

สหสัมพันธ์สำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซชันของอนุภาคที่มีการกระจายขนาด
ต่างกัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CORRELATION FOR PREDICTING MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY OF PARTICLES
WITH DIFFERENT SIZE DISTRIBUTIONS



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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | สหสัมพันธ์สำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด |
| | เซชันของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน |
| โดย | นายกฤติน ก่อเกิด |
| สาขาวิชา | เคมีเทคนิค |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถลิสินสุวรรณ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถลิสินสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

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

กฤติน ก่อเกิด : สหสัมพันธ์สำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน. (CORRELATION FOR PREDICTING MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY OF PARTICLES WITH DIFFERENT SIZE DISTRIBUTIONS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์

การกระจายขนาดของอนุภาคเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิเซชันเบด งานวิจัยนี้ ศึกษาผลของการกระจายขนาดของอนุภาค และ ผลของสภาวะดำเนินการ ที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชัน โดยศึกษาทรายที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยแตกต่างกัน 3 ขนาด รูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน 5 รูปแบบ ปริมาณของอนุภาคของแข็งในช่วง 1 ถึง 3 กิโลกรัม และ อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งในช่วง 30 ถึง 120 องศาเซลเซียส ผลที่ได้พบว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดกว้าง มีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแคบ เนื่องจากการใส่อนุภาคขนาดเล็กลงไปในระบบมากขึ้น จะช่วยให้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิเซชันดีขึ้น โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันเช่นกัน ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคของแข็งสูงขึ้น ขณะที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ย และปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การสร้างสหสัมพันธ์โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง และการใช้โครงข่ายประสาทเทียม สามารถใช้ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันได้ทั้งสองวิธี เนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน

สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6171906023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Minimum fluidization velocity, Particle size distribution, Bed inventory, Bed temperature, Correlation

Krittin Korkerd : CORRELATION FOR PREDICTING MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY OF PARTICLES WITH DIFFERENT SIZE DISTRIBUTIONS. Advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D. Co-advisor: Prof. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D.

The particle size distribution (PSD) is an important parameter that can influence the hydrodynamics in a fluidized bed system. This research objective is to investigate the effect of PSDs of particle and operating parameters on minimum fluidization velocity (U_{mf}). Here, the silica sand with three average diameters and five PSDs were used. Bed inventory ranged from 1 to 3 kg and bed temperature ranged from 30 to 120 °C. The results showed that the U_{mf} values with wide PSDs were lower than the U_{mf} values for narrow cut particle. The reason is because the addition of smaller particles improves the fluidization characteristics. The standard deviation and skewness of PSD also influenced on the U_{mf} . The U_{mf} was observed to decrease with increasing bed temperature. In addition, the effect of average particle diameter and bed inventory could be seen. The U_{mf} increased with the increasing of average particle diameter and bed inventory. Furthermore, the experimental data was fitted with multiple nonlinear regression. The correlation for predicting the U_{mf} for PSDs and operating parameters were developed. This research study used artificial neural networks approach (ANN) for predicting the U_{mf} . Both methods were applicable for predicting the U_{mf} due to the low absolute average error.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง สหสัมพันธ์สำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซนของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณทุกท่าน ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทาง และกระบวนการทำงานตลอดการทำงานวิจัย รวมไปถึงสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการซื้อ อุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อจัดทำชุดวิจัยที่เพียบพร้อมเพื่อให้ผู้จัดทำสามารถทำงานวิจัยได้อย่างสะดวก และ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อย เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा และ ดร.บุญรอด สัจกุลนุกิจ กรรมการภายนอก มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญ พระชนมายุครบ 72 พรรษา และ ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุน สถานที่ในการทำงานวิจัย รวมทั้งบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ ห้องปฏิบัติการงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้ คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้ กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ แก่ผู้จัดทำเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

กฤติน ก่อเกิด

สารบัญ

| | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| | ค |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย..... | 4 |
| 1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย..... | 4 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 4 |
| 1.8 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย | 5 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 7 |
| 2.1 การจำแนกอนุภาคของแข็ง | 7 |
| 2.1.1 การนิยามขนาดของอนุภาคของแข็ง | 7 |
| 2.1.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแข็งด้วยตะแกรงร่อน (Sieve analysis)..... | 9 |

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.3 การจำแนกอนุภาคหลายขนาด | 9 |
| 2.1.4 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง | 10 |
| 2.2 การกระจายขนาดของอนุภาค | 12 |
| 2.3 ฟลูอิดไอเซชัน..... | 16 |
| 2.3.1 นิยาม..... | 16 |
| 2.3.2 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน..... | 16 |
| 2.3.3 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดไอเซชัน | 16 |
| 2.3.4 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดไอเซชัน | 19 |
| 2.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราการไหลของเบด..... | 20 |
| 2.3.6 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน | 22 |
| 2.4 การสร้างแบบจำลองการถดถอย | 25 |
| 2.5 โครงข่ายประสาทเทียม | 26 |
| 2.5.1 แนวคิดและหลักของโครงข่ายประสาทเทียม..... | 26 |
| 2.5.2 ฟังก์ชันการแปลง..... | 27 |
| 2.5.3 กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม..... | 29 |
| 2.5.4 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ..... | 30 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 30 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 34 |
| 3.1 ตัวแปรที่จะศึกษา..... | 34 |
| 3.1.1 การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง..... | 34 |
| 3.1.2 ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย..... | 36 |
| 3.1.3 ปริมาณของอนุภาคของแข็ง..... | 36 |
| 3.1.4 อุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง..... | 36 |
| 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย..... | 36 |

| | | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1 | วิภูภาคของแข็ง..... | 36 |
| 3.2.2 | วิภูภาคของไหล..... | 36 |
| 3.3 | อุปกรณ์และเครื่องปฏิกรณ์..... | 36 |
| 3.3.1 | อุปกรณ์ | 36 |
| 3.3.2 | เครื่องปฏิกรณ์ | 37 |
| 3.3.3 | ระบบวัดความดัน | 40 |
| 3.3.4 | ระบบวัดอุณหภูมิ..... | 40 |
| 3.4 | ขั้นตอนการวิจัย | 42 |
| 3.4.1 | การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเดเซชัน | 42 |
| 3.4.2 | การสร้างสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย | 49 |
| 3.4.3 | การทำนายความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเดเซชันด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม | 51 |
| บทที่ 4 | ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง | 53 |
| 4.1 | ผลการทดลองหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน..... | 53 |
| 4.1.1 | ผลของการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน | 59 |
| 4.1.2 | ผลของขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน..... | 61 |
| 4.1.3 | ผลของปริมาณอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน..... | 62 |
| 4.1.4 | ผลของอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน | 64 |
| 4.2 | การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย | 66 |
| 4.3 | การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันจากโครงข่ายประสาทเทียม | 72 |
| บทที่ 5 | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 80 |
| 5.1 | ผลของตัวแปรที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน..... | 80 |
| 5.1.1 | ผลของการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน | 80 |
| 5.1.2 | ผลของขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน..... | 81 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.3 ผลของปริมาณอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน..... | 82 |
| 5.1.4 ผลของอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน | 82 |
| 5.2 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย | 83 |
| 5.3 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันจากโครงข่ายประสาทเทียม | 84 |
| 5.4 ข้อเสนอแนะ | 85 |
| ภาคผนวก..... | 86 |
| ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ | 87 |
| ภาคผนวก ข ข้อมูลของขนาดอนุภาคและรูปแบบการกระจายขนาด | 93 |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง | 106 |
| บรรณานุกรม..... | 118 |
| ประวัติผู้เขียน | 122 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf})..... | 24 |
| ตารางที่ 3.1 การทดลองทั้งหมดในงานวิจัย..... | 43 |
| ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์การถดถอยของสหสัมพันธ์เพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน..... | 66 |
| ตารางที่ 4.2 ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการใช้สหสัมพันธ์จากงานวิจัยที่ผ่านมา ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน..... | 70 |
| ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของน้ำหนักและไบแอสที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน..... | 74 |

สารบัญรูปร่างภาพ

| | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งตามวิธีการของ Geldart [10]..... | 11 |
| รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของกราฟการกระจายขนาดแบบสะสม และ การกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์ | 12 |
| รูปที่ 2.3 รูปแบบการกระจายขนาดแคบ | 13 |
| รูปที่ 2.4 รูปแบบการกระจายขนาดแบบไบนารี | 14 |
| รูปที่ 2.5 รูปแบบการกระจายแบบยูนิฟอร์ม..... | 14 |
| รูปที่ 2.6 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ | 15 |
| รูปที่ 2.7 รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้..... | 15 |
| รูปที่ 2.8 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันจากทฤษฎี [8] | 19 |
| รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ [19]..... | 21 |
| รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการสำหรับอนุภาค ของแข็งที่มีการกระจายขนาดหรือมีอนุภาคของแข็งหลายชนิดผสมกัน [5]..... | 22 |
| รูปที่ 2.11 ลักษณะของโหนดภายในโครงสร้างของเซลล์ประสาทเทียม | 27 |
| รูปที่ 2.12 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเส้นตรง..... | 28 |
| รูปที่ 2.13 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบลอกซิมมอยด์..... | 28 |
| รูปที่ 2.14 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแทนซิมมอยด์..... | 29 |
| รูปที่ 2.15 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ [30] | 30 |
| รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งรูปแบบต่าง ๆ..... | 35 |
| รูปที่ 3.2 แผนภาพอุปกรณ์และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด..... | 38 |
| รูปที่ 3.3 คอลัมน์ฟลูอิดซ์เบด..... | 39 |
| รูปที่ 3.4 ตำแหน่งวัดความดัน และอุณหภูมิ..... | 41 |
| รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ให้ความร้อน | 41 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ | 54 |
| รูปที่ 4.2 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.19 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 1 กิโลกรัม | 54 |
| รูปที่ 4.3 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.19 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 2 กิโลกรัม | 55 |
| รูปที่ 4.4 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.19 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 3 กิโลกรัม | 55 |
| รูปที่ 4.5 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.46 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 1 กิโลกรัม | 56 |
| รูปที่ 4.6 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.46 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 2 กิโลกรัม | 56 |
| รูปที่ 4.7 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.46 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 3 กิโลกรัม | 57 |
| รูปที่ 4.8 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.92 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 1 กิโลกรัม | 57 |
| รูปที่ 4.9 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.92 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 2 กิโลกรัม | 58 |
| รูปที่ 4.10 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.92 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 3 กิโลกรัม | 58 |
| รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 กิโลกรัม | 63 |
| รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 2 กิโลกรัม | 63 |
| รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 3 กิโลกรัม | 64 |
| รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกจากผลการทดลอง และจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย..... | 68 |

รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากผลการทดลอง กับ
ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย และสหสัมพันธ์
จากงานวิจัยอื่น ๆ..... 69

รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากผลการทดลอง และ
จากสหสัมพันธ์ โดยใช้ข้อมูลการทดลองของงานวิจัยต่าง ๆ และสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการ
ถดถอย 71

รูปที่ 4.17 ผลของจำนวนชั้นแอมแปงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยสำหรับการทำนาย
ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม 73

รูปที่ 4.18 กราฟวิเคราะห์การถดถอยของกระบวนการ (a) Training (b) Validation (c) Testing
และ (d) กระบวนการรวม 73

รูปที่ 4.19 ร้อยละสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรขาเข้าที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน
..... 76

รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้สหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย และโครงข่าย
ประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน 77

รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากผลการทดลอง และ
จากสหสัมพันธ์ โดยใช้ข้อมูลการทดลองของงานวิจัยต่าง ๆ สหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย
และ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม 79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเซนต์ เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่จะเปลี่ยนสภาพชีวมวลของแข็งให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง และ ใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะใช้ตัวดูดซับของแข็งเพื่อจับยึดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการ เป็นต้น ด้วยลักษณะเด่นของกระบวนการฟลูอิดไคเซนต์ที่วัฏภาคของแข็งจะมีการสัมผัสกับวัฏภาคของไหลอย่างทั่วถึง และ มีการกวนผสมภายในสูง เนื่องจากความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการ ทำให้วัฏภาคของแข็ง และ วัฏภาคแก๊สมีการเคลื่อนที่ปั่นป่วนภายในกระบวนการอยู่ตลอด ในการที่จะออกแบบหรือพัฒนากระบวนการฟลูอิดไคเซนต์ให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นที่จะต้องเข้าใจพฤติกรรมของไหลหรืออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเซนต์ รวมไปถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อการดำเนินการในกระบวนการฟลูอิดไคเซนต์ หนึ่งในตัวแปรที่สำคัญต่อกระบวนการฟลูอิดไคเซนต์ คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการออกแบบ และ การดำเนินการของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเซนต์ [1] ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ คือ ความเร็วเริ่มต้นที่อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัว ซึ่งความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์จะขึ้นอยู่กับสมบัติของอนุภาคของแข็ง และ สมบัติของของไหลที่ใช้ในกระบวนการเป็นหลัก เช่น ขนาดของอนุภาคของแข็ง ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ความดันกระบวนการ และ อุณหภูมิกระบวนการ เป็นต้น [2] ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาผลของสภาวะดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์

ในอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการฟลูอิดไคเซนต์ เช่น การอบแห้ง และ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นต้น อนุภาคของแข็งที่ใช้ในกระบวนการจะเป็นอนุภาคที่มีการกระจายขนาดเนื่องจากการบด และ การคัดแยกขนาดอนุภาคให้เป็นอนุภาคขนาดเดี่ยว เป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองระยะเวลา และ ค่าใช้จ่าย [3] นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้เพียงอนุภาคขนาดเล็กหรืออนุภาคขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวในการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถอธิบายผลของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็งที่ใช้ในกระบวนการจริงได้ ดังนั้น ในการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการฟลูอิดไคเซนต์จึงใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งในการศึกษา ซึ่งการ

กระจายขนาดของอนุภาคของแข็งจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเซนต์ โดยพบว่า ในแต่ละช่วงการไหลของฟลูอิดไคเซนต์ อนุภาคที่มีการกระจายขนาดจะส่งผลต่อการฟลูอิดไคเซนต์ที่แตกต่างกัน [4] นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาผลของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน ที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ โดยรูปแบบของการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งที่มีการศึกษาเป็นจำนวนมาก คือ รูปแบบการกระจายขนาดแคบ การแจกแจงแบบไบนารี การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม และ การแจกแจงแบบปกติ พบว่า รูปแบบการกระจายขนาดแคบ และการแจกแจงแบบปกติ จะให้ผลของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ที่คล้ายคลึงกัน ขณะที่รูปแบบการแจกแจงแบบไบนารี และการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม จะให้ผลของอุทกพลศาสตร์ที่แตกต่างกับสองรูปแบบข้างต้น และยังพบช่วงการเกิดฟลูอิดไคเซนต์เป็นช่วงระหว่างความเร็วเริ่มต้นที่ทำให้ของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัวจนถึงของแข็งทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการฟลูอิดไคเซนต์อย่างสมบูรณ์ ในสองรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคนี้ [5] นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาผลของอุณหภูมิ และการกระจายขนาดของอนุภาค ที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ พบว่า ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของแข็งสูงขึ้น ในทุกรูปแบบของการกระจายขนาดของอนุภาค และ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ [6] อีกทั้ง ยังมีการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ พบว่า ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์มีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น โดยไม่ขึ้นกับชนิดของอนุภาคของแข็งที่ใช้ [7]

ตลอดครึ่งศตวรรษที่ผ่านมาได้มีศึกษาผลของสภาวะดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ รวมไปถึงการพัฒนาสหสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดลอง และการวิเคราะห์เชิงมิติ เพื่อให้ได้สหสัมพันธ์ที่ใช้สำหรับชนิดของอนุภาคของแข็งต่าง ๆ และ เงื่อนไขการดำเนินการต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิกระบวนการ และ ความดันกระบวนการ รวมไปถึงรูปแบบของการกระจายขนาดของอนุภาค อย่างไรก็ตาม สหสัมพันธ์ที่ได้พัฒนามาแล้วยังไม่มีสหสัมพันธ์ที่ใช้สำหรับการกระจายขนาดของอนุภาครูปแบบอื่น ๆ ที่แตกต่างจากข้างต้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคเซนต์ สำหรับการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้พัฒนา

ความรู้จากการศึกษาผลของสภาวะดำเนินการต่าง ๆ และ ผลจากการใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งในการศึกษา ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จะเป็นความรู้เบื้องต้นที่สำคัญสำหรับการพัฒนาสหสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้อย่างถูกต้อง และ แม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยในการออกแบบหรือพัฒนากระบวนการฟลูอิดเซชันให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน และ ผลของสภาวะดำเนินการต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน รวมไปถึงพัฒนาสหสัมพันธ์เพื่อสามารถทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ได้อย่างถูกต้อง และ แม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาผลของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน และ ผลของสภาวะดำเนินการ ที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน
- 2) พัฒนาสหสัมพันธ์สำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สร้างเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเพื่อใช้ในการศึกษาผลของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน และ ผลของสภาวะดำเนินการต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน
- 2) ศึกษาผลของการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน 5 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการกระจายขนาดแคบ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ และ รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก ที่ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากัน รวมไปถึงตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณของอนุภาคของแข็ง ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย และ อุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง
- 3) นำผลของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันที่ได้จากการทดลองมาสร้างสหสัมพันธ์ และ ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1) ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเกิน 120 องศาเซลเซียส
- 2) อนุภาคของแข็งที่ใช้อยู่ในกลุ่ม Geldart B และ D

1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย

การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution, PSD) หมายถึง การกระจายสะสมของปริมาณของอนุภาคที่สัมพันธ์กับขนาดอนุภาค

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบผลของการกระจายขนาดของอนุภาครูปแบบต่างกัน และ ผลของสภาวะดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน
- 2) ได้สหสัมพันธ์ใหม่ที่สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชันได้อย่างถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของการกระจายขนาดของอนุภาครูปแบบต่างกัน และ ผลของสภาวะดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน ขั้นตอนในการศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน การสร้างสหสัมพันธ์ และการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน
- 2) ออกแบบและวางแผนการทดลอง
- 3) จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง ได้แก่ สร้างคอลัมน์ฟลูอิดไลเซชันเบดที่ทำจากสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร และอุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ อุปกรณ์ให้ความร้อน อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของของไหลโดยมีอากาศทำหน้าที่เป็นของไหลป้อนเข้าระบบ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และ อุปกรณ์วัดความดัน อนุภาคของแข็งที่ใช้ คือ ททราย (Silica sand) และ เตรียมอนุภาคของแข็งให้เป็นรูปแบบการกระจายขนาดต่าง ๆ ด้วยขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.19 0.46 และ 0.92 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 1 2 และ 3 กิโลกรัม
- 4) ทำการทดลองหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน โดยบรรจุอนุภาคของแข็งลงในคอลัมน์ จากนั้นค่อย ๆ ปรับอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าไปในคอลัมน์ฟลูอิดไลเซชันเบด

ด้วยวาล์ว จนกระทั่งเกิดฟลูอิดเซชัน โดยค่าความดันจะถูกบันทึกตลอดการทดลอง เมื่อเกิดฟลูอิดเซชันจะสังเกตได้จากค่าความดันลดจะคงที่ จึงหยุดการทดลอง โดยค่อย ๆ ปิดวาล์วเพื่อลดอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าลง ในกรณีที่ต้องการทำให้อนุภาคของแข็งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับให้ความร้อนแก่อากาศที่ป้อนเข้าคอลัมน์ฟลูอิดเซนต์เพื่อไปเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง เมื่อได้อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งตามที่ต้องการแล้ว จึงเริ่มทำการทดลองโดยการค่อย ๆ ปรับอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าไปในคอลัมน์ฟลูอิดเซนต์ด้วยวาล์ว จนกระทั่งเกิดฟลูอิดเซชัน โดยค่าความดันจะถูกบันทึกตลอดการทดลอง เมื่อเกิดฟลูอิดเซชันจะสังเกตได้จากค่าความดันลดจะคงที่ จึงหยุดการทดลอง โดยค่อย ๆ ปิดวาล์วเพื่อลดอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าลง นำผลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศป้อนเข้า และความดันลดคร่อมเบด เพื่อหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

- 5) สร้างสหสัมพันธ์ และใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากผลการทดลองที่ได้ ใช้การวิเคราะห์เชิงมิติ สร้างสหสัมพันธ์ และใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และ MATLAB จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของสหสัมพันธ์ที่ได้กับผลการทดลอง และ ผลจากงานวิจัยอื่น ๆ
- 6) ประมวลผล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง เขียนบทความวิจัย และ วิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

- บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย และ ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย
- บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการจำแนกอนุภาคของแข็ง การกระจายขนาดของอนุภาคฟลูอิดเซชัน การสร้างแบบจำลองการถดถอย โครงข่ายประสาทเทียม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 ตัวแปรที่จะศึกษา สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย อุปกรณ์และเครื่องปฏิกิริยา และ ขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 4 ผลการทดลองหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากสหสัมพันธ์ และ การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากโครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การจำแนกอนุภาคของแข็ง

การจำแนกอนุภาคของแข็งเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้งานอนุภาคของแข็งกับกระบวนการต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ ซึ่งอนุภาคของแข็งที่แยกได้จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่ต่างกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอการจำแนกขนาดอนุภาคของแข็งเป็นหลัก

2.1.1 การนิยามขนาดของอนุภาคของแข็ง

ขนาดอนุภาคของแข็ง คือ ความยาวของหนึ่ง (หรือมากกว่า) มิติเชิงเส้นที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นตัวแทนของอนุภาคของแข็งนั้น [8]

สำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างแน่นอน เช่น อนุภาคของแข็งทรงกลม และลูกบาศก์ จะใช้มิติเชิงเส้น คือ เส้นผ่านศูนย์กลางในกรณีของอนุภาคของแข็งทรงกลม และความยาวด้านในกรณีของอนุภาคของแข็งลูกบาศก์ เป็นตัวแทนเพียงแค่นั้นมิติ อนุภาคของแข็งสี่เหลี่ยมผืนผ้า อนุภาคของแข็งทรงกระบอก อนุภาคของแข็งวงรี และ อนุภาคของแข็งโคน จะต้องการมิติเชิงเส้นเป็นตัวแทนตั้งแต่สองมิติเป็นต้นไป เช่น อนุภาคของแข็งทรงกระบอก จะต้องการข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของทรงกระบอก เป็นต้น

สำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน จะใช้วิธีการหรือเทคนิคต่าง ๆ ในการแสดงขนาดของอนุภาค สามารถแบ่งวิธีการหรือเทคนิคต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงปริมาตร (Volume diameter, d_v)

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงปริมาตร คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ดังสมการที่ (2.1)

$$d_v = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

เมื่อ V_p คือ ปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (ลูกบาศก์เมตร)

- 2) เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่ผิว (Surface diameter, d_s)

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่ผิว คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับพื้นที่ผิวของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ดังสมการที่ (2.2)

$$d_s = \left(\frac{S_p}{\pi}\right)^{1/2} \quad (2.2)$$

เมื่อ S_p คือ พื้นที่ผิวของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (ตารางเมตร)

- 3) เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่ผิว-ปริมาตร (Surface-volume diameter, d_{sv})

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่ผิว-ปริมาตร คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเท่ากับสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ดังสมการที่ (2.3)

$$d_{sv} = \frac{6V_p}{S_p} = \frac{d_v^3}{d_s^2} \quad (2.3)$$

- 4) เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงเส้นรอบวง (Perimeter diameter, d_c)

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงเส้นรอบวง คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีเส้นรอบวงเท่ากับเส้นรอบวงแบบฉายของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน

- 5) เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่แบบฉาย (Projected area diameter, d_a)

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่แบบฉาย คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีพื้นที่แบบฉายเท่ากับพื้นที่แบบฉายของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน

- 6) เส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรงร่อน (Sieve diameter, d_p , Screen Aperture)

เส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรงร่อน คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มาจากความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเล็กที่สุดของตะแกรงร่อน (Sieve) ที่อนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอนสามารถลอดผ่านได้ ช่องบนตะแกรงร่อนเกิดจากการนำเส้นลวดมาสานกันเป็นช่องลอดผ่าน โดยทั่วไป ตัวเลขที่ใช้แสดงความกว้างของช่องตะแกรง จะเรียกว่า เมช (Mesh) ซึ่งหมายถึง จำนวนช่องของตะแกรงร่อนที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว ตะแกรงมาตรฐานที่นิยมใช้

ได้แก่ ตะแกรงแบบอังกฤษ (British standard) ตะแกรงแบบไทเลอร์ (Tyler standard) ตะแกรงแบบอเมริกัน (ASTM) และ ตะแกรงแบบเยอรมัน (German DIN standard) ด้วยการแบ่งของมาตรฐานต่าง ๆ เมชขนาดเดียวกัน อาจจะมีพื้นที่ช่องเปิดแตกต่างกัน ทั้งนี้เกิดจากเส้นลวดที่มีขนาดแตกต่างกัน ดังนั้น จึงต้องบอกพื้นที่ช่องเปิด (Standard opening) ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วย

2.1.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแข็งด้วยตะแกรงร่อน (Sieve analysis)

การวิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อน คือ การหาขนาดอนุภาคของแข็งด้วยการร่อนอนุภาคของแข็งจากตะแกรงร่อนขนาดมาตรฐานต่าง ๆ โดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้ อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ ของแข็งที่มีขนาดใหญ่เกินขนาด จะค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนของแข็งที่เล็กเกินขนาด จะลอดผ่านช่องตะแกรงไปได้ การใช้เครื่องมือช่วยให้ตะแกรงเคลื่อนไหวหรือสั่น (sieve shaker) จะช่วยให้การร่อนมีประสิทธิภาพดีขึ้น และใช้เวลาที่น้อยลง แต่จะต้องไม่ใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่งๆ เพราะจะทำให้ของแข็งไปอุดตันตามช่อง หรืออาจเกิดแรงไฟฟ้าสถิตทำให้ของแข็งรวมตัวเป็นก้อน ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดไป [9]

2.1.3 การจำแนกอนุภาคหลายขนาด

ในการดำเนินงานจริง ระบบหรือกระบวนการต่าง ๆ จะประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งจำนวนมาก และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแข็ง เพื่อที่จะออกแบบระบบหรือกระบวนการนั้น ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องมีวิธีการที่เหมาะสมในการจำแนกอนุภาคของแข็งหลายขนาด ซึ่งวิธีการที่ใช้กันอยู่ มีดังต่อไปนี้

1) ค่าเฉลี่ยเชิงเลขคณิต (Arithmetic mean, \bar{d}_{av})

ค่าเฉลี่ยประเภทนี้จะคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งจากผลรวมของขนาดอนุภาคของแข็งต่าง ๆ (d_{pi}) หารด้วยจำนวนอนุภาคของแข็งทั้งหมด ดังสมการที่ (2.4)

$$\bar{d}_{av} = \frac{\sum_i n_i d_{pi}}{\sum_i n_i} \quad (2.4)$$

เมื่อ n_i คือ จำนวนของอนุภาคของแข็งขนาดต่าง ๆ (จำนวนอนุภาค) โดย $\sum_i n_i = n$

2) ค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ผิว (Surface mean, \bar{d}_s)

ค่าเฉลี่ยประเภทนี้จะป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ถูกสมมติให้เป็นทรงกลม โดยพื้นที่ผิวคูณจำนวนอนุภาคของแข็งทั้งหมดนั้นจะมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวจริงของอนุภาคของแข็งทั้งหมด ดังสมการที่ (2.5)

$$\bar{d}_s = \sqrt{\frac{\sum_i n_i d_{pi}^2}{\sum_i n_i}} \quad (2.5)$$

3) ค่าเฉลี่ยเชิงปริมาตร (Volume mean, \bar{d}_v)

ค่าเฉลี่ยประเภทนี้จะป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ถูกสมมติให้เป็นทรงกลม โดยปริมาตรคูณจำนวนอนุภาคของแข็งทั้งหมดนั้นจะมีค่าเท่ากับปริมาตรจริงของอนุภาคของแข็งทั้งหมด ดังสมการที่ (2.6)

$$\bar{d}_v = \sqrt[3]{\frac{\sum_i n_i d_{pi}^3}{\sum_i n_i}} \quad (2.6)$$

4) ค่าเฉลี่ยเชิงปริมาตร-พื้นที่ผิว (Volume-surface mean, \bar{d}_{vs})

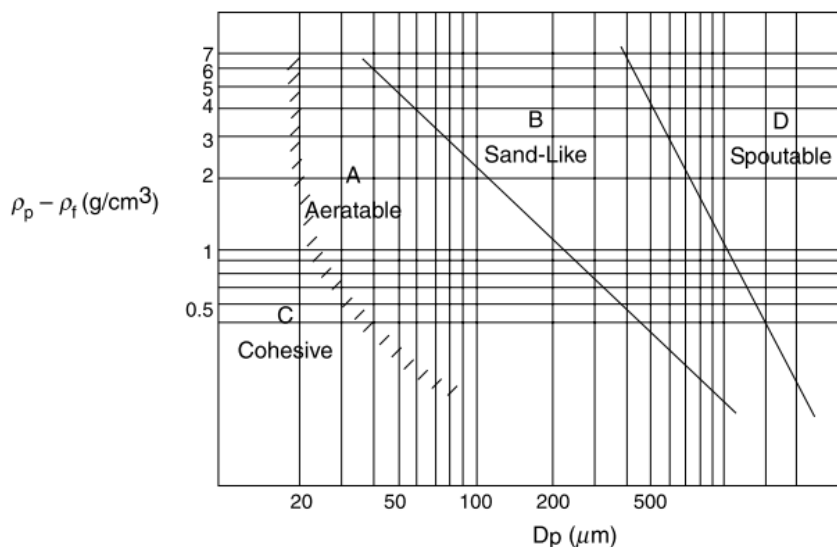
ค่าเฉลี่ยประเภทนี้จะคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งโดยอาศัยค่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตรหรือค่าพื้นที่ผิวต่อมวลของอนุภาคของแข็งนั้น ดังสมการที่ (2.7)

$$\bar{d}_{vs} = \frac{\sum_i n_i d_{pi}^3}{\sum_i n_i d_{pi}^2} = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (2.7)$$

เมื่อ x_i คือ สัดส่วนจำนวนหรือสัดส่วนมวลของอนุภาคของแข็งขนาดต่าง ๆ (ไม่มีหน่วย)

2.1.4 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง

ลักษณะการไหลที่เกิดภายในกระบวนการฟลูอิดเซชันขึ้นอยู่กับประเภทของอนุภาคของแข็ง โดยวิธีการที่นิยมใช้ในการแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง คือ วิธีการของ Geldart ซึ่งแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งจากความสัมพันธ์ของผลต่างความหนาแน่นอนุภาคของแข็ง และของไหล และ ขนาดอนุภาคของแข็งดังรูปที่ 2.1 [10]



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งตามวิธีการของ Geldart [10]

กลุ่ม A อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำ โดยที่ความหนาแน่นต่ำกว่า 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดไลเซชันได้ดี แต่จะเกิดการขยายตัวก่อนช่วงหนึ่งที่จะเริ่มเกิดฟองแก๊สในกระบวนการ

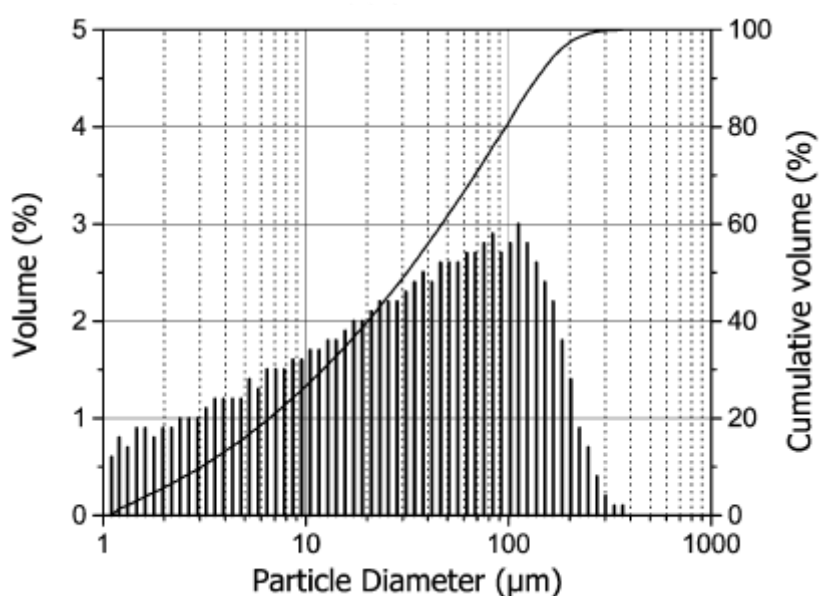
กลุ่ม B เป็นกลุ่มที่อนุภาคของแข็งมีลักษณะคล้ายทราย อนุภาคของแข็งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40-500 ไมโครเมตร และ ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งอยู่ในช่วง 1,400 ถึง 4,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดไลเซชันได้ดีมาก โดยจะเริ่มเกิดฟองแก๊สในกระบวนการได้ทันที

กลุ่ม C อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะมีขนาดเล็กมาก แรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกับแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งนั้น อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดไลเซชันได้ยาก

กลุ่ม D อนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่มาก และมีความหนาแน่นสูง จึงต้องการความเร็วที่สูงมากในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน

2.2 การกระจายขนาดของอนุภาค

การกระจายขนาดของอนุภาค (particle size distribution, PSD) คือ การกระจายตัวโดยมวลที่สอดคล้องกับแต่ละขนาดของอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบของประชากรอนุภาคทั้งหมด ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การกระจายขนาดแบบสะสม (cumulative size distribution) และ การกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์ (relative size distribution หรือเรียกว่า density distribution) [11] โดยตัวอย่างของกราฟการกระจายขนาดแบบสะสม และ การกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์แสดงดังรูปที่ 2.2 [12]



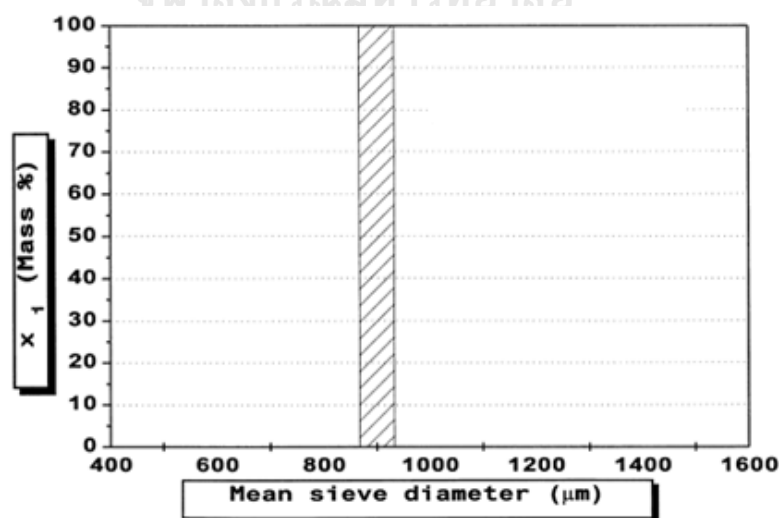
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของกราฟการกระจายขนาดแบบสะสม และ การกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้มีการนำมาศึกษาเป็นจำนวนมาก

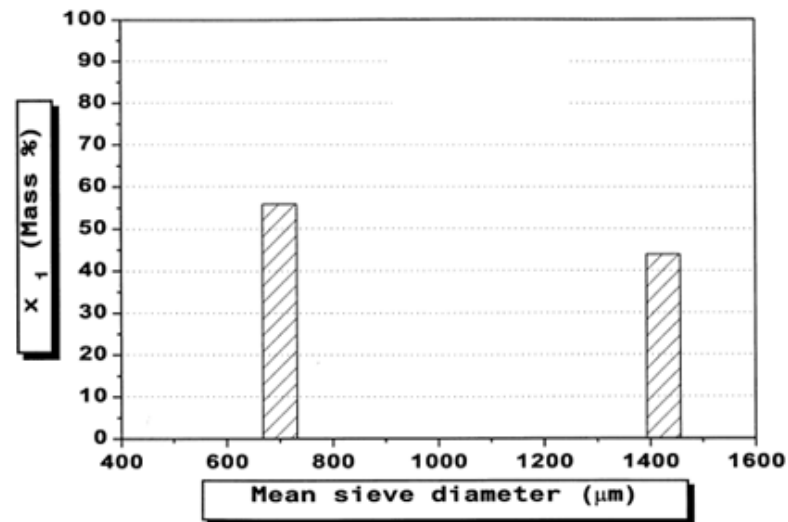
- 1) รูปแบบการกระจายขนาดแคบ (Narrow cut) หมายถึง อนุภาคของแข็งที่มีขนาดอยู่ระหว่างตะแกรงร่อน 2 ชั้น โดยขนาดของอนุภาคของแข็งจะเป็นขนาดเฉลี่ยระหว่างพื้นที่ช่องเปิดของตะแกรงร่อน 2 ชั้น
- 2) รูปแบบการกระจายขนาดแบบไบนารี (Binary) หมายถึง รูปแบบที่มีขนาดของอนุภาค 2 ขนาด โดยแต่ละขนาดอนุภาคจะมีค่าร้อยละกระจายตัวโดยมวลประมาณ 50

- 3) รูปแบบการกระจายแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) หมายถึง รูปแบบที่ขนาดของอนุภาคแต่ละขนาด จะมีค่าร้อยละการกระจายตัวโดยมวลเท่า ๆ กัน โดยประมาณ
- 4) รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ (Normal หรือ Gaussian) หมายถึง รูปแบบที่ขนาดของอนุภาคแต่ละขนาดจะมีค่าการกระจายตัวโดยมวลเป็นสัดส่วนที่สมมูล เส้นโค้งความถี่เป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ (bell shape) และมีความสมมาตร โดยรูปแบบการกระจายแบบปกตินี้ มีค่าสถิติที่สำคัญที่ใช้บ่งบอกลักษณะการกระจายขนาดคือ ค่าเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 5) รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ (Skewness) หมายถึง รูปแบบขนาดของอนุภาคแต่ละขนาดจะมีค่าการกระจายตัวโดยมวลเป็นสัดส่วนที่ไม่สมมาตร โดยมีลักษณะเบ้ไปด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งค่าสถิติที่สำคัญที่ใช้บ่งบอกลักษณะการเบ้คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ ถ้าพื้นที่ใต้เส้นโค้งทางด้านของอนุภาคขนาดใหญ่มีค่ามากกว่าทางด้านอนุภาคขนาดเล็ก การกระจายขนาดจะเป็นการกระจายแบบเบ้ทางลบ (Negative skewness) และสัมประสิทธิ์ความเบ้มีค่าเป็นลบ แต่ถ้าพื้นที่ใต้เส้นโค้งทางด้านของอนุภาคขนาดเล็กมีค่ามากกว่าทางด้านอนุภาคขนาดใหญ่ การกระจายขนาดจะเป็นการกระจายแบบเบ้ทางบวก (Positive skewness) และสัมประสิทธิ์ความเบ้มีค่าเป็นบวก

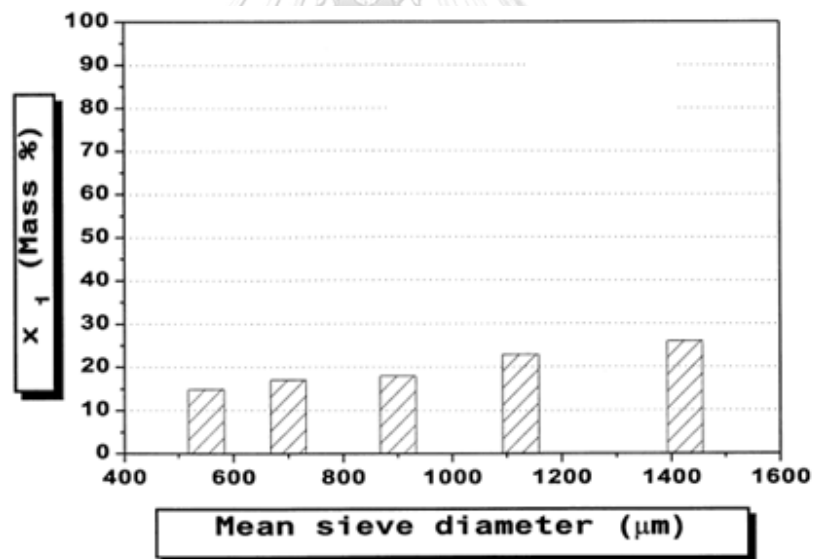
โดยรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 2.3 ถึง 2.7 [5, 13]



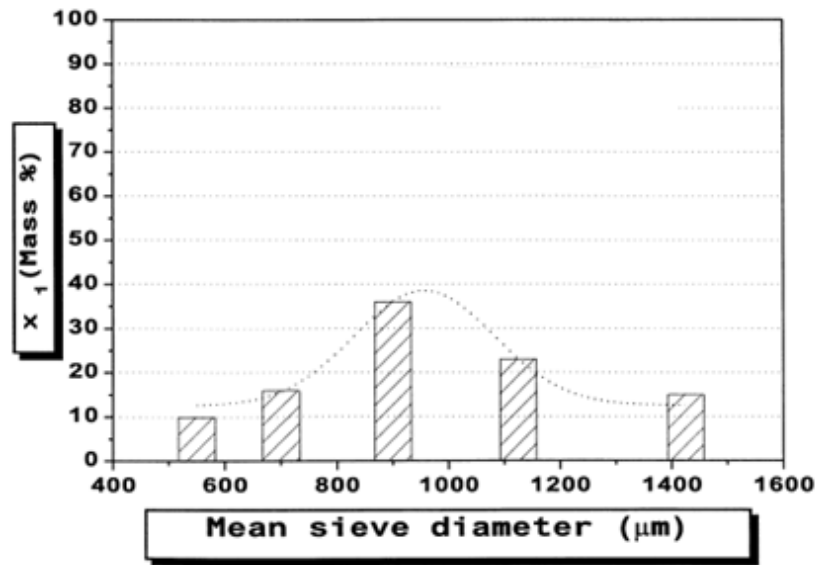
รูปที่ 2.3 รูปแบบการกระจายขนาดแคบ



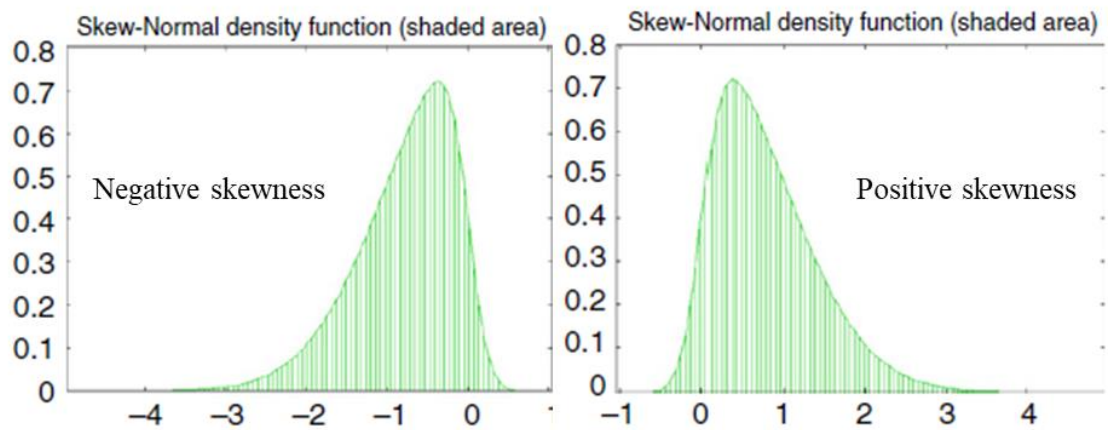
รูปที่ 2.4 รูปแบบการกระจายขนาดแบบไบโมดารี



รูปที่ 2.5 รูปแบบการกระจายแบบยูนิฟอร์ม



รูปที่ 2.6 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ



รูปที่ 2.7 รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้

2.3 ฟลูอิดเซชัน

2.3.1 นิยาม

ฟลูอิดเซชัน (Fluidization) เป็นกระบวนการที่อนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติคล้ายกับของไหล ซึ่งเกิดมาจากการป้อนของไหลให้ผ่านเข้ามาทางด้านล่างของท่อที่มีตะแกรงบริเวณฐานซึ่งรองรับอนุภาคของแข็ง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จะมีอัตราการไหลเฉพาะค่าหนึ่งที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ ที่ภาวะดังกล่าว อนุภาคของแข็งแต่ละอนุภาคจะถูกแยกออกจากกัน และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระ ซึ่งอนุภาคของแข็งจะอยู่ในสภาพไร้น้ำหนัก และมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับของไหล [14]

2.3.2 ประเภทของฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase fluidization) เป็นฟลูอิดเซชันที่เกิดในกระบวนการที่ประกอบด้วย 2 วัฏภาค คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลนี้อาจจะเป็นแก๊สหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้น ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค สามารถแบ่งย่อยได้อีกเป็น ฟลูอิดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง และ ฟลูอิดเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง
- 2) ฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase fluidization) เป็นฟลูอิดเซชันที่เกิดในกระบวนการที่ประกอบด้วย 3 วัฏภาค คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

2.3.3 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน

พฤติกรรมการไหลหรือการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเปลี่ยนไปเมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงไป แสดงในรูปที่ 2.8 โดยคำว่า เบด (Bed) จะใช้เรียกส่วนของพื้นที่หรือปริมาตรภายในท่อ หรือเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคของแข็งอยู่ภายใน ทั้งในภาวะที่อนุภาคของแข็งอยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ [8]

- เบนนิ่ง (Fixed bed)

ลักษณะการไหลแบบนี้ยังไม่ถือว่าเป็นช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน อัตราการป้อนหรือความเร็วของของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะยังไม่เพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัว หรือมีลักษณะเด่น คือ อนุภาคของแข็งในกระบวนการจะไม่มีเคลื่อนที่ [8] สมการของ Ergun [15] จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณความดันตกของการไหลของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบนนิ่งอันประกอบไปด้วยสองพจน์ คือ ความดันสูญเสียเนื่องจากความหนืดของของไหลและความดันสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ของของไหล

$$\frac{\Delta p}{L} g_c = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_0}{(\phi d_p)^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon)\rho_f U_0^2}{\varepsilon^3 \phi d_p} \quad (2.8)$$

เมื่อ Δp คือ ความดันตกของการไหลของของไหล (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)

g_c คือ แรงโน้มถ่วงโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

L คือ ระยะทางของกระบวนการ (ท่อหรือช่องการไหลอื่น) (เมตร)

ε คือ สัดส่วนช่องว่างโดยปริมาตรภายในกระบวนการ (ไม่มีหน่วย)

μ คือ ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตร วินาที)

U_0 คือ ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ (เมตรต่อวินาที)

ϕ คือ ค่าความเป็นทรงกลม (ไม่มีหน่วย)

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของแข็ง (เมตร)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

- ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)

ลักษณะการไหลแบบนี้เริ่มถือว่าเป็นช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน ความเร็วเริ่มต้นที่อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัว เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity; U_{mf}) ลักษณะเด่นของการไหลแบบนี้ คือ จะเริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้น ลักษณะการเกิดฟองแก๊สจะแตกต่างกันไปตามขนาดของอนุภาคของแข็ง สำหรับอนุภาคของแข็งชนิด Geldart C จะไม่เกิดฟองแก๊ส เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กลงทำให้มีแรงระหว่างอนุภาคที่สูงขึ้น จึง

ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก [16] สำหรับอนุภาคของแข็งชนิด Geldart A เมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้ามีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันจะยังไม่เกิดฟองแก๊สในทันที โดยพบว่ามีเพียงการขยายตัวของเบดเกิดขึ้นก่อน เนื่องจากแรงระหว่างอนุภาคของแข็งมีค่ามากกว่าแรงกระทำอันเนื่องมาจากความเร็วของของไหล และจะเริ่มเกิดฟองแก๊สเมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้ามีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน [17] สำหรับอนุภาคของแข็งชนิด Geldart B และ D ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้มีแรงระหว่างอนุภาคลดลง [18]

- ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)

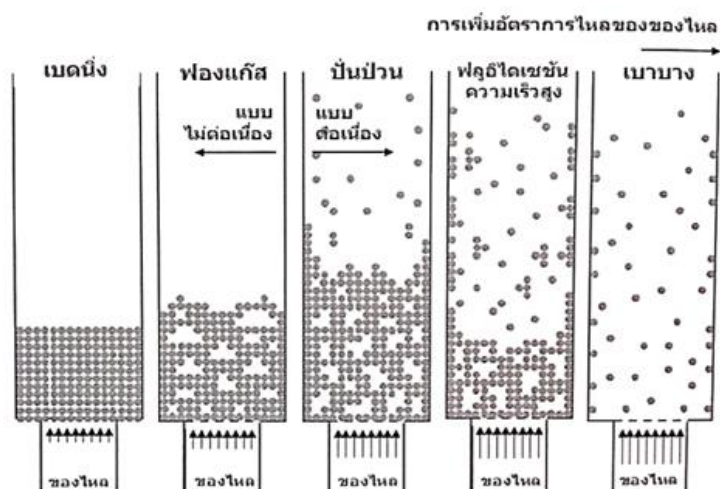
ลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้ามีค่าอยู่ระหว่างความเร็วสองค่า คือ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งในกระบวนการมีค่าสูงที่สุด และ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งมีค่าต่ำที่สุดจนเข้าสู่ภาวะคงตัว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแตกอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นจนคล้ายกับไม่มีฟองแก๊สในกระบวนการ โดยลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ชัดเจน คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ [8]

- ฟลูอิดเซชันแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed)

ลักษณะการไหลแบบนี้เกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้ามีค่ามากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity) ที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง และเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหล แต่ที่บริเวณผนังเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น และเคลื่อนที่ลง ส่วนทิศทางการไหลของของไหล รวมเรียกลักษณะการไหลเฉพาะแบบนี้ว่า การไหลแบบแกนใน - วงนอก (Core-annulus flow) [8]

- ฟลูอิดเซชันแบบเบาบาง (Pneumatic transport fluidized bed)

ลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้ามีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม (Minimum pneumatic transport velocity) อนุภาคของแข็งทั้งหมดจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์โดยจะเคลื่อนที่แยกจากกันเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหล ซึ่งจะมีสัดส่วนระหว่างอนุภาคของแข็ง และของไหลอยู่ที่ประมาณ 1 ต่อ 20 หรือมีปริมาณของไหลในเครื่องปฏิกรณ์อยู่สูงมาก [8]



รูปที่ 2.8 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันจากทฤษฎี [8]

2.3.4 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

ข้อดีของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

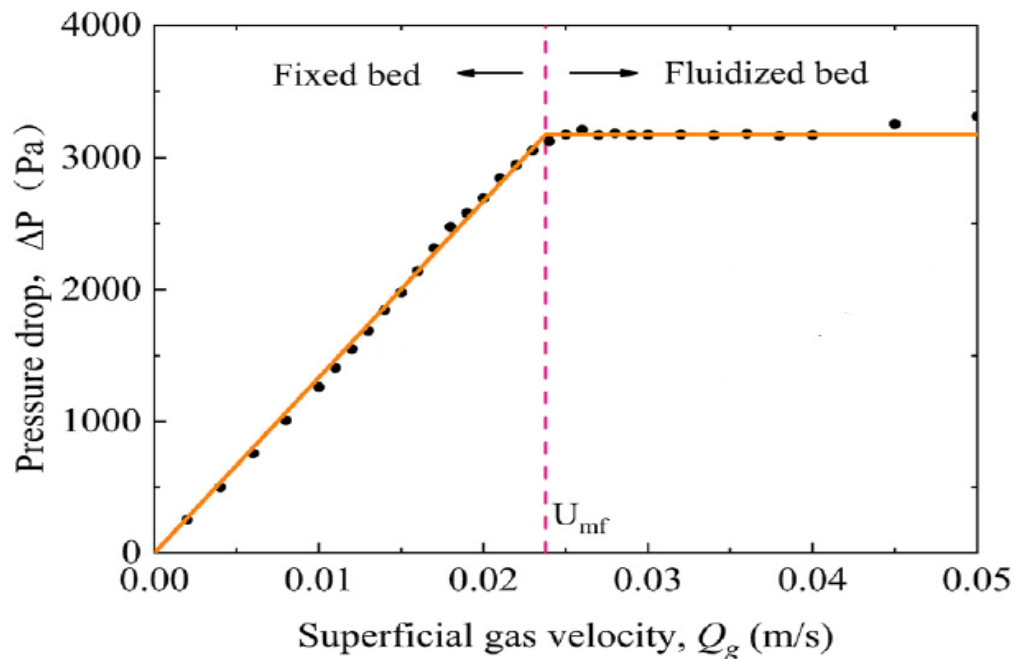
- 1) มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหล และอนุภาคของแข็งสูง และ มีการกวนผสมภายในสูง
- 2) มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งที่เฉพาะเจาะจง คือ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงจะอยู่ที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำจะอยู่ที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์
- 3) เป็นกระบวนการที่สามารถแยกอนุภาคของแข็งได้โดยที่ไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์
- 4) เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง และ ดำเนินการได้ง่าย
- 5) เป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่ดี มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเบด และ มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูง
- 6) เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการต่ำ
- 7) เป็นกระบวนการที่มีความยืดหยุ่นในการดำเนินงานสูง มีช่วงความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการที่กว้าง จึงสามารถใช้งานได้หลากหลาย [8]

ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

- 1) มีการแตกหักหรือลดขนาดของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเกิดการชนกันเองของอนุภาคของแข็ง
- 2) มีการสึกกร่อนของผนังเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเกิดการชน และ เสียดสีของอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่กับผนังเครื่องปฏิกรณ์
- 3) อนุภาคของแข็งมีเวลาอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์สั้น อาจส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์
- 4) กระบวนการมีข้อจำกัด อนุภาคของแข็งจะหลุดออกจากกระบวนการที่ความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการสูง
- 5) การผสมเกิดขึ้นได้ดีในทิศทางตามแนวแกน มากกว่าในทิศทางตามแนวนอน จึงอาจส่งผลให้มีความไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- 6) เกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ภายในกระบวนการ ทำให้ลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล
- 7) ไม่สามารถใช้งานกับอนุภาคของแข็งที่เปราะหรือเหนียว เพราะจะเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ [8]

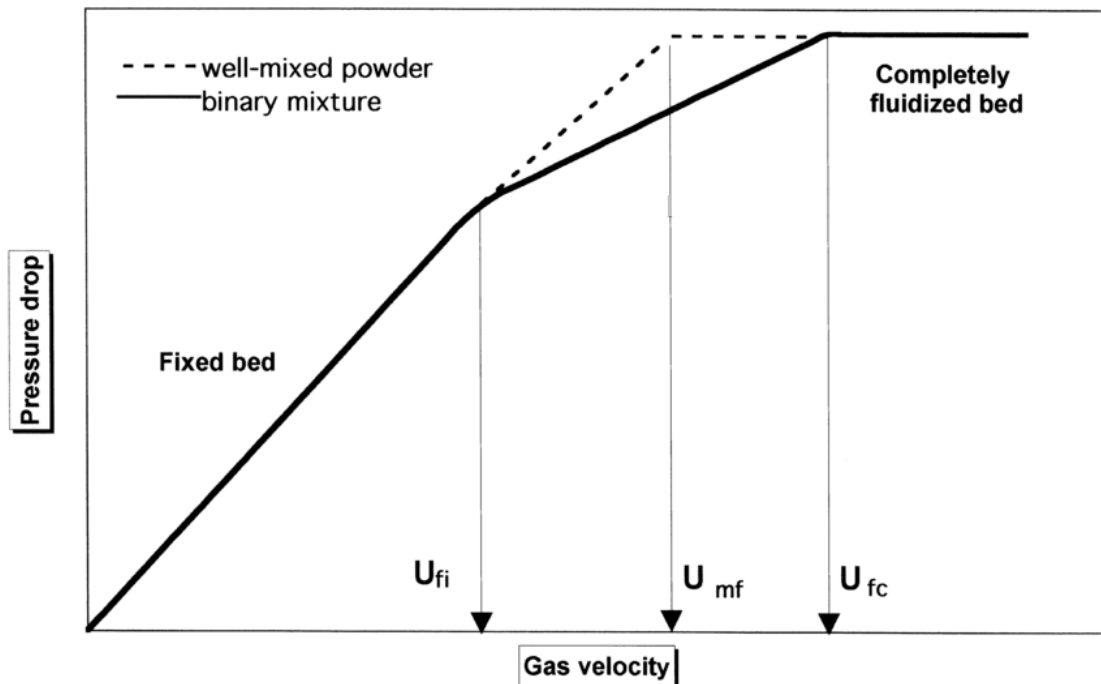
2.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราการไหลของเบต

จาก รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ [19] ในช่วงแรก que ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการต่ำ ๆ จะยังไม่มี การขยับตัวของเบตหรืออยู่ในภาวะเบตนิ่ง ซึ่งอธิบายได้จากพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นคือ อนุภาคของแข็งจะมีแรงเสียดทานระหว่างกัน ในช่วงนี้ค่าความดันลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.8 ของ Ergun [15] จนกระทั่งถึงความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เบตในกระบวนการจะเริ่มเข้าสู่สภาวะฟลูอิดเซชัน ณ จุดนี้ เบตจะเริ่มขยายตัวซึ่งจะไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความดันลดอีกต่อไปเมื่อเพิ่มความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ โดยจุดเริ่มต้นของความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่ทำให้ความดันลดมีค่าคงที่ จะเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ที่ภาวะนี้ อนุภาคของแข็งจะมีการขยับตัว และไม่มีแรงเสียดทานระหว่างกัน



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก และความเร็วจุดเริ่มการไหล [19]

อย่างไรก็ตาม สำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดหรือมีอนุภาคของแข็งหลายชนิดผสมกัน ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันจะไม่ใช่ ณ จุดที่ความดันตกเริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากอนุภาคของแข็งจะเริ่มเข้าสู่สถานะฟลูอิดเซชันไม่พร้อมกันทั้งเบด โดยวิธีการหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดหรือมีอนุภาคของแข็งหลายชนิดผสมกัน จะทำได้โดยการลากเส้นตรงสองเส้นขึ้นมา โดยเส้นตรงเส้นหนึ่งจะลากเส้นตามข้อมูลความดันตกที่ได้ก่อนที่แนวโน้มของข้อมูลจะไม่เป็นเส้นตรง และเส้นตรงอีกเส้นหนึ่งจะลากจากข้อมูลที่ความดันตกมีค่าคงที่ โดยจุดตัดระหว่างเส้นตรงสองเส้นนี้คือ ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ขณะเดียวกันการทำด้วยวิธีนี้จะทราบถึงความเร็วที่ของแข็งอนุภาคแรกเริ่มขยับ (Incipient fluidization velocity, U_{fi}) และ ความเร็วที่อนุภาคของแข็งทั้งหมดเกิดฟลูอิดเซชัน (Complete fluidization velocity, U_{fc}) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 [5]



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดหรือมีอนุภาคของแข็งหลายชนิดผสมกัน [5]

2.3.6 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซนชัน

ในช่วงครึ่งศตวรรษที่ผ่านมา ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนชันได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายตลอดมา และได้มีการหาสมการคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนชัน เพื่อที่จะออกแบบกระบวนการฟลูอิดไอเซนชันให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสมการแรก คือ สมการของ Ergun ซึ่งมีสมมติฐานว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนชันคำนวณจากภาวะที่แรงต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งมีค่าเท่ากับแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็งนั้น (W) [15]

$$\text{แรงต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง} = \text{ความดันลด } (\Delta p) \times \text{พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหล } (A) \quad (2.9)$$

$$\text{แรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง} = \text{ปริมาตรของเบด } (V) \times \text{สัดส่วนโดยปริมาตรของเบด } (\epsilon_s) \times \text{น้ำหนักจำเพาะของเบด } (\rho_s - \rho_f) \quad (2.10)$$

$$\Delta p A = W = (V)(\epsilon_s)(\rho_s - \rho_f)g \quad (2.11)$$

$$\Delta p A = W = (A L_{mf})(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad (2.12)$$

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad (2.13)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

L_{mf} คือ ความสูงของเบดที่ภาวะความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (เมตร)

ε_{mf} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของช่องว่างที่ภาวะความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\frac{1.75}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (2.14)$$

กรณีอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก หรือ $Re_{mf} < 20$

$$U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 (\rho_s - \rho_f) g \varepsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2.15)$$

กรณีอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ หรือ $Re_{mf} > 1000$

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi d_p (\rho_s - \rho_f)}{1.75 \rho_f} g \varepsilon_{mf}^3 \quad (2.16)$$

นอกจากสมการของ Ergun แล้ว ยังมีสมการที่สามารถใช้ทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันอีกหลายสมการดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf})

| ผู้ทำการวิจัย | สมการ | สมการที่ |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Wen and Yu (1966) [20] | $Re_{mf} = (33.7^2 + 0.0408Ar)^{0.5} - 33.7$ | (2.17) |
| Bourgeois and Grenier (1968) [21] | $Re_{mf} = (25.46^2 + 0.0382Ar)^{0.5} - 25.46$ | (2.18) |
| Wu and Baeyens (1991) [22] | $Re_{mf} = 7.33 \times 10^{-5} \times 10^{(8.24 \log_{10} Ar - 8.81)^{0.5}}$ | (2.19) |
| Subramani et al. (2007) [23] | $Re_{mf} = Ar/1502$ | (2.20) |
| Zhiping et al. (2007) [24] | $Re_{mf} = (22.1^2 + 0.0354Ar)^{0.5} - 22.1$ | (2.21) |
| Chen et al. (2010) [25] | $Re_{mf} = 0.01036Ar^{0.7107}$ | (2.22) |
| Jiliang et al. (2013) [6] | $U_{mf} = 0.28 \sum_{i=1}^n x_i d_i^{0.599} \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0.533} / \nu^{0.066}$ | (2.23) |
| Seo et al. (2014) [26] | $Re_{mf} = Ar/1737$ | (2.24) |
| Li et al. (2018) [27] | $Re_{mf} = (31.56^2 + 0.043Ar)^{0.5} - 31.56$ | (2.25) |
| Fu et al. (2019) [7] | $Re_{mf} = \frac{(33.7^2 + 0.0408Ar)^{0.5} - 33.7}{1 - \exp(-14.45\Delta P^{-0.3})}$ | (2.26) |
| Shao et al. (2020) [28] | $U_{mf} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i d_i^{0.55})^{\frac{2}{0.55}} (\rho_s - \rho_g) g}{1653 \mu_g}$ | (2.27) |

2.4 การสร้างแบบจำลองการถดถอย

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผนไว้ล่วงหน้า อาจเกิดจากการเก็บข้อมูลที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือสิ่งที่บันทึกเอาไว้ในอดีต แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาวิเคราะห์ในกรณีดังกล่าวอยู่บ่อยครั้ง ซึ่งการถดถอย (Regression) หมายถึงการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัวหนึ่งที่เราเรียกว่าตัวแปรตาม (Dependent variable) และอีกตัวแปรหนึ่งซึ่งมีตั้งแต่ 1 ตัวแปรขึ้นไป ที่เรียกว่าตัวแปรอิสระ (Independent variable) ในการวิเคราะห์การถดถอย มักเรียกตัวแปรอิสระที่ไม่มีค่าคลาดเคลื่อนว่า ตัวแปรประมาณ (Predictor) และตัวแปรตามที่มีค่าความคลาดเคลื่อน เรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (Response) ซึ่งการวิเคราะห์การถดถอยมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ โดยรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอาจเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ โดยรูปแบบการวิเคราะห์การถดถอยสามารถแบ่งได้เป็นรูปแบบหลัก ๆ ดังนี้



- 1) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) จะเป็นการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นตรง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม 1 ตัว และตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัว การวิเคราะห์เป็นการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม
- 2) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ (Multiple linear regression analysis) จะเป็นการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นตรง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม 1 ตัว และ ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป การวิเคราะห์เป็นการหาขนาดของความสัมพันธ์ และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามด้วยกลุ่มของตัวแปรอิสระที่ศึกษา
- 3) การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) การวิเคราะห์การถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้นจะใช้ในกรณีที่ทราบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์ระหว่างกันแบบไม่เป็นเส้นตรงหรือไม่ทราบความสัมพันธ์ที่แน่นอน แต่ใช้ฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในการสร้างสมการความสัมพันธ์ โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้ การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ (Multiple non-linear regression analysis) ในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามด้วยกลุ่มของตัวแปรอิสระที่ศึกษา

- 4) การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม 1 ตัว และ ตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเป็นความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง
- 5) การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติก (Logistic regression analysis) ใช้ในกรณีที่ตัวแปรตอบสนองมีเพียงสองสถานะ เช่น ใช่ หรือ ไม่ใช่ เป็นต้น แต่ตัวแปรประมาณเป็นค่าแบบต่อเนื่องปกติ

2.5 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network, ANN) เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นโดยใช้แนวคิดการทำงานของสมองมนุษย์ที่สามารถคิดวิเคราะห์ได้อย่างซับซ้อน มาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์โดยจำลองให้เหมือนกระบวนการเรียนรู้ของมนุษย์ เปรียบเสมือนการทำงานของเซลล์ประสาทหรือนิวรอน (Neuron) เพื่อให้สามารถเรียนรู้การจดจำรูปแบบ และสร้างความรู้ใหม่ได้

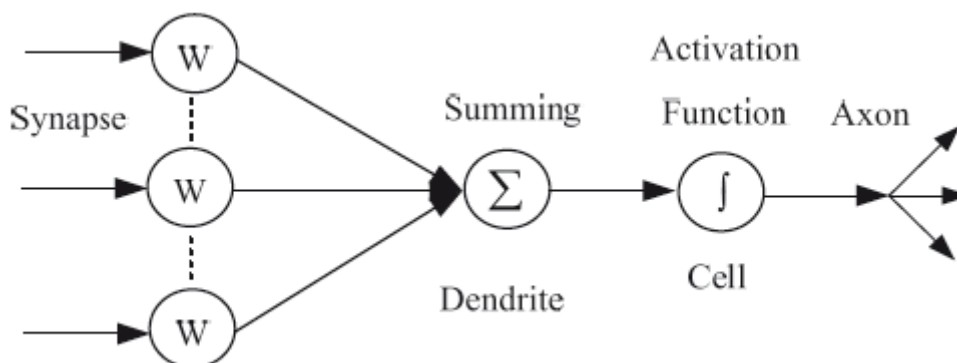
2.5.1 แนวคิดและหลักของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมได้พัฒนาขึ้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เลียนแบบการทำงานของสมองให้เหมือนกระบวนการเรียนรู้ของมนุษย์ภายใต้หลักการดังนี้ [29]

- 1) การประมวลผลต่าง ๆ เกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อยเรียกว่า โหนด (Node) ซึ่งจำลองลักษณะการทำงานมาจากตัวเซลล์
- 2) การส่งสัญญาณ (Signal) ระหว่างโหนด โดยส่วนที่เชื่อมต่อกันจำลองมาจากการเชื่อมต่อกันของเดนไดรต์ (Dendrite) และแอกซอน (Axon) ในระบบประสาทของมนุษย์
- 3) แต่ละการเชื่อมต่อจะมีค่าน้ำหนัก (Weight) ที่ต่างกัน เปรียบเสมือนเป็นค่าที่ให้โครงข่ายใช้ในการตัดสินใจแก้ปัญหา ขึ้นอยู่กับอิทธิพลที่โหนดจะได้รับจากโหนดอื่น ๆ โดยทั่วไปค่าน้ำหนักนี้จะถูกคูณเข้ากับสัญญาณขาเข้าเพื่อส่งออกไปยังนิวรอนอื่น ซึ่งจำลองมาจากไซแนปส์ (Synapse) ค่าน้ำหนักที่ได้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนความรู้ที่รวบรวมไว้ใช้ในการแก้ปัญหาเฉพาะอย่างของมนุษย์
- 4) ภายใต้โหนดจะมีฟังก์ชันกำหนดสัญญาณขาออก ซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function หรือ Transfer function) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนกระบวนการทำงานในตัว

เซลล์ประสาท เพื่อส่งเป็นสัญญาณขาออก ส่งออกไปให้แก่นิวรอนตัวอื่น ๆ ของฟังก์ชันการกระตุ้นนี้

ลักษณะของโหนดภายในโครงสร้างของเซลล์ประสาทเทียมสามารถสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ แสดงดังรูปที่ 2.11 [30]



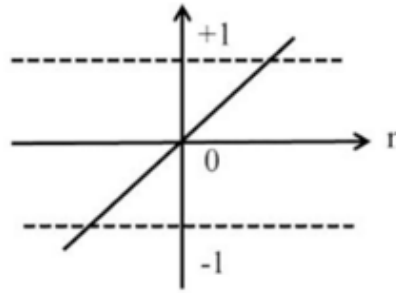
รูปที่ 2.11 ลักษณะของโหนดภายในโครงสร้างของเซลล์ประสาทเทียม

2.5.2 ฟังก์ชันการแปลง

โดยทั่วไปโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วย 3 ชั้น คือ ชั้นรับข้อมูล (Input layer) ชั้นส่งข้อมูลออก (Output layer) และชั้นแอบแฝง (Hidden layer) โดยในชั้นแอบแฝงจะมีการใช้ฟังก์ชันการแปลงหรืออาจเรียกว่าฟังก์ชันกระตุ้น ซึ่งมีฟังก์ชันที่นิยมใช้งาน คือ

- 1) ฟังก์ชันเส้นตรง (Linear) ใช้ประมาณค่าแบบเชิงเส้นสำหรับชั้นรับข้อมูล และชั้นส่งข้อมูลออก เซลล์ประสาทที่ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงจะใช้ในการประมาณค่าเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 2.12 [31] และมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.28)

$$\text{purelin}(n) = n \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.12 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเส้นตรง

- 2) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบลอจิกมอยด์ (Log-Sigmoid) ใช้ประมาณค่าฟังก์ชันสำหรับชั้นแอบแฝง โดยเปลี่ยนรูปของข้อมูลขาเข้าที่มีค่าตั้งแต่บวกอนันต์ถึงลบอนันต์ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 ดังรูปที่ 2.13 [31] และมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.29)

$$\text{logsig}(n) = \frac{1}{1+e^{-n}} \quad (2.29)$$

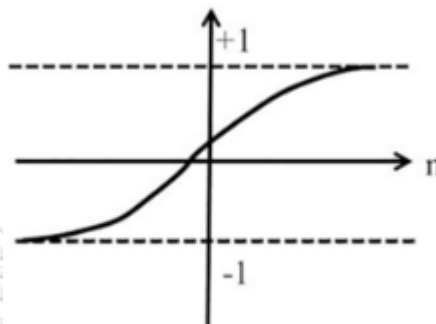
รูปที่ 2.13 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบลอจิกมอยด์

ปัญหาของฟังก์ชันนี้คือการเปลี่ยนแปลงค่าข้อมูลขาออก มีผลต่อค่าของข้อมูลขาเข้าที่จะทำให้ค่าของข้อมูลขาเข้ามีค่าน้อยลงมาก ซึ่งทำให้ค่าเกิดการหายไประหว่างการทำแเกรเดียนท์หรือการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันสูญเสีย [32] ซึ่งการแก้ปัญหานี้ แก้ได้โดยใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์

- 3) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์ (Tan-Sigmoid) เป็นฟังก์ชันที่มีลักษณะคล้ายฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบลอจิกมอยด์ ช่วยลดการหายไปของค่าระหว่างการทำแเกรเดียนท์ ใช้

ประมาณค่าฟังก์ชันสำหรับชั้นแอบแฝงให้มีค่าอยู่ระหว่าง -1 กับ 1 ดังรูปที่ 2.14 [31] และมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.30)

$$\text{tansig}(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.14 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแทนซิกมอยด์

เมื่อ n คือผลลัพธ์ที่ได้จากผลรวมของผลคูณระหว่างข้อมูลที่นำเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนักที่โหนดนั้นได้รับ

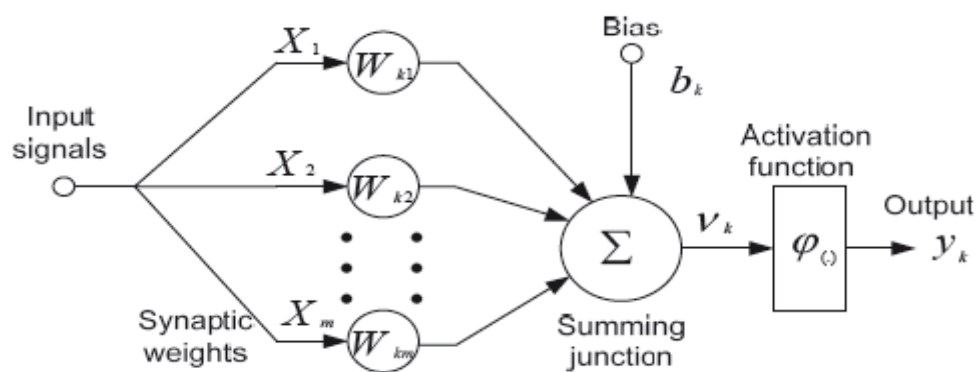
2.5.3 กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมคือการปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้สอดคล้องกับข้อมูลขาเข้า เพื่อให้ได้ข้อมูลขาออกที่ต้องการ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ [30]

- 1) การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning) ข้อมูลจะต้องประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลที่ต้องการปรับสอน และผลลัพธ์ที่ต้องการให้โครงข่ายสร้าง เมื่อมีการนำข้อมูลในลักษณะเดียวกันมาเป็นข้อมูลขาเข้า ขณะสอน โครงข่ายชนิดนี้จะกำหนดค่าผลลัพธ์เป้าหมายให้กับข้อมูลขาเข้าแต่ละตัว โครงข่ายจะนำค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการปรับค่าน้ำหนักเพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด
- 2) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning) การเรียนรู้แบบนี้จะสอนโดยการป้อนข้อมูลขาเข้าอย่างต่อเนื่องเพียงอย่างเดียว ไม่มีการส่งค่าผลลัพธ์เป้าหมายให้กับข้อมูลขาเข้าแต่ละตัว การปรับน้ำหนักใช้ข้อมูลที่นำมาสอนเป็นตัวปรับค่า โดยค่าน้ำหนักจะปรับตามกลุ่มที่ข้อมูลนำเข้ามีรูปแบบคล้ายกัน

2.5.4 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (Back-propagation network) เป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาในลักษณะเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นได้ โดยมีกระบวนการเรียนรู้ข้อมูลในอดีต เริ่มจากนำค่าข้อมูลขาเข้ามาคำนวณหาผลรวมที่ได้ในแต่ละโหนด แล้วส่งผลลัพธ์ไปยังขั้นต่อไปโดยผ่านฟังก์ชันการแปลง จากนั้นใช้วิธีเรียนรู้แบบมีผู้สอน โดยนำผลที่ได้จากโครงข่ายในแต่ละครั้งของชุดข้อมูลที่ป้อนให้กับโครงข่ายนั้นมาเปรียบเทียบกับเป้าหมายขาออก เพื่อหาค่าความผิดพลาดในแต่ละครั้ง แล้วนำค่าความผิดพลาดที่ได้นั้นย้อนกลับไปยังชั้นขาออก และต่อไปยังโหนดต่าง ๆ ของชั้นภายในโครงข่าย และนำค่าผิดพลาดที่ได้ มาใช้ในการคำนวณปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งค่านี้จะเปลี่ยนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาดที่ได้รับ โดยที่การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะมีการคำนวณในทิศทางย้อนกลับจากทางด้านข้อมูลขาออกผ่านชั้นซ่อน จนปรับค่าถ่วงน้ำหนักมาถึงชั้นแรก ที่ต่อจากชั้นขาเข้า จากนั้นคำนวณหาค่าข้อมูลขาออกใหม่ กระบวนการเรียนรู้จะมีการคำนวณวนซ้ำ เช่นนี้ จนกระทั่งค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายที่ต้องการ [30]



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ [30]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Seo และ คณະ [26] ศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดชัน ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบเบดคู่ ซึ่งความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดชันเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการดำเนินการของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด โดยศึกษาผลของขนาดอนุภาค และ ผลของอุณหภูมิในการดำเนินการที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดชัน อุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง 25 ถึง 800 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดชันมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิใน

การดำเนินการสูงขึ้น ขณะที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันมีค่าสูงขึ้น เมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการดำเนินการส่งผลให้สัดส่วนช่องว่างภายในเบตสูงขึ้น เนื่องจากค่าความดันลดที่สูงสุดมีแนวโน้มลดลง ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อหาค่าคงที่ในสหสัมพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปของตัวเลขไร้หน่วยเรียโนลด์ และตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส โดยผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่จากการประมาณของ Wen และ Yu [20] ซึ่งแสดงว่าค่าคงที่ในสหสัมพันธ์นี้สามารถใช้ได้ และสหสัมพันธ์ที่ได้นี้ สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันเพื่อใช้ในการดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบตแบบเบตคู่ได้

Downmore และ คณะ [33] เสนอการศึกษาทางอุทกพลศาสตร์ของผลกระทบของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันแปรผันโดยตรงกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย และ แปรผกผันกับอุณหภูมิ รวมถึงความดันลดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง สำหรับอนุภาคของแข็งทุกขนาด ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันที่ทำนายจากสหสัมพันธ์เพื่อตรวจสอบสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด พบว่า สหสัมพันธ์ของ Hartman และ คณะ [34] เหมาะสมกับการทำนายสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 75 และ 177 มิลลิเมตร และ สหสัมพันธ์ของ Mohanta และ คณะ [35] เหมาะสมกับการทำนายสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดอยู่ในช่วง 250 ถึง 500 มิลลิเมตร เนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้แสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงซ้อน (R^2) ที่สูง ค่าความผิดพลาดของเส้นถดถอยเชิงเส้นตรงต่ำ และ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเรขาคณิตต่ำ ในช่วงของขนาดอนุภาค และ อุณหภูมิที่ศึกษา

Fu และ คณะ [7] ศึกษาผลของปริมาณอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบตที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยใช้อนุภาคของแข็งหนึ่งชนิด และอนุภาคของแข็งสองชนิด พบว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบต เนื่องจากปริมาณของอนุภาคของแข็งที่มากขึ้น ทำให้เกิดความดันลดในระบบที่มากขึ้น จึงต้องใช้ความเร็วของแก๊สป้อนเข้าที่มากขึ้นด้วย จึงจะทำให้อนุภาคของแข็งเกิดการฟลูอิดไอเซชันได้ทั้งหมด นอกจากนี้ยังได้เสนอสหสัมพันธ์สำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันที่เป็นฟังก์ชันกับปริมาณอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบต โดยปรับปรุงจากสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [20] ซึ่งสหสัมพันธ์ที่ได้นี้จำเป็นต้องใช้ค่าของความดันลด และ ค่าของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส เพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยสหสัมพันธ์นี้สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันได้อย่างแม่นยำ ทั้งการใช้อุณหภูมิของแข็งหนึ่ง

ชนิด และ อนุภาคของแข็งสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ และ ผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา

Rasteh และ คณะ [36] ศึกษากระบวนการฟลูอิดเซชันของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบลู่เข้า พบว่า อนุภาคที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม และ ไบนารี จะเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วแก๊สสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่มีการกระจายขนาดแคบ ขณะที่อนุภาคที่มีการแจกแจงแบบปกติจะเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วแก๊สต่ำกว่า ซึ่งเห็นได้ว่าการกระจายขนาดอนุภาคเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดซ์เบด ในงานวิจัยนี้ สหสัมพันธ์สำหรับการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบลู่เข้าได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยได้รวมผลของภาวะดำเนินการ และ ตัวแปรทางเรขาคณิตในรูปของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งสหสัมพันธ์นี้สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ เนื่องจากสหสัมพันธ์ที่เคยมีมาไม่คำนึงถึงผลของการกระจายขนาดของอนุภาค ทำให้ทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้ไม่แม่นยำเมื่อเทียบกับผลการทดลองจริง

Feng และ คณะ [37] ศึกษาผลของความดันที่เพิ่มขึ้น และการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยศึกษาความดันอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 2.7 เมกกะปาสคาล และ ศึกษาแบบการกระจายขนาดแคบ การแจกแจงแบบไบนารี การแจกแจงแบบเทอร์นารี (Ternary) การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม และ การแจกแจงแบบปกติ ผลการศึกษา พบว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจะลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ที่ความดันไม่เกิน 0.3 เมกกะปาสคาล และเปรียบเทียบที่ขนาดอนุภาคของแข็งเท่ากัน ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคที่มีการกระจายขนาดกว้างทุกรูปแบบ จะมีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดแคบ ขณะที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคที่มีการกระจายขนาดกว้างทุกรูปแบบ จะมีค่าแตกต่างกันอย่างมากในช่วงความดันต่ำกว่า 0.9 เมกกะปาสคาล และ ค่าที่แตกต่างนี้จะลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น สำหรับรูปแบบของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดแคบ นอกจากนี้ ได้มีการเสนอสหสัมพันธ์ใหม่ โดยพัฒนาจากการปรับปรุงสมการของ Ergun [15] พบว่าการใช้สมการของ Rowe [38] ในการคิดสหสัมพันธ์ใหม่นี้ สามารถทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคที่มีการกระจายขนาดทุกรูปแบบได้ดีที่สุดภายใต้ภาวะการดำเนินการที่ศึกษา เนื่องจากมีฟังก์ชันของสัดส่วนช่องว่างในเบดรวมอยู่ในสมการด้วย

Jiang และ คณะ [39] ศึกษาผลของอนุภาคที่มีการกระจายขนาดต่างกัน ที่มีต่อพฤติกรรมภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา โดยใช้ในการวิเคราะห์ความผันผวนของความดันภายใน wind caps โดยได้มีการศึกษาความดันที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มความเร็วของแก๊สป้อนเข้า ซึ่งสามารถแสดงค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดพลาสมาได้ ผลการทดลองพบว่า อนุภาคที่มีการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบที่มีค่าความเบ้สูง สามารถเกิดการพลาสมาได้ง่ายที่สุด เนื่องจากมีสัดส่วนของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากกว่าการแจกแจงอื่น ๆ รองลงมาเป็นการแจกแจงแบบเบ้ทางบวกที่มีค่าความเบ้สูง การแจกแจงแบบเบ้ทางลบที่มีค่าความเบ้ต่ำ และ การแจกแจงแบบปกติ ตามลำดับ ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับ การแจกแจงแบบแคบที่มีสัดส่วนของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กมาก พบว่าการแจกแจงแบบแคบจะเกิดพลาสมาได้ดีกว่า เนื่องจากมีสัดส่วนของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่มากกว่า นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบที่มีค่าความเบ้ต่ำ แต่มีปริมาณของอนุภาคของแข็งต่ำลง พบว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดพลาสมา มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความดันลดในระบบที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำลง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีต่อพฤติกรรมภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาผลของการใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง และ ผลของสภาวะการดำเนินการต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย ปริมาณของอนุภาคของแข็ง และ อุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน คือประเด็นแรกที่สำคัญของงานวิจัยนี้ เมื่อทราบถึงแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำไปสู่ประเด็นที่สองของงานวิจัย คือการสร้างสหสัมพันธ์เพื่อนำมาทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

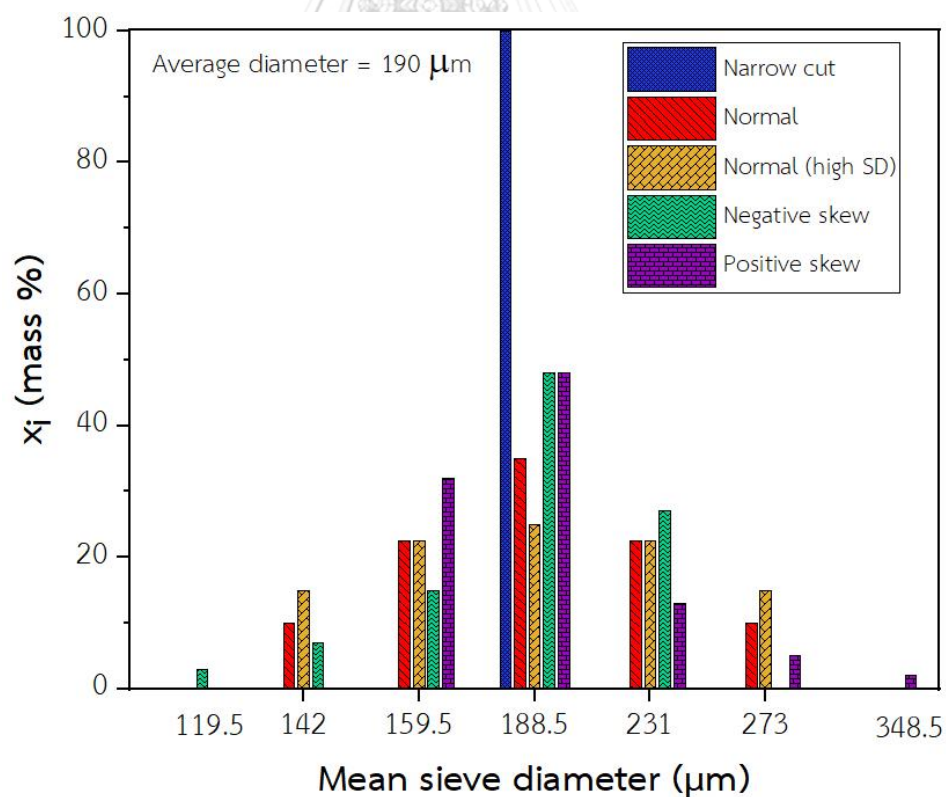
เพื่อที่จะศึกษาในแง่มุมต่าง ๆ ของทั้ง 2 ประเด็นอย่างครบถ้วน ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวแปรที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ในหัวข้อ 3.1 สารที่ใช้ในงานวิจัยและการทำงานของเครื่องมือ และระบบต่าง ๆ ในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการวิจัยจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.4 โดยจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาผลของการใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง และ ผลของสภาวะการดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน การสร้างสหสัมพันธ์เพื่อนำมาทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้แบบจำลองการถดถอย และ การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

3.1 ตัวแปรที่จะศึกษา

3.1.1 การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งในการศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน พบว่า รูปแบบของการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีการศึกษาเป็นจำนวนมาก คือ รูปแบบการกระจายขนาดแคบ การแจกแจงแบบไบนารี การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม และ การแจกแจงแบบปกติ อย่างไรก็ตาม ยังไม่ค่อยมีการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งรูปแบบอื่น ๆ เช่น รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษารูปแบบนี้ ๆ เพื่อที่จะสามารถอธิบายผลของการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น โดย รูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งที่จะศึกษาทั้งหมด มี 5 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการกระจายขนาดแคบ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง รูปแบบ

การกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ และ รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก โดยกำหนดให้ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเชิงปริมาตร-พื้นที่ผิว ในแต่ละรูปแบบการกระจายขนาด มีค่าเท่ากัน ซึ่งการควบคุมให้มีขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเท่ากันในทุกรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งจะส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ในแต่ละรูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ปริมาณที่ไม่เท่ากันของขนาดอนุภาคของแข็งในแต่ละช่วงร้อนผ่านตะแกรง สำหรับรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ และ รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก จะไม่สามารถใช้ขนาดอนุภาคของแข็งในช่วงร้อนผ่านตะแกรงเดียวกันกับช่วงที่ใช้สำหรับรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ และ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง สำหรับขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเดียวกัน เนื่องจากในทางสถิติ ค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบเบ้ทางลบจะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปกติ และ ค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปกติจะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบเบ้ทางบวกตามลำดับ จึงจำเป็นต้องปรับการใช้ขนาดอนุภาคของแข็งในช่วงร้อนผ่านตะแกรงให้แตกต่างกัน เพื่อจะควบคุมให้มีขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเท่ากันในทุกรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งรูปแบบต่าง ๆ

3.1.2 ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย

ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยจะเป็นขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเชิงปริมาตร-พื้นที่ผิว ดังสมการที่ (2.7) โดยมีขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยที่จะศึกษา 3 ขนาด คือ 0.19 0.46 และ 0.92 มิลลิเมตร

3.1.3 ปริมาณของอนุภาคของแข็ง

ปริมาณของอนุภาคของแข็งโดยน้ำหนัก ที่จะศึกษา มี 3 ค่า คือ 1 2 และ 3 กิโลกรัม

3.1.4 อุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง

อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่จะศึกษา มี 3 ค่า คือ 30 75 และ 120 องศาเซลเซียส

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 วัสดุของแข็ง

ทราย (Silica sand) จากบริษัท ควอลิตี้ แชนด์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ความหนาแน่นด้วยวิธีแทนที่น้ำ 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการเตรียมทรายในการทดลองทำได้โดยการคัดแยกขนาดผ่านการร่อนด้วยตะแกรง จากนั้นนำทรายแต่ละช่วงที่ร่อนผ่านตะแกรง ไปจัดเตรียมตามรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาค ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย และ ปริมาณของอนุภาคของแข็ง ตามที่ได้ออกแบบไว้

3.2.2 วัสดุของไหล

อากาศที่อุณหภูมิห้องที่ผ่านเครื่องอัดจนมีความดัน 4 บาร์

3.3 อุปกรณ์และเครื่องปฏิกรณ์

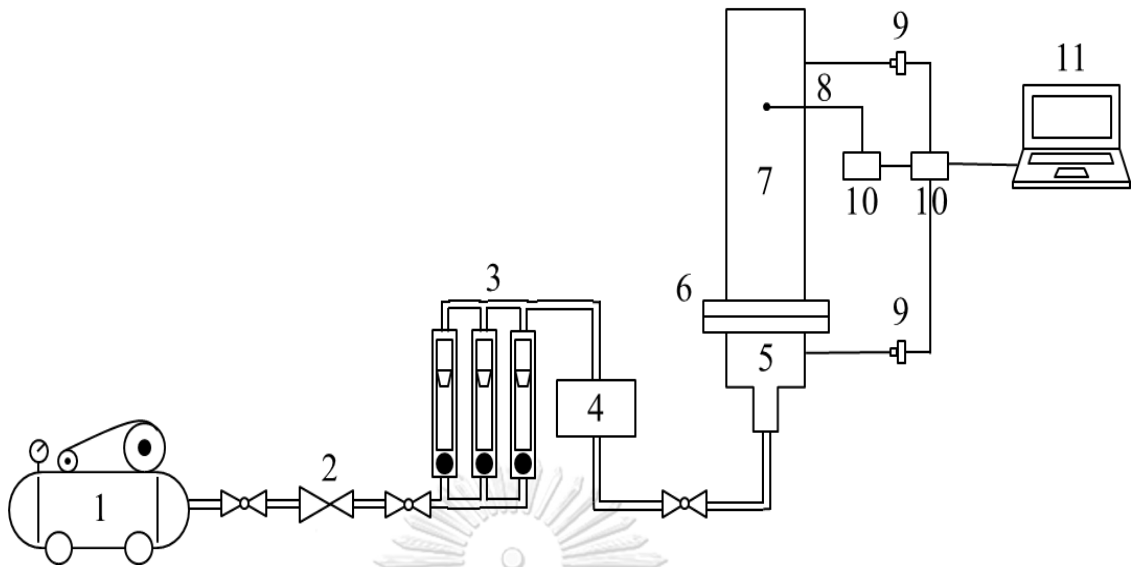
3.3.1 อุปกรณ์

- 1) เครื่องปรับแรงดัน (Regulator) จำนวน 1 ชิ้น สำหรับควบคุมแรงดันของอากาศที่ตำแหน่งท่อลมหลักที่ป้อนเข้าคอลัมน์ฟลูอิดซ์เบด โดยใช้เครื่องปรับแรงดันยี่ห้อ CAMOZZI ที่มีช่วงควบคุมความดันอยู่ระหว่าง 0 ถึง 12 บาร์

- 2) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Rotameter) จำนวน 3 ชิ้น สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าคอลัมน์ฟลูอิดิซ์เบด โดยใช้
 - เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศยี่ห้อ Flowtech ที่มีช่วงการวัดอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 ลิตรต่อนาที
 - เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศยี่ห้อ Flowtech ที่มีช่วงการวัดอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 30 ถึง 300 ลิตรต่อนาที
 - เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศยี่ห้อ Dwyer ที่มีช่วงการวัดอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 200 ถึง 1,400 ลิตรต่อนาที
- 3) อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) สำหรับให้ความร้อนแก่อากาศที่ป้อนเข้าคอลัมน์ฟลูอิดิซ์เบด เพื่อไปเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งภายในคอลัมน์
- 4) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) แบบ Type K ยี่ห้อ Phidgets ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิที่สามารถวัดได้อยู่ในช่วงระหว่าง -40 ถึง 400 องศาเซลเซียส สำหรับวัดอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งภายในคอลัมน์ฟลูอิดิซ์เบด
- 5) เซนเซอร์วัดความดันสัมบูรณ์ของอากาศ (Absolute air pressure sensor) จำนวน 2 ตัว ยี่ห้อ Phidgets ที่มีช่วงการวัดอยู่ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 400 กิโลปาสคาล
- 6) ฮับ (Hub) ยี่ห้อ Phidgets สำหรับเก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิ และความดันที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อไว้

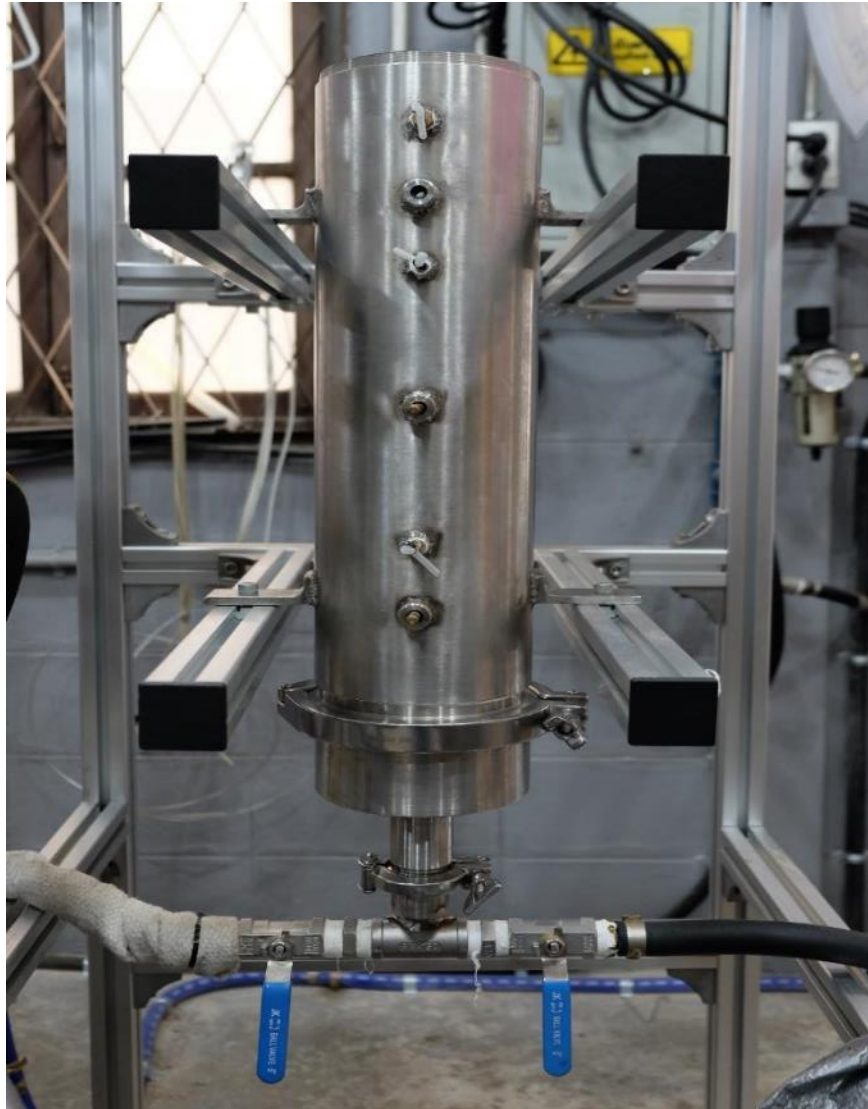
3.3.2 เครื่องปฏิกรณ์

ในรูปที่ 3.3 แสดงเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์เบดโดยส่วนของคอลัมน์ทำมาจากสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร โดยมีตะแกรงเจาะรู (Perforated plate) บริเวณฐานของคอลัมน์ซึ่งรองรับอนุภาคของแข็ง ทำหน้าที่เป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) ที่มีขนาดของรูเท่ากับ 4 มิลลิเมตร และมีร้อยละพื้นที่ช่องเปิดเท่ากับ 10.1 โดยมีแผ่นตะแกรงขนาดเมชเท่ากับ 250 และพื้นที่ช่องเปิดเท่ากับ 0.051 มิลลิเมตร วางอยู่บนตะแกรงเจาะรูเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ โดยด้านล่างของตัวกระจายของไหลจะมีกล่องลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.5 เซนติเมตร ความสูง 7 เซนติเมตร เพื่อช่วยให้อากาศป้อนเข้าคอลัมน์ฟลูอิดิซ์เบดมีความสม่ำเสมอหรือมีปริมาณอากาศเท่า ๆ กันตลอดพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์



รูปที่ 3.2 แผนภาพอุปกรณ์และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไซด์เบด

1. เครื่องอัดอากาศ
2. เครื่องปรับแรงดัน
3. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ
4. อุปกรณ์ให้ความร้อน
5. ก่อ่งลม
6. ตัวกระจายของไหล
7. คอลัมน์ฟลูอิด์ไซด์เบด
8. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
9. เซนเซอร์วัดความดันสัมบูรณ์ของอากาศ
10. สับ
11. คอมพิวเตอร์



CHULALONGKORN UNIVERSITY

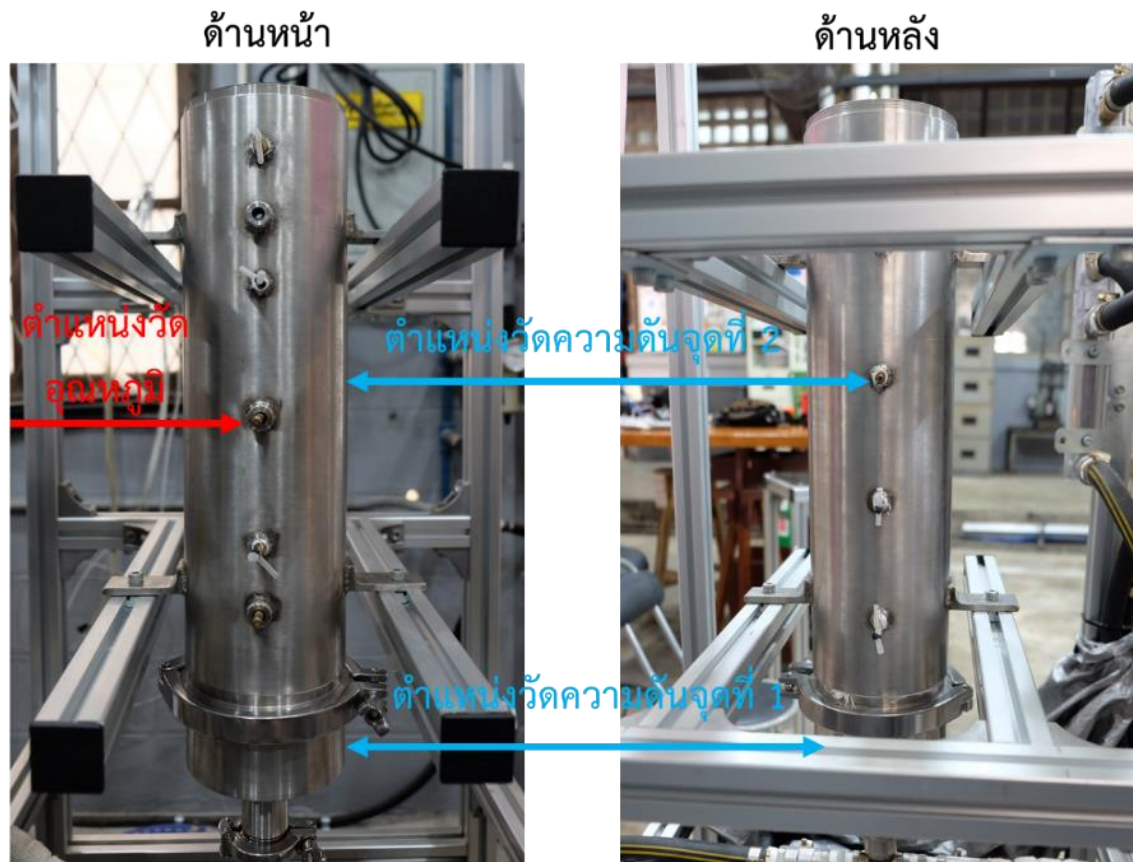
รูปที่ 3.3 คอลัมน์ฟลูอิดไซเบต

3.3.3 ระบบวัดความดัน

ในการหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน การวัดความดันจำเป็นสำหรับการหาความดันลดเพื่อนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ ในการวัดจะใช้เซนเซอร์วัดความดันสัมบูรณ์ของอากาศจำนวน 2 ตัว โดยวัดที่ตำแหน่งใต้ตัวกระจายของไหลบริเวณกล่องลม และ ตำแหน่งเหนืออนุภาคของแข็งที่ใส่ลงไปในคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยความต่างระหว่างความดัน 2 ตำแหน่งจะเป็นความดันลดคร่อมเบดที่ใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ เซนเซอร์วัดความดันแต่ละตัวจะแปลงค่าความดันที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัลส่งเข้าฮับที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยระหว่างการทดลองสามารถดูค่าความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดันผ่านโปรแกรม LabVIEW

3.3.4 ระบบวัดอุณหภูมิ

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน การเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งจะทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับให้ความร้อนแก่อากาศที่ป้อนเข้าคอลัมน์ฟลูอิดเซชันเพื่อไปเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในคอลัมน์ให้ได้ตามที่ต้องการจะศึกษา โดยการวัดอุณหภูมิจะใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเสียบเข้าไปภายในคอลัมน์ ดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 3.4 เพื่อวัดอุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง โดยค่าอุณหภูมิที่วัดได้จะถูกส่งเป็นสัญญาณดิจิทัลเข้าฮับที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยระหว่างการทดลองสามารถดูค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิผ่านโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งวัดความดัน และอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ให้ความร้อน

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชัน

- 1) บรรจุอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาด ขนาด และปริมาณของอนุภาคของแข็งตามที่ได้ออกแบบไว้ ลงในคอลัมน์ฟลูอิดิเซชัน เริ่มต้นการทดลองโดยการค่อย ๆ ปรับอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าไปในคอลัมน์ฟลูอิดิเซชันด้วยวาล์วจนกระทั่งเกิดฟลูอิดิเซชัน โดยค่าความดันจะถูกบันทึกตลอดการทดลอง เมื่อเกิดฟลูอิดิเซชันจะสังเกตได้จากค่าความดันลดจะคงที่ จึงหยุดการทดลอง โดยค่อย ๆ ปิดวาล์วเพื่อลดอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าลง ในกรณีที่ต้องการทำให้อนุภาคของแข็งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับให้ความร้อนแก่อากาศที่ป้อนเข้าคอลัมน์ฟลูอิดิเซชันเพื่อไปเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง เมื่อได้อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่ต้องการแล้ว จึงเริ่มทำการทดลองโดยการค่อย ๆ ปรับอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าไปในคอลัมน์ฟลูอิดิเซชันด้วยวาล์วจนกระทั่งเกิดฟลูอิดิเซชัน โดยค่าความดันจะถูกบันทึกตลอดการทดลอง เมื่อเกิดฟลูอิดิเซชันจะสังเกตได้จากค่าความดันลดจะคงที่ จึงหยุดการทดลอง โดยค่อย ๆ ปิดวาล์วเพื่อลดอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าลง
- 2) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ และหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชันจากการลากเส้นตรงสองเส้นขึ้นมา โดยเส้นตรงเส้นหนึ่งจะลากเส้นตามข้อมูลความดันลดที่ได้ก่อนที่แนวโน้มของข้อมูลจะไม่เป็นเส้นตรง และเส้นตรงอีกเส้นหนึ่งจะลากจากข้อมูลที่มีความดันลดมีค่าคงที่ จุดตัดระหว่างเส้นตรงสองเส้นนี้คือ ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชัน

โดยในการออกแบบการทดลองจะเป็นการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันทั้งหมด ได้แก่ การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง 5 รูปแบบ ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย 3 ขนาด ปริมาณของอนุภาคของแข็ง 3 ค่า และอุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง 3 ค่า ซึ่งทำให้เกิดจำนวนการทดลองทั้งหมด 135 การทดลอง และในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชันเฉลี่ยในแต่ละการทดลอง โดยการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การทดลองทั้งหมดในงานวิจัย

| ลำดับ | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิอนุภาคแข็ง (องศาเซลเซียส) |
|-------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0.19 | Narrow cut | 1 | 30 |
| 2 | 0.19 | Narrow cut | 1 | 75 |
| 3 | 0.19 | Narrow cut | 1 | 120 |
| 4 | 0.19 | Narrow cut | 2 | 30 |
| 5 | 0.19 | Narrow cut | 2 | 75 |
| 6 | 0.19 | Narrow cut | 2 | 120 |
| 7 | 0.19 | Narrow cut | 3 | 30 |
| 8 | 0.19 | Narrow cut | 3 | 75 |
| 9 | 0.19 | Narrow cut | 3 | 120 |
| 10 | 0.19 | Normal | 1 | 30 |
| 11 | 0.19 | Normal | 1 | 75 |
| 12 | 0.19 | Normal | 1 | 120 |
| 13 | 0.19 | Normal | 2 | 30 |
| 14 | 0.19 | Normal | 2 | 75 |
| 15 | 0.19 | Normal | 2 | 120 |
| 16 | 0.19 | Normal | 3 | 30 |
| 17 | 0.19 | Normal | 3 | 75 |
| 18 | 0.19 | Normal | 3 | 120 |
| 19 | 0.19 | Normal (high SD) | 1 | 30 |
| 20 | 0.19 | Normal (high SD) | 1 | 75 |
| 21 | 0.19 | Normal (high SD) | 1 | 120 |
| 22 | 0.19 | Normal (high SD) | 2 | 30 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิอนุภาคแข็ง (องศาเซลเซียส) |
|-------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 23 | 0.19 | Normal (high SD) | 2 | 75 |
| 24 | 0.19 | Normal (high SD) | 2 | 120 |
| 25 | 0.19 | Normal (high SD) | 3 | 30 |
| 26 | 0.19 | Normal (high SD) | 3 | 75 |
| 27 | 0.19 | Normal (high SD) | 3 | 120 |
| 28 | 0.19 | Negative skew | 1 | 30 |
| 29 | 0.19 | Negative skew | 1 | 75 |
| 30 | 0.19 | Negative skew | 1 | 120 |
| 31 | 0.19 | Negative skew | 2 | 30 |
| 32 | 0.19 | Negative skew | 2 | 75 |
| 33 | 0.19 | Negative skew | 2 | 120 |
| 34 | 0.19 | Negative skew | 3 | 30 |
| 35 | 0.19 | Negative skew | 3 | 75 |
| 36 | 0.19 | Negative skew | 3 | 120 |
| 37 | 0.19 | Positive skew | 1 | 30 |
| 38 | 0.19 | Positive skew | 1 | 75 |
| 39 | 0.19 | Positive skew | 1 | 120 |
| 40 | 0.19 | Positive skew | 2 | 30 |
| 41 | 0.19 | Positive skew | 2 | 75 |
| 42 | 0.19 | Positive skew | 2 | 120 |
| 43 | 0.19 | Positive skew | 3 | 30 |
| 44 | 0.19 | Positive skew | 3 | 75 |
| 45 | 0.19 | Positive skew | 3 | 120 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิอนุภาคแข็ง (องศาเซลเซียส) |
|-------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 46 | 0.46 | Narrow cut | 1 | 30 |
| 47 | 0.46 | Narrow cut | 1 | 75 |
| 48 | 0.46 | Narrow cut | 1 | 120 |
| 49 | 0.46 | Narrow cut | 2 | 30 |
| 50 | 0.46 | Narrow cut | 2 | 75 |
| 51 | 0.46 | Narrow cut | 2 | 120 |
| 52 | 0.46 | Narrow cut | 3 | 30 |
| 53 | 0.46 | Narrow cut | 3 | 75 |
| 54 | 0.46 | Narrow cut | 3 | 120 |
| 55 | 0.46 | Normal | 1 | 30 |
| 56 | 0.46 | Normal | 1 | 75 |
| 57 | 0.46 | Normal | 1 | 120 |
| 58 | 0.46 | Normal | 2 | 30 |
| 59 | 0.46 | Normal | 2 | 75 |
| 60 | 0.46 | Normal | 2 | 120 |
| 61 | 0.46 | Normal | 3 | 30 |
| 62 | 0.46 | Normal | 3 | 75 |
| 63 | 0.46 | Normal | 3 | 120 |
| 64 | 0.46 | Normal (high SD) | 1 | 30 |
| 65 | 0.46 | Normal (high SD) | 1 | 75 |
| 66 | 0.46 | Normal (high SD) | 1 | 120 |
| 67 | 0.46 | Normal (high SD) | 2 | 30 |
| 68 | 0.46 | Normal (high SD) | 2 | 75 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิอนุภาคแข็ง (องศาเซลเซียส) |
|-------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 69 | 0.46 | Normal (high SD) | 2 | 120 |
| 70 | 0.46 | Normal (high SD) | 3 | 30 |
| 71 | 0.46 | Normal (high SD) | 3 | 75 |
| 72 | 0.46 | Normal (high SD) | 3 | 120 |
| 73 | 0.46 | Negative skew | 1 | 30 |
| 74 | 0.46 | Negative skew | 1 | 75 |
| 75 | 0.46 | Negative skew | 1 | 120 |
| 76 | 0.46 | Negative skew | 2 | 30 |
| 77 | 0.46 | Negative skew | 2 | 75 |
| 78 | 0.46 | Negative skew | 2 | 120 |
| 79 | 0.46 | Negative skew | 3 | 30 |
| 80 | 0.46 | Negative skew | 3 | 75 |
| 81 | 0.46 | Negative skew | 3 | 120 |
| 82 | 0.46 | Positive skew | 1 | 30 |
| 83 | 0.46 | Positive skew | 1 | 75 |
| 84 | 0.46 | Positive skew | 1 | 120 |
| 85 | 0.46 | Positive skew | 2 | 30 |
| 86 | 0.46 | Positive skew | 2 | 75 |
| 87 | 0.46 | Positive skew | 2 | 120 |
| 88 | 0.46 | Positive skew | 3 | 30 |
| 89 | 0.46 | Positive skew | 3 | 75 |
| 90 | 0.46 | Positive skew | 3 | 120 |
| 91 | 0.92 | Narrow cut | 1 | 30 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิอนุภาคแข็ง (องศาเซลเซียส) |
|-------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 92 | 0.92 | Narrow cut | 1 | 75 |
| 93 | 0.92 | Narrow cut | 1 | 120 |
| 94 | 0.92 | Narrow cut | 2 | 30 |
| 95 | 0.92 | Narrow cut | 2 | 75 |
| 96 | 0.92 | Narrow cut | 2 | 120 |
| 97 | 0.92 | Narrow cut | 3 | 30 |
| 98 | 0.92 | Narrow cut | 3 | 75 |
| 99 | 0.92 | Narrow cut | 3 | 120 |
| 100 | 0.92 | Normal | 1 | 30 |
| 101 | 0.92 | Normal | 1 | 75 |
| 102 | 0.92 | Normal | 1 | 120 |
| 103 | 0.92 | Normal | 2 | 30 |
| 104 | 0.92 | Normal | 2 | 75 |
| 105 | 0.92 | Normal | 2 | 120 |
| 106 | 0.92 | Normal | 3 | 30 |
| 107 | 0.92 | Normal | 3 | 75 |
| 108 | 0.92 | Normal | 3 | 120 |
| 109 | 0.92 | Normal (high SD) | 1 | 30 |
| 110 | 0.92 | Normal (high SD) | 1 | 75 |
| 111 | 0.92 | Normal (high SD) | 1 | 120 |
| 112 | 0.92 | Normal (high SD) | 2 | 30 |
| 113 | 0.92 | Normal (high SD) | 2 | 75 |
| 114 | 0.92 | Normal (high SD) | 2 | 120 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิอนุภาคแข็ง (องศาเซลเซียส) |
|-------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 115 | 0.92 | Normal (high SD) | 3 | 30 |
| 116 | 0.92 | Normal (high SD) | 3 | 75 |
| 117 | 0.92 | Normal (high SD) | 3 | 120 |
| 118 | 0.92 | Negative skew | 1 | 30 |
| 119 | 0.92 | Negative skew | 1 | 75 |
| 120 | 0.92 | Negative skew | 1 | 120 |
| 121 | 0.92 | Negative skew | 2 | 30 |
| 122 | 0.92 | Negative skew | 2 | 75 |
| 123 | 0.92 | Negative skew | 2 | 120 |
| 124 | 0.92 | Negative skew | 3 | 30 |
| 125 | 0.92 | Negative skew | 3 | 75 |
| 126 | 0.92 | Negative skew | 3 | 120 |
| 127 | 0.92 | Positive skew | 1 | 30 |
| 128 | 0.92 | Positive skew | 1 | 75 |
| 129 | 0.92 | Positive skew | 1 | 120 |
| 130 | 0.92 | Positive skew | 2 | 30 |
| 131 | 0.92 | Positive skew | 2 | 75 |
| 132 | 0.92 | Positive skew | 2 | 120 |
| 133 | 0.92 | Positive skew | 3 | 30 |
| 134 | 0.92 | Positive skew | 3 | 75 |
| 135 | 0.92 | Positive skew | 3 | 120 |

3.4.2 การสร้างสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย

สำหรับการสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน จะเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาใช้ในแบบจำลองการถดถอย ใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และ MATLAB สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยมีรูปแบบทั่วไปของสมการ เป็นสมการไร้หน่วยที่นำตัวแปรที่ส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจัดเป็นกลุ่มของตัวแปรไร้หน่วย ซึ่งเป็นรูปแบบสมการเดียวกันกับรูปแบบสมการของ Rasteh และคณะ [36] แต่ทำการปรับเปลี่ยนกลุ่มของตัวแปรไร้หน่วยเพื่อให้สอดคล้องกับการศึกษาผลของการใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง และ ผลของสภาวะการดำเนินการต่าง ๆ แสดงดังสมการที่ (3.1)

$$Re_{mf} = b_1(Ar)^{b_2} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{b_3} \left(\frac{d_p}{D_0}\right)^{b_4} (SD)^{b_5} (2 + Skewness)^{b_6} \quad (3.1)$$

เมื่อ Re_{mf} คือ ตัวเลขไร้หน่วยเรย์โนลด์ที่ภาวะความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

Ar คือ ตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส ที่มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.2)

$$Ar = \frac{g\rho_g(\rho_s - \rho_g)d_p^3}{\mu^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

μ คือ ความหนืดไดนามิกของอากาศ (ปาสคาลต่อวินาที)

$\frac{H_0}{D_0}$ คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอเซชันเบด (ไม่มีหน่วย)

$\frac{d_p}{D_0}$ คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอเซชันเบด (ไม่มีหน่วย)

SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง (ไม่มีหน่วย)

Skewness คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง (ไม่มีหน่วย)

โดยความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันสามารถหาได้จากการแปลงจากความสัมพันธ์ของตัวเลขไร้หน่วยเรย์โนลด์ที่ภาวะความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน แสดงดังสมการที่ (3.3)

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g d_p U_{mf}}{\mu} \quad (3.3)$$

นอกจากนี้การที่อุณหภูมิของอากาศป้อนเข้าสูงขึ้นจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่น และความหนืดของอากาศซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น และความหนืดของอากาศ จะใช้สมการของ Subramani และคณะ [23] ในการคำนวณค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงนี้ ดังสมการที่ (3.4) และ (3.5)

$$\rho_g = 1.2 \frac{293}{T} \quad (3.4)$$

เมื่อ ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

$$\mu = 1.46 \times 10^{-6} \frac{T^{1.504}}{T+120} \quad (3.5)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดไดนามิกของอากาศ (ปาสคาลต่อวินาที)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

โดยรูปแบบทั่วไปของสมการเป็นสมการไร้หน่วยที่ในแต่ละพจน์ของกลุ่มตัวแปรในสหสัมพันธ์นั้น จะแสดงถึงสภาวะการดำเนินการต่าง ๆ ที่จะส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน สำหรับพจน์ของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสจะแสดงถึงผลของการเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากผลต่างของความหนาแน่น ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแรงภายนอกที่กระทำต่อแรงหนืดภายใน โดยพจน์ของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสถือว่าเป็นตัวแทนสำหรับชนิดอนุภาคของแข็ง และของไหลที่ใช้ในระบบ เนื่องจากการเปลี่ยนชนิดของอนุภาคของแข็ง และของไหลจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนไป นอกจากนี้เมื่อระบบดำเนินการที่อุณหภูมิสูง ก็จะส่งผลต่อค่าความหนาแน่น และความหนืดของของไหลที่จะ

เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิด้วย สำหรับพจน์ของอัตราส่วนระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอซ์เบต จะแสดงถึงปริมาณของอนุภาคของแข็งเริ่มต้นที่ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบต และขนาดของคอลัมน์ฟลูอิดไอซ์เบตซึ่งวัดผ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง สำหรับพจน์ของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอซ์เบต จะแสดงถึงขนาดของอนุภาคของแข็งในระบบ และขนาดของคอลัมน์ฟลูอิดไอซ์เบต เนื่องจากการเปลี่ยนขนาดอนุภาคของแข็งจะส่งผลต่อการเกิดฟลูอิดไอซ์เซชันที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับพจน์ของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง และค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง จะแสดงถึงลักษณะของรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้ในระบบ

เมื่อได้สหสัมพันธ์แล้ว จะนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการใช้สหสัมพันธ์อื่น ๆ ของงานวิจัยที่ผ่านมาในการทำนายความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอซ์เซชัน รวมไปถึงการนำสหสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้กับข้อมูลการทดลองอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของสหสัมพันธ์ที่ได้

3.4.3 การทำนายความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอซ์เซชันด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

ในงานวิจัยนี้จะใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2018a ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งจะใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ย้อนกลับ ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ในโปรแกรมนี้แล้ว โดยจะต้องระบุองค์ประกอบบางชนิด เช่น กลุ่มของรูปแบบข้อมูลขาเข้า และรูปแบบเป้าหมายที่ต้องการ จำนวนของข้อมูลฝึกสอน ข้อมูลทดสอบ และทดลอง เป็นต้น ซึ่งเป้าหมายที่ต้องการจากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมคือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอซ์เซชัน โดยมีขั้นตอนสำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมดังนี้

- 1) กำหนดข้อมูลขาเข้า และเป้าหมาย โดยข้อมูลขาเข้าสำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นเมตริกซ์ขนาด 135×5 ซึ่งเป็นข้อมูลของ 5 ตัวแปร คือ Ar , $\frac{H_0}{D_0}$, $\frac{d_p}{D_0}$, SD และ $Skewness$ ตัวแปรละ 135 ข้อมูล และข้อมูลเป้าหมายจะเป็นเมตริกซ์ขนาด 135×1 ซึ่งเป็นข้อมูลของค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอซ์เซชันที่ได้จากการทดลองจำนวน 135 ชุดการทดลอง โดยมีจำนวนโหนดสำหรับข้อมูลขาเข้า และข้อมูลขาออกเท่ากับ 5 และ 1 โหนด ตามลำดับ

- 2) กำหนดจำนวนข้อมูลที่จะนำมาเข้ากระบวนการ Training Validation และ Testing โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าตั้งต้นของโปรแกรมคือ ร้อยละ 70 15 และ 15 ของจำนวนข้อมูลทั้งหมดตามลำดับ
- 3) กำหนดจำนวนชั้นแอบแฝง โดยจะทำการหาจำนวนชั้นแอบแฝงที่เหมาะสมสำหรับการฝึกสอน เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error, MSE) ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเป็นดัชนีวัดความแม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม
- 4) กำหนดกระบวนการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอส โดยในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการตั้งต้นของโปรแกรมคือ วิธี Levenberg Maquard Algorithm
- 5) ทำการฝึกสอน จากนั้นตรวจสอบจำนวนชั้นแอบแฝงที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดหรือเริ่มมีค่าคงที่ จึงจะได้แบบจำลองสำหรับการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน โดยมีรูปแบบทั่วไปของสมการ ดังแสดงในสมการที่ (3.6)

$$Output = purelin \left(\sum_{j=1}^n \left[LW_{1,j} \left(tansig \left(\sum_{i=1}^5 IW_{j,i} p_i + B_{1,j} \right) \right) \right] + B_2 \right) \quad (3.6)$$

เมื่อ p_i คือ ข้อมูลขาเข้า

B_1 คือ ไบแอสของข้อมูลขาเข้าที่ 1 ถึง นิวรอนที่ j ในชั้นแอบแฝง

B_2 คือ ไบแอสของชั้นขาออก

$IW_{j,i}$ คือ น้ำหนักของข้อมูลขาเข้าที่ i ถึง ชั้นแอบแฝงที่ j

$LW_{1,j}$ คือ น้ำหนักของนิวรอนที่ j ในชั้นแอบแฝง ถึง ชั้นขาออก

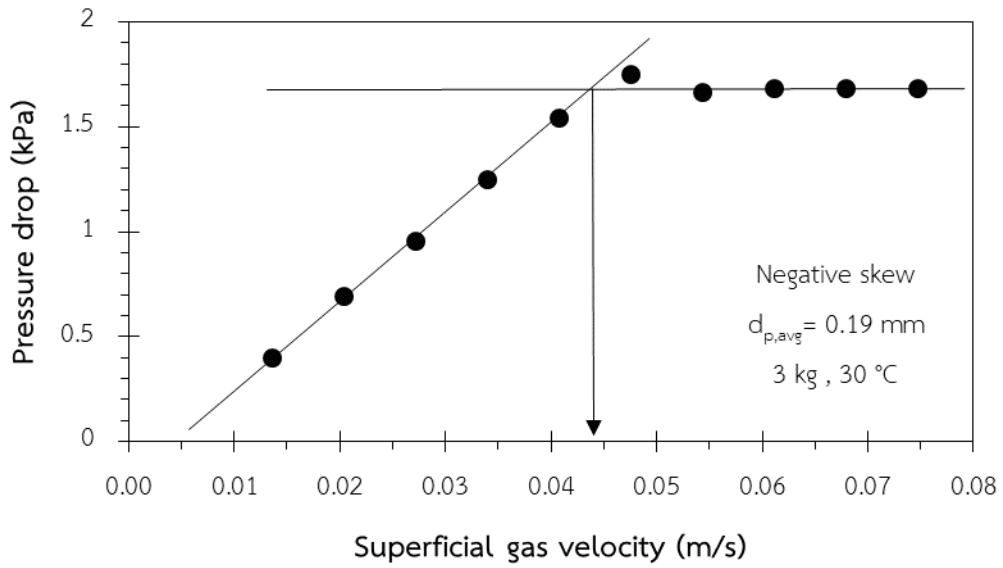
เมื่อได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแล้ว จะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ได้จากการทดลอง และเปรียบเทียบกับค่าจากการทำนายโดยใช้สหสัมพันธ์ที่สร้างจากแบบจำลองการถดถอย รวมไปถึงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับข้อมูลการทดลองอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

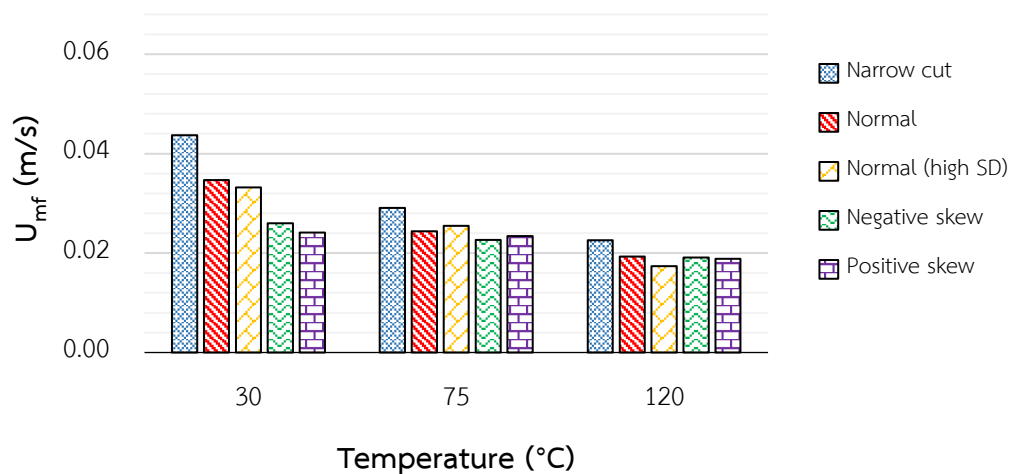
ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจะหาได้จากการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกที่มีความเร็วป้อนเข้ากระบวนการต่ำ ๆ ค่าความดันลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ ซึ่งเป็นช่วงที่เบตยังไม่มีอาการขยับตัวหรืออยู่ในภาวะเบตนิ่ง อธิบายได้จากพฤติกรรมกราฟที่เพิ่มขึ้นคือ อนุภาคของแข็งจะมีแรงเสียดทานระหว่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.8 ของ Ergun [15] และในช่วงหลังที่ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการมีค่าสูง จะเห็นได้ว่าความดันลดจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มความเร็วป้อนเข้ากระบวนการต่อ ซึ่งเป็นช่วงที่เบตในกระบวนการเกิดการขยับตัว และไม่มีแรงเสียดทานระหว่างกัน และอยู่ในสภาวะฟลูอิดไอเซชัน โดยจุดเริ่มต้นของความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่ทำให้ความดันลดมีค่าคงที่ คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน สำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาด ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจะไม่ใช้ ณ จุดที่ความดันลดเริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากอนุภาคของแข็งจะเริ่มเข้าสู่สภาวะฟลูอิดไอเซชันไม่พร้อมกันทั้งเบต ดังนั้นวิธีการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจะทำได้โดยการลากเส้นตรงสองเส้นขึ้นมา โดยเส้นตรงเส้นหนึ่งจะลากเส้นตามข้อมูลความดันลดที่ได้ก่อนที่แนวโน้มของข้อมูลจะไม่เป็นเส้นตรง และเส้นตรงอีกเส้นหนึ่งจะลากจากข้อมูลที่ความดันลดมีค่าคงที่ โดยจุดตัดระหว่างเส้นตรงสองเส้นนี้คือค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน นอกจากนี้ ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่เกิดจากกระบวนการฟลูอิดไอเซชันจากการใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง จะแตกต่างจากกระบวนการฟลูอิดไอเซชันแบบอุดมคติอยู่เล็กน้อย โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของความดันลดในกระบวนการจะมีค่ามากกว่าความดันลดที่ภาวะคงที่เล็กน้อย ก่อนที่ความดันลดดังกล่าวจะตกกลับลงมาจนถึงค่าความดันลดที่ภาวะคงที่ ซึ่งเกิดจากในกระบวนการฟลูอิดไอเซชันจริง เบตจะมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งแบบไม่เป็นระเบียบ ทำให้ต้องมีการสูญเสียพลังงานหรือความดันลดไปกับการเรียงตัวของอนุภาคของแข็งดังกล่าวก่อนที่จะเริ่มกระบวนการฟลูอิดไอเซชัน [8]



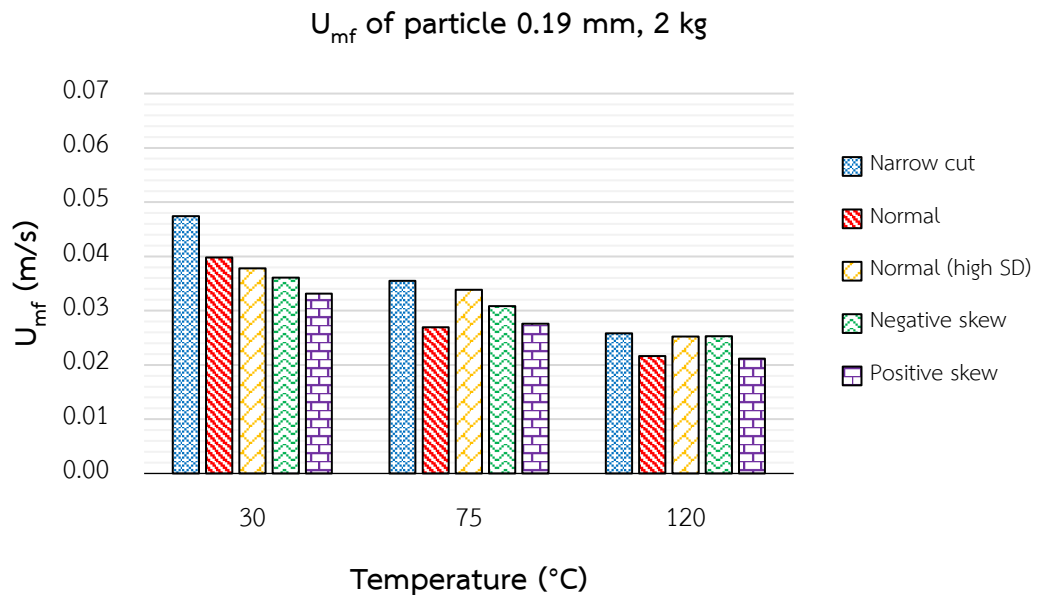
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ

ด้วยวิธีการดังกล่าวจึงหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดได้ รวมไปถึงที่ภาวะดำเนินการต่าง ๆ ได้ โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2 ถึง 4.10

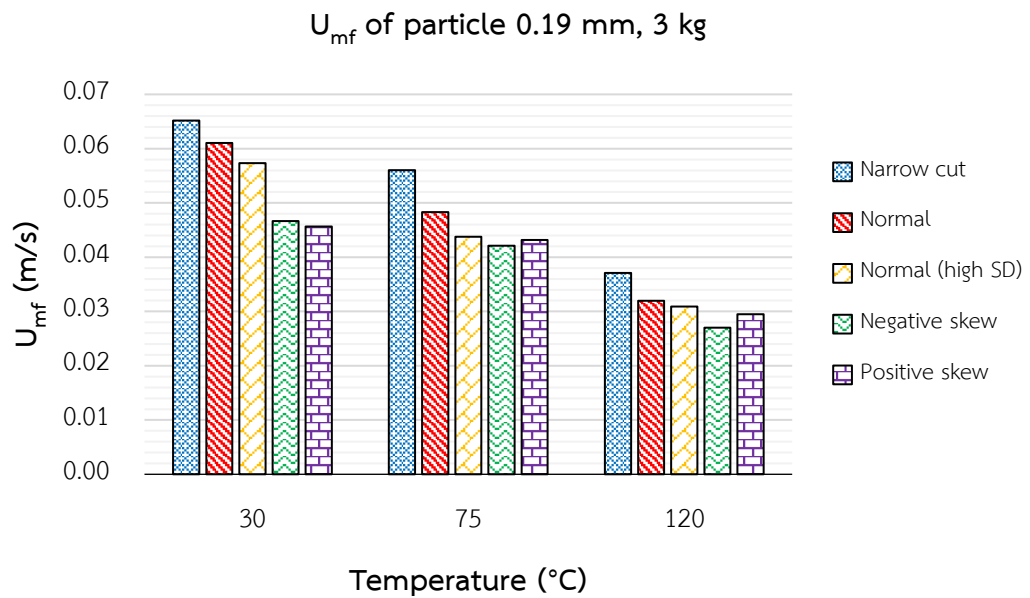
U_{mf} of particle 0.19 mm, 1 kg



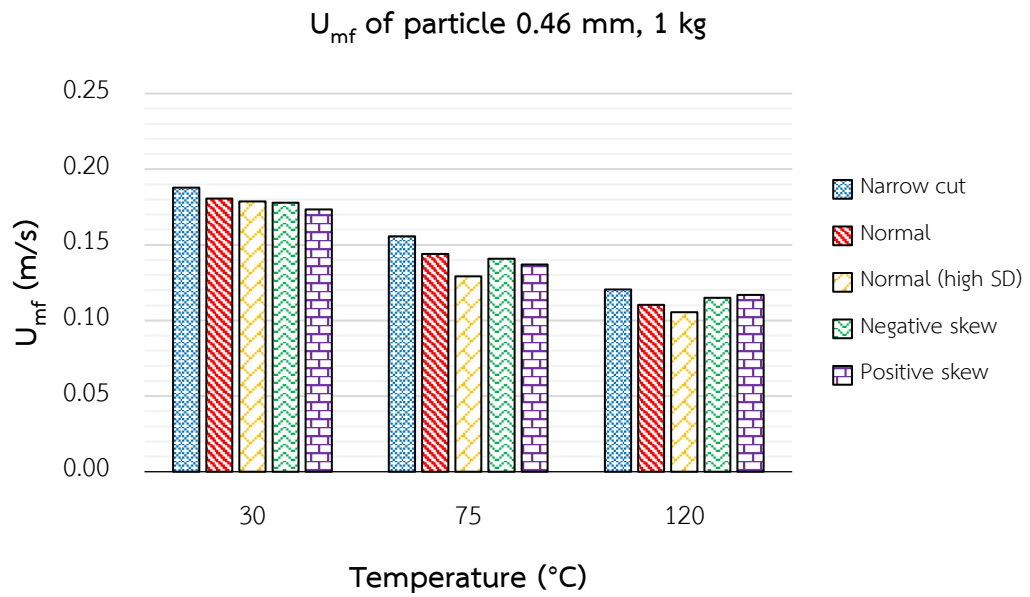
รูปที่ 4.2 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.19 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 1 กิโลกรัม



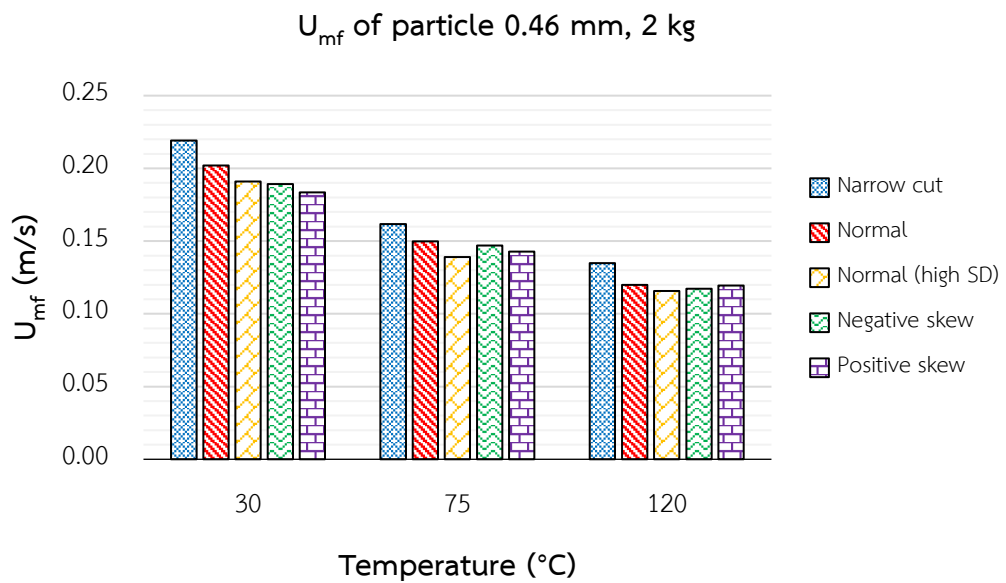
รูปที่ 4.3 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.19 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 2 กิโลกรัม



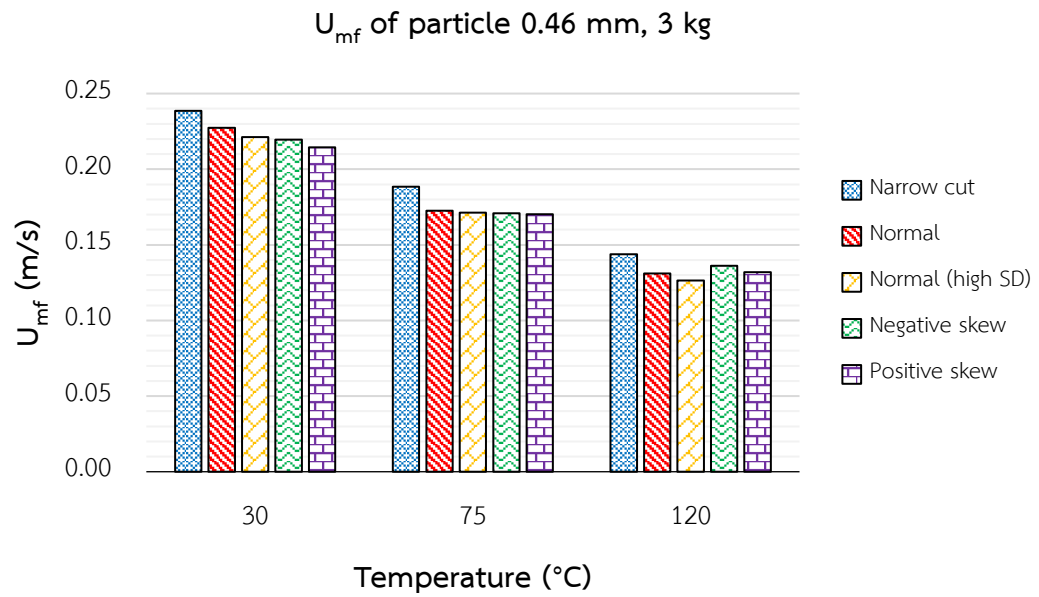
รูปที่ 4.4 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.19 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 3 กิโลกรัม



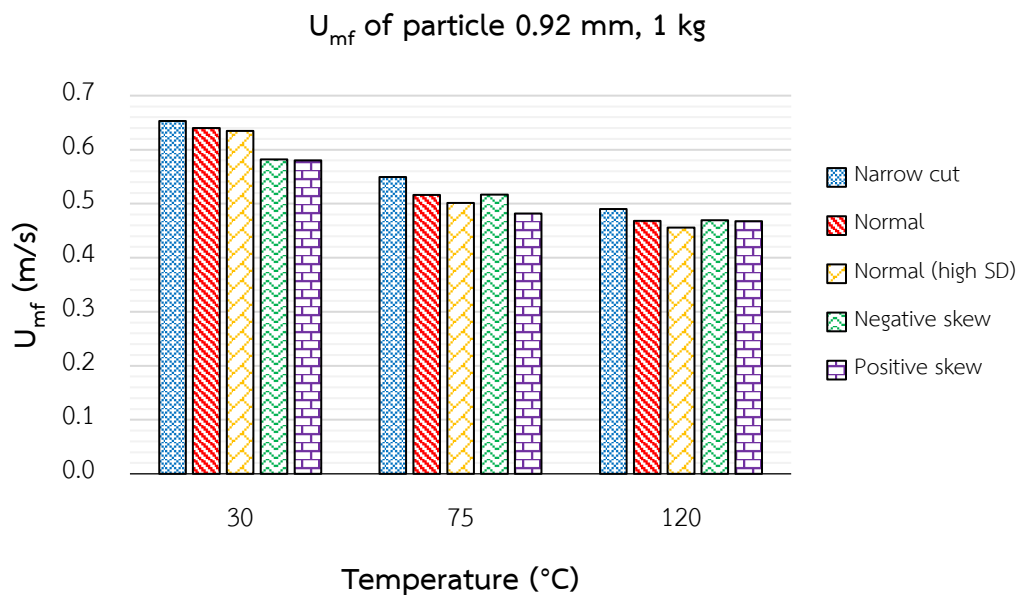
รูปที่ 4.5 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.46 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 1 กิโลกรัม



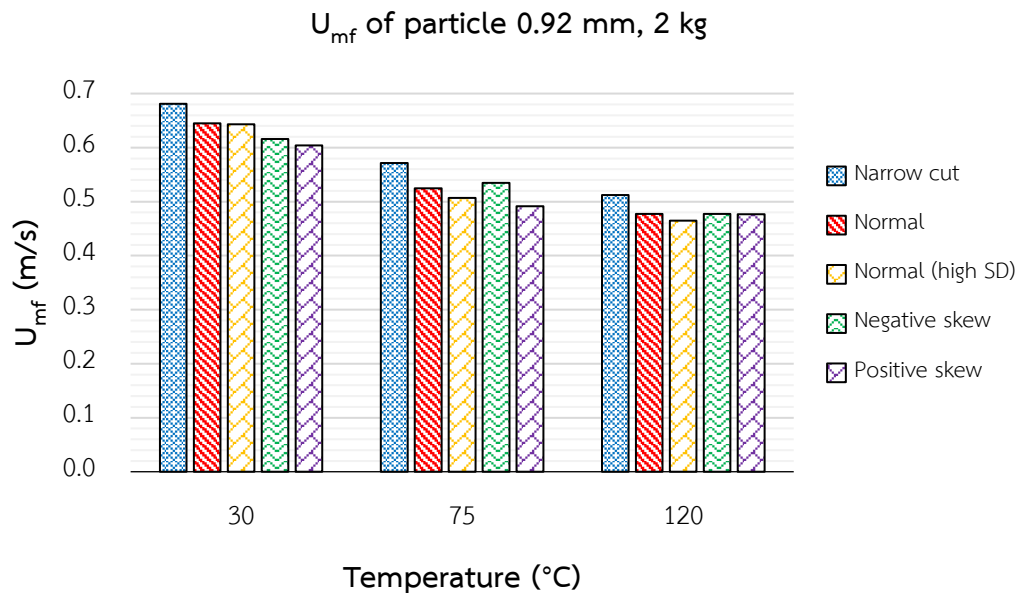
รูปที่ 4.6 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.46 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 2 กิโลกรัม



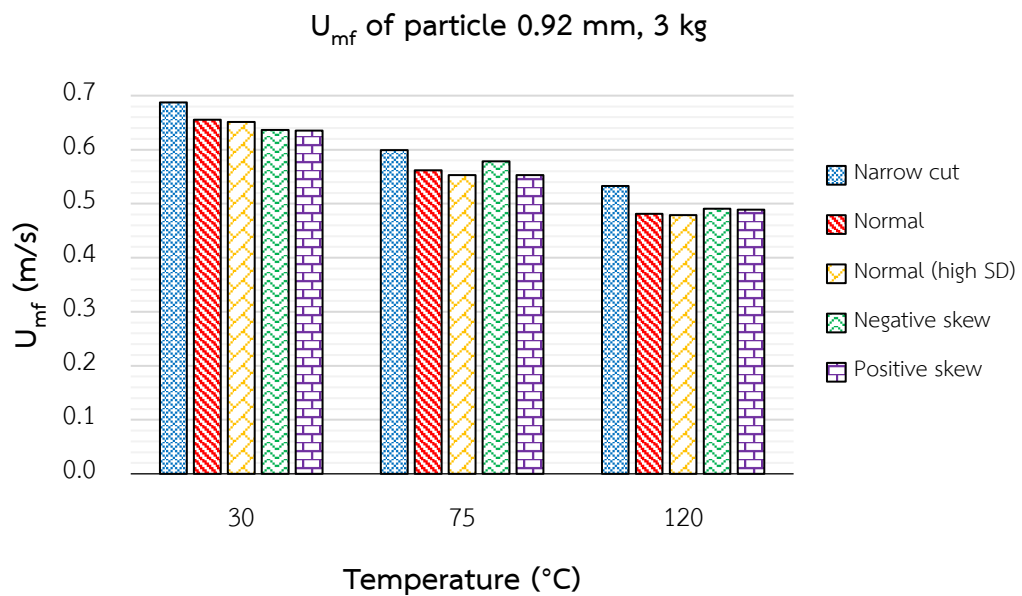
รูปที่ 4.7 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.46 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 3 กิโลกรัม



รูปที่ 4.8 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.92 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 1 กิโลกรัม



รูปที่ 4.9 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดาเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.92 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 2 กิโลกรัม



รูปที่ 4.10 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดาเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.92 มิลลิเมตร และมีปริมาณ 3 กิโลกรัม

4.1.1 ผลของการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.2 ถึง 4.10 ที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดกว้าง ได้แก่ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ การกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง การกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ และ การกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก มีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแคบ เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเท่ากัน ในทุกปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา สาเหตุที่ทำให้ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดกว้างต่ำกว่ารูปแบบการกระจายขนาดแคบเพราะผลของการใส่อนุภาคขนาดเล็กลงไปในระบบมากขึ้นจะช่วยให้การผสมภายในดีขึ้น และช่วยให้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเดเซชันตามที Matheson ได้กล่าวไว้ [40] โดยลักษณะที่เกิดขึ้นของการใส่อนุภาคขนาดเล็กลงไปในระบบมากขึ้นคือ เมื่อระบบเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่าจะเกิดฟลูอิดไอเดเซชันได้ก่อนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ปั่นป่วน และไปชนกับอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่หนึ่ง ซึ่งเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่หนึ่ง รวมถึงเป็นการเพิ่มแรงต้านการเคลื่อนที่ (drag force) ของอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากในระบบฟลูอิดไอเดเซชันเมื่อพิจารณาแรงที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งแต่ละอนุภาค จะพบว่า แรงต้านการเคลื่อนที่ และแรงลอยตัวจะมีทิศขึ้น และมีทิศตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็งนั้น ซึ่งการเพิ่มแรงต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดใหญ่ จะเป็นการช่วยให้อนุภาคขนาดใหญ่เกิดฟลูอิดไอเดเซชันได้เร็วขึ้น และทำให้ทั้งระบบของอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดกว้างเกิดฟลูอิดไอเดเซชันได้ง่ายกว่าระบบของอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดแคบ ซึ่งหมายถึงมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันต่ำกว่านั่นเอง ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีตที่ผ่านมา [37]

เมื่อเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ และการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง พบว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงมีค่าต่ำกว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเท่ากัน ในทุกปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา ถึงแม้ว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงจะมีปริมาณของอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ที่สูงกว่าในรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ ซึ่งหมายถึงความเร็วต่ำสุด

ในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกจะสูงกว่า อย่างไรก็ตามในรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงก็มีปริมาณของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่สูงกว่าในรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติเช่นกัน จากเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ด้านบนเกี่ยวกับการที่มีปริมาณอนุภาคขนาดเล็กสูงกว่าจะช่วยให้เกิดฟลูอิดไฮดรอลิกได้เร็วขึ้น จึงทำให้ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงมีค่าต่ำกว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง และรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ พบว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ และการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง มีค่าสูงกว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ ทั้งการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ และการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเท่ากัน ในทุกปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา เนื่องจากรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบมีอนุภาคของแข็งขนาดเล็กกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่มีอยู่ในรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ และการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง ขณะที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวกกลับมีค่าต่ำกว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบแม้ว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวกจะมีปริมาณของอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่กว่า เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีอยู่ในรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ อย่างไรก็ตาม รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวกมีปริมาณของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของอนุภาคขนาดเล็กที่มีอยู่ในรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ จึงทำให้มีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกที่ต่ำกว่า ซึ่งผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jiang และคณะ [39] เนื่องจาก ในการศึกษาของ Jiang การเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกของรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ และ รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก เปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยไม่เท่ากัน จึงทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบผลจากการใช้รูปแบบการกระจายขนาดที่แตกต่างกันที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกเพียงอย่างเดียวได้ นอกจากนี้ รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่ได้ควบคุมค่าความเบ้ (Skewness) และค่าความโด่ง (Kurtosis) ของการกระจายขนาดที่ใช้ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อแนวโน้มของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกจากผลการทดลองที่ได้ และทำให้ไม่สามารถอธิบายผลจาก

การใช้กระจายขนาดแบบเบ้ที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันผ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้เพียงอย่างเดียวได้ อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าการที่ระบบมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะส่งผลต่อฟลูอิดเซชันค่อนข้างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณาการใช้การกระจายขนาดอนุภาคในการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 75 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแคบมีค่าสูงกว่ารูปแบบการกระจายขนาดกว้างทุกรูปแบบ เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเท่ากัน ในทุกปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา แต่เมื่อเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดกว้างพบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน เป็นผลจากการใช้ปริมาณอนุภาคของแข็งในแต่ละช่วงร้อนผ่านตะแกรงที่ไม่เท่ากันในการเตรียมรูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการศึกษา รวมถึงผลของอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด และความหนาแน่นของของไหลน้อยลง จึงทำให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนในแต่ละรูปแบบการกระจายขนาด และมีแนวโน้มที่แตกต่างจากที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

4.1.2 ผลของขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.2 ถึง 4.10 พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น ในทุกรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาค ปริมาณของอนุภาคของแข็ง และ อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา ซึ่งเหตุผลคือ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก และ ขนาดใหญ่ ที่ถูกใส่ไว้ในคอลัมน์ของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยความสูงเท่ากัน จะพบว่าเบตของคอลัมน์ที่ใส่อนุภาคขนาดเล็กจะมีสัดส่วนช่องว่างที่ต่ำกว่า ทำให้สามารถใส่อนุภาคของแข็งได้ในปริมาณที่มากกว่า จึงทำให้ความดันลดในระบบสูงขึ้น อีกทั้งการที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่มากจะช่วยให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยให้อนุภาคของแข็งเกิดฟลูอิดเซชันได้เร็วขึ้น [33, 41] โดยเมื่อพิจารณาพจน์ของขนาดอนุภาคของแข็ง (d_p) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสมการแรงต้านการเคลื่อนที่ของ Ergun [15]

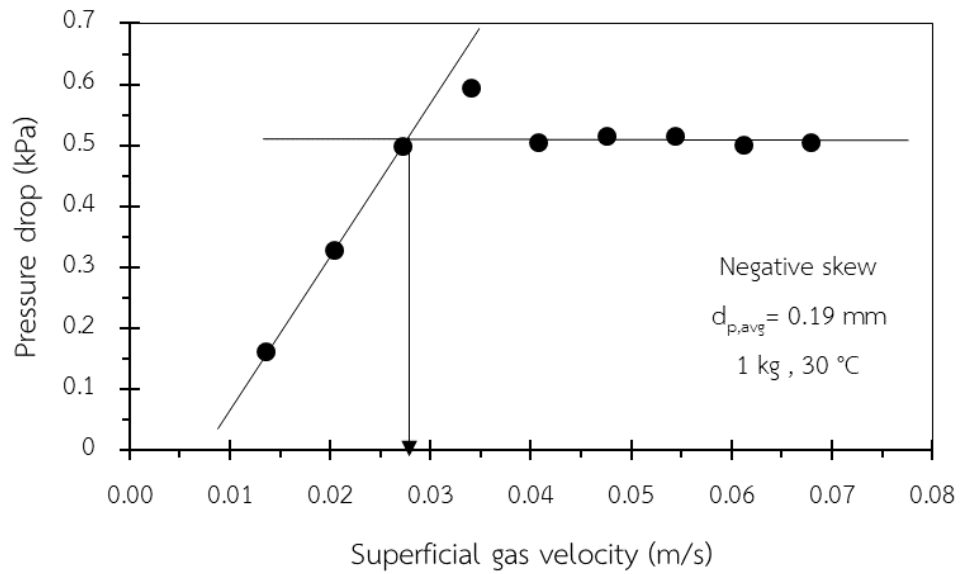
$$\beta = \frac{150\varepsilon_s(1-\varepsilon_g)\mu g}{\varepsilon_g(\phi d_p)^2} + \frac{1.75\rho_g\varepsilon_s}{\phi d_p} |u_s - u_g| \quad (4.1)$$

| | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|
| เมื่อ β | คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร วินาที) |
| \mathcal{E}_s | คือ สัดส่วนช่องว่างของของแข็งโดยปริมาตรในกระบวนการ (ไม่มีหน่วย) |
| \mathcal{E}_g | คือ สัดส่วนช่องว่างของแก๊สโดยปริมาตรในกระบวนการ (ไม่มีหน่วย) |
| u_s | คือ ความเร็วของอนุภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที) |
| u_g | คือ ความเร็วของแก๊ส (เมตรต่อวินาที) |

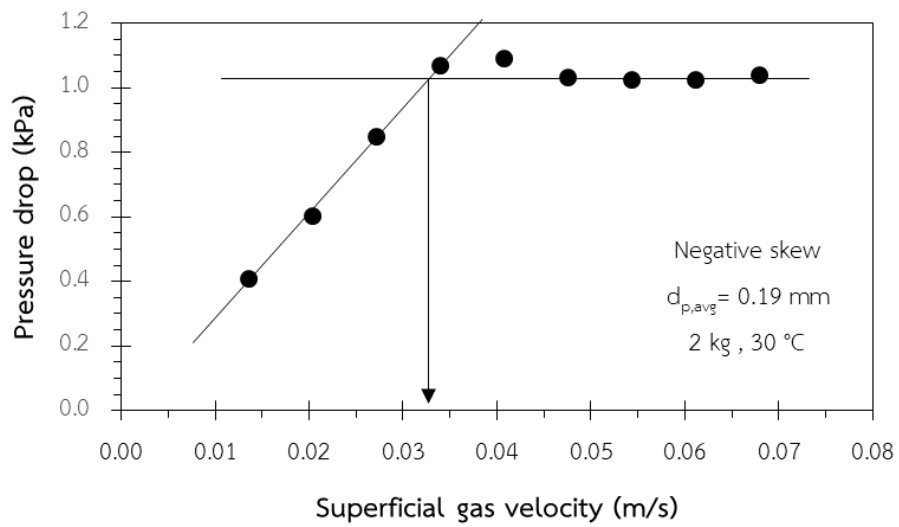
จะเห็นว่าพจน์ของขนาดอนุภาคของแข็งเป็นตัวหารของสมการ ซึ่งการที่อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กลง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงอนุภาคขนาดเล็กจะเกิดฟลูอิดไอเซชันได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งก็คือค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันของอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่

4.1.3 ผลของปริมาณอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

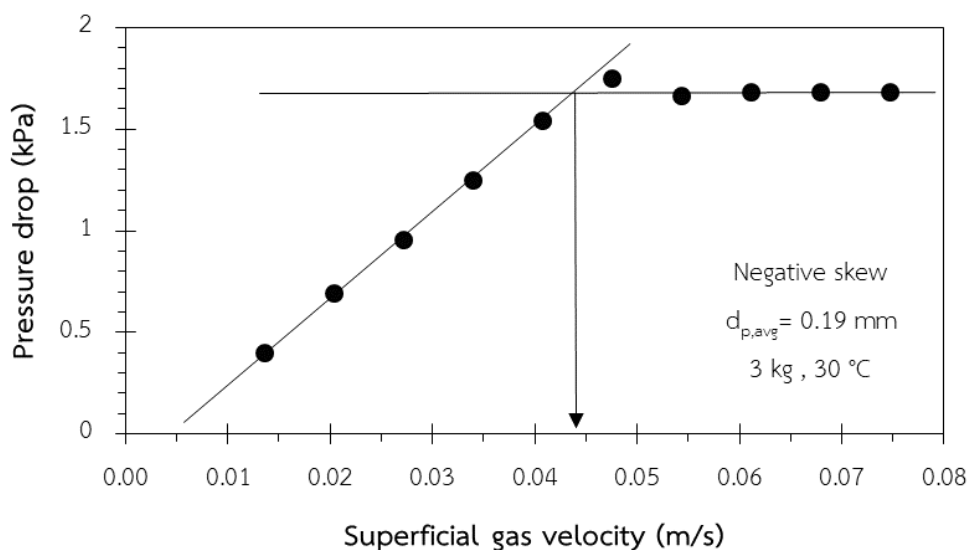
เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.2 ถึง 4.10 พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคของแข็งโดยน้ำหนักหรือปริมาณเบตเริ่มต้นในคอลัมน์ฟลูอิดไอเซชันสูงขึ้น ในทุกรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาค ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย และอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา ซึ่งเหตุผลคือการศึกษาที่ปริมาณของอนุภาคของแข็งเริ่มต้นโดยน้ำหนักมีปริมาณสูงจะก่อให้เกิดความดันลดในระบบที่มากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 ทำให้ต้องป้อนของไหลเข้าระบบด้วยอัตราการไหลที่มากขึ้น ซึ่งก็คือต้องใช้ความเร็วของของไหลป้อนเข้าที่มากขึ้น จึงจะทำให้อนุภาคของแข็งเกิดฟลูอิดไอเซชันได้ทั้งเบต เป็นเหตุผลให้ปริมาณอนุภาคของแข็งโดยน้ำหนักมีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน [7]



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 กิโลกรัม



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตก และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 2 กิโลกรัม



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วจุดเข้ากระบวนกรที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 3 กิโลกรัม

4.1.4 ผลของอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.2 ถึง 4.10 พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคของแข็งสูงขึ้น ในทุกรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาค ขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ย และปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา โดยสาเหตุของการที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีค่าต่ำลงเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น และความหนืดของของไหลเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร ตามการศึกษาของ Goo [42] และ Subramani [23] เมื่ออุณหภูมิของของไหลมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่นของของไหลมีค่าต่ำลง ขณะที่ความหนืดของของไหลจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลจะส่งผลต่อแรงต้านการเคลื่อนที่ที่กระทำบนอนุภาคของแข็งให้มีค่าสูงขึ้น ตามกฎของสโตกส์ (Stokes' law) [43] ส่งผลให้อนุภาคของแข็งเกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันในแต่ละปริมาณอนุภาคของแข็ง ที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 75 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแคบมีค่าสูงกว่ารูปแบบการกระจายขนาดกว้างทุกรูปแบบ เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเท่ากัน ในทุก

ปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา แต่เมื่อเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดกว้างพบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน เป็นผลจากการใช้ปริมาณอนุภาคของแข็งในแต่ละช่วงร้อนผ่านตะแกรงที่ไม่เท่ากันในการเตรียมรูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการศึกษา รวมถึงผลของอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด และความหนาแน่นของของไหลน้อยลง จึงทำให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนในแต่ละรูปแบบการกระจายขนาด และมีแนวโน้มที่แตกต่างจากที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส



4.2 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการ

ถดถอย

การสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาใช้ในแบบจำลองการถดถอยใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และ MATLAB ในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไฮดรอลิก โดยมีตัวแปรตาม 1 ตัว ก็คือ Re_{mf} และ ตัวแปรอิสระ 5 ตัว ได้แก่ Ar , $\frac{H_0}{D_0}$, $\frac{d_p}{D_0}$, SD และ $Skewness$ โดยสหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.2

$$Re_{mf} = 0.0007(Ar)^{0.99} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.057} \left(\frac{d_p}{D_0}\right)^{0.021} (SD)^{-0.003} (2 + Skewness)^{-0.025} \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์การถดถอยของสหสัมพันธ์เพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก

| สัมประสิทธิ์ | Value | Standard Error | t-Statistic value | P-value |
|----------------|--------|----------------|-------------------|----------|
| b ₁ | 0.0007 | 0.00039 | 1.70 | 0.092 |
| b ₂ | 0.99 | 0.0196 | 50.45 | 8.71E-87 |
| b ₃ | 0.057 | 0.0101 | 5.64 | 1.03E-07 |
| b ₄ | 0.021 | 0.0812 | 0.26 | 0.796 |
| b ₅ | -0.003 | 0.00039 | -6.87 | 2.46E-10 |
| b ₆ | -0.025 | 0.0134 | -1.84 | 0.068 |

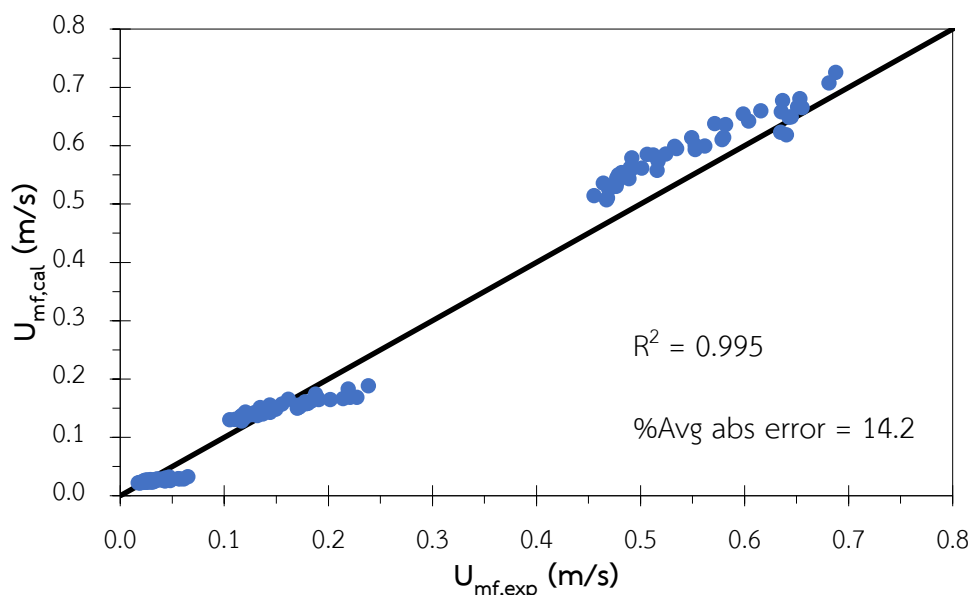
Root mean square error: 0.894

R^2 : 0.995; R^2_{adj} : 0.995; F = 7070; p -value = 0

เมื่อพิจารณาผลทางสถิติจากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ ในการสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไฮดรอลิก ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าตัวแปรอิสระที่ใช้มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามในระดับที่สูง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.995 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ พบว่า ตัวแปร Ar , $\frac{H_0}{D_0}$ และ SD ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ คือมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 โดยตัวแปร **Ar** หรือตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ เช่น ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยที่ใช้ อุณหภูมิที่ใช้ซึ่งส่งผลต่อค่าความหนาแน่น และค่าความหนืดของของไหล ที่ล้วนแต่ส่งผลต่อตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส ตัวแปร $\frac{H_0}{D_0}$ หรืออัตราส่วนระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอซ์เบต แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณาปริมาณของอนุภาคของแข็งเริ่มต้นที่ใช้ และตัวแปร **SD** หรือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง ที่บ่งบอกถึงความสำคัญของรูปแบบของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็งที่แตกต่างกันจะมีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอซ์เซชัน ขณะที่สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ (b_1) ตัวแปร $\frac{dp}{D_0}$ และ **Skewness** เป็นตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือมีค่า p-value สูงกว่า 0.05

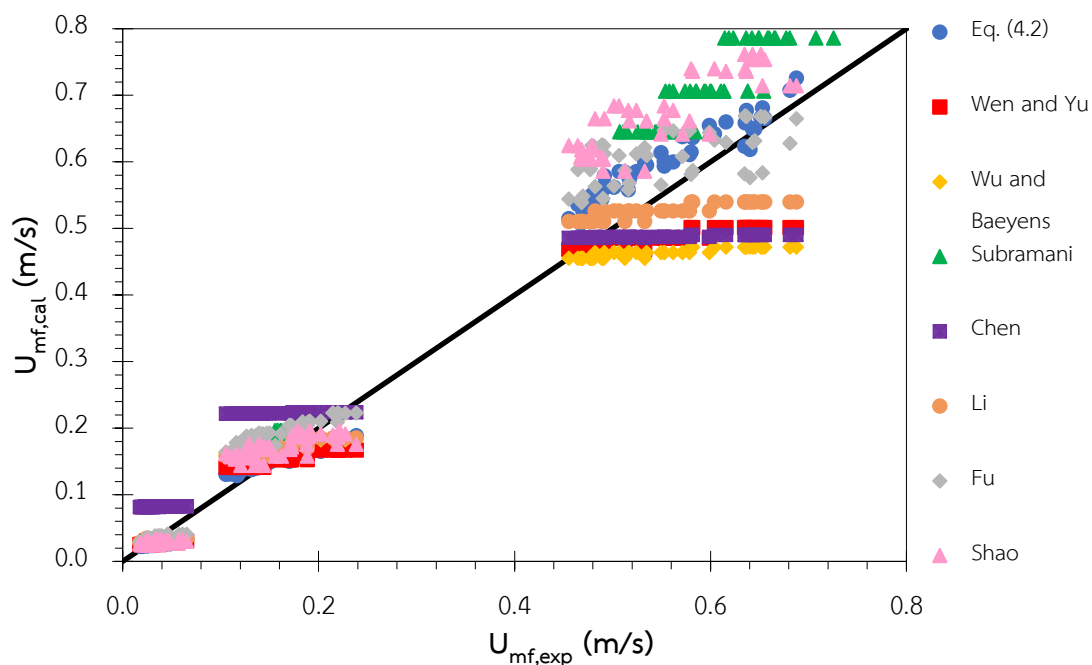
เมื่อนำสหสัมพันธ์นี้ไปใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอซ์เซชันโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง เปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์และผลจากการทดลอง พบว่ามีร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 14.2 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.995 โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความถูกต้อง หรือ ความแม่นยำในการทำนายผลจากการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนายการที่ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มีค่าต่ำ แสดงถึงสหสัมพันธ์ที่ได้นี้ สามารถทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอซ์เซชันได้อย่างแม่นยำ ขณะที่ ค่า R^2 จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่า สหสัมพันธ์ที่ได้มานั้น มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้มาน้อยเพียงใด ซึ่งการที่ค่า R^2 มีค่าสูง แสดงว่าสหสัมพันธ์ที่ได้มานั้น มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้เป็นอย่างมาก โดยผลการเปรียบเทียบของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอซ์เซชันระหว่างผลจากการทดลอง และผลจากการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนาย แสดงในรูปแบบที่



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากผลการทดลอง และจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้กับสหสัมพันธ์ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของงานวิจัยอื่น ๆ โดยเปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันระหว่างผลการทดลอง และผลจากการใช้สหสัมพันธ์ของงานวิจัยอื่น ๆ ในการทำนาย ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการใช้สหสัมพันธ์ของงานวิจัยอื่น ๆ แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า สหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [20] ให้ผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์อื่น ๆ ซึ่งสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu เป็นสหสัมพันธ์ที่พัฒนามาจากสมการของ Ergun [15] จึงทำให้มีงานวิจัยที่ใช้สหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu เป็นต้นแบบในการพัฒนาสหสัมพันธ์ เช่น สหสัมพันธ์ของ Wu และ Baeyens [22] Li และคณะ [27] และ Fu และคณะ [7] เป็นต้น ซึ่งต่างจากสหสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ที่ใช้รูปแบบทั่วไปของสมการเป็นสมการไร้หน่วยที่ในแต่ละพจน์ของกลุ่มตัวแปรในสหสัมพันธ์นั้น อันจะแสดงถึงผลของสภาวะการดำเนินการต่าง ๆ ภายในกระบวนการฟลูอิดเซชันที่จะส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ขณะที่การศึกษาประเภทของอนุภาคของตามวิธีการของ Geldart โดยส่วนใหญ่จะศึกษาในกลุ่ม B เนื่องจากอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดเซชันได้ดีมาก โดยมีสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu ที่ศึกษากลุ่ม D ซึ่งอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่มาก สหสัมพันธ์ของ Wu และ Baeyens ที่ศึกษากลุ่ม B และ D เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้ที่ศึกษากลุ่ม B และ D เช่นเดียวกัน ขณะที่การศึกษาผลของอุณหภูมิ จะมี

เพียงสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu และสหสัมพันธ์ของ Fu ที่ไม่ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่ค่อนข้างแคบ และมีค่าไม่สูง เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม มีเพียงแค่งานวิจัยของ Fu ที่ศึกษาผลของปริมาณอนุภาคของแข็งเริ่มต้นในระบบ และ งานวิจัยของ Shao และคณะ [28] ที่ศึกษาผลของการกระจายขนาดของอนุภาค ซึ่งทั้งสองตัวแปรต่างก็เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของทั้งสองตัวแปรนี้ด้วย โดยในสหสัมพันธ์ที่ได้ จะมีพจน์ของอัตราส่วนระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดซ์เบด ซึ่งจะบ่งบอกถึงปริมาณของอนุภาคของแข็งเริ่มต้นโดยน้ำหนักที่ใช้ และมีพจน์ของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง และ พจน์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็งซึ่งจะบ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายขนาดอนุภาค เพื่อให้สหสัมพันธ์ที่ได้สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ รวมถึงครอบคลุมผลของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่จะมีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันนี้

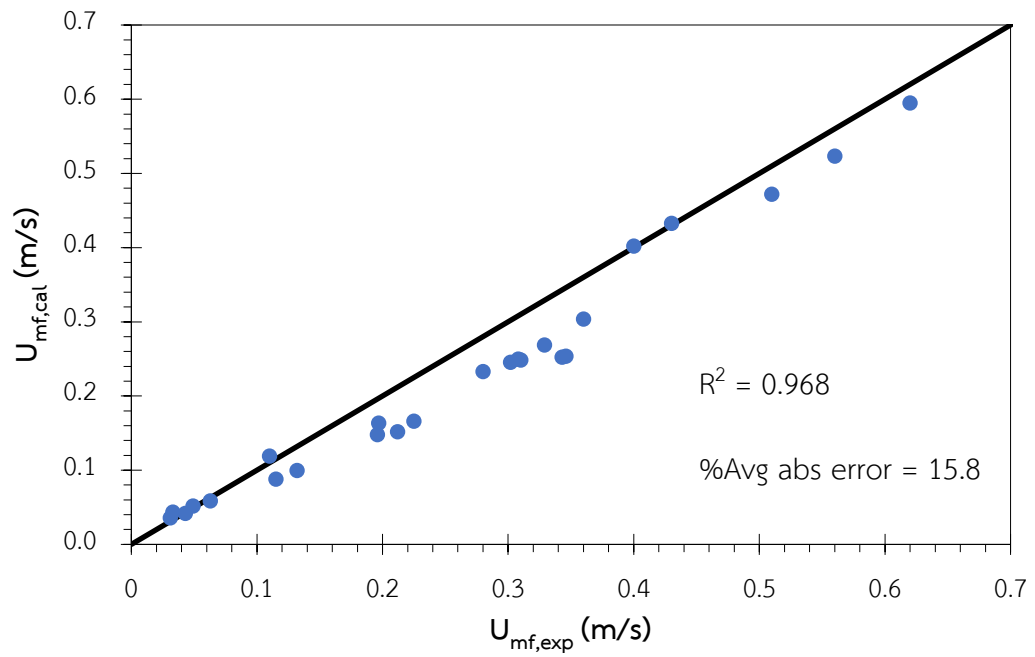


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากผลการทดลอง กับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย และสหสัมพันธ์จากงานวิจัยอื่น ๆ

ตารางที่ 4.2 ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการใช้สหสัมพันธ์จากงานวิจัยที่ผ่านมา ใน การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

| งานวิจัย | ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (%) |
|------------------------------|-----------------------------------------|
| Wen and Yu (1966) [20] | 15.8 |
| Wu and Baeyens (1991) [22] | 18.3 |
| Subramani et al. (2007) [23] | 24.0 |
| Chen et al. (2010) [25] | 76.4 |
| Li et al. (2018) [27] | 16.5 |
| Fu et al. (2019) [7] | 20.5 |
| Shao et al. (2020) [28] | 20.6 |
| Eq. (4.2) | 14.2 |

เมื่อนำสหสัมพันธ์ที่ได้ ไปใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้ข้อมูลในการ ทดลองจากงานวิจัยของ Wu และ Baeyens [22] Jiliang และคณะ [6] Seo และคณะ [26] Rasteh และคณะ [36] และ Downmore และคณะ [33] พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจาก การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์และผลจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 15.8 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.968 ซึ่งงานวิจัยของ Wu และ Baeyens Jiliang และ Seo จะศึกษาความเร็วต่ำสุดในการ เกิดฟลูอิดเซชันของทราย ขณะที่งานวิจัยของ Rasteh จะศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิด ฟลูอิดเซชันของโพลีไมท์ และงานวิจัยของ Downmore จะศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิด ฟลูอิดเซชันของอะลูมินา โดยมีการศึกษาทั้งรูปแบบกระจายขนาดแคบ และรูปแบบการกระจาย ขนาดกว้าง เช่น รูปแบบไบนารี และ รูปแบบยูนิฟอร์ม ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.21 ถึง 1 มิลลิเมตร ซึ่งอนุภาคของแข็งที่ศึกษาจัดอยู่ในกลุ่ม B และ D ตามการจำแนกของ Geldart และมีช่วง ของอุณหภูมิที่ศึกษาตั้งแต่ 25 ถึง 600 องศาเซลเซียส จากผลการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิด ฟลูอิดเซชันที่ได้พบว่า สหสัมพันธ์นี้สามารถทำนายค่าได้โดยอยู่ในร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ เฉลี่ยที่ยอมรับได้ แม้ว่าข้อมูลจากการทดลองของช่วงของอุณหภูมิที่ศึกษาจากงานวิจัยต่าง ๆ จะอยู่ นอกช่วงจากการศึกษาของงานวิจัยนี้ก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.16

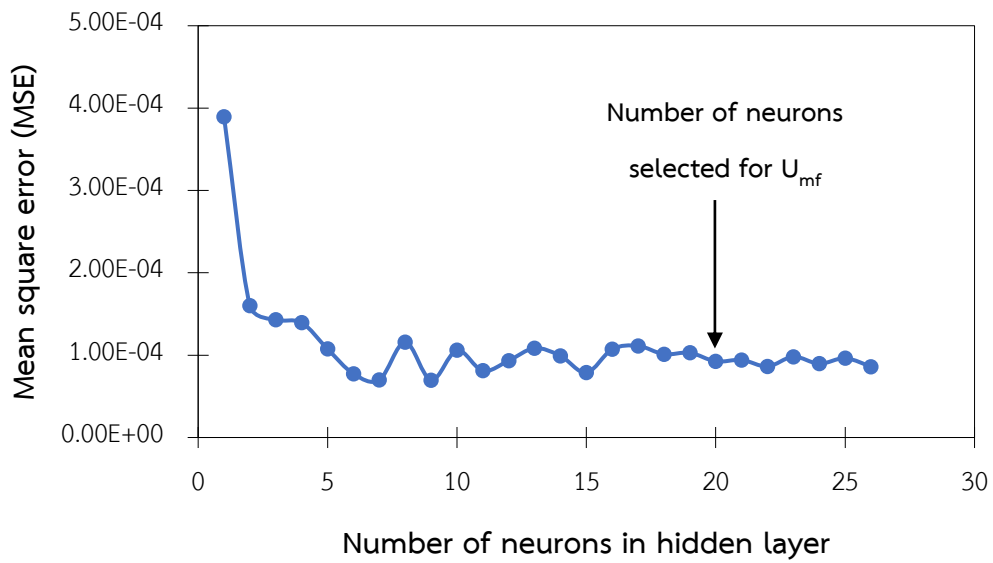


รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากผลการทดลอง และจากสหสัมพันธ์ โดยใช้ข้อมูลการทดลองของงานวิจัยต่าง ๆ และสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการ

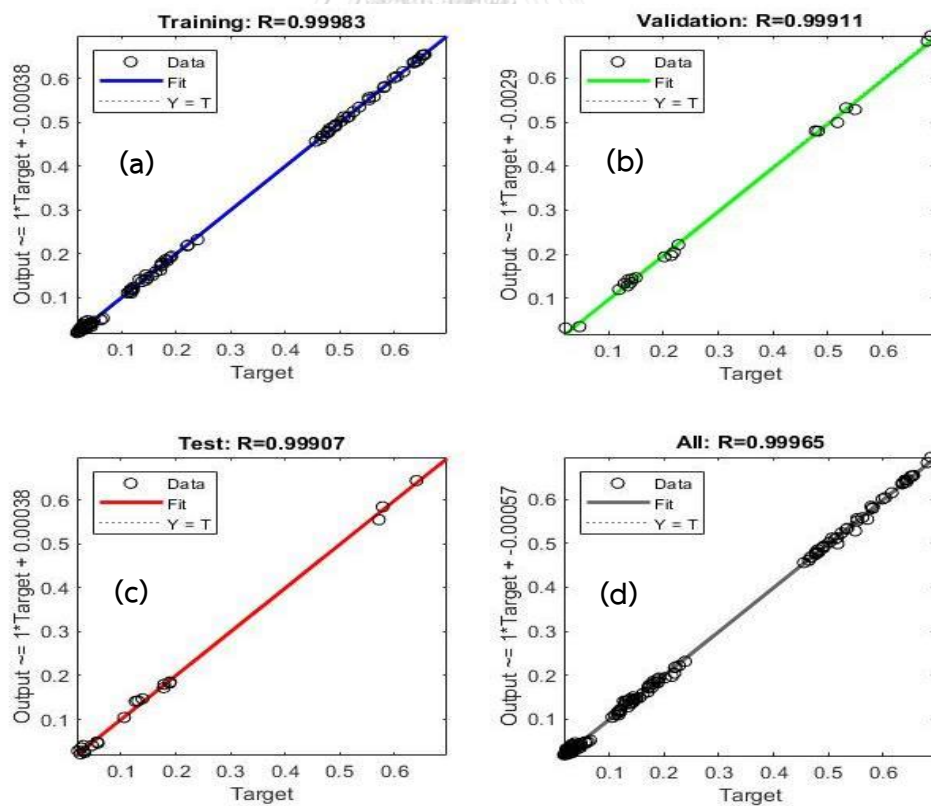
ถดถอย

4.3 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากโครงข่ายประสาทเทียม

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จะใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมของโปรแกรม MATLAB ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยการกำหนดข้อมูลขาเข้า และเป้าหมายสำหรับการฝึกสอน โดยข้อมูลขาเข้าในงานวิจัยนี้ ได้แก่ $Ar \frac{H_0}{D_0} \frac{d_p}{D_0} SD$ และ *Skewness* และ ข้อมูลเป้าหมายคือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันที่ได้จากการทดลอง ในการฝึกสอนจะกำหนดจำนวนชั้นแอบแฝง โดยจะทำการหาจำนวนชั้นแอบแฝงที่เหมาะสมสำหรับการฝึกสอน เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นดัชนีวัดความแม่นยำของการใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยผลของจำนวนชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะแสดงในรูปที่ 4.17 โดยจำนวนชั้นแอบแฝงที่เลือกในงานวิจัยนี้คือ 20 ชั้น เนื่องจากเป็นจำนวนชั้นเริ่มต้นที่เริ่มทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าคงที่ และมีค่าต่ำกว่า 0.0001 โดยรูปที่ 4.18 จะแสดงกราฟวิเคราะห์การถดถอยของกระบวนการ (a) Training (b) Validation (c) Testing และ (d) กระบวนการรวม ซึ่งเป็นกราฟแสดงข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างค่าเป้าหมาย และค่าทำนายจากโครงข่าย ซึ่งให้ค่า R^2 เข้าใกล้ 1 ของทุกกระบวนการซึ่งหมายถึงข้อมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ (R^2 มีค่ามากกว่าเท่ากับ 0.9) โดยตารางที่ 4.3 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ของ น้ำหนักของข้อมูลขาเข้าที่ i ถึง ชั้นแอบแฝงที่ j ($IW_{j,i}$) น้ำหนักของนิวรอนที่ j ในชั้นแอบแฝง ถึง ชั้นขาออก ($LW_{1,j}$) ไบแอสของข้อมูลขาเข้าที่ 1 ถึง นิวรอนที่ j ในชั้นแอบแฝง (B_1) และ ไบแอสของชั้นขาออก (B_2) ซึ่งใช้ในการคำนวณหาข้อมูลขาออกที่จะให้ค่าสอดคล้องกับเป้าหมายสำหรับการฝึกสอนหรือความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมากที่สุด โดยที่ $IW_{j,i}$ จะเป็นเมตริกซ์ขนาด 20×5 และ $LW_{1,j}$ จะเป็นเมตริกซ์แถว ขนาด 1×20



รูปที่ 4.17 ผลของจำนวนชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยสำหรับการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 4.18 กราฟวิเคราะห์การถดถอยของกระบวนการ (a) Training (b) Validation (c) Testing และ (d) กระบวนการรวม

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของน้ำหนักและไบแอสที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซน

| j | $IW_{j,1}$ | $IW_{j,2}$ | $IW_{j,3}$ | $IW_{j,4}$ | $IW_{j,5}$ | $B_{1,j}$ | B_2 | $LW_{1,j}$ |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|---------|------------|
| 1 | 0.94721 | -0.3493 | -0.115 | -0.4641 | -1.9017 | -2.8137 | -0.6226 | -0.404 |
| 2 | -0.2753 | -1.1649 | -1.1882 | -1.5395 | -0.0242 | 2.46028 | | 0.15453 |
| 3 | 0.54532 | -1.1571 | -0.246 | 1.76261 | -0.1077 | 2.35438 | | 0.05677 |
| 4 | 2.72837 | 0.65652 | 0.24579 | -0.0631 | -0.3857 | -1.9678 | | 0.28387 |
| 5 | 0.75243 | 0.06822 | 2.13976 | -0.8954 | -0.3308 | -1.6791 | | 0.04424 |
| 6 | 1.37486 | 0.98322 | -1.1536 | -0.1978 | -0.8176 | -1.3876 | | 0.06051 |
| 7 | 0.82536 | -1.8989 | -1.2037 | 0.03941 | 0.22779 | -0.9102 | | 0.01507 |
| 8 | -1.0997 | -1.0854 | 1.65944 | 0.24271 | 0.88059 | 0.60271 | | -0.0182 |
| 9 | 0.65092 | 0.1761 | 1.43814 | -1.1461 | -1.5112 | -0.3744 | | 0.07177 |
| 10 | 0.09779 | -0.8142 | -0.0724 | -2.0698 | -1.3356 | 0.03241 | | -0.02 |
| 11 | -1.8045 | 0.06046 | 0.03109 | -0.1476 | 0.61405 | -1.3982 | | -0.6901 |
| 12 | 0.66451 | 0.2213 | 1.28276 | 0.66494 | -1.8299 | 0.60943 | | -0.0776 |
| 13 | 0.22241 | 1.32692 | -1.1849 | -0.8058 | -1.1256 | -0.1874 | | -0.0137 |
| 14 | -0.7591 | -0.9962 | -0.227 | 2.0189 | -0.9366 | -0.9826 | | 0.03774 |
| 15 | 0.69154 | 1.05274 | -0.3109 | -0.2361 | 2.25448 | 1.45488 | | 0.03323 |
| 16 | -0.4502 | 1.42263 | 0.24354 | 2.08289 | 0.26398 | -1.6606 | | 0.04155 |
| 17 | 1.1055 | 0.75718 | -0.6846 | -0.1735 | -1.6119 | 1.72947 | | 0.07523 |
| 18 | -2.3329 | -0.2079 | 0.09899 | 0.94727 | -0.8704 | -1.6939 | | -0.0867 |
| 19 | -1.8929 | -0.164 | -0.7154 | 0.37839 | -1.0777 | -2.4598 | | -0.3296 |
| 20 | 1.38957 | -0.4162 | -2.0415 | -0.0541 | -1.164 | 2.87795 | | -0.2768 |

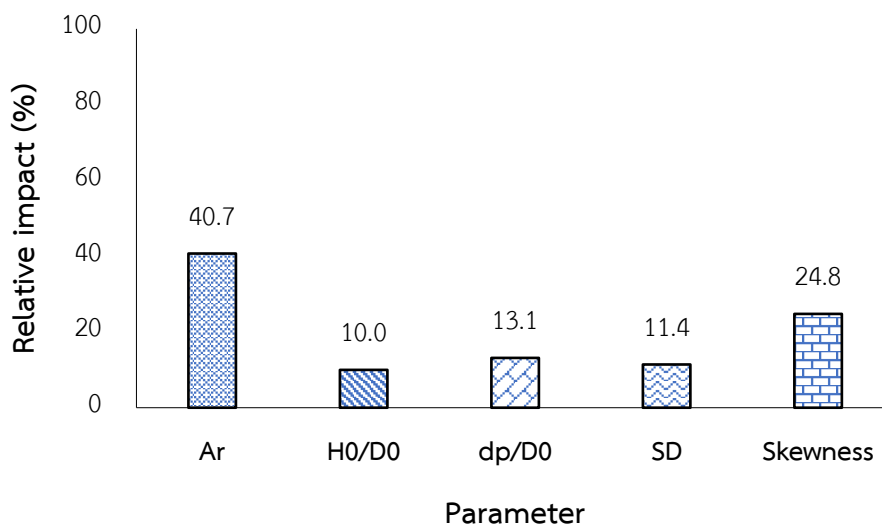
พารามิเตอร์น้ำหนักของข้อมูลขาเข้า และน้ำหนักนิรอนซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 จะถูกใช้ในการพิจารณาสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรขาเข้าที่ใช้ในการฝึกสอนที่มีต่อข้อมูลขาออกที่ต้องการ โดยใช้สมการของ Garson [44] ในการอธิบาย

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \left(\left(\frac{|IW_{j,i}|}{\sum_{i=1}^{i=5} |IW_{j,i}|} \right) \cdot |LW_{1,j}| \right)}{\sum_{i=1}^{i=5} \left\{ \sum_{j=1}^{j=n} \left(\left(\frac{|IW_{j,i}|}{\sum_{i=1}^{i=5} |IW_{j,i}|} \right) \cdot |LW_{1,j}| \right) \right\}} \quad (4.2)$$

เมื่อ I_i คือ สัดส่วนความสำคัญของข้อมูลขาเข้าแต่ละตัว

โดยสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรขาเข้าที่ได้พบว่าตัวแปร Ar หรือตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสเป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันมากที่สุด โดยมีสัดส่วนความสำคัญมากที่สุดคือร้อยละ 40.7 ซึ่งเป็นเพราะว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ เช่น ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยที่ใช้ อุณหภูมิที่ใช้ ซึ่งส่งผลต่อค่าความหนาแน่น และค่าความหนืดของของไหลล้วนแต่ส่งผลต่อตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส จึงทำให้ตัวแปรนี้มีผลอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุดต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ตัวแปร *Skewness* หรือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง เป็นตัวแปรที่มีสัดส่วนความสำคัญรองลงมาคือร้อยละ 24.8 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็งเป็นการบอกถึงการกระจายขนาดของอนุภาคแต่ละขนาดจะมีค่ากระจายตัวโดยมวลเป็นสัดส่วนที่ไม่สมมาตร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณารูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคที่ใช้ ที่จะส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ตัวแปร $\frac{d_p}{D_0}$ หรือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอซ์เบด เป็นตัวแปรที่มีสัดส่วนความสำคัญถัดมาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง โดยมีค่าร้อยละสัดส่วนความสำคัญเท่ากับ 13.1 ซึ่งอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอซ์เบด จะบอกถึงความสำคัญของขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อขนาดของคอลัมน์ฟลูอิดไอซ์เบด ที่ใช้ในการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน และ สองตัวแปรสุดท้ายคือตัวแปร SD หรือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง และตัวแปร $\frac{H_0}{D_0}$ หรืออัตราส่วน

ระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอส์เบต มีร้อยละสัดส่วนความสำคัญที่ใกล้เคียงกันคือร้อยละ 11.4 และ 10 ตามลำดับ โดยร้อยละสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรพาเข้าที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอส์เซชันจะแสดงในรูปที่ 4.19

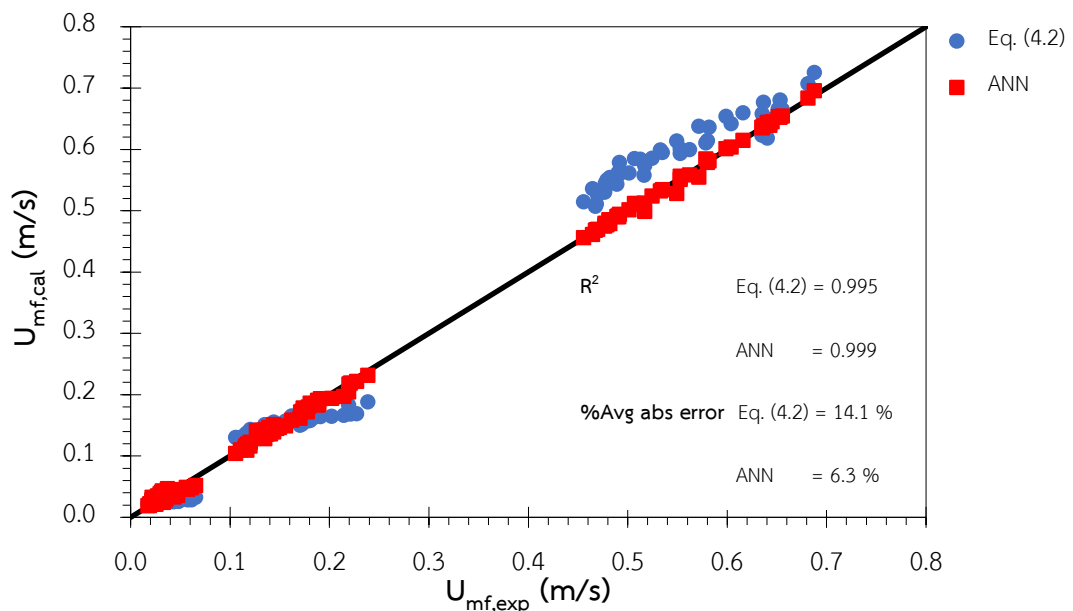


รูปที่ 4.19 ร้อยละสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรพาเข้าที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอส์เซชัน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการสร้างสหสัมพันธ์จากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ และการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอส์เซชันพบว่า ตัวแปรพาเข้าที่มีนัยสำคัญที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอส์เซชันแตกต่างกัน จากการพิจารณาผลทางสถิติสำหรับการใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระที่ให้ค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 พบว่า ตัวแปร Ar $\frac{H_0}{D_0}$ และ SD ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่การพิจารณาสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรพาเข้าสำหรับการใช้โครงข่ายประสาทเทียม พบว่า ตัวแปร Ar และ $Skewness$ เป็นสองตัวแปรที่ให้ค่าร้อยละสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรพาเข้าที่สูง ซึ่งแสดงถึงการที่ตัวแปรนี้มีนัยสำคัญที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอส์เซชัน เมื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญของตัวแปรจากทั้งวิธีการสร้างสหสัมพันธ์ และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอส์เซชัน พบว่า ตัวแปร Ar เป็นตัวแปรที่ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญจากทั้งสองวิธี และน่าจะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดที่มีต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอส์เซชัน นอกจากนี้ทั้งตัวแปร SD และ $Skewness$ ต่างก็เป็นตัวแปรที่ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญจากทั้งสองวิธีเช่นกัน ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึง

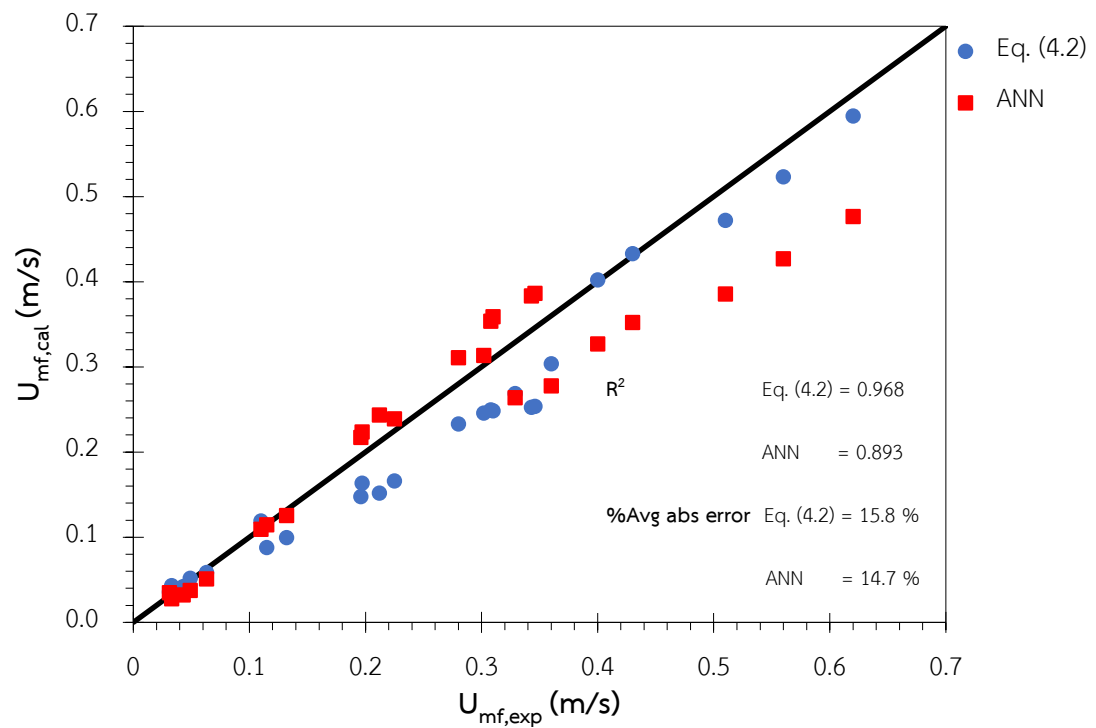
ความสำคัญของรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้ เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการต้องพิจารณาการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน

เมื่อพิจารณาผลจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชันโดยเปรียบเทียบกับผลของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชันที่ได้จากการทดลอง และ ผลการทำนายโดยใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุคูณ สมการที่ (4.2) โดยรูปแบบทั่วไปของสมการที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายจะแสดงในสมการที่ (3.4) และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการจะแสดงในตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลอง และผลจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายพบว่า มีร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย เท่ากับ 6.3 ซึ่งน้อยกว่าการใช้สหสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นในการทำนาย และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดี รวมถึงมีความเหมาะสมในการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้สหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย และโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน

นอกจากนี้ ได้มีการนำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ ไปใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยใช้ข้อมูลในการทดลองจากงานวิจัยของ Wu และ Baeyens [22] Jiliang และคณะ [6] Seo และคณะ [26] Rasteh และคณะ [36] และ Downmore และคณะ [33] โดยผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะนำมาเปรียบเทียบกับการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนายโดยใช้สมการที่ (4.2) พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์ และผลจากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 14.7 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้และสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลขาเข้า และข้อมูลขาออกได้เป็นอย่างดี ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน มักจะมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างแบบจำลองในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจึงมีความเหมาะสม และได้ผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ดี ขณะที่ค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม มีค่าเท่ากับ 0.893 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า ค่า R^2 ที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย บ่งบอกว่าข้อมูลในการทดลองจากงานวิจัยอื่น ๆ มีความเหมาะสมกับสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอยมากกว่า โดยผลการเปรียบเทียบ และร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการใช้สหสัมพันธ์ และโครงข่ายประสาทเทียม จะแสดงในรูปที่ 4.21 อย่างไรก็ตาม ทั้งวิธีการสร้างสหสัมพันธ์ และวิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ก็สามารถใช้ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันได้ จากการที่นำวิธีการทั้งสองไปใช้ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยใช้ข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยอื่นแล้ว ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน เพียงแต่ในการนำไปใช้งานจริง วิธีการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน จะเป็นวิธีที่นำไปใช้งานจริงได้ง่ายกว่า เนื่องจากเป็นเพียงการแทนค่าของตัวแปรตามที่มีในสหสัมพันธ์ ขณะที่วิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม จำเป็นที่จะต้องจัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปให้โครงข่ายเรียนรู้ และประมวลผล เพื่อให้ได้ค่าเป้าหมายที่ต้องการออกมา ซึ่งมีความยุ่งยากในการนำไปใช้งานจริงมากกว่า



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากผลการทดลอง และ จากสหสัมพันธ์ โดยใช้ข้อมูลการทดลองของงานวิจัยต่าง ๆ สหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย และ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลของตัวแปรที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

งานวิจัยนี้ศึกษาผลการใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง และ ผลของสภาวะการดำเนินการต่าง ๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และความเร็วป้อนเข้ากระบวนการที่ได้สอดคล้องกับกระบวนการฟลูอิดเซชันแบบอุดมคติคือ ในช่วงแรกที่ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการต่ำ ๆ ค่าความดันลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ และ ความดันลดจะมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มความเร็วป้อนเข้ากระบวนการต่อ ในช่วงหลังที่ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการมีค่าสูง แต่จะแตกต่างจากกระบวนการฟลูอิดเซชันแบบอุดมคติ คือการเพิ่มขึ้นของความดันลดในกระบวนการจะมีค่ามากกว่าความดันลดที่ภาวะคงที่เล็กน้อย ก่อนที่ความดันลดดังกล่าวจะตกกลับลงมาถึงค่าความดันลดที่ภาวะคงที่ ซึ่งเกิดจากกระบวนการฟลูอิดเซชันที่อนุภาคของแข็งมีการกระจายขนาด โดยความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันคือค่าที่เกิดจากจุดตัดระหว่างเส้นตรงของข้อมูลความดันลดที่ได้ก่อนที่แนวโน้มของข้อมูลจะไม่เป็นเส้นตรง และ เส้นตรงของข้อมูลที่มีความดันลดมีค่าคงที่

5.1.1 ผลของการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

ในการศึกษาผลของการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง จะใช้อนุภาคของแข็งคือ ททราย ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีรูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคที่ศึกษาคือ รูปแบบการกระจายขนาดแคบ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ และ รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก โดยเปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยเท่ากัน ในทุกปริมาณของอนุภาคของแข็ง และอุณหภูมิที่ใช้ศึกษา พบว่าการใช้การกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดกว้างทุกรูปแบบมีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแคบ ซึ่งเกิดจากผลของอนุภาคขนาดเล็กซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยการใส่อนุภาคขนาดเล็กลงไปในระบบมากขึ้นจะช่วยเพิ่มแรงต้าน

การเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดใหญ่ ช่วยให้อนุภาคขนาดใหญ่เกิดฟลูอิดไอเซชันได้เร็วขึ้น และทำให้ทั้งระบบของอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดกว้างเกิดฟลูอิดไอเซชันได้ง่ายขึ้น ซึ่งหมายถึงความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันมีค่าต่ำลง โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็งจะส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีการกระจายขนาดรูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงมีค่าต่ำกว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ รวมไปถึงค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งจะส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทั้งรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ และรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก จะมีค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันต่ำกว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ รวมไปถึงความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวกมีค่าต่ำกว่ารูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งสูงขึ้น ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปแบบการกระจายขนาดแคบจะมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันของรูปแบบการกระจายขนาดกว้างทุกรูปแบบ แต่แนวโน้มของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันสำหรับรูปแบบการกระจายขนาดกว้างจะมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ซึ่งแตกต่างกับแนวโน้มของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส เพราะผลจากการใช้ปริมาณของอนุภาคของแข็งในแต่ละช่วงร้อนผ่านตะแกรงที่ไม่เท่ากันในการเตรียมรูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการศึกษา รวมถึงผลของอุณหภูมิ ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด และความหนาแน่น จึงทำให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนในแต่ละรูปแบบการกระจายขนาด และมีแนวโน้มที่แตกต่างจากที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

5.1.2 ผลของขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น ในทุกรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาค ปริมาณของอนุภาคของแข็ง และ อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา ซึ่งเกิดจากปริมาณ และสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก และอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ รวมถึงผลของการใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ที่กระทำบนอนุภาคของแข็งที่ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการฟลูอิดไอเซชันที่แตกต่างกัน

5.1.3 ผลของปริมาณอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคของแข็งโดยน้ำหนักหรือปริมาณเบตเริ่มต้นในคอลัมน์ฟลูอิดไฮดรอลิกสูงขึ้น ในทุกรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย และ อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา เนื่องจากการมีความดันลดในระบบที่มากขึ้น

5.1.4 ผลของอุณหภูมิของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคของแข็งสูงขึ้น ในทุกรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาค ขนาดอนุภาคของแข็งเฉลี่ย และปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ศึกษา เนื่องจากความหนืดของของไหลจะมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้แรงต้านการเคลื่อนที่ที่กระทำบนอนุภาคของแข็งให้มีความสูงขึ้น และที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งสูงขึ้น แนวโน้มของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกในแต่ละรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคกว้างจะมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากแนวโน้มที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพราะผลจากการใช้ปริมาณของอนุภาคของแข็งในแต่ละช่วงร้อนผ่านตะแกรงที่ไม่เท่ากันในการเตรียมรูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการศึกษา รวมถึงผลของอุณหภูมิ ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด และความหนาแน่น จึงทำให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนในแต่ละรูปแบบการกระจายขนาด และมีแนวโน้มที่แตกต่างจากที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

5.2 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการ

ถดถอย

การสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาใช้ในแบบจำลองการถดถอยใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ ได้สหสัมพันธ์เป็น

$$Re_{mf} = 0.0007(Ar)^{0.99} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.057} \left(\frac{d_p}{D_0}\right)^{0.021} (SD)^{-0.003} (2 + Skewness)^{-0.025} \quad (4.2)$$

โดยสหสัมพันธ์ที่ได้ จะมีพจน์ของตัวแปรที่บ่งบอกถึงผลของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ คือ พจน์ของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยที่ใช้ และอุณหภูมิที่ใช้ พจน์ของอัตราส่วนระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดเซชัน แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณาปริมาณของอนุภาคของแข็งเริ่มต้นที่ใช้ พจน์ของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดเซชัน แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคของแข็งเฉลี่ย และขนาดของคอลัมน์ฟลูอิดเซชันที่ใช้ พจน์ของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง และพจน์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง จะบ่งบอกถึงความสำคัญของรูปแบบของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็งที่แตกต่างกัน ซึ่งทุกพจน์ล้วนมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยพจน์ที่ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ให้ค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 คือ พจน์ของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส พจน์ของอัตราส่วนระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดเซชัน และ พจน์ของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง เมื่อนำสหสัมพันธ์นี้ไปใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง พบว่า ผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย เท่ากับ 14.2 ซึ่งให้ค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้สหสัมพันธ์จากงานวิจัยอื่น ๆ ในการทำนาย และ เมื่อนำสหสัมพันธ์ที่ได้นี้ ไปใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้ข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์ และผลจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 15.8 ซึ่งแสดงถึงสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอยนี้ มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันเมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์อื่น ๆ ที่เคยมีมา

5.3 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากโครงข่ายประสาทเทียม

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จะใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียมของโปรแกรม MATLAB ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีข้อมูลเป้าหมายคือความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันที่ได้จากการทดลอง โดยใช้จำนวนชั้นแอบแฝง 20 ชั้น ซึ่งเป็นจำนวนชั้นเริ่มต้นที่เริ่มทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าคงที่ และมีค่าต่ำกว่า 0.00001 สำหรับการถดถอยของกระบวนการ Training Validation และ Testing ค่าทำนายจากโครงข่ายจะให้ค่า R^2 เข้าใกล้ 1 ของทุกกระบวนการซึ่งหมายถึงข้อมูลจากการเรียนรู้ผ่านทั้งสามกระบวนการมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยพบว่าตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสเป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมากที่สุด โดยมีสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรเข้ามากที่สุดคือร้อยละ 40.7 รองลงมาคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดซ์เบด ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง และ อัตราส่วนระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดซ์เบด ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญของตัวแปรจากทั้งวิธีการสร้างสหสัมพันธ์ และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันพบว่า ตัวแปร Ar เป็นตัวแปรที่ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญจากทั้งสองวิธี และน่าจะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดที่มีต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน นอกจากนี้ทั้งตัวแปร SD และ $Skewness$ ต่างก็เป็นตัวแปรที่ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญจากทั้งสองวิธีเช่นกัน ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความสำคัญของรูปแบบการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้ เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการต้องพิจารณาการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็งต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้นแบบพหุ และ การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยเปรียบเทียบกับผลของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย เท่ากับ 6.3 ซึ่งต่ำกว่าการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนาย และ เมื่อใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยอื่น ๆ โดยเปรียบเทียบกับการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนาย พบว่า การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนาย ให้อัตราความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 14.7 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้สหสัมพันธ์ในการ

ทำนาย เพราะความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถเรียนรู้ และสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระต่าง ๆ และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ที่มักจะมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี ทำให้การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างแบบจำลองในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจึงมีความเหมาะสม ขณะที่ค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม มีค่าเท่ากับ 0.893 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า ค่า R^2 ที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย บ่งบอกว่าข้อมูลจากงานวิจัยอื่น ๆ มีความเหมาะสมกับสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอยมากกว่า อย่างไรก็ตาม ทั้งวิธีการสร้างสหสัมพันธ์ และวิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ก็สามารถใช้ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้ จากการทำนายทั้งสองไปใช้ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยใช้ข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยอื่นแล้ว ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน เพียงแต่ในการนำไปใช้งานจริง วิธีการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จะเป็นวิธีที่นำไปใช้งานจริงได้ง่ายกว่า เนื่องจากเป็นเพียงการแทนค่าของตัวแปร ตามที่มีในสหสัมพันธ์ ขณะที่วิธีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม จำเป็นที่จะต้องจัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปให้โครงข่ายเรียนรู้ และประมวลผล เพื่อให้ได้ค่าเป้าหมายที่ต้องการออกมา ซึ่งมีความยุ่งยากในการนำไปใช้งานจริงมากกว่า



5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติม
- 2) ควรเพิ่มช่วงในการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ให้กว้างขึ้น เช่น ควรศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิที่สูงมากขึ้น
- 3) ควรใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศที่มีความละเอียดในการวัดมากยิ่งขึ้น
- 4) ควรควบคุมรูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ ให้มีค่าความเบ้ และค่าความโด่งของการกระจายขนาดมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยเชิงปริมาตร-พื้นที่ผิว (Volume-surface mean, \bar{d}_{vs})

$$\bar{d}_{vs} = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (2.7)$$

เมื่อ x_i คือ สัดส่วนจำนวนหรือสัดส่วนมวลของอนุภาคของแข็งขนาดต่าง ๆ (ไม่มีหน่วย)

d_{pi} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรงร่อนเฉลี่ยระหว่างตะแกรงร่อน 2 ชั้น (มิลลิเมตร)

กำหนดให้

| | | | | | |
|---------------|-------|-------|--------|--------|-------|
| d_{pi} (mm) | 0.273 | 0.231 | 0.1885 | 0.1595 | 0.142 |
| x_i | 0.1 | 0.225 | 0.35 | 0.225 | 0.1 |

หา $\frac{x_i}{d_{pi}}$ ของแต่ละชั้น จะได้

| | | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| x_i/d_{pi} | 0.366 | 0.974 | 1.857 | 1.411 | 0.704 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|

แทนค่าในสมการข้างต้น จะได้

$$\bar{d}_{vs} = \frac{1}{0.366 + 0.974 + 1.857 + 1.411 + 0.704} = 0.19$$

ดังนั้น ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเชิงปริมาตร-พื้นที่ผิว เท่ากับ 0.19 มิลลิเมตร

2. การคำนวณเลขไร้นิวอาร์คิมิตีส

$$Ar = \frac{g \rho_g (\rho_s - \rho_g) d_p^3}{\mu^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

μ คือ ความหนืดไดนามิกของอากาศ (ปาสคาลต่อวินาที)

d_p คือ ขนาดอนุภาคของแข็ง (เมตร)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

กำหนดให้ หาค่าของเลขไร้นิวอาร์คิมิตีสของอนุภาคของแข็งขนาด 0.19 มิลลิเมตร ที่สภาวะ อุณหภูมิอากาศ 75 องศาเซลเซียส

เนื่องจาก อุณหภูมิของอากาศป้อนเข้าส่งผลต่อค่าความหนาแน่น และความหนืดของอากาศซึ่งขึ้นกับ อุณหภูมิ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น และความหนืดของอากาศ จะใช้สมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ

$$\rho_g = 1.2 \frac{293}{T} \quad (3.4)$$

เมื่อ ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

$$\mu = 1.46 \times 10^{-6} \frac{T^{1.504}}{T+120} \quad (3.5)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดไดนามิกของอากาศ (ปาสคาลต่อวินาที)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

จะคำนวณได้

$$\rho_g = 1.2 \frac{293}{75+273} = 1.01$$

$$\mu = 1.46 \times 10^{-6} \frac{(75+273)^{1.504}}{(75+273)+120} = 2.073 \times 10^{-5}$$

แทนค่าในสมการ (3.2) จะได้

$$Ar = \frac{9.81 \cdot 1.01 (2650 - 1.01) 0.00019^3}{(2.073 \times 10^{-5})^2} = 418.92$$

ดังนั้น เลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสเท่ากับ 418.92

3. การคำนวณเลขไร้หน่วยเรย์โนลด์ที่สภาวะความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g d_p U_{mf}}{\mu} \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

d_p คือ ขนาดอนุภาคของแข็ง (เมตร)

μ คือ ความหนืดไดนามิกของอากาศ (ปาสคาลต่อวินาที)

U_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (เมตรต่อวินาที)

กำหนดให้หาค่าเลขไร้หน่วยเรย์โนลด์ที่สภาวะความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็งขนาด 0.19 มิลลิเมตร ที่สภาวะอุณหภูมิอากาศ 120 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองได้ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันเท่ากับ 0.023 เมตรต่อวินาที

$$\rho_g = 1.2 \frac{293}{120+273} = 0.895$$

$$\mu = 1.46 \times 10^{-6} \frac{(120+273)^{1.504}}{(120+273)+120} = 2.27 \times 10^{-5}$$

แทนค่าในสมการ (3.3) จะได้

$$Re_{mf} = \frac{(0.895)(0.00019)(0.023)}{2.27 \times 10^{-5}} = 0.172$$

ดังนั้น เลขไร้หน่วยเรย์โนลด์ที่สภาวะความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันเท่ากับ 0.172

4. การคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากเลขไร้หน่วยเรย์โนลด์ที่ได้จากสหสัมพันธ์

กำหนดให้เลขไร้หน่วยเรย์โนลด์ที่ได้จากสหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.189 ของอนุภาคของแข็งขนาด 0.19 มิลลิเมตร ที่สภาวะอุณหภูมิอากาศ 120 องศาเซลเซียส

แทนค่าในสมการที่ (3.3) จะได้

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \cdot \mu}{\rho_g \cdot d_p} = \frac{(0.189)(2.27 \times 10^{-5})}{(0.895)(0.00019)} = 0.025$$

ดังนั้น ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน มีค่าเท่ากับ 0.025 เมตรต่อวินาที

5. การคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากสหสัมพันธ์

$$Re_{mf} = 0.0007(Ar)^{0.99} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.057} \left(\frac{d_p}{D_0}\right)^{0.021} (SD)^{-0.003} (2 + Skewness)^{-0.025} \quad (4.2)$$

เมื่อ Re_{mf} คือ ตัวเลขไร้หน่วยเรย์โนลด์ที่สภาวะความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

Ar คือ ตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส ที่มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.2)

$\frac{H_0}{D_0}$ คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอเซชัน (ไม่มีหน่วย)

$\frac{d_p}{D_0}$ คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดไอเซชัน (ไม่มีหน่วย)

SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง (ไม่มีหน่วย)

$Skewness$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของการกระจายขนาดอนุภาคของแข็ง (ไม่มีหน่วย)

กำหนดให้

$$Ar = 308.94 \quad \frac{H_0}{D_0} = 0.39 \quad \frac{d_p}{D_0} = 0.002$$

$$SD = 8.35 \times 10^{-17} \quad Skewness = -1.008$$

แทนค่าในสมการที่ (4.2) จะได้

$$Re_{mf} = 0.0007(308.94)^{0.99}(0.39)^{0.057}(0.002)^{0.021}(8.35 \times 10^{-17})^{-0.003} (2 + (-1.008))^{-0.025} = 0.189$$

ซึ่งจะคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ได้ค่าเท่ากับ 0.025 เมตรต่อวินาที ตามข้อ 4.

6. การคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

กำหนดให้ ค่ามวลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันที่ได้จากการทดลองและจากการใช้สหสัมพันธ์ โดยมีค่าเท่ากับ 0.023 และ 0.025 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

$$\%Absolute \ relative \ error = \frac{|U_{mf,cal} - U_{mf,exp}|}{U_{mf,exp}} \times 100$$

$$\text{จะได้ } \%Absolute \ relative \ error = \frac{|0.025 - 0.023|}{0.023} \times 100 = 11.71$$

ดังนั้น ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 11.71

7. การคำนวณค่า Coefficient of Determination (R^2)

$$R^2 = \left(\frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \right)^2$$

เมื่อ x_i คือ ข้อมูลจากการทดลอง

y_i คือ ข้อมูลจากการทำนาย

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการทดลอง

\bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยข้อมูลจากการทำนาย

กำหนดให้

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| x_i | 0.031 | 0.063 | 0.043 | 0.110 | 0.049 |
| y_i | 0.036 | 0.059 | 0.042 | 0.119 | 0.052 |

จะได้

| x_i | y_i | $(x_i - \bar{x})$ | $(y_i - \bar{y})$ | $(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ | $(x_i - \bar{x})^2$ | $(y_i - \bar{y})^2$ |
|--------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 0.031 | 0.036 | -0.028 | -0.026 | 0.0007 | 0.0008 | 0.0007 |
| 0.063 | 0.059 | 0.004 | -0.003 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 0.043 | 0.042 | -0.016 | -0.019 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 |
| 0.110 | 0.119 | 0.051 | 0.058 | 0.0029 | 0.0026 | 0.0033 |
| 0.049 | 0.052 | -0.010 | -0.010 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 0.059 | 0.061 | | | 0.0041 | 0.0038 | 0.0045 |
| Average | | | | Sum | | |

$$R^2 = \left(\frac{0.0041}{\sqrt{0.0038 \times 0.0045}} \right)^2 = 0.983$$

ดังนั้น ค่า R^2 ของชุดข้อมูลนี้มีค่าเท่ากับ 0.983

ภาคผนวก ข

ข้อมูลของขนาดอนุภาคและรูปแบบการกระจายขนาด

1. ขนาดความกว้างตะแกรงร่อน และ พื้นที่ช่องเปิด จากบริษัท ลี้เจียบเส็ง จำกัด

| Mesh no. | Wire no. | Wire diameter (mm) | Opening (mm) |
|----------|----------|--------------------|--------------|
| 12 | 27 | 0.42 | 1.7 |
| 14 | 27 | 0.42 | 1.39 |
| 16 | 27 | 0.42 | 1.17 |
| 18 | 27 | 0.42 | 0.99 |
| 20 | 27 | 0.42 | 0.85 |
| 25 | 30 | 0.31 | 0.71 |
| 30 | 33 | 0.253 | 0.594 |
| 35 | 35 | 0.213 | 0.51 |
| 40 | 34 | 0.233 | 0.402 |
| 50 | 35 | 0.213 | 0.295 |
| 60 | 37 | 0.172 | 0.251 |
| 70 | 38 | 0.152 | 0.211 |
| 80 | 38 | 0.152 | 0.166 |
| 100 | 42 | 0.101 | 0.153 |
| 120 | 44 | 0.081 | 0.131 |
| 150 | 46 | 0.061 | 0.108 |

2. รายละเอียดของรูปแบบการกระจายขนาด

- รูปแบบการกระจายขนาดแคบ

| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | d_{pi} (mm) | x |
|-------------------|------------|-------------|---------------|---|
| 0.19 | 70-80 | 0.166 0.211 | 0.1885 | 1 |
| 0.46 | 35-40 | 0.402 0.51 | 0.456 | 1 |
| 0.92 | 18-20 | 0.85 0.99 | 0.92 | 1 |

- รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติ

| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | d_{pi} (mm) | x |
|-------------------|------------|-------------|---------------|-------|
| 0.19 | 50-60 | 0.251 0.295 | 0.273 | 0.15 |
| | 60-70 | 0.211 0.251 | 0.231 | 0.225 |
| | 70-80 | 0.166 0.211 | 0.1885 | 0.25 |
| | 80-100 | 0.153 0.166 | 0.1595 | 0.225 |
| | 100-120 | 0.131 0.153 | 0.142 | 0.15 |
| 0.46 | 25-30 | 0.594 0.71 | 0.652 | 0.22 |
| | 30-35 | 0.51 0.594 | 0.552 | 0.26 |
| | 35-40 | 0.402 0.51 | 0.456 | 0.27 |
| | 40-50 | 0.295 0.402 | 0.3485 | 0.15 |
| | 50-60 | 0.251 0.295 | 0.273 | 0.1 |

| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | d_{pi} (mm) | x | |
|-------------------|------------|-------------|---------------|-------|------|
| 0.92 | 14-16 | 1.17 | 1.39 | 1.28 | 0.16 |
| | 16-18 | 0.99 | 1.17 | 1.08 | 0.25 |
| | 18-20 | 0.85 | 0.99 | 0.92 | 0.28 |
| | 20-25 | 0.71 | 0.85 | 0.78 | 0.19 |
| | 25-30 | 0.594 | 0.71 | 0.652 | 0.12 |

- รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง

| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | d_{pi} (mm) | x | |
|-------------------|------------|-------------|---------------|--------|-------|
| 0.19 | 50-60 | 0.251 | 0.295 | 0.273 | 0.15 |
| | 60-70 | 0.211 | 0.251 | 0.231 | 0.225 |
| | 70-80 | 0.166 | 0.211 | 0.1885 | 0.25 |
| | 80-100 | 0.153 | 0.166 | 0.1595 | 0.225 |
| | 100-120 | 0.131 | 0.153 | 0.142 | 0.15 |
| 0.46 | 25-30 | 0.594 | 0.71 | 0.652 | 0.22 |
| | 30-35 | 0.51 | 0.594 | 0.552 | 0.26 |
| | 35-40 | 0.402 | 0.51 | 0.456 | 0.27 |
| | 40-50 | 0.295 | 0.402 | 0.3485 | 0.15 |
| | 50-60 | 0.251 | 0.295 | 0.273 | 0.1 |

| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | d_{pi} (mm) | x |
|-------------------|------------|-------------|---------------|------|
| 0.92 | 14-16 | 1.17 1.39 | 1.28 | 0.16 |
| | 16-18 | 0.99 1.17 | 1.08 | 0.25 |
| | 18-20 | 0.85 0.99 | 0.92 | 0.28 |
| | 20-25 | 0.71 0.85 | 0.78 | 0.19 |
| | 25-30 | 0.594 0.71 | 0.652 | 0.12 |

- รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบ

| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | d_{pi} (mm) | x |
|-------------------|------------|-------------|---------------|------|
| 0.19 | 60-70 | 0.211 0.251 | 0.231 | 0.27 |
| | 70-80 | 0.166 0.211 | 0.1885 | 0.48 |
| | 80-100 | 0.153 0.166 | 0.1595 | 0.15 |
| | 100-120 | 0.131 0.153 | 0.142 | 0.07 |
| | 120-150 | 0.108 0.131 | 0.1195 | 0.03 |
| 0.46 | 30-35 | 0.51 0.594 | 0.552 | 0.39 |
| | 35-40 | 0.402 0.51 | 0.456 | 0.48 |
| | 40-50 | 0.295 0.402 | 0.3485 | 0.07 |
| | 50-60 | 0.251 0.295 | 0.273 | 0.04 |
| | 60-70 | 0.211 0.251 | 0.231 | 0.02 |

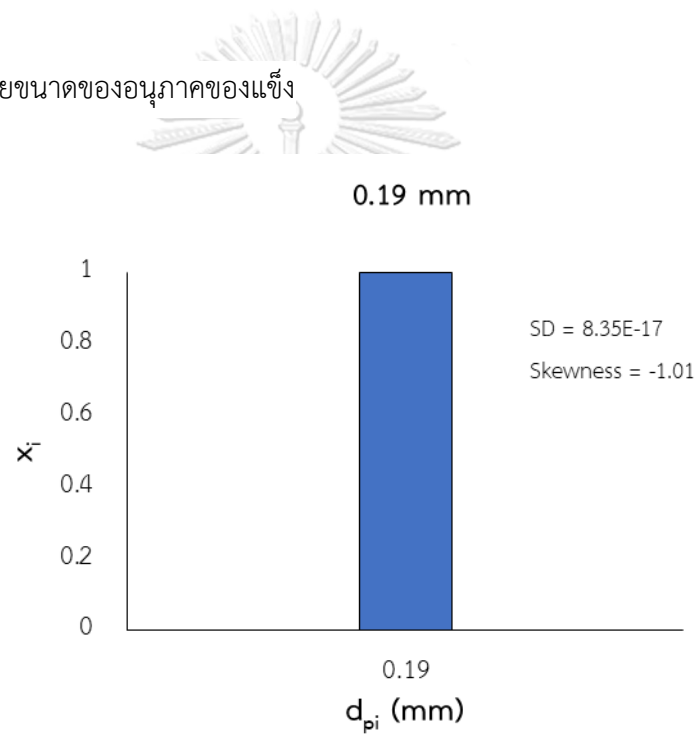
| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | | d_{pi} (mm) | x |
|-------------------|------------|-------------|-------|---------------|------|
| | 16-18 | 0.99 | 1.17 | 1.08 | 0.34 |
| | 18-20 | 0.85 | 0.99 | 0.92 | 0.48 |
| 0.92 | 20-25 | 0.71 | 0.85 | 0.78 | 0.11 |
| | 25-30 | 0.594 | 0.71 | 0.652 | 0.05 |
| | 30-35 | 0.51 | 0.594 | 0.552 | 0.02 |

- รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางบวก

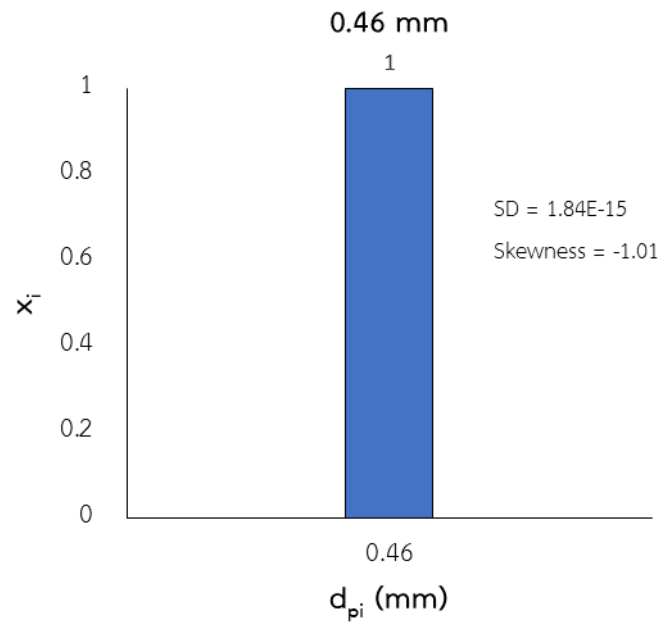
| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | | d_{pi} (mm) | x |
|-------------------|------------|-------------|-------|---------------|------|
| | 40-50 | 0.295 | 0.402 | 0.3485 | 0.02 |
| | 50-60 | 0.251 | 0.295 | 0.273 | 0.05 |
| 0.19 | 60-70 | 0.211 | 0.251 | 0.231 | 0.13 |
| | 70-80 | 0.166 | 0.211 | 0.1885 | 0.48 |
| | 80-100 | 0.153 | 0.166 | 0.1595 | 0.32 |
| | 20-25 | 0.71 | 0.85 | 0.78 | 0.06 |
| | 25-30 | 0.594 | 0.71 | 0.652 | 0.08 |
| 0.46 | 30-35 | 0.51 | 0.594 | 0.552 | 0.15 |
| | 35-40 | 0.402 | 0.51 | 0.456 | 0.47 |
| | 40-50 | 0.295 | 0.402 | 0.3485 | 0.24 |

| Average Size (mm) | Sieves no. | Sieves (mm) | d_{pi} (mm) | x | |
|-------------------|------------|-------------|---------------|-------|------|
| | 12-14 | 1.39 | 1.7 | 1.545 | 0.03 |
| | 14-16 | 1.17 | 1.39 | 1.28 | 0.07 |
| 0.92 | 16-18 | 0.99 | 1.17 | 1.08 | 0.13 |
| | 18-20 | 0.85 | 0.99 | 0.92 | 0.47 |
| | 20-25 | 0.71 | 0.85 | 0.78 | 0.3 |

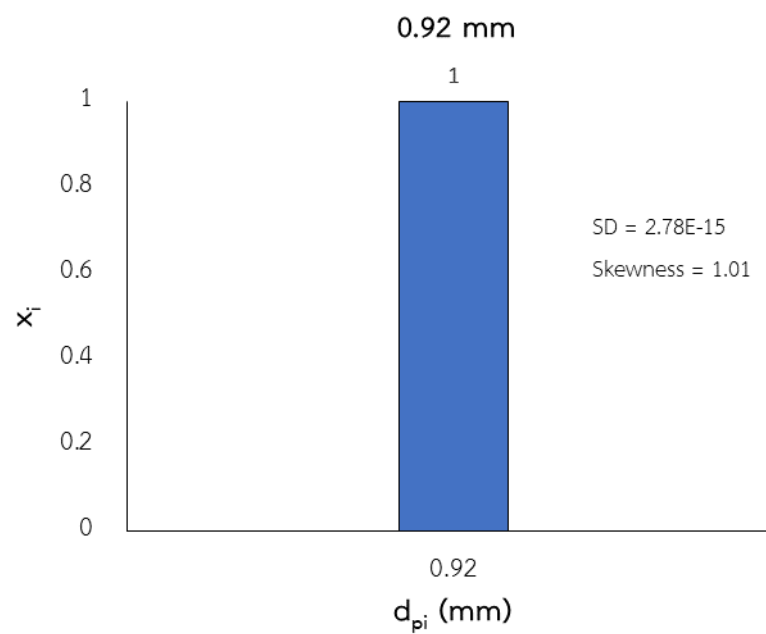
3. กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคของแข็ง



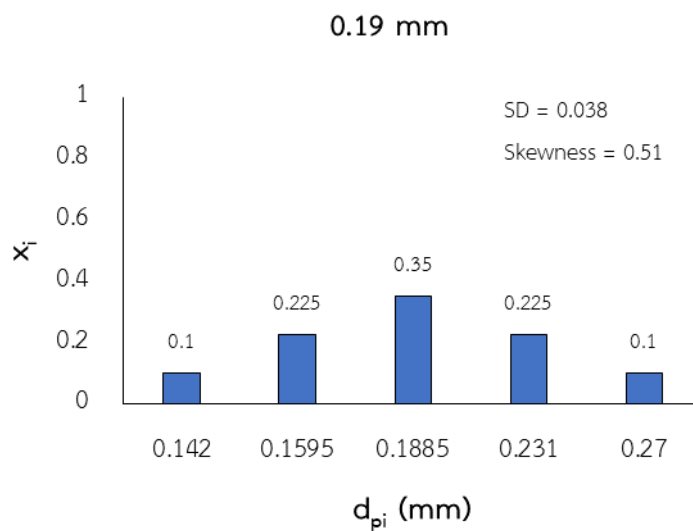
รูปที่ ข. 1 รูปแบบการกระจายขนาดแคบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มิลลิเมตร



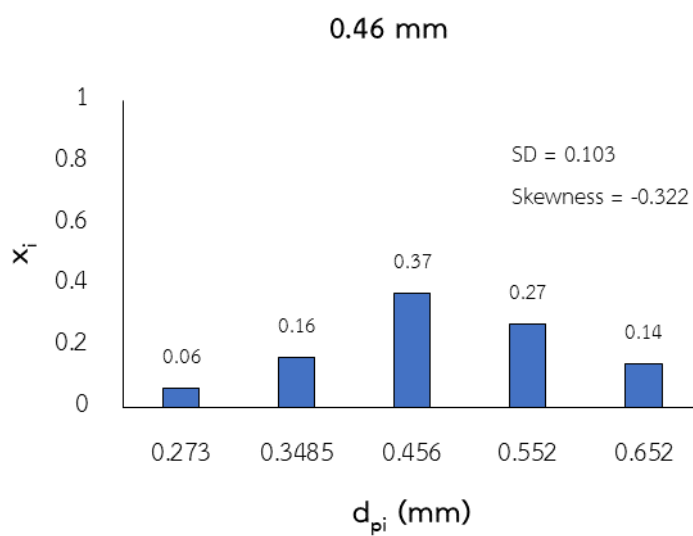
รูปที่ ข. 2 รูปแบบการกระจายขนาดแคบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร



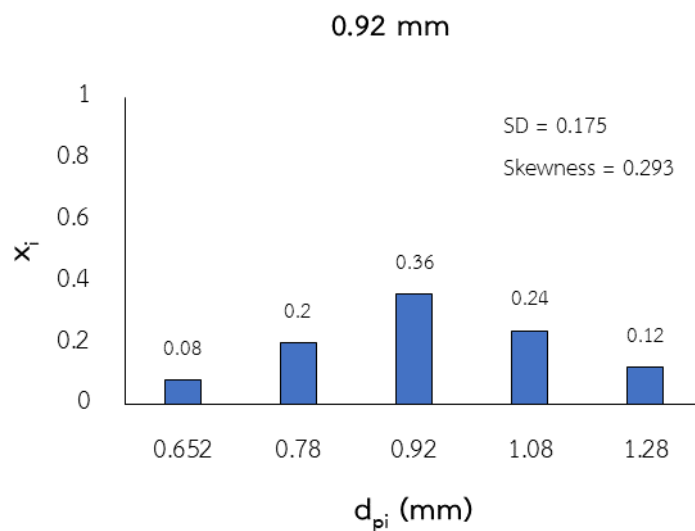
รูปที่ ข. 3 รูปแบบการกระจายขนาดแคบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 มิลลิเมตร



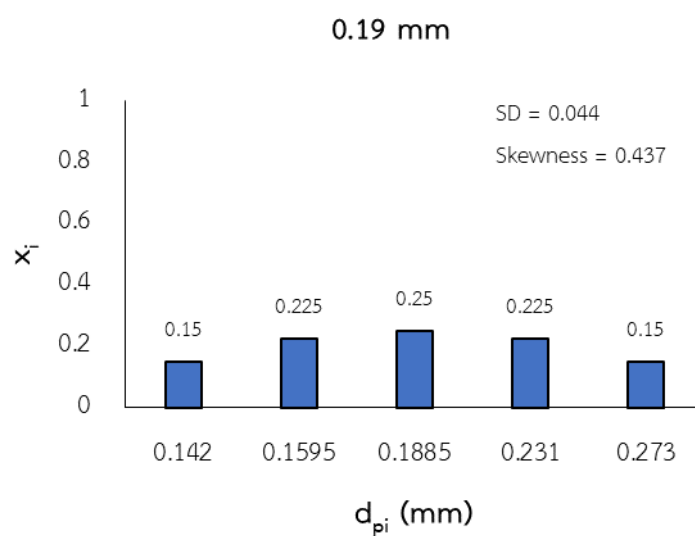
รูปที่ ข. 4 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มิลลิเมตร



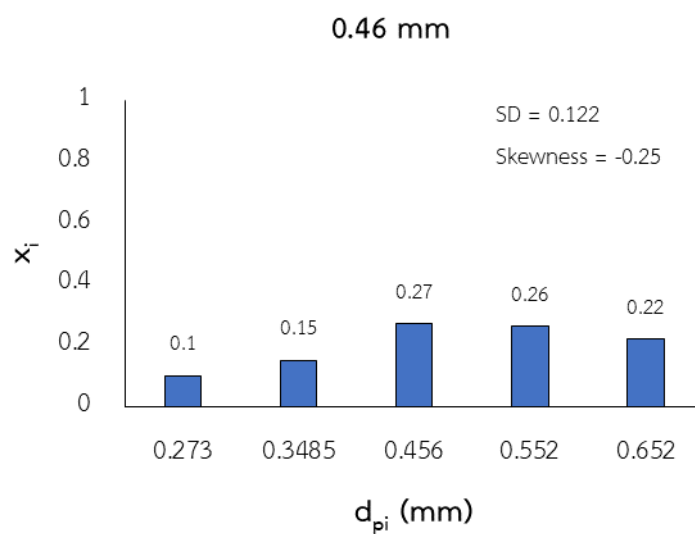
รูปที่ ข. 5 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร



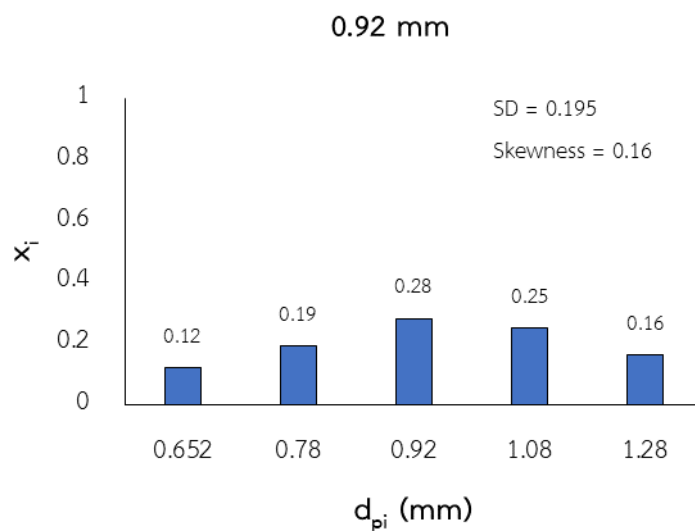
รูปที่ ข. 6 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 มิลลิเมตร



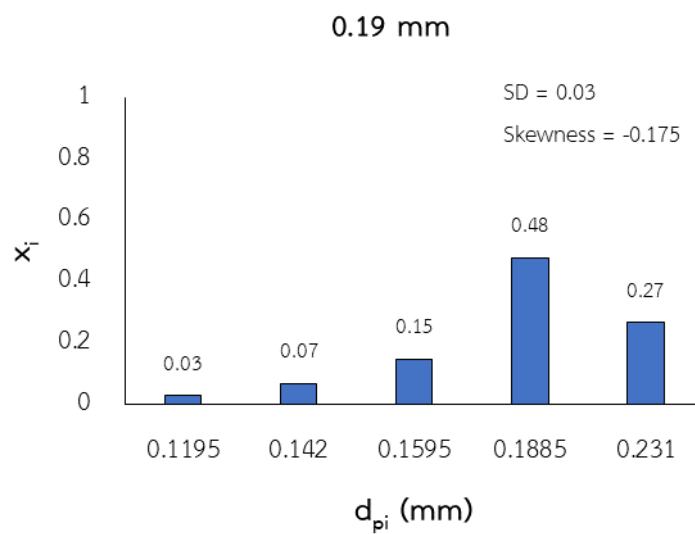
รูปที่ ข. 7 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มิลลิเมตร



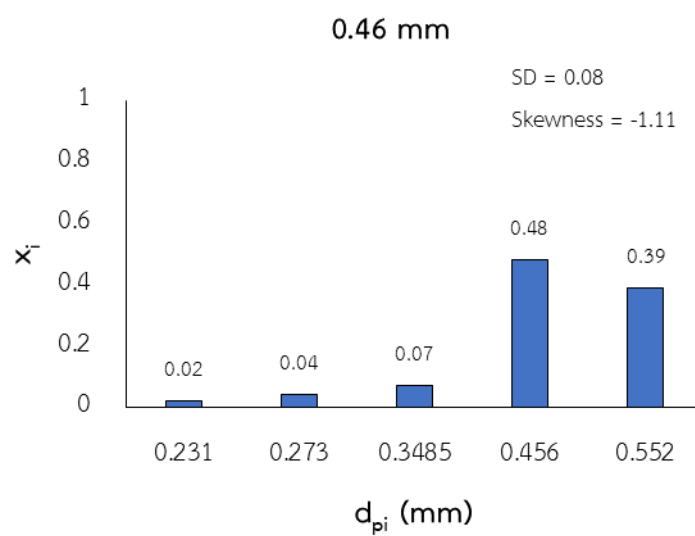
รูปที่ ข. 8 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร



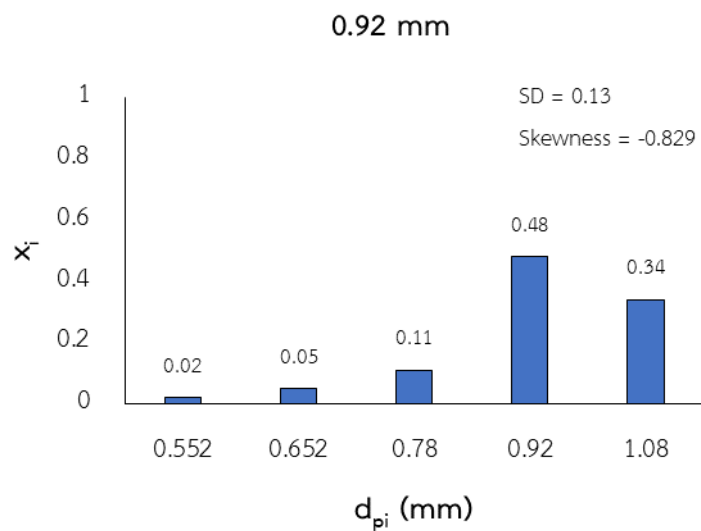
รูปที่ ข. 9 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปกติที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 มิลลิเมตร



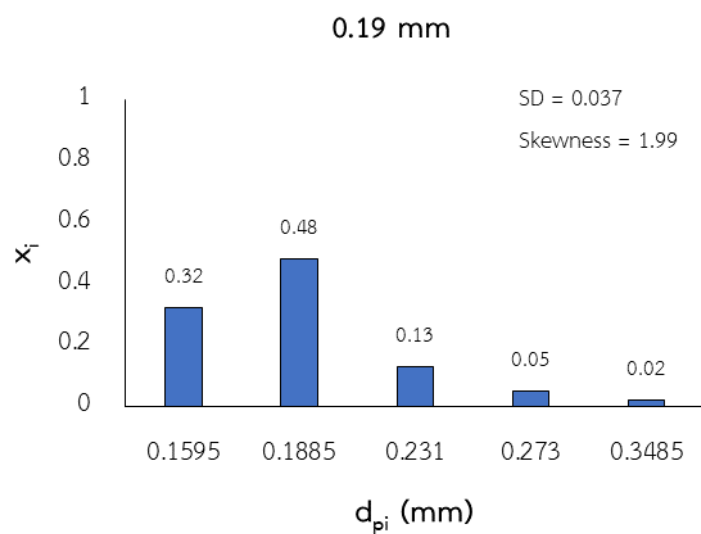
รูปที่ ข. 10 รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มิลลิเมตร



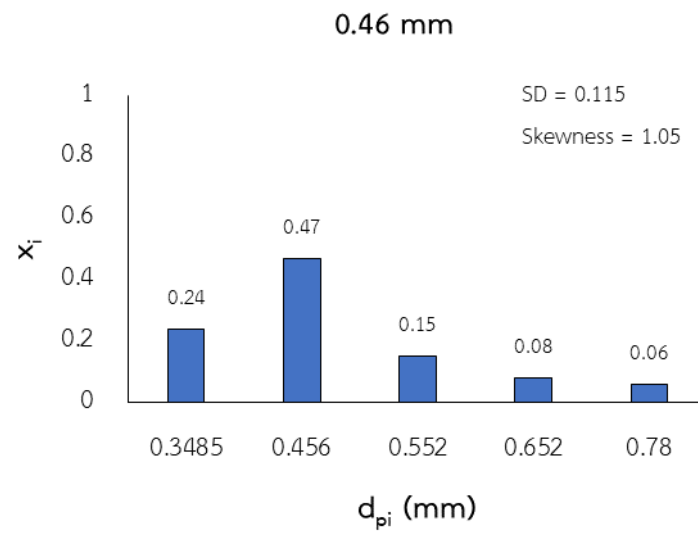
รูปที่ ข. 11 รูปแบบการกระจายขนาดแบบเบ้ทางลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร



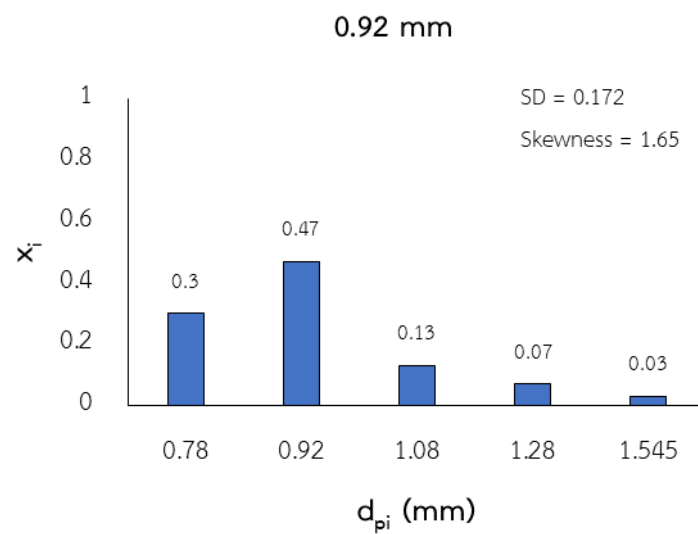
รูปที่ ข. 12 รูปแบบการกระจายขนาดแบบแบบเบ้ทางลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 มิลลิเมตร



รูปที่ ข. 13 รูปแบบการกระจายขนาดแบบแบบเบ้ทางบวกที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 มิลลิเมตร



รูปที่ ข. 14 รูปแบบการกระจายขนาดแบบแบบเบ้ทางบวกที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร



รูปที่ ข. 15 รูปแบบการกระจายขนาดแบบแบบเบ้ทางบวกที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 มิลลิเมตร

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค. 5.1 ผลการทดลองการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

| ลำดับ | ขนาดอนุภาค | | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิ ของอนุภาค แข็ง (°C) | U _{mf} (เมตรต่อวินาที) | | | ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่า U _{mf} | |
|-------|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------|------------|----------------------------------------------------|--------|
| | เฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | |
| 1 | 0.19 | Narrow cut | 1 | 30 | 0.047 | 0.043 | 0.040 | 0.044 | 0.0029 |
| 2 | 0.19 | Narrow cut | 1 | 75 | 0.029 | 0.028 | 0.031 | 0.029 | 0.0012 |
| 3 | 0.19 | Narrow cut | 1 | 120 | 0.023 | 0.025 | 0.019 | 0.023 | 0.0025 |
| 4 | 0.19 | Narrow cut | 2 | 30 | 0.050 | 0.047 | 0.045 | 0.047 | 0.0018 |
| 5 | 0.19 | Narrow cut | 2 | 75 | 0.034 | 0.036 | 0.037 | 0.035 | 0.0010 |
| 6 | 0.19 | Narrow cut | 2 | 120 | 0.027 | 0.026 | 0.025 | 0.026 | 0.0009 |
| 7 | 0.19 | Narrow cut | 3 | 30 | 0.065 | 0.064 | 0.066 | 0.065 | 0.0009 |
| 8 | 0.19 | Narrow cut | 3 | 75 | 0.056 | 0.056 | 0.056 | 0.056 | 0.0001 |
| 9 | 0.19 | Narrow cut | 3 | 120 | 0.036 | 0.037 | 0.038 | 0.037 | 0.0007 |
| 10 | 0.19 | Normal | 1 | 30 | 0.036 | 0.037 | 0.032 | 0.035 | 0.0021 |
| 11 | 0.19 | Normal | 1 | 75 | 0.026 | 0.025 | 0.023 | 0.024 | 0.0010 |
| 12 | 0.19 | Normal | 1 | 120 | 0.019 | 0.020 | 0.020 | 0.019 | 0.0006 |
| 13 | 0.19 | Normal | 2 | 30 | 0.037 | 0.041 | 0.040 | 0.040 | 0.0017 |
| 14 | 0.19 | Normal | 2 | 75 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.0003 |
| 15 | 0.19 | Normal | 2 | 120 | 0.025 | 0.020 | 0.020 | 0.022 | 0.0025 |
| 16 | 0.19 | Normal | 3 | 30 | 0.063 | 0.062 | 0.058 | 0.061 | 0.0020 |
| 17 | 0.19 | Normal | 3 | 75 | 0.047 | 0.049 | 0.049 | 0.048 | 0.0009 |
| 18 | 0.19 | Normal | 3 | 120 | 0.032 | 0.031 | 0.033 | 0.032 | 0.0011 |
| 19 | 0.19 | Normal (high SD) | 1 | 30 | 0.035 | 0.033 | 0.032 | 0.033 | 0.0011 |
| 20 | 0.19 | Normal (high SD) | 1 | 75 | 0.025 | 0.026 | 0.026 | 0.025 | 0.0001 |
| 21 | 0.19 | Normal (high SD) | 1 | 120 | 0.017 | 0.018 | 0.017 | 0.017 | 0.0007 |
| 22 | 0.19 | Normal (high SD) | 2 | 30 | 0.036 | 0.040 | 0.037 | 0.038 | 0.0018 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาค | | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิ ของอนุภาค แข็ง (°C) | U _{mf} (เมตรต่อวินาที) | | | เฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่า U _{mf} |
|-------|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------|------------|--------|----------------------------------------------------|
| | เฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | |
| 23 | 0.19 | Normal (high SD) | 2 | 75 | 0.034 | 0.034 | 0.033 | 0.034 | 0.0003 |
| 24 | 0.19 | Normal (high SD) | 2 | 120 | 0.025 | 0.026 | 0.025 | 0.025 | 0.0007 |
| 25 | 0.19 | Normal (high SD) | 3 | 30 | 0.058 | 0.057 | 0.058 | 0.057 | 0.0005 |
| 26 | 0.19 | Normal (high SD) | 3 | 75 | 0.044 | 0.047 | 0.040 | 0.044 | 0.0028 |
| 27 | 0.19 | Normal (high SD) | 3 | 120 | 0.030 | 0.029 | 0.034 | 0.031 | 0.0019 |
| 28 | 0.19 | Negative skew | 1 | 30 | 0.028 | 0.025 | 0.025 | 0.026 | 0.0011 |
| 29 | 0.19 | Negative skew | 1 | 75 | 0.023 | 0.022 | 0.023 | 0.023 | 0.0005 |
| 30 | 0.19 | Negative skew | 1 | 120 | 0.017 | 0.019 | 0.021 | 0.019 | 0.0017 |
| 31 | 0.19 | Negative skew | 2 | 30 | 0.038 | 0.038 | 0.033 | 0.036 | 0.0024 |
| 32 | 0.19 | Negative skew | 2 | 75 | 0.031 | 0.030 | 0.031 | 0.031 | 0.0004 |
| 33 | 0.19 | Negative skew | 2 | 120 | 0.025 | 0.025 | 0.026 | 0.025 | 0.0004 |
| 34 | 0.19 | Negative skew | 3 | 30 | 0.047 | 0.048 | 0.044 | 0.047 | 0.0017 |
| 35 | 0.19 | Negative skew | 3 | 75 | 0.039 | 0.041 | 0.046 | 0.042 | 0.0031 |
| 36 | 0.19 | Negative skew | 3 | 120 | 0.026 | 0.026 | 0.029 | 0.027 | 0.0012 |
| 37 | 0.19 | Positive skew | 1 | 30 | 0.024 | 0.025 | 0.023 | 0.024 | 0.0007 |
| 38 | 0.19 | Positive skew | 1 | 75 | 0.023 | 0.024 | 0.024 | 0.023 | 0.0005 |
| 39 | 0.19 | Positive skew | 1 | 120 | 0.018 | 0.019 | 0.019 | 0.019 | 0.0004 |
| 40 | 0.19 | Positive skew | 2 | 30 | 0.035 | 0.032 | 0.032 | 0.033 | 0.0013 |
| 41 | 0.19 | Positive skew | 2 | 75 | 0.030 | 0.026 | 0.027 | 0.028 | 0.0019 |
| 42 | 0.19 | Positive skew | 2 | 120 | 0.024 | 0.020 | 0.020 | 0.021 | 0.0021 |
| 43 | 0.19 | Positive skew | 3 | 30 | 0.047 | 0.044 | 0.046 | 0.046 | 0.0012 |
| 44 | 0.19 | Positive skew | 3 | 75 | 0.041 | 0.044 | 0.044 | 0.043 | 0.0014 |
| 45 | 0.19 | Positive skew | 3 | 120 | 0.030 | 0.029 | 0.029 | 0.029 | 0.0004 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาค | | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิ ของอนุภาค แข็ง (°C) | U _{mf} (เมตรต่อวินาที) | | | เฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่า U _{mf} |
|-------|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------|------------|--------|----------------------------------------------------|
| | เฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | |
| 46 | 0.46 | Narrow cut | 1 | 30 | 0.186 | 0.201 | 0.176 | 0.188 | 0.0102 |
| 47 | 0.46 | Narrow cut | 1 | 75 | 0.153 | 0.159 | 0.155 | 0.156 | 0.0024 |
| 48 | 0.46 | Narrow cut | 1 | 120 | 0.116 | 0.128 | 0.118 | 0.120 | 0.0055 |
| 49 | 0.46 | Narrow cut | 2 | 30 | 0.213 | 0.220 | 0.224 | 0.219 | 0.0044 |
| 50 | 0.46 | Narrow cut | 2 | 75 | 0.154 | 0.158 | 0.173 | 0.162 | 0.0082 |
| 51 | 0.46 | Narrow cut | 2 | 120 | 0.160 | 0.115 | 0.129 | 0.135 | 0.0189 |
| 52 | 0.46 | Narrow cut | 3 | 30 | 0.245 | 0.235 | 0.236 | 0.238 | 0.0045 |
| 53 | 0.46 | Narrow cut | 3 | 75 | 0.178 | 0.194 | 0.193 | 0.188 | 0.0076 |
| 54 | 0.46 | Narrow cut | 3 | 120 | 0.148 | 0.143 | 0.141 | 0.144 | 0.0028 |
| 55 | 0.46 | Normal | 1 | 30 | 0.186 | 0.163 | 0.193 | 0.181 | 0.0129 |
| 56 | 0.46 | Normal | 1 | 75 | 0.158 | 0.138 | 0.136 | 0.144 | 0.0100 |
| 57 | 0.46 | Normal | 1 | 120 | 0.107 | 0.118 | 0.106 | 0.110 | 0.0051 |
| 58 | 0.46 | Normal | 2 | 30 | 0.214 | 0.199 | 0.193 | 0.202 | 0.0088 |
| 59 | 0.46 | Normal | 2 | 75 | 0.153 | 0.145 | 0.151 | 0.150 | 0.0032 |
| 60 | 0.46 | Normal | 2 | 120 | 0.110 | 0.121 | 0.128 | 0.120 | 0.0076 |
| 61 | 0.46 | Normal | 3 | 30 | 0.212 | 0.217 | 0.253 | 0.227 | 0.0180 |
| 62 | 0.46 | Normal | 3 | 75 | 0.178 | 0.180 | 0.159 | 0.173 | 0.0095 |
| 63 | 0.46 | Normal | 3 | 120 | 0.123 | 0.138 | 0.132 | 0.131 | 0.0059 |
| 64 | 0.46 | Normal (high SD) | 1 | 30 | 0.197 | 0.171 | 0.168 | 0.179 | 0.0129 |
| 65 | 0.46 | Normal (high SD) | 1 | 75 | 0.117 | 0.132 | 0.139 | 0.129 | 0.0093 |
| 66 | 0.46 | Normal (high SD) | 1 | 120 | 0.102 | 0.104 | 0.111 | 0.106 | 0.0040 |
| 67 | 0.46 | Normal (high SD) | 2 | 30 | 0.204 | 0.186 | 0.183 | 0.191 | 0.0095 |
| 68 | 0.46 | Normal (high SD) | 2 | 75 | 0.143 | 0.143 | 0.131 | 0.139 | 0.0057 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาค | | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิ ของอนุภาค แข็ง (°C) | U _{mf} (เมตรต่อวินาที) | | | เฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่า U _{mf} |
|-------|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------|------------|--------|----------------------------------------------------|
| | เฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | |
| 69 | 0.46 | Normal (high SD) | 2 | 120 | 0.119 | 0.112 | 0.116 | 0.116 | 0.0026 |
| 70 | 0.46 | Normal (high SD) | 3 | 30 | 0.219 | 0.226 | 0.218 | 0.221 | 0.0037 |
| 71 | 0.46 | Normal (high SD) | 3 | 75 | 0.167 | 0.178 | 0.169 | 0.171 | 0.0050 |
| 72 | 0.46 | Normal (high SD) | 3 | 120 | 0.121 | 0.125 | 0.133 | 0.126 | 0.0046 |
| 73 | 0.46 | Negative skew | 1 | 30 | 0.181 | 0.176 | 0.176 | 0.178 | 0.0025 |
| 74 | 0.46 | Negative skew | 1 | 75 | 0.122 | 0.142 | 0.158 | 0.141 | 0.0150 |
| 75 | 0.46 | Negative skew | 1 | 120 | 0.115 | 0.116 | 0.114 | 0.115 | 0.0009 |
| 76 | 0.46 | Negative skew | 2 | 30 | 0.178 | 0.205 | 0.185 | 0.189 | 0.0113 |
| 77 | 0.46 | Negative skew | 2 | 75 | 0.160 | 0.135 | 0.146 | 0.147 | 0.0101 |
| 78 | 0.46 | Negative skew | 2 | 120 | 0.120 | 0.117 | 0.115 | 0.117 | 0.0018 |
| 79 | 0.46 | Negative skew | 3 | 30 | 0.210 | 0.238 | 0.210 | 0.220 | 0.0130 |
| 80 | 0.46 | Negative skew | 3 | 75 | 0.169 | 0.169 | 0.174 | 0.171 | 0.0024 |
| 81 | 0.46 | Negative skew | 3 | 120 | 0.132 | 0.145 | 0.131 | 0.136 | 0.0064 |
| 82 | 0.46 | Positive skew | 1 | 30 | 0.164 | 0.178 | 0.179 | 0.173 | 0.0070 |
| 83 | 0.46 | Positive skew | 1 | 75 | 0.143 | 0.132 | 0.136 | 0.137 | 0.0044 |
| 84 | 0.46 | Positive skew | 1 | 120 | 0.110 | 0.124 | 0.116 | 0.117 | 0.0055 |
| 85 | 0.46 | Positive skew | 2 | 30 | 0.181 | 0.178 | 0.192 | 0.183 | 0.0060 |
| 86 | 0.46 | Positive skew | 2 | 75 | 0.143 | 0.129 | 0.156 | 0.143 | 0.0110 |
| 87 | 0.46 | Positive skew | 2 | 120 | 0.117 | 0.112 | 0.129 | 0.119 | 0.0071 |
| 88 | 0.46 | Positive skew | 3 | 30 | 0.212 | 0.219 | 0.212 | 0.214 | 0.0034 |
| 89 | 0.46 | Positive skew | 3 | 75 | 0.169 | 0.169 | 0.172 | 0.170 | 0.0014 |
| 90 | 0.46 | Positive skew | 3 | 120 | 0.132 | 0.132 | 0.131 | 0.132 | 0.0004 |
| 91 | 0.92 | Narrow cut | 1 | 30 | 0.666 | 0.641 | 0.652 | 0.653 | 0.0105 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาค | | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิ ของอนุภาค แข็ง (°C) | U _{mf} (เมตรต่อวินาที) | | | เฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่า U _{mf} |
|-------|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------|------------|--------|----------------------------------------------------|
| | เฉลี่ย (มิลลิเมตร) | PSD | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | |
| 92 | 0.92 | Narrow cut | 1 | 75 | 0.556 | 0.552 | 0.540 | 0.549 | 0.0066 |
| 93 | 0.92 | Narrow cut | 1 | 120 | 0.515 | 0.458 | 0.498 | 0.490 | 0.0238 |
| 94 | 0.92 | Narrow cut | 2 | 30 | 0.701 | 0.675 | 0.668 | 0.681 | 0.0142 |
| 95 | 0.92 | Narrow cut | 2 | 75 | 0.558 | 0.538 | 0.619 | 0.572 | 0.0346 |
| 96 | 0.92 | Narrow cut | 2 | 120 | 0.506 | 0.511 | 0.521 | 0.512 | 0.0061 |
| 97 | 0.92 | Narrow cut | 3 | 30 | 0.683 | 0.697 | 0.683 | 0.688 | 0.0068 |
| 98 | 0.92 | Narrow cut | 3 | 75 | 0.586 | 0.641 | 0.570 | 0.599 | 0.0305 |
| 99 | 0.92 | Narrow cut | 3 | 120 | 0.537 | 0.551 | 0.510 | 0.533 | 0.0169 |
| 100 | 0.92 | Normal | 1 | 30 | 0.649 | 0.618 | 0.653 | 0.640 | 0.0158 |
| 101 | 0.92 | Normal | 1 | 75 | 0.505 | 0.526 | 0.518 | 0.516 | 0.0085 |
| 102 | 0.92 | Normal | 1 | 120 | 0.485 | 0.472 | 0.448 | 0.468 | 0.0153 |
| 103 | 0.92 | Normal | 2 | 30 | 0.633 | 0.647 | 0.655 | 0.645 | 0.0093 |
| 104 | 0.92 | Normal | 2 | 75 | 0.520 | 0.544 | 0.509 | 0.524 | 0.0148 |
| 105 | 0.92 | Normal | 2 | 120 | 0.479 | 0.480 | 0.472 | 0.477 | 0.0033 |
| 106 | 0.92 | Normal | 3 | 30 | 0.664 | 0.651 | 0.651 | 0.655 | 0.0063 |
| 107 | 0.92 | Normal | 3 | 75 | 0.562 | 0.565 | 0.559 | 0.562 | 0.0027 |
| 108 | 0.92 | Normal | 3 | 120 | 0.475 | 0.490 | 0.478 | 0.481 | 0.0061 |
| 109 | 0.92 | Normal (high SD) | 1 | 30 | 0.633 | 0.663 | 0.609 | 0.635 | 0.0221 |
| 110 | 0.92 | Normal (high SD) | 1 | 75 | 0.508 | 0.484 | 0.512 | 0.501 | 0.0121 |
| 111 | 0.92 | Normal (high SD) | 1 | 120 | 0.453 | 0.455 | 0.459 | 0.455 | 0.0023 |
| 112 | 0.92 | Normal (high SD) | 2 | 30 | 0.596 | 0.692 | 0.641 | 0.643 | 0.0393 |
| 113 | 0.92 | Normal (high SD) | 2 | 75 | 0.510 | 0.489 | 0.520 | 0.507 | 0.0130 |
| 114 | 0.92 | Normal (high SD) | 2 | 120 | 0.453 | 0.480 | 0.460 | 0.464 | 0.0116 |

| ลำดับ | ขนาดอนุภาค เฉลี่ย (ไมครอน) | PSD | ปริมาณอนุภาค ของแข็งเริ่มต้น (กิโลกรัม) | อุณหภูมิ ของอนุภาค แข็ง (°C) | U _{mf} (เมตรต่อวินาที) | | | เฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่า U _{mf} |
|-------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------|------------|--------|----------------------------------------------------|
| | | | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | |
| 115 | 0.92 | Normal (high SD) | 3 | 30 | 0.647 | 0.647 | 0.660 | 0.651 | 0.0064 |
| 116 | 0.92 | Normal (high SD) | 3 | 75 | 0.563 | 0.535 | 0.560 | 0.553 | 0.0125 |
| 117 | 0.92 | Normal (high SD) | 3 | 120 | 0.492 | 0.469 | 0.475 | 0.479 | 0.0098 |
| 118 | 0.92 | Negative skew | 1 | 30 | 0.594 | 0.540 | 0.612 | 0.582 | 0.0307 |
| 119 | 0.92 | Negative skew | 1 | 75 | 0.523 | 0.527 | 0.501 | 0.517 | 0.0116 |
| 120 | 0.92 | Negative skew | 1 | 120 | 0.444 | 0.494 | 0.471 | 0.470 | 0.0201 |
| 121 | 0.92 | Negative skew | 2 | 30 | 0.627 | 0.622 | 0.598 | 0.616 | 0.0126 |
| 122 | 0.92 | Negative skew | 2 | 75 | 0.535 | 0.543 | 0.526 | 0.535 | 0.0066 |
| 123 | 0.92 | Negative skew | 2 | 120 | 0.473 | 0.483 | 0.476 | 0.477 | 0.0043 |
| 124 | 0.92 | Negative skew | 3 | 30 | 0.639 | 0.637 | 0.634 | 0.637 | 0.0018 |
| 125 | 0.92 | Negative skew | 3 | 75 | 0.594 | 0.573 | 0.568 | 0.578 | 0.0113 |
| 126 | 0.92 | Negative skew | 3 | 120 | 0.498 | 0.490 | 0.485 | 0.491 | 0.0055 |
| 127 | 0.92 | Positive skew | 1 | 30 | 0.575 | 0.579 | 0.586 | 0.580 | 0.0046 |
| 128 | 0.92 | Positive skew | 1 | 75 | 0.475 | 0.489 | 0.482 | 0.482 | 0.0055 |
| 129 | 0.92 | Positive skew | 1 | 120 | 0.424 | 0.455 | 0.523 | 0.467 | 0.0414 |
| 130 | 0.92 | Positive skew | 2 | 30 | 0.581 | 0.603 | 0.628 | 0.604 | 0.0195 |
| 131 | 0.92 | Positive skew | 2 | 75 | 0.475 | 0.512 | 0.488 | 0.492 | 0.0153 |
| 132 | 0.92 | Positive skew | 2 | 120 | 0.478 | 0.483 | 0.469 | 0.477 | 0.0055 |
| 133 | 0.92 | Positive skew | 3 | 30 | 0.656 | 0.670 | 0.580 | 0.635 | 0.0395 |
| 134 | 0.92 | Positive skew | 3 | 75 | 0.554 | 0.547 | 0.557 | 0.553 | 0.0042 |
| 135 | 0.92 | Positive skew | 3 | 120 | 0.471 | 0.500 | 0.496 | 0.489 | 0.0125 |

ตารางที่ ค. 5.2 ข้อมูลตั้งต้นสำหรับการสร้างสหสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองการถดถอย และการใช้
โครงข่ายประสาทเทียม

| Ar | Input parameters | | | | Output parameters | |
|----------|------------------|-----------|-----------|----------|-------------------|--------------|
| | H_0/D_0 | d_p/D_0 | SD | Skewness | $Re_{mf,exp}$ | $U_{mf,exp}$ |
| 595.43 | 0.392 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.517 | 0.044 |
| 418.53 | 0.392 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.269 | 0.029 |
| 308.94 | 0.392 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.169 | 0.023 |
| 595.43 | 0.816 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.561 | 0.047 |
| 418.53 | 0.816 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.328 | 0.035 |
| 308.94 | 0.816 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.193 | 0.026 |
| 595.43 | 1.28 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.771 | 0.065 |
| 418.53 | 1.28 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.518 | 0.056 |
| 308.94 | 1.28 | 0.0015 | 8.348E-17 | -1.008 | 0.277 | 0.037 |
| 8449.80 | 0.32 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 5.380 | 0.188 |
| 5939.31 | 0.32 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 3.486 | 0.156 |
| 4384.14 | 0.32 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 2.181 | 0.120 |
| 8449.80 | 0.784 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 6.276 | 0.219 |
| 5939.31 | 0.784 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 3.624 | 0.162 |
| 4384.14 | 0.784 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 2.441 | 0.135 |
| 8449.80 | 1.28 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 6.829 | 0.238 |
| 5939.31 | 1.28 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 4.220 | 0.188 |
| 4384.14 | 1.28 | 0.0037 | 1.836E-15 | -1.008 | 2.606 | 0.144 |
| 67598.42 | 0.4 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 37.404 | 0.653 |
| 47514.52 | 0.4 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 24.612 | 0.549 |
| 35073.09 | 0.4 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 17.759 | 0.490 |
| 67598.42 | 0.784 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 39.016 | 0.681 |

| Input parameters | | | | | Output parameters | |
|------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------|--------------|
| Ar | H_0/D_0 | d_p/D_0 | SD | Skewness | $Re_{mf,exp}$ | $U_{mf,exp}$ |
| 47514.52 | 0.784 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 25.605 | 0.572 |
| 35073.09 | 0.784 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 18.562 | 0.512 |
| 67598.42 | 1.224 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 39.381 | 0.688 |
| 47514.52 | 1.224 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 26.833 | 0.599 |
| 35073.09 | 1.224 | 0.0074 | 2.783E-15 | 1.008 | 19.302 | 0.533 |
| 595.43 | 0.4 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.410 | 0.035 |
| 418.53 | 0.4 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.226 | 0.024 |
| 308.94 | 0.4 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.144 | 0.019 |
| 595.43 | 0.824 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.470 | 0.040 |
| 418.53 | 0.824 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.249 | 0.027 |
| 308.94 | 0.824 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.162 | 0.022 |
| 595.43 | 1.256 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.722 | 0.061 |
| 418.53 | 1.256 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.447 | 0.048 |
| 308.94 | 1.256 | 0.0015 | 0.038 | 0.510 | 0.239 | 0.032 |
| 8449.80 | 0.4 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 5.170 | 0.181 |
| 5939.31 | 0.4 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 3.226 | 0.144 |
| 4384.14 | 0.4 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 1.998 | 0.110 |
| 8449.80 | 0.824 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 5.786 | 0.202 |
| 5939.31 | 0.824 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 3.354 | 0.150 |
| 4384.14 | 0.824 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 2.173 | 0.120 |
| 8449.80 | 1.264 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 6.511 | 0.227 |
| 5939.31 | 1.264 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 3.864 | 0.173 |

| Input parameters | | | | | Output parameters | |
|------------------|-----------|-----------|-------|----------|-------------------|--------------|
| Ar | H_0/D_0 | d_p/D_0 | SD | Skewness | $Re_{mf,exp}$ | $U_{mf,exp}$ |
| 4384.14 | 1.264 | 0.0037 | 0.103 | -0.322 | 2.373 | 0.131 |
| 67598.42 | 0.352 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 36.670 | 0.640 |
| 47514.52 | 0.352 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 23.127 | 0.516 |
| 35073.09 | 0.352 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 16.964 | 0.468 |
| 67598.42 | 0.824 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 36.944 | 0.645 |
| 47514.52 | 0.824 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 23.492 | 0.524 |
| 35073.09 | 0.824 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 17.283 | 0.477 |
| 67598.42 | 1.256 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 37.537 | 0.655 |
| 47514.52 | 1.256 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 25.180 | 0.562 |
| 35073.09 | 1.256 | 0.0074 | 0.175 | 0.293 | 17.422 | 0.481 |
| 595.43 | 0.36 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.393 | 0.033 |
| 418.53 | 0.36 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.236 | 0.025 |
| 308.94 | 0.36 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.130 | 0.017 |
| 595.43 | 0.84 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.447 | 0.038 |
| 418.53 | 0.84 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.313 | 0.034 |
| 308.94 | 0.84 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.189 | 0.025 |
| 595.43 | 1.2 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.678 | 0.057 |
| 418.53 | 1.2 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.405 | 0.044 |
| 308.94 | 1.2 | 0.0015 | 0.044 | 0.437 | 0.231 | 0.031 |
| 8449.80 | 0.392 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 5.115 | 0.179 |
| 5939.31 | 0.392 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 2.892 | 0.129 |
| 4384.14 | 0.392 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 1.911 | 0.106 |

| Input parameters | | | | | Output parameters | |
|------------------|-----------|-----------|-------|----------|-------------------|--------------|
| Ar | H_0/D_0 | d_p/D_0 | SD | Skewness | $Re_{mf,exp}$ | $U_{mf,exp}$ |
| 8449.80 | 0.824 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 5.470 | 0.191 |
| 5939.31 | 0.824 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 3.113 | 0.139 |
| 4384.14 | 0.824 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 2.097 | 0.116 |
| 8449.80 | 1.232 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 6.334 | 0.221 |
| 5939.31 | 1.232 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 3.837 | 0.171 |
| 4384.14 | 1.232 | 0.0037 | 0.122 | -0.249 | 2.290 | 0.126 |
| 67598.42 | 0.392 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 36.347 | 0.635 |
| 47514.52 | 0.392 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 22.458 | 0.501 |
| 35073.09 | 0.392 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 16.498 | 0.455 |
| 67598.42 | 0.8 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 36.820 | 0.643 |
| 47514.52 | 0.8 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 22.699 | 0.507 |
| 35073.09 | 0.8 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 16.824 | 0.464 |
| 67598.42 | 1.264 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 37.297 | 0.651 |
| 47514.52 | 1.264 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 24.765 | 0.553 |
| 35073.09 | 1.264 | 0.0074 | 0.195 | 0.160 | 17.347 | 0.479 |
| 595.43 | 0.416 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.307 | 0.026 |
| 418.53 | 0.416 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.210 | 0.023 |
| 308.94 | 0.416 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.143 | 0.019 |
| 595.43 | 0.8 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.426 | 0.036 |
| 418.53 | 0.8 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.285 | 0.031 |
| 308.94 | 0.8 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.189 | 0.025 |
| 595.43 | 1.2 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.552 | 0.047 |

| Input parameters | | | | | Output parameters | |
|------------------|-----------|-----------|-------|----------|-------------------|--------------|
| Ar | H_0/D_0 | d_p/D_0 | SD | Skewness | $Re_{mf,exp}$ | $U_{mf,exp}$ |
| 418.53 | 1.2 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.390 | 0.042 |
| 308.94 | 1.2 | 0.0015 | 0.030 | -0.175 | 0.202 | 0.027 |
| 8449.80 | 0.4 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 5.092 | 0.178 |
| 5939.31 | 0.4 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 3.154 | 0.141 |
| 4384.14 | 0.4 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 2.081 | 0.115 |
| 8449.80 | 0.8 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 5.420 | 0.189 |
| 5939.31 | 0.8 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 3.292 | 0.147 |
| 4384.14 | 0.8 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 2.125 | 0.117 |
| 8449.80 | 1.28 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 6.288 | 0.220 |
| 5939.31 | 1.28 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 3.825 | 0.171 |
| 4384.14 | 1.28 | 0.0037 | 0.080 | -1.114 | 2.467 | 0.136 |
| 67598.42 | 0.424 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 33.317 | 0.582 |
| 47514.52 | 0.424 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 23.166 | 0.517 |
| 35073.09 | 0.424 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 17.010 | 0.470 |
| 67598.42 | 0.8 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 35.264 | 0.616 |
| 47514.52 | 0.8 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 23.961 | 0.535 |
| 35073.09 | 0.8 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 17.292 | 0.477 |
| 67598.42 | 1.264 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 36.455 | 0.637 |
| 47514.52 | 1.264 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 25.915 | 0.578 |
| 35073.09 | 1.264 | 0.0074 | 0.130 | -0.829 | 17.785 | 0.491 |
| 595.43 | 0.4 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.285 | 0.024 |
| 418.53 | 0.4 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.217 | 0.023 |

| Input parameters | | | | | Output parameters | |
|------------------|-----------|-----------|-------|----------|-------------------|--------------|
| Ar | H_0/D_0 | d_p/D_0 | SD | Skewness | $Re_{mf,exp}$ | $U_{mf,exp}$ |
| 308.94 | 0.4 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.141 | 0.019 |
| 595.43 | 0.84 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.392 | 0.033 |
| 418.53 | 0.84 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.255 | 0.028 |
| 308.94 | 0.84 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.158 | 0.021 |
| 595.43 | 1.256 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.540 | 0.046 |
| 418.53 | 1.256 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.400 | 0.043 |
| 308.94 | 1.256 | 0.0015 | 0.037 | 1.995 | 0.221 | 0.029 |
| 8449.80 | 0.384 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 4.966 | 0.173 |
| 5939.31 | 0.384 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 3.070 | 0.137 |
| 4384.14 | 0.384 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 2.118 | 0.117 |
| 8449.80 | 0.792 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 5.253 | 0.183 |
| 5939.31 | 0.792 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 3.199 | 0.143 |
| 4384.14 | 0.792 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 2.164 | 0.119 |
| 8449.80 | 1.28 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 6.140 | 0.214 |
| 5939.31 | 1.28 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 3.813 | 0.170 |
| 4384.14 | 1.28 | 0.0037 | 0.114 | 1.052 | 2.389 | 0.132 |
| 67598.42 | 0.384 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 33.222 | 0.580 |
| 47514.52 | 0.384 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 21.596 | 0.482 |
| 35073.09 | 0.384 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 16.927 | 0.467 |
| 67598.42 | 0.832 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 34.594 | 0.604 |
| 47514.52 | 0.832 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 22.029 | 0.492 |
| 35073.09 | 0.832 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 17.266 | 0.477 |
| 67598.42 | 1.28 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 36.382 | 0.635 |
| 47514.52 | 1.28 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 24.767 | 0.553 |
| 35073.09 | 1.28 | 0.0074 | 0.172 | 1.647 | 17.711 | 0.489 |

บรรณานุกรม

- [1] D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidization engineering, Elsevier (2013).
- [2] R.R. Pattipati, C. Wen, Minimum fluidization velocity at high temperatures, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development 20(4) (1981) 705-707.
- [3] G.G. Joseph, J. Leboeiro, C.M. Hrenya, A.R. Stevens, Experimental segregation profiles in bubbling gas-fluidized beds, AIChE journal 53(11) (2007) 2804-2813.
- [4] J. Grace, G. Sun, Influence of particle size distribution on the performance of fluidized bed reactors, The Canadian Journal of Chemical Engineering 69(5) (1991) 1126-1134.
- [5] D. Gauthier, S. Zerguerras, G. Flamant, Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization, Chemical Engineering Journal 74(3) (1999) 181-196.
- [6] M. Jiliang, C. Xiaoping, L. Daoyin, Minimum fluidization velocity of particles with wide size distribution at high temperatures, Powder technology 235 (2013) 271-278.
- [7] Z. Fu, J. Zhu, S. Barghi, Y. Zhao, Z. Luo, C. Duan, Minimum fluidization velocity growth due to bed inventory increase in an Air Dense Medium Fluidized Bed, Chemical Engineering Journal 359 (2019) 1372-1378.
- [8] เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, พลูอิตเซชัน, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ (2560).
- [9] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์.
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1303/sieve-analysis>. (Accessed มิถุนายน 2563).
- [10] P. Basu, Combustion and gasification in fluidized beds, CRC press (2006).
- [11] กมรัช เจิมศิริศักดิ์พงษ์, การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการตกตะกอนและการคำนวณประสิทธิภาพของไซโคลอน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, ภาควิชา วิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2546).
- [12] D.S. Júnior, F.B. Júnior, S.S. de Souza, F.J. Krug, Cryogenic sample grinding for copper, lead and manganese determination in human teeth by slurry sampling GFAAS, Journal of Analytical Atomic Spectrometry 18(8) (2003) 939-945.
- [13] M. Eling, Fitting insurance claims to skewed distributions: Are the skew-normal and

- skew-student good models?, Insurance: Mathematics and Economics 51(2) (2012) 239-248.
- [14] R. Surbkar, T. Wongsiriamnuay, S. Surbkar, Foundation of the Ergun equation for the calculation of minimum fluidizing velocity of solid particles, Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering 18(1) (2012) 24-33.
- [15] S. Ergun, Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Prog. 48 (1952) 89-94.
- [16] P. Basu, Bed-to-wall heat transfer in a fluidized bed coal combustor, (1978).
- [17] M. Ye, M.A. van der Hoef, J. Kuipers, The effects of particle and gas properties on the fluidization of Geldart A particles, Chemical engineering science 60(16) (2005) 4567-4580.
- [18] G. Johnson, M. Massoudi, K. Rajagopal, Flow of a fluid—solid mixture between flat plates, Chemical Engineering Science 46(7) (1991) 1713-1723.
- [19] Y. Shao, J. Gu, W. Zhong, A. Yu, Determination of minimum fluidization velocity in fluidized bed at elevated pressures and temperatures using CFD simulations, Powder Technology 350 (2019) 81-90.
- [20] C. Wen, H. Yu, Minimum Fluidization, 1966]: A Generalized Method for Prediction the Minimum Fluidization Velocity, AIChE Journal 12 (1966) 610-612.
- [21] P. Bourgeois, P. Grenier, The ratio of terminal velocity to minimum fluidising velocity for spherical particles, The Canadian Journal of Chemical Engineering 46(5) (1968) 325-328.
- [22] S. Wu, J. Baeyens, Effect of operating temperature on minimum fluidization velocity, Powder technology 67(2) (1991) 217-220.
- [23] H.J. Subramani, M.M. Balaiyya, L.R. Miranda, Minimum fluidization velocity at elevated temperatures for Geldart's group-B powders, Experimental Thermal and Fluid Science 32(1) (2007) 166-173.
- [24] Z. Zhiping, N. Yongjie, L. Qinggang, Effect of pressure on minimum fluidization velocity, Journal of Thermal Science 16(3) (2007) 264-269.
- [25] Z. Chen, X. Chen, Y. Wu, R.-c. CHEN, Study on minimum fluidization velocity at elevated temperature, Proceedings of the CSEE 30 (2010) 21-25.
- [26] M.W. Seo, J.H. Goo, S.D. Kim, J.G. Lee, Y.T. Guahk, N.S. Rho, G.H. Koo, D.Y. Lee, W.C. Cho, B.H. Song, The transition velocities in a dual circulating fluidized bed reactor with

variation of temperatures, *Powder Technology* 264 (2014) 583-591.

[27] L. Li, Y. Duan, L. Duan, C. Xu, E.J. Anthony, Flow characteristics in pressurized oxy-fuel fluidized bed under hot condition, *International Journal of Multiphase Flow* 108 (2018) 1-10.

[28] Y. Shao, Z. Li, W. Zhong, Z. Bian, A. Yu, Minimum fluidization velocity of particles with different size distributions at elevated pressures and temperatures, *Chemical Engineering Science* 216 (2020) 115555.

[29] อาทิตย์ พิสันเทียะ ธีรานันท์ แลจะบก และ วรชาติ ศรีสำราญ, การใช้โครงข่ายประสาทเทียมช่วยออกแบบระบบไฟฟ้าสำหรับวงจรมอเตอร์, โครงการงานหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม (2554).

[30] ชงจรส์ แสงอรุณ และ อรลาภ แสงอรุณ, การจำแนกพฤติกรรมลาออกของพนักงานโรงแรมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม, *Southeast Bangkok Journal* 1(2) (2558) 96-112.

[31] M.G. Tadesse, Y. Chen, L. Wang, V. Nierstrasz, C. Loghin, Tactile comfort prediction of functional fabrics from instrumental data using intelligence systems, *Fibers and Polymers* 20(1) (2019) 199-209.

[32] R. Shanmugamani, *Deep Learning for Computer Vision: Expert techniques to train advanced neural networks using TensorFlow and Keras*, Packt Publishing Ltd 2018.

[33] M. Downmore, S.D. Jambgwa, K.P. Kusaziwa, Effect of bed particle size and temperature variation on the minimum fluidisation velocity: A comparison with minimum fluidisation velocity correlations for bubbling fluidised bed designs, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 233(5) (2019) 1001-1012.

[34] M. Hartman, O. Trnka, M. Pohořelý, Minimum and terminal velocities in fluidization of particulate ceramsite at ambient and elevated temperature, *Industrial & engineering chemistry research* 46(22) (2007) 7260-7266.

[35] S. Mohanta, A.B. Daram, S. Chakraborty, B.C. Meikap, Characteristics of minimum fluidization velocity for magnetite powder used in an air dense medium fluidized bed for coal beneficiation, *Particle & Particle Systems Characterization* 29(4) (2012) 228-237.

[36] M. Rasteh, F. Farhadi, G. Ahmadi, Empirical models for minimum fluidization velocity of particles with different size distribution in tapered fluidized beds, *Powder*

Technology 338 (2018) 563-575.

[37] R. Feng, J. Li, Z. Cheng, X. Yang, Y. Fang, Influence of particle size distribution on minimum fluidization velocity and bed expansion at elevated pressure, Powder technology 320 (2017) 27-36.

[38] P. Rowe, A.-W. Nienow, Minimum fluidisation velocity of multi-component particle mixtures, Chemical Engineering Science 30(11) (1975) 1365-1369.

[39] H. Jiang, H. Chen, J. Gao, J. Lu, Y. Wang, C. Wang, Characterization of gas–solid fluidization in fluidized beds with different particle size distributions by analyzing pressure fluctuations in wind caps, Chemical Engineering Journal 352 (2018) 923-939.

[40] G. Matheson, W. Herbst, P. Holt, Characteristics of fluid-solid systems, Industrial & Engineering Chemistry 41(6) (1949) 1098-1104.

[41] J. Bandara, M.S. Eikeland, B.M.E. Moldestad, Analyzing the effects of particle density, size, size distribution and shape for minimum fluidization velocity with Eulerian-Lagrangian CFD simulation, (2017).

[42] J. Goo, M. Seo, S.D. Kim, B. Song, Effects of temperature and particle size on minimum fluidization and transport velocities in a dual fluidized bed, Proceedings of the 20th international conference on fluidized bed combustion, Springer, 2009, pp. 305-310.

[43] J. Imberger, Environmental fluid dynamics: flow processes, scaling, equations of motion, and solutions to environmental flows, Academic Press 2012.

[44] M. Puig-Arnavat, J.A. Hernández, J.C. Bruno, A. Coronas, Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers, biomass and bioenergy 49 (2013) 279-289.

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ-สกุล | กฤติน ก่อเกิด |
| วัน เดือน ปี เกิด | 28 กรกฎาคม 2538 |
| สถานที่เกิด | ประเทศไทย |
| วุฒิการศึกษา | วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 109/6 ซอยสายไหม16 เขต/แขวง สายไหม จ.กรุงเทพฯ 10220 |
| ผลงานตีพิมพ์ | <p>Soanuch, C., Korkerd, K., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. Minimum fluidization velocities of binary and ternary biomass mixtures with silica sand. Energy Reports (2020) Accepted Manuscript.</p> <p>Korkerd, K., Soanuch, C., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. Effect of particle size distributions on minimum fluidization velocity with varying gas temperature. International Journal of Environmental Science and Development (2020) Accepted Manuscript.</p> <p>Phupanit, J., Soanuch, C., Korkerd, K., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. Computational fluid dynamics simulation of system hydrodynamics in a riser of stage circulating fluidized bed reactor. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering 14(1) (2019), e2277.</p> |