	114.29	0.03	0.03	47.44	46.51
11.65	4.46E+05	7.02E+05	0.74	0.76	0.0280	0.0279	0.0134	0.0123	566.05	832.03	79.19	116.21	0.03	0.03	47.15	45.76
11.70	4.68E+05	7.07E+05	0.74	0.77	0.0280	0.0279	0.0133	0.0123	589.00	843.28	82.34	117.70	0.03	0.03	46.72	45.20
11.75	4.94E+05	7.09E+05	0.74	0.77	0.0279	0.0279	0.0131	0.0123	614.92	852.02	85.91	118.88	0.03	0.03	46.33	44.90
11.80	5.23E+05	7.11E+05	0.74	0.78	0.0279	0.0279	0.0130	0.0123	644.02	859.57	89.95	119.94	0.03	0.03	46.16	44.88
11.85	5.53E+05	7.15E+05	0.74	0.79	0.0279	0.0279	0.0129	0.0123	675.00	867.41	94.31	121.11	0.03	0.03	46.40	45.19
11.90	5.79E+05	7.22E+05	0.74	0.79	0.0280	0.0280	0.0128	0.0123	701.53	876.68	98.13	122.55	0.03	0.03	47.03	45.86
11.95	5.95E+05	7.32E+05	0.74	0.79	0.0280	0.0280	0.0127	0.0123	716.75	887.16	100.38	124.21	0.03	0.03	47.69	46.81
12.00	6.02E+05	7.42E+05	0.74	0.79	0.0280	0.0280	0.0127	0.0122	722.31	895.68	101.20	125.61	0.03	0.03	47.88	47.82
12.05	6.09E+05	7.47E+05	0.74	0.78	0.0280	0.0281	0.0127	0.0122	729.04	898.39	102.08	126.17	0.03	0.03	47.59	48.60
12.10	6.26E+05	7.46E+05	0.74	0.78	0.0280	0.0281	0.0126	0.0122	745.98	893.91	104.43	125.65	0.03	0.03	47.51	48.88
12.15	6.46E+05	7.39E+05	0.74	0.78	0.0280	0.0281	0.0125	0.0122	767.15	884.99	107.47	124.42	0.03	0.03	47.89	48.58
12.20	6.60E+05	7.31E+05	0.74	0.78	0.0280	0.0281	0.0125	0.0123	782.00	876.31	109.57	123.16	0.03	0.03	48.02	47.95
12.25	6.70E+05	7.24E+05	0.75	0.78	0.0280	0.0281	0.0124	0.0123	792.69	871.28	111.02	122.41	0.03	0.03	47.73	47.31
12.30	6.78E+05	7.21E+05	0.75	0.78	0.0280	0.0281	0.0124	0.0123	802.71	871.81	112.40	122.44	0.03	0.03	47.46	46.95
12.35	6.81E+05	7.20E+05	0.75	0.79	0.0280	0.0281	0.0124	0.0123	807.86	874.49	113.12	122.81	0.03	0.03	47.19	47.17
12.40	6.74E+05	7.15E+05	0.76	0.79	0.0280	0.0281	0.0124	0.0123	804.47	871.78	112.62	122.49	0.03	0.03	46.72	47.82
12.45	6.57E+05	7.02E+05	0.76	0.79	0.0280	0.0281	0.0125	0.0123	792.56	857.35	110.92	120.49	0.03	0.03	46.25	48.28
12.50	6.34E+05	6.78E+05	0.77	0.79	0.0280	0.0281	0.0126	0.0124	773.41	832.23	108.24	116.94	0.03	0.03	46.23	48.31
12.55	6.08E+05	6.49E+05	0.77	0.79	0.0280	0.0281	0.0127	0.0125	747.45	800.83	104.66	112.49	0.03	0.03	46.71	48.23
12.60	5.78E+05	6.15E+05	0.76	0.78	0.0280	0.0281	0.0128	0.0126	715.23	764.39	100.21	107.32	0.03	0.03	47.31	48.07
12.65	5.45E+05	5.79E+05	0.76	0.78	0.0280	0.0281	0.0129	0.0128	678.15	724.67	95.04	101.68	0.03	0.03	47.69	47.86
12.70	5.11E+05	5.43E+05	0.75	0.77	0.0280	0.0280	0.0131	0.0129	640.27	684.18	89.71	95.94	0.03	0.03	47.64	47.60
12.75	4.78E+05	5.11E+05	0.75	0.76	0.0280	0.0280	0.0132	0.0131	605.49	647.01	84.67	90.65	0.03	0.03	46.37	47.22

ตารางที่ ก3 (ต่อ) ตัวอย่างข้อมูลจากการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของไรเซออร์ที่มีการคำนวณการถ่ายโอนความร้อน

Height (m)	Re		Pr		k		f		Nu		h		vf_sand		density	
	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall	L-Wall	R-Wall
12.80	4.51E+05	4.88E+05	0.75	0.76	0.0279	0.0280	0.0134	0.0132	578.27	620.01	80.63	86.79	0.03	0.03	44.37	46.68
12.85	4.36E+05	4.70E+05	0.75	0.75	0.0278	0.0280	0.0134	0.0133	563.36	599.14	78.43	83.77	0.02	0.03	43.44	46.02
12.90	4.29E+05	4.51E+05	0.75	0.75	0.0278	0.0279	0.0135	0.0134	555.91	577.41	77.38	80.64	0.02	0.03	43.50	45.38
12.95	4.23E+05	4.32E+05	0.75	0.75	0.0278	0.0279	0.0135	0.0135	548.12	556.00	76.30	77.58	0.02	0.03	43.65	44.88
13.00	4.16E+05	4.14E+05	0.75	0.74	0.0278	0.0279	0.0136	0.0136	538.68	535.03	74.97	74.60	0.02	0.03	43.65	44.54
13.05	4.06E+05	3.95E+05	0.74	0.74	0.0278	0.0279	0.0136	0.0137	527.03	514.01	73.31	71.63	0.02	0.03	43.37	44.26
13.10	3.94E+05	3.76E+05	0.74	0.74	0.0278	0.0279	0.0137	0.0138	513.44	492.93	71.37	68.65	0.02	0.03	42.85	44.00
13.15	3.82E+05	3.57E+05	0.74	0.74	0.0278	0.0278	0.0138	0.0140	500.08	472.17	69.46	65.72	0.02	0.02	42.39	43.75
13.20	3.70E+05	3.39E+05	0.74	0.74	0.0278	0.0278	0.0139	0.0141	485.87	451.96	67.44	62.87	0.02	0.02	41.97	43.50
13.25	3.53E+05	3.21E+05	0.74	0.73	0.0277	0.0278	0.0140	0.0142	467.53	432.17	64.82	60.08	0.02	0.02	41.24	43.19
13.30	3.34E+05	3.03E+05	0.73	0.73	0.0277	0.0278	0.0141	0.0144	446.44	412.56	61.84	57.31	0.02	0.02	40.40	42.78
13.35	3.17E+05	2.86E+05	0.73	0.73	0.0277	0.0278	0.0143	0.0146	427.01	392.91	59.12	54.54	0.02	0.02	39.98	42.28
13.40	3.02E+05	2.68E+05	0.73	0.73	0.0277	0.0277	0.0144	0.0147	410.30	373.02	56.81	51.72	0.02	0.02	40.00	41.68
13.45	2.88E+05	2.50E+05	0.73	0.73	0.0277	0.0277	0.0145	0.0149	395.03	352.71	54.71	48.84	0.02	0.02	40.09	40.95
13.50	2.75E+05	2.31E+05	0.73	0.73	0.0277	0.0277	0.0147	0.0152	380.45	331.64	52.70	45.85	0.02	0.02	40.06	40.00
13.55	2.62E+05	2.11E+05	0.73	0.73	0.0277	0.0276	0.0148	0.0154	365.56	308.55	50.63	42.57	0.02	0.02	39.82	38.70
13.60	2.46E+05	1.88E+05	0.73	0.73	0.0277	0.0275	0.0150	0.0158	347.29	281.66	48.09	38.75	0.02	0.02	39.08	36.94
13.65	2.24E+05	1.60E+05	0.73	0.73	0.0277	0.0274	0.0153	0.0163	321.49	248.54	44.46	34.06	0.02	0.02	37.59	34.51
13.70	1.87E+05	1.35E+05	0.73	0.73	0.0276	0.0273	0.0158	0.0169	278.95	217.88	38.43	29.69	0.02	0.02	34.64	31.00
13.75	2.15E+05	1.82E+05	0.73	0.74	0.0273	0.0271	0.0154	0.0159	314.05	275.78	42.80	37.33	0.02	0.02	28.68	26.94
13.80	4.88E+05	4.98E+05	0.72	0.70	0.0279	0.0283	0.0132	0.0131	594.92	596.61	82.94	84.41	0.02	0.02	35.59	40.50
13.85	1.76E+06	1.93E+06	0.71	0.70	0.0282	0.0286	0.0106	0.0104	1698.85	1814.77	239.86	259.46	0.03	0.03	47.10	53.29
13.90	4.76E+06	4.97E+06	0.77	0.75	0.0320	0.0321	0.0090	0.0090	4124.21	4191.24	660.54	673.19	0.06	0.06	100.69	103.40
13.95	5.40E+06	5.85E+06	1.00	0.93	0.0401	0.0399	0.0089	0.0088	5615.41	5661.81	1126.62	1130.70	0.13	0.13	224.50	222.85
14.00	5.14E+06	5.59E+06	0.85	0.78	0.0438	0.0435	0.0089	0.0088	4735.24	4801.67	1036.99	1043.45	0.16	0.15	268.84	265.24
14.05	5.36E+06	5.59E+06	0.60	0.58	0.0428	0.0426	0.0089	0.0088	3761.98	3807.87	805.46	811.60	0.15	0.15	256.41	254.39
14.10	4.20E+06	4.28E+06	0.57	0.56	0.0446	0.0444	0.0092	0.0092	2936.81	2966.24	655.21	657.92	0.16	0.16	277.51	274.66
14.15	1.97E+06	1.98E+06	0.69	0.69	0.0442	0.0440	0.0104	0.0104	1808.45	1825.43	399.36	401.38	0.16	0.16	273.22	271.04
14.20	6.18E+05	2.44E+05	0.78	0.79	0.0431	0.0430	0.0126	0.0150	767.29	364.60	165.36	78.37	0.15	0.15	261.91	260.49
Average	9.41E+05	1.10E+06	0.78	0.75	3.06E-02	3.05E-02	1.30E-02	1.22E-02	1054.05	1158.26	1.66E+02	1.79E+02	4.93E-02	4.88E-02	85.57	84.74

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

จากตัวอย่างข้อมูลที่สภาวะการจำลองภาวะของแบบจำลองการไหลของโรเซอร์ของ Benyahia ที่สัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 0.4 ที่เวลา 20 วินาที ที่ตำแหน่งห่างจากผนัง ด้านซ้าย 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการจำลองภาวะ

Height (m)	Calculated by Fluent				Calculated by Excel		
	Re_{mix}	Pr_{mix}	k_{mix}	$Density_{mix}$	f_{mix}	Nu	h
1.00	5.11E+04	1.06	0.06	462.196	0.02	129.61	41.16
2.00	2.52E+06	0.88	0.03	165.068	0.01	2751.61	437.66
3.00	2.46E+06	1.03	0.03	142.944	0.01	3028.68	447.29
4.00	2.70E+06	0.98	0.03	107.441	0.01	3153.41	469.39
5.00	2.27E+06	0.97	0.03	87.0465	0.01	2707.90	402.32
6.00	1.89E+06	0.88	0.03	76.3276	0.01	2173.80	318.22
7.00	1.45E+06	0.85	0.03	79.2798	0.01	1699.16	248.33
8.00	1.52E+06	0.85	0.03	68.8609	0.01	1761.75	255.33
9.00	1.35E+06	0.76	0.03	70.9988	0.01	1477.09	212.58
10.00	1.32E+06	0.73	0.03	68.9912	0.01	1410.71	202.72
11.00	1.26E+06	0.71	0.03	63.7833	0.01	1321.70	188.97
12.00	1.27E+06	0.71	0.03	65.7646	0.01	1323.04	188.99
13.00	1.43E+06	1.41	0.04	66.2642	0.01	2375.61	419.35
14.00	2.59E+06	2.10	0.05	416.273	0.01	5102.37	1388.71
14.20	4.00E+05	3.31	0.06	428.17	0.01	1342.21	405.06
Average	1.63E+06	1.15	0.04	157.96	0.01	2117.24	375.07

จากตารางที่ ข1 ข้อมูลส่วนแรกมาจากการคำนวณในโปรแกรม Fluent คือเลขเรย์โนลด์ส์เฉลี่ยของสองวัฏภาค เลขพรันด์เทิลเฉลี่ยของสองวัฏภาค ค่าการนำความร้อนเฉลี่ยของสองวัฏภาค และค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของสองวัฏภาค (รายละเอียดการคำนวณในโปรแกรม Fluent ดูได้จาก ภาคผนวก ค) และข้อมูลในส่วนที่สองนำข้อมูลในส่วนแรกมาคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel โดยที่คำนวณค่า f จากสมการที่ 3.40 คำนวณค่าเลขนัสเซิลต์ จากสมการที่ 3.39 และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจากสมการที่ 3.41 หลังจากนั้นนำค่าความหนาแน่นของของแข็งและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ทุกๆ ความสูงมาเฉลี่ยกันเพื่อเป็นตัวแทนของผลที่ได้จากการจำลองภาวะที่เวลานั้นๆ

ภาคผนวก ค

โปรแกรมเพิ่มเติมที่ใช้ประกอบกับการจำลองภาวะบนโปรแกรม Fluent 6.1

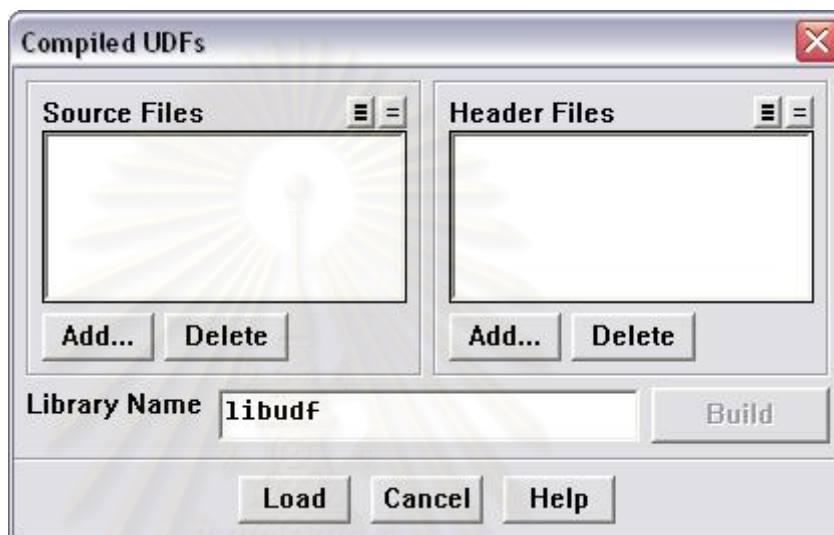
โปรแกรม Fluent เป็นโปรแกรมที่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถที่จะเขียนโปรแกรมเพื่อที่จะสั่งงานให้โปรแกรม Fluent ทำการคำนวณที่นอกเหนือจากการคำนวณพื้นฐานที่มาพร้อมกับโปรแกรม โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเหล่านั้นจะเรียกว่า User Define Function หรือ UDF ซึ่งการเขียน UDF ในโปรแกรม Fluent 6.1 จะต้องเขียนในรูปแบบของไวยากรณ์ภาษา C และใช้ฟังก์ชันที่ตัวโปรแกรม Fluent กำหนดขึ้นมาก่อนแล้ว โดยฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกรวมไว้ในแฟ้ม udf.h ดังนั้นก่อนทำการเขียน UDF ทุกครั้งต้องทำการเรียกคำสั่ง `#include udf.h` ขึ้นต้นแฟ้ม UDF นั้นๆ ทุกครั้ง คำสั่งดังกล่าวเป็นคำสั่งที่บอกให้โปรแกรม Fluent เอาแฟ้ม udf.h มาแทรกเข้าในส่วนบนสุดของแฟ้ม UDF ที่เขียนขึ้นในขณะที่แฟ้ม UDF นั้นจะถูกแปลโปรแกรม (Compiled) ให้อยู่ในรูปแบบของ รันไทม์ไลบรารี (Runtime Library) ที่โปรแกรมสามารถดึงมาใช้ได้ทันที ในขณะที่ทำการจำลองภาวะ

UDF ในโปรแกรม Fluent มีความสามารถที่จะส่งค่าตัวแปร หรือปรับค่าตัวแปร หรือทั้งสองอย่างในระหว่างขั้นตอนการจำลองภาวะของโปรแกรม Fluent ผู้ใช้สามารถเขียน UDF จากโปรแกรมแก้ไขข้อความ (Text Editor) โปรแกรมใดก็ได้ โดยต้องเขียนให้อยู่ในรูปแบบไวยากรณ์ของภาษา C และบันทึกเป็นแฟ้มนามสกุล C เช่น `my_udf.c` หลังจากนั้นต้องเอาไปแปลโปรแกรมด้วยโปรแกรม Fluent เพื่อที่จะสามารถเรียกฟังก์ชันที่มีใน UDF นั้นๆ จากภายในสภาพแวดล้อมของโปรแกรม Fluent เอง ถึงแม้ว่าโปรแกรม Fluent เองจะเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม แต่อย่างไรก็ตาม UDF ไม่สามารถที่จะเข้าไปแก้ไขฟังก์ชันทั้งหมดของตัวโปรแกรม Fluent ได้ รายละเอียดผู้ใช้งานสามารถเรียกดูได้จาก Fluent 6.1 User's Guide ที่มาพร้อมกับแผ่นติดตั้งโปรแกรมเอง

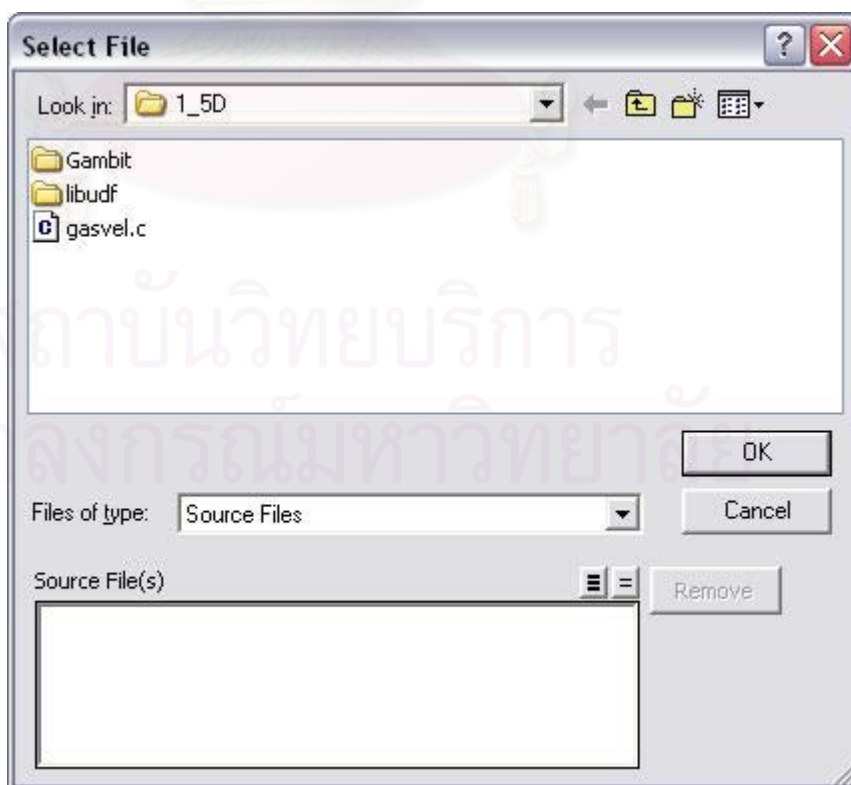
- ขั้นตอนการแปลโปรแกรมของรหัสต้นฉบับ (Source Code) และการใช้งานภายในโปรแกรม Fluent
 1. สร้างแฟ้มรหัสต้นฉบับของ UDF ในสารบบ (Directory) เดียวกับแฟ้มที่ใช้ดำเนินงานของโปรแกรม Fluent
 2. เริ่มโปรแกรม Fluent ภายในสารบบเดียวกับข้อที่แล้ว
 3. โหลดแฟ้มที่ต้องการใช้งานเข้าสู่โปรแกรม Fluent
 4. เปิดแผงการแปลโปรแกรม UDF (Compiled UDFs Panel) ภายในโปรแกรม Fluent จาก

Define→User-Defined→Function→Compiled...

- เลือกเพิ่มรหัสต้นฉบับ โดยกดปุ่ม Add ภายใต้หัวข้อ Source Files ที่แผงการแปลโปรแกรม UDF (รูปที่ ค1) ซึ่งจะเป็นการเปิดแผงเลือกเพิ่ม (Select File Panel) ขึ้นมา (รูปที่ ค2) หลังจากนั้นทำการเลือกเพิ่มรหัสต้นฉบับที่ต้องการแปลโปรแกรม



รูปที่ ค1 แผงการแปลโปรแกรม UDF (Compiled UDFs Panel)



รูปที่ ค2 แผงเลือกเพิ่ม (Select File Panel)

6. กดปุ่ม Build เพื่อทำการแปลโปรแกรมรหัสต้นฉบับ UDF แล้วทำการนำเข้าแฟ้ม ที่ทำการแปลสำเร็จแล้วสู่โปรแกรม Fluent โดยการกดปุ่ม Load ที่แผงการแปลโปรแกรม UDF
7. หลังจากทำการนำเข้าเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้งานสามารถใช้งานฟังก์ชันที่เพิ่มเติมเข้าไปจากการแปลโปรแกรม UDF จากแผงการจัดการต่างๆ ในโปรแกรม Fluent ยกตัวอย่างเช่นในงานวิจัยนี้จะทำการเลือกจาก แผงการกำหนดวัสดุ (Materials Panel) ในการกำหนดสมบัติของค่าการนำความร้อนให้เป็น user-defined

- ตัวอย่างแฟ้มรหัสต้นฉบับที่ใช้ในการคำนวณค่าการนำความร้อนของแก๊สและของแข็งงานวิจัยนี้

```

#include "udf.h"
#define OMEGA 7.26E-3
#define K_F0 0.00257
#define K_S0 1.0
DEFINE_PROPERTY(conduct_gas,cell,thread)
{
    real k_bf, k_gas;
    k_bf = K_F0^(1.-sqrt(1.-C_VOF(cell,thread)));
    k_gas = k_bf/(C_VOF(cell,thread)+SMALL);
    return k_gas;
}
DEFINE_PROPERTY(conduct_solid,cell,thread)
{
    real a, b, term1, term2, gamma, k_bs, k_sol, epsi;
    if (C_VOF(cell,thread) > CONST_GVOF)
    {
        epsi = 1.-C_VOF(cell,thread);
        a = K_S0/K_F0;
        b = 1.25^pow((1.-epsi)/(epsi+SMALL),10./9.);
        term1=(a-1.)/pow((1.-b/a), 2.0)^(b/a)*log(a/b);
        term2=-((b-1.)/(1.-b/a))-0.5^(b+1.);
        gamma = (2./(1.-b/a))*(term1+term2);
        k_bs = sqrt(1.-epsi)*(OMEGA*a +
            (1.-OMEGA)*gamma)*K_F0;
        k_sol = k_bs/(1.-epsi+SMALL);
    }
    else
        k_sol = SD_EPS;
    return k_sol;
}

```

} Include header file and define constant

} conduct_gas function

} conduct_solid function

นอกจากการเขียนแฟ้ม UDF ที่ใช้ในระหว่างการคำนวณการจำลองภาวะของโปรแกรม Fluent ผู้ใช้งานยังสามารถสร้าง ฟังก์ชันกำหนดเอง (Custom Field Functions) เพื่อให้ทำการติดตามค่าการจำลองภาวะนอกเหนือจากค่าปกติที่ Fluent ทำการคำนวณให้ โดยผู้ใช้งานสามารถทำการสร้างฟังก์ชันกำหนดเองจาก

Define → Custom Field Functions

ภายในโปรแกรม Fluent ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างฟังก์ชันกำหนดเองของค่าเฉลี่ยต่างๆ เช่น ค่าความเร็วเฉลี่ย ความหนาแน่นเฉลี่ยของทั้งสองวัสดุ หลังจากทำการสร้างค่าฟังก์ชันกำหนดเองขึ้นมาแล้ว ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบค่าที่ได้จากฟังก์ชันดังกล่าวได้ทุกๆ จุดในแบบจำลองการไหล

- ฟังก์ชันกำหนดเองที่ใช้ในงานวิจัยนี้
 - $k_{mix} = \text{air-thermal-conductivity-lam} * \text{air-vof} + \text{sand-thermal-conductivity-lam} * \text{sand-vof}$
 - $vis_{mix} = \text{air-viscosity} * \text{air-vof} + \text{sand-viscosity} * \text{sand-vof}$
 - $vel_{mix} = \text{air-velocity-magnitude} * \text{air-vof} + \text{sand-velocity-magnitude} * \text{sand-vof}$
 - $cp_{mix} = \text{air-specific-heat-cp} * \text{air-vof} + \text{sand-specific-heat-cp} * \text{sand-vof}$
 - $den_{mix} = \text{air-density} * \text{air-vof} + \text{sand-density} * \text{sand-vof}$
 - $re = (\text{den}_{mix} * \text{riser_diameter} * \text{vel}_{mix}) / \text{vis}_{mix}$
 - $pr = (\text{cp}_{mix} * \text{vis}_{mix}) / k_{mix}$

เมื่อ

k_{mix}	คือ ค่าการนำความร้อนเฉลี่ยของสองวัสดุ
vis_{mix}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเฉลี่ยของสองวัสดุ
vel_{mix}	คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยของสองวัสดุ
cp_{mix}	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของสองวัสดุ
den_{mix}	คือ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของสองวัสดุ
re	คือ เลขเรย์โนลด์ส์เฉลี่ยของสองวัสดุ
pr	คือ เลขพรันด์เทิลเฉลี่ยของสองวัสดุ
$air-vof$	คือ ค่าสัดส่วนปริมาตรของวัสดุแก๊ส
$sand-vof$	คือ ค่าสัดส่วนปริมาตรของวัสดุของแข็ง
$riser-diameter$	คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของไรเซอร์ เท่ากับ 0.2 เมตร

air-viscosity	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของวัฏภาคแก๊ส
sand-viscosity	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของวัฏภาคของแข็ง
air-density	คือ ค่าความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส
sand-density	คือ ค่าความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง
air-velocity-magnitude	คือ ค่าความเร็วของวัฏภาคแก๊ส
sand-velocity-magnitude	คือ ค่าความเร็วของวัฏภาคของแข็ง
air-specific-heat-cp	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัฏภาคแก๊ส
sand-specific-heat-cp	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัฏภาคของแข็ง
air-thermal-conductivity-lam	คือ ค่าการนำความร้อนของวัฏภาคแก๊ส
sand-thermal-conductivity-lam	คือ ค่าการนำความร้อนของวัฏภาคของแข็ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณพพล มังกรานนท์ชัย เกิดวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย