

การจำลองอุทกพลวัตของอนุภาคในไรเซอร์ของกระบวนการฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน



นาย สมบัติ กীরติพรานนท์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2997-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRODYNAMIC SIMULATION OF PARTICLES IN A RISER OF  
CIRCULATING FLUIDIZED BED



Mr.Sombat Keeratipranon

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2997-9



สมบัติ กิรติพรานนท์ : การจำลองอุทกพลวัตของอนุภาคในไรเซอร์ของกระบวนการฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (HYDRODYNAMIC SIMULATION OF PARTICLES IN A RISER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED) อ. ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์., อ. ที่ปรึกษาร่วม: ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ จำนวนหน้า 59 หน้า. ISBN 974-17-2997-9.

พฤติกรรมกรไหล 2 วัฏภาคในไรเซอร์ของกระบวนการฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน ประกอบไปด้วย ของแข็งและแก๊สในไรเซอร์ถูกจำลองโดยใช้ทฤษฎีจลนพลศาสตร์สำหรับอนุภาคของแข็ง คือ ทฤษฎีและตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วน วัฏภาคของแก๊ส คืออากาศ ด้วยโปรแกรม Fluent ในระบบ 2 มิติที่ภาวะพลวัต ทำการแก้สมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมของแต่ละวัฏภาคแยกกันด้วยเทคนิค Finite Volume Numerical ความสัมพันธ์ระหว่างวัฏภาคทั้งสองแสดงในสมการแรงลากวัตถุ (Drag Force) ผลการศึกษาพฤติกรรมภายในไรเซอร์พบว่ากรณีที่อนุภาคของแข็งมีปริมาณฟลักซ์สูง ควรใช้พารามิเตอร์การไหลแบบราบเรียบ และกรณีที่อนุภาคของแข็งมีปริมาณฟลักซ์ต่ำ ควรใช้พารามิเตอร์การไหลแบบปั่นป่วน และการเลือกใช้สมการโมเดลของ Synclair ในการสร้างแบบจำลองไรเซอร์สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมกระจายตัวของอนุภาคของแข็งได้ดีกว่าการใช้สมการโมเดลของ Gidaspow



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

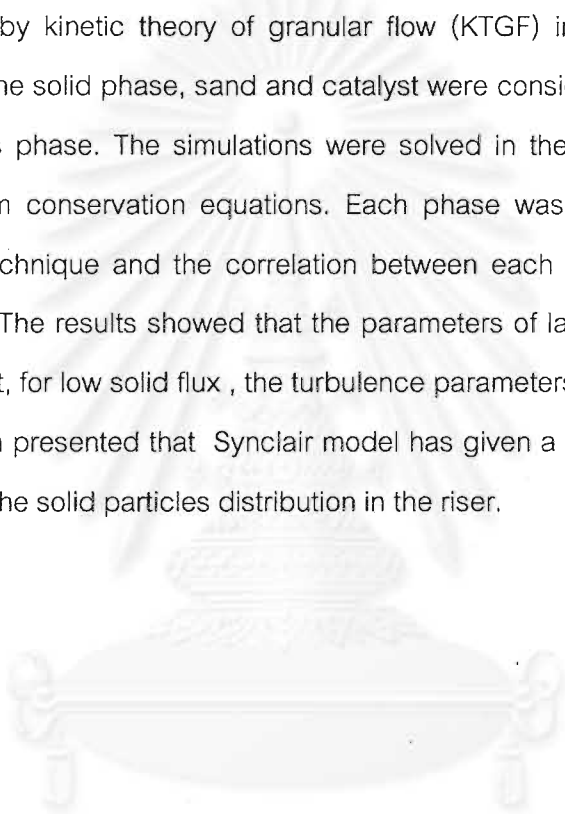
ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต..... *อวิชาติ กิรติพรานนท์*  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *พรพจน์*  
ปีการศึกษา.....2545..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *บุญรอด*

## 4272414323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: RISER/HYDRODYNAMIC/FLUIDIZED BED/SIMULATION

SOMBAT KEERATIPRANON: HYDRODYNAMIC SIMULATION OF PARTICLES IN A RISER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.PORNPOTE PIUMSOMBOON, THESIS CO-ADVISOR : DR.BOONROD SAJJAKULNUKIT, 59 pp. ISBN 974-17-2997-9.

The flow behaviors of two phases in the riser of CFB that consists of solid and gas were simulated by kinetic theory of granular flow (KTGF) in two dimensions by Fluent program. For the solid phase, sand and catalyst were considered in the riser and air was used for gas phase. The simulations were solved in the dynamic mode with mass and momentum conservation equations. Each phase was calculated by Finite Volume Numerical technique and the correlation between each phase was shown in drag force equation. The results showed that the parameters of laminar were useful for the high solid flux but, for low solid flux , the turbulence parameters were much suitable. Finally, this simulation presented that Synclair model has given a better prediction than Gidaspow model for the solid particles distribution in the riser.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Technology.....	Student signature..... <i>Sombat</i> .....
Field of study...Chemical Technology.....	Advisor's signature..... <i>Pornpote</i> .....
Academic year .....2002.....	Co-advisor's signature..... <i>Boonrod</i> .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. บุญรอด สัจกุลนุกิจ ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ที่ห้องวิจัยคอมพิวเตอร์ 'ไซเบอร์เนติกส์'ทุกท่านสำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนทำให้การทำงานวิจัยเป็นไปอย่างมีความสุข

ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมาตั้งแต่เกิดจนถึงวันนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ข
สารบัญ .....	ช
สารบัญภาพ .....	ณ
สารบัญตาราง .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์ .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.5 วิธีที่จะดำเนินการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ฟลูอิดไดเซชัน.....	3
2.1.1 นิยาม.....	3
2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน .....	3
2.1.3 ลักษณะของฟลูอิดไดเซชัน.....	4
2.1.4 แก๊สฟลูอิดไดเซชัน.....	5
2.1.5 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดไดซ์เบด.....	12
2.1.6 ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน .....	13
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	14
2.2.1 สมการอนุรักษ์พื้นฐาน.....	15
2.2.2 สมการเสริม.....	17
2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตที่ผนัง.....	20
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการพัฒนาแบบจำลองไรเซอร์	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	24
3.2 วิธีการพัฒนาแบบจำลองไรเซอร์.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 กระบวนการ 2 กระบวนการที่ใช้เพื่อการศึกษาแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ ...	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	
4.1 การทดสอบความถูกต้องของการใช้โปรแกรม Fluent โดยการจำลองโรเตอร์ ตามที่เสนอไว้ในผลงานวิจัยของ Benyahia .....	34
4.2 การศึกษาเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับสภาวะดำเนินการในงานวิจัยของ ดร.บุญรอด .....	38
4.2.1 จำลองสถานการณ์โรเตอร์ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการ ไหลราบเรียบ เสนอโดย Gidaspow และใช้สมการ Drag ของ Arastoopour.....	38
4.2.2 จำลองสถานการณ์โรเตอร์โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการ ไหลราบเรียบ เสนอโดย Synclair และใช้สมการ Drag ของ Wen และ Yu.....	40
4.2.3 จำลองสถานการณ์โรเตอร์ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการ ไหลปั่นป่วน $k - \epsilon$ เสนอโดย Gidaspow และใช้สมการ Drag ของ Arastoopour.....	42
4.2.4 การศึกษาผลกระทบจากประเภทของสมการที่ใช้ในการจำลอง สถานการณ์.....	45
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย .....	51
รายการอ้างอิง .....	52
ภาคผนวก .....	54
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	59



## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะของเบตที่มีของไหลต่างชนิดกัน ไหลผ่านด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน.....	4
2.2 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไอเซชันเบตแก๊ส-ของแข็ง.....	5
2.3 แสดงลักษณะของเบตนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง.....	6
2.4 ลักษณะการเกิด Wake.....	8
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในช่วงการเกิดเบตแบบปั่นป่วน.....	9
2.6 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดไอเซชันเบต.....	12
3.1 โรเซอริที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัย.....	25
3.2 โปรแกรม Gambit รุ่น 3.1.....	25
3.3 การสร้างรูปโรเซอริในโปรแกรม Gambit.....	26
3.4 โรเซอริที่ทำการเมช ในโปรแกรม Gambit.....	27
3.5 โปรแกรม Fluent รุ่น 4.5.....	28
3.6 โรเซอริที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ตามข้อมูลอ้างอิงของ Benyahia.....	31
3.7 โรเซอริที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของทรายตามข้อมูลดร. บุญรอด.....	32
4.1 ผลการจำลองสถานการณ์ของ Benyahia แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอริที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ด้วยสมการ Gidaspow ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที.....	34
4.2 ผลการจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นใหม่ แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอริที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ด้วยสมการ Gidaspow ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที.....	35
4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นใหม่ แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอริที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ด้วยสมการ Gidaspow เมื่อเปลี่ยนค่า $e$ จาก 0.95 เป็น 0.80 และ 1.0 ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที.....	36
4.4 ผลการจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นใหม่ แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอริที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ด้วยสมการ Gidaspow ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที.....	37
4.5 ผลการทำนายพฤติกรรมกระจายตัวของทรายภายในโรเซอริที่ระดับความสูงของโรเซอริ 1.3 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Gidaspow.....	38

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.6 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอรัที่ระดับความสูงของโรเซอรั 4.2 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Gidaspow.....	39
4.7 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอรัที่ระดับความสูงของโรเซอรั 5.4 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Gidaspow.....	39
4.8 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอรัที่ระดับความสูงของโรเซอรั 1.3 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Synclair .....	40
4.9 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอรัที่ระดับความสูงของโรเซอรั 4.2 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Synclair .....	41
4.10 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอรัที่ระดับความสูงของโรเซอรั 5.4 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Synclair .....	42
4.11 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอรัที่ระดับความสูงของโรเซอรั 1.3 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วน ด้วยสมการ Gidaspow.....	43
4.12 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอรัที่ระดับความสูงของโรเซอรั 4.2 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วน ด้วยสมการ Gidaspow.....	43
4.13 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอรัที่ระดับความสูงของโรเซอรั 5.4 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วน ด้วยสมการ Gidaspow.....	44
4.14 เปรียบเทียบชนิดของสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของอนุภาคทราย เมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ระดับความสูงภายในโรเซอรั 1.3 เมตร.....	46

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.15 เปรียบเทียบชนิดของสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของอนุภาคทรายเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ระดับความสูงภายในไรเซอร์ 4.2 เมตร.....	47
4.16 เปรียบเทียบชนิดของสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของอนุภาคทรายเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ระดับความสูงภายในไรเซอร์ 5.4 เมตร.....	48



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ภาวะขอบเขตการจำลองสถานการณ์โรเซอรั	29
4.1 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากผลการทดลองกับผลจากการสร้างสถานการณ์จำลองการกระจายตัวของอนุภาคทรายภายในโรเซอรั	49
4.2 เปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการคำนวณ ค่าความเค้นระหว่างสมการ Gidaspow และสมการ Sinclair	50
ก1 ข้อมูลการกระจายตัวของทรายในโรเซอรัที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ด้วยโปรแกรม Fluent กรณีใช้ข้อมูลการจำลองสถานการณ์จากงานวิจัยของ ดร.บุญรอด โมเดล Gidaspow กำหนดลักษณะการไหลแบบ Laminar	55
ก2 ข้อมูลการกระจายตัวของทรายในโรเซอรัที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ด้วยโปรแกรม Fluent กรณีใช้ข้อมูลการจำลองสถานการณ์จากงานวิจัยของ ดร.บุญรอด โมเดล Synclair กำหนดลักษณะการไหลแบบ Laminar	56
ก3 ข้อมูลการกระจายตัวของทรายในโรเซอรัที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ด้วยโปรแกรม Fluent กรณีใช้ข้อมูลการจำลองสถานการณ์จากงานวิจัยของ ดร.บุญรอด โมเดล Gidaspow กำหนดลักษณะการไหลแบบ Turbulent	57
ก4 ข้อมูลการกระจายตัวของทรายในโรเซอรัที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ด้วยโปรแกรม Fluent กรณีใช้ข้อมูลการจำลองสถานการณ์จากงานวิจัยของ ดร.บุญรอด โมเดล Synclair กำหนดลักษณะการไหลแบบ Turbulent	58

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	= พื้นที่หน้าตัดของโรเตอร์
$F_D$	= แรงลากเนื่องจากการไหล
$g$	= ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
$L$	= ความสูงของเบด
$L_t$	= ความสูงของเบดขณะเกิดฟลูอิโดเซชัน
$L_{mf}$	= ความสูงของเบดขณะเริ่มเกิดฟลูอิโดเซชัน
$\Delta P$	= ความดันตกคร่อม
$Re_p$	= ตัวแปรไร้หน่วยของ Particle Reynolds Number
$U$	= ความเร็วแก๊สภายในท่อโรเตอร์
$U_A$	= ความเร็วแก๊สที่เติมเข้ามา
$U_{ch}$	= Choking Velocity
$U_{mb}$	= ความเร็วแก๊สที่ทำให้เริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด
$U_{mf}$	= ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิโดเซชัน
$U_{ms}$	= ความเร็วแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับหลอดลง
$U_t$	= ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง
$U_{t,spherical}$	= ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งที่เป็นทรงกลมในของไหลที่อยู่นิ่ง
$U_t^*$	= ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง
$V_{mb}$	= ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างแก๊สกับของแข็ง ขณะเริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด
$V_{mf}$	= ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างแก๊สกับของแข็ง ขณะเริ่มเกิดฟลูอิโดเซชัน
$V_g$	= ความเร็วแก๊สที่ไหลผ่านเบด
$\rho_B$	= ความหนาแน่นบัลค์ของเบด
$\rho_g$	= ความหนาแน่นของแก๊ส
$\rho_s$	= ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง
$\mu$	= สัมประสิทธิ์ความหนืดของแก๊ส
$\varepsilon$	= ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนช่องว่าง
$\varepsilon_{ch}$	= ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนช่องว่าง ขณะที่แก๊สมีความเร็วเท่ากับ $U_{ch}$
$\varepsilon_{mf}$	= ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนช่องว่าง ขณะที่แก๊สมีความเร็วเท่ากับ $U_{mf}$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เตาเผาชนิดฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน ( Circulating Fluidized Bed Combustor : CFBC ) ได้รับความนิยมมากเนื่องจากมีข้อดี คือใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลายประเภท อาทิเช่น ลิกไนต์ และเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ซึ่งในที่นี้ได้แก่ ชูยอ้อย (Pith); เปลือกไม้ (Bark); กากอ้อย (Bagasse) และกากตะกอน (Sludge) มีประสิทธิภาพสูงเพราะสามารถนำเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดกลับเข้ามาเผาอีก และยังช่วยลดปริมาณ  $SO_x$  และ  $NO_x$  ซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ภายในเตาเผา จะมีประโยชน์อย่างมาก ต่อการพัฒนาการออกแบบและปรับปรุงเตาเผาในอนาคต

งานวิจัยนี้จะศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ในโปรแกรมเชิงการค้าเพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งศึกษาตัวแปรและพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค โดยนำข้อมูลจากบทความวิจัยของ Benyahia และ ดร.บุญรอด และพัฒนาแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม FLUENT เป็นเครื่องมือในการวิจัย

### 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาหาแบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงอุทกพลวัตที่เหมาะสมเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ของกระบวนการฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน เพื่อกำหนดค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองอุทกพลวัตของอนุภาคในโรเตอร์ของกระบวนการฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน
2. ศึกษาตัวแปรและพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคภายในโรเตอร์ของกระบวนการฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองอุทกพลวัตของอนุภาคในไรเซอร์ของกระบวนการฟลูอิดไรเซชันแบบหมุนเวียน
2. ได้แนวทางในการพัฒนาการออกแบบและปรับปรุงเตาเผา

#### 1.5 วิธีที่จะดำเนินการวิจัย

1. ศึกษารายละเอียดของเตาเผาชนิดฟลูอิดไรเซชันแบบหมุนเวียน
2. สืบค้นทางสารสนเทศเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีในอดีต
3. ศึกษาโปรแกรม FLUENT
4. ศึกษาแบบจำลองในไรเซอร์ของกระบวนการฟลูอิดไรเซชันแบบหมุนเวียน
5. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ฟลูอิดไอเซชัน

ในปัจจุบันฟลูอิดไอเซชันเป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจจากวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถตอบสนองความต้องการทางอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เครื่องมือฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงได้ถูกสร้างขึ้น และพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา เช่น เครื่องทำนมผงให้โตขึ้น (Agglomeration) เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช เตาเผาขยะฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น

##### 2.1.1 นิยาม

คำว่า ฟลูอิดไอเซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้นเมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงในหอตลอดแล้วให้ของไหล (แก๊ส, ของเหลว) ไหลผ่านจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็ง และไหลออกจากด้านบนของหอตลอด เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหลเรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไดซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไอเซชัน

##### 2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน

งานของฟลูอิดไอเซชัน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบันพอที่จะสรุปประเภทของงานได้เป็น 2 แบ่งด้วยกัน คือ ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะและฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ

1. ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ (Two-phase Fluidization) หมายความว่าในหอตลอดหรือในเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดไดซ์เบด 2 สถานะจึงแบ่งย่อยได้เป็น

- แก๊สฟลูอิดไอเซชัน (Gas Fluidization)
- ฟลูอิดไอเซชันของเหลว (Liquid Fluidization)

2. ฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) หมายความว่าในหอตลอดหรือในเบดจะประกอบด้วยของสามสถานะอยู่พร้อม คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

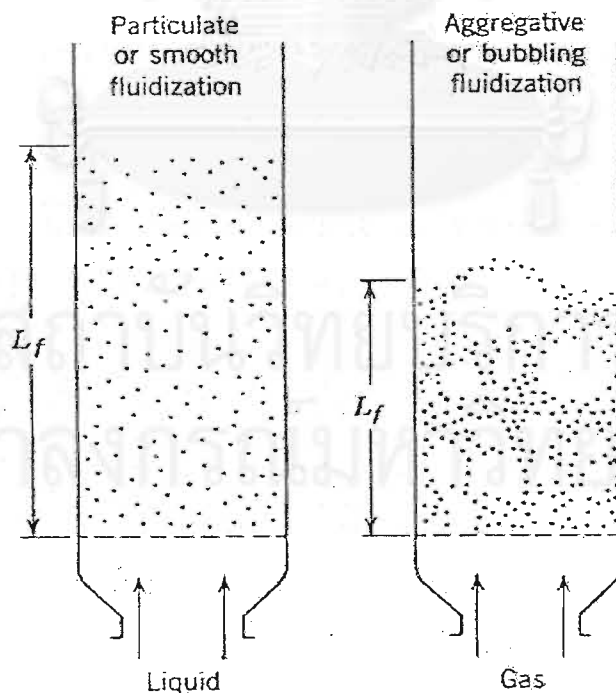


สำหรับฟลูอิดเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดเซชันสองสถานะ หอทดลองที่เป็นฟอง (Bubble Column) และหอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed Bed) ดังนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อนมาก การคำนวณต้องใช้หลักคณิตศาสตร์ขั้นสูง

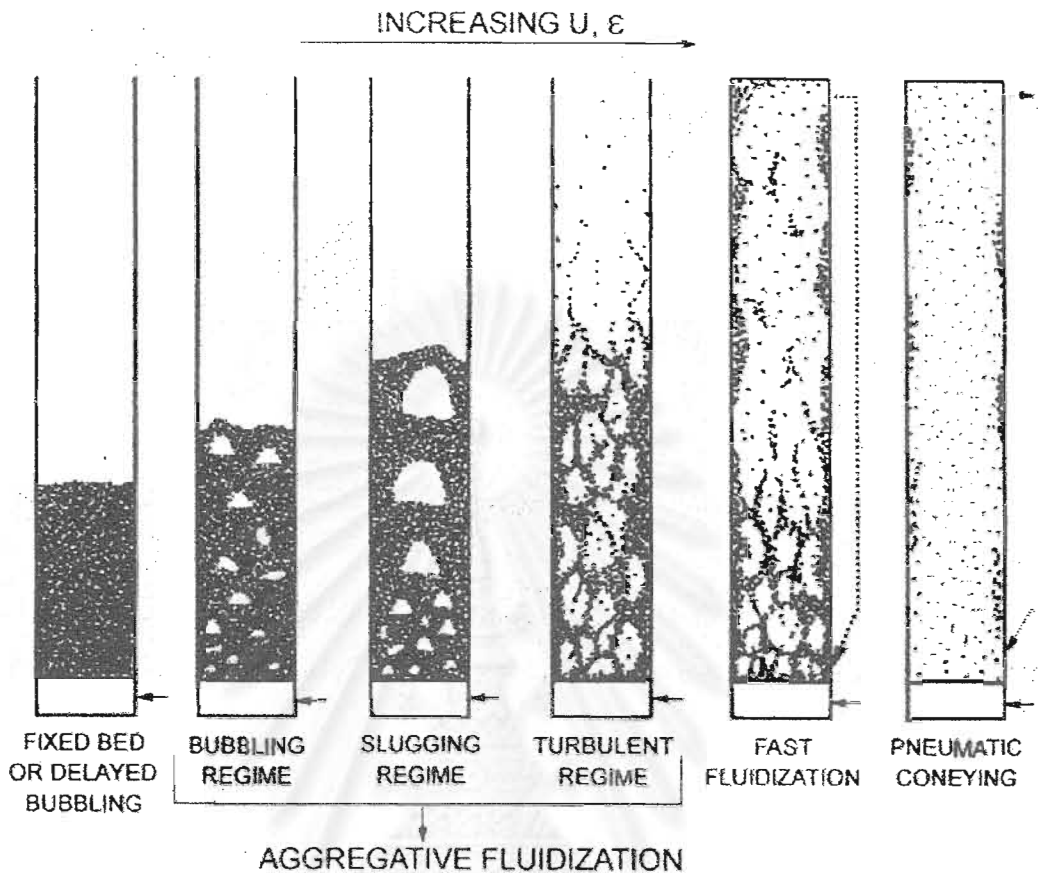
### 2.1.3 ลักษณะของฟลูอิดเซชัน

คำว่า เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็น ตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายแก๊ส (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด

ฟลูอิดเซชันที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการ หมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิดเซชันที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยัง ทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกัน เป็นฟองแก๊สขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบด จึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกัน ไหลผ่านด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วต่ำสุด ในการเกิดฟลูอิดเซชัน



รูปที่ 2.2 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไรซ์เบดแก๊ส-ของแข็ง (Grace, J. R. 1997)

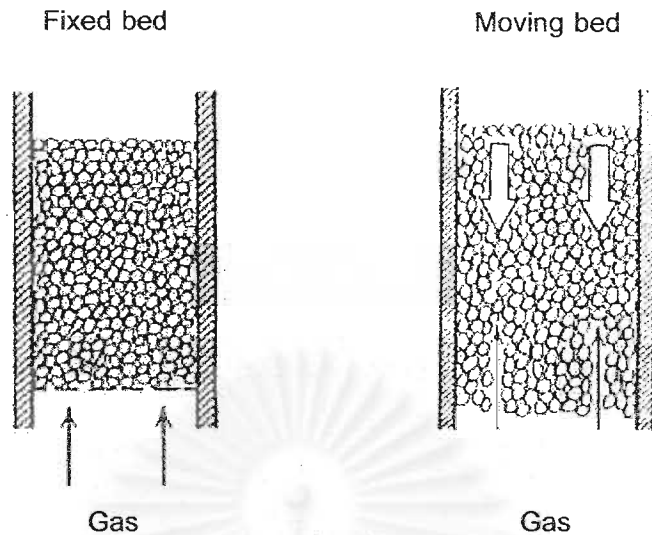
#### 2.1.4 แก๊สฟลูอิดไรซ์

แก๊สฟลูอิดไรซ์เป็นการเกิดฟลูอิดไรซ์เบดสองสถานะระหว่างของไหลที่เป็นแก๊สกับของแข็ง ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ขอบเขตของฟลูอิดไรซ์เบด (Regime of Fluidization) จะสามารถแบ่งได้ ดังรูปที่ 2.2

เมื่อเบดวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายแก๊ส (Gas Distributor) และมีแก๊สเคลื่อนที่ผ่าน ขึ้นมา (Upward Flowing) ซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้น และ Hydrodynamic ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้

- เบดนิ่ง (Pack Bed หรือ Fixed Bed)

เมื่อแก๊สไหลผ่านเบดขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่อนุภาคของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า Moving Bed ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของเบตนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง

เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบตที่วางนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางกรไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure Drop) ตกคร่อมเบตได้

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

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

- เบตแบบฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่งอนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วจุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum Fluidization Velocity;  $U_{mf}$ ) และเรียกเบต ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบต ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบต ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force;  $F_D$ ) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

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

A = พื้นที่หน้าตัดของเบต

L = ความสูงของเบต

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชัน (Minimum Fluidization Condition) ดังนี้

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

โดยที่ ตัวห้อย mf แทนภาวะต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไอเซชัน

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$- Re_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right)}{150 \mu} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.4)$$

$$- Re_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g} = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.5)$$

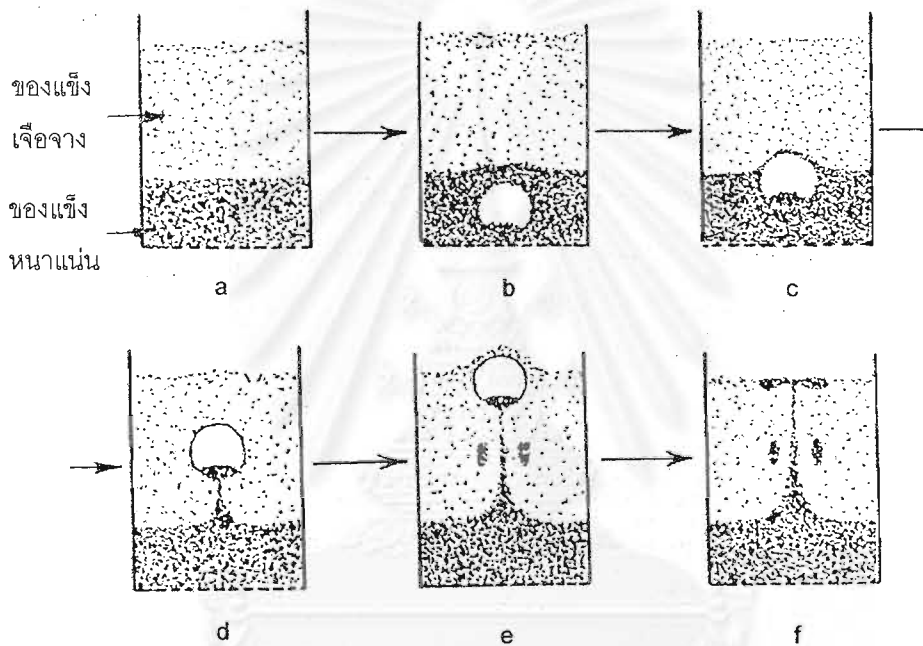
ส่วนความเร็วของแก๊สที่ทำให้เริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด (Minimum Bubbling Fluidization Velocity,  $U_{mb}$ ) ในกรณีของอนุภาคของแข็งกลุ่ม A ของ Geldart  $U_{mb}$  จะมีค่ามากกว่า  $U_{mf}$  ส่วนในกรณีของอนุภาคกลุ่ม B และ D  $U_{mb}$  จะเท่ากับ  $U_{mf}$  ดังนั้น รูปแบบการเกิดฟลูอิดไอเซชันแบบสม่ำเสมอ หรือแบบไม่มีฟองแก๊ส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

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

สำหรับอนุภาคของแข็งกลุ่ม A B และ D ของ Geldart ถ้าเพิ่มความเร็วของแก๊สจนพบว่าจะเริ่มเกิดฟองแก๊สขึ้น เบดจะเริ่มแบบออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นฟองแก๊สเรียกว่า Bubble Phase อาจมีอนุภาคของแข็งอยู่บ้างแต่น้อยมาก
2. ส่วนที่ไม่ใช่ฟองแก๊สหรือส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น เรียกว่า Emulsion Phase ขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม
  - ขนาดของอนุภาคของแข็ง ;  $d_p$  ที่เพิ่มขึ้น
  - ความเร็วแก๊ส ;  $(U - U_{mb})$  ที่เพิ่มขึ้น
  - ตำแหน่งที่อยู่เหนือตะแกรงรองรับ หรือตัวกระจายแก๊สที่เพิ่มขึ้น

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกันผ่าน Emulsion Phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย จนกระทั่งถึงผิวบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิว อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่เกือบทั้งหมดจะตกกลับลงมายังเบตใหม่ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่ของแข็งเคลื่อนที่ตามฟองแก๊สนี้ว่า การเกิด Wake ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การเกิด Wake เกิดจากความดันที่อยู่ใต้ล่างฟองแก๊สน้อยกว่า ความดันบริเวณ Emulsion Phase ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่จากบริเวณที่ความดันสูงมาอยู่ในบริเวณที่มีความดันต่ำ



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิด Wake (Kunii and Levenspiel, 1991)

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบตขึ้นไป ซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบตอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (Freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน (น้อยมาก) ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วย (ไม่ตกกลับลงมา) ณ ความสูงค่าหนึ่งใน Freeboard ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมายังเบตจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ Transport Disengaged Height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับแก๊สด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า Elutriation Rate

- เบตแบบสลัก (Slugging Bed)

ดังกล่าวมาแล้วว่าขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบด ถ้าเบดบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด (หอทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลัก และที่ความเร็วของแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดหรือหอทดลอง ก็คือ Minimum Slugging Velocity ( $U_{ms}$ ) ซึ่งในปี ค.ศ. 1967 Stewart และ Davidson ได้ประมาณไว้ ดังนี้

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

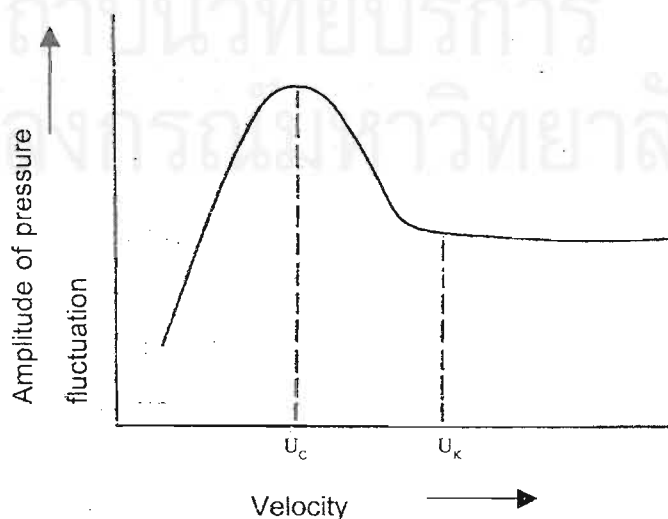
$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอทดลอง

#### - เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนมากกว่า  $U_{mf}$  เบดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จุดดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส) การเคลื่อนไหวภายในเบดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. Dense Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น
2. Dilute Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่านพบว่า การเปลี่ยนภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบด



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน

แบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบริดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบดแบบฟองแก๊สนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเบดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังนี้ รูปที่ 2.5

Terminal Velocity คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอยทอดลงไป โดย Haider และ Levenspiel ได้ประมาณไว้ในปี 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

$$U_{t,\text{spherical}} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.9)$$

$$U_{t,\text{spherical}} = \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.10)$$

$$U_{t,\text{spherical}} = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.11)$$

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  $d_p^*$  ซึ่งเป็นเทอมของตัวแปรไร้หน่วย โดยที่

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

และ

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

ดังนั้นจาก  $u_t$  ที่ได้จากสมการที่ (2.8) และ (2.12) นำมาหา  $u_t$  โดยอาศัยสมการที่ (2.14) ได้

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

#### - Fast Fluidized Bed

ไม่สามารถระบุพื้นผิวด้านบนของเบดได้ อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกทางด้านบนหรือตกลงและต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างหอตกลง อนุภาคของแข็งจะรวมกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผนังของหอตกลง ขณะที่แก๊สและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านในจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งในหอตกลงเจือจางมากขึ้น

จากรูปที่ 2.2 ในภาวะที่เป็น Fast Fluidization ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดหรือหอตกลงกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของหอตกลง ระบบแบบนี้จะเรียกว่าฟลูอิโดซีเบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

หมายเหตุ ฟลูอิโดซีชันที่ผ่านมาทั้งหมด (ยกเว้น Fast Fluidized Bed) อาจเรียกรวมกันว่า Captive Fluidized Bed เพราะอนุภาคของแข็งทั้งหมดซึ่งสัมผัสกับแก๊สจะถูกจำกัดบริเวณอยู่ภายในระยะความสูงหนึ่งจากตัวกระจายแก๊สเท่านั้น หรือในบางกรณีที่มีการพัดพาเกิดขึ้นก็มีอนุภาคของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกพัดพาไป

#### - Dilute-Phase Transport หรือ Pneumatic Conveying

เป็นการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยแก๊ส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่อนุภาคของแข็งมีความเร่ง และอนุภาคของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผนังของหอตกลง ความเร็วแก๊สที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดโซกิง (Choking Velocity,  $U_{ch}$ ) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วแก๊สในระบบที่เป็นเฟสเจือจางและมีปริมาณอนุภาค



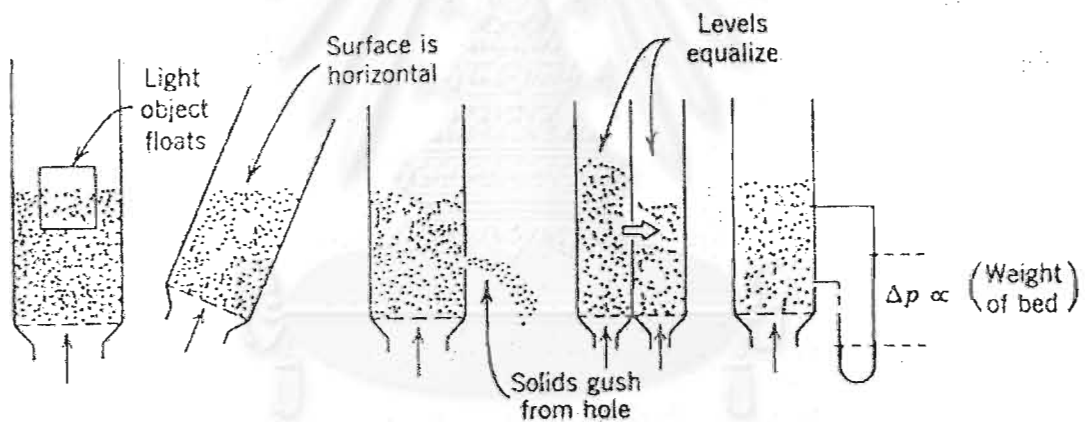
ของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเฟสเฉื่อยเป็นเฟสหนาแน่น ซึ่งความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือ ความเร็วในการเกิดโซกิ้งนั่นเอง ปริมาณของแข็งที่ไหลออกจากเบดในตอนนี้ Zenz ได้เสนอความสัมพันธ์ไว้ว่า

$$G_{s, ch} = \rho_s (1 - \epsilon_{ch}) (U_{ch} - U_t) \tag{2.16}$$

เมื่อ  $G_{s, ch}$  คือ อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบดต่อพื้นที่หน้าตัดของหลอดลง

$\epsilon_{ch}$  คือ อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบดในภาวะ Choking พบว่าค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.943 ถึง 0.987

### 2.1.5 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิไดซ์เบด



รูปที่ 2.6 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิไดซ์เบด (Kunii and Levenspiel, 1991)

ในขณะที่เม็ดของแข็งลอยตัวอยู่ในลักษณะฟลูอิไดซ์เช่นแบบหนาแน่นแล้วนั้น ผิวหน้าของเบดจะเรียบสม่ำเสมอเหมือนผิวหน้าของของไหลที่ใสอยู่ในภาชนะ โดยเฉพาะถ้าเป็นฟลูอิไดซ์เบดแบบเดียวกัน หรือว่าจัดหลอดทดลองเอนไปทางซ้ายหรือขวาก็ตาม ผิวหน้าก็ยังเรียบอยู่อย่างเดิม ดังรูปที่ 2.6 ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความจำเพาะน้อยกว่าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบดใส่ลงไปบนเบดวัตถุของแข็งนั้นจะลอยอยู่บนผิวหน้าของเบด นอกจากนี้ถ้าเจาะรูด้านข้างของเบด เม็ดของแข็งจะไหลออกทางรูนั้นได้เหมือนของเหลว หรือถ้านำเอาเบด 2 เบดมาต่อท่อถึงกัน เม็ดของแข็งจากเบดสูงกว่าจะไหลไปยังเบดที่มีเม็ดของแข็งต่ำกว่า

## 2.1.6 ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคทางฟลูอิดเซชันกับเทคนิคอื่นๆ พอสรุปได้ดังนี้

### ข้อดี

- เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบตคงที่ตลอด
- มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
- จากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบตและไหลเติมเข้ามาในเบตได้
- การที่เม็ดของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบต เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวทำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วของไหลค่าเดียวกัน ฟลูอิดเซชันเบตจึงเหมาะสมกับกระบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ
- อัตราการถ่ายเทมวลสารและพลังงานสูง เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลมีมากเมื่อเทียบกับเบตนิ่ง
- ที่ความเร็วของของไหลสูงๆ การทำงานของฟลูอิดเซชันเบตจะเสียพลังงานน้อยกว่าเบตที่อยู่กับที่มาก เพราะแรงเสียดทานและความดันลดมีค่าน้อยกว่า
- สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่อง
- สามารถใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

### ข้อเสีย

- เนื่องจากมีการผสมกันของเม็ดของแข็งอย่างรวดเร็ว อาจทำให้ระยะเวลาที่เม็ดของแข็งสัมผัสและผสมกับของไหลสั้นเกินไป เบตอาจจะไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวโดยตลอด แต่อาจแก้ไขได้โดยใช้เบตหลายชั้น
- เกิดการขัดสีระหว่างของแข็งและภาชนะทำให้เกิดการสึกกร่อน เม็ดของแข็งมีขนาดเล็กลง

## 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองการไหลของระบบหลายวัฏภาค (Multiphase Flow Model) เช่น ระบบของเหลว-ของเหลว ของเหลว-แก๊ส และแก๊ส-ของแข็ง ใช้อธิบายพฤติกรรมของของไหลด้วยวิธีออยเลอร์เลียน (Eulerian) ซึ่งสนใจของไหลแบบต่อเนื่องจึงไม่จำเป็นต้องติดตามการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค สำหรับระบบแก๊ส-ของแข็ง จะใช้วิธีออยเลอร์เลียนได้เมื่อเฟสของแข็งมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้นจึงได้มีการนำแบบจำลองทฤษฎีจลน์การไหลของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow :KTGF) มาใช้เพื่อกำหนดค่าความดันและความหนืดในวัฏภาคของแข็งโดยสมมติว่า อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายโมเลกุลแก๊ส จากทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Kinetic Theory of Gas) โดยปกติแต่ละโมเลกุลของแก๊สจะเคลื่อนที่อย่างไม่มีระเบียบ (Random Motion) ด้วยความเร็วไม่เท่ากันและไม่คงที่ เนื่องจากโมเลกุลอาจกระทบผนังภาชนะบ้าง ประทะหรือชนกันเองบ้าง ความเร็วจึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทุกครั้งที่มีการชนกัน นอกจากจะมีการเปลี่ยนความเร็วแล้ว ยังมีการถ่ายโอนโมเมนตัมและเปลี่ยนทิศทางอีกด้วย ทิศทางจะเปลี่ยนไปอย่างไรขึ้นอยู่กับลักษณะการชนของโมเลกุล บางโมเลกุลเมื่อชนแล้วอาจหยุดนิ่งแต่ก็จะหยุดอยู่ไม่นานเพราะจะถูกโมเลกุลอื่นมาชนทำให้เคลื่อนที่ได้อีก ในสภาพที่แท้จริงนั้นแก๊สย่อมมีโอกาสชนกันหลายลักษณะ และไม่เป็นระเบียบแล้วแต่ทิศทางและความเร็วของการชน แต่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์ของโมเลกุลทั้งหมดในแก๊สจำนวนหนึ่งนั้นจะมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่อุณหภูมิคงที่ การชนในลักษณะที่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์เฉลี่ยคงที่นี้เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) แต่สำหรับอนุภาคของแข็งจะถือว่าการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision) เพราะขณะที่ชนนอกจากจะถ่ายโอนโมเมนตัมให้กันและกันแล้ว ยังมีการสูญเสียทั้งความเร็วและพลังงานจลน์ พลังงานจลน์ที่เสียไปจะกลายเป็นงานและความร้อน

จากทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Gidaspow, D., 1994)

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} mc^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{3} mc^2 = k_B T \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{3} c^2 = \theta \quad \text{ให้} \quad \frac{k_B}{m} = 1 \quad (2.19)$$

$\dot{E}_k$  คือ พลังงานจลน์แก๊ส 1 โมเลกุล (จูล)

$m$  คือ มวลของแก๊ส 1 โมเลกุล (กิโลกรัม)

$c_2$  คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความเร็วที่แปรผันจากความเร็วเฉลี่ย (เมตร/วินาที)

$k_B$  คือ ค่าคงที่ของโบทซ์แมน (Boltzman) เท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  จูล/(โมเลกุล เคลวิน)

$\theta$  คือ พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy หรือ Granular Temperature)

$T$  คือ อุณหภูมิของแก๊ส (เคลวิน)

การคำนวณลักษณะการไหลโดยทั่วไป จำเป็นต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับสมการอนุกรมมวลโมเมนตัมและพลังงานของระบบแก๊สและของแข็ง. ความซับซ้อนของสมการทำให้หาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ได้ยาก เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) จึงนำมาใช้เพื่อเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของระบบสมการพีชคณิตจากนั้นระบบสมการพีชคณิต เพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลข (Numerical Solution) ในระบบแก๊ส-ของแข็งจะแก้สมการของแต่ละวัฏภาคแยกกัน แต่จะสัมพันธ์กันระหว่างวัฏภาคแก๊สกับของแข็งโดยใช้สมการของแรงลาก (Drag Force) ในสมการอนุกรมโมเมนตัม

## 2.2.1 สมการอนุกรมพื้นฐาน (Gidaspow, D., 1994)

สมการอนุกรมมวล

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{U}_g) = 0 \quad (2.20)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{U}_s) = 0 \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1 \quad (2.22)$$

เมื่อ

$\varepsilon_s$  = สัดส่วนของปริมาตรในวัฏภาคของแข็ง

$\varepsilon_g$  = สัดส่วนของปริมาตร ในวัฏภาคแก๊ส

$\rho$  = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$U$  = ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)

$t$  = เวลา (วินาที)

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial(\epsilon_g \rho_g \bar{U}_g)}{\partial t} + \nabla(\epsilon_g \rho_g \bar{U}_g \bar{U}_g) = \nabla \cdot T_g - \epsilon_g \nabla P + \epsilon_g \rho_g \bar{g} - \beta(\bar{U}_g - \bar{U}_s) \quad (2.23)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial(\epsilon_s \rho_s \bar{U}_s)}{\partial t} + \nabla(\epsilon_s \rho_s \bar{U}_s \bar{U}_s) = \nabla \cdot T_s - \epsilon_s \nabla P + \epsilon_s \rho_s \bar{g} - \beta(\bar{U}_s - \bar{U}_g) \quad (2.24)$$

เมื่อ

$T$  = ความเค้นเทนเซอร์ (Tensor Stress)

$\beta$  = สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (Interphase Drag Coefficient)

$P$  = ความดัน (พาสคัล)

สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการแกว่งจากความปั่นป่วน (Turbulent Fluctuating Energy)

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \bar{U}_s \theta_s) \right] = T_s : \nabla \bar{U}_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \theta_s) - \gamma_s - 3\beta \theta_s \quad (2.25)$$

เมื่อ พจน์ทางซ้ายมือของสมการคืออัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานแกว่งสุทธิ

พจน์แรกทางขวามือของสมการคือพลังงานแกว่งเนื่องจากความเค้น

พจน์ที่สองทางขวามือของสมการคือการนำพลังงานแกว่ง

พจน์ที่สามทางขวามือของสมการคือการสูญเสียพลังงานแกว่งเนื่องจากความการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

พจน์ที่สี่ทางขวามือของสมการคือการสูญเสียพลังงานแกว่งเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของแข็งกับแก๊ส

$$\theta_s = \frac{1}{3} \langle U_s'^2 \rangle \quad (2.26)$$

$U_s'$  = ความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ย (Fluctuating Velocity)

## 2.2.2 สมการเสริม

สมการเสริมที่จะนำไปใช้ในสมการหลักมีดังนี้

Arastoopour ใช้ค่า  $\beta$  ที่ให้ความต่อเนื่องตลอดช่วงของสัดส่วนของปริมาตร (Benyahia, S., 2000)

$$\beta = \left( \frac{17.3}{\text{Re}} + 0.336 \right) \frac{\rho_g}{d_p} \left| \vec{U}_g - \vec{U}_s \right| (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_g^{-2.8} \quad (2.27)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_g d_p \left| \vec{U}_g - \vec{U}_s \right|}{\mu_g} \quad (2.28)$$

ความเค้นเทนเซอร์ของวิฤภาคของแก๊ส

$$\tau_g = 2\varepsilon_g \mu_g \left[ \frac{1}{2} [\nabla \vec{U}_g + (\nabla \cdot \vec{U}_g)^T] - \frac{1}{3} (\nabla \vec{v}_g) \mathbf{I} \right] \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\mathbf{I}$  คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์

ความเค้นเทนเซอร์ของวิฤภาคของแข็ง

$$\tau_s = (\varepsilon_s \mu_b \nabla \vec{U}_s - \rho_s) \mathbf{I} + 2\varepsilon_s \mu_s \left[ \frac{1}{2} [\nabla \vec{U}_s + (\nabla \vec{U}_s)^T] - \frac{1}{3} (\nabla \vec{U}_s) \mathbf{I} \right] \quad (2.30)$$

เมื่อ

$\mu_s$  คือ ความดันในวิฤภาคของแข็ง

$\mu_b$  คือ ความหนืดบัลก์

$\mu_s$  คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น

ในความเค้นเทนเซอร์ของวัสดุของแข็งจะมีพจน์ของ  $P_s$ ,  $\mu_b$  และ  $\mu_s$  เพิ่มเข้ามาซึ่งในความเค้นเทนเซอร์ในเฟสแก๊สไม่มี ตัวแปร  $P_s$ ,  $\mu_b$  และ  $\mu_s$  เป็นฟังก์ชันกับ  $\theta_s$

$$P_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1+e)\varepsilon_s^2 g_o \theta_s \quad (2.31)$$

$$g_o = \frac{3}{5} \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (2.32)$$

e คือ สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (Restitution Coefficient)

e=1 เป็นการชนแบบยืดหยุ่นไม่มีการสูญเสียพลังงาน

e=0 เป็นการชนซึ่งจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดระหว่างการชน

0<e<1 เป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งจะสูญเสียพลังงานระหว่างการชน

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

ความหนืดเนื่องจากความเค้น  $\mu_s$

$$\mu_s = \frac{2\mu_{s,dil}}{(1+e)g_o} \left[ 1 + \frac{4}{5} g_o \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p (1+e) g_o \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.33)$$

$$\mu_{s,dil} = \frac{5\rho_s d_p \sqrt{\theta\pi}}{96} \quad (2.34)$$

ความหนืดบัลก์ ( $\mu_b$ ) เป็นตัววัดความต้านทานต่อการอัดและการขยายตัวของอนุภาค

$$\mu_b = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p (1+e) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.35)$$

การกระจายตัวของพลังงาน ( $K_s$ )

$$K_s = \frac{150\rho_s d_p \sqrt{\theta_s T_s}}{384(1+e)g_o} \left[ 1 + \frac{6}{5}g_o \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + 2\varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_o (1+e) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.36)$$

การสูญเสียพลังงานแกว่ง ( $\gamma_s$ )

$$\gamma_s = 3\varepsilon_s^2 \rho_s g_o \theta_s (1-e^2) \left[ \frac{4}{d_p} \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} - \nabla \bar{u}_s \right] \quad (2.37)$$

สมการของ Synclair

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} \quad (2.38)$$

$$\mu_{s,col} = \frac{5\rho_s d_s (\theta_s \pi)^{1/2}}{96\varepsilon_s} \left[ \left( \frac{8\varepsilon_s}{5(2-\eta)} \right) \left( 1 + \frac{8}{5}\eta(3\eta-2)\varepsilon_s g_o \right) + \frac{768}{25\pi} \eta \varepsilon_s^2 g_o \right] \quad (2.39)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{5\rho_s d_s (\theta_s \pi)^{1/2}}{96\varepsilon_s \eta (2-\eta) g_o} \left( \frac{1}{1 + \frac{\zeta}{L}} \right) \left[ \left( 1 + \frac{8}{5}\eta(3\eta-2)\varepsilon_s g_o \right) \right] \quad (2.40)$$

นำสมการ 2.39 และ 2.40 มารวมกัน และจัดรูปสมการ จะได้

$$\mu_s = \frac{\mu_{s,col}}{\eta g_o} \left( \frac{1 + \frac{8}{5}\eta(3\eta-2)\varepsilon_s g_o}{2-\eta} \right) \left[ \frac{8\eta g_o}{5} + \frac{1}{\varepsilon_s \left( 1 + \frac{\zeta}{L} \right)} \right] + \frac{768}{25\pi} \eta \varepsilon_s g_o \mu_{s,col} \quad (2.41)$$

เมื่อ L คือ รัศมีของโรเตอร์

$$\zeta = \frac{d_s}{6\varepsilon_s \sqrt{2}} \quad (2.42)$$

เมื่อ  $\zeta$  คือ ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างอนุภาค (Mean Free Path of Particles)

$$g_o = \frac{\varepsilon_{s,max}^{1/3}}{\varepsilon_{s,max}^{1/3} - \varepsilon_s^{1/3}} \quad (2.43)$$

$$\eta = \frac{1}{2}(1+e) \quad (2.44)$$

$$\mu_b = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_s g_o (1+e) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.45)$$



$$p_s = \rho_s \left( \frac{\varepsilon_s}{1 + \frac{\zeta}{L}} + 4\eta\varepsilon_s^2 g_o \right) \theta_s \quad (2.46)$$

$$k_{o_s} = \frac{25\sqrt{\pi}}{128} \rho_s d_s \left[ \left( \frac{1}{1 + \frac{\zeta}{L}} \frac{8}{\eta g_o} + \frac{96\varepsilon_s}{5} \right) \left( \frac{1 + \frac{12}{5}\eta^2(4\eta - 3)\varepsilon_s g_o}{41 - 33\eta} \right) + \frac{512}{25\pi} \eta\varepsilon_s^2 g_o \right] \sqrt{\theta_s} \quad (2.47)$$

### 2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตที่ผนัง (Boundary Condition at the Wall)

#### เงื่อนไขความเร็วที่ผนัง

สำหรับความเร็วของแก๊สที่ผนังให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (No Slip Condition)

สำหรับความเร็วของอนุภาคของแข็งใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของจอห์นสันและแจคสัน (Johnson and Jackson, 1987) สามารถคำนวณความเร็วของอนุภาคของแข็งที่ผนังได้จาก สมการความเครียดตามแนวเงื่อนไขดังนี้

$$\tau_{s,w} = \frac{\pi\rho_s \bar{n}_{s,w} \psi \sqrt{\theta_s}}{2\sqrt{3} \left( \frac{\alpha_{s,\max}}{\alpha_s} - \frac{\alpha_{s,\max}^{2/3}}{\alpha_s^{2/3}} \right)} \quad (2.48)$$

เมื่อ  $\bar{n}_{s,w}$  = ความเร็วของอนุภาคของแข็งที่ผนัง

$\psi$  = สัมประสิทธิ์สเปคูลาริตี (Specularity Coefficient)

สัมประสิทธิ์สเปคูลาริตี เป็นตัววัดความเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนังซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์หมายความว่าอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเมื่ออยู่ที่ผนัง (Free Slip Condition) ถ้ามีค่าเท่ากับหนึ่งหมายความว่าอนุภาคของแข็งจะหยุดทันทีเมื่ออยู่ที่ผนัง (Non Slip Condition) ถ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ได้บ้างเมื่ออยู่ที่ผนัง (Partial Slip Condition)

#### เงื่อนไขของพลังงานการแกว่งที่ผนัง

พลั๊กซ์ของพลังงานการแกว่งที่ผนังจะเท่ากับการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนังดังสมการของจอห์นสันและแจคสัน (Johnson and Jackson, 1987)

$$q_{w,\kappa} + \frac{\pi \rho_s \bar{n}_s \psi \sqrt{\theta_s}}{2\sqrt{3} \left( \frac{\alpha_{s,\max}}{\alpha_s} - \frac{\alpha_{s,\max}^{2/3}}{\alpha_s^{2/3}} \right)} - \frac{\sqrt{3} \pi \rho_s (1 - e_w^2) \theta_s^{3/2}}{4 \left( \frac{\alpha_{s,\max}}{\alpha_s} - \frac{\alpha_{s,\max}^{2/3}}{\alpha_s^{2/3}} \right)} = 0 \quad (2.49)$$

เมื่อ  $q_{w,\kappa}$  = พลังงานการแกว่งของอนุภาคของแข็งที่ผนัง

$e_w$  = สัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนัง มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

ถ้า  $e_w = 0$  หมายความว่า เมื่ออนุภาคเมื่ออนุภาคของแข็งชนกับผนังจะสูญเสียพลังงานทั้งหมด

$e_w = 1$  หมายความว่า เมื่ออนุภาคของแข็งชนกับผนังจะไม่สูญเสียพลังงาน ความเร็วก่อนชนผนังจะเท่ากับความเร็วหลังจากชนผนัง

$0 < e_w < 1$  หมายความว่า เมื่ออนุภาคของแข็งชนกับผนังจะสูญเสียพลังงานบางส่วน

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Benyahia, et al (2000) ได้สร้างแบบจำลองการไหลของอนุภาคของแข็งและแก๊สของฟลูอิดไอซ์แบบหมุนเวียนโดยใช้ทฤษฎีจลน์สำหรับเฟสอนุภาคของแข็ง แบบจำลองถูกจำลองขึ้นโดยใช้โปรแกรม Fluent อนุภาคของ FCC จะเป็นวิฤภาคของแข็งและอากาศจะเป็นวิฤภาคแก๊ส ซึ่งจำลองเป็นรูปแบบการไหล 2 มิติ สภาวะไม่คงตัว และอุณหภูมิคงที่ สมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมของแต่ละวิฤภาคแก้โดยเทคนิค Finite Volume Numerical ซึ่งแก้สมการของแต่ละวิฤภาคแยกกันแต่จะสัมพันธ์กันระหว่างเฟสของแข็งกับวิฤภาคแก๊สโดยใช้สมการของแรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag Force) ในการทดลองทำการศึกษาโปรไฟล์ความเร็วสัดส่วนปริมาตร ความดัน และ พารามิเตอร์ของเทอร์บิวเลนซ์ ของแต่ละวิฤภาค ผลการคำนวณพบว่า ปริมาตรฟลักซ์ของแข็ง และค่าความดันลดภายในโรเตอร์สอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ผลจากการคำนวณให้ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (Solid Density) บริเวณผนังเบี่ยงเบนไปมากเมื่อเทียบกับการทดลอง

Huilin L., Guangbo Z., Rushan B., Yongjin C., และ Gidaspow D. (2000) พัฒนาแบบจำลองสำหรับการเผาไหม้ถ่านหินของเตา CFB เพื่อทำนายอุณหภูมิของฟลูแก๊สและการกระจายของอนุภาคคาร์บอนในเตาทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมีของห้องเผาไหม้

Sotudeh-Gharebaagh R., Legros R., Chaouki J., and Paris J. (1998) ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองแบบลงรายละเอียดสำหรับการเผาไหม้ถ่านหินในเตาฟลูอิดไอซ์แบบหมุน

เวียน (CFB) แบบจำลองที่นำเสนอรวมรายละเอียดเกี่ยวกับไฮโดรไดนามิกส์พารามิเตอร์ (Hydrodynamic Parameters), แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Model) และข้อมูลด้านจลนพลศาสตร์ที่จำเป็นในการจำลองสถานะการเผาไหม้ของถ่านหินใน CFB ความถูกต้องของแบบจำลองถูกตรวจสอบโดยใช้ ข้อมูล 14 ชุดจากเตาเผาต้นแบบขนาด 0.8 MWth ของ CANMET ผลที่ได้จากการทำแบบจำลองจะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

Hrenya et al (1997) ได้อธิบายความสำคัญในการพิจารณาสัดส่วนของปริมาตรของอนุภาคของแข็งในระบบเมื่อเป็นการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ การดูโมเมนต์สำหรับการไหลแบบ Fully-Developed ในระบบแก๊ส-ของแข็งจะพิจารณาการแพร่ซึ่งรวมเอาความดันใน Laminar และ Turbulent ความดันลด และ Drag Force สำหรับการไหลแบบเจือจาง (Dilute Flow) Drag Force จะมีค่าน้อยกว่าแรงชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคของแข็งอยู่น้อย ดังนั้น Hrenya et al ได้สรุปว่ารายละเอียดของเทอร์บิวเลนต์ในพจนการแพร่มีความสำคัญ แต่ในกรณีของการไหลแบบหนาแน่น (Dense Flow) จะแตกต่างจากการไหลแบบเจือจาง เพราะว่ามีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่มาก อิทธิพลของ Drag Force มีผลมากดังนั้นแรงที่มีอิทธิพลมากในกระบวนการก็คือ ความดันลดและ Drag Force ในขณะที่พจนการแพร่มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ โดยทั่วไปสำหรับการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์จะมีความสำคัญเมื่อเป็นการไหลแบบเจือจางมากๆ และไม่สำคัญสำหรับการไหลแบบหนาแน่น

Samuelsberg A. และ Hjertager B. H. (1995) ศึกษาผลของการกระจายความเร็วของอนุภาคของแข็งในแนวแกนและแนวรัศมีในฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้เทคนิค LDA (Laser Doppler Anemometry) วัดความเร็วของอนุภาคของแข็ง และใช้แบบจำลองการไหล 2 มิติ 2 เฟส มาทำนายการกระจายความเร็ว ผลการทำนายเกิดการไหลแบบแกนวงแหวน (Core Annulus Flow) ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลอง ค่าจากการทำนายความเร็วในแนวแกนสอดคล้องอย่างดีกับผลจากการทดลอง แต่ค่าจากการทำนายความเร็วในแนววงแหวนบริเวณใกล้กับผนังมีค่ามากเกินไปเมื่อเทียบกับผลจากการทดลอง

Sengupta S. P. และ Basu P. (1991) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหม้อไอน้ำฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน โดยคำนึงถึงความยืดหยุ่นในการใช้งาน ซึ่งในแบบจำลองได้พิจารณาเกี่ยวกับไฮโดรไดนามิกส์, การถ่ายโอนความร้อน, ปฏิกิริยาสำหรับถ่านหิน และการจับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ผลที่ได้พบว่าสัดส่วนช่องว่างจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของเบด, การกระจายตัว

ของถ่านชาร์มีทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี, ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลงตามแนวรัศมี และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น

Arena และ คณะ (1990) ได้สร้างแบบจำลองเตาเผาชนิดฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยแบ่ง riser ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 แทน Dense Zone ส่วนที่ 2 แทน Intermediate Transition Zone และส่วนที่ 3 แทน Dilute Zone ซึ่งแต่ละส่วนจะแทนด้วยบล็อกปฏิบัติการ โดยสมมติให้มีการผสมกันของอนุภาคของแข็งอย่างดี และให้เกิดมีการไหลแบบ Plug Flow และไฮโคลนเป็นบล็อกปฏิบัติการที่ 4 เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าสอดคล้องกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการพัฒนาแบบจำลองไรเซอร์

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์เพนเทียมเฟิร์ ความเร็ว 1.7 กิกะเฮิรตซ์
- 3.1.2 โปรแกรม Fluent รุ่น 4.5 และโปรแกรม Gambit รุ่น 1.3

#### 3.2 วิธีการพัฒนาแบบจำลองไรเซอร์

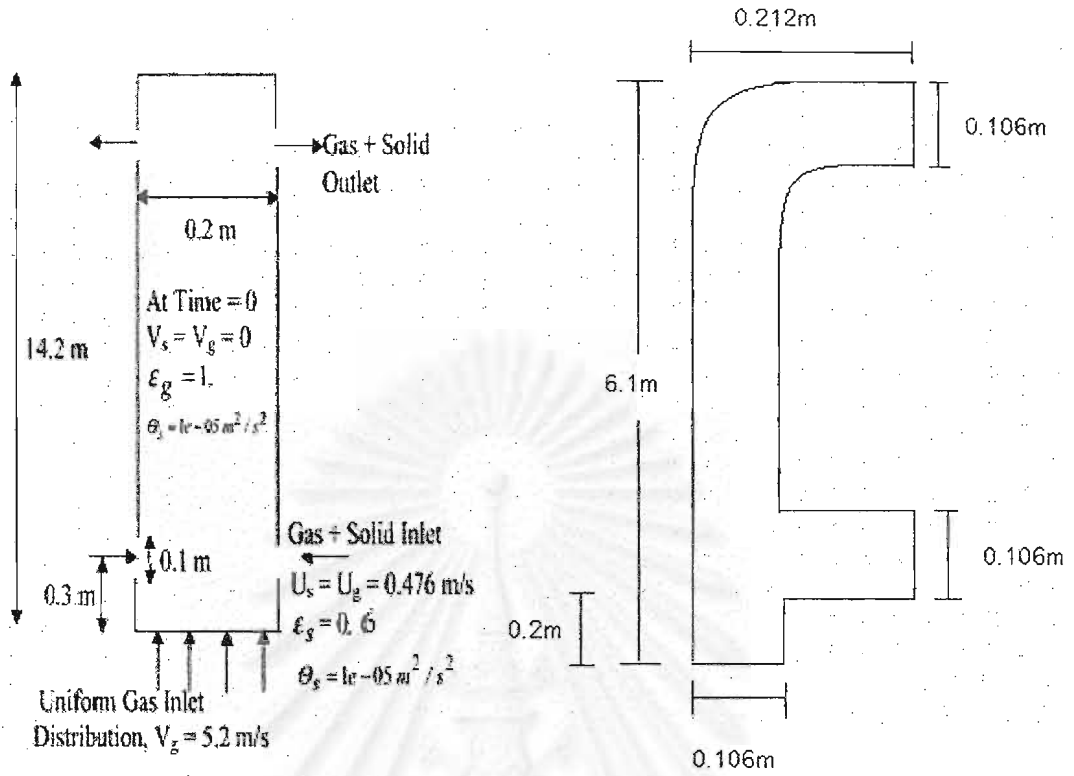
การพัฒนาแบบจำลองไรเซอร์เพื่อทำการจำลองอุทกพลศาสตร์บนโปรแกรม Fluent แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิต Geometric Modeling
2. ขั้นตอนการแก้สมการอนุรักษ์มวล พลังงาน และโมเมนตัม เพื่ออธิบายปรากฏการณ์อุทกพลศาสตร์

ขั้นตอนที่ 1 ผู้วิจัยจะต้องสร้างรูปทรงทางเรขาคณิตของอุปกรณ์ที่ต้องการจำลองมาแปลงให้อยู่ในรูปแบบลักษณะ Computer Graphic โดยโปรแกรม Fluent มีเครื่องมือในการดำเนินการดังกล่าวคือโปรแกรม Gambit ขั้นตอนการสร้างรูปนั้นอธิบายไว้ใน 3.2.1

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อผู้วิจัยได้สร้างรูป Computer Graphic สำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการทำการจำลองสภาวะการณ์แล้ว ผู้วิจัยจะต้องถ่ายโอน Gambit File มาใน Fluent Environment จากนั้นจะต้องเลือกแบบจำลองที่จะใช้และกำหนดสภาวะขอบเขตของกระบวนการดังรายละเอียดใน 3.2.2 ก่อนจะเริ่มดำเนินการแก้สมการได้

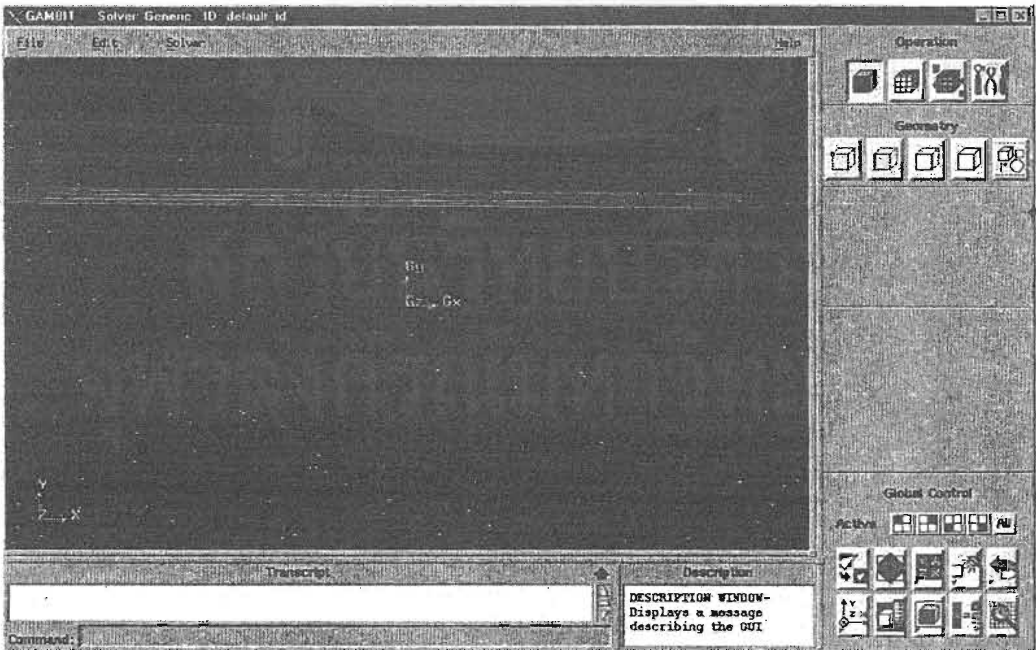
3.2.1 การสร้างรูปไรเซอร์ให้มีขนาดตามเครื่องมือทดลองของ ดร.บุญรอด (Sajjakulnukit, 1999) และ Benyahia (2000) ดังรูปที่ 3.1 ด้วยโปรแกรม Gambit



รูปที่ 3.1 โรเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัย (ก) Benyahia (ข) ดร.บุญรอด (Sajakulnukit, 1999)

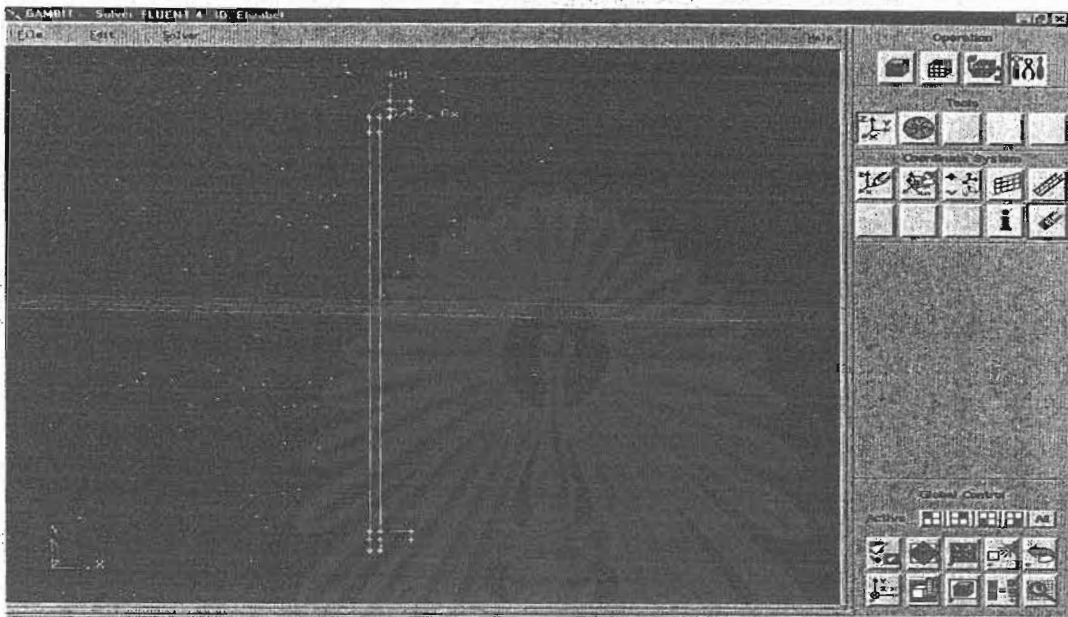
ในส่วนของ การสร้างรูปแบบการจำลองสองมิติของโรเตอร์ด้วยโปรแกรม Gambit ในที่นี้ขอ ยกตัวอย่างเฉพาะการจำลองจากโรเตอร์ในรูป 3.1(ข)

1. เปิดโปรแกรม Gambit และเลือกการสร้างรูปแบบสองมิติ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โปรแกรม Gambit รุ่น 3.1

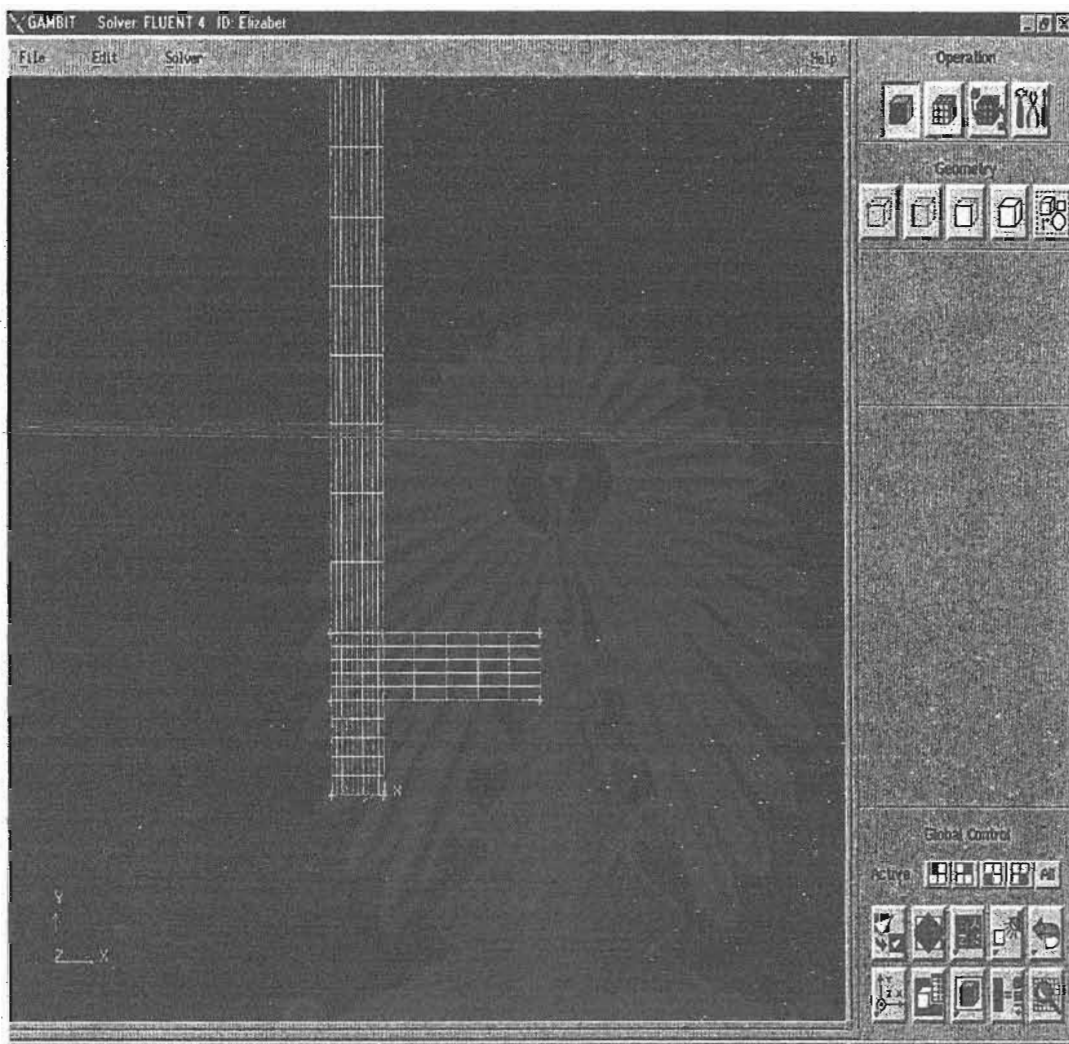
2. เลือกระบบพิกัดอ้างอิงแบบพิกัดฉาก
3. ระบุขนาดเส้นผ่านและความสูงของโรเตอร์ เพื่อสร้างรูปโรเตอร์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การสร้างรูปโรเตอร์ในโปรแกรม Gambit

4. ทำการ เมชรูป (Mesh) ซึ่งก็คือการแบ่งรูปออกเป็นส่วนย่อยเพื่อใช้ในการคำนวณภายในโปรแกรม ดังรูปที่ 3.3 ในงานวิจัยนี้ทำการเมชแกน X 17 ช่อง และแกน Y 82 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 โรเซอริที่ทำการเมช ในโปรแกรม Gambit

5. ใส่ข้อมูลระบุตำแหน่งการจำลองสถานการณ์เช่น ระบุตำแหน่งทางเข้า ทางออก และผนังท่อ
6. ทำการบันทึกรูปภาพได้ข้อมูลนามสกุล grid

### 3.2.2 การจำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของของไหลในโรเซอริด้วยโปรแกรม Fluent

โปรแกรม Fluent เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณสถานะการไหลเชิงพลวัตของของไหล โดยใช้ทฤษฎีทางพลศาสตร์ของของไหลเชิงการคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) เป็นกลไกหลักในการพัฒนาโปรแกรม ในการใช้โปรแกรม Fluent ผู้ใช้จะต้องมีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลและทราบ



ถึงทฤษฎีใหม่ทางการไหลหลายเฟส เนื่องจากโปรแกรม Fluent มีทางเลือกให้ผู้ใช้ต้อง  
ระบุในรายละเอียดอีกมาก ดังเสนอในตาราง

1. เปิดโปรแกรม Fluent ดังรูปที่ 3.5

```

Fluent [V4]
File Define Solve Slices Display Plot Report Help
(*)- READING LAYOUT FILE
(*)- FILENAME ALIASED TO D:\Fluent.Inc\fluent4.5\lib\DFLTINS
*****
*
*          FLUENT (V4.56) Fluid Flow Modeling
*
* Copyright (C) 1984, 1989, 1991, 1995 by Fluent Inc.
* All rights reserved. Use of this code is subject
* to the terms of the software license agreement.
* Use, reproduction, or disclosure by the U.S.
* Government is subject to restrictions set forth
* in Government Contracts with Fluent Inc. as
* governed by FAR 52.227.19(c)(2).
*
*          FLUENT is a registered trademark of:
*
*          Fluent Inc.
*          Centerra Resource Park
*          18 Cavendish Court
*          Lebanon, New Hampshire 03766 USA
*          (800) 445-4454
*
*****
*          Number of Cells and Species Dynamically Allocated
*****

(*)- FILENAME ALIASED TO D:\Fluent.Inc\fluent4.5\lib\HELPPFILE

Current fluent usage:
  1. g99sombat_k@ct_rsh15 Thu Apr 24 14:48 ct_rsh15
  2. g99sombat_k@ct_rsh15 Thu Apr 24 15:01 ct_rsh15
License for fluent expires 20-jun-2003.

COMMANDS AVAILABLE FROM *MAIN*:
  ALLOCATE-MEMORY      READ-CASE-FILE      READ-CASE-DATA
  EXPERT               FORMATTED-FILES    SETUP-1
  OPTIONS              VIEW-GRAPHICS      QUIT
  HELP
ENTER HELP (COMMAND) FOR MORE INFORMATION.
(*MAIN*)-

```

รูปที่ 3.5 โปรแกรม Fluent รุ่น 4.5

2. เรียกข้อมูลรูปภาพที่สร้างจากโปรแกรม Gambit จากขั้นตอนที่ 3.2.1
3. เลือกหน่วยที่ใช้ในการคำนวณแบบระบบมาตราเมตริกซ์ (SI)
4. เลือกภาวะที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เรเซอร์มีดังนี้

— การกำหนดวิภาคเป็นสองวิภาค คือ ของแข็ง และ แก๊ส

- การกำหนดพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน
- เลือกรวบรวมการคำนวณแบบพลวัต
- กำหนดช่วงเวลาการคำนวณในโปรแกรม 0.0005 วินาที
- ในทุกๆ ช่วงเวลาการคำนวณในโปรแกรมกำหนดให้มีการคำนวณซ้ำมากที่สุด (Maximum Iteration) 100 รอบ จนกว่าค่าของตัวแปรที่คำนวณ เช่น ความดัน ความเร็ว มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าของตัวมันเองก่อนหน้าหนึ่งรอบ ถ้ามีค่าน้อยกว่า 0.1% ก็จะสามารถคำนวณจบได้

5. กำหนดภาวะขอบเขตของโรเซอ์แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ภาวะขอบเขตการจำลองสถานการณ์โรเซอ์

	ความเร็วในแนว แกนเอ็กซ์ (m/s)	ความเร็วในแนว แกนวาย (m/s)	สัดส่วนปริมาตร (%)	Slip condition at walls
Inlet 1				
แก๊ส	-*	-*	-*	-**
ของแข็ง	-*	-*	-*	-**
Inlet 2				
แก๊ส	-*	-*	-*	-**
ของแข็ง	-*	-*	-*	-**

หมายเหตุ \* ข้อมูลที่ต้องป้อนให้โปรแกรม Fluent

\*\* ผู้ใช้โปรแกรมต้องกำหนดว่าจะให้มี slip condition ที่ผนังหรือไม่

6. กำหนดสมบัติของของไหลในแต่ละวัฏภาคภายในโรเซอ์ เช่นการกำหนดสมบัติทางกายภาพของสารในระบบ
7. กำหนดการจำลองสถานการณ์โรเซอ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมภายในโรเซอ์

8. เก็บข้อมูลปริมาณของแข็งภายในไรเซอร์ ที่ระยะตำแหน่งพื้นที่หน้าตัดต่างๆ และที่ตำแหน่งความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร (การเลือกตำแหน่งการเก็บข้อมูลที่ค่าดังกล่าว เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ผู้วิจัยมีข้อมูลในการทำการทดลองระบบจริง)

### 3.3 กระบวนการ 2 กระบวนการที่ใช้เพื่อการศึกษาแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์

ไรเซอร์เป็นถึงปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในกระบวนการแครกกิง (Craking) คือกระบวนการแตกน้ำมันโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลเล็ก หรือใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์เตาเผาในอุตสาหกรรมโรงงานผลิตไฟฟ้า ภายในไรเซอร์ประกอบไปด้วยสาร 2 วัฏภาคคือ วัฏภาคของแข็ง (ในกระบวนการแครกกิงคือสารตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เตาเผาวัฏภาคของแข็งคือ ททราย) และ วัฏภาคแก๊ส

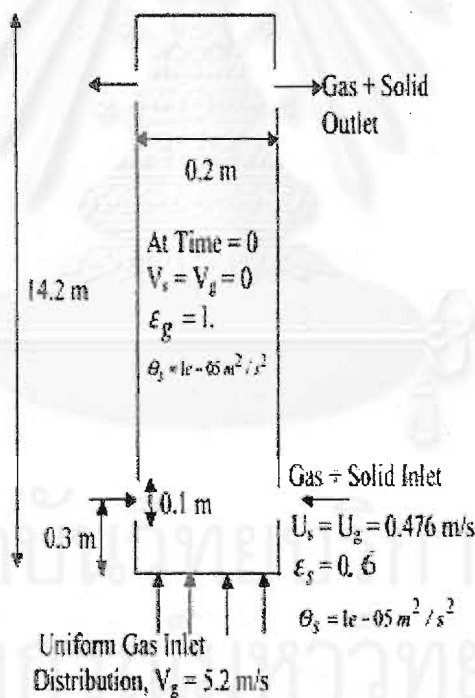
ในกระบวนการแครกกิงประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันโมเลกุลใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราการกระจายตัวของสารตัวเร่งปฏิกิริยาภายในไรเซอร์ ซึ่งพฤติกรรมของการกระจายตัวของของแข็งภายในไรเซอร์มีความซับซ้อนมาก เนื่องจากภายในไรเซอร์จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Backmixing ทำให้ยากต่อการทำนายพฤติกรรมของการกระจายตัวของวัฏภาคของแข็งที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาภายในไรเซอร์ ซึ่งความเข้าใจพฤติกรรมของการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในไรเซอร์จะช่วยให้ผู้ผลิตสามารถกำหนดประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาภายในกระบวนการได้ ดังนั้นการศึกษาดูพฤติกรรมของการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในไรเซอร์จึงเป็นงานวิจัยที่มีผู้คนให้ความสนใจในการศึกษาเพื่อทำนายพฤติกรรมภายในถึงปฏิกรณ์ชนิดนี้ ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ตามค่าเป้าหมาย สำหรับกรณีที่ใช้ไรเซอร์เป็นเตาเผารกระจายตัวของทรายหรือวัฏภาคของแข็งภายในไรเซอร์แสดงถึงการกระจายตัวของความร้อนภายในเตาเผาซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการให้ความร้อนของเตาเผานั้นเอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษหาแบบจำลองพฤติกรรมภายในไรเซอร์ที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม Fluent เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของการกระจายตัวของวัฏภาคของแข็งในไรเซอร์โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้

3.3.1 เปรียบเทียบพฤติกรรมของการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในไรเซอร์ ด้วยแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ด้วยโปรแกรม Fluent รุ่น 4.5 กับข้อมูลอ้างอิงของ Benyahia ที่สร้างแบบจำลองสถานการณ์ไรเซอร์ที่ภาวะเงื่อนไขในกระบวนการเหมือนกัน แต่ทำการ Mesh รูปภาพต่างกัน

โดยในงานวิจัยนี้ทำการ Mesh รูปเท่ากันทุกจุดในการคำนวณ (Uniform) ส่วนงานวิจัยของ Benyahia ทำการ Mesh แบบไม่สม่ำเสมอทั้งรูป (Nonuniform) รายละเอียดระบบการจำลองสถานการณ์มีดังนี้

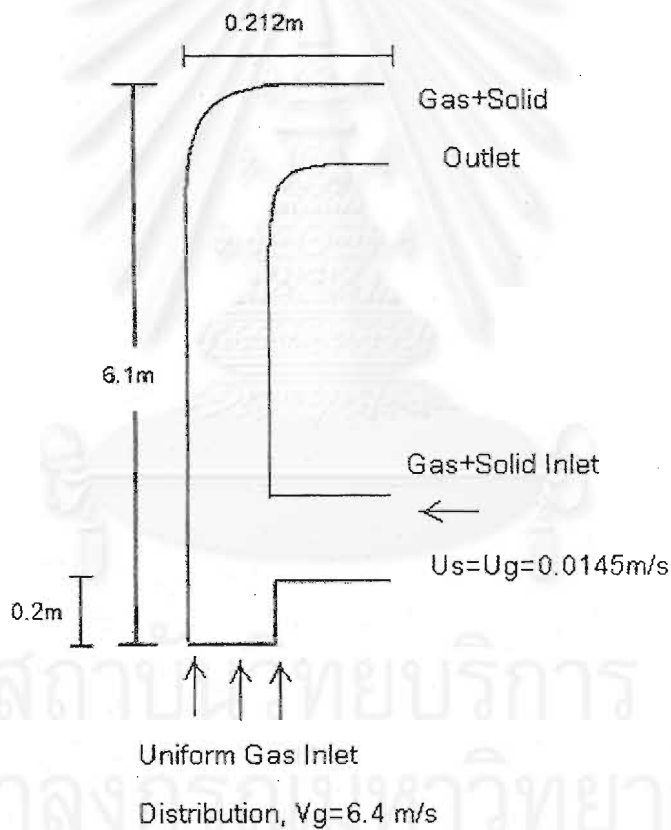
- วัสดุของแข็งเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด FCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 ไมโครเมตร
- ความหนาแน่นของสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด FCC 1712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ฟลักซ์อนุภาคของแข็ง 489 กิโลกรัมต่อพื้นที่หน้าตัดต่อวินาที
- ความหนาแน่นของแก๊สหรืออากาศ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ความหนืดของแก๊ส  $2 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที
- ความเร็วของแก๊ส 5.2 เมตรต่อวินาที
- ขนาดของการ mesh  $18 \times 210 = 3780$  cell
- รูปทรงโรเตอร์กรณีจำลองสถานการณ์โรเตอร์ตาม Benyahia ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โรเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ตามข้อมูลอ้างอิงของ Benyahia

3.3.2 การสร้างแบบจำลองสถานการณ์โรเตอร์ เพื่ออธิบายพฤติกรรมกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงของดร.บุญรอด รายละเอียดในการจำลองสถานการณ์มีดังนี้

- รัศมีของแข็งเป็นทราย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 129 ไมโครเมตร
- ความหนาแน่นของทราย 2651 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ฟลักซ์อนุภาคของแข็ง 23 กิโลกรัมต่อพื้นที่หน้าตัดต่อวินาที
- ความหนาแน่นของแก๊สหรืออากาศ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ความหนืดของแก๊ส  $2 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที
- ความเร็วของแก๊ส 6.4 เมตรต่อวินาที
- ขนาดของการ mesh  $17 \times 82 = 1394$  cell
- รูปทรงโรเตอร์กรณีจำลองสถานการณ์ภาวะการดำเนินการตามข้อมูลของดร.บุญรอด ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โรเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของทรายตามข้อมูลดร. บุญรอด

3.3.3 ศึกษาพารามิเตอร์การกำหนดพฤติกรรมไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน  $k - \epsilon$  ในการสร้างแบบจำลองโรเตอร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทราย

3.3.4 ศึกษาชนิดของสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์โรเซอร์ 2 สมการ กรณีทำนายพฤติกรรมกระจายตัวของทราย รายละเอียดดังนี้

1. กรณีเลือกพารามิเตอร์กำหนดพฤติกรรมไหลแบบราบเรียบ
  - สมการ Gidaspow
  - สมการ Synclair
2. กรณีเลือกพารามิเตอร์กำหนดพฤติกรรมไหลแบบปั่นป่วน  $k-\epsilon$ 
  - สมการ Gidaspow
  - สมการ Synclair



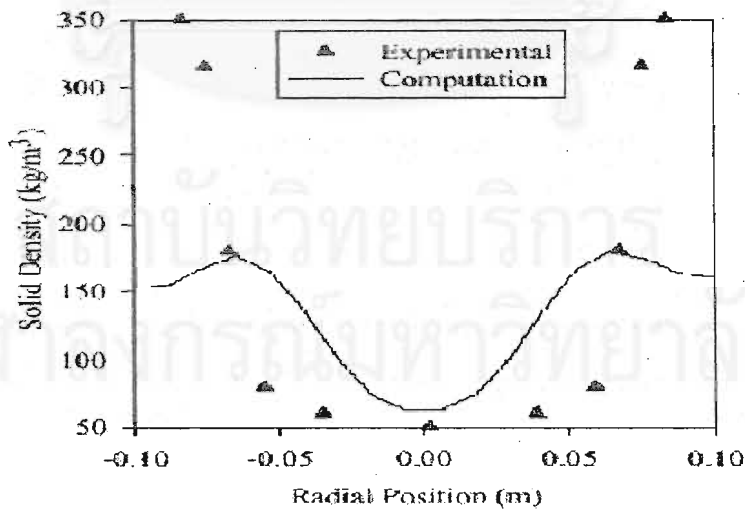
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง**

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์โรเซอร์ เพื่อทำนายพฤติกรรมของแข็งภายในระบบด้วยโปรแกรม Fluent จำเป็นต้องพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์หลายตัว ซึ่งการกำหนดพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันส่งผลให้ผลการจำลองสถานการณ์แตกต่างกันหรือบางกรณีอาจทำให้ผลการจำลองที่ได้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของแข็งภายในระบบได้อย่างถูกต้อง แต่ถ้าผู้ใช้โปรแกรมมีข้อมูลในการจำลองสถานการณ์ที่มากเพียงพอ และสามารถวิเคราะห์เพื่อเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม แบบจำลองระบบที่ได้จะสามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของแข็งในโรเซอร์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นข้อมูลและความรู้ในการวิเคราะห์ระบบเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Fluent

**4.1 การทดสอบความถูกต้องของการใช้โปรแกรม Fluent โดยการจำลองโรเซอร์ตามที่เสนอไว้ในผลงานวิจัยของ Benyahia**

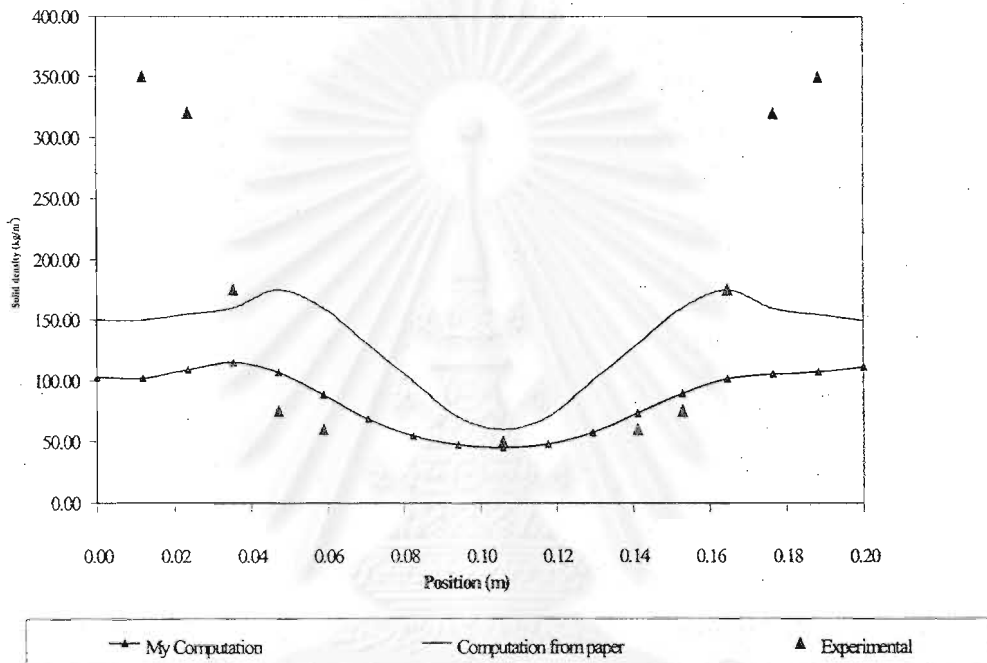
การตรวจสอบความถูกต้องของการใช้โปรแกรม Fluent หรือการจำลองสถานการณ์ ทำโดยการสร้างแบบจำลองโรเซอร์ตามข้อมูลอ้างอิงของ Benyahia ในโปรแกรม Fluent รุ่น 4.5 ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองสถานการณ์ของ Benyahia แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอร์ที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ด้วยสมการ Gidaspow ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที

จากรูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอร์ บริเวณผนังของโรเซอร์ทั้งสองข้างจะมีปริมาณของแข็งอยู่มาก ในขณะที่บริเวณแกนกลางโรเซอร์จะมีปริมาณของแข็งอยู่น้อย ลักษณะการกระจายตัวของของแข็งดังรูป 4.1 เรียกว่า การเกิด Core-Annulus

Solid density distribution in the riser at 3.9 m



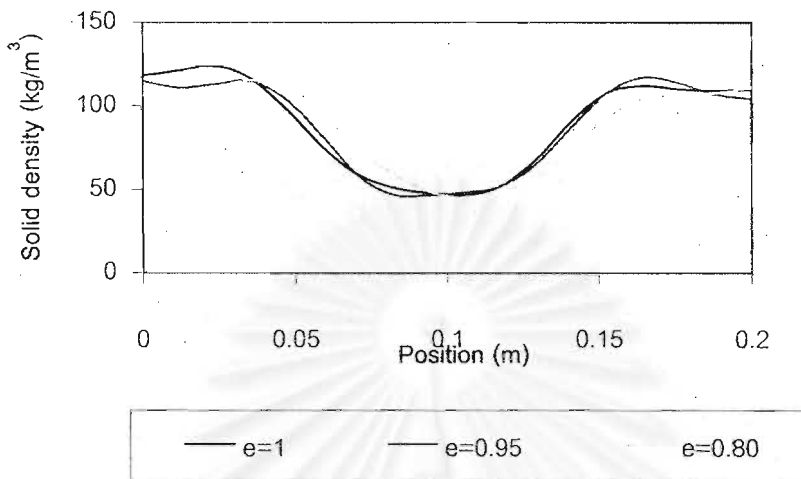
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นใหม่ แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอร์ที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ด้วยสมการ Gidaspow ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที

จากกราฟแสดงผลการกระจายตัวของของแข็งที่ทำการสร้างแบบจำลองตามข้อมูลของ Benyahia ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที พบว่ากราฟที่ได้มีพฤติกรรมคล้ายข้อมูลการคำนวณอ้างอิง โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณกับข้อมูลการคำนวณอ้างอิง 18 จุดมีค่า 38.21% การดำเนินการคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์ความเร็ว 1.7 GHz ใช้เวลาในการคำนวณ 1 สัปดาห์

ดังนั้นผู้วิจัยจึงลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์โดยเปลี่ยนค่า  $e$  คือ สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 (อธิบายในหน้า 18) จากเดิมมีค่าเท่ากับ 0.95 เป็น 0.80 และ 1.0 ผลการคำนวณแสดงในรูป 4.3



## Solid density distribution in the riser at 3.9 m

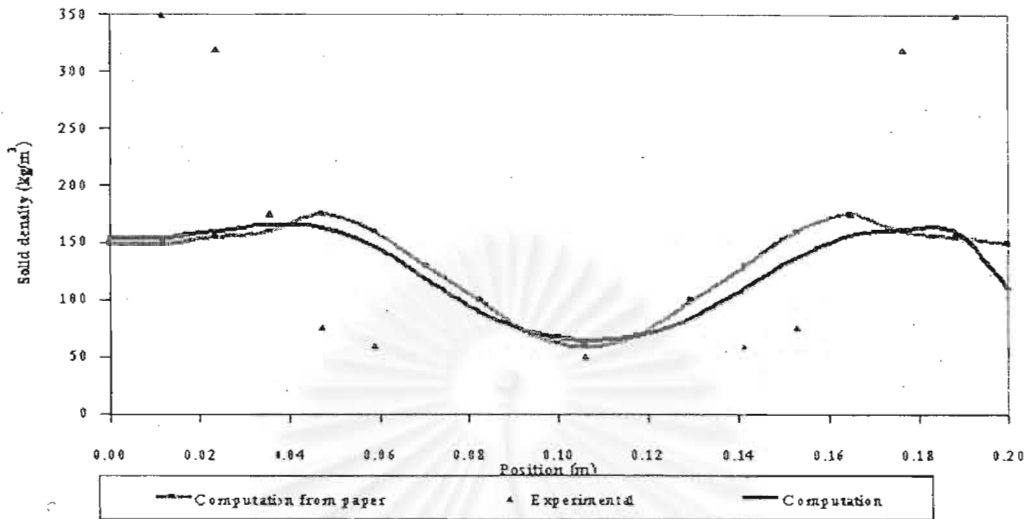


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นใหม่ แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในไโรเซอร์ที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ด้วยสมการ Gidaspow เมื่อเปลี่ยนค่า  $e$  จาก 0.95 เป็น 0.80 และ 1.0 ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที

จากกราฟแสดงผลการกระจายตัวของของแข็งที่ทำการสร้างแบบจำลองตามข้อมูลของ Benyahia ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที พบว่าเมื่อเปลี่ยนค่า  $e$  จาก 0.95 เป็น 0.80 และ 1.0 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณกับข้อมูลการคำนวณอ้างอิง 18 จุดมีค่า 34.30% และ 32.51% ตามลำดับ ซึ่งผลของความหนาแน่นของของแข็งบริเวณผนังของไโรเซอร์ของข้อมูลการคำนวณอ้างอิงมีค่า  $150 \text{ kg/m}^3$  ในขณะที่ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนค่า  $e$  มีค่าประมาณ  $120 \text{ kg/m}^3$  ดังนั้นการเปลี่ยนค่า  $e$  มีผลกระทบต่อกระจายตัวของของแข็งภายในไโรเซอร์ที่ระดับความสูง 3.9 เมตร

จากนั้นผู้วิจัยได้ลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ อีก เช่น ค่า  $e_w$  คือ สัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนัง มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 (อธิบายในหน้า 21) และค่า  $\psi$  คือ สัมประสิทธิ์สเปคูลาริตี เป็นตัววัดความเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนังซึ่งมีค่าระหว่าง 0 กับ 1 (อธิบายในหน้า 20) พบว่ามีผลกระทบต่อกระจายตัวของของแข็งภายในไโรเซอร์ที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ต่อมาผู้วิจัยได้สืบค้นข้อมูลวิทยานิพนธ์ของ Benyahia แล้วศึกษาข้อมูลพบว่าบทความวิจัยของ Benyahia พิมพ์ค่า  $\mathcal{E}_s=0.40$  เป็นข้อมูลที่ผิด ซึ่งค่าที่ถูกต้องในวิทยานิพนธ์คือ  $\mathcal{E}_s=0.60$  ภายหลังจากที่ผู้วิจัยเปลี่ยนค่าจาก  $\mathcal{E}_s=0.40$  เป็น  $\mathcal{E}_s=0.60$  ผลการคำนวณแสดงดังรูป 4.4

Solid density distribution in the riser at 3.9 m.



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นมาใหม่ แสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในไรเซอร์ที่ระดับความสูง 3.9 เมตร ด้วยสมการ Gidaspow ที่เวลาเฉลี่ย 15-40 วินาที

จากกราฟแสดงผลการกระจายตัวของของแข็งที่ทำการสร้างแบบจำลองตามข้อมูลของ Benyahia พบว่ากราฟที่ได้มีพฤติกรรมคล้ายข้อมูลอ้างอิงอย่างมาก โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณกับข้อมูลการคำนวณอ้างอิง 18 จุดเท่ากับ 7.11 % ผลการคำนวณมีค่าความผิดพลาดน้อยลงมากเนื่องจากการเพิ่มค่า  $\epsilon_s$  ซึ่งได้แก่การเพิ่มสัดส่วนของปริมาตรของแข็งที่ทางเข้าไรเซอร์ให้สอดคล้องค่าที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์ของ Benyahia ถ้าค่า  $\epsilon_s$  มีค่ามากแสดงว่ามีปริมาณของแข็งป้อนเข้าไรเซอร์มากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของการกระจายตัวของของแข็งภายในไรเซอร์มีค่ามากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนค่าจาก  $\epsilon_s=0.40$  เป็น  $\epsilon_s=0.60$  จึงมีผลอย่างมากต่อการกระจายตัวของของแข็งภายในไรเซอร์

ผลการคำนวณที่ดำเนินการโดยผู้วิจัยมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณซึ่งถูกนำเสนอในบทความวิจัยของ Benyahia ดังแสดงโดยเส้นทึบและเส้นบางในรูปที่ 4.4 จากการจำลองกระบวนการเลียนแบบเอกสารงานวิจัยของ Benyahia ทำให้ผู้วิจัยมั่นใจได้ว่า มีความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องในการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีความยืดหยุ่นสูง มีฟังก์ชันและทางเลือกมาก

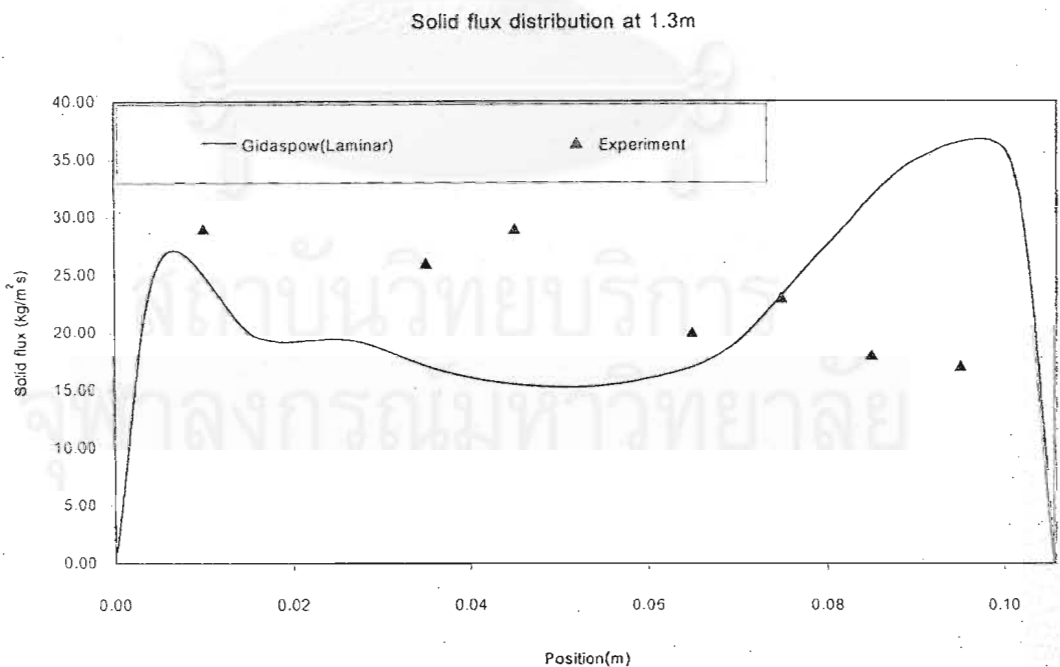
4.2 การศึกษาเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับสภาวะดำเนินการในงานวิจัย ดร.บุญรอด การสร้างแบบจำลองสถานการณ์โรเซอร์ เพื่ออธิบายพฤติกรรมการกระจายตัวของทราย ภายในโรเซอร์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงของ ดร.บุญรอด ผลการจำลองแสดง ดังรูปที่ 4.5-4.16 ผู้วิจัยได้ดำเนินการ 4 แบบย่อยมีรายละเอียดดังนี้ คือ

- การจำลองแบบจำลองการไหลราบเรียบด้วยสมการ Gidaspow และสมการ Sinclair
- การจำลองแบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $k-\epsilon$  ด้วยสมการ Gidaspow และสมการ Sinclair

4.2.1 จำลองสถานการณ์โรเซอร์ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการไหลราบเรียบ เสนอโดย Gidaspow และใช้สมการ Drag ของ Arastoopour คือ

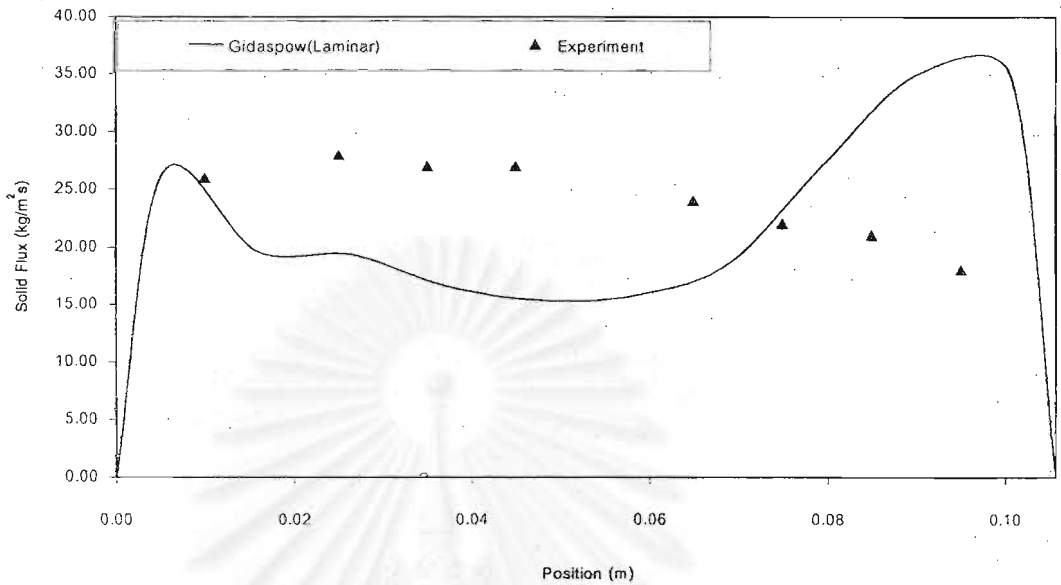
$$\beta = \left( \frac{17.3}{\text{Re}} + 0.336 \right) \frac{\rho_g}{d_p} \left| \bar{U}_g - \bar{U}_s \right| (1 - \epsilon_g) \epsilon_g^{-2.8}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_g d_p \left| \bar{U}_g - \bar{U}_s \right|}{\mu_g}$$



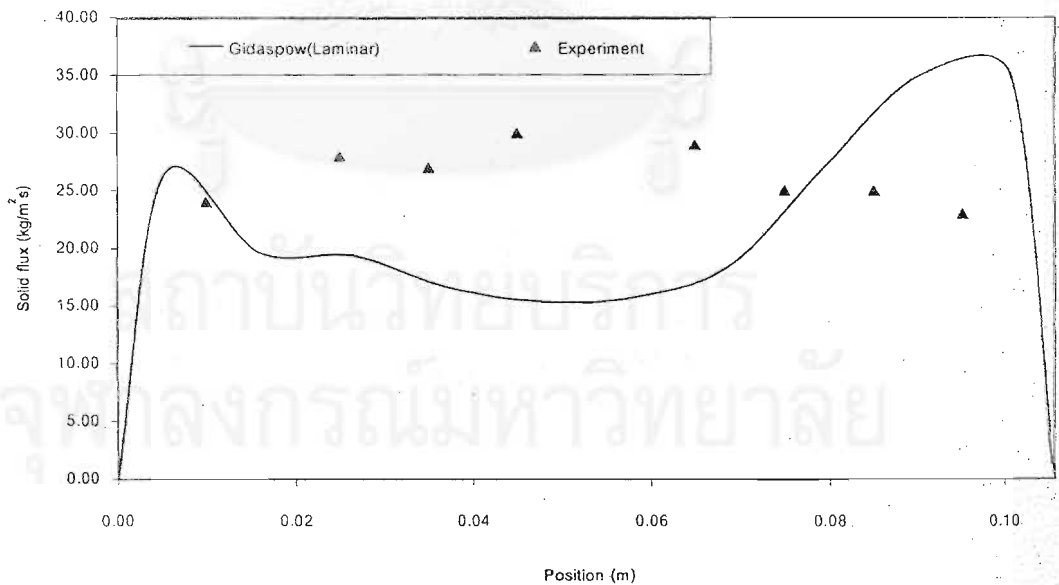
รูปที่ 4.5 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอร์ที่ระดับความสูงของโรเซอร์ 1.3 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Gidaspow

Solid flux distribution at 4.2 m



รูปที่ 4.6 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูงของโรเตอร์ 4.2 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Gidaspow

Solid flux distribution at 5.4 m



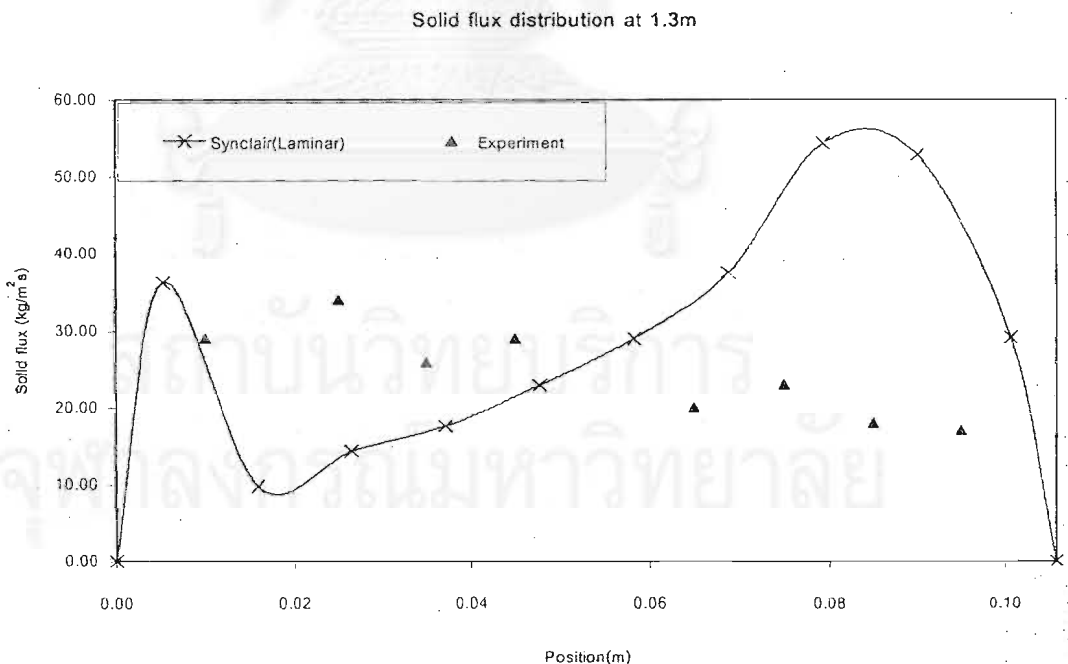
รูปที่ 4.7 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูงของโรเตอร์ 5.4 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Gidaspow

รูป 4.5 – 4.7 เป็นผลการคำนวณฟลักซ์ของแข็งในโรเตอร์ ที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ตามลำดับเมื่อเวลาการจำลองกระบวนการผ่านไป 16 วินาที จากกราฟผลการทดลองพบว่าแบบจำลองทำนายพฤติกรรมของทรายในโรเตอร์ได้แนวโน้มที่แตกต่างจากผลการทดลองทุกระดับความสูงที่ค่าต่างกัน แบบจำลองทำนายค่าต่ำกว่าความเป็นจริงทุกระดับความสูงในช่องกลางโรเตอร์และให้ค่าสูงกว่าผลการทดลองในช่วงบริเวณผนังของโรเตอร์ซึ่งผลที่ได้ตรงกันข้ามกับการทดลอง โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจากการคำนวณจากข้อมูล 8 จุดที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร มีค่า 41.2% 37.32% และ 34.29% ตามลำดับ

4.2.2 จำลองสถานการณ์โรเตอร์โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการไหลราบเรียบ เสนอโดย Synclair และใช้สมการ Drag ของ Wen และ Yu คือ

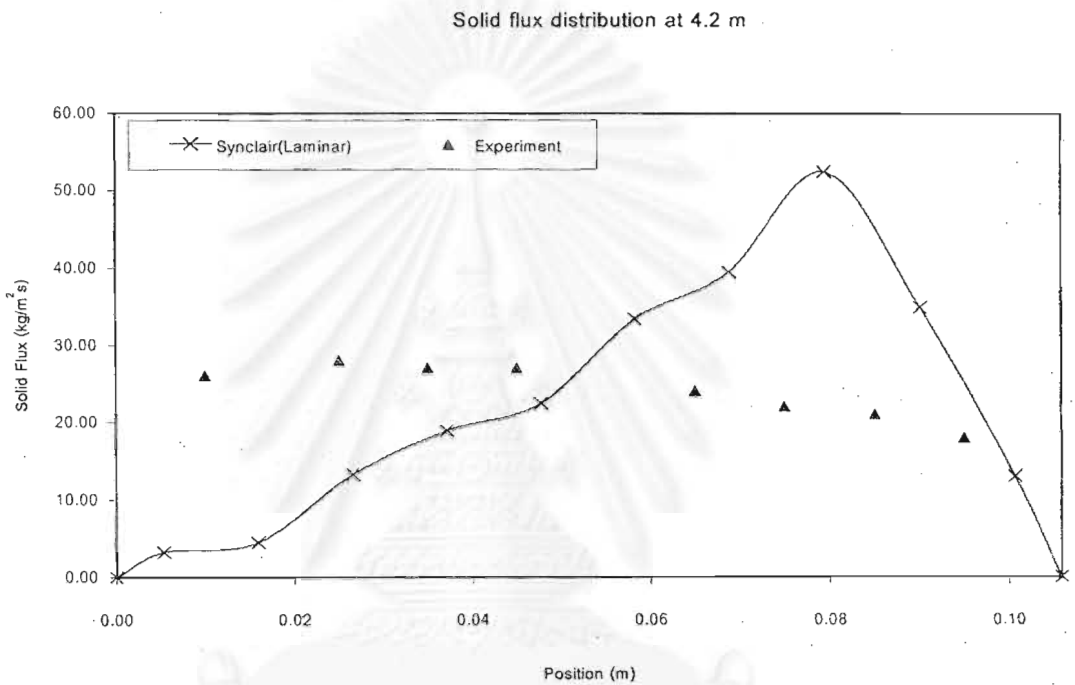
$$\beta = \frac{18}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}) \frac{\rho_g}{d_p} |U_g - U_s| (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_g^{-2.7}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_g d_p |\bar{U}_g - \bar{U}_s|}{\mu_g}$$

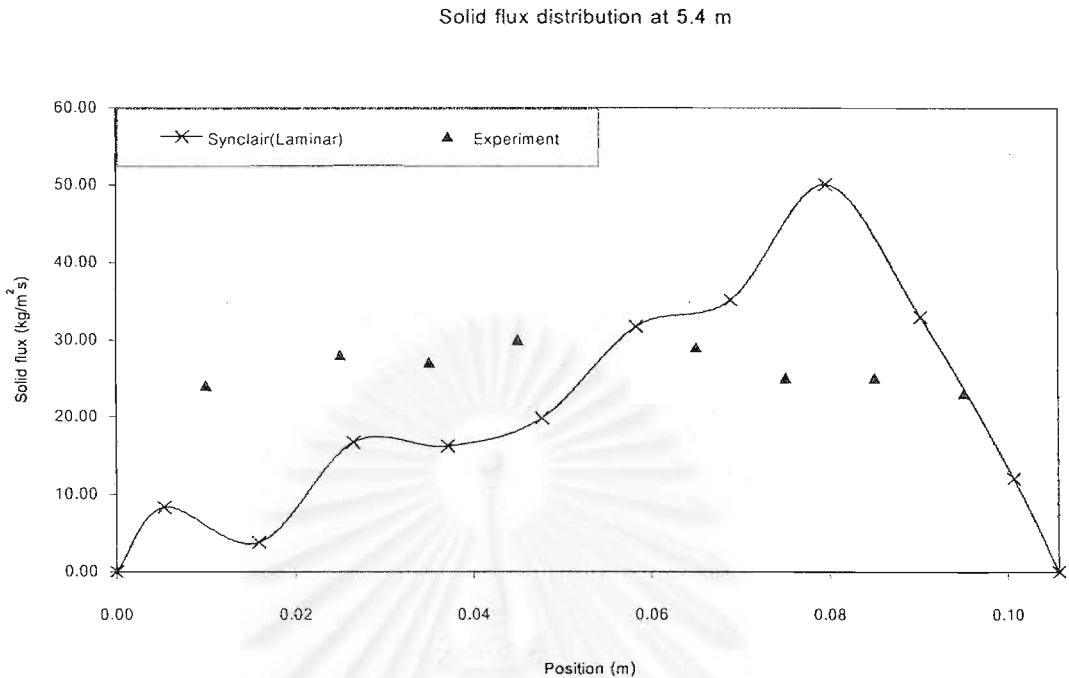


รูปที่ 4.8 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูงของโรเตอร์ 1.3 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Synclair

รูป 4.8 เป็นผลการคำนวณฟลักซ์ของแข็งในไรเซอร์ ด้วยสมการ Synclair เมื่อเวลาการจำลองกระบวนการผ่านไป 16 วินาที จากกราฟผลการทดลองพบว่าแบบจำลองทำนายพฤติกรรมของทรายในไรเซอร์ได้แนวโน้มที่แตกต่างจากผลการทดลอง ที่ระดับความสูง 1.3 เมตรแบบจำลองทำนายค่าสูงกว่าความเป็นจริงบริเวณผนังของไรเซอร์โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจากการคำนวณจากข้อมูล 8 จุด 80.02 %



รูปที่ 4.9 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในไรเซอร์ที่ระดับความสูงของไรเซอร์ 4.2 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Synclair

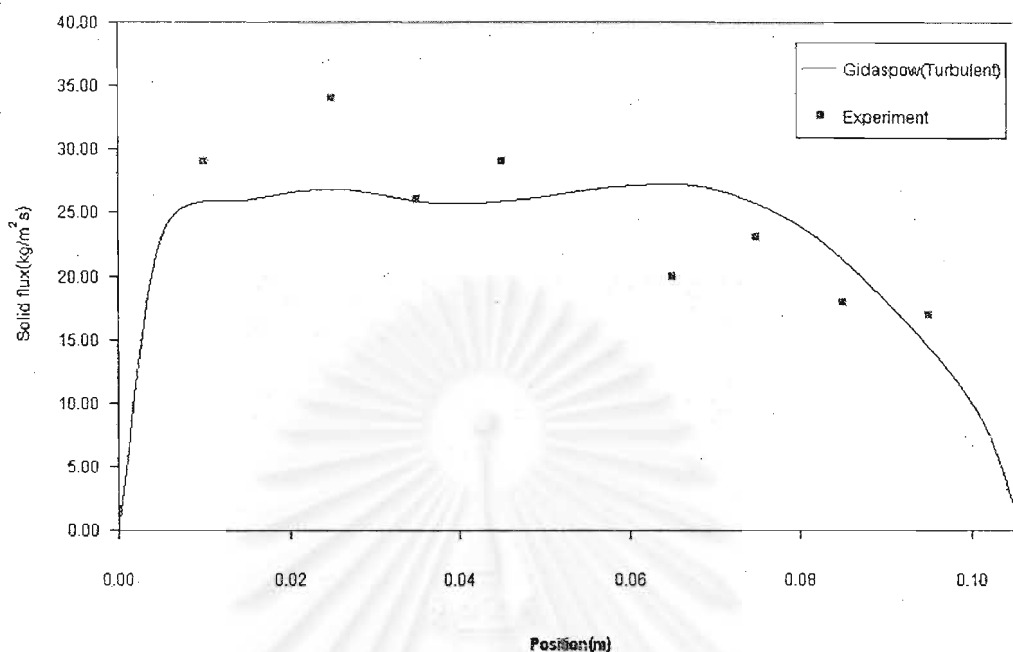


รูปที่ 4.10 ผลการทำนายพฤติกรรมกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูงของโรเตอร์ 5.4 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบราบเรียบ ด้วยสมการ Synclair

รูป 4.9 – 4.10 เป็นผลการคำนวณฟลักซ์ของแข็งในโรเตอร์ ด้วยสมการ Synclair เมื่อเวลาการจำลองกระบวนการผ่านไป 16 วินาที จากกราฟผลการทดลองพบว่าแบบจำลองทำนายพฤติกรรมของทรายในโรเตอร์ได้แนวโน้มที่แตกต่างจากผลการทดลอง ระดับความสูงที่ค่าต่างกัน แบบจำลองทำนายค่าต่ำกว่าความเป็นจริงในช่วงผนังโรเตอร์จนถึงกลางโรเตอร์และให้ค่าสูงกว่าผลการทดลองในช่วงบริเวณขอบด้านขวาของโรเตอร์ซึ่งผลที่ได้ตรงกันข้ามกับการทดลอง โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจากการคำนวณจากข้อมูล 8 จุดที่ระดับความสูง 4.2 และ 5.4 เมตร มีค่า 63.17% และ 46.56% ตามลำดับ

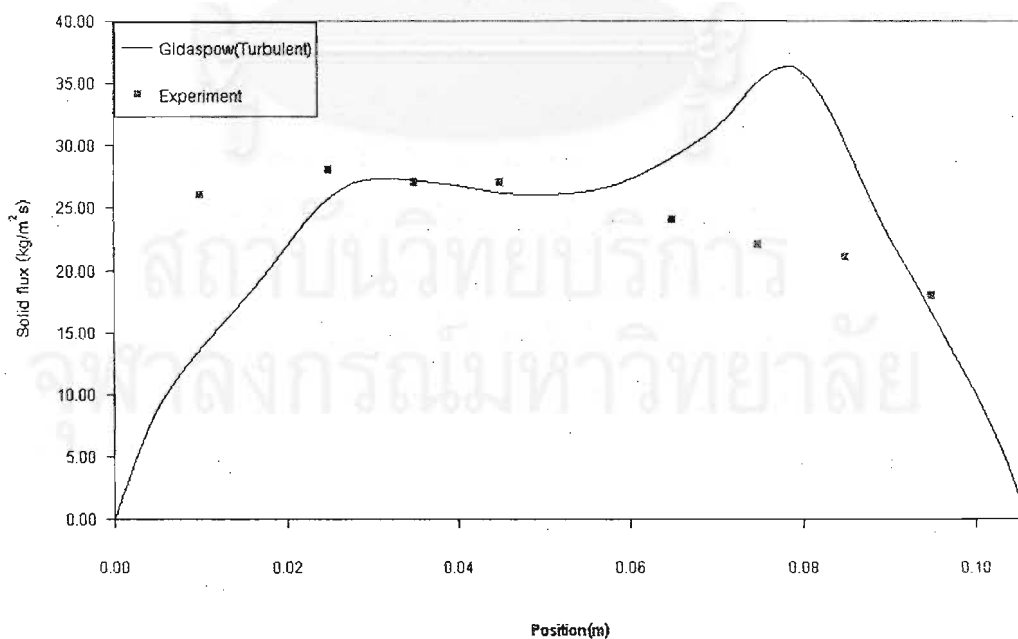
4.2.3 จำลองสถานการณ์โรเตอร์ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการไหลปั่นป่วน  $k - \epsilon$  เสนอ โดย Gidaspow และใช้สมการ Drag ของ Arastoopour

Solid flux distribution at 1.3 m



รูปที่ 4.11 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูงของโรเตอร์ 1.3 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วน ด้วยสมการ Gidaspow

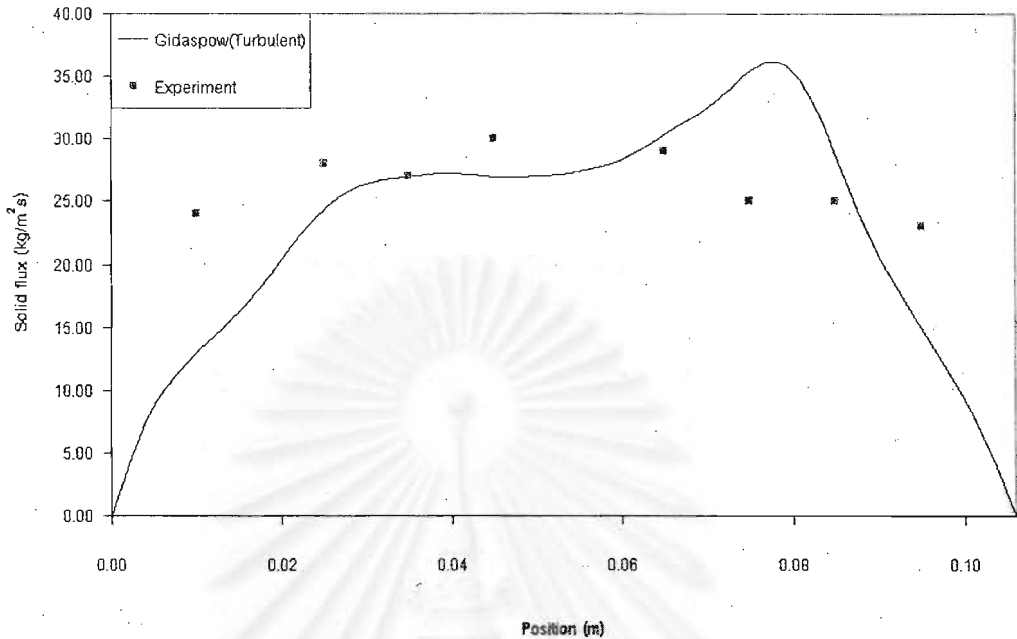
Solid flux distribution at 4.2m



รูปที่ 4.12 ผลการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูงของโรเตอร์ 4.2 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วน ด้วยสมการ Gidaspow



Solid flux distribution at 5.4m.



รูปที่ 4.13 ผลการทำนายพฤติกรรมกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูงของโรเตอร์ 5.4 เมตรเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วน ด้วยสมการ Gidaspow

รูปที่ 4.11-4.13 เป็นผลการคำนวณฟลักซ์ของแข็งในโรเตอร์ เมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วน ด้วยสมการ Gidaspow สำหรับที่ความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ตามลำดับผลการจำลองที่ระดับ 1.3 เมตร แบบจำลองสามารถทำนายผลของฟลักซ์ของแข็งได้สอดคล้องกับการทดลองมากขึ้น ถึงแม้ว่าแบบจำลองจะให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าการทดลองในช่วงขอบโรเตอร์ด้านซ้าย แต่ผลการทำนายในช่วงกลางท่อและขอบด้านขวาค่อนข้างสอดคล้องกับการทดลอง อย่างไรก็ตามผลการคำนวณที่ความสูง 4.2 และ 5.4 เมตร ยังไม่สอดคล้องกับผลจากการทดลองเท่าที่ควร ดังจะเห็นได้ว่าแบบจำลองให้ Solid Profile ที่เบี่ยงเบนออกไปจากค่าการทดลองอย่างมากในช่วงขอบด้านขวาของโรเตอร์ (ตำแหน่ง 0.08-0.1 เมตร)

จากกราฟผลการทดลองพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมของทรายในโรเตอร์ ได้แนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองทุกระดับความสูงที่ค่าต่างกัน โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจากการคำนวณจากข้อมูล 8 จุดที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร มีค่า 13.56% 20.16% และ 16.66% ตามลำดับ

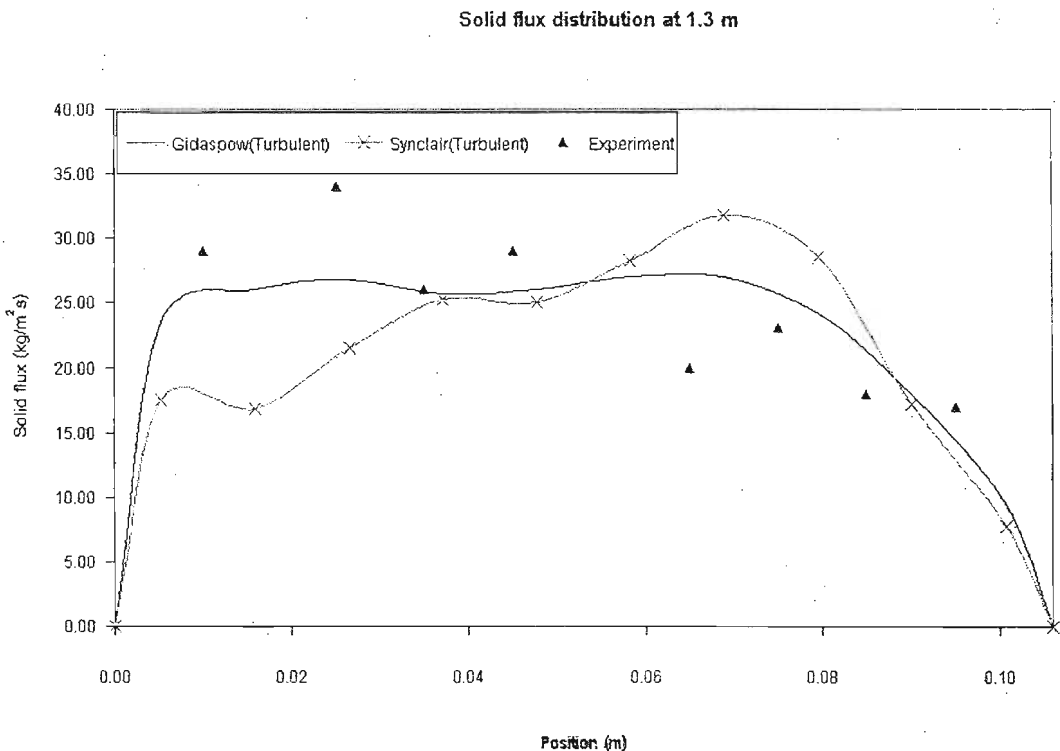
เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทราย กรณีเลือกกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบการไหลปั่นป่วน พบว่าแบบจำลองสถานการณ์ไรเซออร์นี้สามารถทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายได้ดีกว่าการเลือกพารามิเตอร์การไหลแบบราบเรียบ (ดังรูปที่ 4.5-4.7) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากสภาวะการดำเนินการของการทดลองทั้งสองระบบแตกต่างกัน จากการศึกษางานวิจัยของ Hrenya et. al. (1997) ได้ให้แนะนำว่า "กรณีการไหลแบบเฉื่อยจากการเลือกพารามิเตอร์การคำนวณแบบปั่นป่วน จะทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวได้ถูกต้องกว่าการเลือกพารามิเตอร์การไหลแบบราบเรียบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากตัวแปรในสมการคำนวณของการแพร่มีความสำคัญ ต่างจากกรณีการไหลแบบหนาแน่นที่ปริมาณอนุภาคของแข็งมีมากทำให้มีอิทธิพลของแรงลากวัตถุ(Drag Force) มีผลมาก ในขณะที่พจน์ของการแพร่จะมีผลน้อยดังนั้นแรงที่มีอิทธิพลต่อระบบคือ ความดันลด และ แรงลาก การคำนวณแบบปั่นป่วนจึงสามารถตัดทิ้งไปได้" ดังนั้นที่ภาวะการดำเนินการของการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของทราย ซึ่งเป็นภาวะที่ปริมาณอนุภาคของแข็งมีปริมาณน้อย ดังนั้นการคำนวณแบบราบเรียบจึงไม่เหมาะสมใช้เป็นพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลองทำให้การเลือกพารามิเตอร์แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน สามารถทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายในไรเซออร์ได้ดีกว่า

#### 4.2.4 การศึกษาผลกระทบจากประเภทของสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ไรเซออร์มีความสำคัญต่อความสามารถในการทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งภายในไรเซออร์ ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบเปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ไรเซออร์ 2 สมการดังนี้

- การจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของทรายภายในไรเซออร์แบบการไหลอย่างปั่นป่วนด้วยสมการ Gidaspow
- การจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของทรายภายในไรเซออร์แบบการไหลอย่างปั่นป่วนด้วยสมการ Synclair

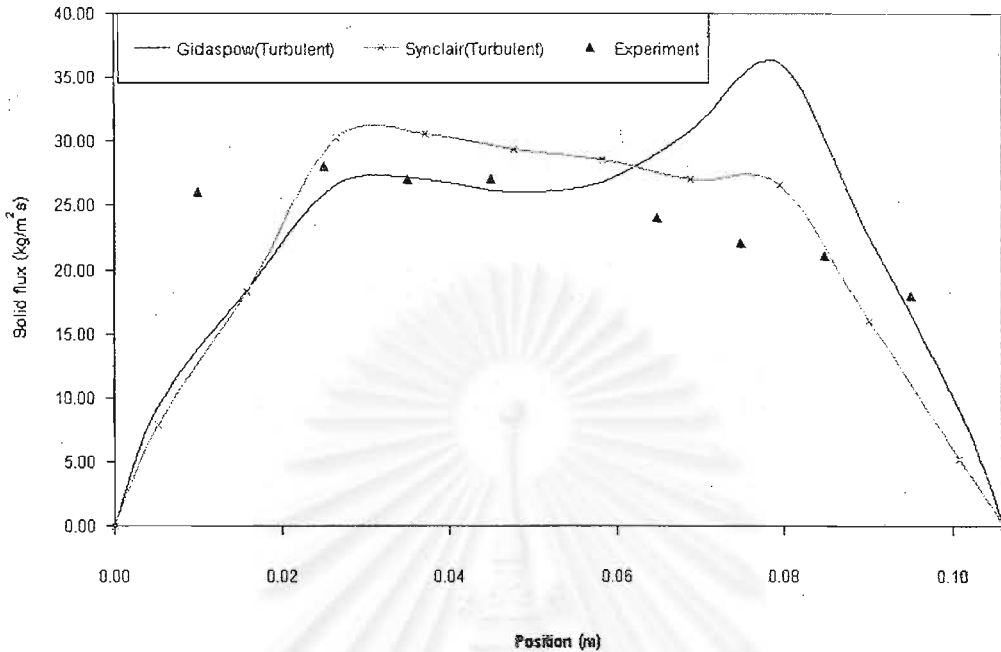
ผลการเปรียบเทียบการเลือกใช้สมการในการจำลองสถานการณ์ทรายภายในไรเซออร์ ณ ระดับความสูงต่าง ๆ ภายในไรเซออร์แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบชนิดของสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของอนุภาคทราย เมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ระดับความสูงภายในโรเตอร์ 1.3 เมตร

ผลการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูง 1.3 เมตร สัญลักษณ์สามเหลี่ยมแสดงผลการทดลอง กราฟเส้นทึบแสดงการทำนายการกระจายตัวของอนุภาคด้วยสมการ Gidaspow ส่วนเส้นทึบที่มีเครื่องหมายกากบาทแสดงการทำนายการกระจายตัวของอนุภาคด้วยสมการ Synclair การจำลองสถานการณ์โรเตอร์ด้วยสมการ Gidaspow สามารถทำนายลักษณะการกระจายตัวของทรายได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกว่าแบบจำลองของ Synclair ที่ทำนายผลการกระจายตัวได้ผิดพลาดมากที่ผนังของโรเตอร์ ส่วนที่บริเวณกลางโรเตอร์พบว่าสมการ Gidaspow และ Synclair สามารถทำนายพฤติกรรมกระจายตัวของอนุภาคได้เป็นอย่างดี

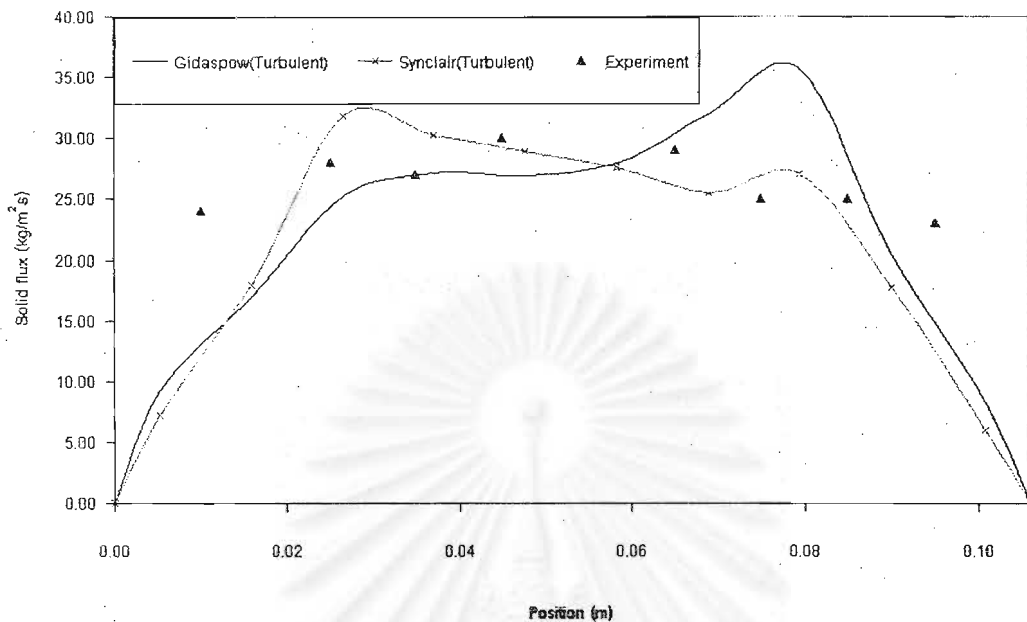
Solid flux distribution at 4.2 m



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบชนิดของสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของอนุภาคทรายเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ระดับความสูงภายในโรเตอร์ 4.2 เมตร

ผลการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูง 4.2 เมตร สัญลักษณ์สามเหลี่ยมแสดงผลการทดลอง กราฟเส้นทึบแสดงการทำนายการกระจายตัวของอนุภาคด้วยสมการ Gidapow ส่วนเส้นทึบที่มีเครื่องหมายกากบาทแสดงการทำนายการกระจายตัวของอนุภาคด้วยสมการ Synclair แบบจำลองสถานการณ์ที่ระดับความสูง 4.2 พบว่าสมการ Synclair สามารถทำนายแนวโน้มการกระจายตัวของทรายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการ Gidapow ซึ่งการทำนายการกระจายตัวที่ผนังโรเตอร์ได้แนวโน้มผิดพลาดอย่างมากที่ตำแหน่ง 0.08 เมตร ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับผลจากการทำนายพฤติกรรมด้วยแบบจำลองมีค่าสูง แม้ว่าแนวโน้มของกราฟที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ตำแหน่งกลางท่อก็ตาม

Solid flux distribution at 5.4 m



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบชนิดของสมการที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของอนุภาคทรายเมื่อกำหนดพารามิเตอร์การไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ระดับความสูงภายในโรเตอร์ 5.4 เมตร

ผลการจำลองสถานการณ์การกระจายตัวของทรายภายในโรเตอร์ที่ระดับความสูง 5.4 เมตร สัญลักษณ์สามเหลี่ยมแสดงผลการทดลอง กราฟเส้นทึบแสดงการทำนายการกระจายตัวของอนุภาคด้วยสมการ Gidaspow ส่วนเส้นทึบที่มีเครื่องหมายกากบาทแสดงการทำนายการกระจายตัวของอนุภาคด้วยสมการ Synclair แบบจำลองสถานการณ์ที่ระดับความสูง 5.4 พบว่าสมการ Synclair สามารถทำนายแนวโน้มการกระจายตัวของทรายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าที่ระดับความสูงค่าอื่น เนื่องจากที่ระดับความสูงมีค่ามากปริมาณอนุภาคในโรเตอร์จะมีปริมาณน้อยลงทำให้สมการ Synclair สามารถทำนายพฤติกรรมของการกระจายตัวได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ค่าความผิดพลาดมีค่าเพียง 13.45 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสมการ Gidaspow ยังคงให้แนวโน้มการทำนายการกระจายตัวของทรายผิดพลาดที่ตำแหน่ง 0.08 เมตร ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับผลจากการทำนายพฤติกรรมด้วยแบบจำลองมีค่าสูง แม้ว่าแนวโน้มของกราฟที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ตำแหน่งกลางท่อก็ตาม

จากกราฟผลการทำนายพฤติกรรมของการกระจายตัวของอนุภาคทรายภายในโรเตอร์ กรณีการเลือกใช้สมการในการสร้างแบบจำลองต่างกัน พบว่าสมการ Gidaspow และ Synclair สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมของการกระจายตัวของอนุภาคทรายได้แนวโน้มแตกต่างกัน โดยมีค่าการ

คำนวณค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจากการคำนวณจากข้อมูล 8 จุดที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตรดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากผลการทดลองกับผลจากการสร้างสถานการณ์จำลองการกระจายตัวของอนุภาคทรายภายในโรเซอ์

ระดับความสูงภายในโรเซอ์ (เมตร)	ค่าความผิดพลาดจากการ คำนวณด้วยสมการ Gidaspow เทียบกับผลการทดลอง	ค่าความผิดพลาดจากการ คำนวณด้วยสมการ Synclair เทียบกับผลการทดลอง
1.3	14	27
4.2	20	17
5.4	17	13

ค่าจากตารางการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของสมการทั้งสองพบว่า การจำลองสถานการณ์ด้วยสมการ Gidaspow และ Synclair มีความสัมพันธ์กับระดับความสูงของอนุภาคภายในโรเซอ์ กรณีพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคที่ระดับความสูง 1.3 เมตรพบว่า สมการ Gidaspow สามารถทำนายพฤติกรรมของการกระจายตัวของอนุภาคได้ดีกว่าการเลือกใช้สมการ Synclair แต่ที่ระดับความสูง 4.2 และ 5.4 พบว่าสมการ Synclair สามารถทำนายการกระจายตัวของทรายภายในโรเซอ์ได้ดีกว่า สมการ Gidaspow ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากสมการที่ใช้ในการคำนวณพจน์ เทนเซอร์ความเค้นของ สมการทั้งสองต่างกัน ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการคำนวณ ค่าความเค้นระหว่างสมการ Gidaspow และสมการ Synclair

$$T_s = (\varepsilon_s \mu_b \nabla \bar{U}_s - P_s)I + 2\varepsilon_s \mu_s \left[ \frac{1}{2} [\nabla \bar{U}_s + (\nabla \bar{U}_s)^T] - \frac{1}{3} (\nabla \bar{U}_s)I \right]$$

สมการ Gidaspow	สมการ Synclair
$P_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1+e)\varepsilon_s^2 g_o \theta_s$	$P_s = \frac{\varepsilon_s}{1 + \frac{\zeta}{L}} \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1+e)\varepsilon_s^2 g_o \theta_s$
$\mu_s = \frac{\mu_{s,dil}}{\eta g_o} \left[ 1 + \frac{8}{5} g_o \varepsilon_s \eta \right]^2 + \frac{768}{25\pi} \eta \varepsilon_s g_o \mu_{s,dil}$	$\mu_s = \frac{\mu_{s,dil}}{\eta g_o} \left( \frac{1 + \frac{8}{5} \eta (3\eta - 2) \varepsilon_s g_o}{2 - \eta} \right) \left[ \frac{8\eta g_o}{5} + \frac{1}{\varepsilon_s \left( 1 + \frac{\zeta}{L} \right)} \right] + \frac{768}{25\pi} \eta \varepsilon_s g_o \mu_{s,dil}$

จากการเปรียบเทียบสมการที่ใช้ในการคำนวณตารางที่ 4.2 พบว่าพจน์ของสัดส่วนความหนาแน่นของอนุภาคของสมการทั้งสองต่างกัน โดยสมการ Gidaspow เหมาะกับภาวะอนุภาคของทรายมีจำนวนอนุภาคของทรายมาก ส่วนสมการ Synclair เหมาะสำหรับกรณีที่อนุภาคของแข็งภายในระบบมีจำนวนอนุภาคของทรายเบาบาง

## สรุปผลงานวิจัย

ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการจำลองสถานการณ์โรเซอริที่มีผลต่อการทำนายพฤติกรรม การกระจายตัวของของแข็งที่เป็นทรายตามภาวะการดำเนินการของ Benyahia และ ดร.บุญรอด พบว่าการเลือกแบบจำลองคณิตศาสตร์การไหลแบบราบเรียบเหมาะกับการจำลองสถานการณ์ที่อนุภาคของแข็งมีปริมาณมาก ส่วนกรณีที่อนุภาคของแข็งในระบบมีปริมาณน้อยควรเลือกใช้การแบบจำลองคณิตศาสตร์สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน และแบบจำลองโรเซอริที่เลือกใช้สมการคำนวณของ Gidaspow สามารถทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอริได้ดีเมื่อระดับความสูงภายในโรเซอริมีค่าน้อย ส่วนที่ระดับความสูงภายในโรเซอริมีค่ามาก สมการ Synclair จะมีความเหมาะสมในการใช้สร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของทรายในระบบได้ดีกว่า

### ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. สร้างแบบจำลองโรเซอริแบบ 3 มิติ เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองยังสามารถทำนายพฤติกรรมการกระจายตัวของของแข็งภายในโรเซอริได้ถูกต้องหรือไม่
2. เปลี่ยนปริมาณอนุภาคของของแข็งที่ค่าต่างๆ ในระบบโรเซอริ เพื่อตรวจสอบช่วงอนุภาคของแข็งที่สัมพันธ์กับการเลือกพารามิเตอร์การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน
3. ทำการทดลองสร้างแบบจำลองสถานการณ์ที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในโรเซอริ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

- Augusto, N., and others. 2000. Riser Hydrodynamics :Simulation Using Kinetic Theory. Particle Technology and Fluidization. 46: 52-67
- Arena, U.,Malandrino, A., and Massimilla, L.1991. Modeling of Circulating Fluidized Bed Combustion of a Char. The Canadian Journal of Chemical Engineering.69: 860-868.
- Benyahia, S., and other. 2000. Simulation of Particles and Flow Behavior in the Riser Section of a Circulating Fluidized Bed using the Kinetic Theory Approach for the Particulate Phase . Power Technology. 112: 24-33.
- Gidaspow, D.1994 Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory description. Academic Press.
- Grace,J.R.,Avidan,A.A.,and Knowlton,T.M.1997.Circulating fluidized beds.Great Britain: Blackie academic and professional.
- Hrenya, C.M.,Sinclair.J.L.1997. Effects of particle-phase turbulence in gas-solid flows.AIChE J.41 no.6.
- Huilin, L., Guangbo, Z., Rushan, B., Yongjin, C., and Gidaspow, D.2000. A CoalCombustion Model for Circulating Fluidized Bed Boilers. Fuel. 79: 165-172.
- Krishna, R., Sinclair, J.L., and other. 2001. Comparative Analysis of CFD Model of Dense Gas-Solid Systems. AIChE Journal. 47 no.5: 1035-1051.
- Samuelsberg, A., and Hjertager, B. H. 1996. An Experimental and Numerical Study of Flow Patterns in a Circulating Fluidized Bed Reactor. International Journal of Multiphase Flow. 22. No.3: 575-591
- Sajjakulnukit, B.1999. Hydrodynamics and Heat Transfer in a Circulating Fluidized Bed. (Doctoral dissertation, Chemical Engineering , University of New Brunswick).
- Sotudeh-Grarebaagh, R., Legros, R., Chaouki, J.,and Paris, J., 1998. Simulation of Circulating Fluidized Bed Reactors Using ASPEN PLUS. Fuel. 77: 327-337.
- Sengupta, S. P., and Basu, P. 1991. A Generalized Mathematical Model for Circulating Fluidized Bed Boiler Furnace. Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. Fluidized Bed Combustion. ASME: 1295-1301.

Wachem van, B.G.M., Schouten, J.C., Bleek van den C.M., Krishna, R. and Sinclair, J.L.  
2001. Comparative analysis of CFD models of dense gas-solid systems. AIChE  
J.41 no.6.: 1035-1051.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 ข้อมูลการกระจายตัวของทรายในโรเตอร์ที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ด้วยโปรแกรม Fluent กรณีใช้ข้อมูลการจำลองสถานการณ์จากงานวิจัยของ ดร.บุญรอด โมเดล Gidaspow กำหนดลักษณะการไหลแบบ Laminar

ตำแหน่งห่างจาก ผนังโรเตอร์ด้านซ้าย(เมตร)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเตอร์ 1.3 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเตอร์ 4.2 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเตอร์ 5.4 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)
0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	26.42	9.30	0.09
0.02	19.66	18.36	0.18
0.03	19.35	26.57	0.27
0.04	16.62	27.00	0.27
0.05	15.36	26.01	0.26
0.06	15.77	26.87	0.27
0.07	18.52	30.76	0.31
0.08	27.10	36.15	0.36
0.09	34.96	22.46	0.22
0.10	34.93	9.07	0.09
0.11	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ก2 ข้อมูลการกระจายตัวของทรายในโรเซอรัที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ด้วยโปรแกรม Fluent กรณีใช้ข้อมูลการจำลองสถานการณ์จากงานวิจัยของ ดร.บุญรอด โมเดล Synclair กำหนดลักษณะการไหลแบบ Laminar

ตำแหน่งห่างจาก ผนังโรเซอรัด้านซ้าย(เมตร)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเซอรั 1.3 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเซอรั 4.2 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเซอรั 5.4 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)
0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	36.29	3.26	8.34
0.02	9.81	4.49	3.77
0.03	14.37	13.31	16.70
0.04	17.58	18.90	16.21
0.05	22.92	22.45	19.80
0.06	29.00	33.34	31.74
0.07	37.53	39.46	35.13
0.08	54.36	52.43	50.07
0.09	52.84	34.86	32.95
0.10	29.08	13.06	12.05
0.11	0.00	0.00	0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก3 ข้อมูลการกระจายตัวของทรายในโรเตอร์ที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ด้วยโปรแกรม Fluent กรณีใช้ข้อมูลการจำลองสถานการณ์จากงานวิจัยของ ดร.บุญรอด โมเดล Gidaspow กำหนดลักษณะการไหลแบบ Turbulent

ตำแหน่งห่างจาก ผนังโรเตอร์ด้านซ้าย(เมตร)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเตอร์ 1.3 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเตอร์ 4.2 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเตอร์ 5.4 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)
0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	23.47	26.42	26.42
0.02	26.05	19.66	19.66
0.03	26.85	19.35	19.35
0.04	25.71	16.62	16.62
0.05	26.02	15.36	15.36
0.06	26.99	15.77	15.77
0.07	27.05	18.52	18.52
0.08	24.12	27.10	27.10
0.09	18.00	34.96	34.96
0.10	9.41	34.93	34.93
0.11	0.00	0.00	0.00

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก4 ข้อมูลการกระจายตัวของทรายในโรเซอร์ที่ระดับความสูง 1.3 4.2 และ 5.4 เมตร ด้วยโปรแกรม Fluent กรณีใช้ข้อมูลการจำลองสถานการณ์จากงานวิจัยของ ดร.บุญรอด ไมเคิล Synclair กำหนดลักษณะการไหลแบบ Turbulent

ตำแหน่งห่างจาก ผนังโรเซอร์ด้านซ้าย(เมตร)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเซอร์ 1.3 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเซอร์ 4.2 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	ปริมาณฟลักซ์ของทรายที่ความสูงโรเซอร์ 5.4 เมตร (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)
0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	17.46	7.84	7.19
0.02	16.83	18.32	17.92
0.03	21.55	30.21	31.79
0.04	25.23	30.57	30.28
0.05	25.01	29.41	28.87
0.06	28.30	28.62	27.55
0.07	31.85	27.00	25.47
0.08	28.61	26.61	27.08
0.09	17.14	15.90	17.74
0.10	7.75	5.17	5.95
0.11	0.00	0.00	0.00

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สมบัติ กীরติพรานนท์ เกิดที่กรุงเทพมหานคร วันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ.2519 สำเร็จ  
การศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย