


อิทธิพลของแผ่นกระจายอากาศและการเกาะกันของอนุภาคที่มีต่อฟลูอิดไอเซชัน



นาย สุรชัย ภัทรพงศ์เกษม

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ภาควิชา เคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0545-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20604853

# INFLUENCE OF DISTRIBUTOR AND AGGLOMERATION ON FLUIDIZATION



Mr. Surachai Pattarapongkasem

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 2001

ISBN 974-03-0545-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลของแผ่นกระจายอากาศและการเกาะกันของอนุภาคที่มีต่อฟลูอิด  
ไดเซชัน

โดย

นายสุรชัย ภัทรพงศ์เกษม

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

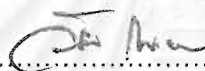
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ กัญญา บุญยเกียรติ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิษณุ มีอยู่


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

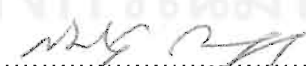
  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ไพธิพิจิตร)

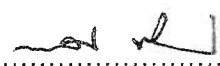
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงษ์ วิทิตสานต์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ กัญญา บุญยเกียรติ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิษณุ มีอยู่)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

นายสุรชัย ภัทรพงศ์เกษม : อิทธิพลของแผ่นกระจายอากาศและการเกาะกันของอนุภาคที่มีต่อฟลูอิดิเดชัน . (INFLUENCE OF DISTRIBUTOR AND AGGLOMERATION ON FLUIDIZATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ. กัญจนา บุญยเกียรติ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. วิษณุ มีอยู่, 103 หน้า. ISBN 974-03-0545-8.

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมได้มีการนำระบบฟลูอิดิเดชันมาใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น ในกระบวนการทางปิโตรเคมี ชีวเคมี ไฟฟ้าเคมี เป็นต้น ในส่วนของระบบฟลูอิดิเดชันแบบ 3 ภูมิภาคบ่อยครั้งมักเกิดปัญหาการที่ของเหลวในระบบทำให้อนุภาคของของแข็งเกิดการจับและเกาะตัวกันขึ้น น้ำหนักของอนุภาคที่เกิดการเกาะตัวกันจะมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้กระบวนการเกิดฟลูอิดิเดชันเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์หรือเกิดดีฟลูอิดิเดชัน ปัจจัยที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิดิเดชันที่สมบูรณ์มีด้วยกันหลายอย่างเช่น ชนิดและสมบัติของอนุภาค ของไหล อุณหภูมิ ความดัน และแผ่นกระจายอากาศ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงผลของแผ่นกระจายอากาศและการเกาะกันของอนุภาคที่มีต่อระบบฟลูอิดิเดชัน

จากการศึกษาโดยใช้อนุภาคเม็ดพลาสติกขนาด 0.6 ซม. ซึ่งอยู่ใน Geldart กลุ่ม D ในหอตกลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1416 เมตร พบว่า เมื่อการเกาะกันของอนุภาคมากขึ้นจาก 1 เม็ดเป็น 2 4 5 และ 6 เม็ด ขนาดของอนุภาคจะใหญ่ขึ้น ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเดชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.6 1.7 1.85 2.1 และ 2.2 เมตร/วินาที ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นน้ำหนักก็จะเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่มากขึ้นซึ่งก็คือแรงลอยตัว จึงต้องใช้ความเร็วอากาศสูงขึ้นในการทำให้เกิดฟลูอิดิเดชัน และพบว่าค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเดชันจากการทดลองและจากการคำนวณมีค่าไม่ค่อยใกล้เคียงกันเช่นในอนุภาคแบบ 6 เม็ดคำนวณได้ 1.75 เมตร/วินาที แต่จากการทดลองได้ 2.2 เมตร/วินาที จึงใช้ทฤษฎีของแฟรคทัลเข้ามาช่วยแก้ปัญหาในการคำนวณในส่วนของค่าแฟคเตอร์รูปร่างจะได้ค่าเป็น 2.39 เมตร/วินาที ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกว่า ในการจำลองการไหลของแผ่นกระจายพบว่าแผ่นกระจายอากาศแบบ I และ J ที่มีการเจาะในลักษณะแบบตรงและแบบเฉียงด้วยนั้นจะให้ผลของการกระจายที่ดีที่สุด เพราะทำให้เกิดการหมุนวนและเกิดแรงเฉือนขึ้น ในระบบที่มีความชื้นและน้ำโดยใช้เมล็ดถั่วเขียวเป็นเบตนั้น พบว่าค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเดชันคือ 1.5 เมตร/วินาที ซึ่งมากกว่าเมื่อเทียบกับระบบแห้ง 1 เมตร/วินาที จึงเห็นได้ว่าของเหลวที่อยู่ในระบบนั้นมีความสำคัญมากเนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงกับระบบ

ภาควิชา..เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....สุรชัย ภัทรพงศ์เกษม  
 สาขาวิชา..เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา..2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4172509223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: fluidization / agglomeration / distributor /fractal

Mr.SURACHAI PATTARAPONGKASEM : INFLUENCE OF DISTRIBUTOR AND AGGLOMERATION ON FLUIDIZATION : ASSOC. PROF. KUNCHANA BUNYAKIAT, THESIS COADVISOR : ASSIST. PROF. Dr. VISSANU MEEYOO, 103 pp. ISBN 974-03-0545-8.

Fluidization system has been widely used in many industries such as petrochemical, biochemical, and electrochemical processes. One of the major problems of 3-phase fluidization systems is that the liquid in the system causes the particle agglomeration, which results in an incomplete fluidization, or so-called defluidization. Since the factors that make a complete fluidization system include type and properties of particle, liquid, temperature, pressure, and distributor, we herein report our study in the effect of distributors and agglomerating particles on the fluidization.

In a gas-solid fluidization experiment with plastic particles (0.6 cm in diameter), the minimum fluidization velocity ( $U_{mf}$ ) changed from 1.6 to 1.7, 1.85, 2.1, 2.2 m/s when the number of agglomerating particles increased from 1 to 2, 4, 5, 6, respectively, which was due to the movement resistance of the increased particle weight and buoyancy force. In order to achieve a complete fluidization at that stage, a higher air velocity is required. We found that the calculated and experimental values of minimum fluidization velocity of agglomerating particle are significantly different. For instance, in the case with 6 particles the calculate  $U_{mf}$  was of 1.75 m/s whereas the experimental data was 2.2 m/s. We, therefore, decided to solve this problem by using fractal theory in the part of shape factor. This resulted in a much better agreement between the two values (new calculated  $U_{mf}$  2.39 m/s vs experimental  $U_{mf}$  2.2 m/s). We also found that the distributors type I and J which possess both straight and oblique air flows were the most efficient ones. In a system which contains mung bean (as a bed), moisture and water, the minimum fluidization velocity was higher than that in the dry system or 2-phase ( $U_{mf}$  1.5 m/s for the 3-phase and 1 m/s for the 2-phase system). Therefore, the liquid in the system is of great significance to the fluidization.

Department ...Chemical Technology.....	Student's signature.....	<i>Surachai P.</i>
Field of study ...Chemical Technology...	Advisor's signature.....	<i>Kunchana</i>
Academic year ...2001.....	Co-advisor's signature .....	<i>Visanu</i>

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลงด้วยดีเนื่องจากได้รับความเอาใจใส่ดูแลความช่วยเหลือ ความเมตตากรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดแนวทางอันเป็นประโยชน์จาก รศ.กัญญา บุญเกียรติ และ ผศ.ดร.วิษณุ มีอยู่ จึงขอขอบคุณท่านทั้งสองเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณคุณสืบวงศ์ เหมวงศ์ ที่ช่วยเป็นธุระด้านธุรการต่างๆ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยทางด้านวัสดุประยุกต์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่กรุณาอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่กรุณาอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณท่านที่มีได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณพ่อ แม่ และทุกคนในครอบครัว รุ่นพี่ และเพื่อนๆที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ระบบของฟลูอิดเซชัน.....	3
2.1.1 ลักษณะของฟลูอิดเซชันในเบด.....	3
2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบฟลูอิดเซชัน.....	5
2.1.3 ฟลูอิดเซชันแบบเรียบและแบบขรุขระ.....	7
2.1.4 การเกิดฟองแก๊สและชั้นสลั๊บของไหลกับเม็ดของแข็ง.....	8
2.1.5 เบดเจือจาง.....	9
2.1.6 ลักษณะคล้ายกับของไหลของฟลูอิดเซชันเบด.....	10
2.2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์.....	11
2.2.1 ช่องว่างภายในเบด.....	11
2.2.2 พื้นที่เฉพาะ.....	11
2.2.3 พื้นที่เฉพาะของเม็ดของแข็ง.....	12
2.2.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมติ.....	12
2.2.5 แฟคเตอร์รูปร่าง.....	13
2.2.6 สมการทั่วไปของการเกิดฟลูอิดเซชัน.....	14
2.3 ตัวแปรและปัจจัยที่มีผลต่อระบบฟลูอิดเซชัน.....	18
2.3.1 ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดเซชัน.....	18
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบฟลูอิดเซชัน.....	21
2.3.2.1 ลักษณะของฟองแก๊ส.....	21
2.3.2.2 อิทธิพลของผิวผนังหลอดลง.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.3 อิทธิพลของตัวกระจายแก๊ส.....	22
2.3.2.4 การออกแบบตัวกระจายของไหล.....	23
2.4 การประยุกต์ใช้งานของฟลูอิดส์เบดแบบ 3 ภูมิภาค.....	24
2.5 แพรคทัล.....	24
บทที่ 3 การทดลอง.....	27
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	27
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	31
4.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดส์เบด.....	31
4.2 คุณภาพของระบบฟลูอิดส์เบด.....	34
4.3 การจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม Ansys.....	37
4.4 เปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลในการเกิดฟลูอิดส์เบด ที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลอง.....	47
4.5 แพรคทัล.....	51
4.6 ผลของความชื้นและน้ำที่มีต่อตัวเหลืองและตัวเขียว.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก.....	74
ภาคผนวก ข.....	88
ภาคผนวก ค.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่า $U_{mi}$ ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ.....	48
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันเมื่อค่าแฟคเตอร์รูปร่าง มีค่าเปลี่ยนไป.....	50
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าแฟรคทอลไดเมนชันที่หาได้จากอนุภาคแต่ละแบบ.....	53
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแฟคเตอร์รูปร่างที่ได้จากอนุภาคแต่ละแบบ.....	54
ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบค่า $U_{mi}$ ที่ได้จากการทดลองจริงและจากการคำนวณ ค่า $\phi$ ที่ต่างกัน.....	54



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ระดับของเบดในหอทดลอง.....	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบด.....	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะต่างๆของฟลูอิดไคซ์เบดที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของไหลเพิ่มขึ้น.....	8
รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบของ Damronglerd ศึกษาถึงเบดเจือจาง.....	9
รูปที่ 2.5 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดไคซ์เบด.....	10
รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดกับอัตราการไหลของอากาศ.....	14
รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Re_p$ กับ $C_d Re_p^2$ ของBrown.....	18
รูปที่ 2.8 ตัวกระจายและชิ้นส่วนที่ทำให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอ.....	20
รูปที่ 2.9 การเกิด Channeling.....	20
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างรูปแฟรคทัลที่มีลักษณะความเหมือนในตัวของมันเอง.....	25
รูปที่ 2.11 การหาค่าแฟรคทัลและกราฟ Richardson Plot.....	26
รูปที่ 3.1 ภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองฟลูอิดไคซ์เบด.....	29
รูปที่ 3.2 การจำลองการเกาะกันของอนุภาค 5 แบบ.....	30
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของ อนุภาคชนิด 1 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	32
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของ อนุภาคชนิด 2 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	32
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของ อนุภาคชนิด 4 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	33
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของ อนุภาคชนิด 5 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	33
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของ อนุภาคชนิด 6 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	34
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาค ชนิด 1 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	35
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาค ชนิด 2 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	35

รูปที่ 4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาค ชนิด 4 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A – J.....	36
รูปที่ 4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาค ชนิด 5 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A – J.....	36
รูปที่ 4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาค ชนิด 6 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A – J.....	37
รูปที่ 4.11	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ A และ B โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	38
รูปที่ 4.12	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ C โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	38
รูปที่ 4.13	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ D โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	39
รูปที่ 4.14	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ E โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	39
รูปที่ 4.15	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ F โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	40
รูปที่ 4.16	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ G โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	40
รูปที่ 4.17	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ H โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	41
รูปที่ 4.18	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ I โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	41
รูปที่ 4.19	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ J โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	42
รูปที่ 4.20	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ A และ B ซึ่งมีอนุภาคบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	43
รูปที่ 4.21	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ C ซึ่งมีอนุภาคบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	43
รูปที่ 4.22	ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ D ซึ่งมีอนุภาคบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรมแอนติส.....	44



รูปที่ 4.40 กราฟเปรียบเทียบค่า $U_{mi}$ ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1- 5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ I.....	61
รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบค่า $U_{mi}$ ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1- 5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ J.....	62
รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบค่า $U_{mi}$ ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1- 5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบต่างๆ.....	62
รูปที่ 4.43 แสดงลักษณะการเกิดพันธะที่เกิดจากของเหลว.....	64
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความดันตกคร่อม ของถั่วเขียว.....	65
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความดันตกคร่อม ของถั่วเขียวที่แช่ น้ำ และอากาศมีความชื้นมากกว่า 95 %.....	65
รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความสูงของเบด ของเมล็ดถั่วเขียว.....	66
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความสูงของเบด ของเมล็ดถั่วเขียวที่แช่น้ำและอากาศมีความชื้นมากกว่า 95 %.....	66
ภาคผนวก	
รูปที่ ก-1. การเรียงตัวของเม็ดทรงกลมแบบรูปลูกบาศก์.....	74
รูปที่ ก-2. การเรียงตัวของเม็ดทรงกลมแบบ Orthorombic.....	75
รูปที่ ก-3. การเรียงตัวของเม็ดทรงกลมแบบ Romboedric.....	76
รูปที่ ก-4. แสดงการลากเส้นตรงหาค่าแฟรคทอลไดเมนชันของ อนุภาคแบบที่ 1- 4.....	81
รูปที่ ก-5. กราฟแสดงความชันระหว่างค่า $\log P$ และ $\log \lambda$ ของ อนุภาคแบบที่ 2.....	82
รูปที่ ก-6. กราฟแสดงความชันระหว่างค่า $\log P$ และ $\log \lambda$ ของ อนุภาคแบบที่ 3.....	83
รูปที่ ก-7. กราฟแสดงความชันระหว่างค่า $\log P$ และ $\log \lambda$ ของ อนุภาคแบบที่ 4 และ 5.....	83
รูปที่ ข-1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 1 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	88
รูปที่ ข-2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 2 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	88

รูปที่ ข-3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 4 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	89
รูปที่ ข-4. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 5 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	89
รูปที่ ข-5. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 6 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	90
รูปที่ ข-6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 1 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	90
รูปที่ ข-7. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 2 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	91
รูปที่ ข-8. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 4 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	91
รูปที่ ข-9. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 5 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	92
รูปที่ ข-10. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศ ของอนุภาคชนิด 6 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J.....	92
รูปที่ ค-1. แผ่นกระจายอากาศแบบ A.....	93
รูปที่ ค-2. แผ่นกระจายอากาศแบบ B.....	94
รูปที่ ค-3. แผ่นกระจายอากาศแบบ C.....	95
รูปที่ ค-4. แผ่นกระจายอากาศแบบ D.....	96
รูปที่ ค-5. แผ่นกระจายอากาศแบบ E.....	97
รูปที่ ค-6. แผ่นกระจายอากาศแบบ F.....	98
รูปที่ ค-7. แผ่นกระจายอากาศแบบ G.....	99
รูปที่ ค-8. แผ่นกระจายอากาศแบบ H.....	100
รูปที่ ค-9. แผ่นกระจายอากาศแบบ I.....	101
รูปที่ ค-10. แผ่นกระจายอากาศแบบ J.....	102

## สัญลักษณ์และคำย่อ

$A_f$	พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์, เมตร <sup>2</sup>
$A_p$	พื้นที่ผิวของเม็ทของแข็งเพียงเม็ดเดียว, เมตร <sup>2</sup>
$C_d$	สัมประสิทธิ์ค่าแดร็ก(drag coefficient)
$D_h$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิกของอนุภาค, เมตร
$d_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, เมตร
$d_e$	เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของอนุภาค, เมตร
$f_w$	แฟกเตอร์(factor)
$F_D$	แรงแดร็กของอนุภาคในฟลูอิด์เบดแบบของเหลว-ของแข็ง
$F_{Ds}$	แรงแดร็กของอนุภาคในของเหลวนั่นดี
$g$	แรงโน้มถ่วง, 980 เซนติเมตร/วินาที <sup>2</sup>
$g_c$	ตัวเปลี่ยนหน่วย, 980 กรัม.เซนติเมตร/(กรัม-น้ำหนัก)(วินาที) <sup>2</sup>
$L$	ความสูงของเบด, เซนติเมตร
$L_{mf}$	ความสูงของเบดที่สภาวะต่ำสุดของฟลูอิด์เซชัน, เซนติเมตร
$\Delta p$	ความดันตกคร่อม, กรัม-น้ำหนัก/เซนติเมตร <sup>2</sup>
$Re_p$	เรโนลด์ นัมเบอร์ของอนุภาค, $d_p u_{opg} / \mu$ , ไร้หน่วย
$Re_{mf}$	เรโนลด์ นัมเบอร์ที่จุดต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์เซชัน, ไร้หน่วย
$Re_{mb}$	เรโนลด์ นัมเบอร์ที่จุดที่เกิดฟองก๊าซเป็นฟองแรก, ไร้หน่วย
$\Delta t$	ความแตกต่างของเวลา, วินาที
$U_0$	อัตราการไหลของก๊าซ, เมตร / วินาที
$U_{mf}$	อัตราการไหลของก๊าซต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด์เซชัน, เมตร / วินาที
$U_t$	ความเร็วปลายของอนุภาค, เมตร / วินาที
$W$	น้ำหนักของอนุภาคทั้งหมด, กิโลกรัม
$\epsilon$	สัดส่วนช่องว่าง, ไร้หน่วย
$\epsilon_m$	สัดส่วนช่องว่างในเบดบรรจุ, ไร้หน่วย
$\epsilon_{mf}$	สัดส่วนช่องว่างที่สภาวะต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์เซชัน, ไร้หน่วย
$\rho_g$	ความหนาแน่นของของไหล, กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup>
$\rho_s$	ความหนาแน่นของอนุภาค, กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup>

- $\phi_s$  แพลตฟอร์มรูปร่างของอนุภาค, ไร่นวอย
- $\delta$  แพรคทอลไดเมนชัน
- $\lambda$  ค่าความยาวของเส้นตรงที่มีค่าคงที่ ที่ลากไปตามเส้นรอบรูป หาดด้วยความยาวสูงสุด  
ของรูปฉาย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

ฟลูอิดิเซชัน(fluidization)[1] เป็นการทำให้อนุภาคของแข็งมีลักษณะคล้ายของไหล[1, 11, 12] ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ในประเทศไทย ได้รู้จักกันมานานแล้ว แต่เพิ่งจะนำมาพัฒนาให้เหมาะสมกับงานที่จะทำในระยะหลังนี้เอง เพื่อเป็นการตอบสนองตามความต้องการทางอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้น โดยได้มีการนำระบบฟลูอิดิเซชันมาใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น ในกระบวนการทางปิโตรเคมี ชีวเคมี ไฟฟ้าเคมี วิศวกรรมเคมี และการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น[14, 8]

ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบฟลูอิดิเซชันแบบ 2 วัฏภาคแบบใช้แก๊สเป็นของไหล มักจะเกิดฟองแก๊สและเกิดช่องว่างของแก๊สขึ้นภายในเบด ระบบจึงเกิดฟลูอิดิเซชันได้ไม่ดี และในระบบฟลูอิดิเซชันแบบ 3 วัฏภาค บ่อยครั้งมักจะเกิดปัญหาการที่ของเหลวในระบบทำให้อนุภาคของแข็งเกิดการจับและเกาะตัวกันเป็นก้อนขึ้น[14, 16] น้ำหนักของอนุภาคที่เกิดจากการเกาะตัวกันของหลายๆอนุภาคจะมากขึ้น จนทำให้อนุภาคของแข็งที่อยู่ในระบบนั้นไม่มีลักษณะคล้ายของไหลอีกต่อไป ซึ่งส่งผลให้กระบวนการเกิดฟลูอิดิเซชันเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์หรือเกิดดีฟลูอิดิเซชัน(defluidization)[17] ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะไม่ตรงตามที่ต้องการ ซึ่งลักษณะกลไกของการเกิดฟลูอิดิเซชันยังไม่ทราบเป็นที่แน่นอน ดังนั้นจึงยังไม่สามารถที่จะทำนายได้ว่าเหตุใดจึงเกิดดีฟลูอิดิเซชันขึ้น

ปัจจัยที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิดิเซชันที่สมบูรณ์มีด้วยกันหลายอย่างเช่น ชนิดและสมบัติของอนุภาค, ของไหล, อุณหภูมิ, ความดัน และแผ่นกระจายอากาศ เป็นต้น[13, 18] ดังนั้นการแก้ปัญหาที่จะไม่ให้เกิดการเกาะกันของอนุภาคและการเกิดดีฟลูอิดิเซชันขึ้นนั้น ก็คือการทำให้อนุภาคที่อยู่ในระบบมีการกระจายตัวที่ดี[14] โดยแนวทางหนึ่งที่น่าจะสามารถนำมาใช้ได้คือ การให้แผ่นกระจายอากาศที่สามารถกระจายอากาศได้ดี ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าแผ่นกระจายอากาศที่ออกแบบมาแตกต่างกันนั้น มีผลต่อกลไกการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกระจายอากาศ ซึ่งจะให้ผลการกระจายอากาศและการขยายตัวของเบดที่แตกต่างกันออกไป นั่นคือแผ่นกระจายอากาศมีผลกับการกระจายอากาศและการขยายตัวของเบด[24]

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงลักษณะการเกิดฟลูอิดเซชันที่เกิดจากการใช้แผ่นกระจายอากาศที่ออกแบบมาแตกต่างกัน และพิจารณาถึงอนุภาคของของแข็งที่มีการเกาะกันในลักษณะต่างๆกันว่าจะเกิดฟลูอิดเซชันเป็นลักษณะใด โดยการพิจารณาถึงการเกิดฟลูอิดเซชันจะพิจารณาจากความเร็วของของไหลที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงลักษณะการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกที่เกิดขึ้นที่เกิดจากการใช้แผ่นกระจายอากาศที่ออกแบบมาแตกต่างกัน และพิจารณาถึงอนุภาคของของแข็งที่มีการเกาะกันในลักษณะต่างๆกันว่าจะเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกเป็นลักษณะใด โดยการพิจารณาถึงการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกจะพิจารณาจากความเร็วของของไหลที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไฮดรอลิก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

ระบบฟลูอิดไอเซชัน เป็นระบบที่ทำให้อนุภาคของของแข็งมีลักษณะคล้ายของไหล โดยการป้อนของไหล(แก๊สหรือของเหลว)เข้าสู่หอตลอดจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน และจะไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล ซึ่งบนแผ่นกระจายของไหลจะมีอนุภาคของของแข็งที่มีลักษณะเป็นชิ้นหรือเป็นเม็ดอยู่ ของไหลจะไหลผ่านชั้นของอนุภาคของของแข็ง แล้วจึงไหลออกทางด้านบนของหอตลอด เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆจนอนุภาคของของแข็งเริ่มขยับตัว และจนกระทั่งความเร็วของของไหลสูงมากพอจะทำให้อนุภาคเกิดการลอยตัวอย่างมีอิสระไม่เกาะติดกัน ซึ่งอนุภาคจะมีลักษณะคล้ายของไหล จุดนี้เองเรียกว่า " ฟลูอิดไอเซชัน " [1,11]

### 2.1 ระบบฟลูอิดไอเซชัน

ระบบฟลูอิดไอเซชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

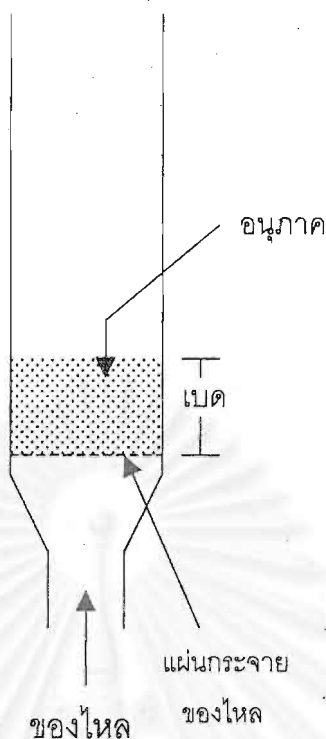
1. ฟลูอิดไอเซชันสองวัฏภาค (Two-phase fluidization) ในหอตลอดจะประกอบด้วยวัฏภาคของของแข็งและของไหล ซึ่งของไหลอาจจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดไอเซชันสองวัฏภาคจึงแบ่งได้เป็นอีก 2 ชนิด คือ

- แก๊สฟลูอิดไอเซชัน (Gas fluidization)
- ฟลูอิดไอเซชันของเหลว (Liquid fluidization)

2. ฟลูอิดไอเซชันสามวัฏภาค (Three-phase fluidization) ในหอตลอดจะประกอบด้วยวัฏภาคของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สำหรับฟลูอิดไอเซชันสามวัฏภาคเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดไอเซชันสองวัฏภาค

#### 2.1.1 ลักษณะของฟลูอิดไอเซชันในเบด

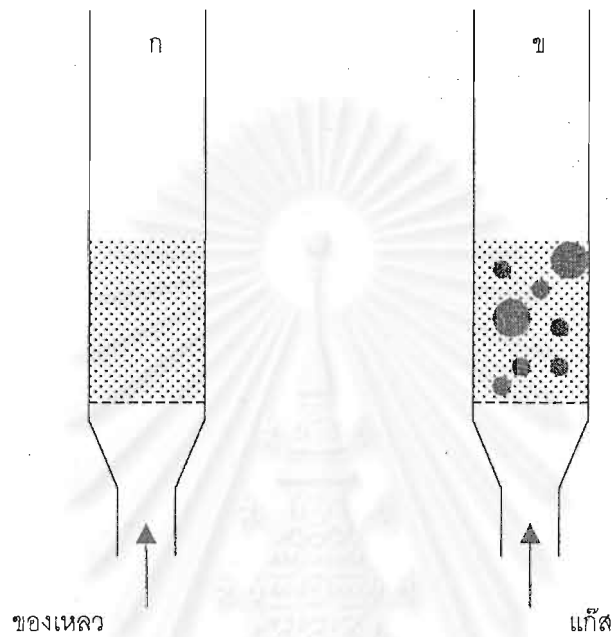
เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตลอดที่มีปริมาณอนุภาคของเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยของไหลในหอตลอด ซึ่งจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือ ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอตลอดดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระดับของเบดในหอทดลอง

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอทดลองเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้าๆ ขณะที่ความเร็วของของไหลยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวและจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวอย่างเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดิเซชัน หลังจากนั้นไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของไหล ช่วงที่เม็ดของแข็งอยู่ชิดกันมาก เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดิซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีก ของไหลเกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งลอยออกจากหอทดลอง เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดิซ์เบดแบบเจือจาง (Dilute-phase fluidized bed) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากหอทดลอง ซึ่งในลักษณะนี้เราใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ ถ้าใช้อากาศก็เป็นการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatics transport) แต่ถ้าใช้ของเหลวจะเรียกว่า ขนส่งด้วยของเหลว (Hydraulics transport)

ฟลูอิดิ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดแบบนี้ว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Particulate bed of homogeneously bed or smoothly fluidized bed or liquid fluidized bed) ดังรูปที่ 2.2 ก.



รูปที่ 2.2 ลักษณะของฟลูอิดิ์เบด

ฟลูอิดิ์เบดที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากการใช้ของเหลวมาก เพราะเมื่อความเร็วของอากาศสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดิ์เบดแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวเองขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกออกในที่สุด ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองแก๊สลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นไปด้วย ซึ่งการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งภายในเบดจะเป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวาย เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดิ์เบดวุ่นวาย ดังรูปที่ 2.2 ข.

### 2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบฟลูอิดิ์เบด

ข้อเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้นิเทศฟลูอิดิ์เบดกับการใช้นิเทศอื่น ๆ มีรายละเอียดดังนี้

### 2.1.2.1 ข้อดี

เนื่องจากเม็ดยางของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบตจะคงที่ตลอดซึ่งต่างจากเบตนิ่งหรือเบตบรรจุ อุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบต ในการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบนส่วนเม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก และจากการที่มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบตและไหลเติมเข้าไปในเบตได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่ายขึ้น และได้ผลผลิตที่คงที่

การที่เม็ดของแข็งไหลเวียนอยู่ภายในเบตเม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของไหลอันเดียวกัน ฟลูอิดเบตจึงเหมาะสมกับกระบวนการที่มีปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบตนิ่งที่ใช้เม็ดของแข็งจำนวนเท่ากัน จึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร ในการทำงานด้วยฟลูอิดเบตจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและความดันตกคร่อมของเบตน้อยกว่าในแบบเบตบรรจุมาก อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการขนส่งเม็ดของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ [1,11,18]

### 2.1.2.2 ข้อเสีย

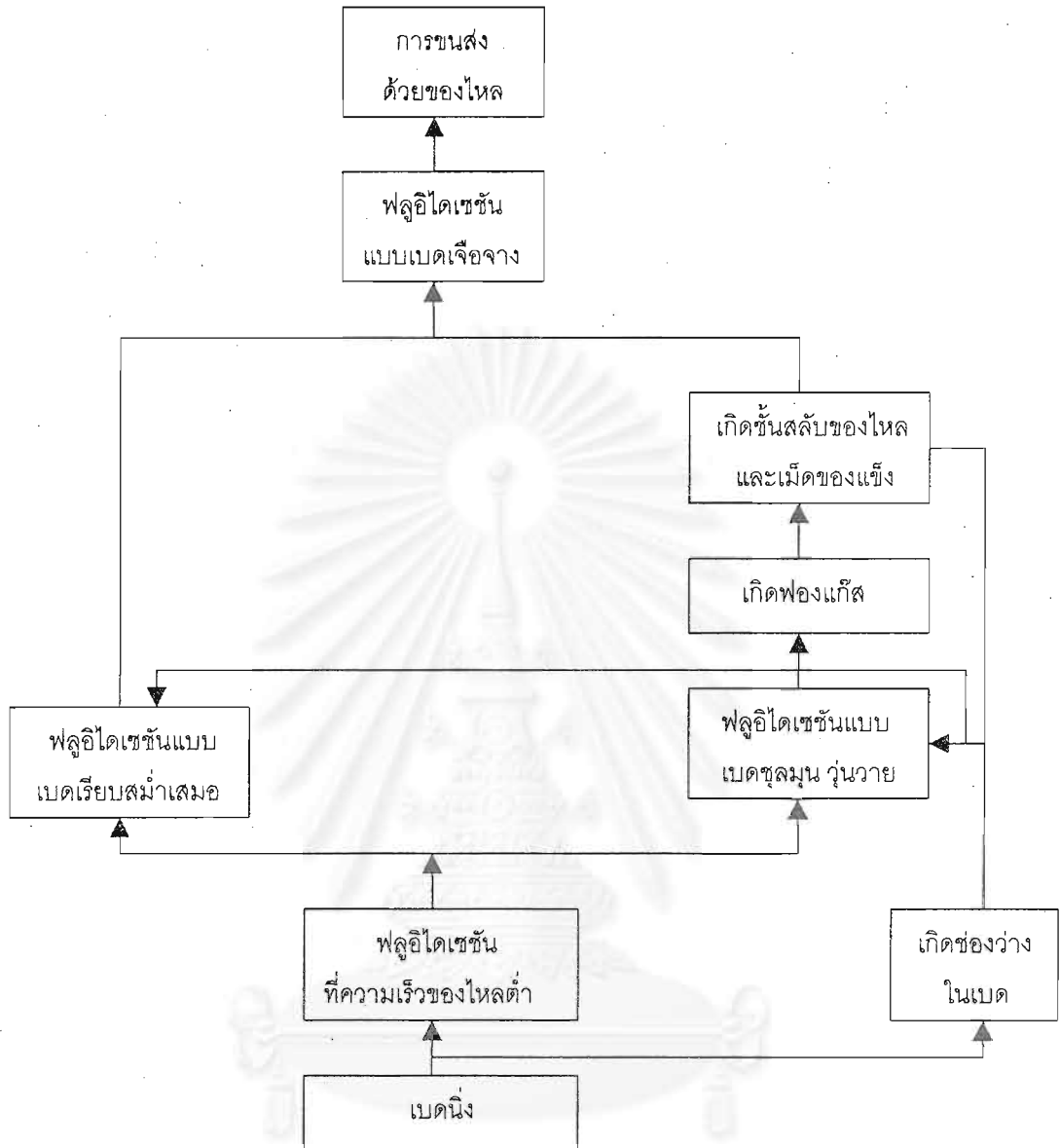
ในระบบมักเกิดฟองแก๊สในเบตเมื่อใช้แก๊สในระบบ ทำให้การสัมผัสไม่ดี เป็นการสูญเสียเปลืองถ้ายังเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยแล้วทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง การผสมจะเกิดอย่างรวดเร็ว บางครั้งเม็ดของของแข็งมีช่วงเวลาอยู่ในเบตสั้นเกินไป เมื่อทำงานต่อเนื่องทำให้ผลลัพธ์ลดลง หรือเม็ดของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ตรงตามข้อกำหนด เวลาของของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบตสูงๆ หรือเบตหลายๆชั้นทำให้เปลืองเงินลงทุนมาก การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไป เม็ดของแข็งก็จะออกจากเบตไปพร้อมกับของไหล เมื่อเม็ดของแข็งมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการสันตะเหือนของหอตลอด หรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากเม็ดของแข็งมากกระทบกับผนังของหอตลอด ระบบไม่สามารถใช้กับเม็ดของแข็งที่เป็ยกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อนและตกลงมายังส่วนล่างของเบต [1,11]

### 2.1.3 ฟลูอิดเซชันแบบเรียบ(Smoothly fluidized beds) และแบบซุลมุน(Aggregative fluidized beds or bubbling fluidized beds)

ฟลูอิดเซชันแบบเบดเรียบมีลักษณะดังนี้ เม็ดของของแข็งแยกออกจากกันโดยอิสระ ระยะห่างระหว่างเม็ดมีค่าใกล้เคียงกันมาก และระยะห่างนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามความเร็วของของไหล โดยเบดจะมีเนื้อที่สม่ำเสมอหรือกล่าวอีกประการหนึ่งคือ มีความหนาแน่นของเม็ดของแข็งสม่ำเสมอ

ส่วนเบดซุลมุนเม็ดของแข็งไม่ได้เคลื่อนที่อย่างอิสระ แต่มีแนวโน้มที่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ๆ การเคลื่อนไหวของกลุ่มเป็นไปอย่างซุลมุน นอกจากนี้บางส่วนของของไหลยังก่อตัวเป็นฟองที่ส่วนล่างของเบด แล้วฟองนี้ก็จะชักนำให้เม็ดของของแข็งลอยตามขึ้นไปจนถึงส่วนบนของเบด ถ้าของไหลเป็นของเหลวการก่อตัวเป็นฟองก็มีส่วนคล้ายกับการเกิดฟองแก๊ส เมื่อเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้นเบดจึงมีลักษณะเหมือนกับของเหลวกำลังเดือด เบดจึงไม่สม่ำเสมอ โดยภายในเบดจะประกอบด้วยสถานะ 2 สถานะ คือ เบดหนาแน่นและเบดเจือจางอยู่ปนกัน ถ้ามองในแง่ปฏิบัติ ฟลูอิดเซชันแบบซุลมุนจะเกิดขึ้นได้ก็ต้องใช้เม็ดของแข็งและของไหลที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกันมาก ซึ่งก็ได้แก๊สและอนุภาคของแข็ง เป็นต้น ในรูปที่ 2.3 จะแสดงลักษณะต่างๆของฟลูอิดเบดที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของไหลเพิ่มขึ้น





รูปที่ 2.3 ลักษณะต่างๆของฟลูอิดเซชันเบตที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของไหลเพิ่มขึ้น

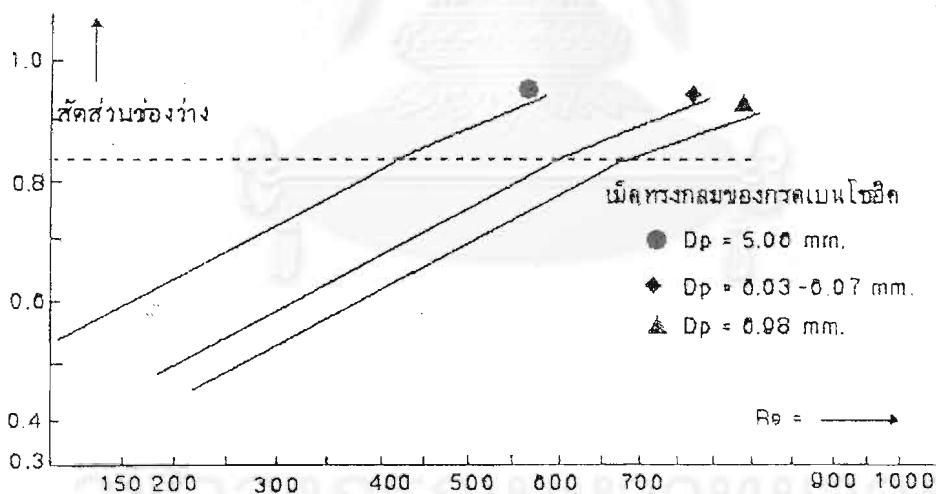
#### 2.1.4 การเกิดฟองแก๊สและชั้นสลับของไหลกับเม็ดของแข็ง

ลักษณะการเกิดเบตทั้งสองแบบจะเกิดขึ้นเฉพาะในเบตขุลมุนเท่านั้น ฟองที่เกิดขึ้นคล้ายกับเกิดกลุ่มแก๊ส เริ่มแรกเกิดขึ้นที่ส่วนกลางเหนือแผ่นกระจาย หลังจากนั้นก็จะหลุดลอยผ่านชั้นเบตขึ้นไปจนถึงผิวหน้าของเบตแล้วก็แตกกระจายออก ซึ่งขนาดของฟองก็จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ว่างในหลอดทดลอง [1,8]

ชั้นสลับเกิดขึ้นได้เมื่อฟองแก๊สหลายๆฟองได้มารวมกันแล้วเกิดเป็นฟองขนาดใหญ่ จนมีเส้นผ่านศูนย์กลางโตเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด ฟองแก๊สก็จะแยกของแข็งออกเป็นชั้นๆให้เห็นชัดเจน จากการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งนั้นจะเคลื่อนที่คล้ายกับการเคลื่อนที่ของลูกสูบ เม็ดของแข็งจะเคลื่อนที่จนถึงความสูงระดับหนึ่งแล้วแยกตัวออกตกลงในเบดเหมือนกับฝนตกแล้วก่อตัวเป็นเบดซุลมุนใหม่ เบดชนิดนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกับเบดที่มีความสูงมากๆ และแก๊สมีความเร็วสูง

### 2.1.5 เบดเจือจาง

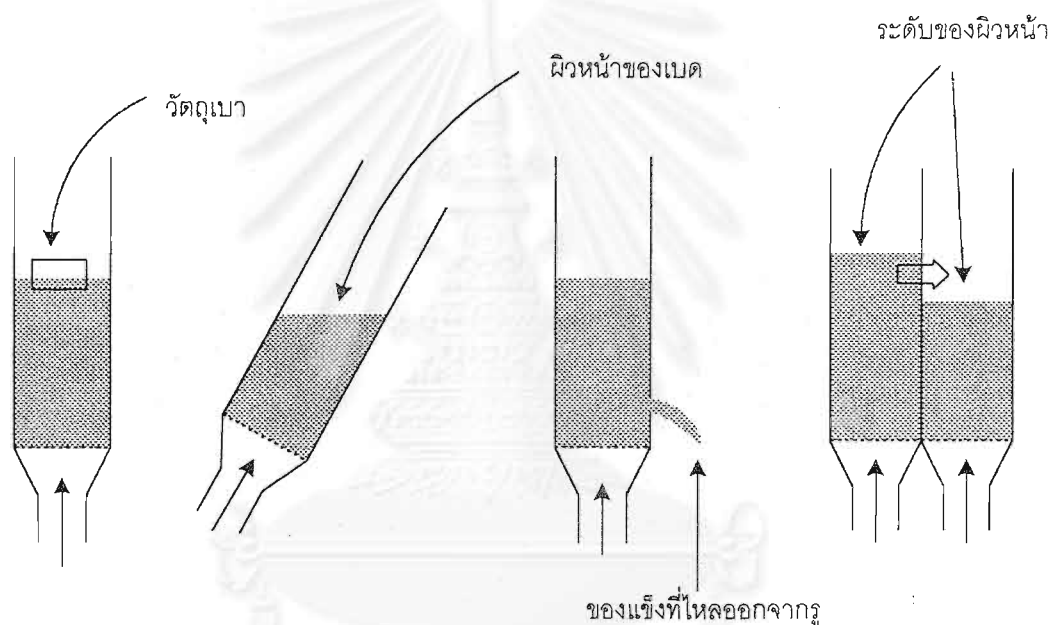
เบดเจือจางเกิดขึ้นต่อเมื่อความเร็วของไหลเพิ่มมากขึ้นระยะห่างของเม็ดของแข็งมากกว่าความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง Damronglerd [38] ได้ทำการศึกษาเบดเจือจางโดยใช้เบดขนาด 5.06 มม. และ 6.98 มม. ถูกทำให้ฟลูอิดไดซ์ด้วยน้ำ พบว่าเบดจะเปลี่ยนแปลงเมื่อสัดส่วนช่องว่างในเบด มากกว่า 0.85 โดยดูจากการหาค่าของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วของไหล(ซึ่งแสดงให้ดูในรูปของค่า Reynolds Number) ซึ่งในเบดหนาแน่นจะมีความชันประมาณ 2.38 และค่าของความชันในเบดเจือจางมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.0 ซึ่งเห็นข้อแตกต่างได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบของ Damronglerd ศึกษาถึงเบดเจือจาง

## 2.1.6 ลักษณะคล้ายกับของไหลของฟลูอิดซ์เบด

ในขณะที่เม็ดของแข็งลอยตัวอยู่ในลักษณะฟลูอิดซ์เบดแบบหนาแน่นแล้วนั้น ผิวหน้าของเบดจะเรียบสม่ำเสมอเหมือนกับผิวหน้าของของไหลที่ใสอยู่ในภาชนะ โดยเฉพาะถ้าเป็นฟลูอิดซ์เบดแบบเดียวกันหรือว่าจัดหอตกลงเอนไปทางซ้ายหรือขวาก็ตาม ผิวหน้าก็ยังเรียบอยู่อย่างเดิม ดังรูปที่ 2.5 ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบดใส่ลงไป ในเบดวัตถุของแข็งนั้นจะลอยอยู่บนผิวหน้าของเบด นอกจากนี้ถ้าเจาะรูด้านข้างของเบด เม็ดของแข็งจะไหลออกจากรูนั้นได้เหมือนของเหลว หรือถ้านำเอาเบดสองเบดมาต่อท่อถึงกัน เม็ดของแข็งจากเบดสูงกว่าจะไหลไปยังเบดที่มีเม็ดของแข็งต่ำกว่า ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดซ์เบด

จากการที่ของแข็งในเบดมีการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหลนี้ จึงมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอย่างมหาศาล ที่สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ทำงานในระบบต่อเนื่อง (Continuous process) ได้ดังในหอทดลองที่มีหลายๆ ชั้น เม็ดของแข็งจากชั้นบนจะไหลลงมายังชั้นล่างและไหลออกนอกหอทดลอง เช่นการไหลของของเหลวในหอกลั่น หรือใช้บ้อนวัสดุของแข็งเข้าทางซ้ายแล้วให้ไปออกทางด้านขวาของหอทดลอง ในขณะที่ผ่านเบดออกมานี้ย่อมต้องมีการเปลี่ยนแปลงภายในเบดอย่างแน่นอน เช่น การตากแห้งเมล็ดธัญญาหาร

## 2.2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

### 2.2.1 ช่องว่างภายในเบต(Voidage)

เม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ในเบตไม่ว่าจะบรรจุอย่างเป็นระเบียบหรือแบบไม่เป็นระเบียบ (Random packing) ย่อมเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดของของแข็งขึ้นเสมอ จะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและขนาดของเม็ดของแข็งที่ใช้ เม็ดของแข็งที่ผิวราบเรียบก็ไม่ค่อยเป็นปัญหามากนัก แต่ถ้าเป็นของแข็งที่มีรูพรุน(pore)อยู่ภายในเม็ดด้วยแล้วการหาปริมาณช่องว่างที่แท้จริงย่อมทำได้ยากมาก

การคำนวณหาช่องว่างภายในเบต[1] กรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบตทำให้เกิดขนาดช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป เช่น การเรียงตัวแบบ Cubic, Orthorhombic และ Romboedric

$$\text{สัดส่วนช่องว่าง } (\varepsilon) = \frac{\text{ปริมาตรของช่องว่าง}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดที่พิจารณา}} \quad (2.1)$$

สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่เป็นรูปทรงกลม อาจเป็นวัสดุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน การหาสัดส่วนช่องว่างที่เกิดขึ้นในเบตก็จะเปลี่ยนไปตามรูปร่างและขนาดของวัสดุที่ใช้บรรจุในหอตกลง หรือแม้แต่การบรรจุที่เป็นระเบียบกับแบบไม่เป็นระเบียบก็จะมีช่องว่างไม่เท่ากัน

### 2.2.2 พื้นที่เฉพาะ (Specific area)

พื้นที่เฉพาะในเบต(a) หมายถึง ผิวหน้าของเม็ดวัสดุหรือพื้นที่สัมผัสของเม็ดของแข็งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเบต[1]

$$a = \frac{A_c}{V_c} \quad (2.2)$$

$A_c$  = ผิวหน้าหรือพื้นที่สัมผัสของเม็ดของแข็งทั้งหมดในเบต

$V_c$  = ปริมาตรทั้งหมดในเบต

### 2.2.3 พื้นที่เฉพาะของเม็ดของแข็ง ( $S_p$ )

พื้นที่เฉพาะของเม็ดของแข็ง หมายถึง พื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งต่อปริมาตรของตัวเม็ดของแข็งเอง[1]

$$S_p = \frac{A_p}{V_p} \quad (2.3)$$

$A_p$  = พื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งเม็ดเดียว

$V_p$  = ปริมาตรของเม็ดของแข็งเม็ดเดียว

ถ้าเม็ดของแข็งเป็นทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$

$$S_p = \frac{\pi d^2}{\frac{\pi}{6} d^3} = \frac{6}{d} \quad (2.4)$$

ในเขตที่มีขนาดเม็ดทรงกลมเท่ากันตลอดเขต พื้นที่เฉพาะของเม็ดของแข็งคำนวณได้ดังนี้

$$S_p = \frac{A_c}{V_c(1-\varepsilon)} = \frac{a}{1-\varepsilon} \quad (2.5)$$

เม็ดของแข็งที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมการคำนวณหรือหาค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทำได้ไม่  
ง่ายนัก จึงมีผู้กำหนดค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมติของเม็ดของแข็งขึ้น

### 2.2.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมติ ( $d_p$ )

Dela Vailla ได้ให้นิยามของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมุติดังนี้

$$d_p = \frac{k_1}{S_p} \quad (2.6)$$

$k_1$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับการรูปร่างของเม็ดของแข็ง

เม็ดของแข็งที่กลมมน  $k_1 = 6.1$

เม็ดของแข็งที่เป็นเหลี่ยม  $k_1 = 7.7$

บางครั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมติได้จากการคำนวณพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งแล้วเทียบเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันซึ่งค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

$$d_p = \frac{6}{S_p} \quad (2.7)$$

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า ( $d_e$ )

คำนวณจากเม็ดของแข็งที่มีปริมาตรเท่ากับเม็ดของแข็งทรงกลม

$$\begin{aligned} d_e &= \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}} \\ &= 1.241V_p^{1/3} \end{aligned} \quad (2.8)$$

## 2.2.5 แพลคเตอร์รูปร่าง

ในการศึกษาทางทฤษฎีบางอย่าง เช่น ศึกษาการถ่ายเทมวลสารหรือการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกไปยังเม็ดของแข็งหรือจากเม็ดของแข็งไปยังภายนอก รูปร่างลักษณะของเม็ดของแข็งเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลไม่น้อยเช่นกัน

แพลคเตอร์รูปร่าง ( $\phi_s$ ) คือ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีปริมาตรเทียบเท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งใดๆ[1]

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลมปริมาตรเทียบเท่าเม็ดของแข็ง}}{\text{พื้นที่ผิวของเม็ดของแข็ง}} \quad (2.9)$$

พื้นที่ผิวทรงกลมเท่ากับ  $\pi d^2$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมปริมาตรเทียบเท่าเม็ดของแข็งคำนวณได้จาก

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}} = 1.241V_p^{1/3}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore \text{พื้นที่ผิวทรงกลม} &= \pi(1.241V_p^{1/3})^2 \\
 &= 4.87V_p^{2/3} \\
 \phi_s &= \frac{4.87V_p^{2/3}}{A_p} \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

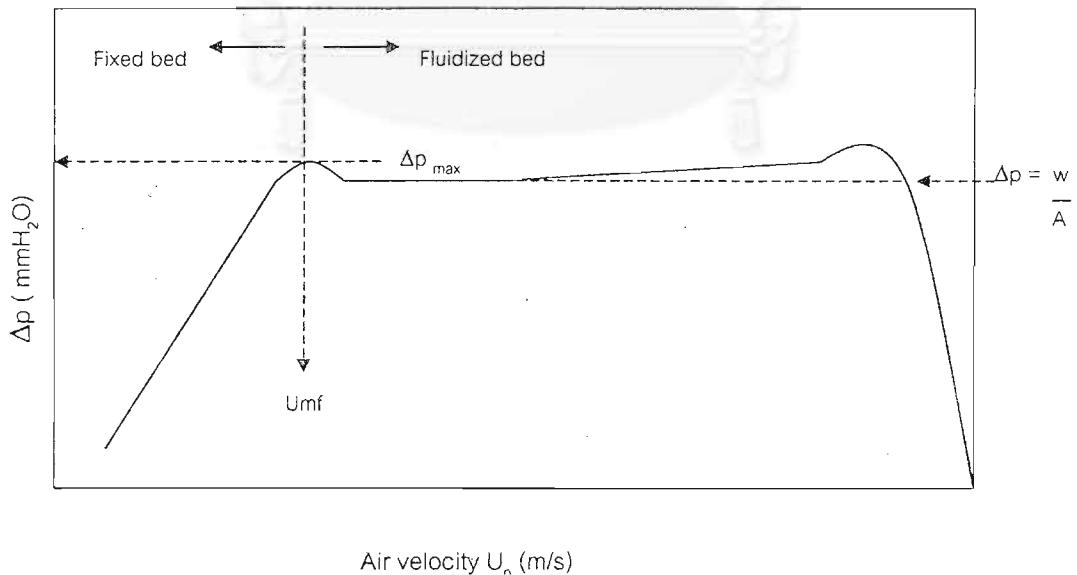
ข้อสังเกต

ถ้าเม็ดของแข็งเป็นรูปทรงกลม  $\phi_s = 1$

และถ้าของแข็งมีรูปร่างต่างๆไป  $\phi_s < 1$  เสมอ

## 2.2.6 สมการทั่วไปของการเกิดฟลูอิดเซชัน

จุดที่อนุภาคของของแข็งเริ่มลอยตัวอย่างเป็นอิสระเรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดเซชัน (minimum fluidization) และความเร็วของของไหลที่ทำให้เกิดจุดเริ่มฟลูอิดเซชันเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (minimum fluidization velocity,  $U_{mf}$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการของ S.Ergun[2] โดยลักษณะกราฟที่ได้จากสมการของ Ergun เป็นดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดกับอัตราการไหลของอากาศ

โดยค่าของ  $U_{mi}$  จะสามารถหาได้จากรูปที่ 2.6 คือที่จุดสูงสุดของความดันตกคร่อมของเส้นกราฟการลดลงของความเร็วอากาศ  
การไหลที่เกิดขึ้นในหอตดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. การไหลแบบเป็นระเบียบ (laminar flow) คือที่อัตราการไหลของของไหลต่ำมาก ๆ ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จาก

$$\Delta P = \frac{32\mu U_0 L}{g_c D_h^2} \quad (2.11)$$

2. การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) คือที่อัตราการไหลของของไหลสูง การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะไม่เป็นระเบียบ ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการของ Ergun [1,2,11]

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 150 \frac{(1-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu U_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \frac{\rho_g U_0^2}{\phi_s d_p} \quad (2.12)$$

จากสมการที่(2.12) ที่ค่าของเรโนลด์(Re)ต่ำ การสูญเสียความหนืด(viscous losses)มีค่ามากกว่าจึงเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 150 \frac{(1-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu U_0}{(\phi_s d_p)^2} \quad \text{Re}_p < 20 \quad (2.13)$$

$$\text{โดยที่ค่า } \text{Re}_p = \frac{d_p \rho_g U_0}{\mu} \quad (2.14)$$

และที่ค่าเรโนลด์(Re)สูงการสูญเสียพลังงานจลน์(kinetic energy losses)มีค่ามากกว่าจึงสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 1.75 \frac{1-\varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \frac{\rho_g U_0^2}{\phi_s d_p} \quad \text{Re}_p > 1000 \quad (2.15)$$

ในขณะที่เกิดฟลูอิดเซชันพบว่า เม็ดของแข็งจะอยู่ในสภาวะสมดุลของแรง 2 แรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวเม็ดของแข็งกับแรงพยุงจากของไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านทานของของไหล



$$\text{แรงพุง (แรงเสียดทาน + แรงต้านทาน)} = \text{น้ำหนักของเม็ดของแข็ง} \quad (2.16)$$

หรือ

$$\begin{aligned} & (\text{ความดันตกคร่อมในพื้นที่ภาคตัดขวาง}) \times (\text{พื้นที่ภาคตัดขวางของหลอดลง}) \\ & = (\text{ปริมาตรของเบด}) \times (\text{ส่วนของของแข็งในเบด}) \times (\text{ความถ่วงจะเพาะของของแข็ง}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta P \cdot A_t = W = (A_t L_{mf}) (1 - \varepsilon_{mf}) \left[ (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right] \quad (2.18)$$

และสามารถจัดรูปเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.19)$$

ในส่วนค่าความความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันหาได้จาก

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.20)$$

จากสมการ(2.20) ที่ขนาดอนุภาคเล็กสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \cdot \frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} g \left( \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) \quad \text{Re}_p < 20 \quad (2.21)$$

จากสมการ(2.20) ที่ขนาดอนุภาคใหญ่สามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi_s d_p}{1.75} \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \cdot g \varepsilon_{mf}^3 \quad \text{Re}_p > 1000 \quad (2.22)$$

แต่ถ้ารู้ค่าของ  $\varepsilon_{mf}$  และ/หรือ  $\phi_s$  จะได้ว่า

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} = 14 \quad \text{และ} \quad \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} = 11 \quad (2.23)$$

ดังนั้นที่ขนาดอนุภาคเล็กสามารถเขียนสมการหาความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ใหม่เป็น

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad \text{Re}_p < 20 \quad (2.24)$$

ดังนั้นที่ขนาดอนุภาคใหญ่สามารถเขียนสมการหาความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ใหม่เป็น

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad \text{For } Re_p > 1000 \quad (2.25)$$

ความเร็วปลายของอนุภาคสามารถหาได้จาก

$$U_t = \left[ \frac{4gd_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

ดังนั้นค่าเรโนลด์ซ์ของอนุภาคสามารถหาได้จาก

$$Re_p = \frac{d_p \rho_g U_t}{\mu} \quad (2.27)$$

ในส่วนของค่า  $C_d$  สามารถหาได้จาก

$$C_d Re_p^2 = \frac{4gd_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{3\mu^2} \quad (2.28)$$

อนุภาคที่เป็นทรงกลมสามารถค่า  $C_d$  ได้จาก

$$C_{d,spherical} = 24 / Re_p \quad \text{For } Re_p < 0.4 \quad (2.29)$$

$$C_{d,spherical} = 10 / Re_p^{1/2} \quad \text{For } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.30)$$

$$C_{d,spherical} = 0.43 \quad \text{For } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.31)$$

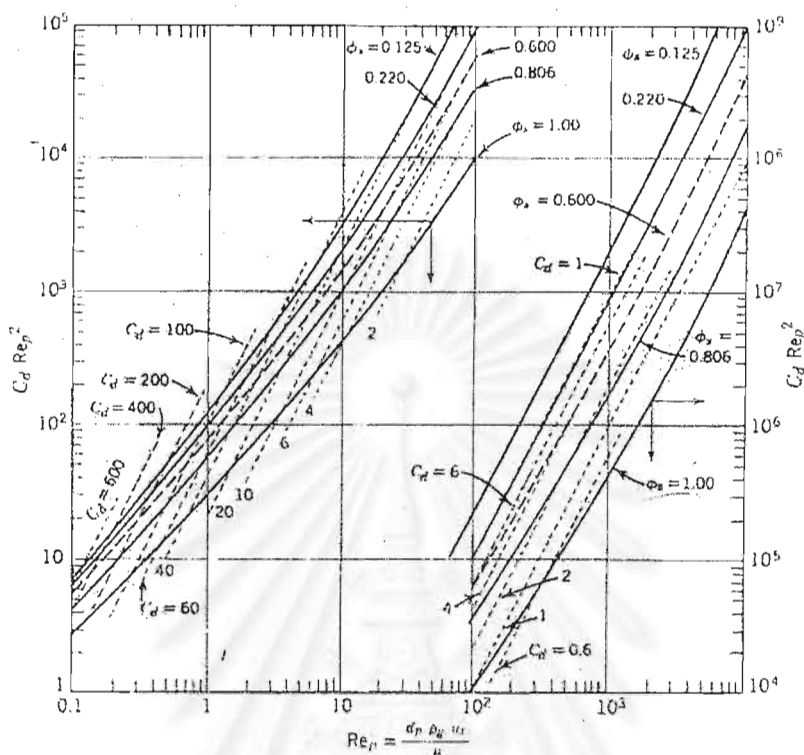
เมื่อทราบค่า  $C_d$  ดังนั้นสามารถหาค่า  $U_t$  จากสมการที่ (2.26) หรือ

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{For } Re_p < 0.4 \quad (2.32)$$

$$U_{t,spherical} = \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{For } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.33)$$

$$U_{t,spherical} = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{For } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.34)$$

การหาค่า  $C_d$  ยังสามารถหาได้จากรูปที่ 2.7 เมื่อรู้ค่า  $C_d Re_p^2$  จากสมการที่ (2.28)



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re_p$  กับ  $C_d Re_p^2$  ของ Brown [7,37]

## 2.3 ตัวแปรและปัจจัยที่มีผลต่อระบบฟลูอิดเซชัน

### 2.3.1 ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดเซชัน [1,11,13,21,22]

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อฟลูอิดเซชัน ได้แก่

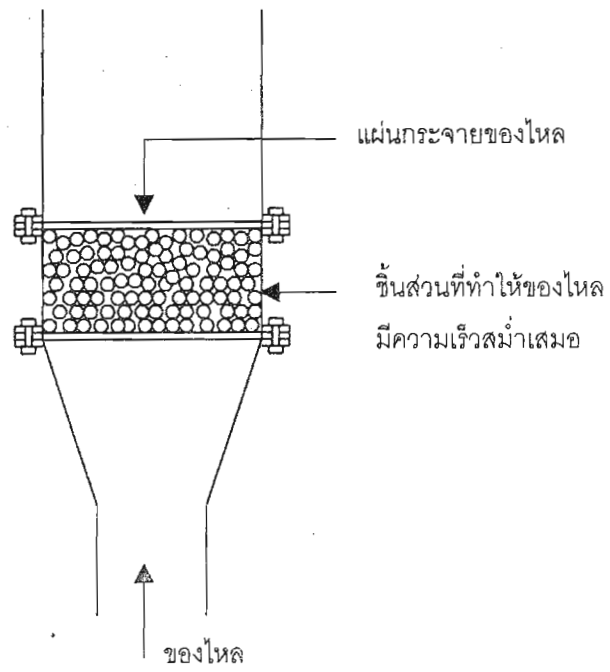
- ความเร็วของของไหล
- ตัวกระจายของไหล
- ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอด
- เม็ดของแข็ง
- ความหนาแน่นของของไหลและเม็ดของแข็ง อุณหภูมิ ความดัน
- ความหนืด
- ความสูงของเบด

ฟลูอิดไรเซชันจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยแฟกเตอร์หลายอย่างมาผสมผสานกันให้เกิดความพอเหมาะขึ้นในเบด เบดนั้นจึงจะมีลักษณะคล้ายของไหลได้ แฟกเตอร์หรือตัวแปรที่สำคัญคือ ความเร็วของของไหล ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ความเร็วของของไหลที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นทีละน้อยนั้น ในระยะแรกเบดยังนิ่งอยู่ความดันตกก็จะเพิ่มไปพร้อมกับความเร็วของของไหล จนถึงระดับหนึ่งเมื่อเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวและเมื่อแยกตัวเป็นอิสระ ความดันตกของเบดก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไปหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ไม่ว่าจะเพิ่มความเร็วให้กับของไหลเท่าไรก็ตาม เบดในช่วงนี้เรียกว่า " ฟลูอิดไรเซชันเบด "

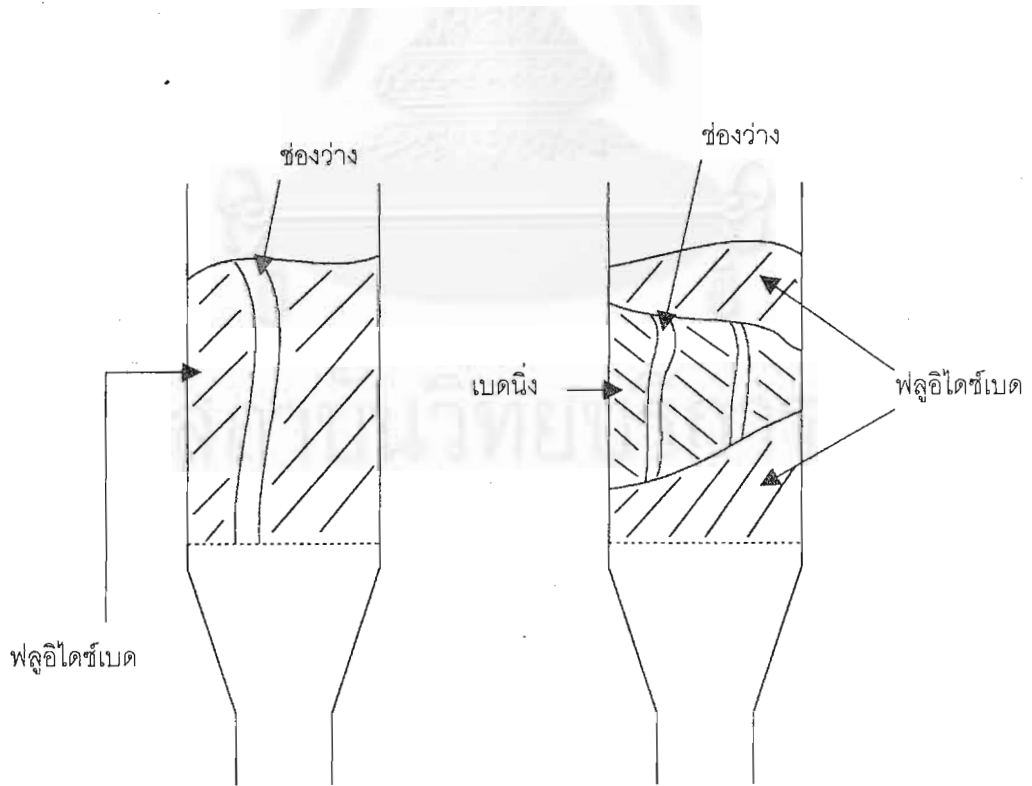
แม้ว่าวัสดุที่ใช้เป็นเบดจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป ลักษณะของเบดหรือความสัมพันธ์ของความดันตกของเบดกับความเร็วก็มีผลเหมือนเดิมคือ ในช่วงที่เป็นฟลูอิดไรเซชันเบดจะมีค่าความดันตกคงที่ เพราะค่าความดันตกในขณะนั้น จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอัตราส่วนของน้ำหนักของเม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ต่อพื้นที่ภาคตัดขวางของหอตกลง

ขณะที่เบดเริ่มเกิดฟลูอิดไรเซชัน เม็ดของแข็งก็เริ่มขยับตัวและจัดระเบียบของตัวเองให้อยู่ในแนวเดียวกัน หรือจัดเรียงเม็ดต่อเม็ดอย่างสวยงาม จากนั้นแต่ละเม็ดก็ค่อยๆแยกห่างกันออกไปเป็นอิสระตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น ความเร็วของของไหลที่ทำให้เบดเริ่มขยับตัวหรือเริ่มจัดตัวเองนี้ (ในขณะเดียวกันความดันตกเริ่มคงที่) ความเร็วจำนวนนี้เรียกว่า " ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไรเซชัน " (minimum fluidization velocity)

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ตัวกระจายของไหล และชั้นส่วนที่จะทำให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของหอตกลง (homogeneity section) [22,24] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และในหอตกลงใดก็ตาม การออกแบบตัวกระจายหรือชั้นส่วนกระจายของไหลที่ไม่เหมาะสมกับเบดที่ใช้แล้ว จะมีโอกาสที่จะเกิดช่องว่างหรือแนวช่องว่างที่มีแต่ของไหลเพียงอย่างเดียวไหลผ่าน (channeling) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ตัวกระจายและชั้นส่วนที่ทำให้ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.9 การเกิด Channeling

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบฟลูอิดไคซ์เบด

ในกระบวนการฟลูอิดไคซ์เบดนั้น มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลต่อระบบอย่างเห็นได้ชัด คือ ลักษณะของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในหอตลอด

#### 2.3.2.1 ลักษณะของฟองแก๊ส

เมื่อปล่อยอากาศให้ไหลเข้าทางด้านล่างของเบดจะเกิดฟองแก๊สขึ้น โดยฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเม็ดของแข็ง ความเร็วของแก๊ส และแผ่นกระจายของไหล ลักษณะของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นแบ่งได้ดังนี้[1,20]

Channeling ซึ่งจะเกิดการผ่านของแก๊สเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งอยู่ตรงทางผ่านของแก๊สทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างๆจะไม่เคลื่อนที่

Bubbling อนุภาคของแข็งในฟลูอิดไคซ์เบดจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าหากบริเวณใดมีปริมาณของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่นหรือไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนั้นว่า " bubbling "

Slugging เป็นการเกิดหรือรวมตัวของฟองแก๊ส จนได้ฟองแก๊สที่มีขนาดเท่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหอตลอด ทำให้มีการแยกตัวของเม็ดของแข็งเป็นชั้นๆ ทำให้การถ่ายเทมวลสารหรือการถ่ายเทความร้อนเกิดได้ไม่ทั่วถึง เนื่องจากเม็ดของแข็งจะสัมผัสกับแก๊สเป็นเวลาดสั้นๆ หรือไม่สัมผัสเลยในบางส่วน

Spouted bed เป็นการที่แก๊สไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของเม็ดของแข็งเท่านั้นด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของของแข็งน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณด้านข้าง ลักษณะการไหลแบบนี้คล้ายน้ำพุ

#### 2.3.2.2 อิทธิพลของฝาผนังหอตลอด

เม็ดของแข็งที่บรรจุในหอตลอดนั้นถ้าเป็นขนาดเม็ดเล็กๆ ปัญหาก็มักไม่ค่อยเกิดขึ้นมากนัก เมื่อขนาดของเม็ดของแข็งเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งขนาดของเม็ดของแข็งเมื่อเทียบกับรัศมีความ

โค้งของหอตดลองปรากฏว่ามีค่าต่างกันไม่มาก เม็ดของแข็งเหล่านี้จะเรียงตัวอยู่ในหอตดลองคล้ายกับว่าเรียงตัวเป็นวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกับหอตดลอง ชั้นของเม็ดที่ติดอยู่กับผนังจะทำให้ช่องว่างมากกว่าแถบอื่น ดังนั้นสัดส่วนช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในเบดจึงมากกว่าเม็ดของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่า ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า อิทธิพลของฝาผนังหอตดลอง (Wall effect)

ขณะที่ของไหลไหลผ่านขึ้นมา ด้านใกล้ผนังความเร็วความเร็วของไหลจะต่ำมากหรือเกือบไม่มีการไหลเลย เนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน เมื่อในหอตดลองที่บรรจุเม็ดของแข็งมีอิทธิพลของฝาผนังเกิดขึ้น ขอบเขตการไหลชนิดเรียบจะสูงมากขึ้น พื้นที่การไหลของของไหลในหอตดลองจะลดน้อยลงหรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำงานที่แท้จริงของของไหลเล็กกว่าเดิมมาก ประสิทธิภาพก็จะน้อยลงด้วย

### 2.3.2.3 อิทธิพลของตัวกระจายแก๊ส

ในขณะที่เบดเกิดฟลูอิดไดซ์เบดด้วยความเร็วของแก๊สต่ำสุด ลักษณะของเบดยังเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดทั้งเบด เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สให้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะก่อตัวเป็นฟองแก๊สขึ้นหรือไม่นั้นขึ้นกับคุณสมบัติของตัวกระจายที่รองรับเบดอยู่ว่าเป็นชนิดใด อย่างเช่นตัวกระจายทำด้วยโลหะเจาะรู(perforated) ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวกระจายที่เป็นรูพรุน ซึ่งเกิดจากการใช้เม็ดโลหะขนาดเล็กมาอัดด้วยความดันสูงๆจนติดกับตัวแผ่นกระจาย(sintered plate) ตัวกระจายแบบหลังนี้แก๊สผ่านได้อย่างสม่ำเสมอ ตัวกระจายแก๊สที่เป็นแบบแผ่นเจาะรูแก๊สจะผ่านออกไปเหมือนกับเจ็ท การเกิดจำนวนฟองขึ้นอยู่กับจำนวนรูที่เจาะ

นอกจากตัวกระจายแก๊สที่ได้กล่าวมาแล้ว ก็มีอีกหลายคนที่ได้พยายามคิดสร้างตัวกระจายแก๊สแบบต่างๆขึ้น เพื่อให้เหมาะกับงานที่ใช้และมีการกระจายของแก๊สที่ดี โดยตัวกระจายอากาศที่ดีนั้นต้องทำให้อนุภาคที่อยู่ในระบบมีสภาพไม่อยู่นิ่งและไหลวนได้ดี [24]

### 2.3.2.4 การออกแบบตัวกระจายของไหล

การออกแบบตัวกระจายนั้นสิ่งที่สำคัญคือ ความดันตกคร่อมตัวกระจายของไหล โดย Agarwal et al. [1] ได้เสนอว่าความดันตกคร่อมตัวกระจายของไหลจะมีค่าเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของความดันตกคร่อมในเบดต่ำสุดประมาณ 35 ซม. ของน้ำ

$$\Delta P_{d,\min} = \max(0.1 \Delta P_{bed}) \quad (2.35)$$

สมการ (2.35) เป็นสมการที่เป็นบรรทัดฐานในการออกแบบความดันตกคร่อมตัวกระจายของไหล การออกแบบทำได้โดย

1. หาค่าความดันตกคร่อมตัวกระจายของไหล จากสมการ(2.35)
2. หาค่าของเรโนลด์์ของการไหลทั้งหมด( $Re_t$ ) ก่อนผ่านตัวกระจาย เพื่อนำมาหาค่า  $C'_d$
3. หาค่าความเร็วของของไหลที่ผ่านรูของแผ่นกระจายของไหลจากสมการ (2.36)

$$u_{or} = C'_d \left( \frac{2g_c \Delta p_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (2.36)$$

อัตราส่วนของ  $u_o/u_{or}$  คือ สัดส่วนของพื้นที่รูต่อพื้นที่ทั้งหมด

4. กำหนดจำนวนรู ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตัวกระจายก็จะสามารถหาความเร็วได้

$$u_o = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 u_{or} N_{or} \quad (2.37)$$

ขณะที่แก๊สผ่านรูออกมาเป็นเจตนันจะมีพลังงานจลน์ที่จะไปทำให้เกิดฟลูอิดไคส์เบด พลังงานจลน์นี้จะสมดุลกับน้ำหนักของน้ำหนักของเบดขณะเกิดฟลูอิดไคส์เบด

$$\frac{\rho_g u_o^2}{2g_c} = \left( \frac{1}{2} \text{ to } \frac{3}{4} \right) \left( \frac{W_{bed}}{A_r} \right) \quad (2.38)$$

หรือ

$$u_{or} = (0.70 - 0.85) \left( \frac{2g_c \Delta p_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (2.39)$$



## 2.4 การประยุกต์ใช้งานของฟลูอิดซ์เบดแบบ 3 ภูมิภาค

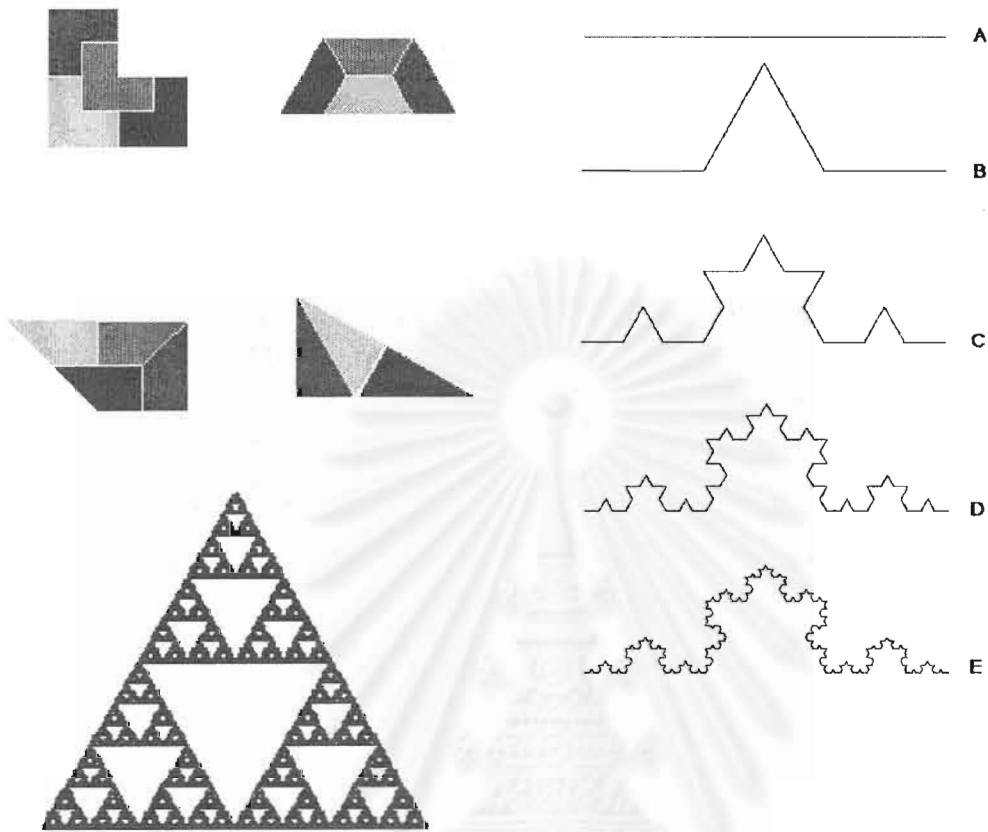
การใช้งานของฟลูอิดซ์เบดแบบ 3 ภูมิภาค สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการคือ

1. กระบวนการทางฟิสิกส์ (physical) เช่น ใช้ในระบบทำความเย็น หอเพิ่มความชื้น และลดความชื้นใช้ทำน้ำตาลเม็ดเล็กๆ และใช้ในการอบแห้ง
2. กระบวนการทางเคมี (chemical) เช่น ใช้ในการผลิตเมทานอล (methanol) ผลิตโพลีเอทิลีน (polyethylene) และผลิตโพลีโอเลฟิน (polyolefins) เป็นต้น

## 2.5 แฟรคทัล (Fractal)

จากการทดลองพบว่าค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์เบด จากการทดลองและจากการคำนวณมีค่าไม่ค่อยใกล้เคียงกันนัก จึงคิดว่าน่าจะมีตัวแปรบางตัวในสมการของ Ergun มีค่ายังไม่ถูกต้อง ซึ่งคิดว่าน่าจะเป็นในส่วนของแฟคเตอร์รูปร่าง ( $\phi_s$ ) เพราะว่าการคำนวณหาค่าแฟคเตอร์รูปร่างนั้นอาจไม่ถูกต้องนักเนื่องจากการคำนวณแบบปริมาตรเทียบเท่า จากวัตถุที่เป็นรูปทรงอื่นๆที่ไม่ใช่ทรงกลมโอกาสที่จะคำนวณผิดพลาดมีมาก และเมื่อพิจารณาค่าแฟคเตอร์รูปร่างในสมการที่ 2.20 จะเห็นว่าค่าแฟคเตอร์รูปร่างยกกำลังสองเป็นส่วนอยู่ในสมการเมื่อค่าแฟคเตอร์รูปร่างมีค่าน้อยลงจะทำให้ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์เบดมีค่าน้อยลงด้วย โดยถ้าค่าแฟคเตอร์รูปร่างยิ่งน้อยลงค่าผลต่างของ  $U_{mf}$  ก็จะมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงน่าจะมีวิธีการหาค่าแฟคเตอร์รูปร่างที่มีความถูกต้องมากกว่านี้

Benoit Mandelbrot [4-6] ได้เสนอทฤษฎีของแฟรคทัล ซึ่งเป็นตัวที่จะนำมาแก้ปัญหาในเรื่องของมาตราส่วนและได้ให้คำจำกัดความไว้ว่า แฟรคทัล คือ สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นหรือพื้นผิวที่เป็นอิสระไม่ขึ้นกับมาตราส่วน และมีคุณสมบัติที่มีความเหมือนในตัวเอง (self-similarity) เป็นส่วนย่อยส่วนหนึ่งของความเหมือนในตัวเอง โดยมาตราส่วนของแฟรคทัล คือ fractal dimension เป็นหน่วยของความคล้ายคลึงกันของเส้น พื้นผิว หรือปริมาตร รูปที่ 2.10 เป็นตัวอย่างรูปที่เป็นแฟรคทัล ซึ่งจะเห็นว่ารูปแต่ละรูปจะประกอบขึ้นจากรูปเล็กจนกลายเป็นรูปใหญ่โดยที่ที่รูปเล็กย่อยจะมีลักษณะเหมือนกับรูปใหญ่



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างรูปแฟรคทัลที่มีลักษณะความเหมือนในตัวของมันเอง

และ Louis Fry Richardson ได้เสนอวิธีการหาค่า fractal dimension ซึ่งเค้าได้ใช้หา fractal dimension ของเกาะอังกฤษ[4-6,10] ดังแสดงในรูปที่ 2.11

สมการการหาค่า fractal dimension

$$\delta = 1 + \frac{\ln m}{\ln \lambda} \tag{2.40}$$

$\delta$  = ค่า fractal dimension

$\lambda$  = ค่าความยาวของเส้นตรงที่มีค่าคงที่ ที่ลากไปตามเส้นรอบรูป หารด้วยความยาวสูงสุดของรูปฉาย

$P$  = ค่าความยาวเส้นรอบรูปที่เกิดจากค่าของ  $\lambda$  รวมกัน หารด้วยความยาวสูงสุดของรูปฉาย

$L$  = ค่าความยาวสูงสุดของรูปฉาย



รูปที่ 2.11 การหาค่าแฟรคทัลและกราฟ Richardson Plot

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

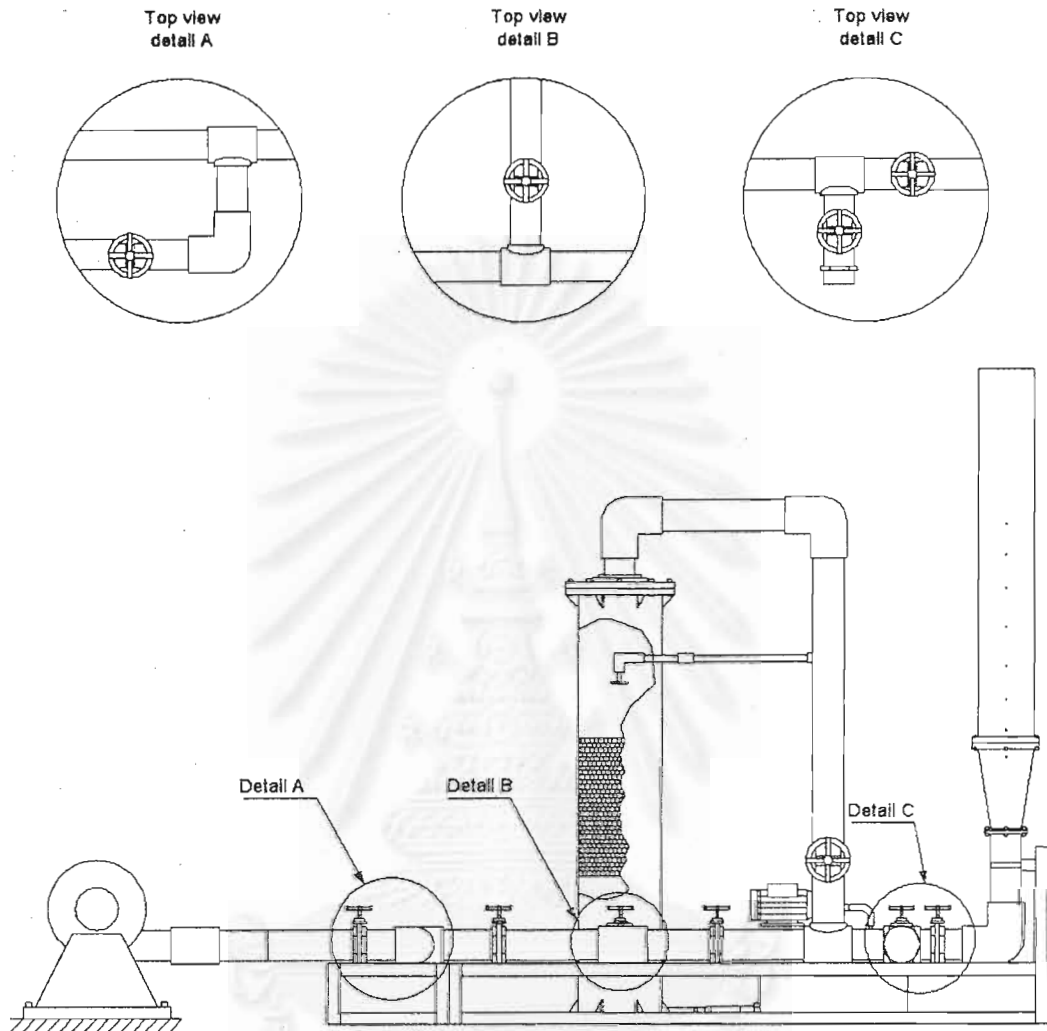
1. ชุดทดลองฟลูอิดไดเซชัน
2. มานอมิเตอร์(manometer)
3. เครื่องวัดความเร็วลม(anemometer)
4. เครื่องวัดอุณหภูมิ(thermometer)
5. เครื่องวัดความชื้นของอากาศ(hygrometer)
6. เม็ดพลาสติกทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.59 – 0.6 ซม. ความหนาแน่น 1.025 กรัม/ซม.<sup>3</sup> ซึ่งจัดอยู่ใน เกลดาร์ท กลุ่ม ดี
7. เมล็ดถั่วเหลือง
8. เมล็ดถั่วเขียว
9. แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J

#### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1. ออกแบบเครื่องมือที่จะใช้ในการทดลองระบบฟลูอิดไดเซชัน โดยหอทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.1416 เมตร ความสูง 1 เมตร ดังรูปที่ 3.1 และแผ่นกระจายอากาศเป็นแผ่นพลาสติกหนา 0.008 เมตร ซึ่งเจาะรูให้อากาศไหลผ่านได้โดยการเจาะรูจะมีขนาดและลักษณะที่แตกต่างกัน A-J แบบดังแสดงในภาคผนวก โดยแบบ A จะเจาะตามแนวรัศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.0055 เมตร, แบบ B เจาะขนาดเท่ากันแต่ในการเจาะจะต่างกันไป, แบบ C จะเจาะเฉียง 45° ตามแนวรัศมี, แบบ D เจาะแนวเฉียง 45° สลับกันไป แบบ E และ F เจาะแบบกรวยหงายและคว่ำโดยด้านกว้างและแคบจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 และ 0.0055 เมตรตามลำดับ, แบบ G เจาะตามแนวรัศมี เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0035 เมตร, แบบ H จะมีการเจาะตามแนวรัศมี แต่วงนอกสุดเจาะแบบเฉียง 45°, แบบ I เจาะตามแนวรัศมี แต่ 3 วงนอกสุดเจาะแบบเฉียง 45°, แบบ J เจาะตามแนวรัศมี แต่ 3 วงในเจาะแบบกรวยหงายและ 3 วงนอกสุดเจาะแบบเฉียง 45° ซึ่งการเจาะแบบตรงทำ

ให้การไหลของอากาศจะเป็นลักษณะตรงและถ้าเจาะแบบเฉียงก็จะทำให้อากาศไหลแบบหมุนวน

2. จำลองการเกาะกันของอนุภาคที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในระบบ 3 ภูมิภาค โดยนำเม็ดพลาสติกมาติดกาให้มีลักษณะเกาะกันเป็นแบบ 2 เม็ด, 4 เม็ด, 5 เม็ด และ 6 เม็ด ดังรูปที่ 3.2
3. บรรจอนุภาคเม็ดพลาสติกเข้าในหอทดลองโดยเริ่มต้นใช้อนุภาคแบบ 1 เม็ด ให้มีความสูงของเบต 15 ซม. เปิดเครื่องเป่าอากาศและเปิดวาล์วเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่หอทดลองโดยเริ่มที่ความเร็วอากาศน้อยๆ วัดความเร็วของอากาศเข้าโดยใช้ออร์ฟิซ และใช้เครื่องวัดความเร็วลมที่ด้านบนหอทดลองของอากาศขาออกด้วย วัดความดันตกคร่อมเบตที่ระดับต่างๆโดยใช้มานอมิเตอร์(manometer) วัดการขยายตัวของเบตและสังเกตลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุภาค แล้วทำการบันทึกผลการทดลอง เพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งเบตเริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน บันทึกค่าต่างๆทุกระยะต่อไปจนกระทั่งถึงความเร็วที่เกือบจะทำให้อนุภาคลอยหลุดออกจากหอทดลอง และค่อยๆลดความเร็วอากาศลงจนถึงศูนย์
4. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนอนุภาคจาก 1 เม็ด เป็นอนุภาคที่เกาะกัน 2, 4, 5 และ 6 เม็ด เพื่อดูว่าอนุภาคที่เกาะกันแบบต่างๆจะมีผลอย่างไรกับระบบ
5. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนแผ่นกระจายอากาศที่ใช้เป็นแบบอื่นๆ เพื่อดูว่าแผ่นกระจายอากาศแบบอื่นๆมีผลอย่างไรกับระบบ
6. ทำซ้ำตามการทดลองข้างบนที่กล่าวมาแล้ว แต่ใช้เมล็ดถั่วเหลืองและถั่วเขียวแทน และเลือกใช้แผ่นกระจายอากาศเพียงบางแผ่น
7. ทำการทดลองเหมือนข้อ 6 และเพิ่มความชื้นของอากาศเข้าไปในระบบโดยให้มี %RH มากกว่า 95% และใช้ความเร็วของอากาศคงที่ที่ 1.2 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิด ฟลูอิดไอเซชัน จับเวลาที่ทำให้เกิดดีฟลูอิดไอเซชัน
8. ทำการทดลองโดยเพิ่มและลดความเร็วลม แต่ ให้นำเมล็ดถั่วมาแช่น้ำก่อนการทดลองและเพิ่มความชื้นของอากาศเข้าไปในระบบโดยให้มี %RH มากกว่า 95%
9. ใช้โปรแกรม Ansys จำลองการไหลเพื่อดูลักษณะการไหลของอากาศผ่านแผ่นกระจายอากาศที่มีลักษณะต่างๆกัน
10. นำผลการทดลองที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ทฤษฎีต่างๆเช่นแฟรคทัลมาอธิบาย และสร้างสมการความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับอุทกพลศาสตร์ของระบบฟลูอิดไอเซชันโดยใช้แฟรคทัลเข้ามาช่วย

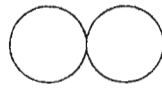


รูปที่ 3.1 ภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองฟลูอิดเซชัน

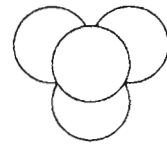
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



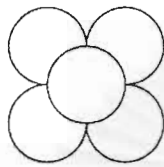
แบบที่ 1



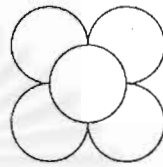
แบบที่ 2



แบบที่ 3



แบบที่ 4  
(5 อนุภาค)



แบบที่ 5  
(6 อนุภาค)

รูปที่ 3.2 การจำลองการเกาะกันของอนุภาค 5 แบบ (ภาพด้านบน)



## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

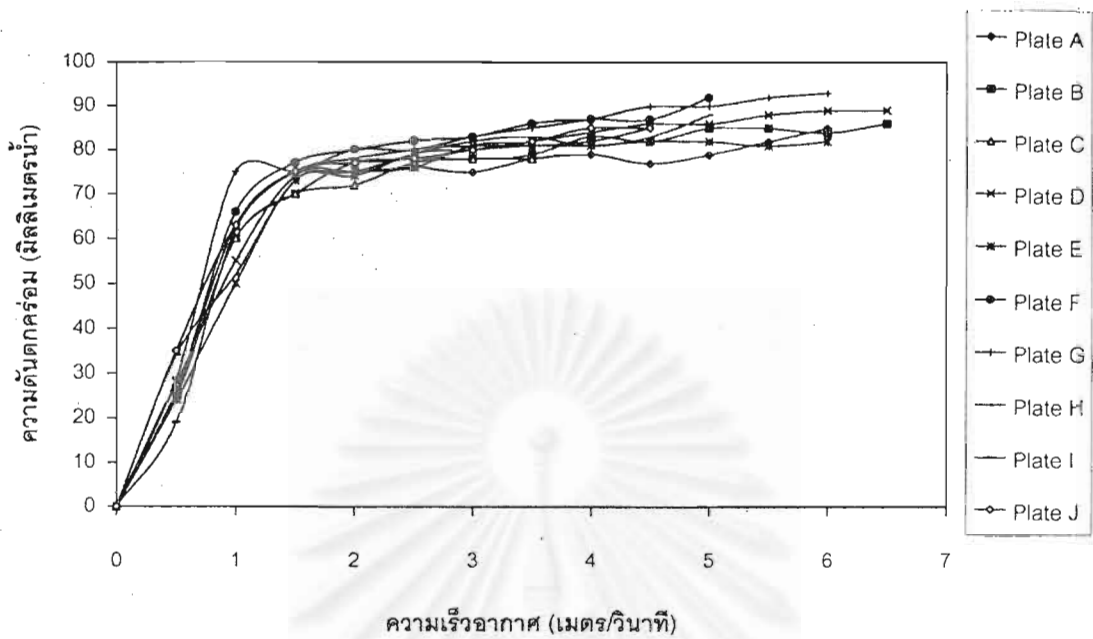
#### 4.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากกราฟ ( $u_{mf}$ )

จากการทดลองโดยใช้ อนุภาคเม็ดพลาสติกที่จำลองการเกาะกัน 5 แบบ และใช้แผ่นกระจายอากาศแบบต่างๆ (A-J) 10 แบบ นำค่าจากการทดลองมาพลอตกราฟระหว่างความดันตกคร่อมเบดกับความเร็วของอากาศ จะเห็นว่าลักษณะกราฟที่ได้ตรงตามทฤษฎี [1,11] ดังนั้นการหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากกราฟ จะหาได้จากจุดที่ความดันตกคร่อมสูงสุดและเริ่มมีค่าคงที่ จากนั้นลากเส้นตามแนวตั้งลงมาตัดกับแกน Y ค่าที่ได้จะเป็นค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันของแผ่นกระจายอากาศแต่ละแบบมีค่าอยู่ประมาณ 1.6 เมตร/วินาที

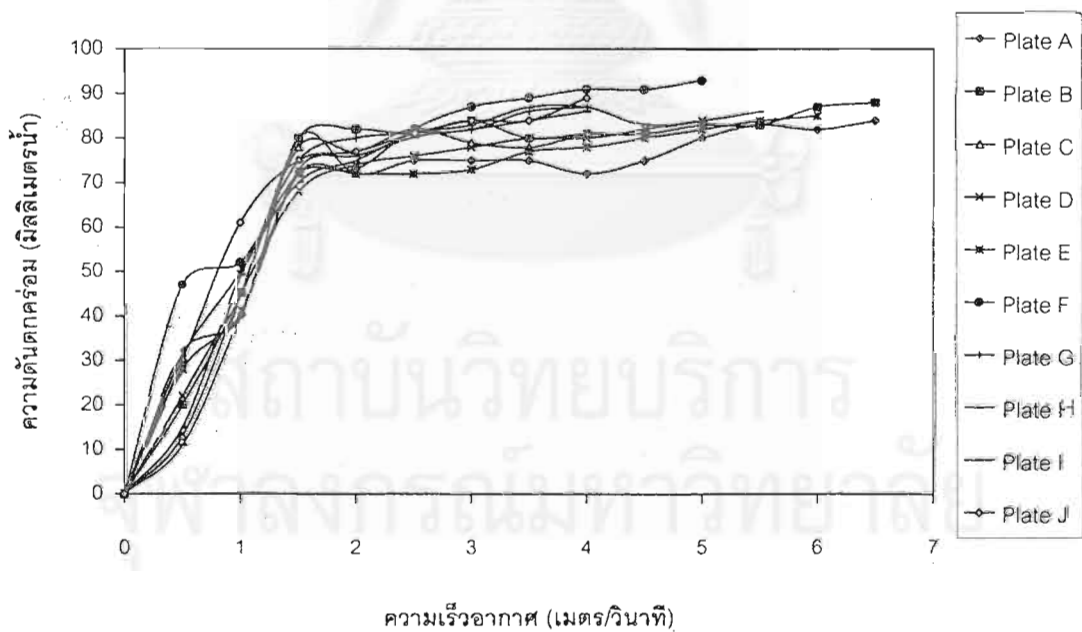
รูปที่ 4.2 – 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของอนุภาคที่เกาะกันแบบ 2 4 5 และ 6 เม็ด ตามลำดับ เมื่อจำนวนอนุภาคที่เกาะกันมากขึ้น ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.6 เมตร/วินาที ไปเป็น 1.6-1.7, 1.7, 2.05, และ 2.2 เมตร/วินาที ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคที่เกาะกันมากขึ้นจะมีขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้เกิดแรงต้านการลอยตัวและแรงต้านการเคลื่อนที่มากขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้ความเร็วของอากาศสูงขึ้นในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

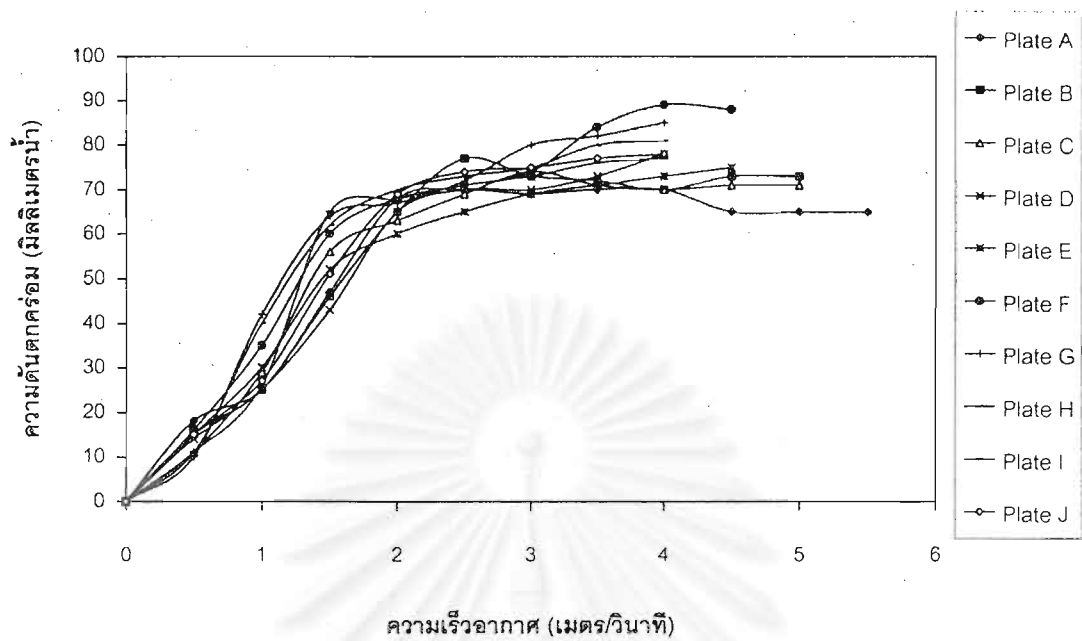




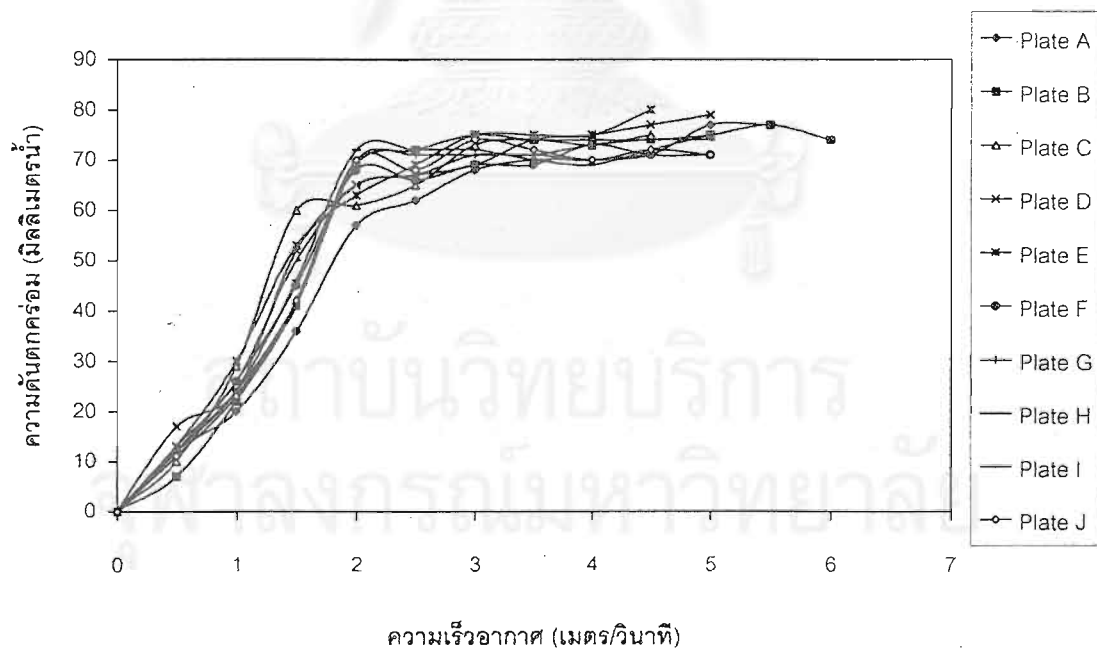
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 1 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



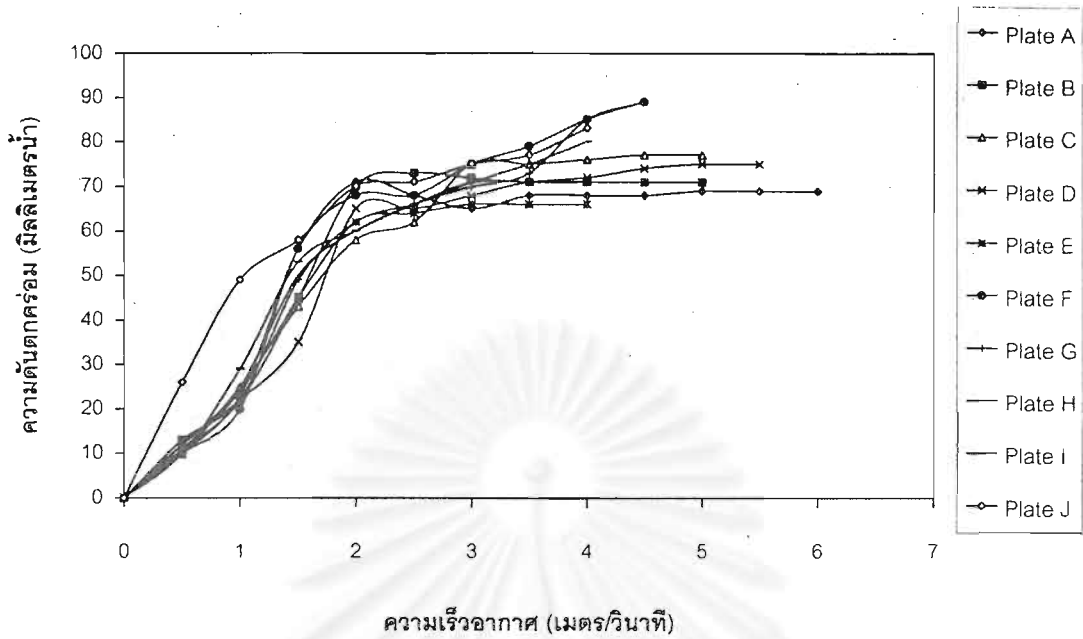
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 2 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 4 เมตร โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 5 เมตร โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันตกคร่อมกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 6 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J

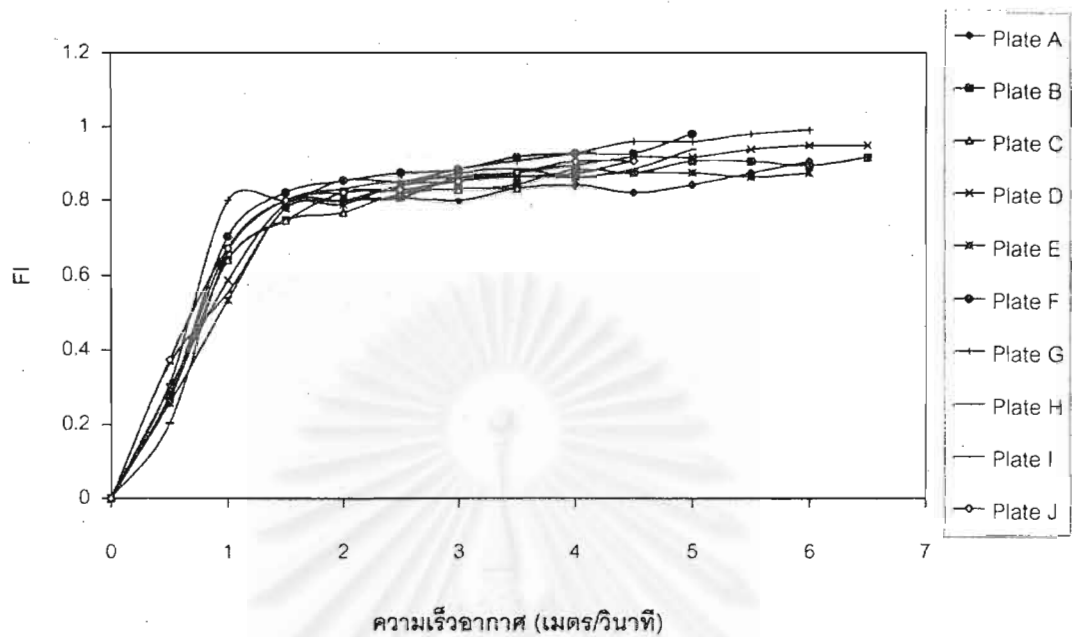
#### 4.2 คุณภาพของระบบฟลูอิดไอเซชัน

เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของระบบฟลูอิดไอเซชัน (quality of the fluidization) ซึ่งระบบจะมีคุณภาพดีก็ต่อเมื่อค่าความดันตกคร่อมเบดมีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบดต่อหน่วยพื้นที่ โดยจะแสดงในรูปของค่า FI (fluidization index) [12,21,31] ตามสมการที่ 4.1

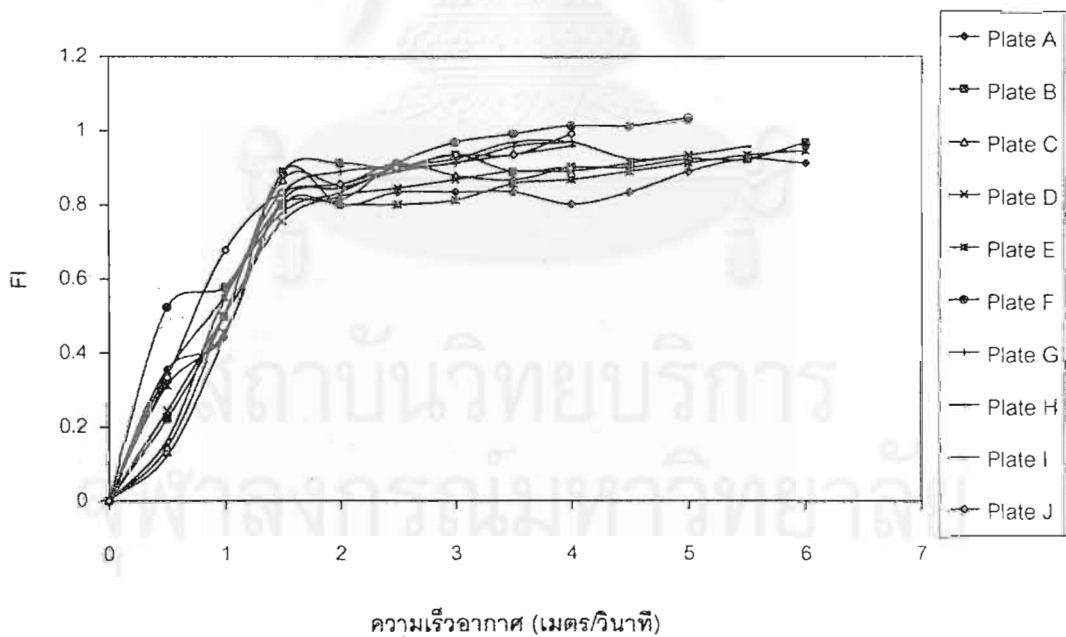
$$FI = \frac{\Delta P}{mg} \quad (4.1)$$

ดังนั้นค่า FI ที่ดีควรมีค่าเท่ากับ 1

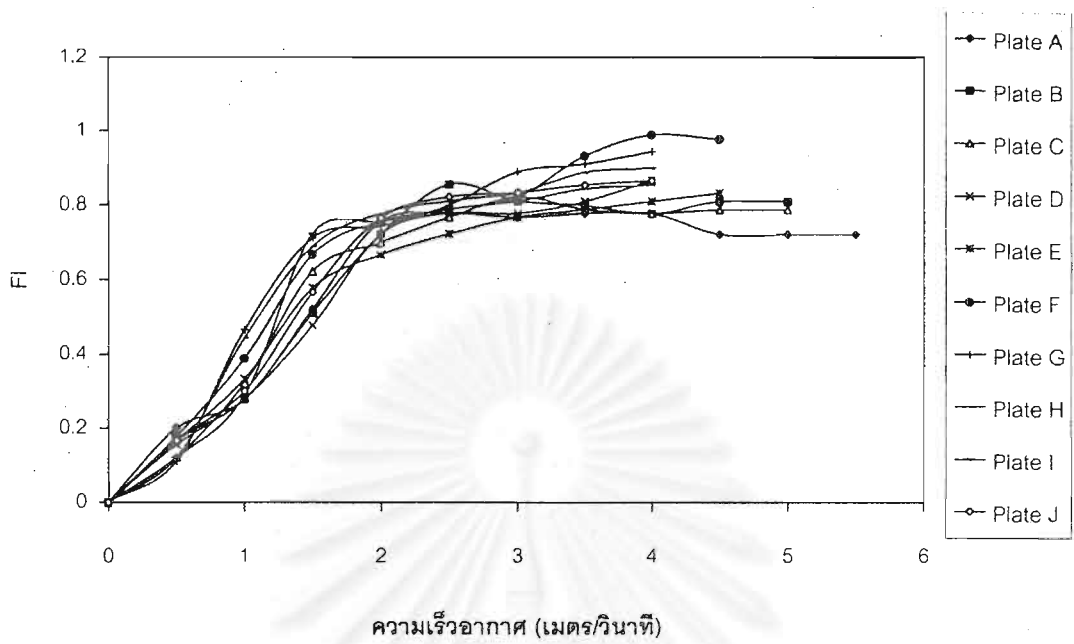
จากรูปที่ 4.6 - 4.10 จะเห็นว่าค่า FI ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 - 1 นั่นคือระบบมีคุณภาพอยู่ที่ 80 - 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่า  $FI < 1$  นั้นจะเป็นช่วงที่เบดเกิด ฟองอากาศและช่องว่างภายในเบด [31]



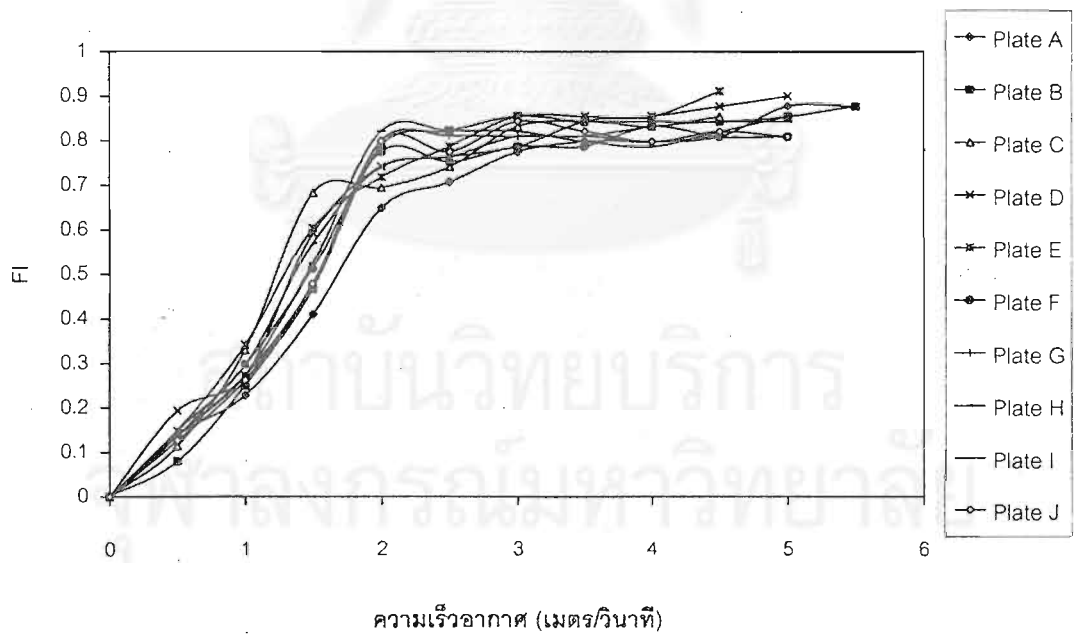
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 1 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



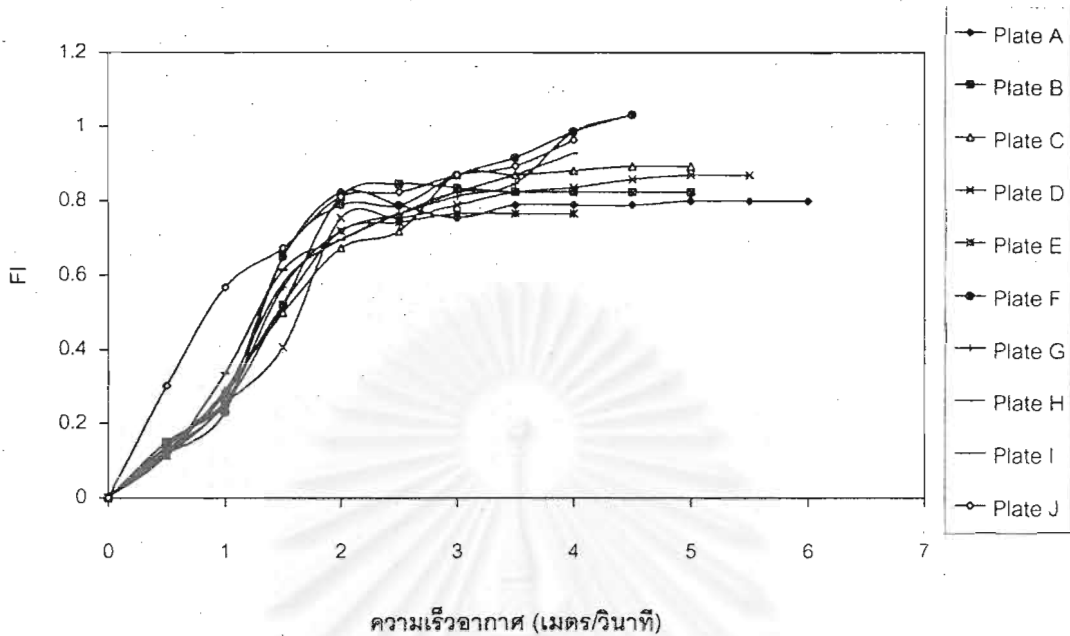
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 2 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 4 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



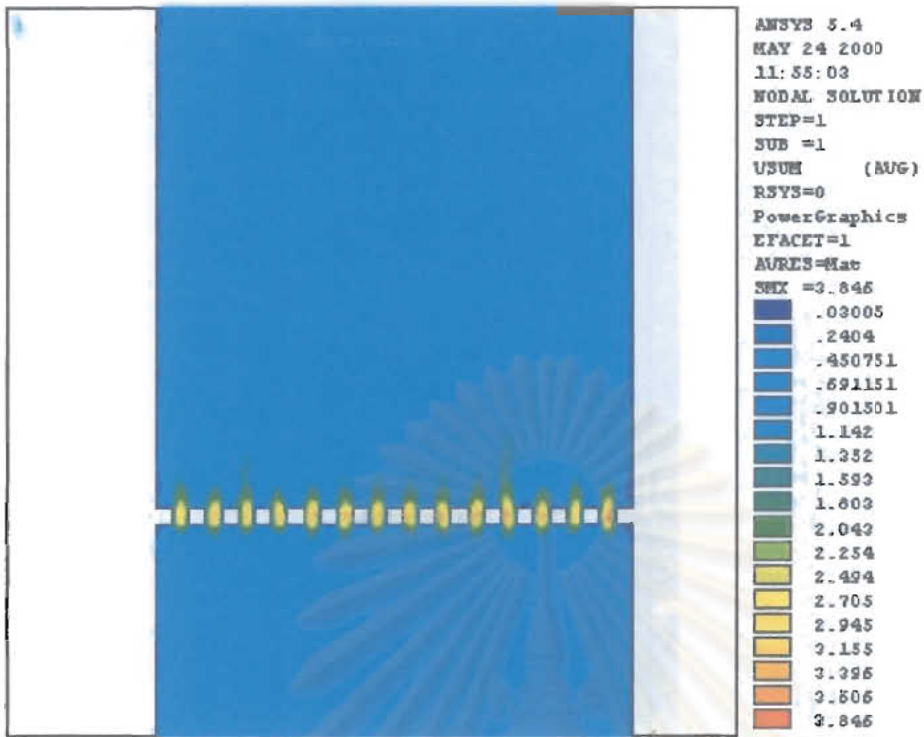
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 5 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



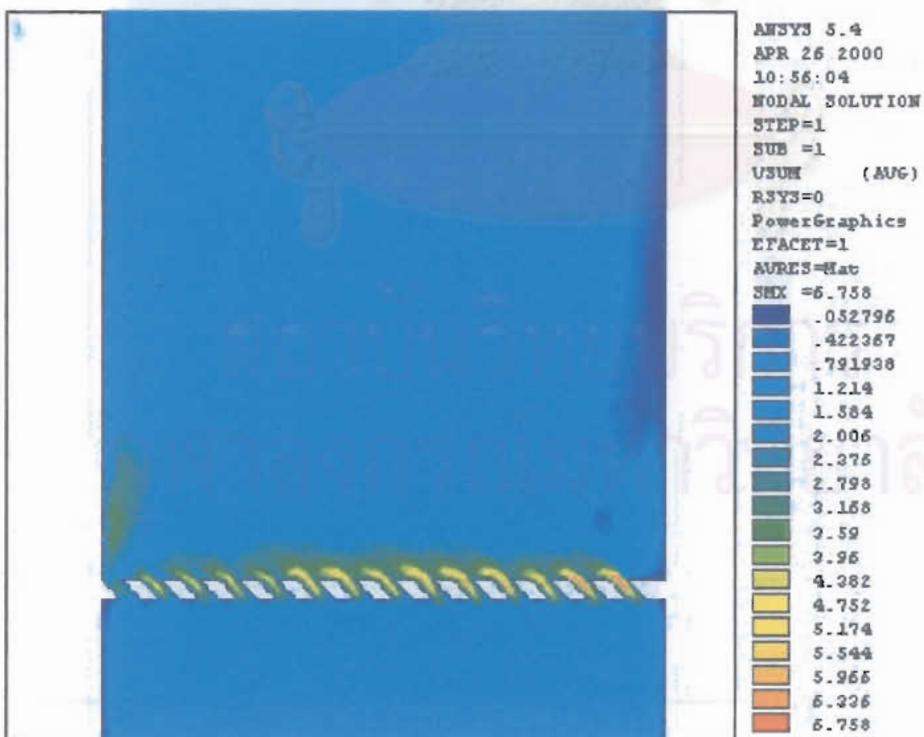
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า FI กับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 6 เมตร โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A – J

#### 4.3 การจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม Ansys

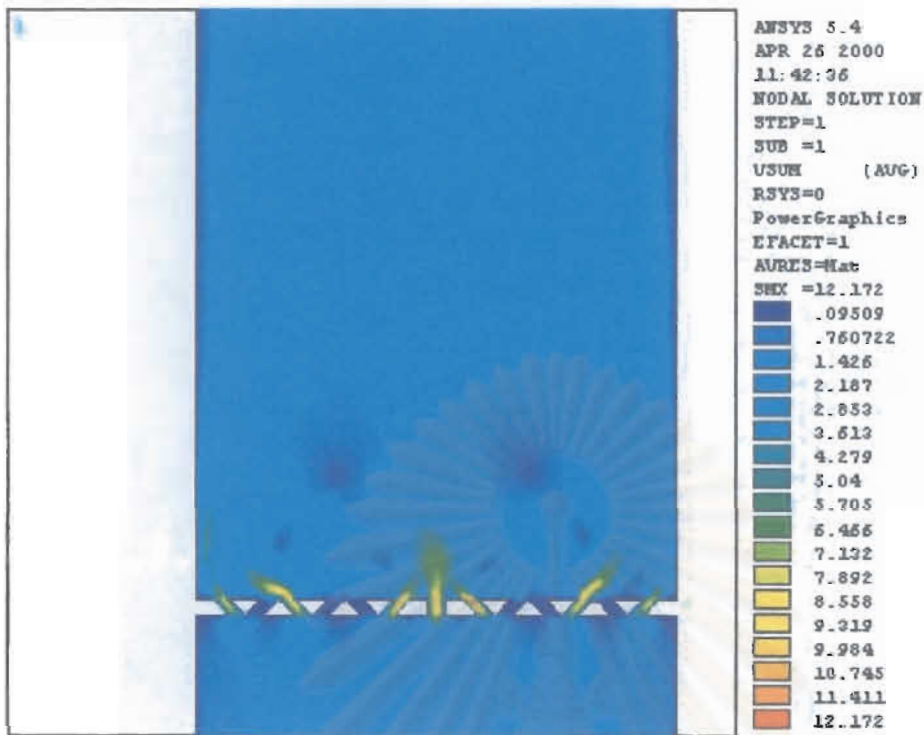
เมื่อใช้โปรแกรม Ansys จำลองการไหลเพื่อดูลักษณะการไหลของอากาศผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ A – J ในแบบ 2 มิติ โดยสิ่งที่แสดงในรูปแบบเป็นค่าความเร็วของอากาศที่ความเร็วต่างๆ หน่วยเป็น เมตร/วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.19



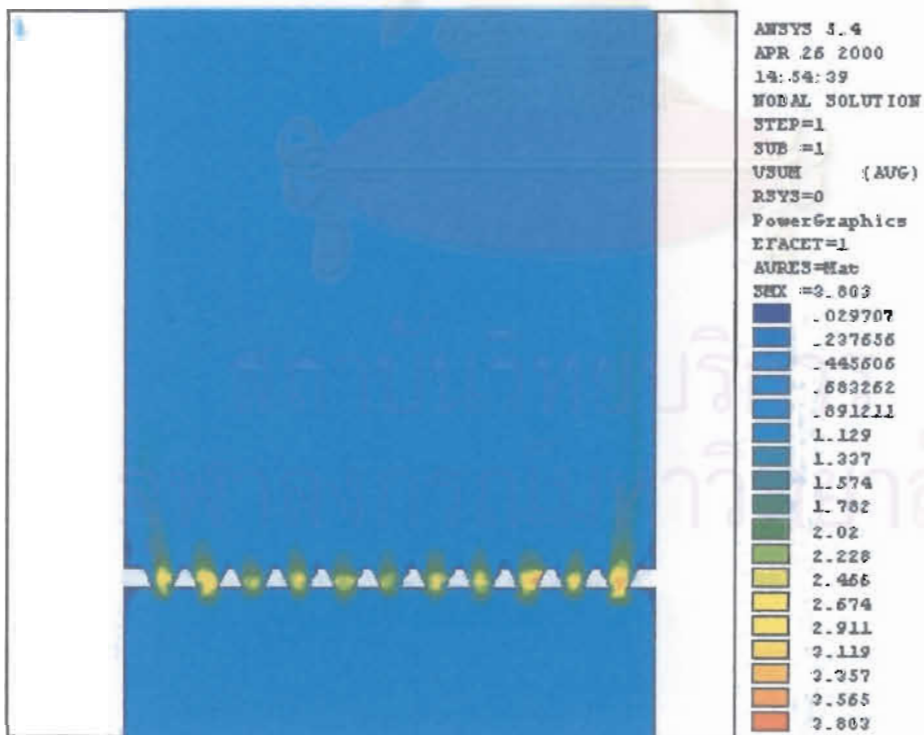
รูปที่ 4.11 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ A และ B โดยใช้โปรแกรม Ansys



รูปที่ 4.12 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ C โดยใช้โปรแกรม Ansys

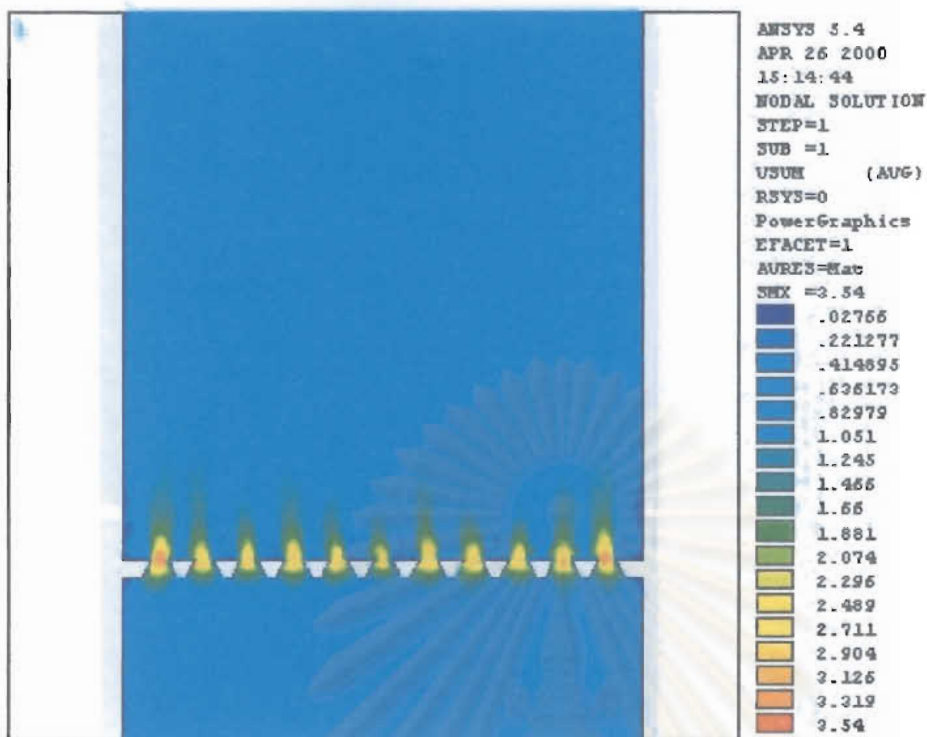


รูปที่ 4.13 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ D โดยใช้โปรแกรม Ansys

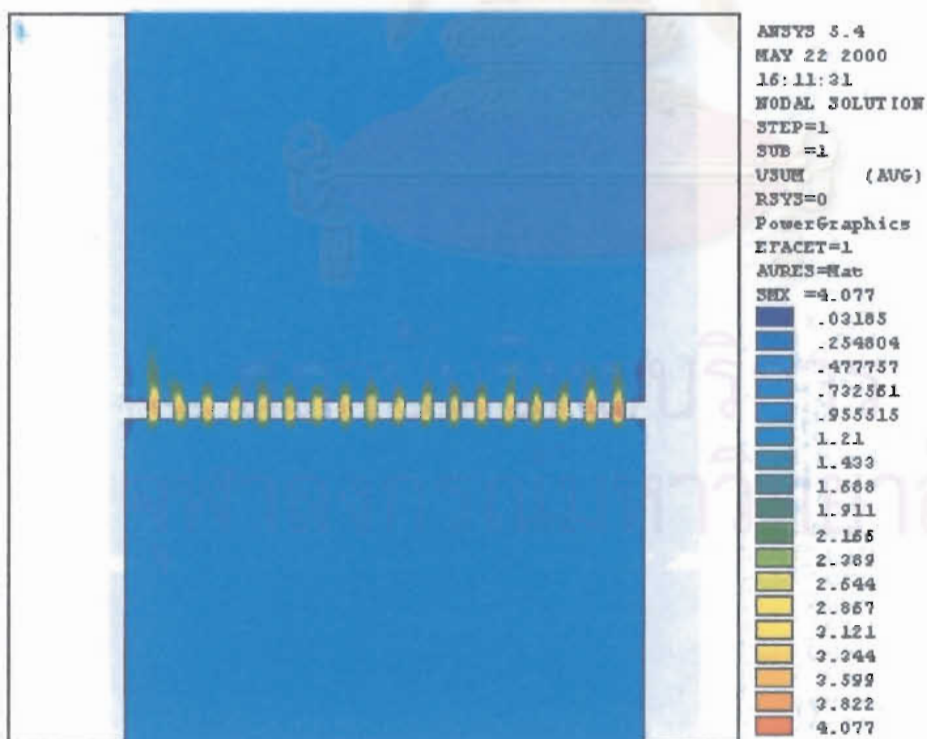


รูปที่ 4.14 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ E โดยใช้โปรแกรม Ansys

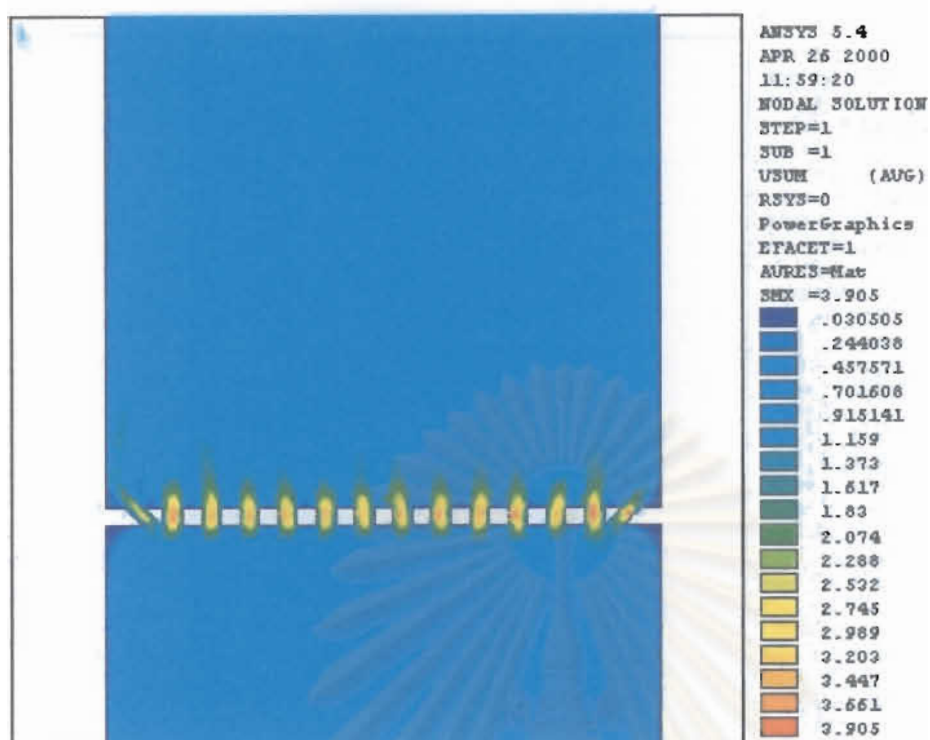




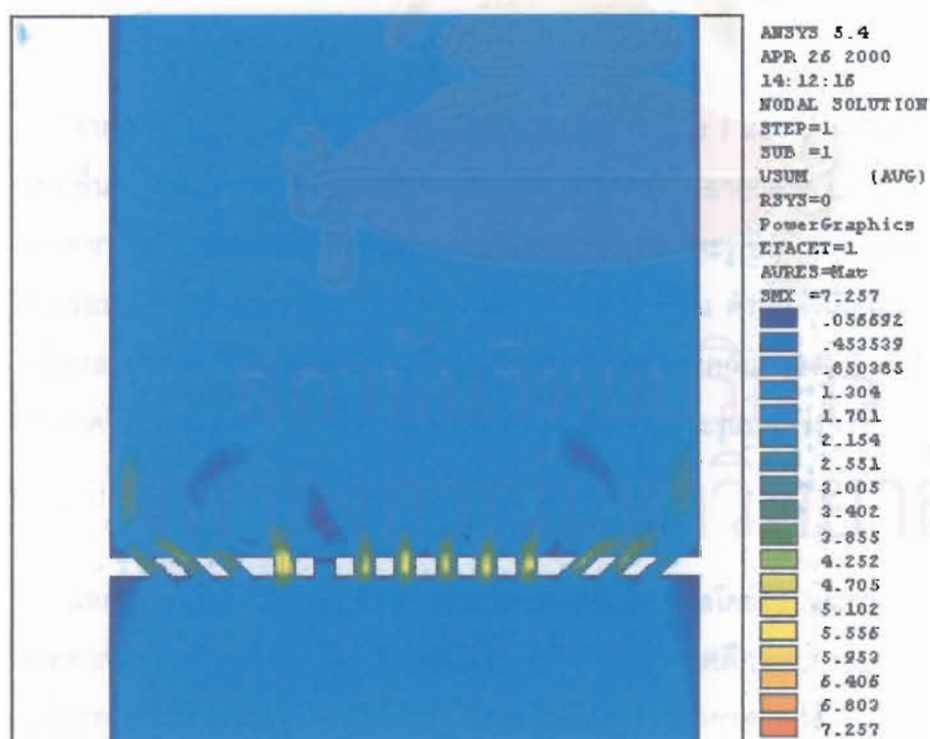
รูปที่ 4.15 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ F โดยใช้โปรแกรม Ansys



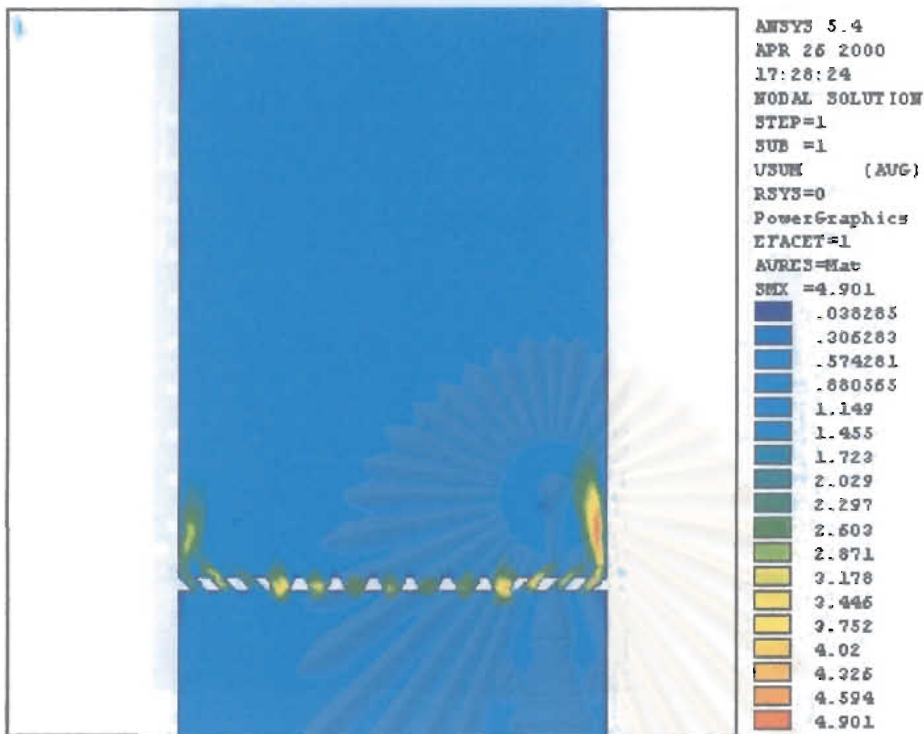
รูปที่ 4.16 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ G โดยใช้โปรแกรม Ansys



รูปที่ 4.17 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ H โดยใช้โปรแกรม Ansys



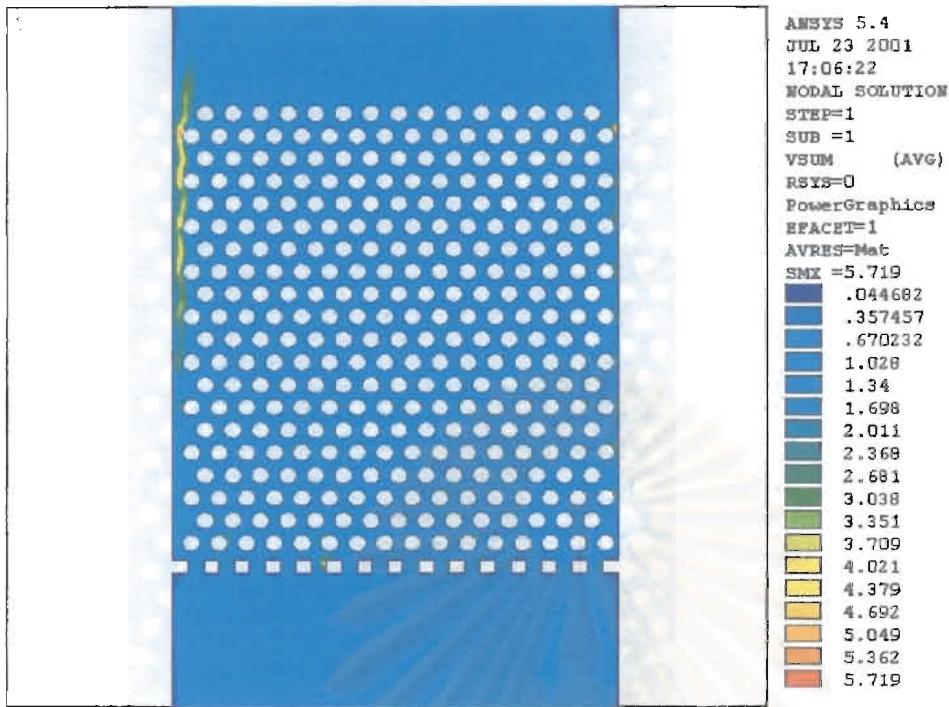
รูปที่ 4.18 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ I โดยใช้โปรแกรม Ansys



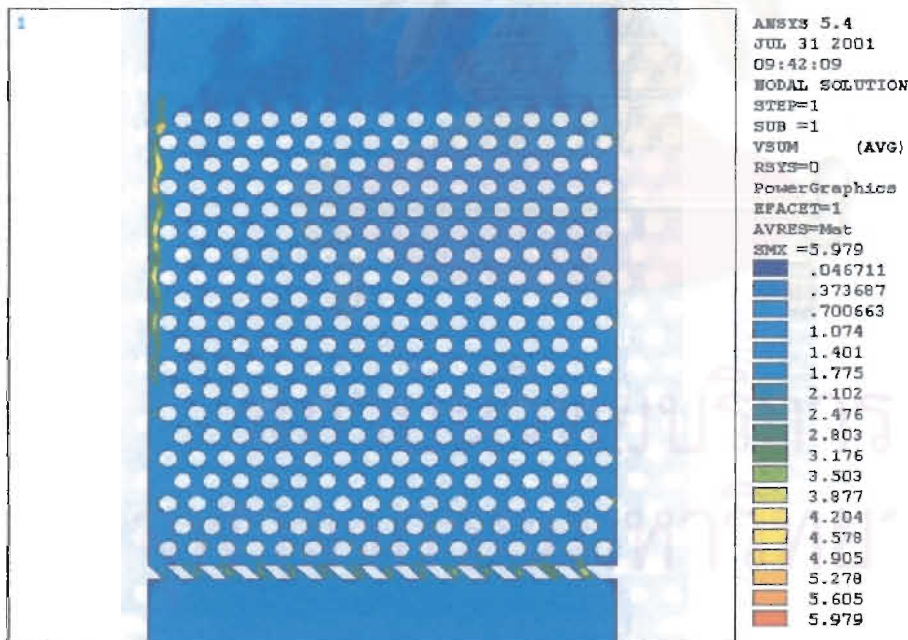
รูปที่ 4.19 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ J โดยใช้โปรแกรม Ansys

จากรูปที่ 4.11 - 4.19 พบว่าที่แผ่นกระจายอากาศแบบ I และ J มีการกระจายอากาศที่ดีกว่าแบบอื่นๆ โดยจากรูปจะเห็นว่าความเร็วเหนือแผ่นกระจายอากาศมีค่ามากกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งเนื่องมาจากที่แผ่นกระจายอากาศทั้งสองแบบนี้มีส่วนของการเจาะรูเป็น 2 แบบคือแบบเฉียง  $45^{\circ}$  ทางด้านรอบนอกของแผ่นและเจาะแบบตรงในส่วนของกลางแผ่น ดังนั้นจึงเกิดแรง เชื่อนขึ้น ซึ่งแรง เชื่อนนี้เองสามารถทำให้อุณหภูมิที่เกาะกันนั้นเกิดการแตกออกจากกันได้[27] ทำให้มีการกระจายของอุณหภูมิที่ดีกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งในแบบอื่นๆนั้นจะเป็นการเจาะรูแบบตรงหรือแบบเฉียงเพียงอย่างเดียว

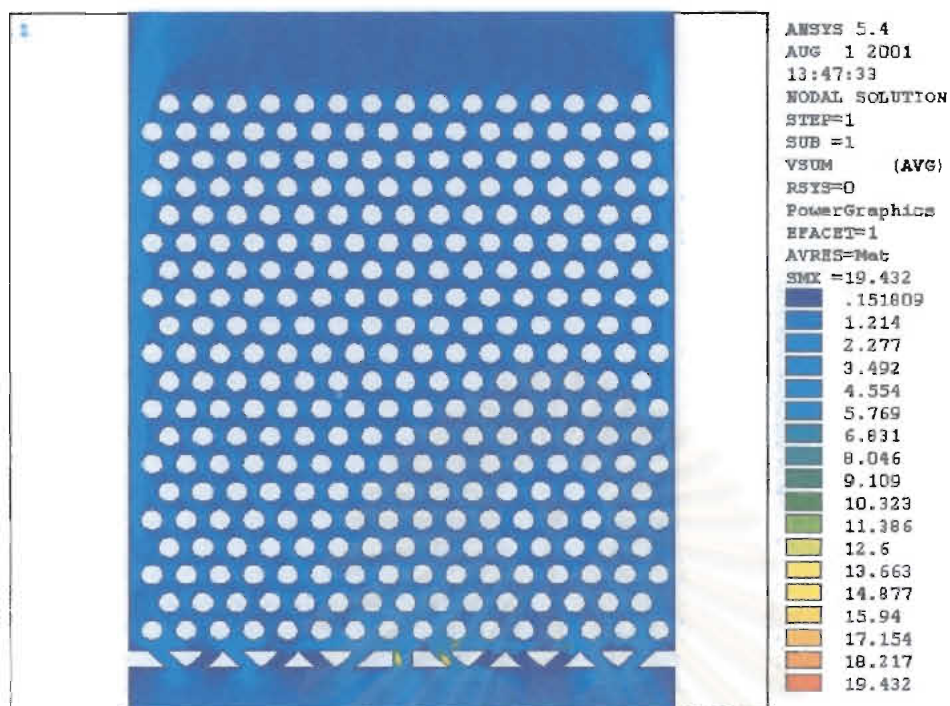
และจากรูปที่ 4.20 - 4.28 พบว่าการจำลองการไหลโดยให้อุณหภูมิอยู่ในระบบ แผ่นกระจายอากาศแบบ I และ J มีแนวโน้มให้ผลการกระจายอากาศดีกว่าแบบอื่นๆ โดยพิจารณาจากความเร็วของอากาศในแนวแกน X และ Y เหนือแผ่นกระจายอากาศ พบว่าในแบบที่เจาะตรง เช่น แบบ A และ B จะมีความเร็วเฉพาะในแกน X แต่แบบ I และ J จะมีทั้งความเร็วในแกน X และ Y มากกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดการหมุนวนและแรงเชื่อน



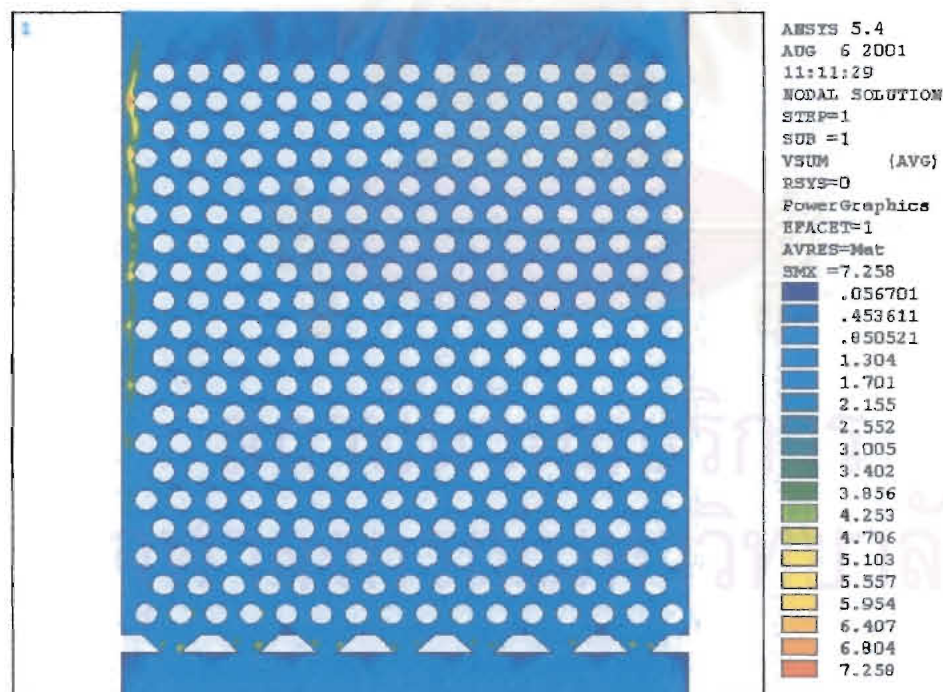
รูปที่ 4.20 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ A และ B ซึ่งภายในหอตดลองมีอนุภาคบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys



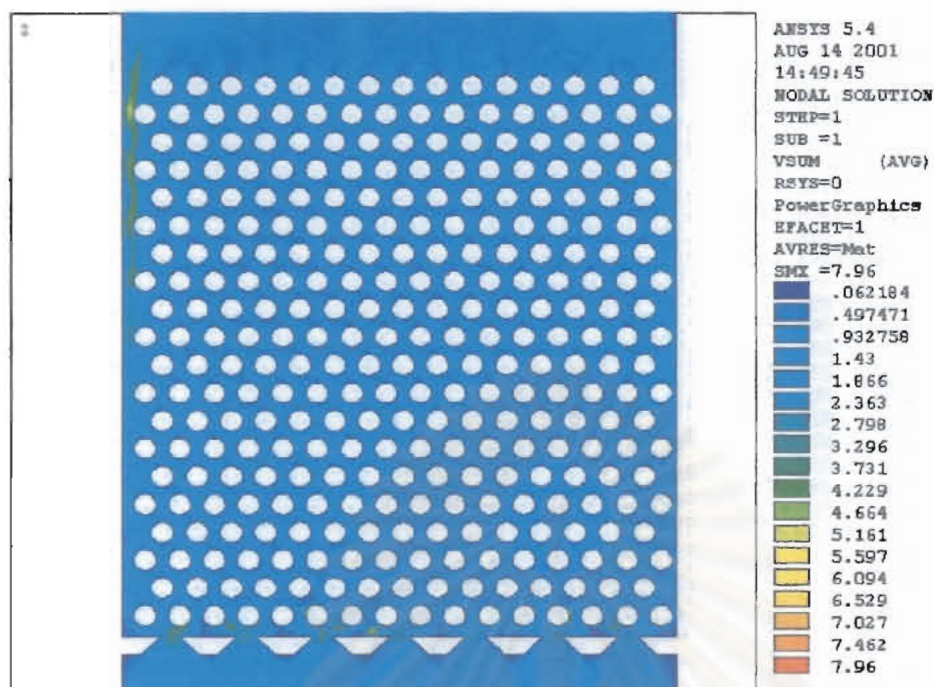
รูปที่ 4.21 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ C ซึ่งภายในหอตดลองมีอนุภาคบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys



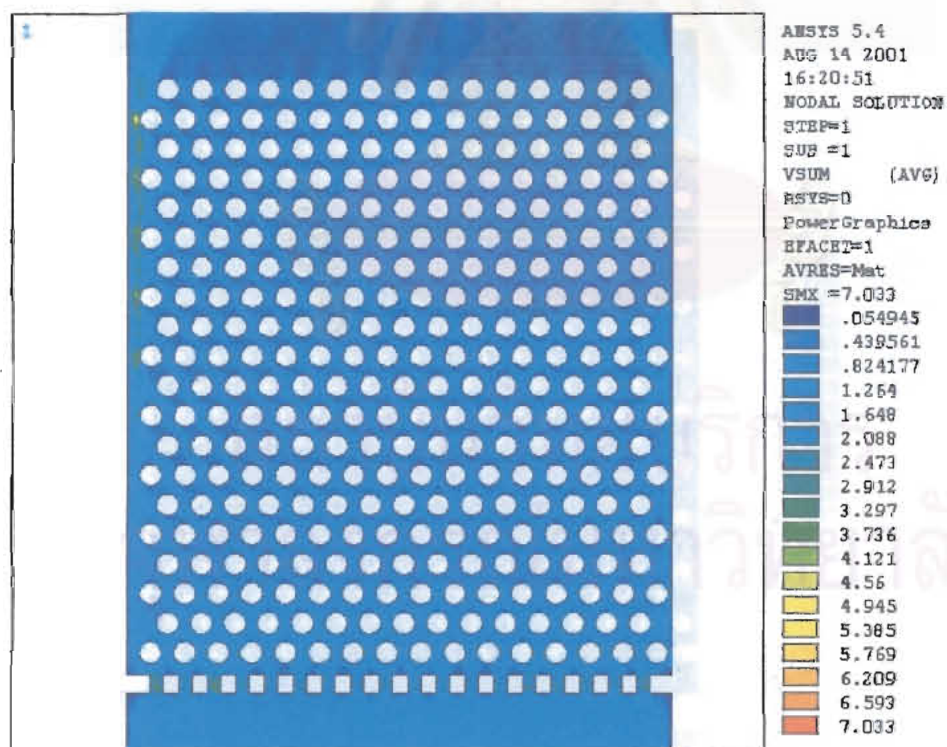
รูปที่ 4.22 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ D ซึ่งภายในท่อทดลองมีอนุภาคบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys



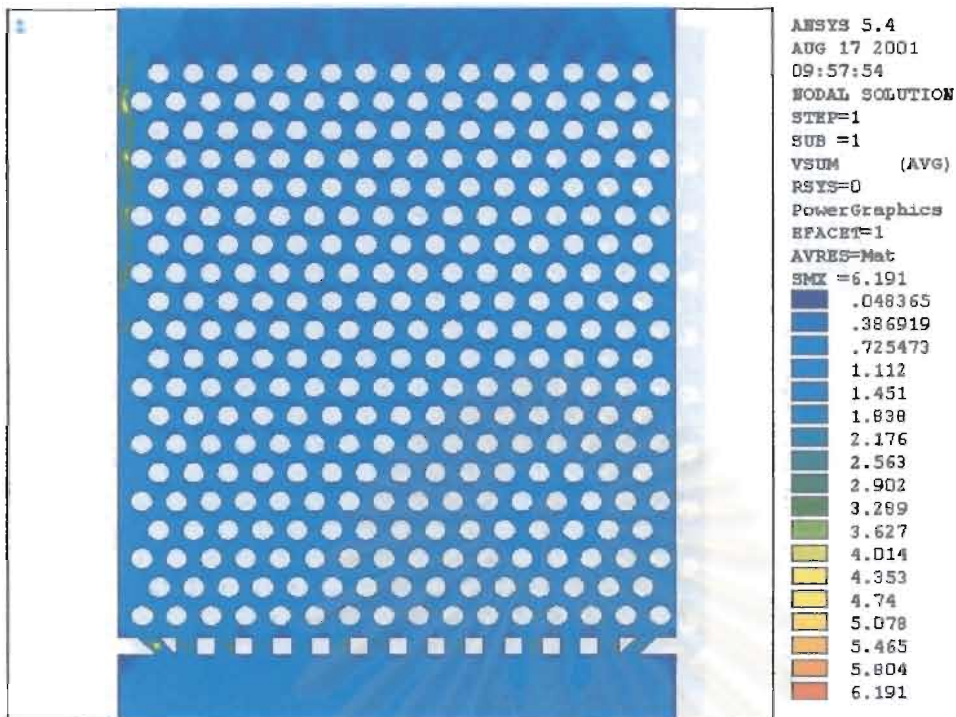
รูปที่ 4.23 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ E ซึ่งภายในท่อทดลองมีอนุภาคบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys



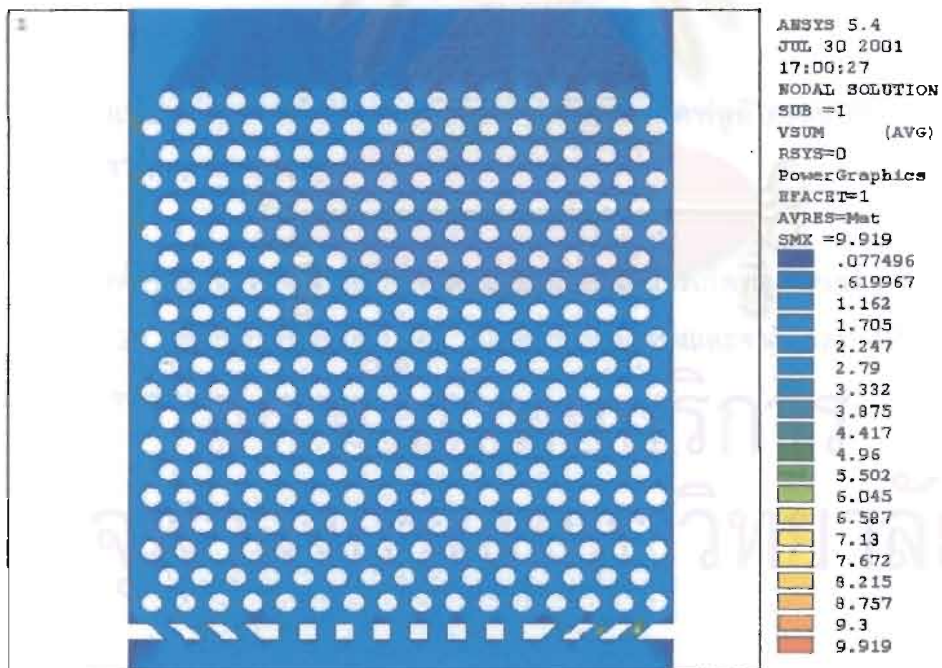
รูปที่ 4.24 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ F ซึ่งภายในหอตดลงมีอุณหภูมิบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys



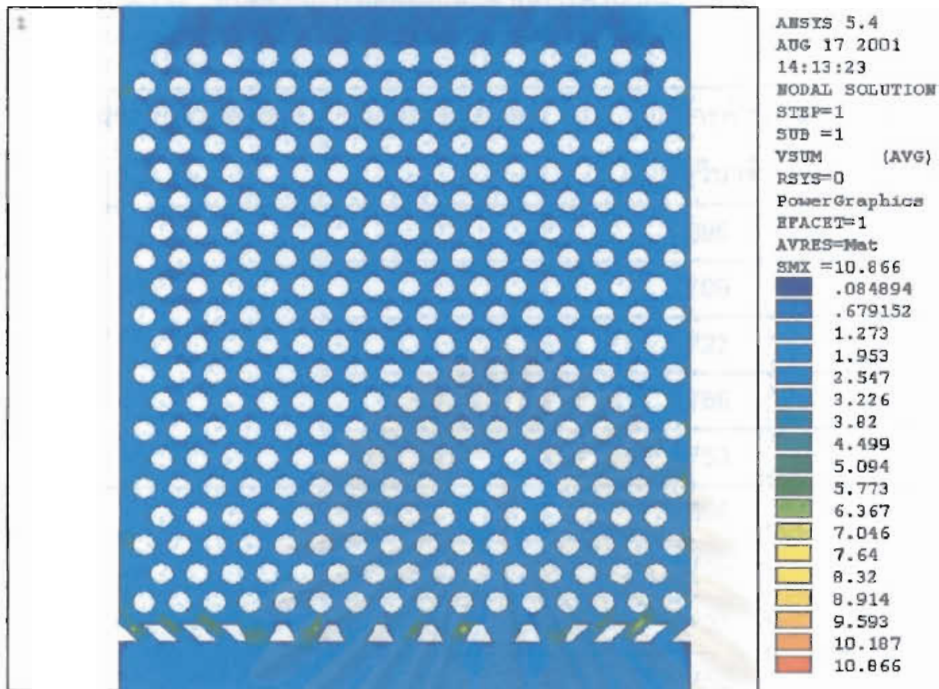
รูปที่ 4.25 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ G ซึ่งภายในหอตดลงมีอุณหภูมิบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys



รูปที่ 4.26 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ H ซึ่งภายในหอตดลงมีอุณหภูมิบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys



รูปที่ 4.27 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ I ซึ่งภายในหอตดลงมีอุณหภูมิบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys



รูปที่ 4.28 ภาพจำลองการไหลของอากาศ ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบ J ซึ่งภายในหอดทดลองมีอนุภาคบรรจุอยู่ โดยใช้โปรแกรม Ansys

#### 4.4 เปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลในการเกิดฟลูอิโดเซชันที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลอง

การคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดของของไหลในการเกิดฟลูอิโดเซชัน( $U_{mf}$ )กระทำโดยใช้สมการที่ 2.20 โดยเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 ค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ

ชนิดของแผ่นกระจายอากาศ	ชนิดของอนุภาค	$U_{mf}$ จากการคำนวณ (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ จากการทดลอง (เมตร/วินาที)
A	1	1.696	1.600
	2	1.709	1.600
	3	1.723	2.100
	4	1.766	2.150
	5	1.753	2.150
B	1	1.696	1.600
	2	1.709	1.700
	3	1.723	2.100
	4	1.766	2.200
	5	1.753	2.230
C	1	1.696	1.500
	2	1.709	1.700
	3	1.723	1.750
	4	1.766	1.700
	5	1.753	2.150
D	1	1.696	1.600
	2	1.709	1.800
	3	1.723	2.100
	4	1.766	2.180
	5	1.753	2.200
E	1	1.696	1.600
	2	1.709	1.650
	3	1.723	1.700
	4	1.766	1.900
	5	1.753	2.180

ตารางที่ 4.1 ค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ (ต่อ)

ชนิดของแผ่นกระจายอากาศ	ชนิดของอนุภาค	$U_{mf}$ จากการคำนวณ (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ จากการทดลอง (เมตร/วินาที)
F	1	1.696	1.600
	2	1.709	1.650
	3	1.723	2.100
	4	1.766	2.100
	5	1.753	2.180
G	1	1.696	1.550
	2	1.709	1.600
	3	1.723	1.750
	4	1.766	2.180
	5	1.753	2.180
H	1	1.696	1.600
	2	1.709	1.800
	3	1.723	2.000
	4	1.766	2.180
	5	1.753	2.200
I	1	1.696	1.600
	2	1.709	1.750
	3	1.723	1.750
	4	1.766	2.180
	5	1.753	2.200
J	1	1.696	1.600
	2	1.709	1.750
	3	1.723	2.100
	4	1.766	2.180
	5	1.753	2.200

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณนั้น มีค่าต่างกันพอสมควร โดยเฉพาะที่ชนิดอนุภาคแบบที่ 4 และ 5 จะมีค่าต่างกันมาก แสดงว่ามีผลจากค่าของตัวแปร โดยเฉพาะ แพลคเตอร์รูปร่าง ( $\phi_s$ ) เพราะได้จากการคำนวณค่าแพลคเตอร์รูปร่างซึ่งเป็นการคำนวณแบบปริมาตรเทียบเท่า และเมื่อพิจารณาค่าแพลคเตอร์รูปร่างในสมการที่ 2.20 จะเห็นว่าค่าแพลคเตอร์รูปร่างยกกำลังสอง ซึ่งมีผลสำคัญกับการคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ( $U_{mf}$ ) โดยถ้าค่าแพลคเตอร์รูปร่างยิ่งน้อยลงค่าผลต่างของ  $U_{mf}$  ก็จะมีมากขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อิทธิพลของค่าแพลคเตอร์รูปร่างที่มีต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

$\phi_s$	$U_{mf}$ ของอนุภาคชนิดที่ 2 (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ ของอนุภาคชนิดที่ 3 (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ ของอนุภาคชนิดที่ 4 (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ ของอนุภาคชนิดที่ 5 (เมตร/วินาที)
0.9	1.822	2.088	2.214	2.281
0.8	1.709	1.961	2.081	2.144
0.7	1.587	1.825	1.938	1.997
0.6	1.453	1.677	1.783	1.838
0.5	1.305	1.513	1.611	1.663
0.4	1.136	1.328	1.418	1.465
0.3	0.935	1.110	1.190	1.234
0.2	0.677	0.833	0.903	0.941
0.1	0.309	0.426	0.481	0.512

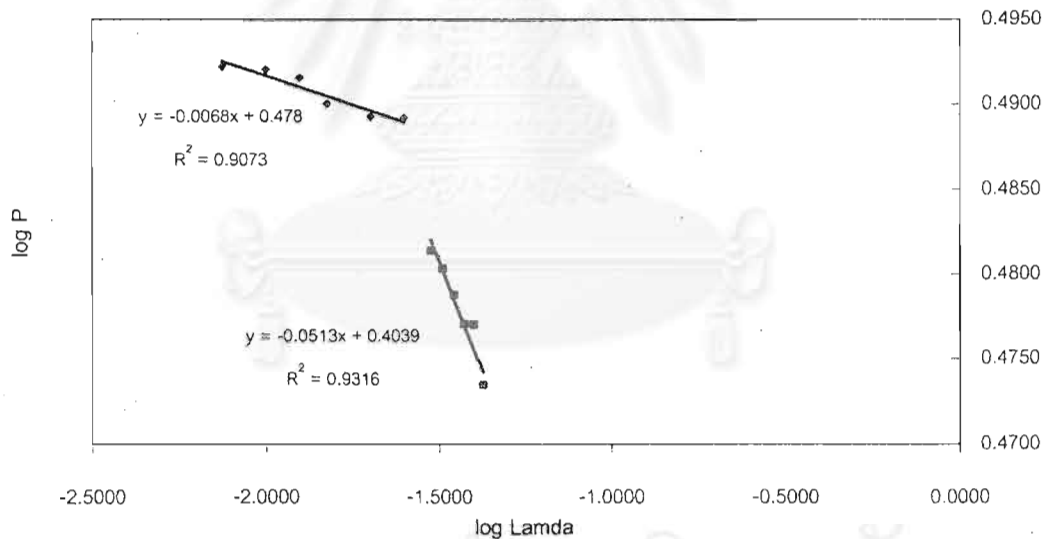
จากตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นการสมมติค่าแพลคเตอร์รูปร่างขึ้นมาเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันเมื่อค่าแพลคเตอร์รูปร่างเปลี่ยนไป พบว่าเมื่อค่าแพลคเตอร์รูปร่างมีค่าลดลงจะทำให้ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันลดลงด้วยเช่นกัน จะเห็นว่าค่าแพลคเตอร์รูปร่างมีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยจากเดิมค่าแพลคเตอร์รูปร่างสามารถหาได้จากสมการ 2.9 และ 2.10 ดังนั้นจึงน่าจะมีวิธีการหาค่าแพลคเตอร์รูปร่างที่ดีกว่านี้

#### 4.5 การคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้แฟรคทัล

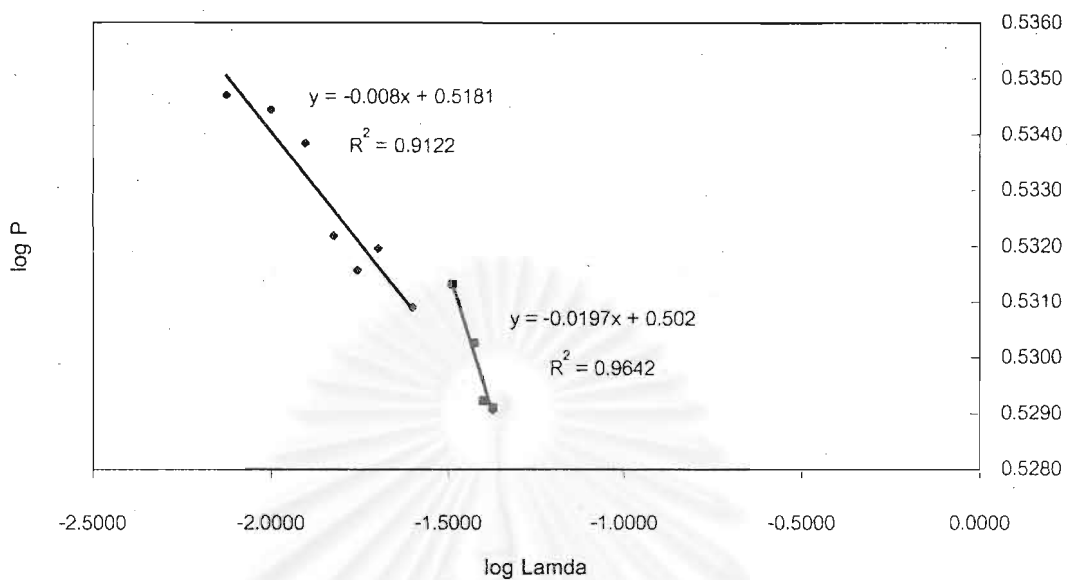
เพื่อแก้ไขปัญหาการคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จึงนำแฟรคทัลมาใช้ในการคำนวณ โดยใช้ในส่วนของความคล้ายคลึงของวงกลมของอนุภาค เพื่อเปรียบเทียบความเป็นวงกลมของอนุภาคชนิดต่างๆได้ โดยหน่วยของแฟรคทัล คือ แฟรคทัลไดเมนชัน (fractal dimension) ซึ่งการหาค่าแฟรคทัลไดเมนชันสามารถหาได้จากสมการที่ 2.44 โดยวิธีการหาแสดงในภาคผนวก

$$\delta = 1 + |m| \quad (2.40)$$

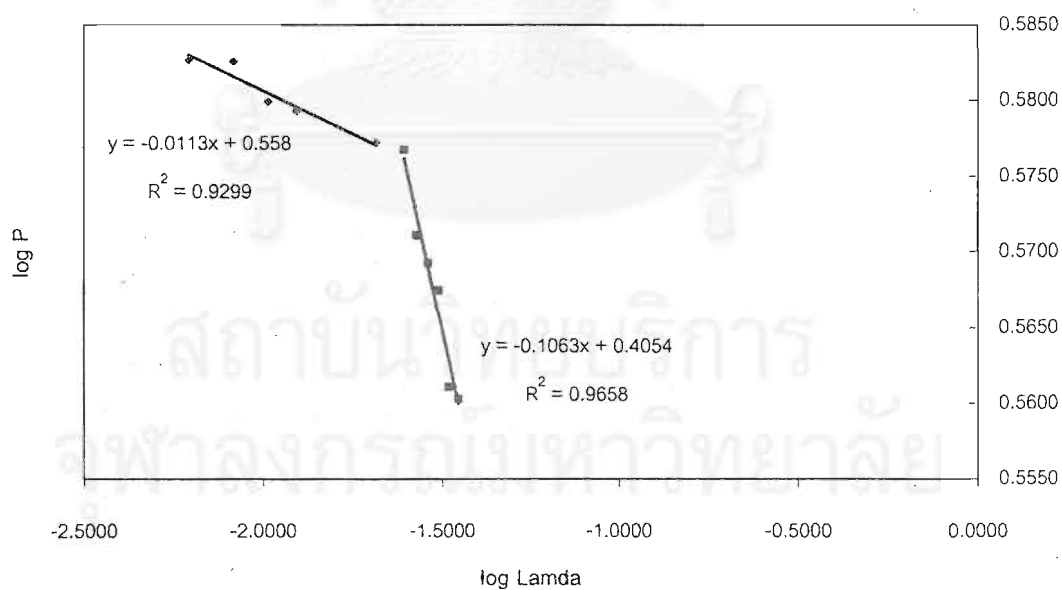
จากการหาค่า  $\log P$  และ  $\log \lambda$  ของอนุภาคชนิดต่างๆแล้วนำมาพลอตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.29-4.31



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log P$  และ  $\log \lambda$  ของอนุภาคแบบที่ 2



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า log P และ log  $\lambda$  ของอนุภาคแบบที่ 3



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า log P และ log  $\lambda$  ของอนุภาคแบบที่ 4 และ 5

จากรูปที่ 4.29, 4.30 และ 4.31 ค่าความชันที่ได้จากกราฟสามารถแบ่งความชันได้ออกเป็น 2 ช่วงด้วยกัน เราจะเลือกใช้ค่าความชันที่มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากเส้นตรงที่มีช่วงความยาวสั้น ซึ่งเส้นตรงที่สั้นกว่านี้จะให้ค่าที่มีความยาวใกล้เคียงกับความยาวรอบรูปจริงมากกว่า จากนั้นแทนค่าความชันลงในสมการที่ 2.44 จะได้

ค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 2

$$\delta = 1 + |-0.0068|$$

$$\delta = 1.007$$

ค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 3

$$\delta = 1 + |-0.008|$$

$$\delta = 1.008$$

ค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 4

$$\delta = 1 + |-0.0113|$$

$$\delta = 1.011$$

ค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 5

$$\delta = 1 + |-0.0113|$$

$$\delta = 1.011$$

ตารางที่ 4.3 ค่าแฟรคทัลไดเมนชันที่หาได้จากอนุภาคแต่ละแบบ

ชนิดของอนุภาค	แฟรคทัลไดเมนชัน ( $\delta$ )
1	1.000
2	1.007
3	1.008
4	1.011
5	1.011

นำค่าแฟรคทัลไดเมนชันที่ได้มาหาค่า แฟคเตอร์รูปร่าง จากสมการที่ 2.40

$$\phi_1 = \text{fractal dimension type 1} / \text{fractal dimension type n} \quad (4.2)$$

ซึ่งวิธีแรกหาโดยใช้ปริมาตรเทียบเท่าจากสมการที่ 2.9

นำค่าแฟคเตอร์รูปร่าง  $\phi_1$  มาเปรียบเทียบกับค่า  $\phi_2$  ซึ่งได้จากวิธีแรกดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแฟคเตอร์รูปร่างที่ได้จากอนุภาคแต่ละแบบ

ชนิดอนุภาค	แฟคทิลโดเมนชั้น	$\phi_1$	$\phi_2$
1	1.000	1.000	1.000
2	1.007	0.993	0.800
3	1.008	0.992	0.630
4	1.011	0.989	0.590
5	1.011	0.989	0.550

เมื่อนำค่า แฟคเตอร์รูปร่าง ( $\phi_1$  และ  $\phi_2$ ) มาคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันโดยแทนลงในสมการ (2.20) ผลที่ได้ปรากฏว่า  $\phi_1$  ให้ค่า  $U_{mf}$  ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่า  $\phi_2$  นั่นก็หมายความว่า การหาค่าแฟคเตอร์รูปร่างโดยใช้แฟคทิลโดเมนชั้นให้ค่าแฟคเตอร์รูปร่างที่ดีกว่าการหาแบบเดิม ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองจริงและจากการคำนวณค่า  $\phi$  ที่ต่างกัน

ชนิดของแผ่นกระจายอากาศ	ชนิดของอนุภาค	$U_{mf}$ จากการคำนวณค่า $\phi$ จากการใช้แฟคทิลโดเมนชั้น (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ จากการคำนวณค่า $\phi$ จากวิธีเดิม (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ จากการทดลองจริง (เมตร/วินาที)
A	1	1.696	1.696	1.600
	2	1.922	1.709	1.600
	3	2.198	1.723	2.100
	4	2.326	1.766	2.150
	5	2.396	1.753	2.150

ตารางที่ 4.5 ค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองจริงและจากการคำนวณค่า  $\phi$  ที่ต่างกัน (ต่อ)

ชนิดของแผ่นกระจายอากาศ	ชนิดของอนุภาค	$U_{mf}$ จากการคำนวณค่า $\phi$ จากการใช้แฟรคทัล (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ จากการคำนวณค่า $\phi$ จากวิธีเดิม (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ จากการทดลองจริง (เมตร/วินาที)
B	1	1.696	1.696	1.600
	2	1.922	1.709	1.700
	3	2.198	1.723	2.100
	4	2.326	1.766	2.200
	5	2.396	1.753	2.230
C	1	1.696	1.696	1.500
	2	1.922	1.709	1.700
	3	2.198	1.723	1.750
	4	2.326	1.766	1.700
	5	2.396	1.753	2.150
D	1	1.696	1.696	1.600
	2	1.922	1.709	1.800
	3	2.198	1.723	2.100
	4	2.326	1.766	2.180
	5	2.396	1.753	2.200
E	1	1.696	1.696	1.600
	2	1.922	1.709	1.650
	3	2.198	1.723	1.700
	4	2.326	1.766	1.900
	5	2.396	1.753	2.180
F	1	1.696	1.696	1.600
	2	1.922	1.709	1.650
	3	2.198	1.723	2.100
	4	2.326	1.766	2.100
	5	2.396	1.753	2.180



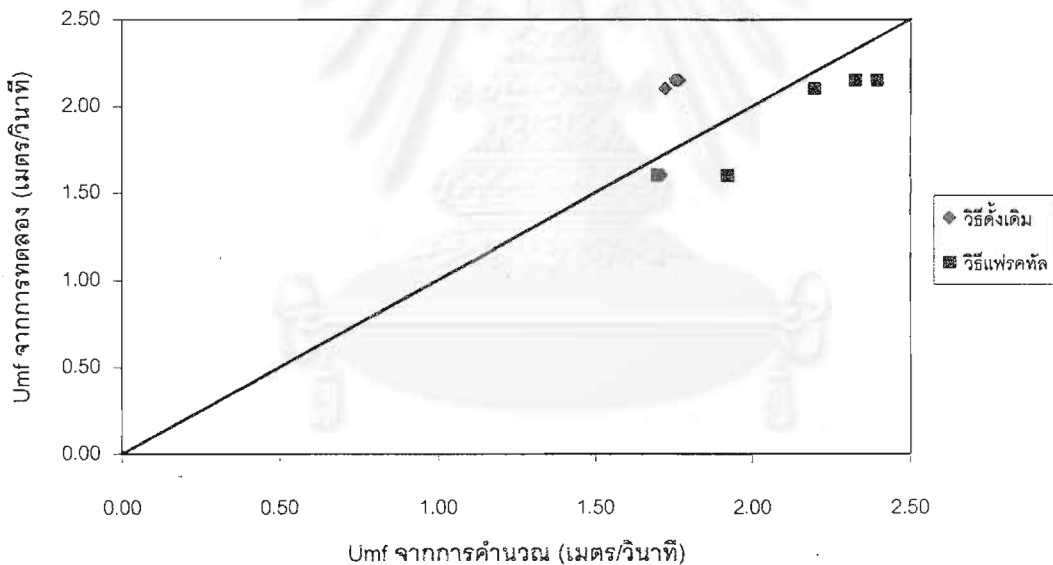
ตารางที่ 4.5 ค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองจริงและจากการคำนวณค่า  $\phi$  ที่ต่างกัน(ต่อ)

ชนิดของแผ่น กระจายอากาศ	ชนิดของ อนุภาค	$U_{mf}$ จากการคำนวณค่า $\phi$ จากการใช้แฟรคทัล (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ จากการคำนวณค่า $\phi$ จากวิธีเดิม (เมตร/วินาที)	$U_{mf}$ จากการ ทดลองจริง (เมตร/วินาที)
G	1	1.696	1.696	1.550
	2	1.922	1.709	1.600
	3	2.198	1.723	1.750
	4	2.326	1.766	2.180
	5	2.396	1.753	2.180
H	1	1.696	1.696	1.600
	2	1.922	1.709	1.800
	3	2.198	1.723	2.000
	4	2.326	1.766	2.180
	5	2.396	1.753	2.200
I	1	1.696	1.696	1.600
	2	1.922	1.709	1.750
	3	2.198	1.723	1.750
	4	2.326	1.766	2.180
	5	2.396	1.753	2.200
J	1	1.696	1.696	1.600
	2	1.922	1.709	1.750
	3	2.198	1.723	2.100
	4	2.326	1.766	2.180
	5	2.396	1.753	2.200

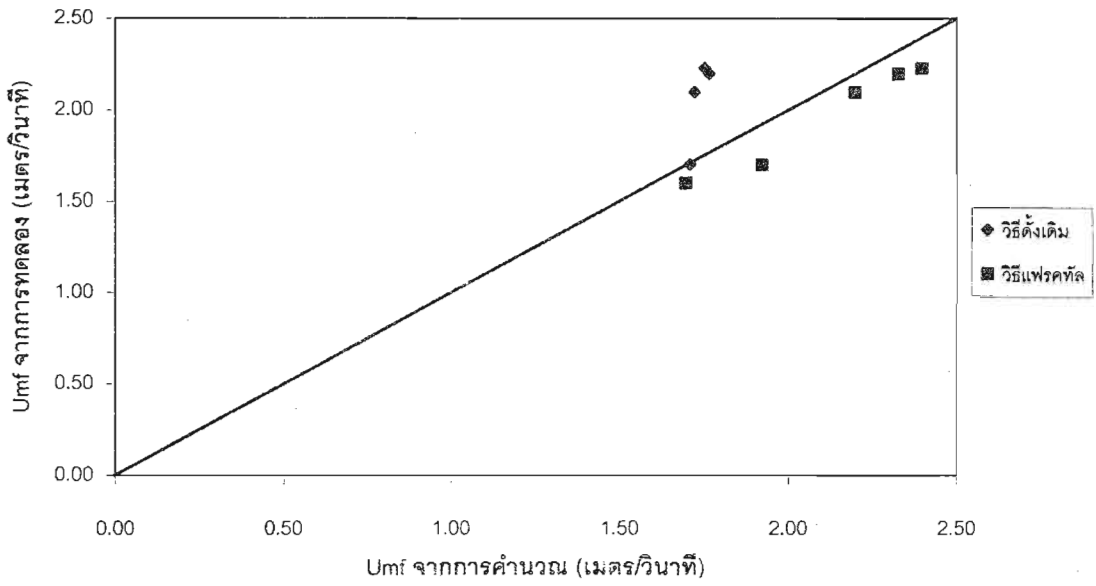
จากรูปที่ 4.32-4.42 เป็นการเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี โดยวิธีการหาค่าแฟคเตอร์รูปร่างแบบปริมาตรเทียบเท่าและวิธีแฟรคทัล จะเห็นว่าส่วนใหญ่ค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการคำนวณหาแฟคเตอร์รูปร่างจากวิธีแฟรคทัลให้ค่าที่ใกล้กับเส้นตรง  $X = Y$  มากกว่าที่คำนวณจากการหาแฟคเตอร์รูปร่างแบบวิธีปริมาตรเทียบเท่า และค่าจะอยู่ใต้เส้นตรง  $X = Y$  แสดงว่าค่า  $U_{mf}$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง

สามารถเขียนสมการการหาค่า  $U_{mf}$  ได้ใหม่ โดยใช้ค่าแฟคเตอร์รูปร่างที่หาจากวิธีแฟรคทัลแทนค่าแฟคเตอร์รูปร่างที่หาแบบวิธีปริมาตรเทียบเท่า

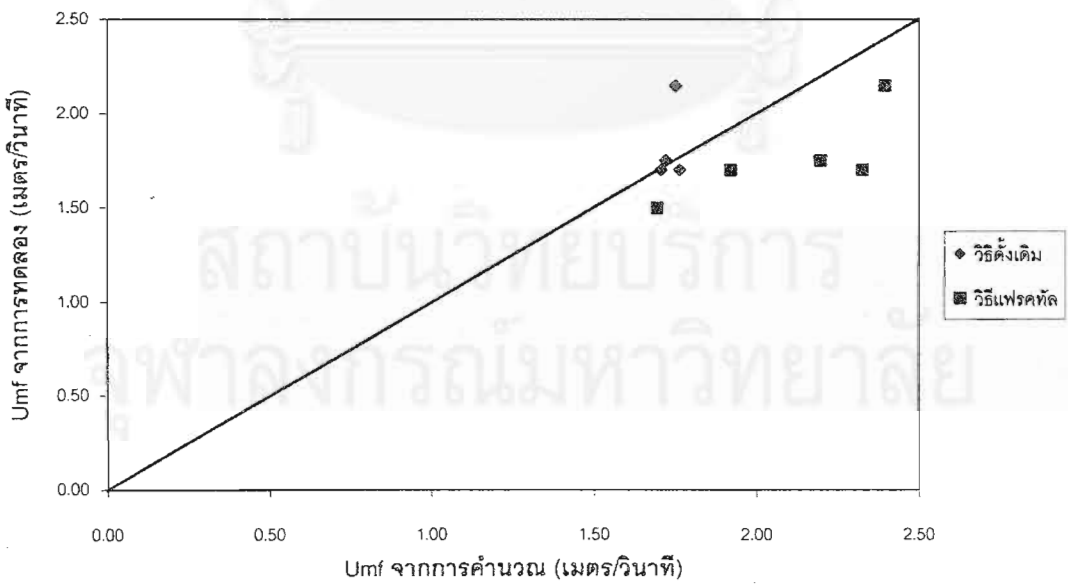
$$\frac{1.75}{\phi_1 \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_1^2 \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (4.3)$$



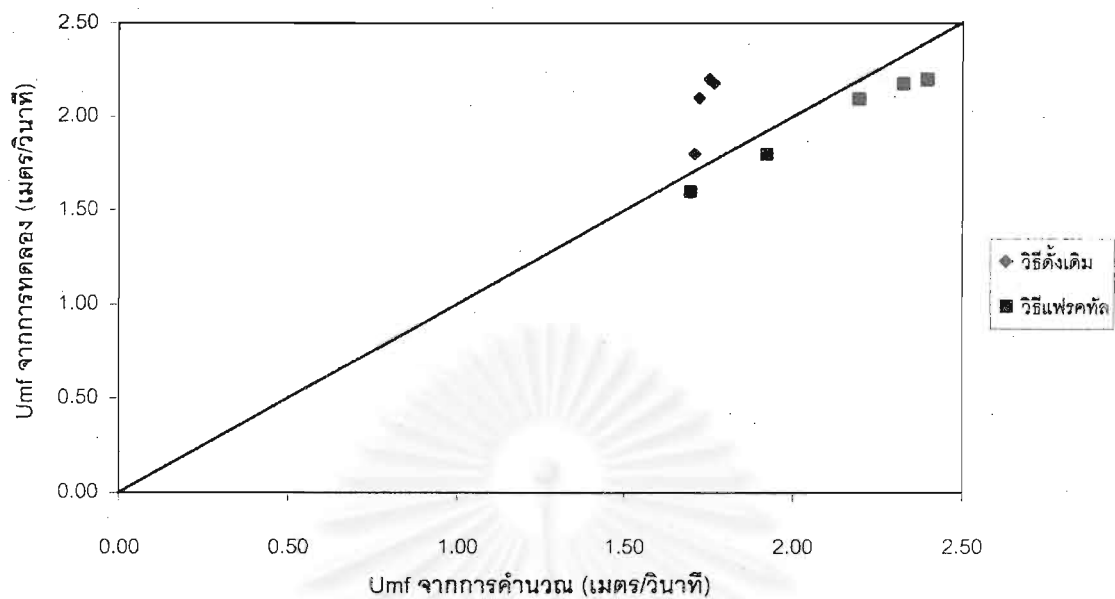
รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาคชนิดที่ 1-5 ของแผ่นกระจายอากาศแบบ A



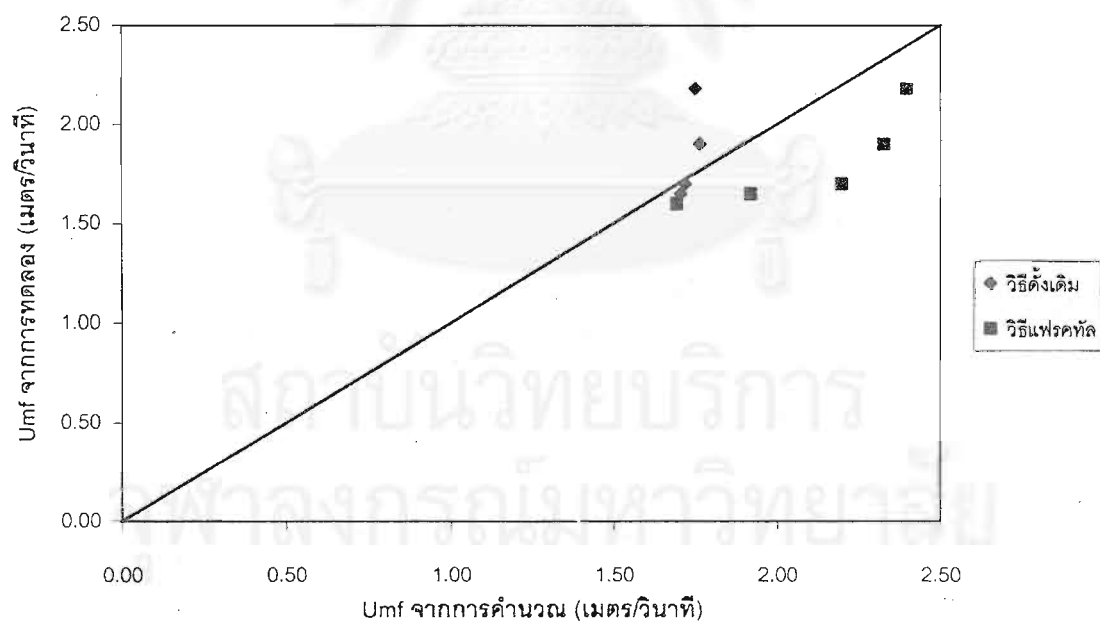
รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1-5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ B



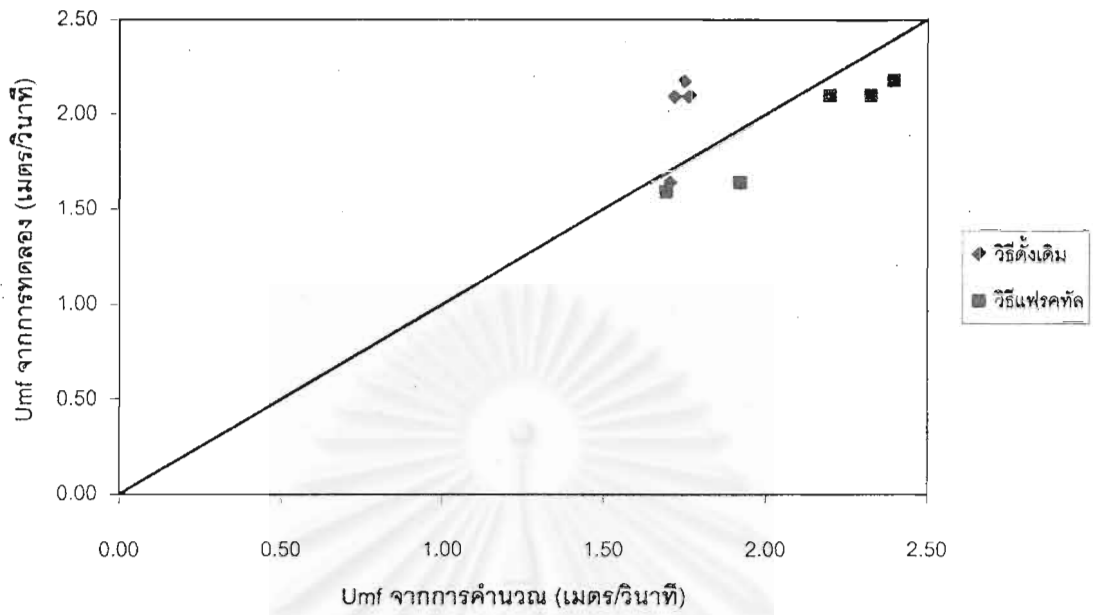
รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1-5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ C



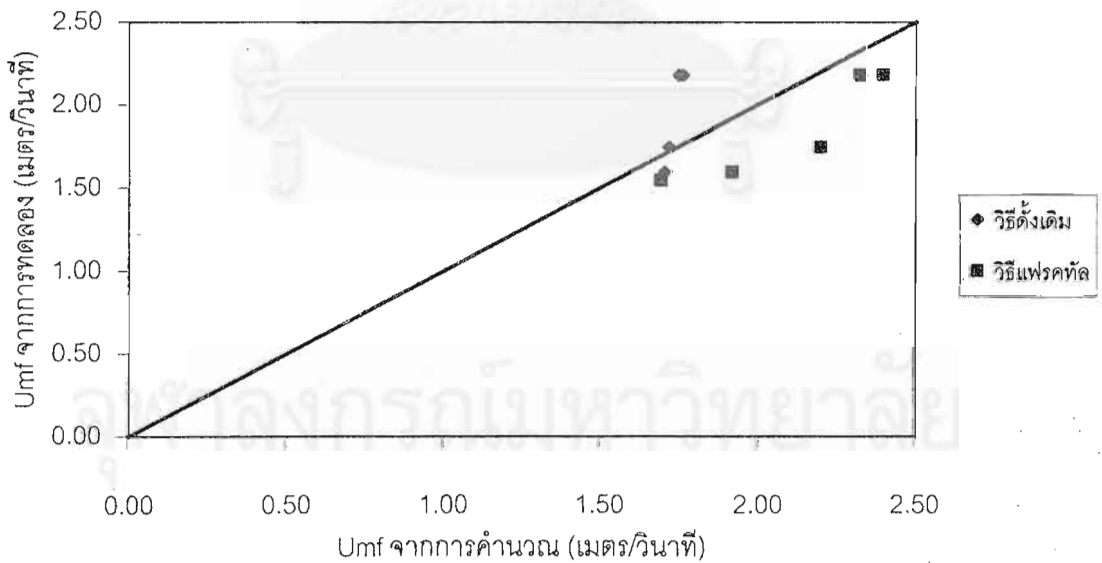
รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1- 5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ D



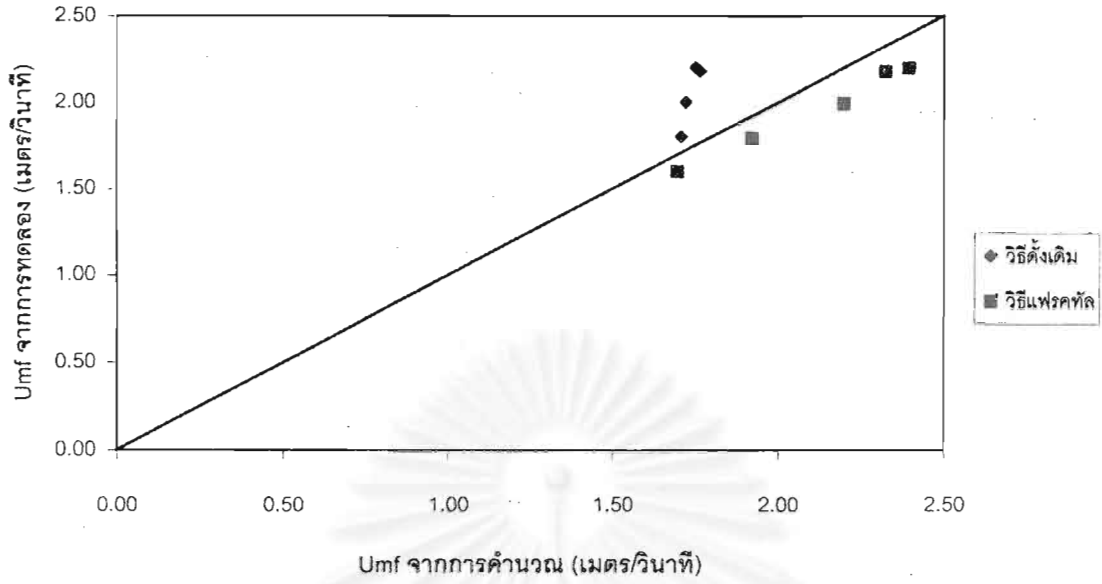
รูปที่ 4.36 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1- 5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ E



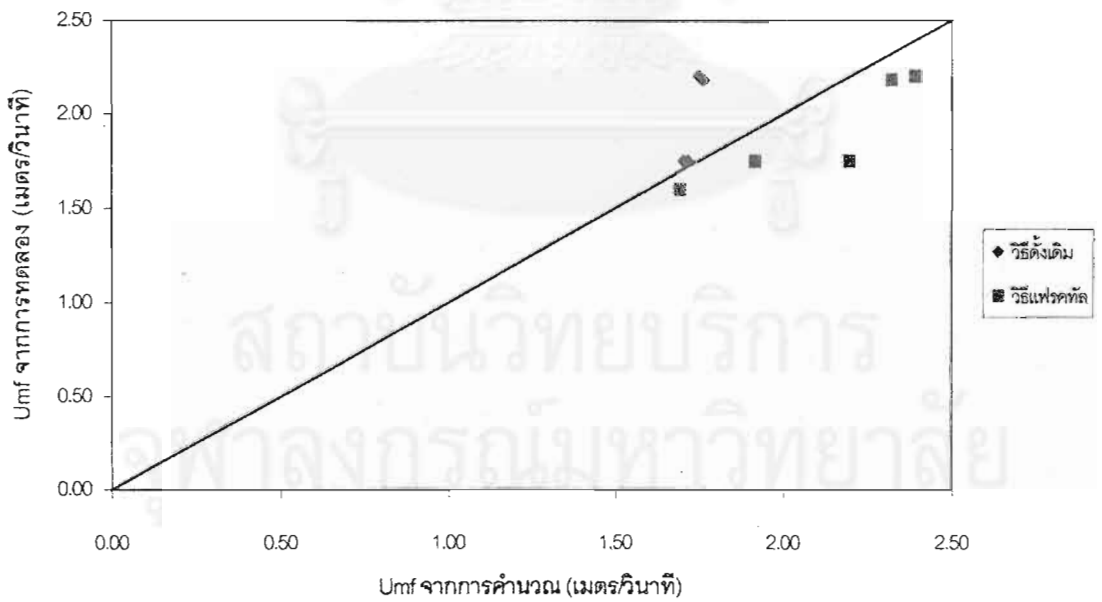
รูปที่ 4.37 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1-5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ F



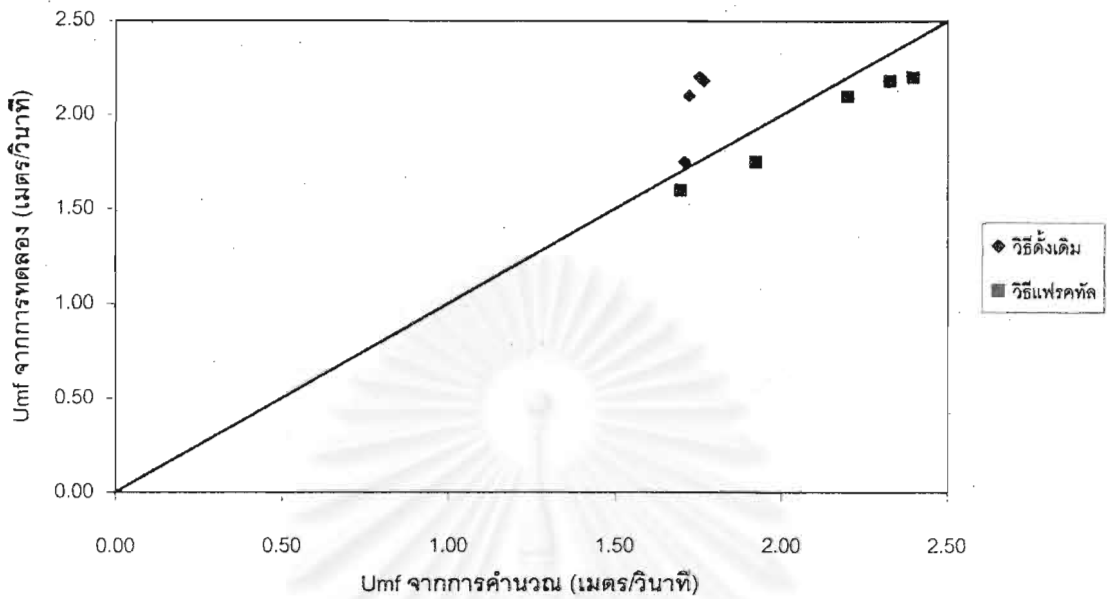
รูปที่ 4.38 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1-5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ G



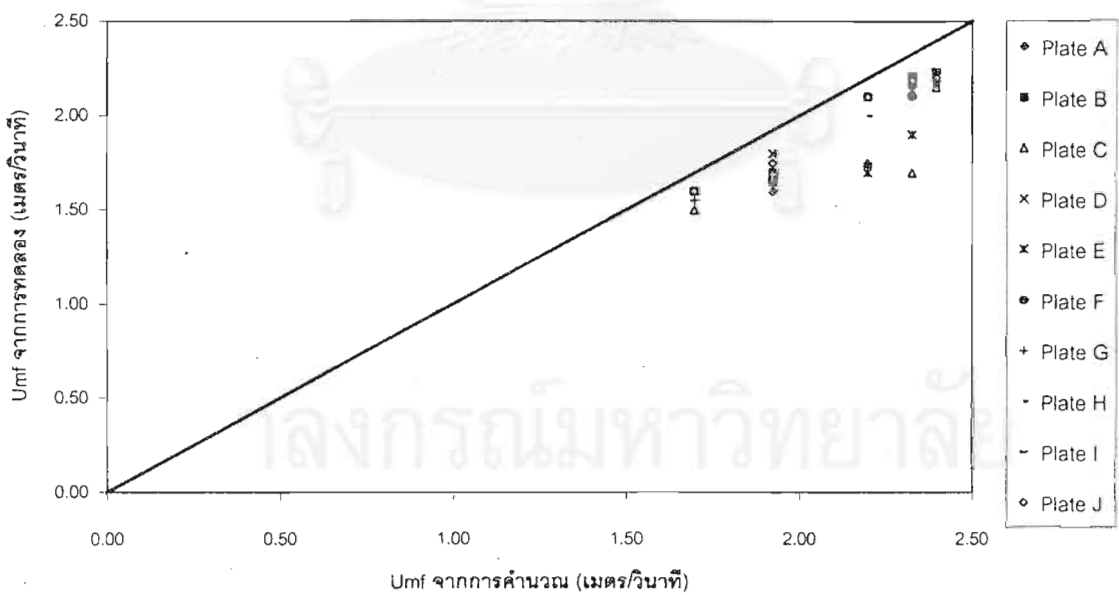
รูปที่ 4.39 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1-5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ H



รูปที่ 4.40 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1-5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ I



รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1-5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบ J



รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับจากการคำนวณ ของอนุภาค ชนิดที่ 1-5 ของ แผ่นกระจายอากาศแบบต่างๆ

#### 4.6 ผลของความชื้นและน้ำที่มีต่อถั่วเหลืองและถั่วเขียว

การทดลองโดยใช้ถั่วเหลืองและถั่วเขียวแทนเม็ดพลาสติก เพื่อเป็นการจำลองการเกาะกัน และการเกิดดีฟลูอิดิเซชันว่าของเหลวที่อยู่ในระบบมีผลหรือไม่

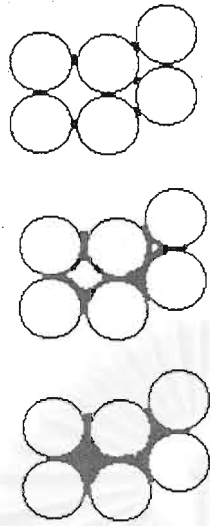
ในการทดลองโดยใช้ถั่วเหลืองและถั่วเขียว และทำการเพิ่มความชื้นของอากาศให้มีความชื้นมากกว่า 95 % พบว่าในการใช้ถั่วเหลืองเป็นเบตแทนเม็ดพลาสติกนั้น เมื่อทำการป้อนอากาศขึ้นที่ความเร็ว 1.2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชัน เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นว่าเปลือกของเมล็ดถั่วเหลืองเริ่มมีการดูดซับน้ำและมีการพองขึ้น หลังจากเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมงเม็ดถั่วเหลืองก็พองขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งการที่เมล็ดถั่วเหลืองพองขึ้นนั้นทำให้ความหนาแน่นและความสูงของเบตมีการเปลี่ยนแปลง[16] ดังนั้นการทดลองโดยใช้เมล็ดถั่วเหลืองจึงไม่เหมาะสม

การทดลองโดยใช้ถั่วเขียวแทน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปเมล็ดถั่วเขียวเริ่มมีการเกาะกันของเมล็ด อันเนื่องมาจากความชื้นในอากาศเปลี่ยนมาเป็นน้ำและมาเคลือบอยู่ที่ผิวของเมล็ดถั่วเขียว และน้ำนี่เองเป็นตัวทำให้เกิดพันธะของเหลว(Liquid bonding) ซึ่งความแข็งแรงของพันธะก็ขึ้นกับปริมาณน้ำที่มาเคลือบอยู่ที่ผิวของเมล็ดถั่วเขียว ยิ่งมีน้ำเคลือบมากพันธะก็จะแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งการเกิดพันธะออกได้เป็น 3 แบบ[14,29] ตามรูปที่ 4.43

1. Pendular saturation state คือ พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งมีลักษณะเป็นจุดเนื่อง จากมีของเหลวน้อย
2. Funicular saturation state คือ ของเหลวจะมากขึ้นทำให้พันธะมีความแข็งแรงมากขึ้น
3. Capillary saturation state คือ ในช่องว่างระหว่างของแข็งจะมีของเหลวอยู่เต็มไปหมดทำให้พันธะแข็งแรงมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



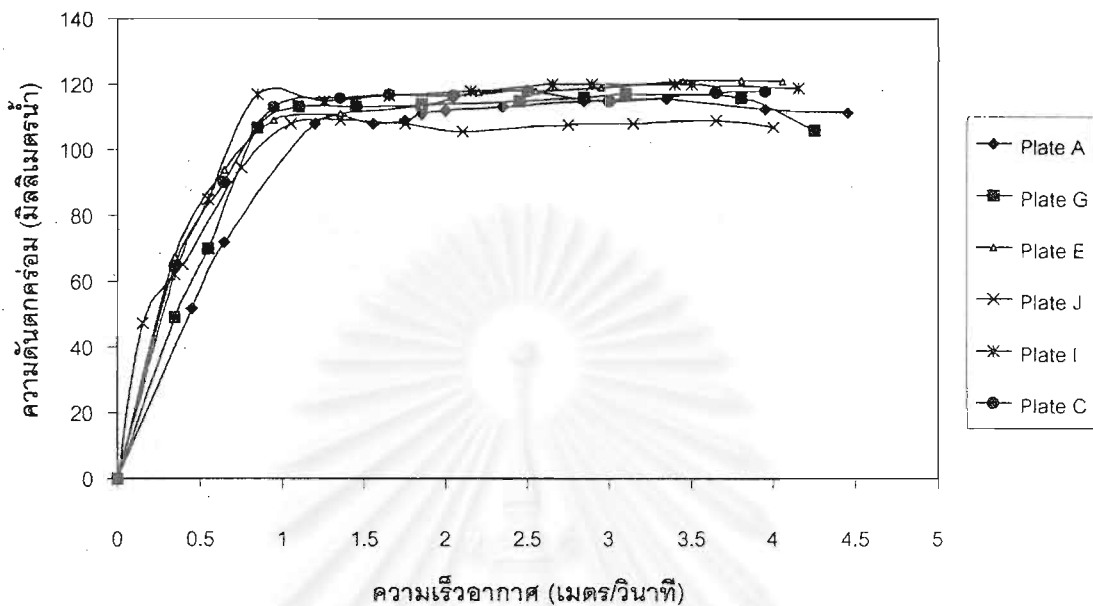


รูปที่ 4.43 แสดงลักษณะการเกิดพันธะที่เกิดจากของเหลว

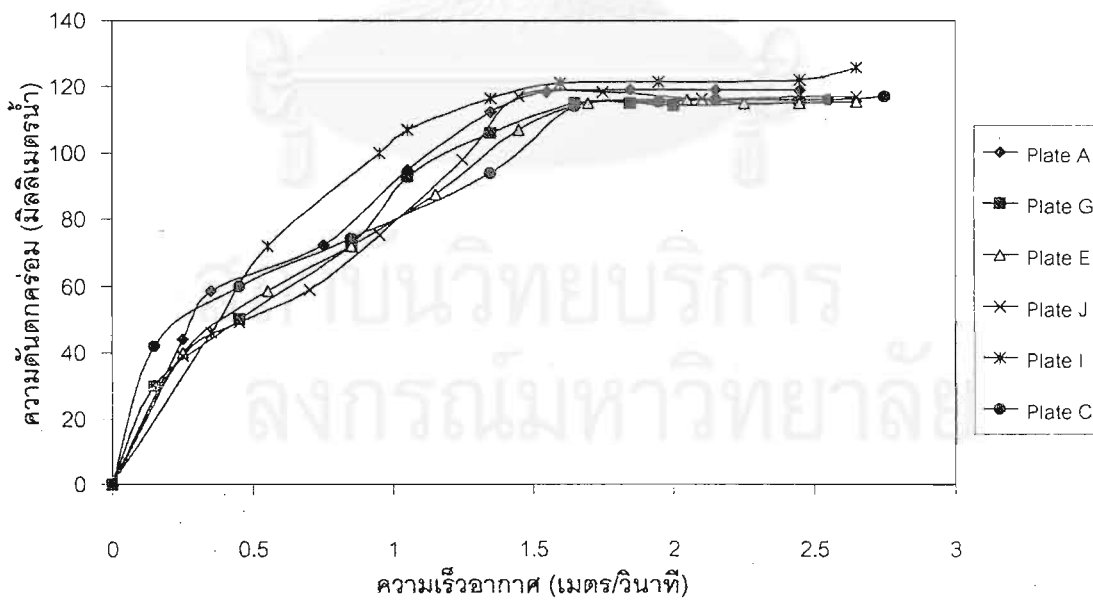
เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นความสูงของเบดเริ่มลดลง แต่ลดลงไม่มากจาก ความสูง 17.5 เซนติเมตร เหลือ 17 เซนติเมตร ซึ่งเห็นผลไม่ค่อยชัดเจนเท่าไรนัก

จึงได้มีการปรับเปลี่ยนการทดลองเป็น การนำเมล็ดถั่วเขียวมาแช่น้ำก่อนให้ชุ่มแล้วจึงทำการทดลองแต่ทำการทดลองเพื่อหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน ปรากฏว่าเมื่อนำค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชันของการทดลองแบบปกติ คือใช้ของไหลเป็นอากาศอย่างเดียว พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชันของระบบที่ใช้ความชื้นมีค่ามากกว่า เนื่องจากน้ำที่อยู่ในระบบทำให้เมล็ดถั่วเกาะกันดังนั้นจึงต้องใช้ความเร็วของอากาศมากขึ้นในการทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน แสดงดังรูปที่ 4.44 และรูปที่ 4.45

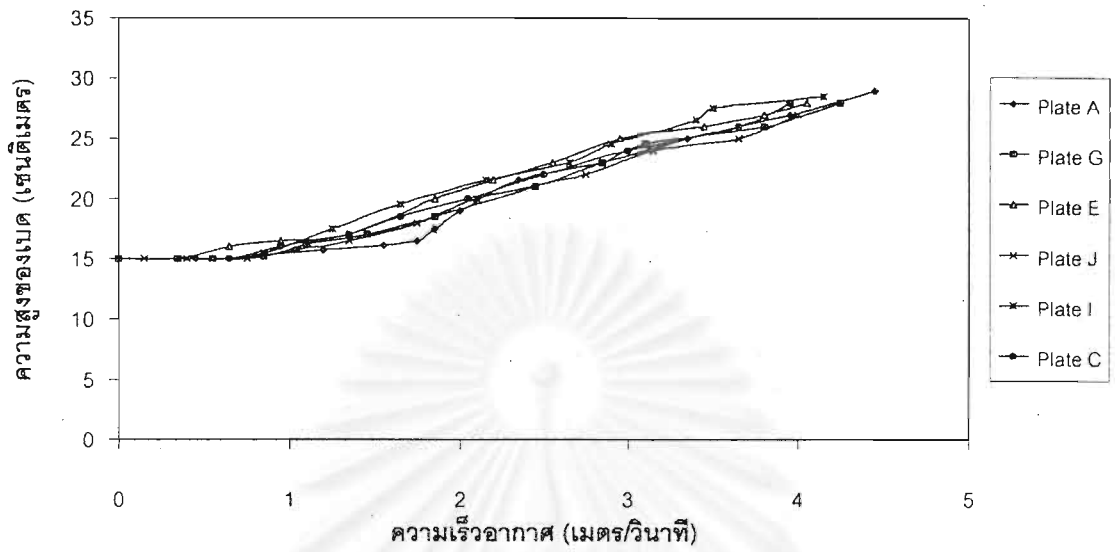
จะเห็นว่าจากรูปที่ 4.44 ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชันมีค่าอยู่ในช่วง 1-1.25 เมตร/วินาที และจากรูป 4.45 มีค่าอยู่ในช่วง 1.5-1.75 เมตร/วินาที ในส่วนของความดันตกคร่อมในรูปที่ 4.45 จะมีค่ามากกว่ารูปที่ 4.44 เล็กน้อยเนื่องจากเมล็ดถั่วมีการเกาะกัน น้ำหนักจึงมากขึ้นและไปขัดขวางการลอยตัว ทำให้ความดันตกคร่อมมีค่ามากขึ้น[14,16,17] จากรูปที่ 4.46 และ 4.47 จะเห็นว่าการขยายตัวของเบดของรูปที่ 4.47 มีค่าน้อยกว่ารูปที่ 4.46 ที่ความเร็วเท่ากัน เนื่องจากในระบบที่มีน้ำ เมล็ดถั่วเขียวจะเกิดการเกาะกันและมีน้ำหนักมากทำให้การขยายตัวของเบดลดลง ดังนั้นของเหลวที่เกิดขึ้นในระบบมีความสำคัญมากเพราะจะมีผลกระทบต่อโดยตรงกับระบบ



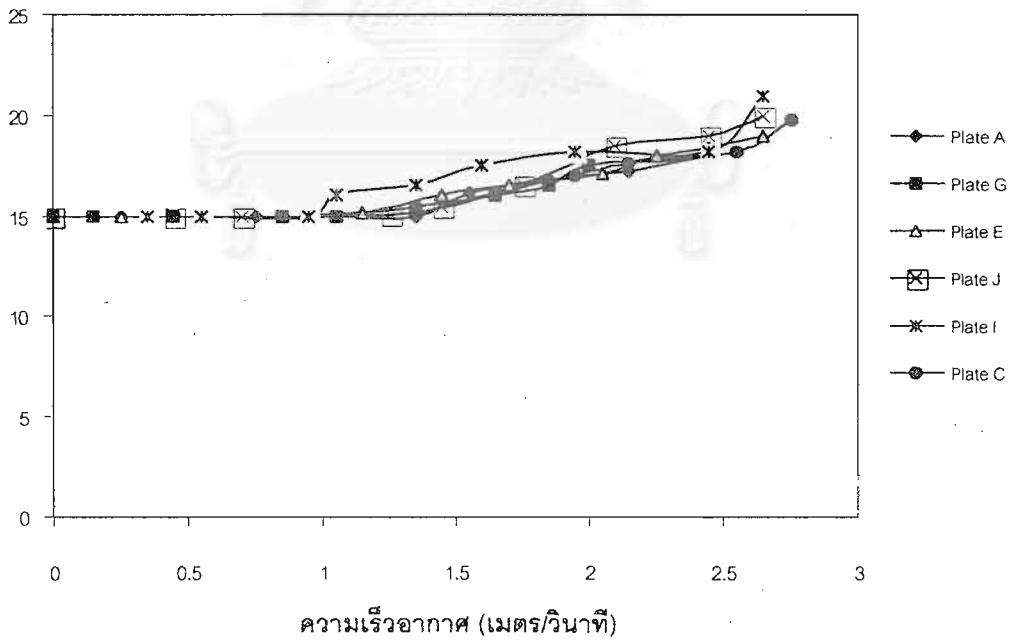
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและความดันตกคร่อมของถ้วยเขียว (ระบบ 2 วัฏภาค)



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความดันตกคร่อมของถ้วยเขียวที่แช่ น้ำ และอากาศมีความชื้นมากกว่า 95 % (ระบบ 3 วัฏภาค)



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความสูงของเบดของเมล็ดถั่วเขียว (ระบบ 2 ภูมิภาค)



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความสูงของเบดของเมล็ดถั่วเขียวที่แห้งและอากาศมีความชื้นมากกว่า 95 % (ระบบ 3 ภูมิภาค)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการผลทดลอง อนุภาคที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.59 – 0.6 ซม. โดยแบ่งอนุภาค ออกเป็นแบบ 1, 2, 3, 4 และ 5 ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่เกาะกัน 1, 2, 4, 5 และ 6 เม็ด ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อเป็นการจำลองการเกาะตัวของอนุภาคในระบบฟลูอิดไอเซชันแบบ 3 มิติ ที่ความสูงเบด 15 ซม. และใช้แผ่นกระจายอากาศ A - J แบบ โดยแบบ A จะเจาะตามแนวรัศมีมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากับ 0.0055 เมตร, แบบ B เจาะขนาดเท่ากันแต่ในการเจาะจะต่างกันไป, แบบ C จะเจาะ เฉียง 45° ตามแนวรัศมี, แบบ D เจาะแนวเฉียง 45° สลับกันไป แบบ E และ F เจาะแบบกรวยหงาย และคว่ำโดยด้านกว้างและแคบจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.01 และ 0.0055 เมตรตามลำดับ, แบบ G เจาะตามแนวรัศมี เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0035 เมตร, แบบ H จะมีการเจาะตามแนวรัศมี แต่ วงนอกสุดเจาะแบบเฉียง 45°, แบบ I เจาะตามแนวรัศมี แต่ 3 วงนอกสุดเจาะแบบเฉียง 45°, แบบ J เจาะตามแนวรัศมี แต่ 3 วงในเจาะแบบรูปกรวยหงายและ 3 วงนอกสุดเจาะแบบเฉียง 45° ซึ่งการ เจาะแบบตรงทำให้การไหลของอากาศจะเป็นลักษณะตรงและถ้าเจาะแบบเฉียงก็จะทำให้อากาศ ไหลแบบหมุนวน ในช่วงเริ่มต้นการทดลองทำการป้อนอากาศให้ไหลผ่านแผ่นกระจายอากาศเข้าสู่ คอลัมน์ โดยที่ความเร็วของอากาศยังต่ำอยู่ประมาณ 0.5 เมตร/วินาที อนุภาคจะอยู่ในสภาพนิ่ง ซึ่ง เรียกสภาวะนี้ว่า "เบดนิ่ง" จากนั้นค่อยๆเพิ่มความเร็วของอากาศให้มากขึ้น อนุภาคจะเริ่มขยับตัว มากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคเริ่มลอยตัวอย่างมีอิสระ สภาวะนี้เรียกว่า "เกิดฟลูอิดไอเซชัน" ความเร็วของอากาศที่ป้อนในช่วงนี้จะเรียกว่า "ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน" หลังจากจุด นี้เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นอีกจะทำให้เบดขยายตัวมากขึ้น จนอนุภาคสามารถหลุดลอยออก จากคอลัมน์ได้

การพิจารณารูปแบบการเกาะของอนุภาค แบบ 1, 2, 3, 4 และ 5 พบว่าเมื่อการเกาะกัน ของอนุภาคมากขึ้น ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจะมีค่าเพิ่ม ขึ้น เนื่องจากเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นน้ำหนักก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่มาก ขึ้นซึ่งก็คือแรงลอยตัว จึงต้องใช้ความเร็วอากาศสูงขึ้นในการทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันโดยสามารถ สังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของอากาศ จุดที่เริ่มเกิด ฟลูอิดไอเซชันจะเป็นจุดที่สูงที่สุดของค่าความดันตกคร่อมที่เริ่มมีการเปลี่ยนความชันอย่างเห็นได้ชัด

และมีแนวโน้มคงที่ และเมื่อลากเส้นตรงตามแนวตั้งลงมาตัดกับแกน Y ค่าที่ได้จะเป็นค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

การพิจารณาแบบของแผ่นกระจายอากาศแบบ A - J ความหนา 8 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะการเจาะที่แตกต่างกันนั้น โดยการเจาะแบบตรงนั้นจะทำให้การไหลของแก๊สไหลเป็นลำทรงกระบอกตรงๆ แต่ถ้าเจาะในแนวเฉียงจะทำให้การไหลของแก๊สไหลแบบหมุนวนเหนือแผ่นกระจายอากาศจากการทดลองพบว่าแผ่นกระจายอากาศแบบ I และ J มีแนวโน้มการกระจายอากาศที่ดีกว่าแบบอื่นๆ ในอนุภาคแต่ละแบบ โดยสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วของอากาศ และจากการใช้โปรแกรมแอนนิซจำลองการไหลของอากาศในคอลัมน์ผ่านแผ่นกระจายอากาศแบบต่างๆ ในแบบ 2 มิติ พบว่าแผ่นกระจายอากาศแบบ I และ J ให้แนวโน้มการกระจายอากาศที่ดีที่สุด โดยลักษณะของแผ่นกระจายอากาศแบบ I และ J มีการเจาะรูแบบแนวตรงและแนวเฉียง 45 องศา ทางด้านรอบนอกของแผ่นตามแนวรัศมีส่งผลให้เมื่ออากาศผ่านตรงช่วงที่เจาะแบบเฉียงนี้จะทำให้อากาศเกิดการหมุนวนและเกิดแรงเฉือน ซึ่งแรงเฉือนนี้จะทำให้ไม่เกิดการเกาะกันของอนุภาคและทำให้อนุภาคที่เกาะกันอยู่แตกออกจากกันได้ เกิดการผสมกันได้ดียิ่งขึ้น อนุภาคก็จะมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น

ในการหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสามารถหาได้จากสมการของ Ergun แต่เมื่อนำค่าที่หาได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงแล้วปรากฏว่ามีค่าไม่ค่อยใกล้เคียงกันเท่าไรนัก ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นอาจจะมีความผิดพลาดอยู่อันเนื่องมาจากค่าต่างๆ ที่วัดได้จากเครื่องมือที่มีความผิดพลาดและการใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางปริมาตรเทียบเท่าทรงกลมแทนเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เกาะกันนั้น แล้วนำมาใช้หาค่าแฟคเตอร์รูปร่างยังไม่ถูกต้อง เช่น เม็ดพลาสติกแบบที่ 5 ค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 2.2 เมตร/วินาที แต่จากการคำนวณได้ 1.75 เมตร/วินาที ดังนั้นจึงได้เสนอแฟคทอลไดเมนชัน มาใช้ในการหาค่าแฟคเตอร์รูปร่างแทนการหาแบบปริมาตรเทียบเท่า ซึ่งจะได้ค่า 2.39 เมตร/วินาที จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกว่า จากการเปรียบเทียบค่าในตารางที่ 4.5 พบว่าค่า  $\phi_1$  เป็นค่าแฟคเตอร์รูปร่างที่หาจากค่าแฟคทอลไดเมนชัน ส่วนค่า  $\phi_2$  เป็นการหาแบบปริมาตรเทียบเท่า จะเห็นว่าค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันที่หาจากค่า  $\phi_1$  จะให้ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากกราฟมากกว่าที่หาได้จาก  $\phi_2$  และจากการเปรียบเทียบค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี จะเห็นว่าส่วนใหญ่ค่า  $U_{mf}$  ที่ได้จากการคำนวณหาแฟคเตอร์รูปร่างจากวิธีแฟคทอลให้ค่าที่ใกล้กับเส้นตรง  $X = Y$  มากกว่าที่คำนวณจากการหาแฟคเตอร์รูปร่างวิธีเดิม ดังนั้นแฟคทอลจึงสามารถแก้ปัญหาทางการคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้

เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของระบบฟลูอิดิเซชัน (quality of the fluidization) ซึ่งระบบจะมีคุณภาพดีก็ต่อเมื่อค่าความดันตกคร่อมเบดมีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบดต่อหน่วยพื้นที่ โดยจะแสดงในรูปของค่า FI (fluidization index) ดังนั้นค่า FI ที่ดีควรมีค่าเท่ากับ 1 จากการทดลองค่า FI ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 – 1 นั่นคือระบบมีคุณภาพอยู่ที่ 80 – 100 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนที่ค่าน้อยกว่า 1 นั้น เป็นช่วงที่เบดเกิดฟองอากาศและเกิดช่องว่างภายในเบด

การทดลองโดยใช้ถั่วเขียวแช่น้ำแทนเม็ดพลาสติก และใช้ของไหลเป็นอากาศที่มีความชื้นมากกว่า 95% พบว่าค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันของการทดลองแบบปรกติ คือใช้ของไหลเป็นอากาศอย่างเดียวก่อประมาณ 1 เมตร/วินาที และค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันของระบบที่ใช้ความชื้นมีค่าประมาณ 1.5 เมตร/วินาที ซึ่งมีค่ามากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่อยู่ในระบบทำให้เม็ดถั่วจัดเรียงตัวดีขึ้นและเกาะกันดังนั้นจึงต้องใช้ความเร็วของอากาศมากขึ้นในการทำให้เกิดฟลูอิดิเซชัน และมีการขยายตัวของเบดน้อยกว่า ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าของเหลวที่อยู่ในระบบนั้นมีความสำคัญมากเนื่องจากมีผลกระทบกับระบบโดยตรง

## 5.2. ข้อเสนอแนะ

การทดลองในระบบ 3 ภูมิภาค ของเหลวที่ใช้ควรจะเป็นชนิดอื่น และอนุภาคควรจะมีคุณสมบัติคงที่เมื่อสัมผัสกับของเหลว

## รายการอ้างอิง

1. Kunii, D. and Levenspiel, O. Fluidization Engineering. Boston, USA: Butterworth-Heinman, 1991.
2. Ergun, S. Fluid Flow through Packed Columns. Chem. Eng. Progr. 48 (1952): 89-97.
3. Geldart, D. Types of Gas Fluidization. Powder Technol. 7 (1973) : 285-292.
4. Mandelbrot, B.B. Fractal, Form, Chance and Dimension. Sanfrancisco: Frecman, 1977.
5. Kaye, B.H. A random Walk Through Fractal Dimensions. 2<sup>sd</sup> Edition. VHC. Weinheim, 1994.
6. Kaye, B.H. Direct Characterization of Fineparticle. Newyork: John Wiley&Son, 1981.
7. McCabe, W. L. and Smith, Julian C. Unit Operations of Chemical Engineering. 2<sup>sd</sup> Edition. New York: McGraw-Hill Book, 1967.
8. Perry, J. H. Chemical Engineering Handbook. 3<sup>rd</sup> Edition. McGraw-Hill Book, 1950.
9. กัญจนนา บุญเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
10. Allen, T. Particle Size Measurement. 5<sup>th</sup> Edition. London: Chapman&Hall, 1997
11. Reppenhagen, J. Particle Technology: Fluidization. [Online]. Available from: <http://www.tu-harburg.de> [2000, May 30].
12. A. C. Hoffmann. Manipulating fluidized beds by using internals. [Online] Available from : <http://www.fi.uib.no/~hoffmann/papershtml/npt00/npt99.html> [2000, May 30].
13. Lin, T. J. and Fan, L. S. Characteristics of High-Pressure Liquid-Solid Fluidization. Particle Technology and Fluidization. 43, 1 (1997) : 45-57.
14. Wright, P.C. and Raper, J.A. Examination of dispersed liquid-phase three-phase fluidized beds Part 1. Non-porous, uniform particle system. Powder Technol. 97 (1998) : 208- 226.
15. Briens, L.A., Briens C.L. and Margarity, A. Minimum liquid fluidization velocity in gas-liquid-solid fluidized beds. AIChE Journal. 43 , 5 (1997) : 1189-1189.

16. Wright, P.C. and Raper, J.A. Examination of dispersed liquid-phase three-phase fluidized beds Part 1. Porous, and non-spherical particle system. Powder Technol. 102 (1999) : 37-51.
17. Wright, P.C. and Raper, J.A. Role of liquid bridge forces in cohesive fluidization. Trans AIChE, 76 (1998) : 753-760.
18. Wright, P.C. and Raper, J.A. Investigation into the Viability of a liquid-film three-phase spouted bed biofilter. J.Chem Technol. Biotechnol. 73 (1998) : 281-291.
19. Moseley, J.L. and O'Brien, T.J. A model for agglomeration in a fluidized bed. Chemical Engineering Science. 48, 17 (1993) : 3043-3050.
20. Noordergraaf, L.W., Van Dijk, A. and Van Den Bleek, C.M. Fluidization and slugging in large-particle systems. Powder Technol. 52 (1987) : 59-68.
21. Marring, E., Hoffmann, A.C. and Janssen L.P.B.M. The effect of vibration on the fluidization behavior of some cohesive powders. Powder Technol. 79 (1994) : 1-10.
22. San Jose, M.J., Olazar, M., Benito, P.L. and Bilbao, J. Hydrodynamic and expansion of fluidized beds of coarse particles. Trans IChemE. 73 (1995) : 473-479.
23. De Luca, L., Di Felice, R., Foscolo, P.U. and Boattini, P.P. Slugging behaviour of fluidized beds of large particles. Powder Technol. 69 (1992) : 171-175.
24. Birk, R.H. (Hank), Camp, G.A. (Gary) and Hutchison, L.B.(Loyd). Design of an agglomeration resistant gas distributor. AIChE SYMPOSIUM SERIES. 86,276 (1990) : 16-25.
25. M'chirgui, A., Tadriss, L. and Pantaloni, J. Influence of particle-size distribution on entrainment solid rate in fluidized bed. AIChE Journal. 43, 1 (1997) : 260-262.
26. Kaye, B.H., Alliet, D., Switzer, L. and Turbitt-Daoust, C. The effect of shape on intermethod correlation of techniques for characterizing the size distribution of powder. Part 1: correlating the size distribution measured by sieving, image analysis and diffractometer methods. Part.Part. Syst. Charact. 14 (1997) : 219 - 224.
27. Apicella, E., D'Amore, M., Tardos, G. and Mauri, R. Onset of instability in sheared gas fluidized beds. AIChE Journal. 43, 5 (1997) : 1362-1365.



28. Karamanev, D.G., Chavarie, C. and Samson, R. Hydrodynamics of soil immobilization in the immobilized soil bioreactor. AIChE Journal. 43, 5 (1997) : 1163-1170.
29. Simons, S.J.R. Modelling of agglomerating system : from sphere to fractal. Powder Technol. 87 (1996) : 29-41.
30. Subero, J., Pascual, D. and Ghadiri, M. Production of agglomerates of well-defined structures and bone properties using a novel technique. Trans IChemE. 78 (2000) : 55-60.
31. Kuipers, N.J.M., Stamhuis, E.J. and Beenackers, A.A.C.M. Fluidization of potato starch in a stirred vibrating fluidized bed. Chem. Eng. Sci. 51, 11 (1996) : 2727-2732.
32. Alhotra, M., Law-Kwet-Cheong, L. and Mujumdar, A.S. Pressure drop characteristics for vibrated of dry and sticky particles. Powder Technol. 39 (1984) : 101-105.
33. Gauthier, D., Zerguerras, S. and Flamant, G. Influence of the particle size distributor Of powders on the velocities of minimum and complete fluidization. Chem.Eng.J. 74 (1999) : 181-196.
34. Mitra-Marjumdar, D., Farouk , B.and Shah, Y.T. Hydrodynamic modeling of threephase flow through a vertical column. Chem.Eng.Sci. 52, 24 (1997) : 4485-4497.
35. Ruud van Ommen, J., Schounten, J. C. and Van Den Bleek., Cor M. An early-warning-method for detecting bed agglomeration in fluidized bed combustors. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustors, Savannah Georgia, 1999.
36. Gunn, D.J. and Hilal, N. The expansion of gas-fluidized beds in bubbling fluidisation. Chem.Eng.Sci. 52, 16 (1997) : 2811-2822.
37. Brown et al, G.G. Unit Operations. New York : John Wiley&Son, 1950.
38. Damronglerd, S. Docteur Ingenieur Thesis, University of Toulouse, Toulouse, France, 1973.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

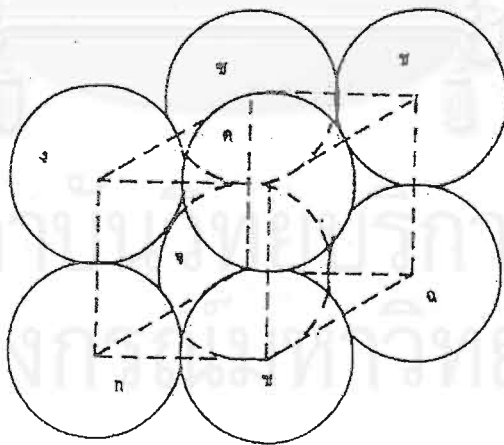
### ก.1 การหาค่าช่องว่างภายในเบด

กรณีที่มีเม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบดทำให้เกิดขนาดช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป เช่น การเรียงตัวแบบ Cubic, Orthorhombic และ Romboedric

$$\text{สัดส่วนช่องว่าง } (\varepsilon) = \frac{\text{ปริมาตรของช่องว่าง}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดที่พิจารณา}} \quad (\text{ก-1})$$

การเรียงตัวแบบลูกบาศก์ (Cubic) ดังรูปที่ ก-1 ภายในลูกบาศก์จะมีชั้นส่วน 8 ชั้นของลูกทรงกลม 8 ลูก แต่ละชั้นมีปริมาตรเป็น  $1/8$  เท่าของลูกทรงกลม โดยมุมของลูกบาศก์แทนด้วยตำแหน่ง

ก - ข



รูปที่ ก-1. การเรียงตัวของเม็ดทรงกลมแบบรูปลูกบาศก์

$$\text{ปริมาตรของของแข็งทั้งหมดในสี่เหลี่ยมลูกบาศก์} = \frac{1}{8} \frac{\pi}{6} d^3 \times 8$$

$$= \frac{\pi}{6} d^3$$

$d$  = ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรงกลม

ปริมาตรของลูกบาศก์  $= d^3$

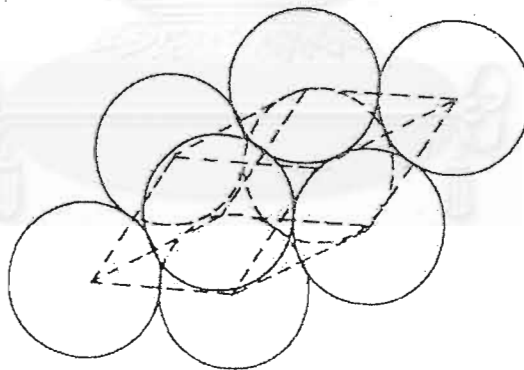
ปริมาตรของช่องว่าง  $= \left( d^3 - \frac{\pi d^3}{6} \right)$

$$\text{สัดส่วนช่องว่าง } (\varepsilon) = \left( d^3 - \frac{\pi d^3}{6} \right) / d^3$$

$$= 1 - \frac{\pi}{6}$$

$$= 0.477$$

การเรียงตัวเป็นแบบ Orthorombic คือเม็ดทรงกลมแถวบนจะอยู่ระหว่างเม็ดทรงกลมแถวล่าง 2 เม็ดด้วยกัน เมื่อพิจารณาจากจุดศูนย์กลางของเม็ดทรงกลมทั้งแปด จะได้รูปออกมาเป็น Orthorombic ดังรูปที่ ก-2.



รูปที่ ก-2. การเรียงตัวของเม็ดทรงกลมแบบ Orthorombic

ปริมาตรของช่องว่างที่อยู่ในรูป Orthorombic เท่ากับปริมาตรของเม็ดทรงกลมเหมือนกับกรณีของรูปลูกบาศก์  $= \frac{\pi d^3}{6}$

ปริมาตรของรูป Orthorombic  $= d^3 \sin 60^\circ$

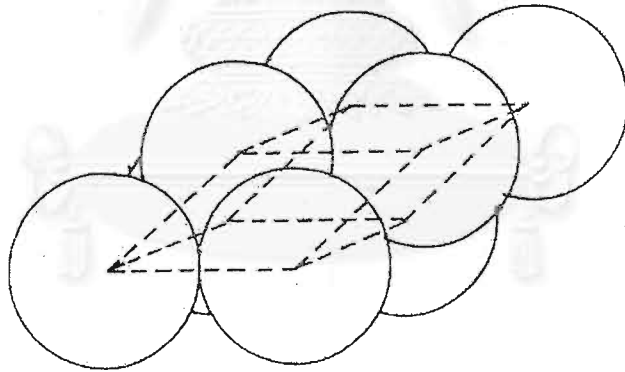
$$\text{ปริมาตรของช่องว่าง} = d^3 \sin 60^\circ - \frac{\pi}{6} d^3$$

$$\text{สัดส่วนของช่องว่าง} = \frac{d^3 \sin 60^\circ - \frac{\pi}{6} d^3}{d^3 \sin 60^\circ}$$

$$= 1 - \frac{\pi}{6 \sin 60^\circ}$$

$$= 0.395$$

การเรียงตัวแบบ Romboedric คือ เม็ดทรงกลมบนชั้นที่สองจะวางอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดของทรงกลมสี่เม็ดของชั้นที่หนึ่ง ดังรูปที่ ก-3. จุดศูนย์กลางของทรงกลมทั้งแปดจะเป็นรูป Romboedric



รูปที่ ก-3. การเรียงตัวของเม็ดทรงกลมแบบ Romboedric

ปริมาตรของช่องแข็งในรูป romboedric เท่ากับปริมาตรของเม็ดทรงกลมเหมือนในกรณีของลูกบาศก์  $= \frac{\pi}{6} d^3$

$$\text{ปริมาตรของรูป romboedric} = d^3 \sqrt{1 - \frac{1}{4(\sin 45^\circ)^2}}$$

$$\text{ปริมาตรของช่องว่าง} = d^3 \sqrt{1 - \frac{1}{4(\sin 45^\circ)^2}} - \frac{\pi}{6} d^3$$

$$\text{สัดส่วนของช่องว่าง} = 1 - \frac{1}{6 \times \sqrt{1 - \frac{1}{4(\sin 45^\circ)^2}}}$$

$$= 0.295$$

สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่เป็นรูปทรงกลม อาจเป็นวัสดุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน การหาสัดส่วนช่องว่างที่เกิดขึ้นในเบดก็จะเปลี่ยนไปตามรูปร่างและขนาดของวัสดุที่ใช้บรรจุในหอคดลอง หรือแม้แต่การบรรจุที่เป็นระเบียบกับแบบไม่เป็นระเบียบก็จะมีช่องว่างไม่เท่ากัน

## ก.2 การคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของหอคดลองด้านนอก	0.1584	m.
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของหอคดลองด้านใน	0.1416	m.
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดพลาสติกแบบ 1 เม็ด	0.006	m.
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกแบบ 2 เม็ด	0.0076	m.
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกแบบ 4 เม็ด	0.0095	m.
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกแบบ 5 เม็ด	0.0103	m.
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกแบบ 6 เม็ด	0.0109	m.
ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแบบ 1 เม็ด	1025	kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแบบ 2 เม็ด	1042	kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแบบ 5 เม็ด	1062	kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแบบ 5 เม็ด	1064	kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแบบ 6 เม็ด	1075	kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้อง	1.1597	kg/m <sup>3</sup>

ความหนืดของอากาศที่อุณหภูมิห้อง ที่สภาวะ minimum fluidization	$1.85 \times 10^{-5}$ kg/m.s
สัดส่วนช่องว่างของเม็ดพลาสติกแบบ 1 เม็ด	0.47
สัดส่วนช่องว่างของเม็ดพลาสติกแบบ 2 เม็ด	0.47
สัดส่วนช่องว่างของเม็ดพลาสติกแบบ 4 เม็ด	0.475
สัดส่วนช่องว่างของเม็ดพลาสติกแบบ 5 เม็ด	0.48
สัดส่วนช่องว่างของเม็ดพลาสติกแบบ 6 เม็ด	0.48

### ก.2.1 การหาค่าแฟคเตอร์รูปร่าง

สามารถหาได้จากสมการ 2.9

$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลมปริมาตรเทียบเท่าเม็ดของแข็ง}}{\text{พื้นที่ผิวของเม็ดของแข็ง}}$$

$$\text{ค่าแฟคเตอร์รูปร่างเม็ดพลาสติกแบบ 1 เม็ด} = 1$$

$$\text{ค่าแฟคเตอร์รูปร่างเม็ดพลาสติกแบบ 2 เม็ด} = \frac{\pi \times 0.0076^2}{2 \times \pi \times 0.006^2}$$

$$= 0.8$$

$$\text{ค่าแฟคเตอร์รูปร่างเม็ดพลาสติกแบบ 4 เม็ด} = \frac{\pi \times 0.0095^2}{4 \times \pi \times 0.006^2}$$

$$= 0.63$$

$$\text{ค่าแฟคเตอร์รูปร่างเม็ดพลาสติกแบบ 5 เม็ด} = \frac{\pi \times 0.0103^2}{5 \times \pi \times 0.006^2}$$

$$= 0.59$$

$$\text{ค่าแฟคเตอร์รูปร่างเม็ดพลาสติกแบบ 6 เม็ด} = \frac{\pi \times 0.0109^2}{6 \times \pi \times 0.006^2}$$

$$= 0.55$$

ก.2.2 การคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน( $U_{mf}$ )

จะหาได้จากสมการ 2.20

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$

นำค่าต่างๆแทนค่าลงในสมการ 2.20

เม็ดพลาสติกแบบ 1 เม็ด

$$\frac{1.75}{1 \times 0.47} \left( \frac{0.006 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right)^2 + \frac{150 \times (1 - 0.47)}{1^2 \times 0.47^3} \left( \frac{0.006 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right) =$$

$$\frac{0.006^3 \times 1.1597 \times (1025 - 1.1597) \times 9.81}{(1.85 \times 10^{-5})^2}$$

จากการ trial & error จะได้ค่า  $U_{mf} = 1.6965$  m/s

เม็ดพลาสติกแบบ 2 เม็ด

$$\frac{1.75}{0.8 \times 0.47} \left( \frac{0.0076 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right)^2 + \frac{150 \times (1 - 0.47)}{0.8^2 \times 0.47^3} \left( \frac{0.0076 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right) =$$

$$\frac{0.0076^3 \times 1.1597 \times (1042 - 1.1597) \times 9.81}{(1.85 \times 10^{-5})^2}$$

จากการ trial & error จะได้ค่า  $U_{mf} = 1.7089$  m/s

เม็ดพลาสติกแบบ 4 เม็ด

$$\frac{1.75}{0.63 \times 0.475} \left( \frac{0.0095 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right)^2 + \frac{150 \times (1 - 0.475)}{0.63^2 \times 0.475^3} \left( \frac{0.0095 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right) =$$

$$\frac{0.0095^3 \times 1.1597 \times (1062 - 1.1597) \times 9.81}{(1.85 \times 10^{-5})^2}$$



จากการ trial & error จะได้ค่า  $U_{mf} = 1.7227 \text{ m/s}$

เม็ดพลาสติกแบบ 5 เม็ด

$$\frac{1.75}{0.59 \times 0.48} \cdot \left( \frac{0.0103 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right)^2 + \frac{150 \times (1 - 0.48)}{0.59^2 \times 0.48^3} \cdot \left( \frac{0.0103 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right) =$$

$$\frac{0.0103^3 \times 1.1597 \times (1064 - 1.1597) \times 9.81}{(1.85 \times 10^{-5})^2}$$

จากการ trial & error จะได้ค่า  $U_{mf} = 1.7662 \text{ m/s}$

เม็ดพลาสติกแบบ 6 เม็ด

$$\frac{1.75}{0.55 \times 0.48} \cdot \left( \frac{0.0109 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right)^2 + \frac{150 \times (1 - 0.48)}{0.55^2 \times 0.48^3} \cdot \left( \frac{0.0109 \times U_{mf} \times 1.1597}{1.85 \times 10^{-5}} \right) =$$

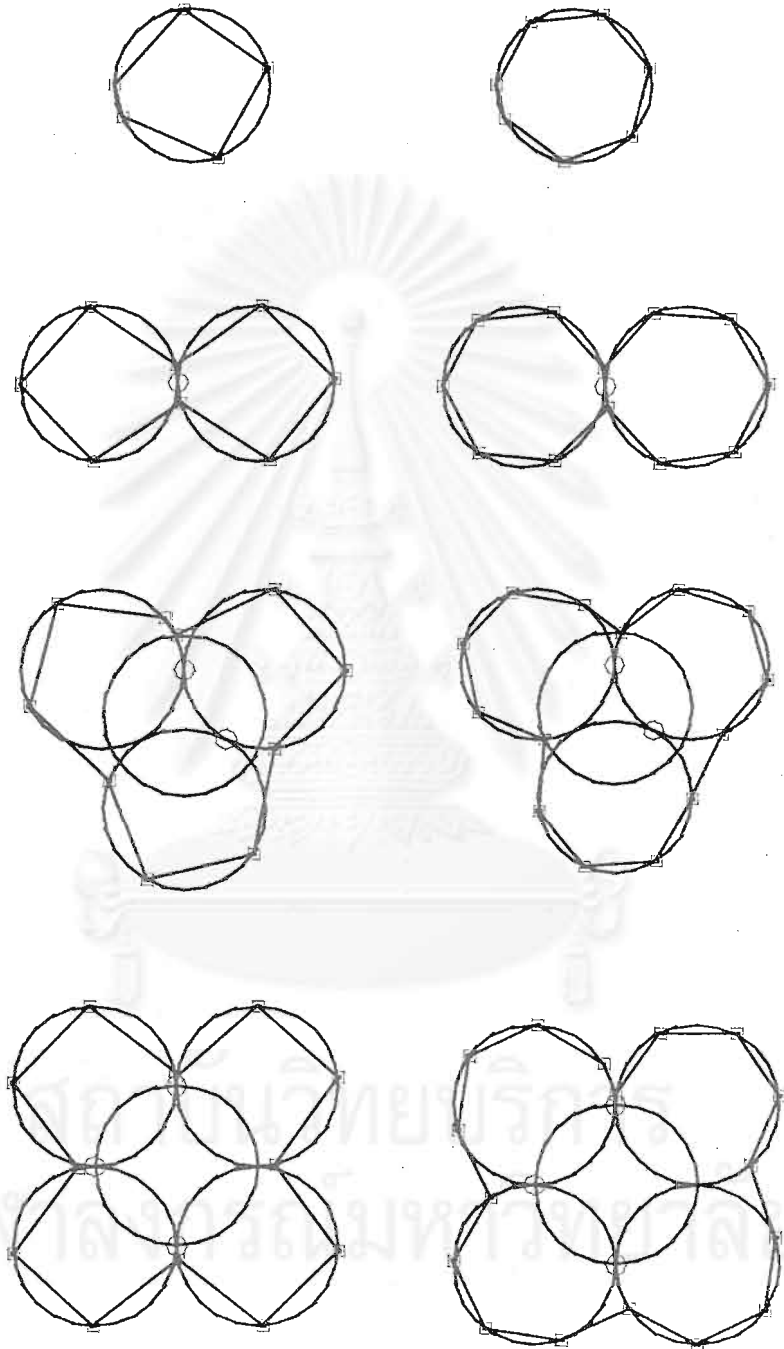
$$\frac{0.0109^3 \times 1.1597 \times (1075 - 1.1597) \times 9.81}{(1.85 \times 10^{-5})^2}$$

จากการ trial & error จะได้ค่า  $U_{mf} = 1.7531 \text{ m/s}$

### ก.3 การหาค่า Fractal dimension

1. นำอนุภาคทั้ง 5 แบบมาทำเป็นภาพถ่ายที่มีลักษณะเป็นวงกลมมากที่สุด ตามรูปที่ ก-4.
2. กำหนดค่าความยาวของเส้นตรงให้เป็นค่าคงที่
3. ลากเส้นตรงไปตามแนวขอบของวงกลม ตามรูป โดยใช้ความยาวของเส้นตรงมีขนาดเท่าเดิมจนวนกลับมาอยู่ที่จุดเริ่มต้น รวมความยาวของเส้นตรงทั้งหมด จะได้เป็นความยาวเส้นรอบรูป ที่เกิดจากเส้นตรงนั้นๆ
4. นำค่าความยาวของเส้นตรงหารด้วยค่าความยาวสูงสุดของภาพถ่ายของอนุภาคจะได้เป็นค่า  $\lambda$
5. และนำค่าความยาวเส้นรอบรูปหารด้วยค่าความยาวสูงสุดของภาพถ่ายของอนุภาคจะได้เป็นค่า  $P$
6. จากนั้นทำแบบเดิมโดยกำหนดให้ความยาวของเส้นตรงมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ เพื่อหาค่า  $P$  และค่า  $\lambda$  ออกมาหลายๆค่า

7. นำค่า  $P$  และ  $\lambda$  มาพลอตกราฟ log-log หรือใส่ค่า log ก่อนแล้วจึงพลอตแบบธรรมดา เมื่อได้ความชันของกราฟ นำมาแทนค่าในสมการที่ 2.44 ก็จะได้ค่าแฟรคทัลไดเมนชัน

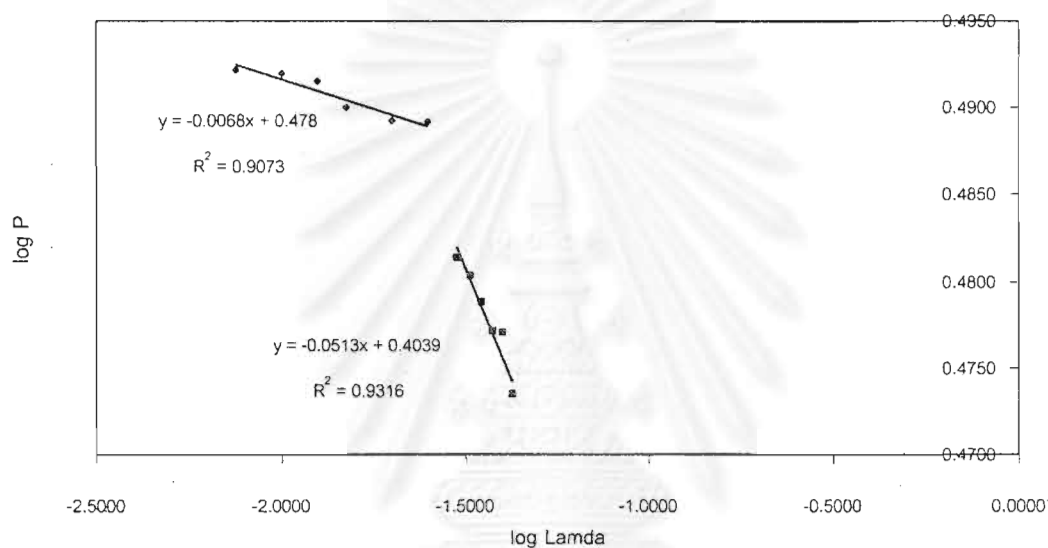


รูปที่ ก-4. แสดงการลากเส้นตรงหาค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคแบบที่ 1- 4

ในส่วนของอนุภาคชนิดที่ 1 เมื่อเส้นตรงที่ใช้ลากมีค่าชันลงมากๆ แล้ว ค่าความยาวเส้นรอบรูปที่ได้จะมีค่าเท่ากับความยาวเส้นรอบรูปของวงกลมจริง ดังนั้นเมื่อนำมาพลอตกราฟระหว่าง P และ  $\lambda$  จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 1 จะมีค่าเท่ากับ 1

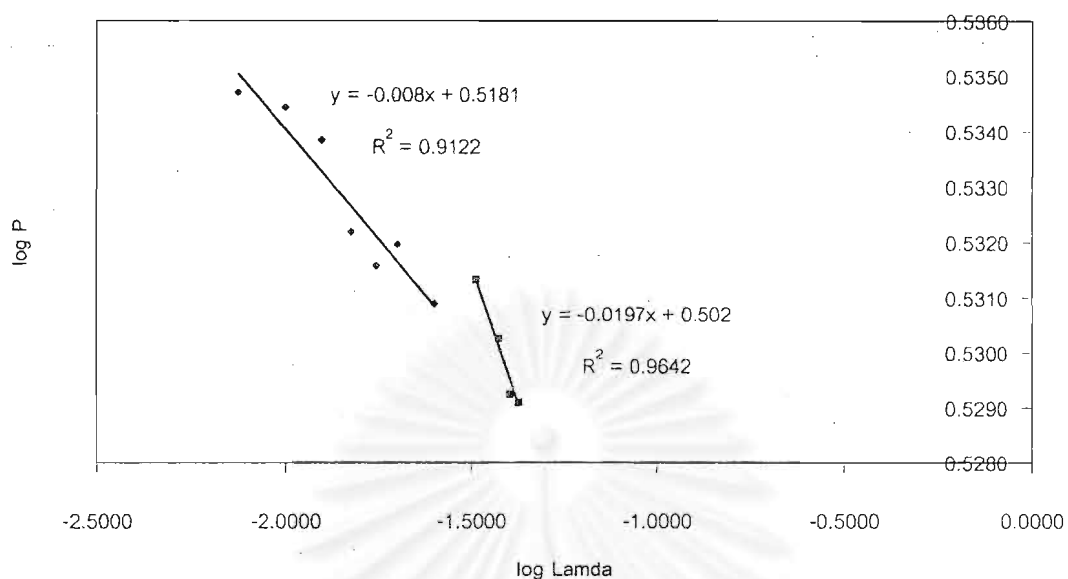
$$\delta = 1 + |0|$$

$$\delta = 1$$

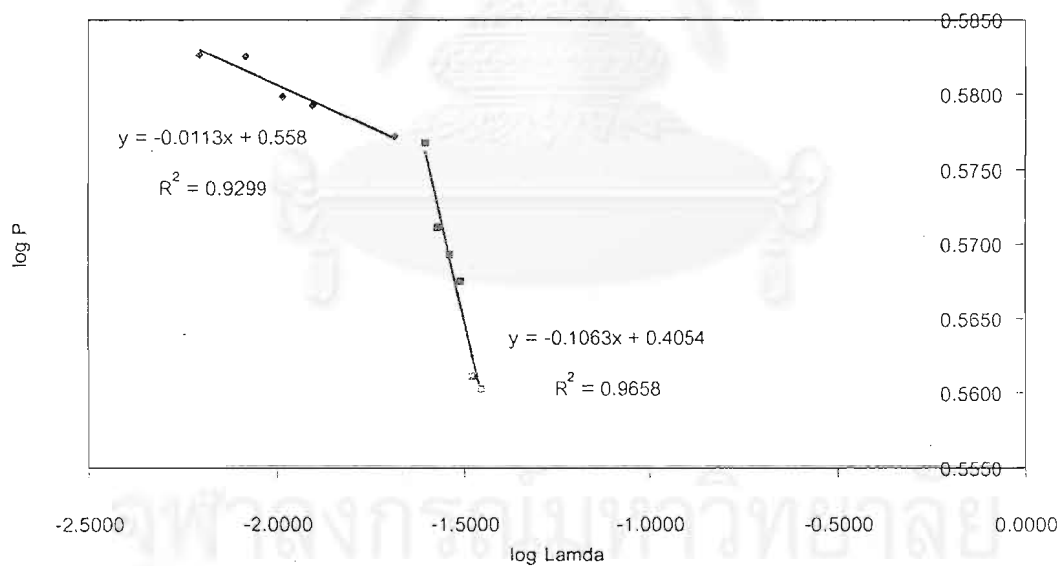


รูปที่ ก-5. กราฟแสดงความชันระหว่างค่า  $\log P$  และ  $\log \lambda$  ของอนุภาคแบบที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก-6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log P$  และ  $\log \lambda$  ของอนุภาคแบบที่ 3



รูปที่ ก-7. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log P$  และ  $\log \lambda$  ของอนุภาคแบบที่ 4, 5

จากรูปที่ ก-5, ก-6, ก-7 ค่าความชื้นที่ได้จากกราฟสามารถแบ่งความชื้นได้ออกเป็น 2 ช่วงด้วยกัน เราจะเลือกใช้ค่าความชื้นที่มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากเส้นตรงที่มีช่วงความยาว

สั้น ซึ่งเส้นตรงที่สั้นกว่านี้จะให้ค่าที่มีความยาวใกล้เคียงกับความยาวรอบรูปจริงมากกว่า จากนั้น แทนค่าความชันลงในสมการที่ 2.44 จะได้

ค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 2

$$\delta = 1 + |-0.0068|$$

$$\delta = 1.007$$

ค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 3

$$\delta = 1 + |-0.008|$$

$$\delta = 1.008$$

ค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 4

$$\delta = 1 + |-0.0113|$$

$$\delta = 1.011$$

ค่าแฟรคทัลไดเมนชันของอนุภาคชนิดที่ 5

$$\delta = 1 + |-0.0113|$$

$$\delta = 1.011$$

ตารางที่ ก-1. แสดงค่าแฟรคทัลไดเมนชันที่หาได้จากอนุภาคแต่ละแบบ

Particle type	แฟรคทัลไดเมนชัน ( $\delta$ )
1	1.000
2	1.007
3	1.008
4	1.011
5	1.011

นำค่าแฟรคทัลไดเมนชันที่ได้มาหาค่าแฟคเตอร์รูปร่าง

$$\phi_1 = \text{fractal dimension type 1} / \text{fractal dimension type n} \quad (\text{ก-2})$$

ซึ่งวิธีแก้หาได้จากสมการที่ 2.9

$$\phi_2 = \frac{\text{พื้นที่ผิวทรงกลมปริมาตรเทียบเท่า}}{\text{พื้นที่ผิวของเม็ดของแข็ง}}$$

ตารางที่ ก-2. แสดงค่าแฟคเตอร์รูปร่างที่ได้จากอนุภาคแต่ละแบบ

Particle type	Fractal Dimension	$\phi_1$	$\phi_2$
1	1.000	1.000	1.000
2	1.007	0.993	0.800
3	1.008	0.992	0.630
4	1.011	0.989	0.590
5	1.011	0.989	0.550

เมื่อนำค่า แฟคเตอร์รูปร่าง ( $\phi_1$  และ  $\phi_2$ ) มาคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันโดยแทนลงในสมการที่ 2.20 ผลที่ได้ปรากฏว่า  $\phi_1$  ให้ค่า  $u_{mf}$  ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่า  $\phi_2$  นั่นก็หมายความว่า การหาค่าแฟคเตอร์รูปร่างโดยใช้ แฟรคทัลโดเมนชั้น ให้ค่า แฟคเตอร์รูปร่าง ที่ดีกว่าการหาแบบเดิม

#### ก.4 ความชื้น

##### ก.4.1 ความชื้นในวัตถุ

ความชื้นเป็นตัวบ่งบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัตถุเมื่อเทียบกับมวลของวัตถุ ความชื้นในวัตถุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$W_w = \frac{m_{st} - m_s}{m_{st}} \quad (ก-3)$$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$W_w = \frac{m_{st} - m_s}{m_s} \quad (ก-4)$$

ความชื้นแบบนี้เป็นที่นิยมในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้ง

#### ก.4.2 ความชื้นในอากาศ (Humidity)[8,9]

ความชื้น หมายถึง น้ำหนักของน้ำ(ไอน้ำ)ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของแก๊สปลดความชื้น(หรือแก๊สแห้ง)

$$\text{ความชื้น} = \frac{\text{มวลของไอน้ำในแก๊ส}}{\text{มวลของแก๊สแห้ง}} \quad (\text{ก-5})$$

ความชื้นเป็นโมล (molar humidity) หมายถึงจำนวนโมลของน้ำต่อโมลของแก๊สปลดความชื้น

$$\text{ความชื้นเป็นโมล} = \frac{\text{จำนวนโมลของไอน้ำในแก๊ส ณ.อุณหภูมิหนึ่ง}}{\text{จำนวนโมลของแก๊สแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน}} \quad (\text{ก-6})$$

ความชื้นสมบูรณ์ (absolute humidity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำต่อมวลของแก๊สปลดไอน้ำ กับ มวลของไอน้ำอิ่มตัวต่อมวลของแก๊สไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน

ความชื้นสัมพัทธ์(relative humidity, RH) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความดันย่อยของไอน้ำกับความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน

ไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด ไอ้อาจจะไม่อยู่ในสภาพอิ่มตัว(unsaturated) หรือสภาพร้อนยิ่งยวด (superheated) ถ้าทำให้ไอน้ำเย็นลงเรื่อยๆ ความดันไอคงที่ จนกระทั่งกลายเป็นไออิ่มตัวที่อุณหภูมินี้ และจะเริ่มควบแน่นเป็นหยดน้ำ อุณหภูมินี้คือ จุดน้ำค้าง (dew point temperature)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature) หมายถึง อุณหภูมิของอากาศที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ปกติ

อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature) หมายถึง อุณหภูมิของอากาศที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ โดยจะใช้สำลีหรือผ้าพันรอบกระเปาะแล้วจุ่มน้ำให้เปียกชุ่ม ใช้ลมพัดผ่านกระเปาะชุ่มน้ำด้วยความเร็วสูง เช่น 1000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที อุณหภูมิจะลดลงเรื่อยๆจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ที่อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากกระเปาะเท่ากัน อุณหภูมินี้คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก ที่เรียกว่า ความแตกต่างทางไซโครเมตริก (psychrometric difference) แสดงถึง อัตราความแห้งของอากาศที่วัดนั่นเอง ถ้าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองสูงมากแสดงว่าอากาศนั้นแห้งมาก ถ้าความแตกต่างน้อยแสดงว่าอากาศขณะนั้นมีความชื้นสูงมาก ถ้าความแตกต่างเท่ากับศูนย์แสดงว่า อากาศขณะนั้นอิ่มตัวด้วยความชื้นแล้ว [9]

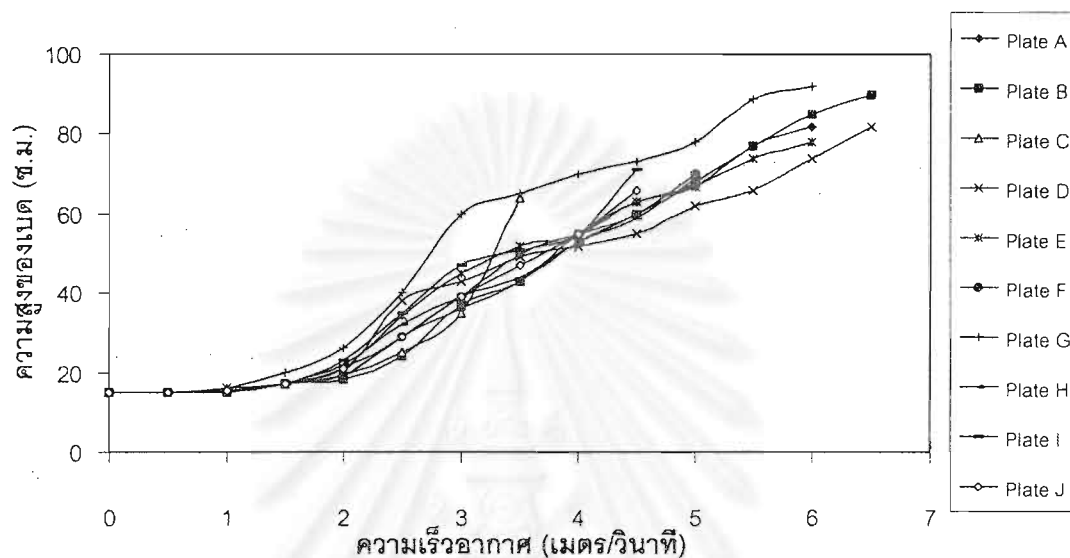


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

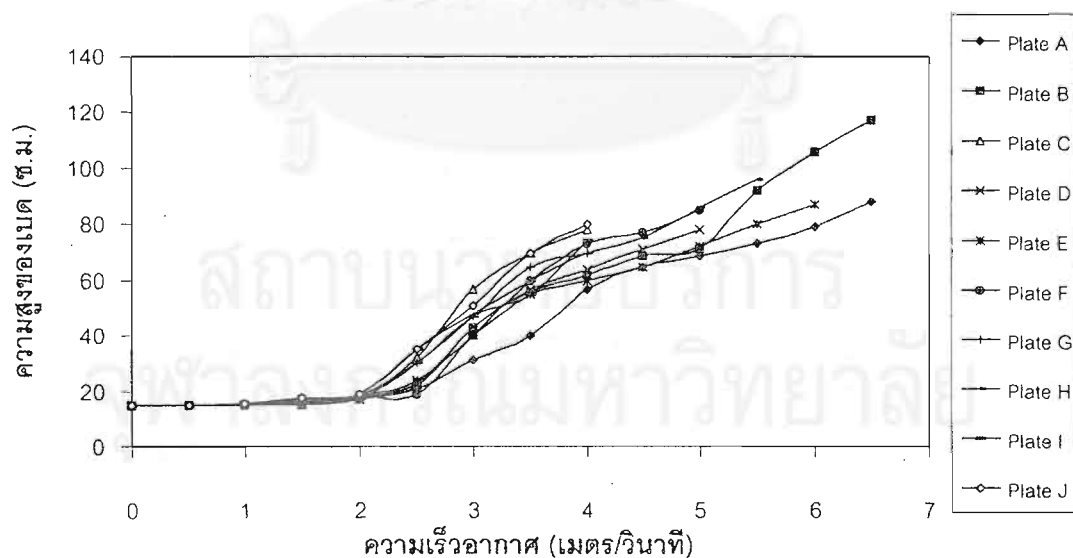


## ภาคผนวก ข

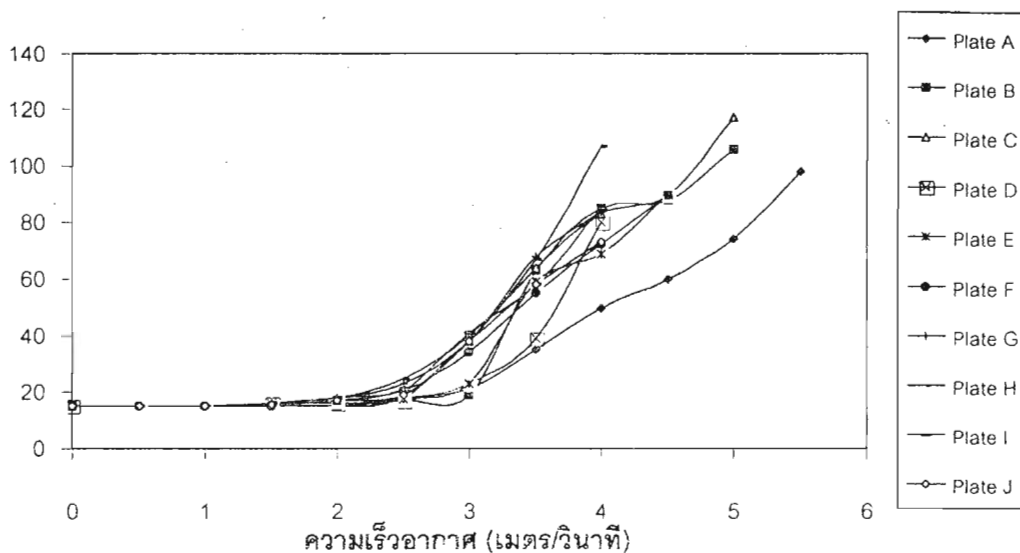
ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดและสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศของ อนุภาคแบบที่ 1-5



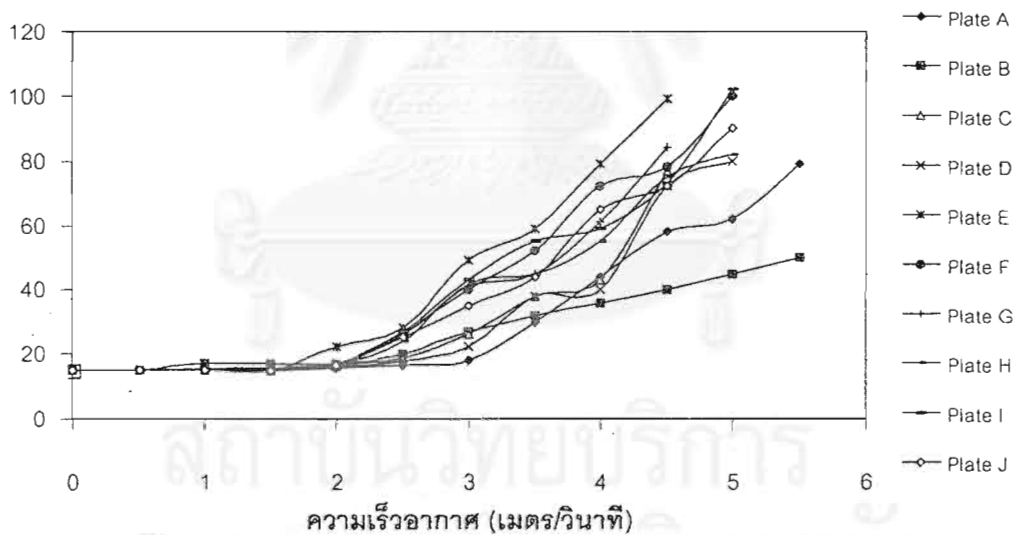
รูปที่ ข-1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 1 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



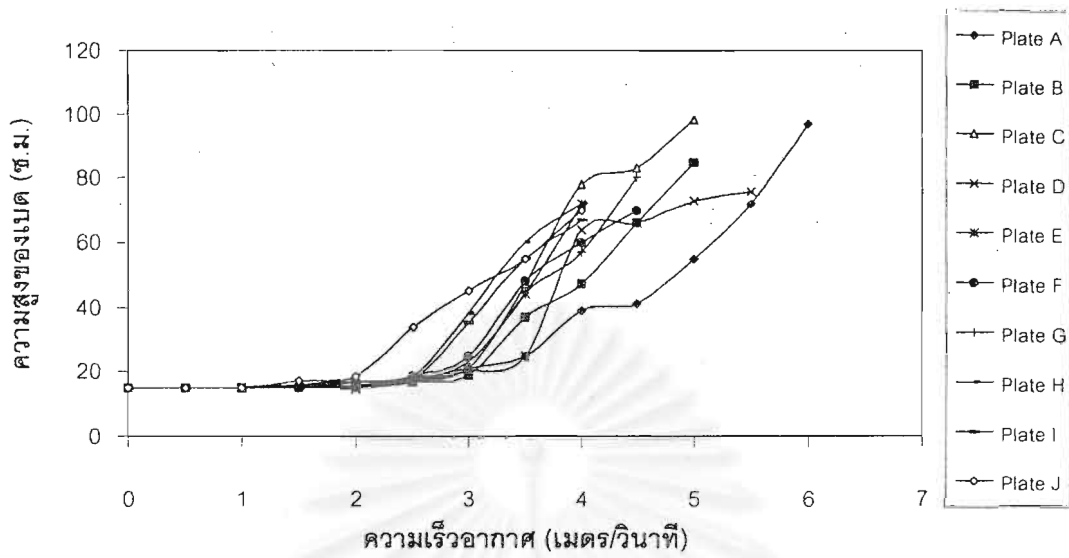
รูปที่ ข-2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 2 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



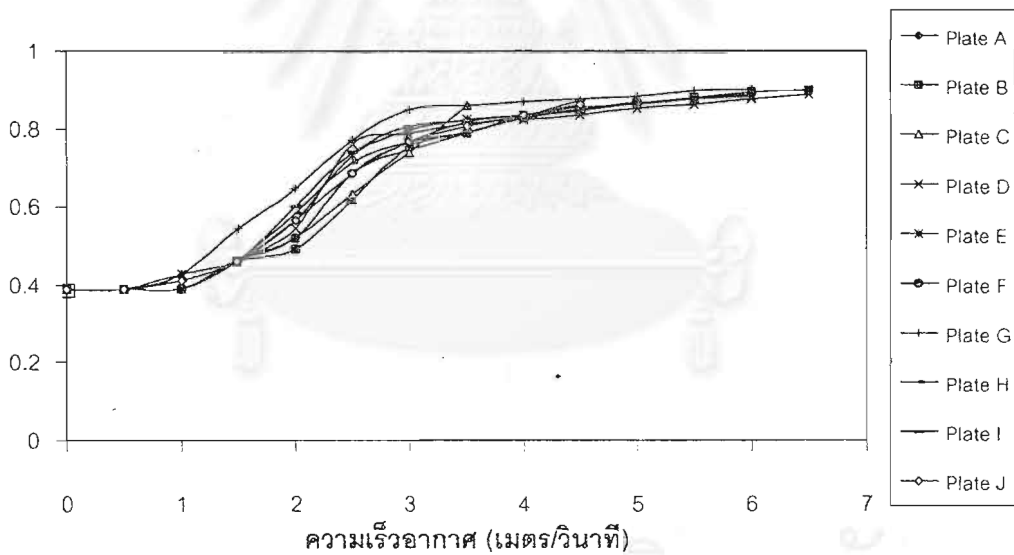
รูปที่ ๑-3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบตกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 4 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



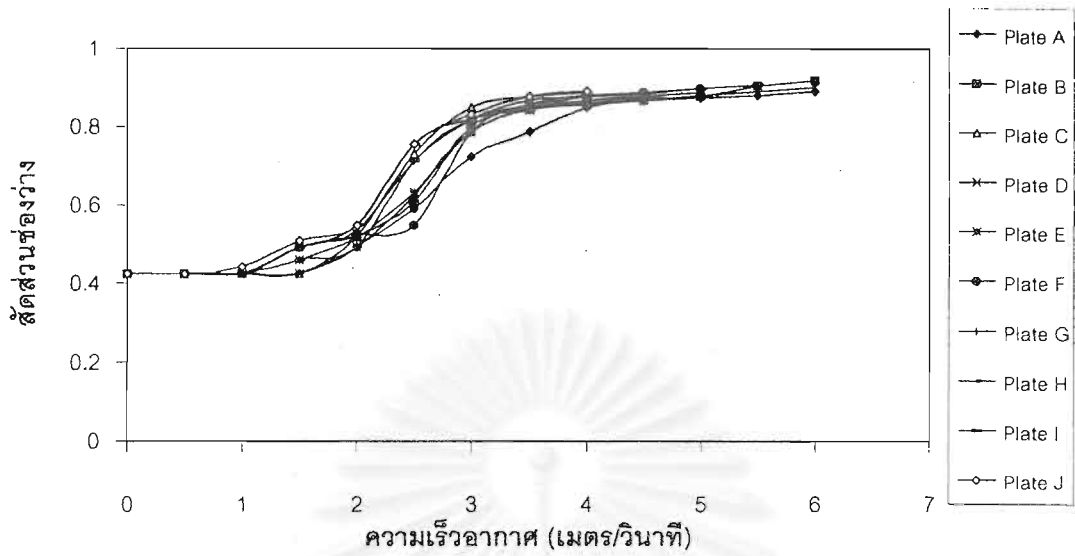
รูปที่ ๑-4. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบตกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 5 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



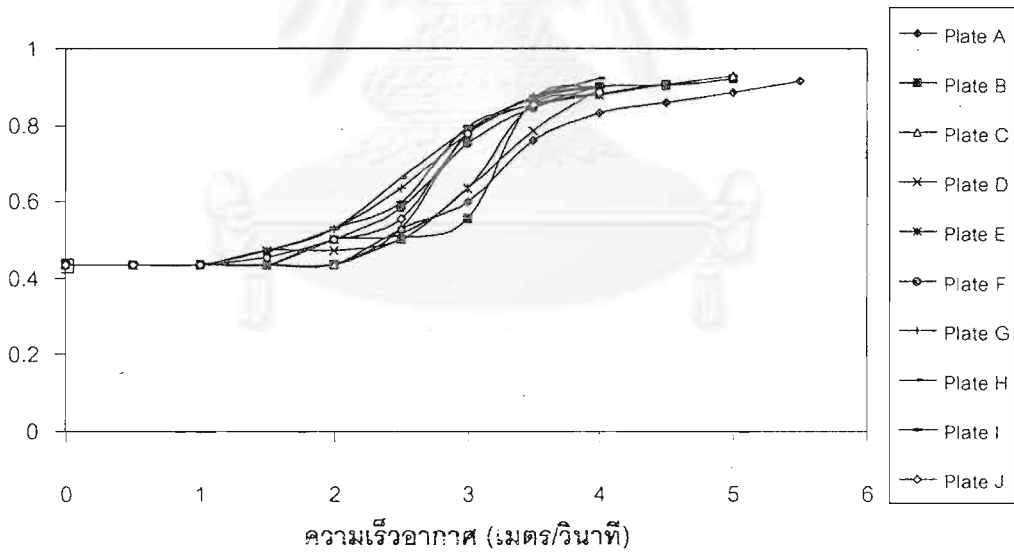
รูปที่ ข-5. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับความเร็วกาศของอนุภาคชนิด 6 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A-J



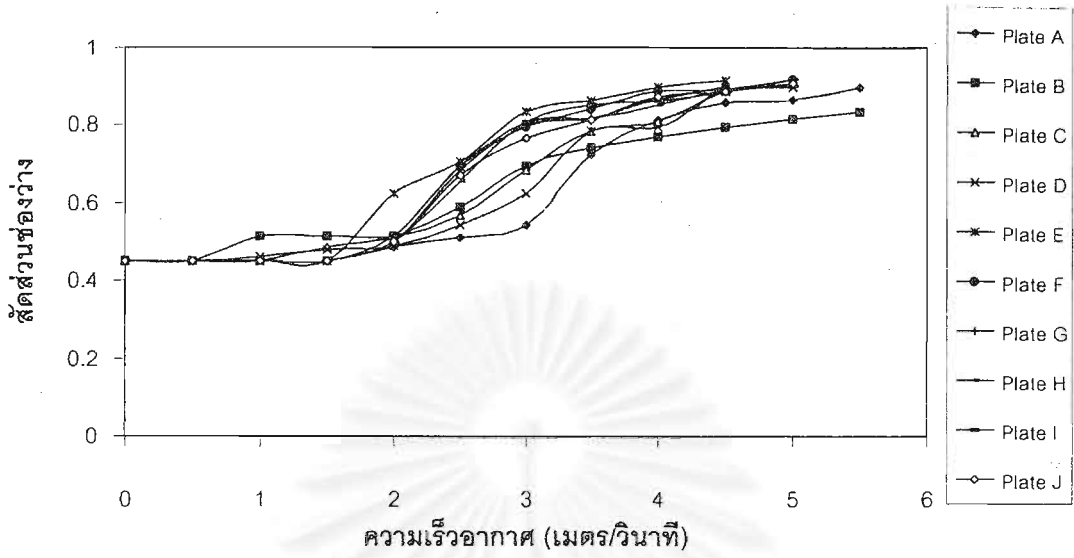
รูปที่ ข-6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วกาศของอนุภาคชนิด 1 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A-J



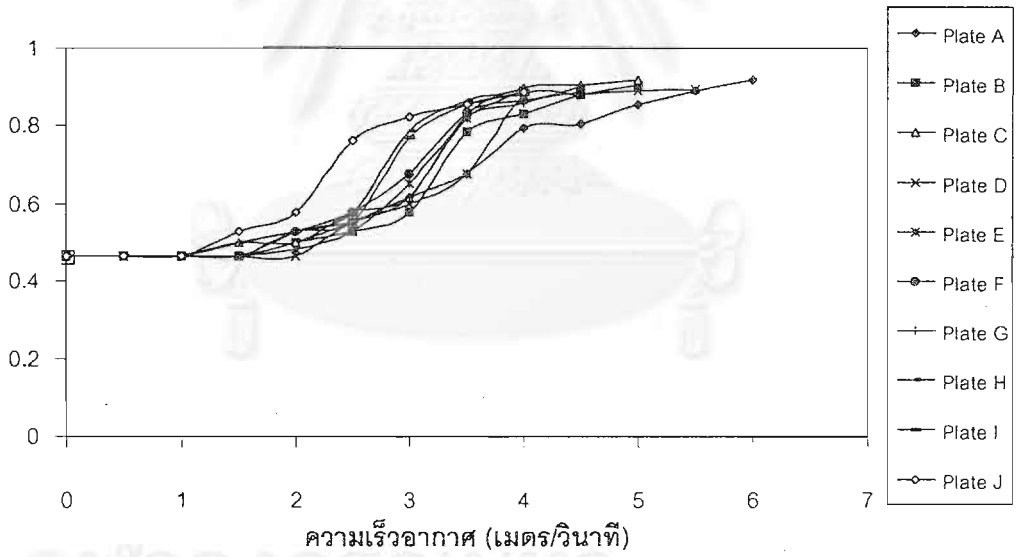
รูปที่ ข-7. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 2 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



รูปที่ ข-8. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 4 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



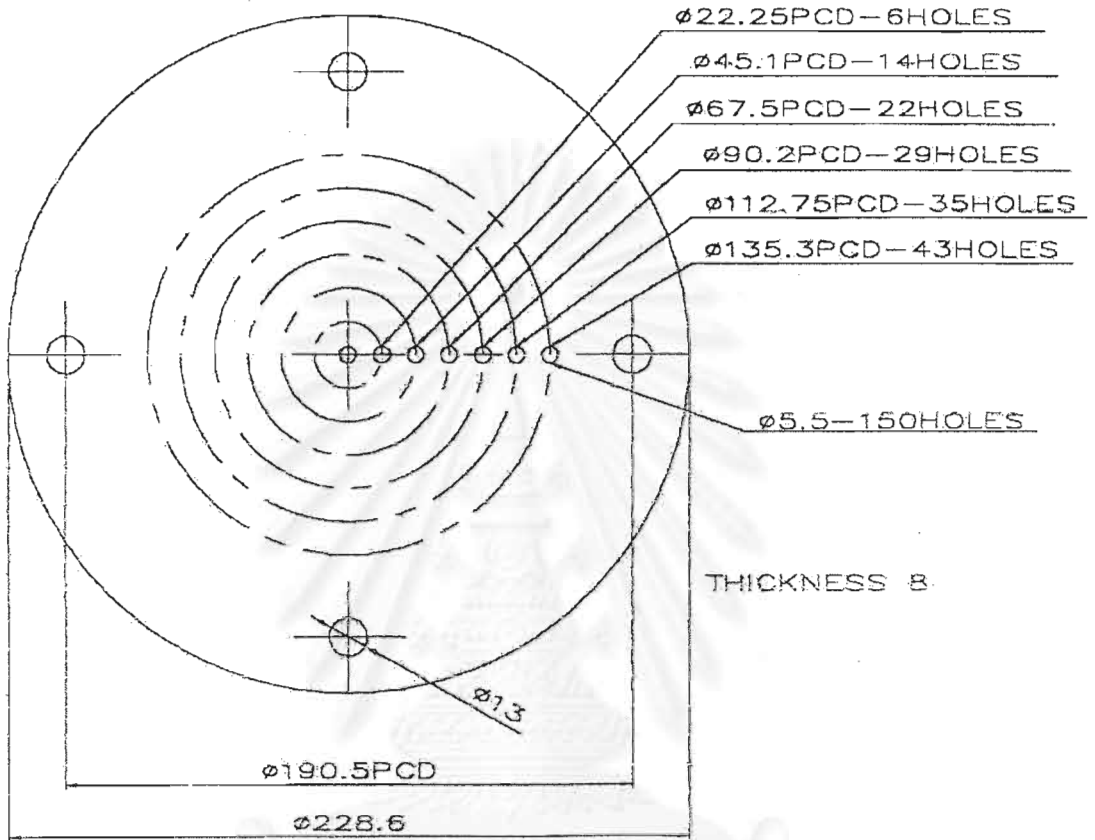
รูปที่ ข-9. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 5 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J



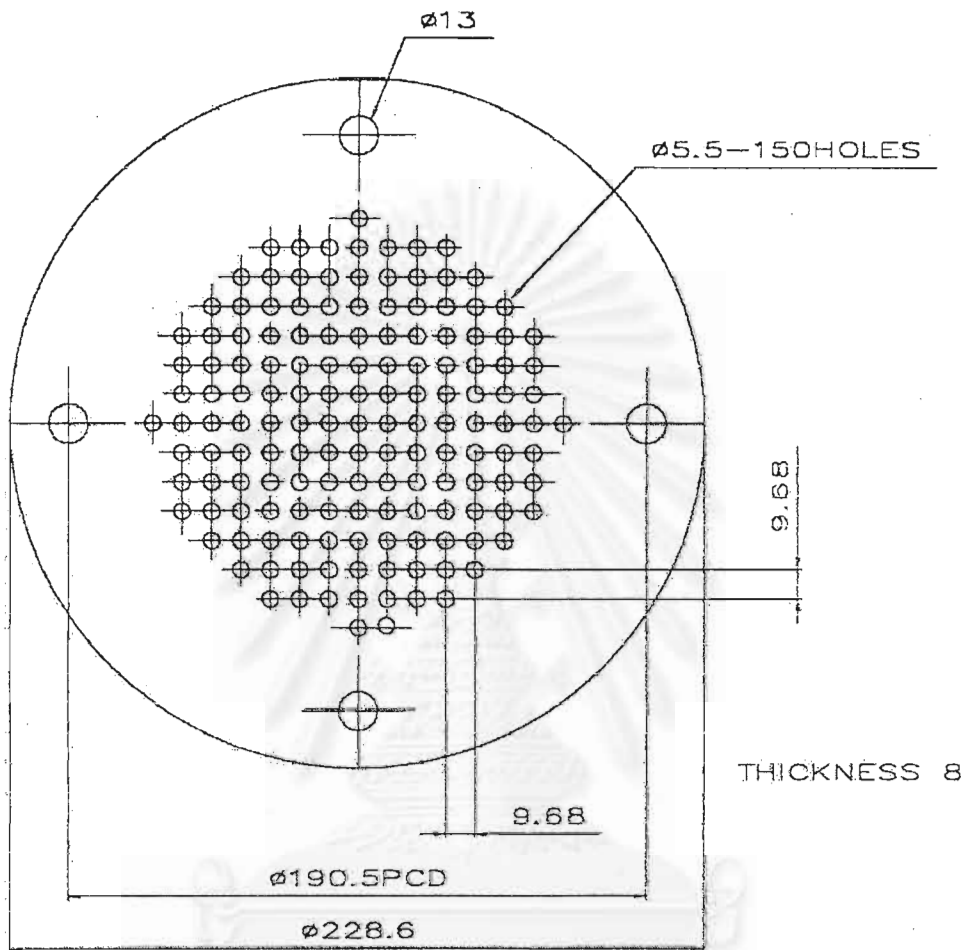
รูปที่ ข-10. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับความเร็วอากาศของอนุภาคชนิด 6 เม็ด โดยใช้แผ่นกระจายอากาศแบบ A - J

ภาคผนวก ค

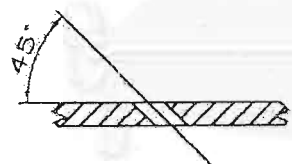
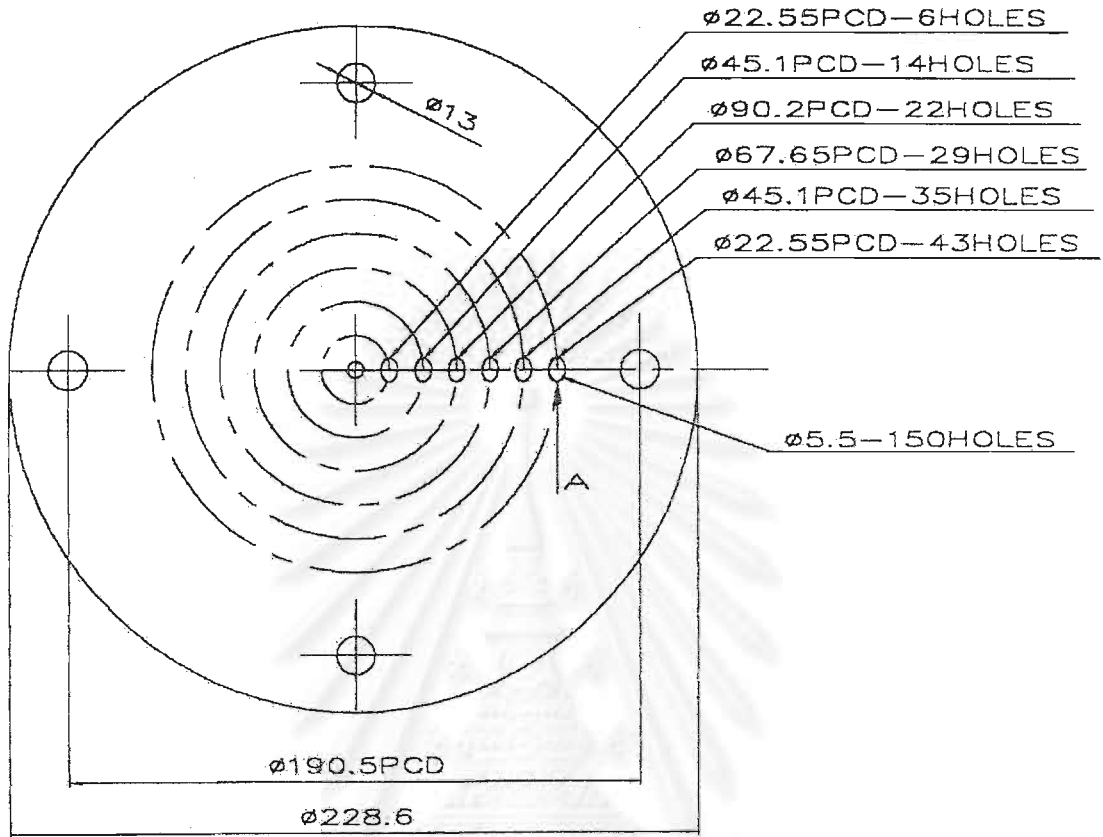
ค.1 แผ่นกระจายอากาศ



รูปที่ ค-1. แผ่นกระจายอากาศแบบ A



รูปที่ ค-2. แผ่นกระจายอากาศแบบ B



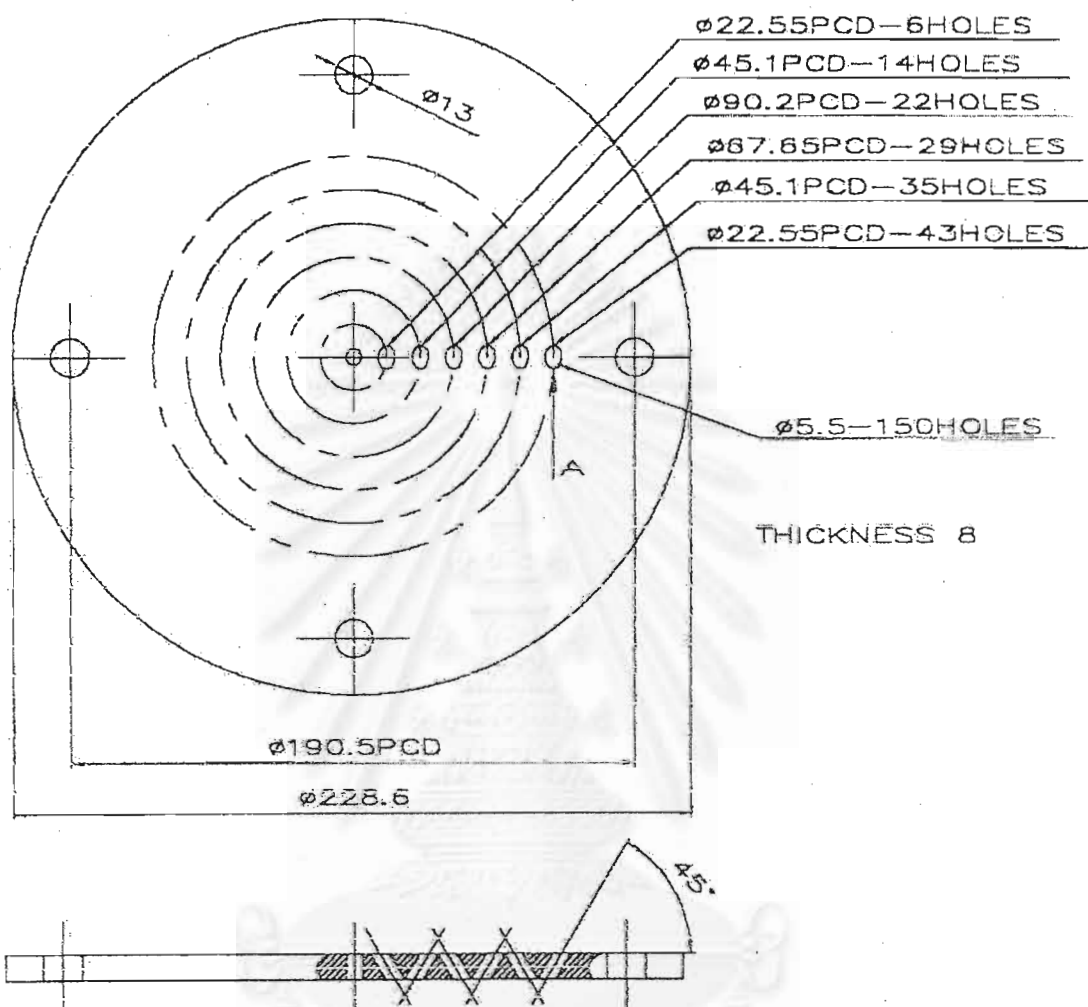
THICKNESS 8

TOPVIEW  
DETAIL 'A'  
SCALE 1:1

รูปที่ ค-3. แผ่นกระจายอากาศแบบ C

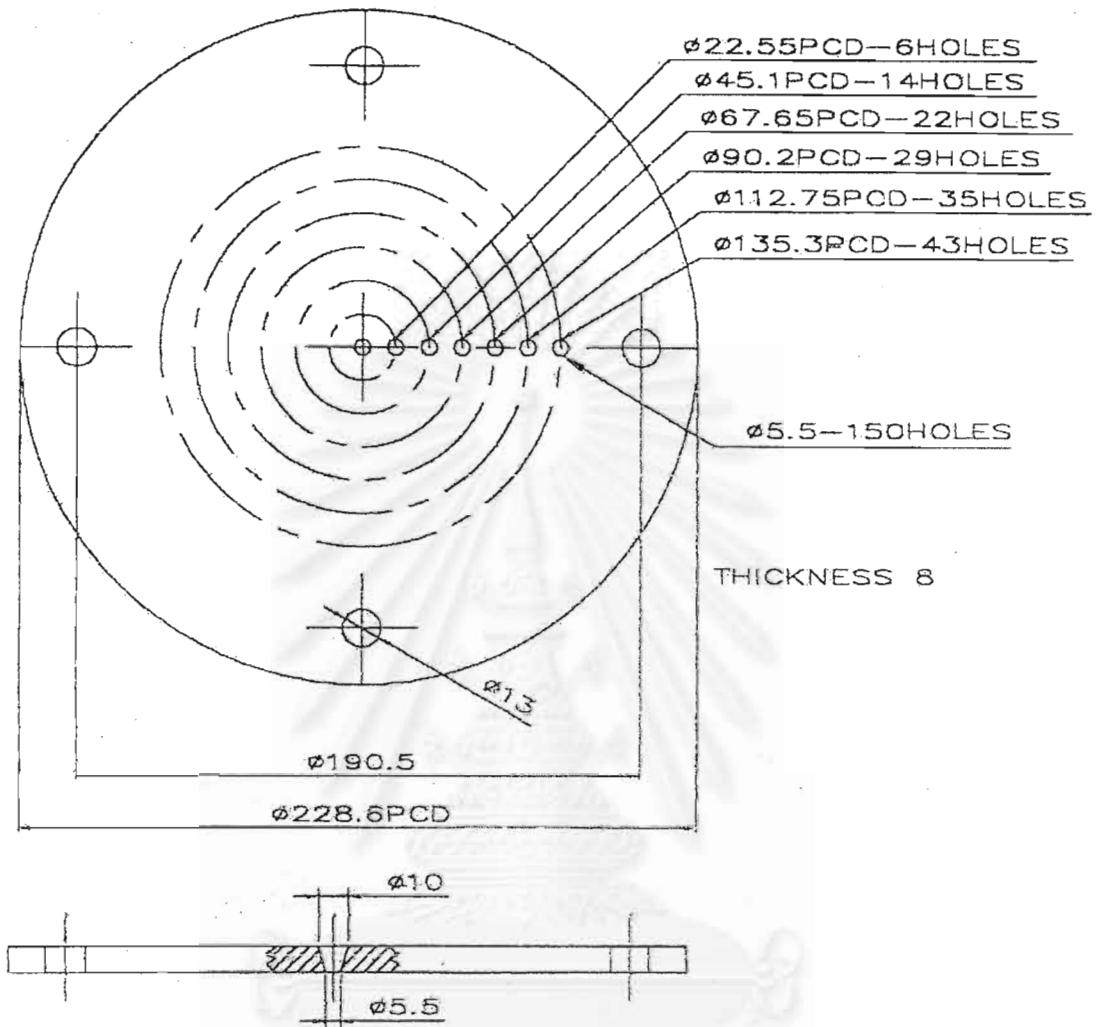
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





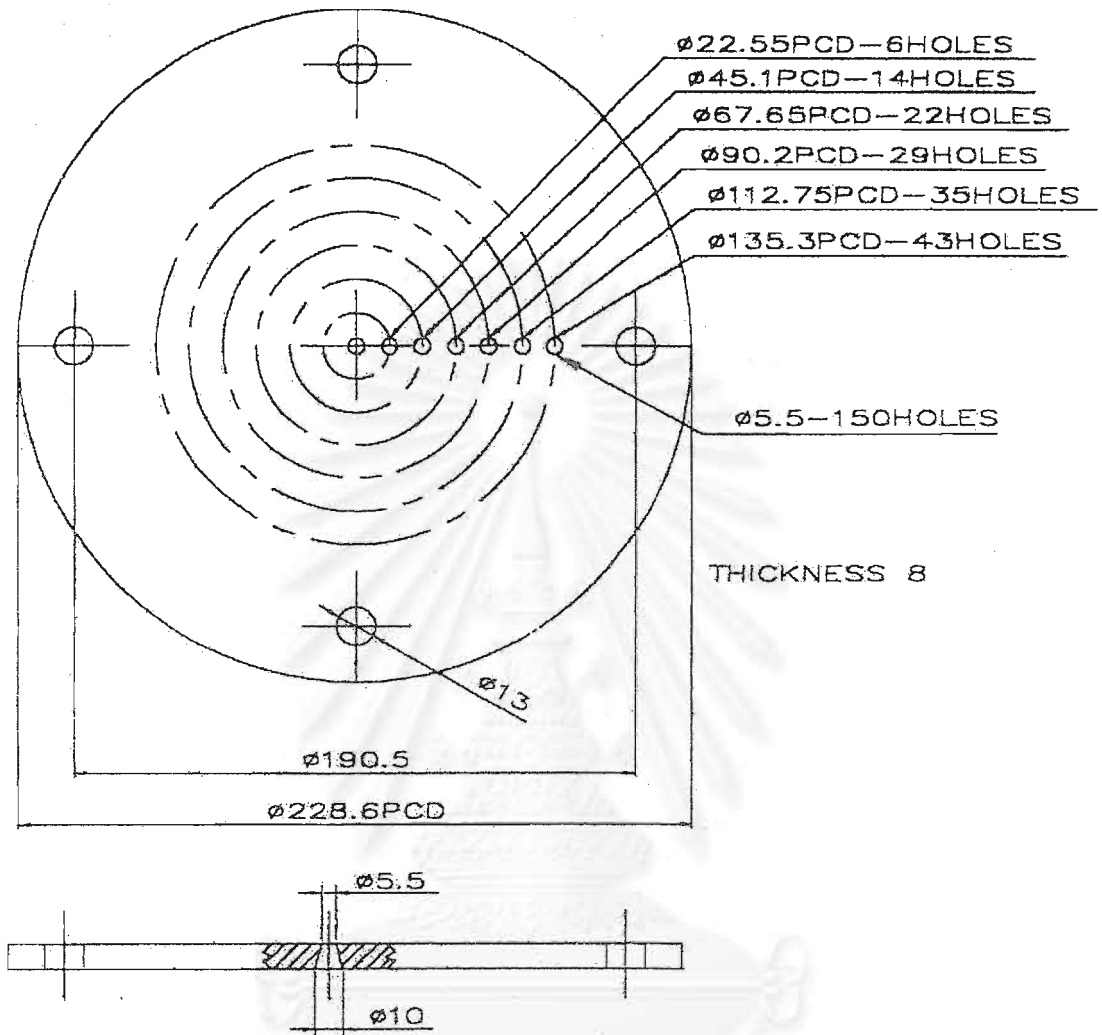
รูปที่ ค-4. แผ่นกระจายอากาศแบบ D

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



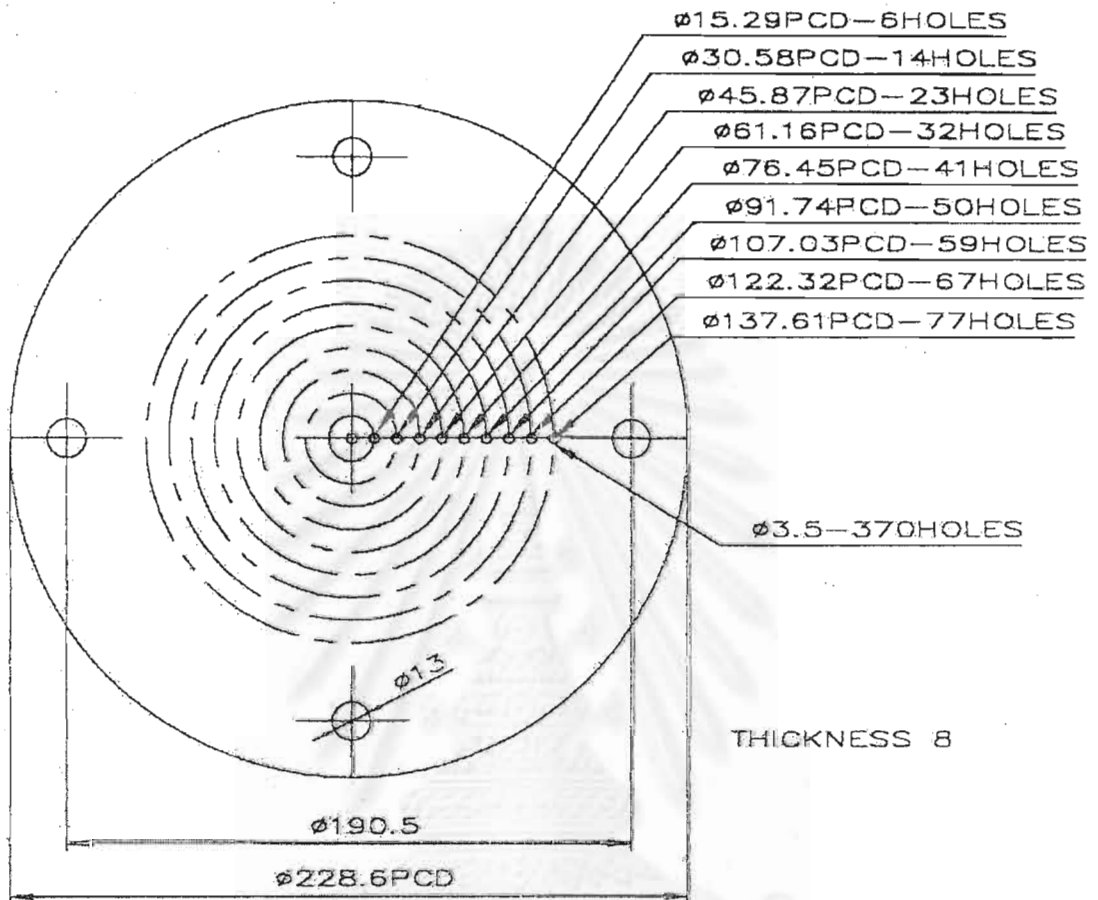
รูปที่ ค-5. แผ่นกระจายอากาศแบบ E

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



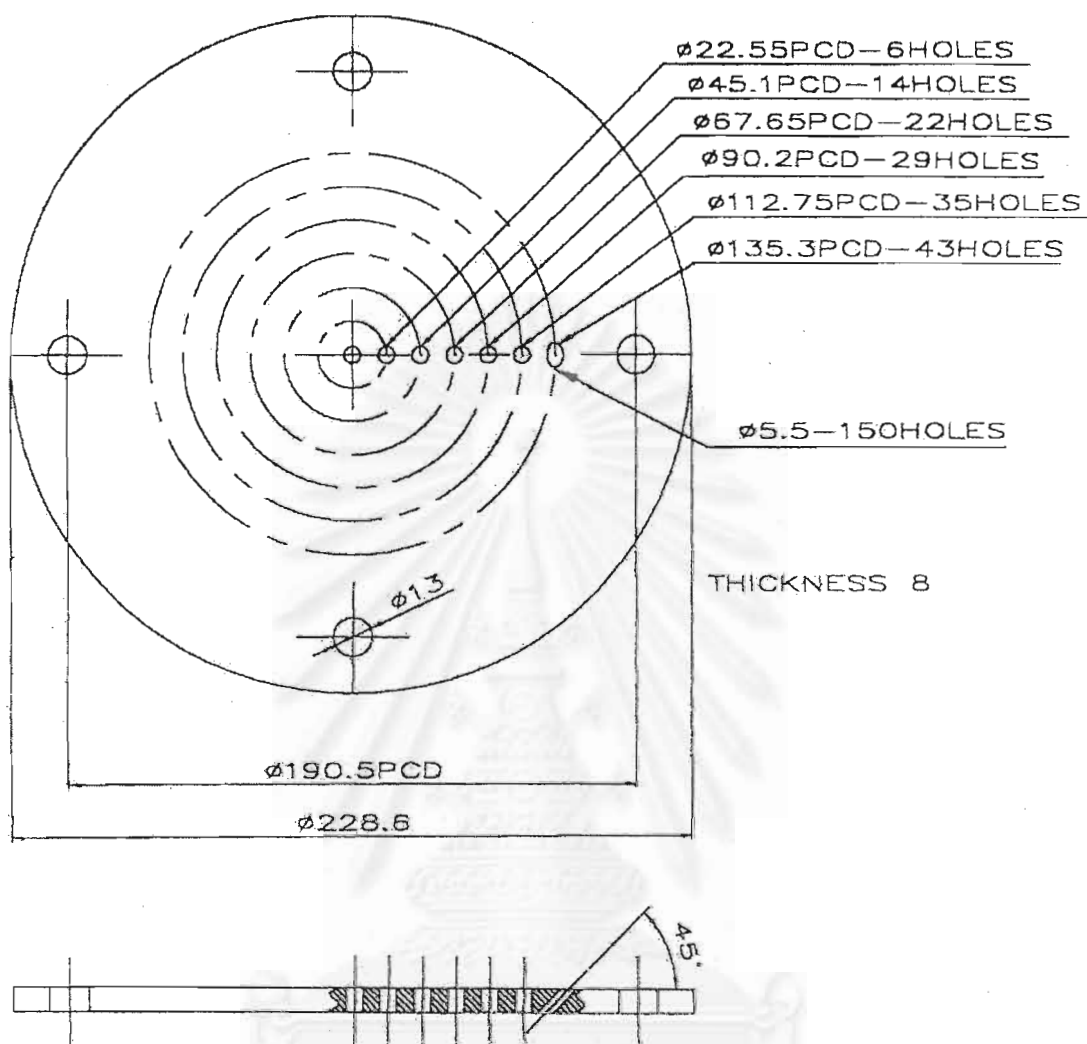
รูปที่ ค-6. แผ่นกระจายอากาศแบบ F

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



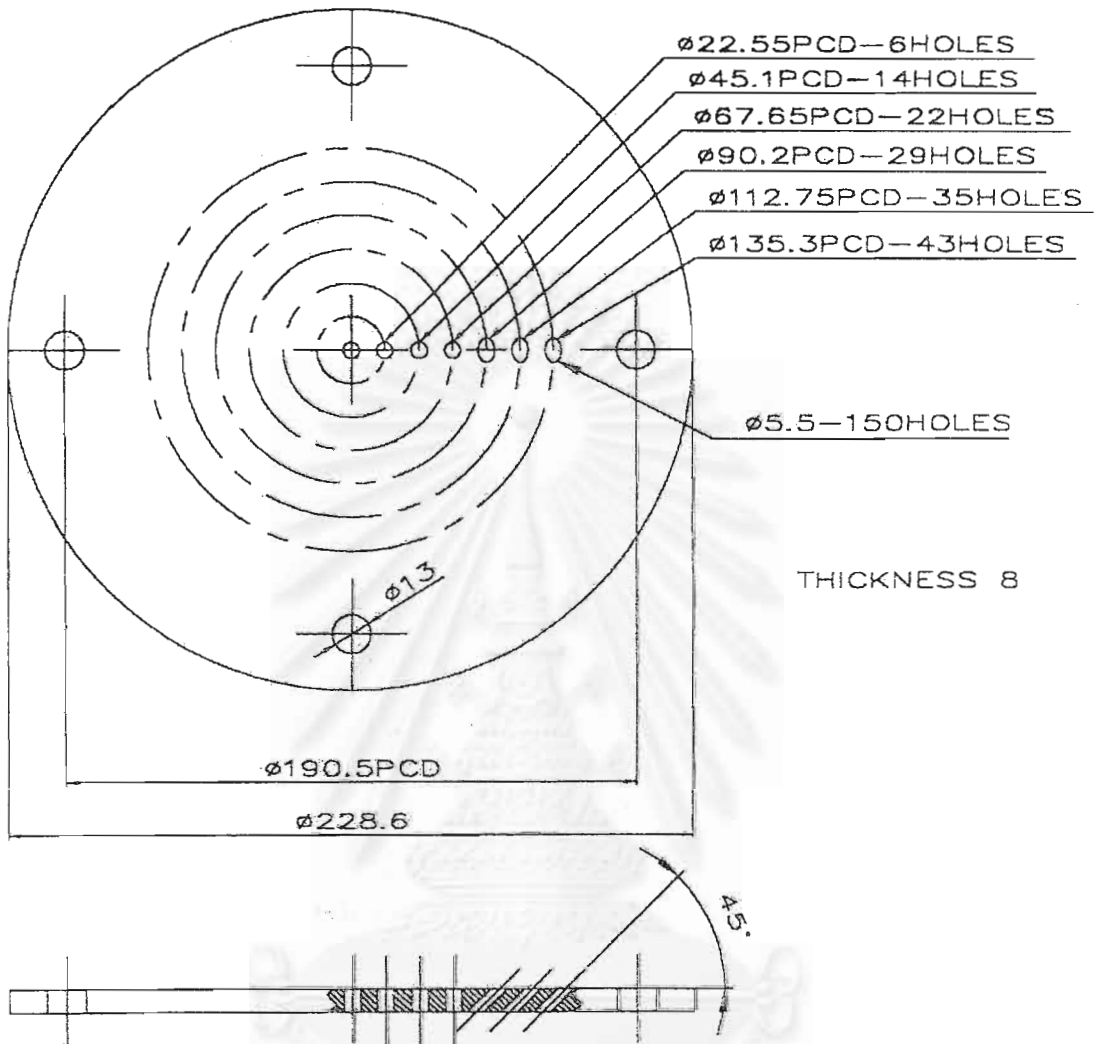
รูปที่ ค-7. แผ่นกระจายอากาศแบบ G

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



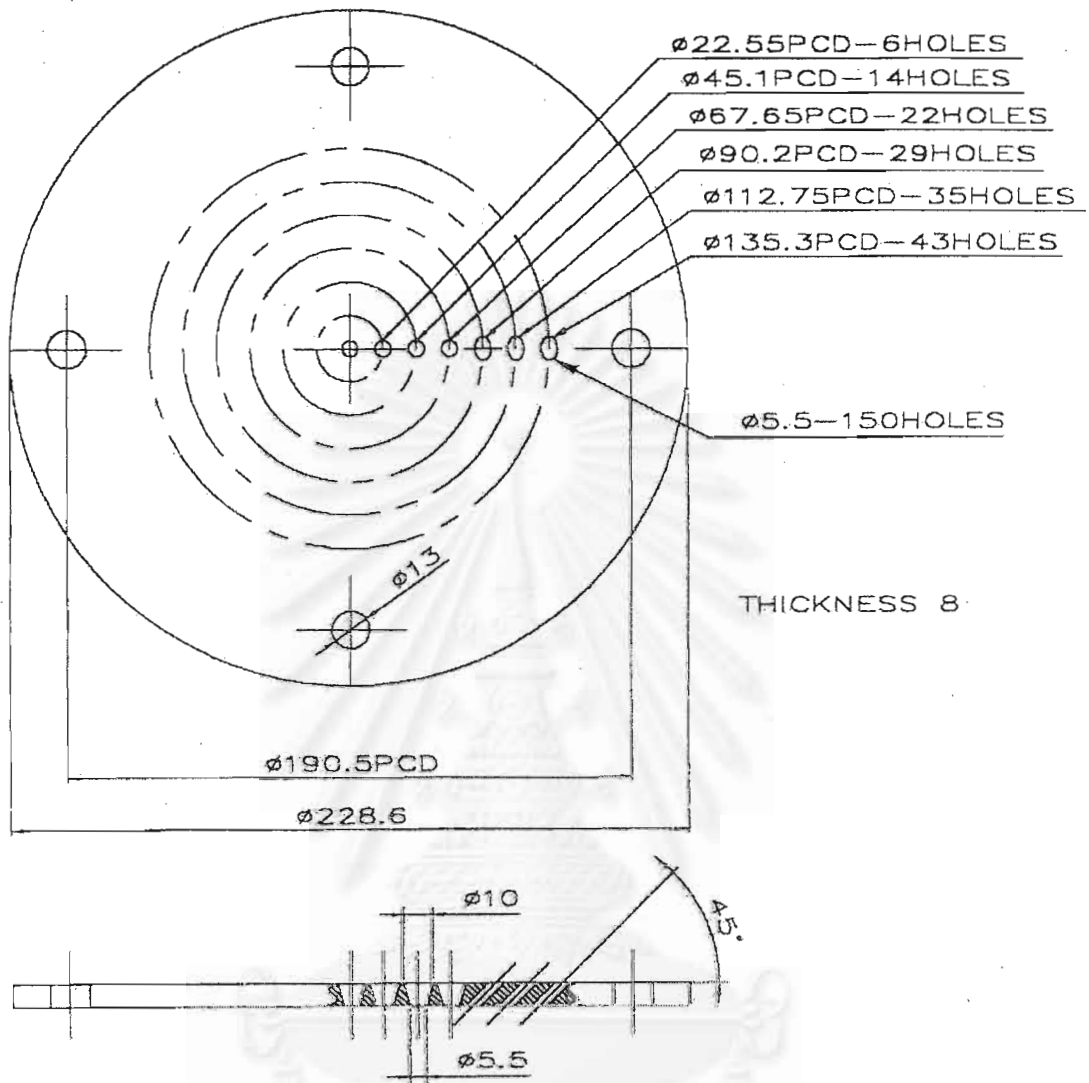
รูปที่ ค-8. แผ่นกระจายอากาศแบบ H

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-9. แผ่นกระจายอากาศแบบ I

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-10. แผ่นกระจายอากาศแบบ J

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรชัย ภัทรพงศ์เกษม เกิดเมื่อวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิศวกรรม จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2541



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย