



รายงานโครงงานวิจัย

วิทยาศาสตร์ข้อมูลในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

Data Science in Minimum fluidization Velocity Prediction

โดย

นางสาวพิชญานิน รัตน์บุญทา 6032943823

นายศิรินทร์ อร่ามราษฎร์ 6032906623

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยาศาสตร์ข้อมูลในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

นางสาว พิชญานิน รัตน์บุญทา
นาย ศรินทร์ อร่ามราษฎร์

โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการ วิทยาศาสตร์ข้อมูลในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน
(Data Science in Minimum Fluidization Velocity Prediction)

ชื่อนิสิตที่ร่วมในโครงการ นายศิริินทร์ อร่ามราษฎร์
นางสาวพิชญานิน รัตน์บุญทา

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน มีหลากหลายสมการที่ใช้ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน แต่สามารถใช้ทำนายได้แม่นยำเพียงแค่อนุภาคของแข็งชนิดใดชนิดหนึ่ง และ ส่วนใหญ่จะใช้ได้กับอนุภาคของแข็งที่เป็นทรงกลมเท่านั้น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาสมการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันที่สามารถใช้ได้กับอนุภาคของแข็งใด ๆ โดยใช้ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ข้อมูลในการจัดเก็บ รวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุและการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างสหสัมพันธ์ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันและเปรียบเทียบผลการทำนายที่ได้ ระหว่างการใช้สมสัมพันธ์ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง จากผลที่ได้ พบว่า สหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมผ่านโปรแกรม MATLAB มีความแม่นยำสูงกว่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุผ่านโปรแกรม Microsoft Excel เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ แสดงการตัดสินใจที่สูงกว่า และ ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่ต่ำกว่า โดยสหสัมพันธ์ที่ได้นี้สามารถใช้ทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันของอนุภาคของแข็งใด ๆ ได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้มีการคำนึงถึงผลของความไม่เป็นทรงกลมของอนุภาคของแข็ง ซึ่งจะช่วยในการออกแบบและพัฒนากระบวนการฟลูอิดไอเซชันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต.....พิชญานิน รัตน์บุญทา.....

ลายมือชื่อนิสิต.....ศิริินทร์ อร่ามราษฎร์.....

ลายมือ อ.ที่ปรึกษา.....เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ.....

Title Data Science in Minimum Fluidization Velocity Prediction

Student Name Mr. Kirin Aramrad
Ms. Pitchayanin Ratanaboonta

Advisor Assoc. Prof. Dr. Benjapon Chalermnsinsuwan

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,
Academic Year 2020

Abstract

Recently, there are several equations for predicting the minimum fluidization velocity. However, they can accurately predict with each specific solid particle and mainly focus on the spherical particle. This research objective is to develop an equation to predict the minimum fluidization velocity that can be used with any solid particles by using data science knowledge to collect, gather and analyze the independent variables effect on the minimum fluidization velocity from various relevant researches. The data were analyzed using multiple linear regression and artificial neural network to establish the correlations in form of mathematical equation. The obtained correlations could predict the minimum fluidization velocity and could be used to compare the obtained results from the mathematical correlations with the experimental results. The results showed that the correlation developed from the artificial neural network through MATLAB program gave more accurate prediction than the correlation developed from the multiple linear regression through Microsoft Excel program due to the higher coefficient of determination and the lower absolute average error. The obtained correlation then can be used to accurately predict the minimum fluidization velocity of any solid particles with including the non-spherical particle effect. This will enable more efficient fluidization process design and development.

Department of Chemical Technology

Academic Year 2020

Student's signature.....Pitchayanin Ratanaboonta.....

Student's signature.....Kirin Aramrad.....

Advisor's signature.....Benjapon Chalermnsuwan.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์เรื่อง วิทยาศาสตร์ข้อมูลในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซนซ์ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทาง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ มาโดยตลอดจนโครงการเสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาราบขอบพระคุณด้วยความเคารพเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณนายภฤติน ก่อเกิด ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความช่วยเหลือ ตั้งเริ่มต้นโครงการจนกระทั่งโครงการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนสถานที่ในการจัดทำโครงการจนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่ผู้จัดทำเสมอจนโครงการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

พิชญานิน รัตนบุญทา
ศิรินทร์ อร่ามราษฎร์

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การจำแนกอนุภาคของแข็ง (particle characterization).....	3
2.2 ฟลูอิดิเซชัน (fluidization).....	7
2.3 วิทยาการข้อมูล (data science).....	13
2.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network).....	16
2.5 การวิเคราะห์กลุ่มข้อมูล (Clustering Analysis)	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25

3.1 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเก็บรวบรวมข้อมูล	25
3.2 การสร้างสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอยและการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนาย ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน	26
3.3 การแบ่งกลุ่มข้อมูลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำการวิเคราะห์แบบไม่มีผู้สอน (Self-Organizing Map, SOM)	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	28
4.1 ผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
4.2 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์ การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ	28
4.3 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	31
4.4 การวิเคราะห์กลุ่มข้อมูล (Clustering analysis).....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	44
5.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
5.2 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอย เชิงเส้นแบบพหุ.....	44
5.3 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	45
5.4 การวิเคราะห์กลุ่มข้อมูล (Clustering Analysis).....	45
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	46
ภาคผนวก	47
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลตัวแปรตามและตัวแปรดำเนินการอิสระที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในการทำนายความเร็ว ต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน	47
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลตัวแปรตามและตัวแปรดำเนินการอิสระที่ใช้ทดสอบแบบจำลองในการทำนายความเร็วต่ำสุด ในการเกิดฟลูอิดเซชัน	104
บรรณานุกรม.....	108

สารบัญรูปร่าง

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งตามวิธีการของ Geldart.....	6
รูปที่ 2.2 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันจากทฤษฎี.....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างระบบประสาท.....	16
รูปที่ 2.4 การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม.....	17
รูปที่ 2.5 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....	18
รูปที่ 2.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	18
รูปที่ 2.7 โครงข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ.....	19
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการจัดกลุ่มแบบแบ่งส่วน.....	21
รูปที่ 2.9 แผนภาพเดนโดรแกรมจากการจัดกลุ่มแบบลำดับชั้น.....	21
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการจัดกลุ่มแบบลำดับชั้น.....	23
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากผลที่ได้รวบรวมและจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ.....	29
รูปที่ 4.2 ผลของจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) และ ค่า R สำหรับการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	31
รูปที่ 4.3 กราฟวิเคราะห์การถดถอยของกระบวนการ.....	32
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากข้อมูลที่ได้รวบรวมและจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียม.....	34
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากการใช้สหสัมพันธ์แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุและจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียม.....	35
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการวิเคราะห์แบ่งกลุ่มข้อมูล Self-Organizing Map, SOM ของข้อมูลที่ได้จากการรวบรวม 1000 ชุดข้อมูล.....	36
รูปที่ 4.7 ผลของจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) สำหรับการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2.....	37
รูปที่ 4.8 ผลของจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) สำหรับการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4.....	37
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากข้อมูลและจาก	

สหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2.....	38
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากข้อมูลและจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4.....	38
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลการทำนายของกลุ่มข้อมูลที่ 1 และ 3 เมื่อใช้สหสัมพันธ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2 และ 4.....	39
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการวิเคราะห์แบ่งกลุ่มข้อมูล Self-Organizing Map, SOM ของข้อมูลสำหรับการทดสอบสหสัมพันธ์ 50 ชุดข้อมูล.....	41
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลการทำนายค่าเรย์โนลด์์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมดและการจัดแบ่งกลุ่มของกลุ่มข้อมูลที่ 2 และ 4.....	41
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลการทำนายค่าเรย์โนลด์์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุและโครงข่ายประสาทเทียมก่อนและหลังการวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูลและจากงานวิจัยอื่นๆ.....	42

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}).....	12
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุเพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุด ในการเกิดฟลูอิดเซชัน.....	28
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของน้ำหนักรวมและไบแอสที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความเร็วต่ำสุด ในการเกิดฟลูอิดเซชัน.....	33
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลตัวแปรตามและตัวแปรดำเนินการอิสระที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในการทำนาย ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน.....	47
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลตัวแปรตามและตัวแปรดำเนินการอิสระที่ใช้ทดสอบแบบจำลองในการทำนาย ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน.....	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ในปัจจุบัน ฟลูอิดไดเซชันเป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจจากวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นระบบที่สามารถตอบสนองความต้องการทางอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การออกแบบและการใช้งานกระบวนการฟลูอิดไดเซชันสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการผสม การอบแห้ง การแช่เยือกแข็ง หรือหน่วยปฏิบัติการอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การดำเนินงานต้องการอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้อุณหภูมิของแก๊สภายในกระบวนการหลุดลอยออกไปจากกระบวนการ จึงต้องมีความรู้เกี่ยวกับความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ค่านี้เป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบและการเลือกขนาดเครื่องอัดอากาศ การเกิดฟลูอิดไดเซชันนอกจากจะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคของแก๊สด้วย การออกแบบระบบฟลูอิดไดเซชันจึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลลักษณะของอนุภาคของแก๊ส อีกทั้งอนุภาคของแก๊สยังมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ และไม่แน่นอน ทำให้มีสมการหลายสมการที่สามารถใช้ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน สมการที่นิยมใช้ในการคำนวณ คือ สมการของ Ergun โดยลักษณะของอนุภาคที่ใช้ประกอบการคำนวณ ได้แก่ ขนาด ความหนาแน่นปรากฏ ความพรุน และแฟคเตอร์รูปร่าง แต่สมการของ Ergun นั้นสามารถใช้ได้กับอนุภาคของแก๊สเพียงบางชนิด การศึกษานี้จึงต้องการพัฒนาสมการที่สามารถใช้ในการคำนวณได้กับอนุภาคของแก๊สทุกชนิด เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยนำความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ข้อมูล หรือ Data Science ซึ่งเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวกับการจัดการ จัดเก็บ รวบรวม ตรวจสอบ และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อนำไปสู่ความรู้ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง [4] ซึ่งในการศึกษาข้อมูลเพื่อพิสูจน์หาสมการนั้นจำเป็นต้องใช้ปริมาณของข้อมูลที่มากเพียงพอในการวิเคราะห์รูปแบบของข้อมูล และนำไปสู่การสร้างสมการในการคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดของกระบวนการฟลูอิดไดเซชันโดยไม่ขึ้นกับชนิดของอนุภาคของแก๊ส

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างสมการสำหรับหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันที่สามารถใช้ได้กับอนุภาคของแก๊สทุกชนิด โดยอาศัยความรู้ในด้านวิทยาศาสตร์ข้อมูล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษา และจัดเก็บข้อมูลในลักษณะของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำมาวิเคราะห์ และรวบรวมเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการสร้างสมการในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน
- 2) นำข้อมูลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน และค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันที่ได้จากการรวบรวม เพื่อสร้างสหสัมพันธ์โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาข้อมูลจากเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟลูอิดไอเซชัน โดยรวบรวมตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน เช่น ขนาด ความหนาแน่นปรากฏ ความพรุน และแพคเตอร์รูปร่าง เป็นต้น รวมถึงขั้นตอนในการศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ผลของการกระจายขนาดอนุภาคในรูปแบบที่ต่างกัน และ ผลของสภาวะต่างๆที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน การสร้างสหสัมพันธ์ และการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน
- 2) ออกแบบ และวางแผนการทดลอง
- 3) สร้างสหสัมพันธ์จากฐานข้อมูลที่รวบรวมไว้โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อสร้างสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของสหสัมพันธ์ที่ได้กับผลการทดลอง และ ผลจากงานวิจัยอื่นๆ
- 4) สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน/บทความวิชาการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้สมการที่ใช้คำนวณค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันโดยไม่ขึ้นกับชนิดของอนุภาคของแข็งที่สามารถนำสมการไปใช้ได้จริง
- 2) ได้ความรู้ และความเข้าใจที่มากขึ้นในเรื่องกระบวนการฟลูอิดไอเซชัน/วิทยาศาสตร์ข้อมูลจากการลงมือปฏิบัติงานจริง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การจำแนกอนุภาคของแข็ง (particle characterization)

การจำแนกอนุภาคของแข็งเป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานอนุภาคของแข็งกับกระบวนการต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ ก่อนที่จะมีการใช้งานอนุภาคของแข็งใด การวิเคราะห์สมบัติอนุภาคของแข็งจึงเป็นขั้นตอนลำดับแรก ที่ต้องดำเนินการ โดยสมบัติของอนุภาคของแข็งหลัก ที่จะต้องมีการจำแนกประกอบไปด้วย ^[93]

- ขนาด (size)
- รูปร่าง (shape)
- ความหนาแน่น (density)
- สัณฐาน (Morphology)

2.1.1 การนิยามขนาดของอนุภาคของแข็ง

ขนาดอนุภาคของแข็ง คือ ความยาวของหนึ่ง (หรือมากกว่า) มิติเชิงเส้นตรงที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นตัวแทนของอนุภาคของแข็งนั้น

สำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างแน่นอน ได้แก่ อนุภาคของแข็งทรงกลมและลูกบาศก์จะต้องการมิติเชิงเส้นตรงเป็นตัวแทนเพียงแค่มิติหนึ่งมิติซึ่งคือ เส้นผ่านศูนย์กลางในกรณีของอนุภาคของแข็งทรงกลมและความยาวด้านในกรณีของอนุภาคลูกบาศก์ อนุภาคของแข็งสี่เหลี่ยมผืนผ้า อนุภาคของแข็งทรงกระบอก อนุภาคของแข็งวงรี และอนุภาคของแข็งโคน จะต้องการมิติเชิงเส้นตรงเป็นตัวแทนตั้งแต่สองมิติเป็นต้นไป ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคของแข็งทรงกระบอก จะต้องการข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวทรงกระบอก เป็นต้น

สำหรับอนุภาคของแข็งที่มีรูปทรงไม่แน่นอน จะทำการหาขนาดอนุภาคของแข็งได้ค่อนข้างยากขึ้นอยู่กับวิธีการอ้างอิงหรือเทคนิคที่เลือกใช้ ซึ่งจะสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงปริมาตร (Volume diameter, d_v)

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงปริมาตร คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่ไม่รูปร่างไม่แน่นอน ดังสมการที่ 2.1

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

เมื่อ V_p คือ ปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (ลูกบาศก์เมตร)

2. เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่ผิว (Surface diameter, d_s)

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่ผิว คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับพื้นที่ผิวของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอนนั้น ดังสมการที่ 2.2

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

เมื่อ S_p คือ พื้นที่ผิวของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (ตารางเมตร)

3. เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่ผิว – ปริมาตร (Surface-Volume diameter, d_{sv})

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่ผิว – ปริมาตร คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเท่ากับสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอนนั้น ดังสมการที่ 2.3

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

4. เส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรงร่อน (Sieve diameter, $d_{p,screen\ aperture}$)

เส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรงร่อน คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มาจากความกว้างของช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดเล็กที่สุดของตะแกรงร่อน (Sieve) ที่อนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอนสามารถลอดผ่านได้ โดยทั่วไปตัวเลขที่ใช้แสดงความกว้างของช่องตะแกรง จะเรียกว่า เมช (Mesh) ซึ่งหมายถึง จำนวนช่องของตะแกรงร่อนที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงร่อนขนาด 10 เมช ในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง มาตรฐานการแบ่งตะแกรงร่อน แบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ ตะแกรงแบบอเมริกัน (ASTM, US standard) ตะแกรงแบบไทเลอร์ (Tyler standard) ตะแกรงแบบอังกฤษ (British standard) และ ตะแกรงแบบเยอรมัน (German DIN standard) ด้วยการแบ่งของมาตรฐานต่างๆ เมชขนาดเดียวกัน อาจจะมีพื้นที่ช่องเปิดแตกต่างกัน ดังนั้น จึงต้องบอกพื้นที่ช่องเปิด (standard opening) ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วย

5. เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงเส้นรอบวง (Perimeter diameter, d_c)

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงเส้นรอบวง คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีเส้นรอบวงเท่ากับเส้นรอบวงแบบฉาย (Project outline) ของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอนนั้น

6. เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่แบบฉาย (Projected area diameter, d_a)

เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงพื้นที่แบบฉาย คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีพื้นที่แบบฉายเท่ากับพื้นที่แบบฉาย (Projected area) ของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอนนั้น

2.1.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแข็งด้วยตะแกรงร่อน (Sieve analysis)

วิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งด้วยตะแกรงร่อน คือการหาขนาดอนุภาคโดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักไปบนชุดตะแกรงทดสอบ (test sieves) ซึ่งมีช่องขนาดต่างๆ กัน โดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ โดยของแข็งที่มีขนาดใหญ่เกินขนาด (oversize) จะค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนของแข็งที่มีขนาดเล็ก (undersize) จะลอดผ่านช่องตะแกรงไปได้ การใช้เครื่องมือช่วยให้ตะแกรงเคลื่อนไหวหรือสั่น (sieve shaker) จะช่วยให้การร่อนมีประสิทธิภาพดีขึ้นในเวลานที่น้อยลง แต่จะต้องไม่ใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่งๆ เพราะจะทำให้ของแข็งไปอุดตันตามช่องหรืออาจทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตและของแข็งรวมตัวเป็นก้อนทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดไป [94]

2.1.3 การจำแนกอนุภาคของแข็งหลายชนิด

การดำเนินงานในกระบวนการต่างๆ จะประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งจำนวนมากและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแข็ง เพื่อที่จะออกแบบระบบหรือกระบวนการนั้นๆ อย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องมีวิธีการที่เหมาะสมในการจำแนกอนุภาคของแข็งหลายขนาดนั้น ซึ่งวิธีการมีดังต่อไปนี้ [93]

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

ค่าเฉลี่ยประเภทนี้จะคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งจากผลรวมของขนาดอนุภาคของแข็งต่างๆ (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 จำนวนของอนุภาคของแข็งขนาดต่างๆ (จำนวนอนุภาค) โดย $\sum_i n_i = n$
 d_{pi} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง

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

ค่าเฉลี่ยประเภทนี้จะป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ถูกสมมติให้เป็นทรงกลมโดยพื้นที่ผิวคูณจำนวนอนุภาคของแข็งทั้งหมดนั้นจะมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวจริงของอนุภาคของแข็งทั้งหมด 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)

ค่าเฉลี่ยประเภทนี้จะป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของอนุภาคของแข็งที่ถูกสมมติให้เป็นทรงกลมโดยปริมาตรคูณจำนวนอนุภาคของแข็งทั้งหมดนั้นจะมีค่าเท่ากับปริมาตรจริงของอนุภาคของแข็งทั้งหมด ดังสมการที่ 2.6

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

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

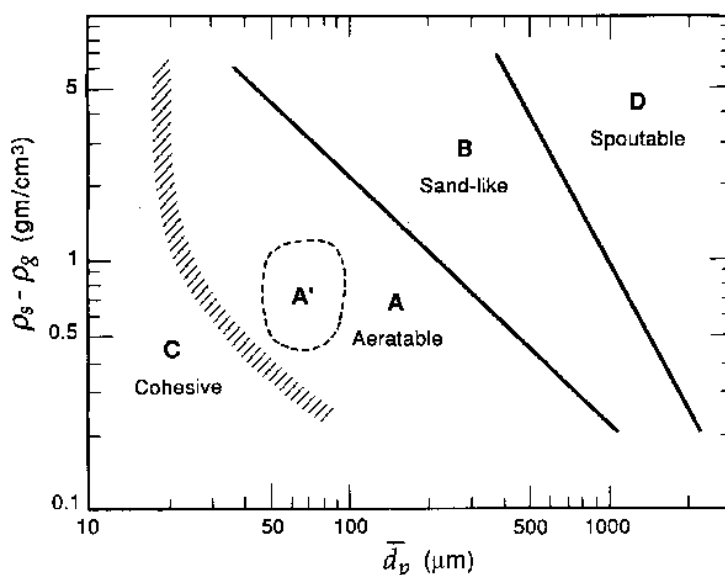
ค่าเฉลี่ยประเภทนี้จะคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งโดยอาศัยค่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตรหรือค่าพื้นที่ผิวต่อมวลของอนุภาคของแข็ง ดังสมการที่ 2.7

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

เมื่อ x_i คือ สัดส่วนจำนวนหรือสัดส่วนมวลของอนุภาคของแข็งขนาดต่างๆ (ไม่มีหน่วย)

2.1.4 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง

ลักษณะการไหลที่เกิดภายในกระบวนการฟลูอิดเซชันขึ้นอยู่กับประเภทของอนุภาคของแข็ง โดยวิธีการที่มีการใช้งานกันค่อนข้างมากในการแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง คือ วิธีการของ Geldart ซึ่งแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งจากความสัมพันธ์ของผลต่างความหนาแน่นอนุภาคของแข็ง และของไหล และ ขนาดของอนุภาคของแข็ง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งตามวิธีการของ Geldart [43]

- การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งของ Geldart กลุ่ม A

อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดกระบวนการฟลูอิดิเซชันได้ดี แต่จะเกิดการขยายตัวก่อนช่วงหนึ่งที่จะเริ่มเกิดฟองแก๊สในกระบวนการ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี (FCC catalyst) ส่วนมากอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับกระบวนการเคมีที่อาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี

- การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งของ Geldart กลุ่ม B

อนุภาคกลุ่มนี้จะเกิดกระบวนการฟลูอิดิเซชันได้ดีมาก เริ่มเกิดจากฟองแก๊สในกระบวนการได้ทันทีเช่น ทราบ ส่วนมากอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับกระบวนการเผาไหม้หรือการผลิตแก๊ส

- การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งของ Geldart กลุ่ม C

อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะมีขนาดเล็กมาก แรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกับแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งนั้น อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดกระบวนการฟลูอิดิเซชันได้ยาก เช่น แป้ง และผงแก้ว การประยุกต์ใช้งานอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จึงเป็นไปได้ยากและจำกัด

- การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งของ Geldart กลุ่ม D

อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะมีขนาดใหญ่มากจึงต้องการความเร็วสูงมากในการใช้งานกระบวนการเช่น เม็ดข้าว และเม็ดกาแฟ ส่วนมากอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับการอบแห้ง

2.2 ฟลูอิดิเซชัน (fluidization)

2.2.1 นิยาม

ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization) เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดที่สัมผัสกับของไหลแล้วอนุภาคของแข็งจะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยที่ของไหลที่ใช้จะถูกปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับอนุภาคของแข็ง แล้วจะไหลผ่านออกทางส่วนบนของหอดทดลองซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Column) หรือเป็นท่อเหลี่ยมแนวตั้ง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดอนุภาคของแข็งจะเริ่มเคลื่อนที่ และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ซึ่งอนุภาคของแข็งที่อยู่ใต้อันนี้จะมีความคล้ายคลึงของไหล ^[74]

2.2.2 ประเภทของฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

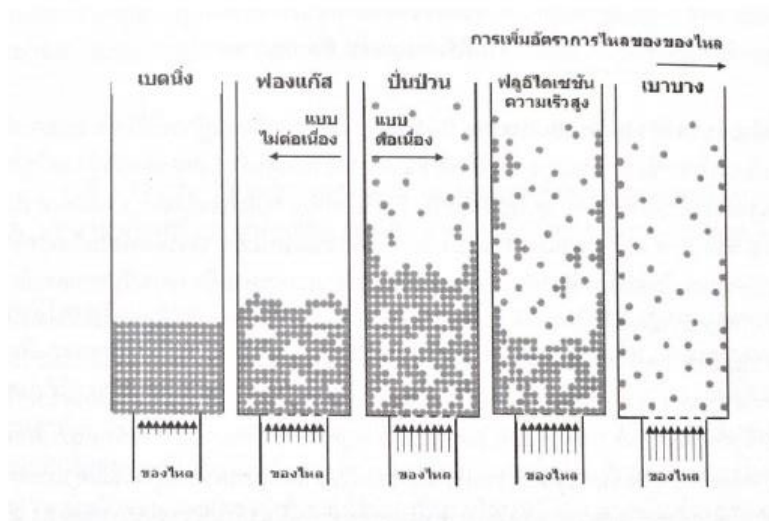
1. ฟลูอิดิเซชันแบบสองวัฏภาค (Two – phase fluidization) เป็นฟลูอิดิเซชันที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ประกอบด้วยวัฏภาค 2 วัฏภาค ได้แก่ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลอาจจะ

เป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้น ฟลูอิดิเซชันแบบสองวัฏภาคสามารถแบ่งย่อยออกได้อีกเป็น

- ฟลูอิดิเซชันแบบแก๊ส – ของแข็ง (Gas-solids fluidization)
- ฟลูอิดิเซชันแบบของเหลว- ของแข็ง (Liquid – solids fluidization)

2. ฟลูอิดิเซชันแบบสามวัฏภาค (Three - phase fluidization) เป็นฟลูอิดิเซชันที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ประกอบด้วยวัฏภาค 3 วัฏภาค ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

2.2.3 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชัน



รูปที่ 2.2 ช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชันจากทฤษฎี^[93]

1. เบริดนิ่ง (Fixed bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ยังไม่ถือว่าเป็นรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชัน อัตราการป้อนหรือความเร็วของของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะยังไม่เพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัวโดยมีลักษณะเด่นคืออนุภาคของแข็งในกระบวนการจะไม่มีเคลื่อนที่

2. ฟลูอิดิเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้เริ่มถือว่าเป็นรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชันความเร็วเริ่มต้นที่อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัวเรียกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชัน (Incipiently fluidized bed, Onset of fluidization, Fluidization point หรือ Bed at minimum fluidization) มีลักษณะเด่น คือ จะเริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเกิดฟองแก๊สจะแตกต่างกันไปตามขนาดของอนุภาคของแข็ง อนุภาคของแข็งชนิด Geldart A เมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ถึงความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชันจะยังไม่เกิดฟองแก๊สในทันที แต่จะมีการขยายตัวของเบดเกิดขึ้นก่อน เนื่องจากแรงระหว่างอนุภาคโดยจะเริ่มเกิดฟองแก๊สหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่

ทำให้เกิดฟองแก๊ส (Minimum bubbling velocity) สำหรับอนุภาคของแข็งชนิด Geldart B และ D ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันเนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้มีแรงระหว่างอนุภาคลดลงส่วนอนุภาคของแข็งชนิด Geldart C จะไม่เกิดฟองแก๊สเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กลงทำให้มีแรงระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น (เป็นลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่องหรือการทำงานแบบกะ)

3. ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่าอยู่ระหว่างความเร็วสองค่าซึ่งคือความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งในกระบวนการมีค่าสูงที่สุด และความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งมีค่าต่ำที่สุดจนเข้าสู่ภาวะคงตัว มีลักษณะเด่น คือ ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแตกอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นจนคล้ายกับไม่มีฟองแก๊สในกระบวนการโดยลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ชัดเจนคือบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ (เป็นลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่องหรือการทำงานแบบกะ/ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง)

4. ฟลูอิดเซชันแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้เกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity) โดยเป็นช่วงการไหลที่อยู่ระหว่างช่วงการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน และฟลูอิดเซชันแบบเบาบาง ที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง และเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหล แต่ที่บริเวณผนังเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น และเคลื่อนที่ลงสวนทิศทางการไหลของของไหล รวมเรียกลักษณะการไหลเฉพาะแบบนี้ว่าการไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus flow) ซึ่งเป็นลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

5. ฟลูอิดเซชันแบบเบาบาง (Dilute หรือ Pneumatic transport fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม (Minimum pneumatic transport velocity) สำหรับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในช่วงการไหลนี้จะพบว่าอนุภาคของแข็งทั้งหมดจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์โดยจะเคลื่อนที่แยกจากกันเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหลซึ่งจะมีสัดส่วนระหว่างอนุภาคของแข็ง และของไหลอยู่ที่ประมาณ 1 ต่อ 20 หรือมีปริมาณของไหลในเครื่องปฏิกรณ์อยู่สูงมาก ซึ่งเป็นลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

2.2.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

ข้อดีของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

- 1) มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็งสูง และมีการกวนผสมภายใน (Internal mixing) สูง เนื่องจากความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการ ทำให้แก๊สและอนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่ปั่นป่วนภายในกระบวนการอยู่ตลอด
- 2) มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งที่เฉพาะเจาะจง คือ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูง และต่ำ จะอยู่ที่บริเวณด้านล่าง และด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ตามลำดับ
- 3) เป็นกระบวนการที่สามารถแยกอนุภาคของแข็งที่ผ่านการดำเนินการ/การเกิดปฏิกิริยาแล้วได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ โดยอนุภาคที่ผ่านการดำเนินการ/การเกิดปฏิกิริยาจะมีขนาดเล็กกลง และลอยออกบริเวณด้านบนกระบวนการ
- 4) เป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่ดี มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเบต และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูง
- 5) เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการต่ำ เพราะมีแรงต้านทานภายในกระบวนการ (Friction) ที่ต่ำ
- 6) เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous) และ การดำเนินการทำได้ง่าย
- 7) เป็นกระบวนการที่มีความยืดหยุ่นในการดำเนินงานสูง มีช่วงความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการกว้าง จึงสามารถใช้งานได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิด

ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

- 1) อนุภาคของแข็งมีเวลาอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์สั้น เนื่องจากเป็นการไหลของของไหล และอนุภาคของแข็งไปในทิศทางเดียวกันเป็นส่วนมาก โดยสามารถทำการปรับปรุงได้ด้วยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบขั้นลำดับ
- 2) เกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ภายในกระบวนการในบางรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน ซึ่งจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล
- 3) การผสมเกิดขึ้นได้ดีในทิศทางตามแนวแกน (Vertica) มากกว่าการผสมในทิศทางตามแนวนอน (Horizontal) จึงอาจมีความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ
- 4) กระบวนการมีข้อจำกัด อนุภาคของแข็งจะหลุดออกจากกระบวนการที่ความเร็วของไหลป้อนเข้า ดังนั้น ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อดักเก็บ และป้อนอนุภาคของแข็งที่หลุดออกกลับเข้ามากระบวนการสูงในกระบวนการ
- 5) อนุภาคของแข็งในกระบวนการมีขนาดลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งเกิดจากการชนกันของอนุภาคของแข็งหรือปฏิกิริยาเคมีภายในกระบวนการ

- 6) เครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการสั่น และสึกกร่อน เนื่องจากมีการชนของอนุภาคของแข็งกับผนังเครื่องปฏิกรณ์
- 7) ไม่สามารถใช้งานกับอนุภาคของแข็งที่เปียกหรือเหนียว เพราะจะเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

2.2.5 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

ในช่วงครึ่งศตวรรษที่ผ่านมา ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายตลอดมา และได้มีการหาสมการคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) เพื่อที่จะออกแบบกระบวนการฟลูอิดเซชันให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสมการแรกคือสมการของ Ergun ซึ่งจะมีสมมติฐานว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิดเซชันจะคำนวณจากภาวะที่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุหรืออนุภาคของแข็งมีค่าเท่ากับแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของวัตถุหรืออนุภาคของแข็ง (W)^[93]

แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุ = ความดันลด (Δp) \times พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหล (A)

แรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของวัตถุ = ปริมาตรของเบต (V) \times สัดส่วนโดยปริมาตรของเบต (ϵ_s) \times

น้ำหนักจำเพาะของเบต ($\rho_s - \rho_f$)

$$\Delta p A = W = (V) (\epsilon_s) (\rho_s - \rho_f) \left(\frac{g}{g_c}\right)$$

$$\Delta p A = W = (A L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_f) \left(\frac{g}{g_c}\right)$$

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_f) \left(\frac{g}{g_c}\right)$$

เมื่อ $\frac{g}{g_c}$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าแรงโน้มถ่วงต่อค่าคงที่การแปลงแรงโน้มถ่วง (สำหรับการแปลงหน่วย กรณีหน่วยแบบอังกฤษ มีค่า 32.174 lb_m·ft/lb_f·s² ส่วนกรณีหน่วยเอสไอ มีค่า 1 kg·m/N·s²)

L_{mf} คือ ความสูงของเบตที่ภาวะความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (เมตร)

ϵ_{mf} คือ สัดส่วนปริมาตรของช่องว่างที่ภาวะความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

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

กรณีอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก หรือ $Re_{mf} < 20$

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

กรณีอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ หรือ $Re_{mf} > 1000$

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

นอกจากสมการของ Ergun แล้วยังมีสมการที่สามารถใช้ทำนายค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันอีกหลายสมการ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (U_{mf})^[70]

ผู้ทำการวิจัย	สมการ
Wen and Yu (1966)	$Re_{mf} = (33.7^2 + 0.0408 Ar)^{0.5} - 33.7$
Subramani et al. (2007)	$Re_{mf} = Ar / 1502$
Li et al. (2018)	$Re_{mf} = (31.56^2 + 0.043 Ar)^{0.5} - 31.56$
Feng et al. (2017)	$Re_{mf} = (27.9^2 + 0.054 Ar)^{0.5} - 27.9$
Zheng et al. (1985)	$Re_{mf} = (18.75^2 + 0.03125 Ar)^{0.5} - 18.75$
Zhu et al. (2007)	$Re_{mf} = (22.1^2 + 0.0354 Ar)^{0.5} - 22.1$
Chen et al. (2010)	$Re_{mf} = 0.01036 Ar^{0.7107}$
Wu and Baeyens (1991)	$Re_{mf} = 7.33 \times 10^{-5} \times 10^{(8.24 \lg Ar - 8.81)^{0.5}}$
Ma et al. (2013)	$U_{mf} = 0.28 \sum_{i=1}^n x_i d_i^{0.599} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0.533} / \nu^{0.066}$

เมื่อ Ar คือ ตัวเลขไร์หน่วยอาร์คิมิดีส (ไม่มีหน่วย)

d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

Re_{mf} คือ ค่าเรย์โนลด์์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (ไม่มีหน่วย)

U_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (เมตรต่อวินาที)

v	คือ	ปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (ลูกบาศก์เมตร)
x_i	คือ	สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคของแข็งขนาดต่างๆ (ไม่มีหน่วย)
ρ_g	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

2.3 วิทยาการข้อมูล (data science)

วิทยาการข้อมูล เป็นสาขาวิชาที่ใช้วิธีการ กระบวนการ อัลกอริทึม และระบบทางวิทยาศาสตร์มาใช้ เพื่อหาความรู้จากข้อมูลหลากหลายรูปแบบ ทั้งจัดเก็บเป็นระเบียบ และไม่เป็นระเบียบ เป็นสาขาที่เกี่ยวข้องกับการทำเหมืองข้อมูล การเรียนรู้เชิงลึก และข้อมูลขนาดใหญ่ [20] [89]

วิทยาการข้อมูลเป็นศาสตร์ที่เป็นการบูรณาการสถิติศาสตร์ การวิเคราะห์ข้อมูล และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถเข้าใจ และวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในข้อมูลได้ ใช้เทคนิค และทฤษฎีที่ได้มาจากคณิตศาสตร์ สถิติศาสตร์ วิทยาการคอมพิวเตอร์ และวิทยาการสารสนเทศ [37]

2.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงทำนาย (Predictive Analytics)

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงทำนายเป็นการใช้แบบจำลองขั้นสูงเพื่อศึกษาไปข้างหน้าได้จากข้อมูลในอดีตที่มีขนาดใหญ่ (Big Data) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำเข้ามาผ่านกระบวนการต่างๆ การทำให้ข้อมูลแสดงออกมาเป็นรายงาน และการวิเคราะห์ (Report/Analysis) จะเป็นการหาคำตอบที่เกิดขึ้นในอดีต เช่น เกิดอะไรขึ้น และทำไมถึงเกิดเช่นนั้น การติดตามผล (Monitoring) เป็นการติดตามผลที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน จากนั้นการใช้การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงทำนาย (Predictive Analytics) จะสามารถตอบคำถามที่ว่า อะไรจะเกิดขึ้นในอนาคต และอะไรที่น่าจะเกิดขึ้นมากที่สุด [90]

ขั้นตอนการทำการวิเคราะห์เชิงทำนาย (Predictive Analytics Process)

ขั้นตอนการทำการวิเคราะห์เชิงทำนาย ประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอนมาตรฐาน ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการเข้าใจในจุดประสงค์ทางธุรกิจ (Business Understanding) เป็นขั้นตอนที่วิเคราะห์ ความต้องการทำเหมืองข้อมูล เมื่อทราบจุดประสงค์แล้วก็ระบุผลลัพธ์ หรือเป้าหมายที่ต้องการที่จะได้จากการวิเคราะห์ และขั้นตอนนี้ยังเป็นขั้นตอนการวางแผนงาน
2. ขั้นตอนการเข้าใจในข้อมูล (Data Understanding) เป็นขั้นตอนที่มีการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องน่าเชื่อถือ ในจำนวนที่มากเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากข้อมูลเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในกระบวนการ

3. ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Data Preparation) เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลายาวนานที่สุด เนื่องจากความถูกต้อง ที่จะได้จากการทำการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นขึ้นอยู่กับ คุณภาพของข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย ๆ อีก คือ การคัดเลือกข้อมูล (Data Selection) เป็นการกำหนดเป้าหมายว่าสิ่งที่ต้องการจะวิเคราะห์คืออะไร
 - การกลั่นกรองข้อมูล (Data Cleaning) เป็น การทำให้ข้อมูลมีความถูกต้อง โดยจะมีการลบข้อมูลที่ซ้ำซ้อนกัน ซ่อมแซมข้อมูลที่ขาดหายไปรวมถึงแก้ไขข้อมูลที่มีข้อผิดพลาด การตัดข้อมูลที่ไม่วางอยู่ในช่วงออก เป็นต้น
 - การบูรณาการข้อมูล (Data Integration) เป็นการรวบรวมข้อมูลจากหลายๆ แหล่งเข้าด้วยกัน เนื่องจากในบางครั้งข้อมูลมาจากหลายแหล่ง
 - การลดขนาดข้อมูล (Data Reduction) เป็นการลดขนาดข้อมูล ในบางครั้งข้อมูลที่มีมากจนเกินไป จะทำให้การทำงานในการสร้างแบบจำลองมีความช้า และเสียพื้นที่ในการเก็บข้อมูลอย่างมาก
 - การแปลงรูปข้อมูล (Data Transformation) เป็นขั้นตอนการเตรียมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่พร้อมไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักอัลกอริทึมของการทำเหมืองข้อมูล บางครั้งข้อมูลบางประเภทไม่สามารถทำการสร้างแบบจำลองได้ ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูลแบบรายการการซื้อสินค้าไม่สามารถใช้หลักอัลกอริทึมของกฎความสัมพันธ์ (Association Rule) ได้ ต้องมีการทำการแปลงรูปแบบข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational Data) อีกทั้งข้อมูลประเภท Text ก็ไม่สามารถใช้ในอัลกอริทึมประเภทการจำแนกประเภทของข้อมูลได้ ต้องมีการแปลงรูปแบบข้อมูล ซึ่งในบางครั้ง เรียกว่า การสกัดฟีเจอร์ (Feature Extraction) กระทำในขั้นตอนนี้ ซึ่งเป็นการแปลงข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่กำหนดเอง (Normalization)
 - การทำให้ข้อมูลเป็นช่วง (Data Discretization) เป็นการทำให้ข้อมูลที่เป็นตัวเลขอยู่ในจำนวนของช่วงที่ต้องการ
4. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (Modeling) เป็นขั้นตอนในการใช้อัลกอริทึมในการสร้างแบบจำลอง
5. ขั้นตอนการตรวจสอบ และประเมินผล (Evaluation) เป็นขั้นตอนในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองวิเคราะห์ข้อมูลเชิงทำนาย ดูจากความแม่นยำในการทำนาย เพื่อนำแบบจำลองไปใช้ได้จริง

6. ขั้นตอนการนำไปใช้งาน (Deployment) เป็นขั้นตอนที่นำแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลไปใช้จริง

ประเภทแบบจำลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงทำนายมักจะพูดถึงแบบจำลองเชิงทำนาย (Predictive Model) เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามได้มีการแบ่งประเภทของแบบจำลองออกมาเป็นอีก 3 ประเภทตามการวิเคราะห์ข้อมูล

1. แบบจำลองเชิงทำนาย (Predictive Model) เป็นในการหาความสัมพันธ์ภายในหรือรูปแบบที่ซ่อนตัวอยู่ในข้อมูล
2. แบบจำลองเชิงอธิบาย (Descriptive Model) เป็นการอธิบายลักษณะของข้อมูลและแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มๆ เพื่ออธิบายลักษณะของข้อมูลนั้นๆ
3. แบบจำลองการตัดสินใจ (Decision Model) เป็นการหาเทคนิคที่ดีที่สุดในการทำนายผลของการตัดสินใจ

เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงทำนาย

วิธีการ และเทคนิคการวิเคราะห์เชิงทำนาย สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ประเภท คือ วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) วิธีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) และวิธีแบบการหากฎของความสัมพันธ์ (Association Rules Discovery)

1. การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีที่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างแบบจำลองในการอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรที่จะนำมาพิจารณาแบบจำลองที่ใช้ เช่น Linear Regression Logistic Regression Multinomial Logistic Regression Probit Regression Time Series เป็นต้น

2. การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning)

การเรียนรู้ของเครื่องเป็นวิธีการขั้นสูงในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งไม่จำเป็นที่ตัวแปรแต่ละตัวต้องมีความสัมพันธ์ระหว่างกัน โดยสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น การวินิจฉัยทางการแพทย์ การตรวจสอบการฉ้อโกงบัตรเครดิต การเรียนรู้จดจำใบหน้าและเสียง และการวิเคราะห์ตลาดหลักทรัพย์ เป็นต้น โดยแบบจำลองในประเภทนี้ ได้แก่ Neural Network Support Vector Machine Naïve Bayes และ K-Nearest Neighbor

3. การหากฎของความสัมพันธ์ (Association Rules Discovery)

การหากฎของความสัมพันธ์เป็นกระบวนการทำเหมืองข้อมูลที่สำคัญ และได้รับความนิยมอย่างมาก บางครั้งจะเรียกว่า Market Basket Analysis เป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูล 2 ชุดขึ้นไปที่มีขนาดใหญ่

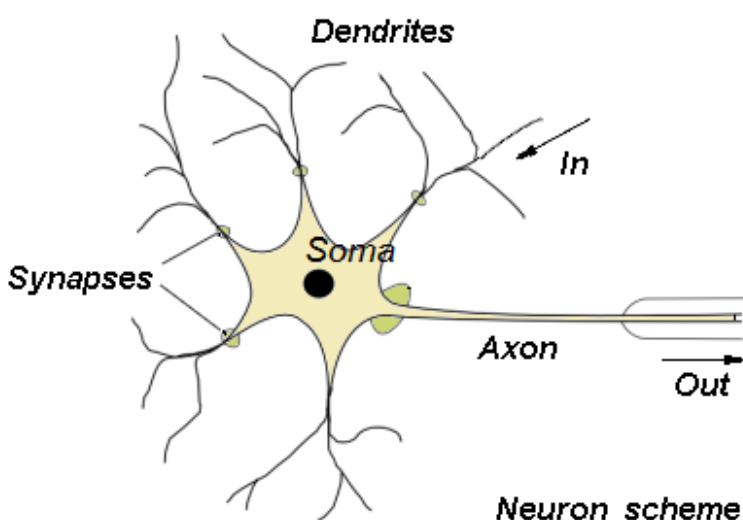
2.4 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งในด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การจำแนกรูปแบบ การทำนาย การควบคุม การหาความเหมาะสม และการจัดกลุ่ม เป็นต้น โดยลักษณะการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมคือการลอกเลียนแบบการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์ เพื่อให้การประมวลผลของคอมพิวเตอร์สามารถเรียนรู้ และตัดสินใจได้เหมือนกับมนุษย์

รูปแบบการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการพัฒนาทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำให้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์สามารถทำนายสิ่งต่างๆได้ เนื่องจากการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมจะมีการสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เป็นข้อมูลนำเข้า (Input) และข้อมูลส่งออก (Output) โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของข้อมูลที่เป็นข้อมูลนำเข้า และข้อมูลนำออกมาก่อน ^[92]

2.4.1 แบบจำลองของเซลล์ประสาท

โครงข่ายประสาทเทียมเกิดขึ้นจากการพัฒนากระบวนการทางคอมพิวเตอร์ให้มีความสามารถในการเรียนรู้ และสามารถตัดสินใจเสมือนกับการทำงานของสมองมนุษย์ โดยโครงข่ายประสาทของมนุษย์จะประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทหรือนิวรอน (Neuron) ที่ทำหน้าที่หลัก ๆ อยู่ 2 อย่างคือ การคำนวณ และการส่งผลที่ได้จากการคำนวณไปยังอีกปลายหนึ่งของเซลล์



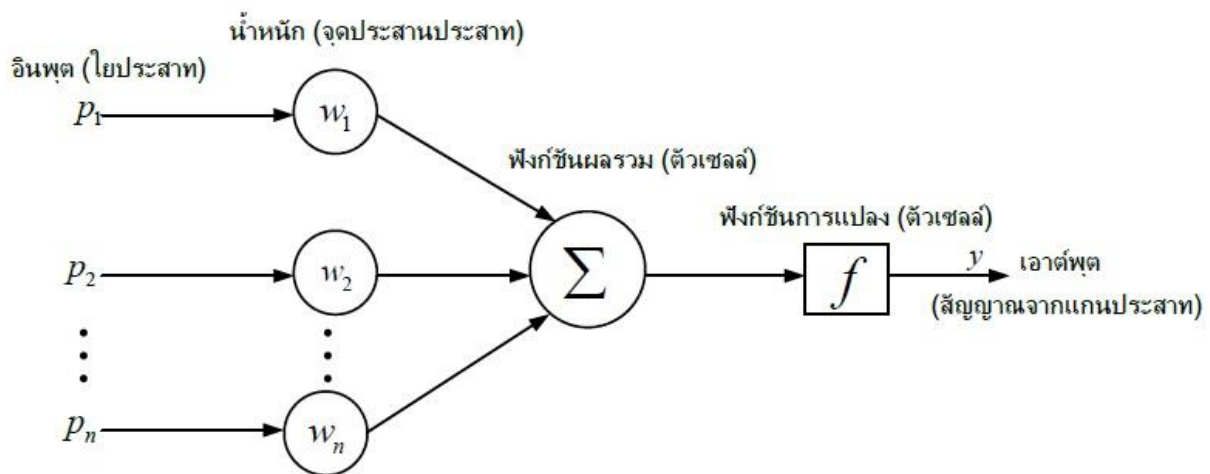
รูปที่ 2.3 โครงสร้างระบบประสาท

จากรูปที่ 2.3 สามารถอธิบายการทำงานของระบบประสาทได้ คือ เดนไดรต์ (Dendrites) เป็นส่วนขยายหรือส่วนต่อของโซมา (Soma) ซึ่งมีลักษณะคล้ายขนที่ทำหน้าที่เหมือนช่องทางในการรับค่าอินพุต เดนไดรต์จะทำการรับอินพุตผ่านใยประสาท (Synapses) ของเซลล์ประสาทอื่น ๆ เมื่อรับอินพุตเข้ามาแล้ว

โซมาจะทำหน้าที่ในการประมวลผลและเมื่อประมวลผลเสร็จแล้วก็จะทำการ ส่งผลลัพธ์ออกไปให้เซลล์ประสาทอื่นผ่านทางแอกซอน (Axon)

2.4.2 หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมจะมีอินพุตหลายค่าเข้ามาในโครงข่าย โดยจะถูกแทนด้วย สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ $X(n)$ โดยแต่ละอินพุตจะถูกนำมาคูณด้วยค่าความรู้หรืออาจเรียกว่าเป็นค่า น้ำหนัก (weight) ซึ่งแทนด้วย $W(n)$ โดยที่ปกติผลคูณของค่าน้ำหนักที่ถูกนำเข้าสู่โครงข่ายนั้นจะถูกนำมารวมกัน และส่งเข้าไปในฟังก์ชันการแปลง (transfer function) เพื่อนำไปหาผลลัพธ์หรือเอาต์พุต ดังรูปที่ 2.4 ข้างล่างนี้



รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

2.4.3 ประเภทของเครือข่ายประสาทเทียม

ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ประเภทการคาดเดา (Prediction)
2. ประเภทการจัดลำดับหมวดหมู่ (Classification)
3. ประเภทการเชื่อมโยงข้อมูล (Data Association)
4. ประเภทกระบวนการสร้างความคิด (Data Conceptualization)
5. ประเภทกลั่นกรองข้อมูล (Data Filtering)

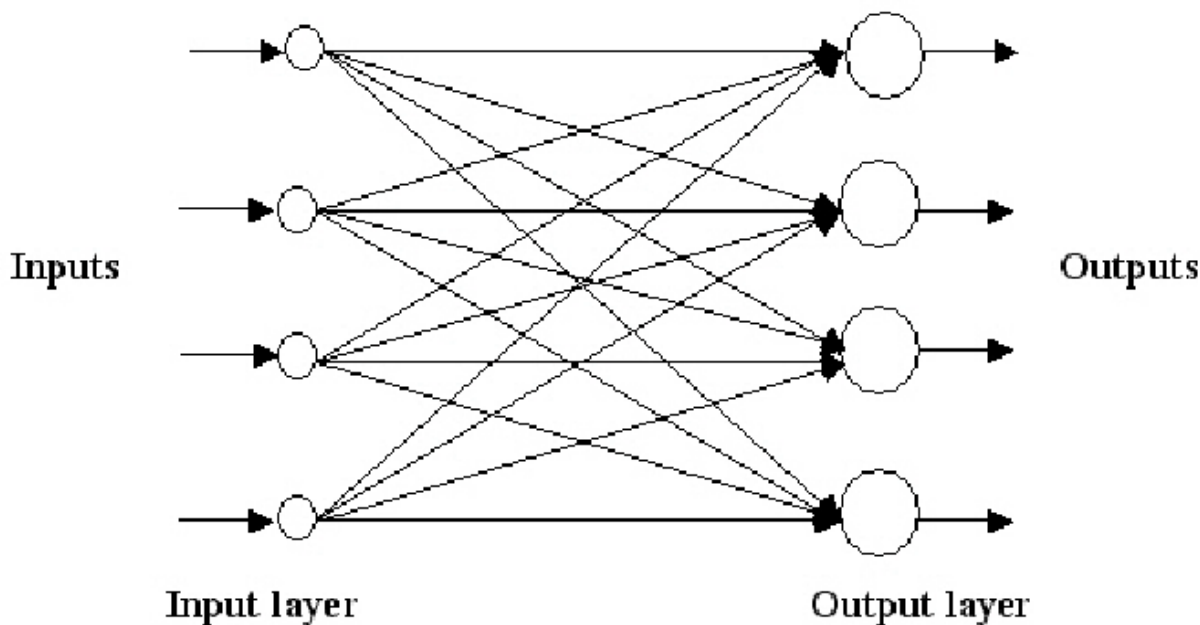
2.4.4 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม

สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมสามารถจำแนกตามโครงสร้างของโครงข่ายได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Artificial Neural Network)

สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่าย โครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้จะมีอินพุตนิเวรอนเชื่อมต่อกับเอาต์พุตนิเวรอน และมีค่าน้ำหนักเป็นตัวปรับระดับสัญญาณอินพุตเพียงชั้นเดียว ค่าน้ำหนักแต่ละ

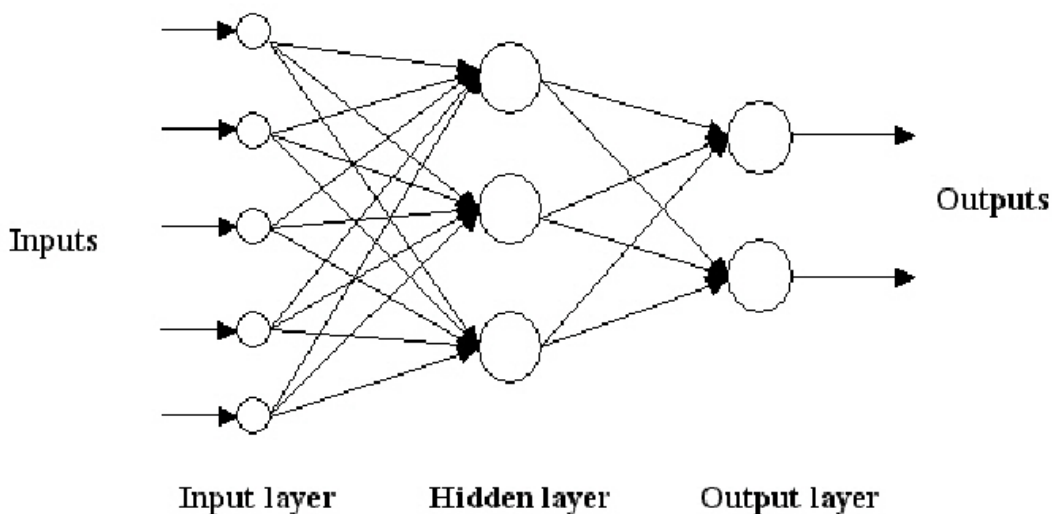
ค่าจะเป็นอิสระต่อกันไม่ส่งผลกระทบต่อค่าปรับค่าน้ำหนักตัวอื่น จึงมักใช้กับการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อนมากนัก โดยลักษณะโครงข่ายแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว [68]

2. โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multilayer Artificial Neural Network)

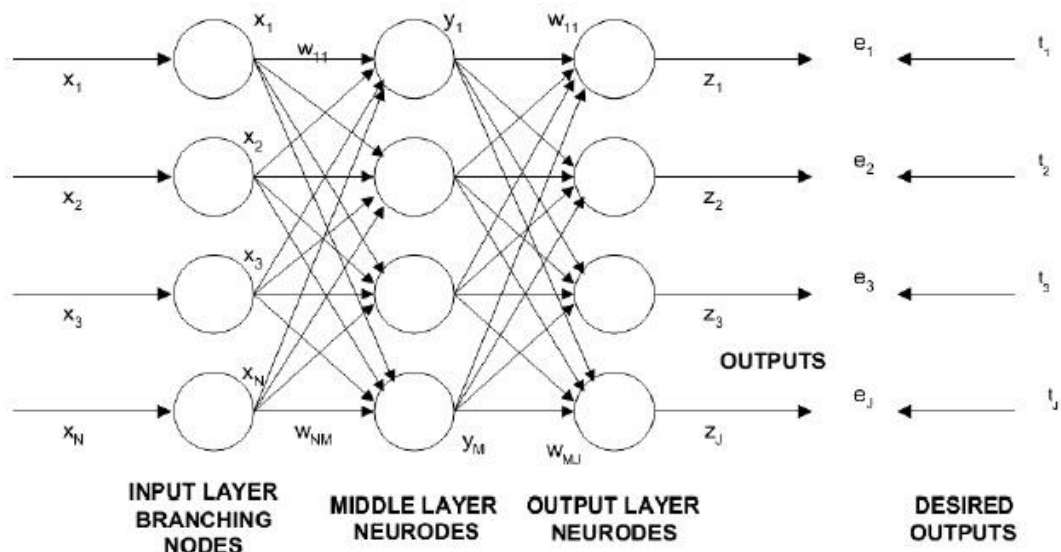
สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้จะมีชั้นนิวรอนคั่นอยู่ระหว่างอินพุต และชั้นเอาต์พุต ซึ่งอาจจะมีหนึ่งหรือหลายชั้นก็ได้ ชั้นที่คั่นอยู่เรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden layer) ดังนั้น จำนวนของค่าน้ำหนักจะมีมากขึ้นตามจำนวนชั้นซ่อนที่เพิ่มเข้าไป โดยทั่วไปโครงข่ายแบบหลายชั้นสามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่า โครงข่ายแบบชั้นเดียว แต่การเรียนรู้จะยากกว่า ลักษณะโครงข่ายแสดงดังรูป



รูปที่ 2.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น [68]

3. โครงข่ายประสาทเทียมชนิดการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

หลักการเรียนรู้แบบแพร่กลับ เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น โดยที่ขั้นตอนในการปรับน้ำหนักเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมนั้นจะใช้วิธีสอนว่าค่าเป้าหมายของแต่ละอินพุตคืออะไร และใช้ความผิดพลาดของเอาต์พุตเปรียบเทียบกับเป้าหมาย เพื่อเป็นตัวชี้ในการปรับค่าน้ำหนัก สำหรับในชั้นซ่อนจะไม่มีค่าเป้าหมายที่จะทำการเปรียบเทียบ ดังนั้น การปรับค่าน้ำหนักสำหรับชั้นซ่อนจึงใช้วิธีการแพร่ค่าความผิดพลาดจากชั้นเอาต์พุตกลับมายังชั้นซ่อน กระบวนการสำคัญของการเรียนรู้แบบแพร่กลับมี 3 ขั้นตอน คือ การป้อนไปข้างหน้า (Feedforward) ของรูปแบบอินพุต (Input Pattern) การคำนวณ และส่งค่าผิดพลาดกลับคืน (Backpropagation of Error) และการปรับค่าน้ำหนักให้เหมาะสม โครงข่ายประสาทเทียมชนิดการเรียนรู้แบบแพร่กลับประกอบด้วยนิวรอนจำนวน 3 ชั้น ชั้นแรกจะเป็นอินพุต ชั้นถัดมา เป็นชั้นซ่อนซึ่งสามารถมีได้หลายชั้น และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นเอาต์พุต แต่ละชั้นจะมีการเชื่อมโยงถึงกันหมด ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ ^[92]

2.4.5 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

1. การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) ข้อมูลจะประกอบด้วยตัวอย่างข้อมูลที่ต้องการสอน และผลลัพธ์ที่ต้องการให้โครงข่ายสร้าง เมื่อมีการนำข้อมูลในลักษณะเดียวกันมาเป็นข้อมูลป้อนเข้า โครงข่ายจะกำหนดค่าผลลัพธ์ที่เป็นเป้าหมายให้กับข้อมูลป้อนเข้าแต่ละตัว โครงข่ายจะนำค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการปรับค่าน้ำหนักเพื่อให้ค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด ถ้าหากเปรียบเทียบกับมนุษย์จะเหมือนกับการสอนนักเรียนโดยมีครูผู้สอนคอย ให้คำแนะนำ

2. การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) การเรียนรู้แบบนี้จะสอนโครงข่ายโดยการนำข้อมูลป้อนเข้าอย่างต่อเนื่องเพียงอย่างเดียว ไม่มีการส่งค่าผลลัพธ์เป้าหมายให้กับข้อมูลป้อนเข้าแต่ละตัว การปรับน้ำหนักจะใช้ข้อมูลที่นำมาสอนเป็นตัวปรับค่า โดยน้ำหนักจะปรับตามกลุ่มที่ข้อมูลป้อนเข้ามีรูปแบบคล้ายคลึงกัน ถ้าเปรียบเทียบกับมนุษย์จะเหมือนกับการที่สามารถแยกแยะพันธุ์พืชพันธุ์สัตว์ ตามลักษณะรูปร่างของมันได้ด้วยตัวเอง

2.4.6 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้หลาย ๆ ด้าน ดังต่อไปนี้

1. การจำแนกรูปแบบ (Pattern Recognition) เช่น การมองเห็นวัตถุหรือการวิเคราะห์เสียงพูด เพื่อแปลความหมาย เป็นต้น
2. การทำนาย (Prediction) หรือการพยากรณ์ (Forecasting) เช่น การทำนายราคาหุ้นของตลาดหลักทรัพย์ การพยากรณ์อัตราการไหลของน้ำ และการพยากรณ์ราคาสินค้า เป็นต้น
3. การควบคุม (Control) เช่น การควบคุมระบบเครื่องปรับอากาศ การควบคุมระบบ เครื่องยนต์ และการควบคุมหุ่นยนต์ เป็นต้น
4. การหาความเหมาะสม (Optimization) เช่น การเลือกกระยะทางที่ใกล้หรือสั้นที่สุดในการเดินทาง
5. การจัดกลุ่ม (Clustering) เช่น การวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม หรือ ภาพถ่ายทางอากาศ เป็นต้น

2.5 การวิเคราะห์กลุ่มข้อมูล (Clustering Analysis)^[91]

การวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster Analysis) เป็นเทคนิคการแบ่งกลุ่มหน่วยข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยอย่างน้อย 2 กลุ่ม โดยมีหลักเกณฑ์ในการแบ่งดังนี้ “ให้หน่วยที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันมีลักษณะที่เหมือนกันหรือคล้ายกัน แต่หน่วยที่อยู่ต่าง กลุ่มกันจะมีลักษณะที่ต่างกัน” ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดกลุ่มโดยไม่ทราบมาก่อนว่าควรมีกี่กลุ่ม แต่จะจัดกลุ่มตามค่าของตัวแปรที่นำมาใช้ โดยให้สมาชิกในกลุ่มเดียวกัน มีความเหมือนหรือใกล้เคียงกันในตัวแปรที่ศึกษา และมีความแตกต่างจากสมาชิกกลุ่มอื่น

2.5.1 เงื่อนไขในการเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดกลุ่ม

การจัดกลุ่มข้อมูล นอกจากตัวแปรที่เลือกใช้จะมีความสำคัญแล้ว ยังมีเงื่อนไขอื่น ๆ ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดกลุ่มได้ ประกอบด้วย

- การวัดความคล้ายคลึงกัน: ควรใช้พิจารณาเฉพาะข้อมูลที่มีความคล้ายกัน
- การลดขนาด: ควรลดขนาดของข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานโดยการแยกข้อมูลที่มีความแตกต่างสูงออกจากกลุ่ม
- ชื่อกลุ่ม: ควรตั้งชื่อกลุ่มสำหรับกลุ่มที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการระบุกลุ่มอย่างชัดเจน
- จำนวนกลุ่ม: จำนวนกลุ่มสำคัญต่อการจัดกลุ่มมาก หากมีข้อมูลน้อยจะประเมินได้ยาก

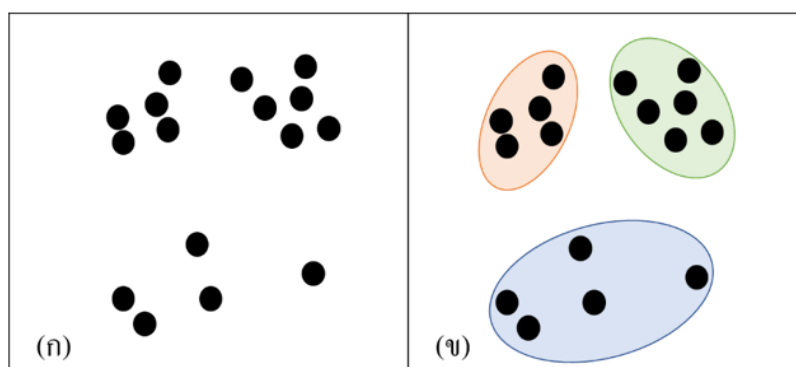
- การซ้อนทับของกลุ่ม: หากเป็นการจัดกลุ่มเอกสารหรือข้อความ ควรยอมรับได้หากมีการซ้อนทับกันในแต่ละกลุ่ม เนื่องจากเอกสารบางอย่างมีหัวข้อเหมือนกัน
- ความสามารถในการขยายขนาด: สามารถจัดกลุ่มโดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดอัลกอริทึม
- ความยืดหยุ่น: อัลกอริทึมควรปรับขนาดได้ด้วยคุณสมบัติที่แตกต่างกันจากกลุ่มอื่น

2.5.2 ประเภทของการจัดกลุ่ม

1. Partitioning Clustering เป็นวิธีการจัดกลุ่มแบบแบ่งส่วน โดยจะจัดกลุ่ม k กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มอาจแสดงโดยค่ากึ่งกลางของกลุ่ม (Centroid) ทั้งนี้ความแม่นยำของการจัดกลุ่มขึ้นอยู่กับประเภทของข้อมูลที่นำมาจัดกลุ่ม

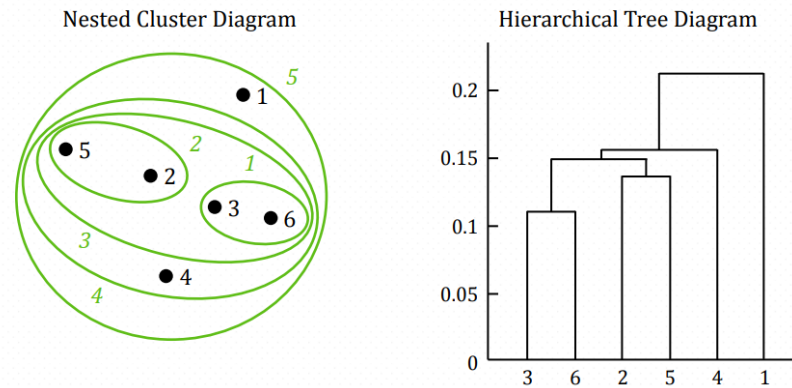
ขั้นตอนจะเริ่มจากนำข้อมูลจากฐานข้อมูลตัวแปรทั้งหมด n หน่วย มาจัดกลุ่มโดยต้องการจัดกลุ่มออกเป็น k กลุ่ม ซึ่งมีข้อตกลง คือ จำนวนกลุ่มที่แบ่งออกมาต้องมีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนข้อมูลทั้งหมด ($k \leq n$) และจะต้องใส่ข้อมูลที่มีอยู่ลงไปในแต่ละกลุ่มจนครบจำนวน k กลุ่ม โดยที่

- แต่ละกลุ่มควรมีข้อมูลอย่างน้อย 1 ข้อมูล
- ข้อมูลแต่ละข้อมูลควรอยู่เพียงกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการจัดกลุ่มแบบแบ่งส่วน (ก) ก่อนการจัดกลุ่ม (ข) หลังการจัดกลุ่ม

2. Hierarchical Clustering เป็นวิธีการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น วิธีนี้จะจัดกลุ่มข้อมูลโดย พิจารณาการรวมกลุ่มจากระยะห่างของข้อมูล โดยข้อมูลที่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุดจะเชื่อมต่อกัน และรวมเป็นกลุ่ม จากนั้นค่อยเชื่อมต่อกับข้อมูลที่มีระยะห่างไกลถัดไป ซึ่งระยะห่างที่แตกต่างกันในกลุ่ม และลำดับขั้นในการจัดกลุ่มสามารถอธิบายจากแผนภาพเดนโดแกรม (Dendrogram) ดังรูป

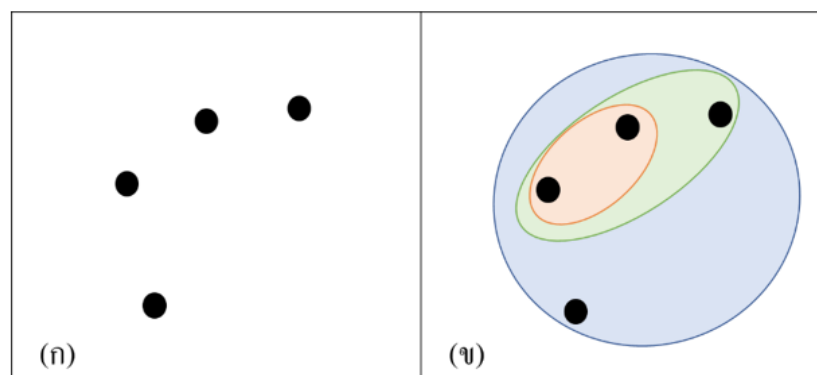


รูปที่ 2.9 แผนภาพเดนไดรแกรมจากการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น

วิธีการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นสามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ Agglomerative Approach และ Divisive Approach โดยวิธี Agglomerative เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด

การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นโดยวิธี Agglomerative สามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. ค้นหาข้อมูลที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด และรวมเข้าไว้ด้วยกันเป็นกลุ่ม
2. ค้นหา และรวมข้อมูลที่ใกล้เคียงที่สุดลำดับถัดไป โดยที่ข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลเดี่ยว หรือกลุ่มของข้อมูล



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น (ก) ก่อนการจัดกลุ่ม (ข) หลังการจัดกลุ่ม

3. Density Based Clustering เป็นวิธีการจัดกลุ่มแบบอิงความหนาแน่นของข้อมูลแต่ละกลุ่ม สำหรับแต่ละข้อมูลในกลุ่มอย่างน้อยต้องมีจำนวนจุดต่ำสุดภายในรัศมีที่กำหนดแต่ละกลุ่มเป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่น และล้อมรอบด้วยพื้นที่ที่มีความหนาแน่นต่ำ

4. Grid Based Clustering เป็นวิธีการจัดกลุ่มโดยข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นกริดตามลักษณะของข้อมูล วิธีนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากการสังข้อมูล และสามารถจัดการกับข้อมูลที่ไม่ใช่ตัวเลขได้อย่างง่ายดาย

5. Model Based Clustering เป็นวิธีการจัดกลุ่มโดยจัดกลุ่มข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงสูง และความคล้ายคลึงกันต่ำ การจัดกลุ่มวิธีนี้จะยึดตามค่าเฉลี่ยและฟังก์ชันข้อผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด

2.5.3 การจัดกลุ่มวิธี K-means Clustering

การวิเคราะห์แบบ Partitioning methods ที่ดีที่สุด คือวิธี K-means ซึ่งอธิบายโดยละเอียดได้ ดังนี้ วิธี K-means Clustering เป็นวิธีจัดกลุ่มตามคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยจะกำหนดจุดกึ่งกลางแต่ละกลุ่ม ข้อมูล จุดกึ่งกลางคือค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด และพิภักเป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตสำหรับแต่ละมิติ จะแตกต่างกันไปตามข้อมูลทั้งหมดในกลุ่ม

การจัดกลุ่มแบบนี้มีเงื่อนไขว่าจะต้องกำหนดจำนวนกลุ่มไว้ก่อน จากนั้นโปรแกรมจะเลือกข้อมูลเข้าแต่ละกลุ่ม โดยสุดท้ายแล้ว กลุ่มที่ได้จะเป็นกลุ่มแยกจากกัน ไม่ซ้อนทับกัน โดยการจัดกลุ่มวิธีนี้เหมาะสำหรับข้อมูลมากกว่า 200 ข้อมูล โดยมุ่งเน้นที่จะให้ข้อมูลในกลุ่มเดียวกันมีความคล้ายคลึงกันมากที่สุด และข้อมูลต่างกลุ่มกันมีความแตกต่างกันมากที่สุด

ขั้นตอนการจัดกลุ่มของเทคนิค K-means Clustering มี 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. เลือกจำนวนกลุ่มข้อมูล k กลุ่ม
2. สุ่มค่ากึ่งกลางเป็นตัวแทนข้อมูลของแต่ละกลุ่ม (k กลุ่ม)
3. คำนวณระยะห่างแบบยุคลิด (Euclidean Distance) ของแต่ละข้อมูลกับค่ากึ่งกลางของกลุ่ม
4. จัดกลุ่มแต่ละข้อมูลให้ใกล้กับค่ากึ่งกลางมากที่สุด
5. คำนวณค่าเฉลี่ยและกำหนดค่ากึ่งกลางใหม่
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 ถึง 6 จนได้ค่าเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shao และคณะ (2020) ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความดัน อุณหภูมิ และการกระจายขนาดอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน การวัดค่าความเร็วต่ำสุดถูกดำเนินการภายใต้ความดัน 0.1 เมกะพาสคัล ถึง 0.5 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ถึง 850 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ pressurized fluidized bed สำหรับการกระจายขนาดอนุภาคแบบแคบและแบบกว้างใน 3 ลักษณะ (binary, uniform และ Gaussian) ของอนุภาคของทรายซิลิกา ผลการศึกษาพบว่าค่าความเร็วต่ำสุดสำหรับการกระจายขนาดอนุภาคแบบแคบและแบบกว้างทั้งคู่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อความดันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า อนุภาคผสมแบบ Gaussian มีค่าความเร็วต่ำสุดใกล้เคียงกับการกระจายขนาดอนุภาคแบบแคบ ในขณะที่อนุภาคผสมแบบ binary และ uniform มีค่าความเร็วต่ำสุดที่มากกว่า จากข้อมูลการทดลองได้มีการพัฒนาความสัมพันธ์แบบง่ายขึ้นใหม่ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันในสภาวะที่มีความดันและอุณหภูมิแตกต่างกัน ^[70]

Yan และคณะ (2019) ศึกษาเกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถใช้ในการทำนายและตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านในอนุภาคแก๊ส-ของแข็งที่ไม่เป็นอนุภาคทรงกลมได้ และจากผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสามารถหา curve fitting ของสัมประสิทธิ์แรงต้าน จำนวนเลขเรย์โนลด์ และค่าความ

เป็นทรงกลมที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ เมื่อรวมความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์แรงต้านกับแบบจำลองของ Syamlal-O'Brien และ Gidaspow-blend ซึ่งเป็นการจำลองการไหลแบบสองเฟสด้วยแบบจำลองของ ออยเลอร์โดยจะไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเบตนิ่ง (fixed beds) ไปยังเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed) การจำลองการลดลงของความดันเปรียบเทียบกับผลการทดลองสอดคล้องซึ่งกันและกัน แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมในระบบแก๊ส-ของแข็งสามารถทำนายได้อย่างสมเหตุสมผลโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมและงานนี้มีการอ้างอิงสำหรับการทำนายสัมประสิทธิ์แรงต้านของอนุภาคที่มีรูปร่างซับซ้อนในระบบสองวัฏภาคระหว่างแก๊สและของแข็ง [83]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การสร้างสหสัมพันธ์เพื่อให้ได้สมการทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจำเป็นต้องใช้ชุดข้อมูลจำนวนมากจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาเพื่อเพิ่มความถูกต้อง และแม่นยำในการทำนาย จึงได้นำกระบวนการด้านวิทยาศาสตร์ข้อมูลมาใช้เป็นเครื่องมือในการจัดการกับข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ให้เป็นไปในลักษณะเดียวกัน โดยทำการสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้ข้อมูลที่ผ่านการรวบรวม และจัดกลุ่มประเภทของข้อมูล ซึ่งในบทนี้จะกล่าวแยกเป็นประเด็นสำคัญ 3 ประเด็น ได้แก่ การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเก็บรวบรวมข้อมูล ในหัวข้อ 3.1 การสร้างสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย และการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน รวมถึงการวิเคราะห์ และจัดกลุ่มข้อมูลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

3.1 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเก็บรวบรวมข้อมูล

ศึกษาข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟลูอิดเซชัน โดยรวบรวมเป็นชุดข้อมูลในลักษณะของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ได้แก่

3.1.1 ตัวแปรอิสระ (Independent variables)

- 1) ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (ρ_p)
- 2) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_p)
- 3) ความเป็นทรงกลม (ϕ)
- 4) สัดส่วนช่องว่างภายในเบด (ε)
- 5) เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ฟลูอิดเซชันเบด (D_c)
- 6) ความสูงเบดเริ่มต้น (H_0)
- 7) ความหนาแน่นของแก๊ส (ρ_g)
- 8) ความหนืดไดนามิกของแก๊ส (μ_g)
- 9) ตัวเลขไร์หน่วยอาร์คิมิดีส (Ar)

3.1.2 ตัวแปรตาม (Dependent variable)

- 1) ค่าเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Re_{mf})

ข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- 1) ชุดข้อมูลสำหรับการนำไปสร้างสหสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และโครงข่ายประสาทเทียม
- 2) ชุดข้อมูลสำหรับนำไปเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และโครงข่ายประสาทเทียม

3.2 การสร้างสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอยและการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนาย

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

3.2.1 การสร้างสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย

การสร้างสหสัมพันธ์เพื่อการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมในหัวข้อ 3.1 มาสร้างแบบจำลองการถดถอยโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ โดยใช้ Data Analysis Tools และ Regression ในโปรแกรม Microsoft Excel โดยค่าเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจะเป็นตัวแปรตาม (Y) และตัวแปรอิสระ (X) ของข้อมูลที่เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

เมื่อได้สหสัมพันธ์แล้วจะนำไปใช้กับข้อมูลการทดลองอื่นๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และเหมาะสมของสหสัมพันธ์ที่ได้ และนำไปเปรียบเทียบกับการใช้สหสัมพันธ์อื่นๆของงานวิจัยที่ผ่านมาในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

3.2.2 การสร้างสหสัมพันธ์จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม

งานวิจัยนี้จะใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ในโปรแกรม MATLAB ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีขั้นตอนสำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ดังนี้

- 1) กำหนดข้อมูลขาเข้าและเป้าหมาย โดยข้อมูลขาเข้า ซึ่งเป็นข้อมูลของ 9 ตัวแปรดำเนินการอิสระที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ได้แก่ $\rho_p, d_p, \phi, \varepsilon, D_c, H_0, \rho_g, \mu_g$ และ Ar และข้อมูลเป้าหมายเป็นข้อมูลของค่าเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน
- 2) กำหนดจำนวนข้อมูลที่จะนำเข้ากระบวนการ Training Validation และ Testing โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าตั้งต้นของโปรแกรม คือ ร้อยละ 70 15 และ 15 ของจำนวนข้อมูลทั้งหมดตามลำดับ
- 3) กำหนดจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝง โดยทำการหาจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่เหมาะสมสำหรับการฝึกสอน เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error, MSE) ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำและยอมรับได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเป็นดัชนีวัดความแม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

- 4) กำหนดกระบวนการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอส โดยในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการตั้งต้นของโปรแกรม คือ วิธี Levenberg Maquard Algorithm
- 5) ทำการฝึกสอน และตรวจสอบจำนวนชั้นแอบแฝงที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดหรือเริ่มมีค่าคงที่ จึงจะได้แบบจำลองสำหรับการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซนชันจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม

3.3 การแบ่งกลุ่มข้อมูลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำการวิเคราะห์แบบไม่มีผู้สอน (Self-Organizing Map, SOM)

การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Clustering) จะใช้เครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูลโดยไม่มีการฝึกสอน (Self-Organizing Map, SOM) จากข้อมูลที่เป็นตัวแปรดำเนินการอิสระที่รวบรวมไว้ 1000 ชุดข้อมูล

- 1) กำหนดข้อมูลขาเข้า ซึ่งเป็นข้อมูลของ 9 ตัวแปรดำเนินการอิสระที่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซนชัน ได้แก่ $\rho_p, d_p, \phi, \varepsilon, D_c, H_0, \rho_g, \mu_g$ และ Ar
- 2) กำหนดจำนวนชั้นนิวรอนในการวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูล โดยทำการเลือกจำนวนนิวรอนที่ 2 ชั้น เพื่อทำการจัดกลุ่มออกมา 4 กลุ่มข้อมูล
- 3) ทำการฝึกสอนข้อมูล โดยการฝึกสอนข้อมูลจะหยุดลงโดยอัตโนมัติเมื่อครบตามจำนวนครั้งแล้ว
- 4) เมื่อเสร็จการฝึกสอน จะได้แบบจำลองการวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูล สามารถรู้จำนวนของชุดข้อมูลในแต่ละกลุ่ม หลังจากนั้นทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลตามที่ได้จากการวิเคราะห์
- 5) นำกลุ่มข้อมูลที่ได้แบ่งกลุ่มจากข้อ 4) ไปสร้างสหสัมพันธ์จากแบบจำลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ตามวิธีดำเนินการเช่นเดียวกันกับข้อ 3.2.2

ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซนชันที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม จะถูกเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สหสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ รวมถึงการใช้สหสัมพันธ์จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียบกับข้อมูลการทดลองอื่นๆจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเหมาะสมในการใช้สหสัมพันธ์จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟลูอิดไอเดเซชัน โดยมีตัวแปรตาม 1 ตัว คือ Re_{mf} และตัวแปรดำเนินการอิสระ 9 ตัว ได้แก่ $\rho_p, d_p, \varphi, \varepsilon, D_c, H_0, \rho_g, \mu_g$ และ Ar ซึ่งการรวบรวมดังกล่าวได้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 1050 ชุดข้อมูล และแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- 1) 1000 ชุดข้อมูลสำหรับการนำไปสร้างสหสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังตารางที่ ก. 1
- 2) 50 ชุดข้อมูลสำหรับนำไปเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังตารางที่ ก. 2

4.2 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ

การสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน จะนำข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมมาสร้างแบบจำลองการถดถอยโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel โดยมีตัวแปรตาม 1 ตัว คือ Re_{mf} และตัวแปรดำเนินการอิสระ 9 ตัว ได้แก่ $\rho_p, d_p, \varphi, \varepsilon, D_c, H_0, \rho_g, \mu_g$ และ Ar ในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเดเซชัน โดยสหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned} Re_{mf} = & -33.91 + 6.56\rho_g + 0.0017\rho_g + 36862d_p + 5.41\varepsilon \\ & + 16.92D_c + 8.9\varphi + 9.74H_0 - 59842\mu_g + 0.000041Ar \end{aligned} \quad (4.1)$$

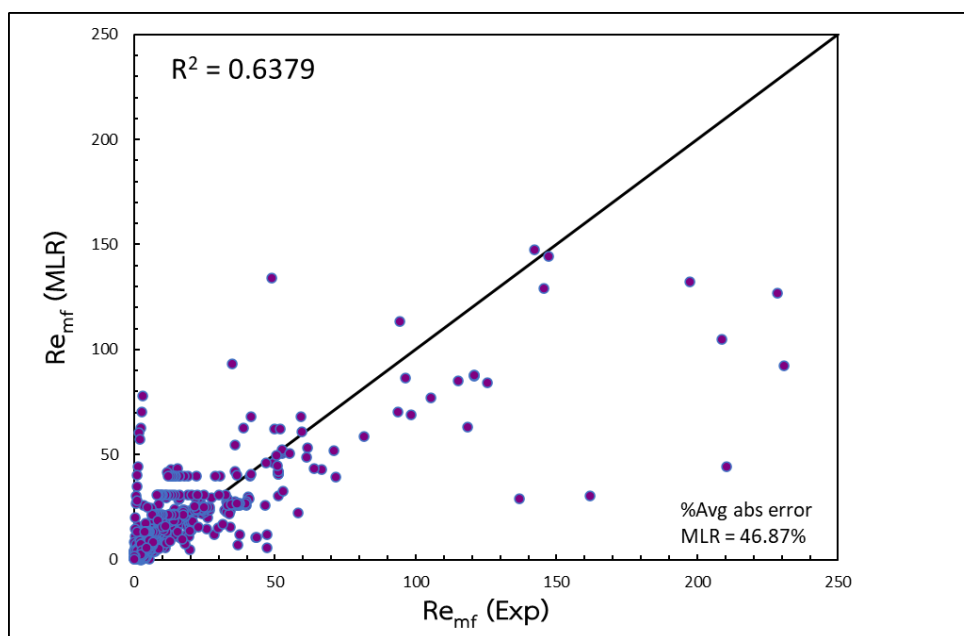
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุเพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน

Variables	Coefficients	Standard Error	P-value
Intercept	-33.91	5.15	7.48E-11
Gas density	6.56	2.20	0.0029
Particle density	0.0017	0.00	9.60E-06
Particle diameter	36862	1707.45	5.15E-85
Bed voidage	5.41	3.31	0.102
Column diameter	16.92	9.33	0.070
Sphericity	8.90	3.57	0.013
Initial bed height	9.74	4.02	0.016
Gas viscosity	-59842	73042.60	0.413
Ar	0.000041	6.85E-06	2.07E-09

เมื่อพิจารณาผลทางสถิติจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุในการสร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าตัวแปรอิสระที่ใช้มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามในระดับที่ไม่สูงมากนัก โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.6379 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ พบว่า ตัวแปร $\rho_p, d_p, \phi, H_0, \rho_g$ และ Ar ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ คือ p-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 โดยตัวแปร Ar หรือตัวเลขไร้นิยามอาร์คิมิดีส แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดำเนินการต่างๆ เช่น ขนาดของอนุภาคของแข็ง (d_p) ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (ρ_p) และความหนาแน่นของของไหล (ρ_g) ที่ล้วนส่งผลต่อตัวเลขไร้นิยามอาร์คิมิดีส อีกทั้งตัวแปรดำเนินการเหล่านี้ยังมีค่า p-value ที่ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งให้ผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน ตัวแปร ϕ หรือ ค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคของแข็ง ที่บ่งบอกถึงความสำคัญของรูปร่างหรือรูปทรงของอนุภาคของแข็งที่ใช้นั้นมีความหลากหลายและแตกต่างกัน และตัวแปร H_0 หรือค่าความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งในคอลัมน์ฟลูอิดไอเซชัน แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณาปริมาณของอนุภาคของแข็งเริ่มต้นที่ใช้ ในขณะที่ตัวแปร ε, D_c และ μ_g เป็นตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า p-value สูงกว่า 0.05 นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระยังมีผลต่อการทำนายที่จะได้ค่าออกมาในเชิงบวกหรือลบ ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปร จากการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.1 พบว่า ตัวแปรอิสระส่วนใหญ่จะมีผลต่อการทำนายออกมาในค่าที่เป็นเชิง

บวก ยกเว้นตัวแปรของความหนืดแก๊ส (μ_g) และ ค่าคงที่ (Intercept) ที่มีผลต่อค่าการทำนายออกมาเป็นค่าในเชิงลบ ซึ่งจะส่งผลค่าจากการทำนายนั้นมีความคลาดเคลื่อนมากยิ่งขึ้น

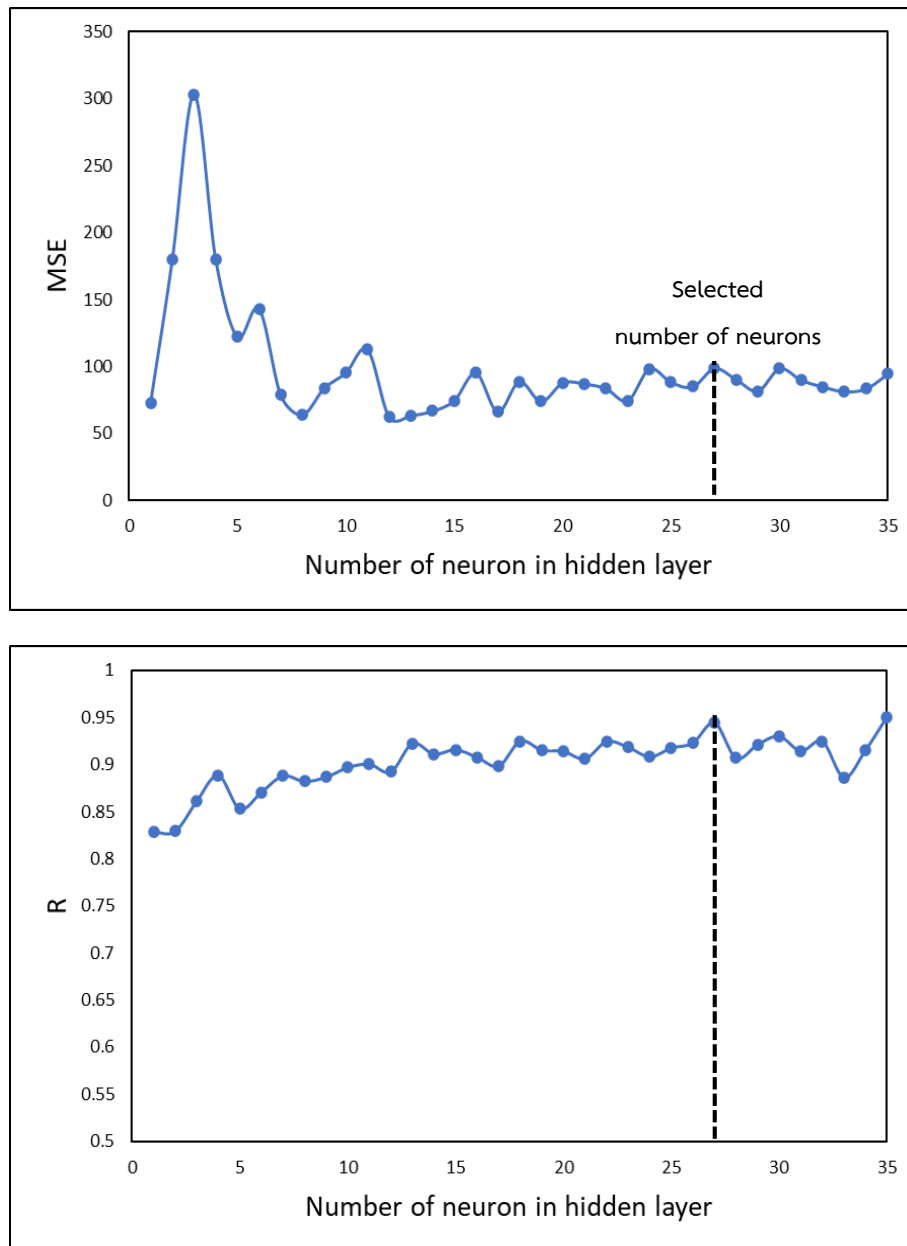
เมื่อนำสมสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกโดยใช้ข้อมูลจากการรวบรวม นำมาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้สมสัมพันธ์และผลจากข้อมูลที่ได้รวบรวมไว้ พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.6379 และร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 46.87 โดยค่า R^2 เป็นค่าที่บ่งบอกว่าสมสัมพันธ์ที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้มาน้อยเพียงใด ซึ่งการที่ R^2 มีค่าต่ำ แสดงว่าสมสัมพันธ์ที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลน้อย ขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความถูกต้อง และแม่นยำในการทำนายผลจากการใช้สมสัมพันธ์ที่ได้ การที่ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มีค่าสูง แสดงถึงสมสัมพันธ์ที่ได้มานั้นมีความแม่นยำน้อยในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก โดยผลการเปรียบเทียบของค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกระหว่างผลจากข้อมูลที่ได้รวบรวม และผลจากการใช้สมสัมพันธ์ในการทำนาย แสดงในรูปที่ 4.1



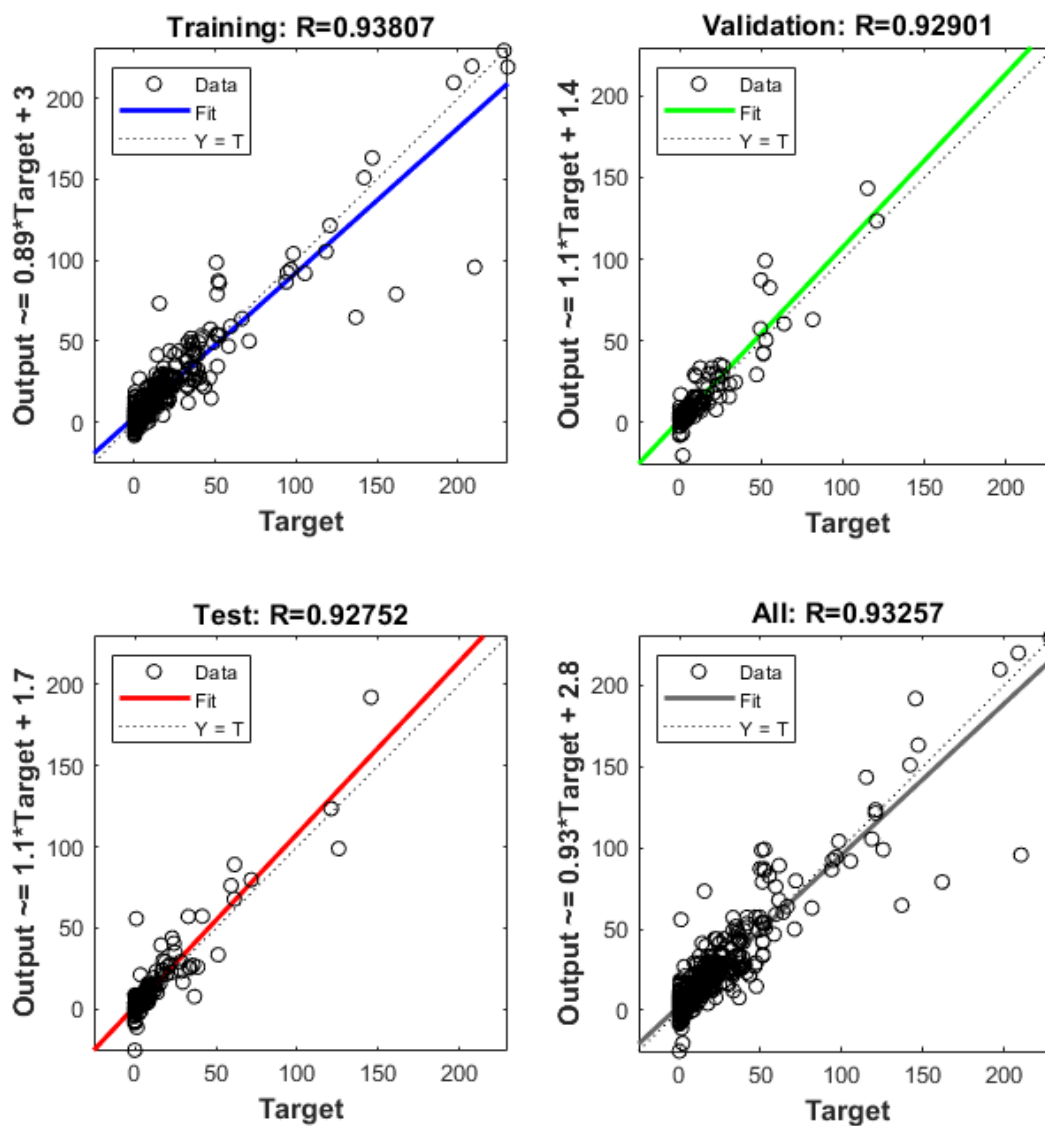
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกจากข้อมูลที่ได้รวบรวม และจากสมสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ

4.3 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จะใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยการกำหนดข้อมูลขาเข้า ได้แก่ $\rho_p, d_p, \phi, \varepsilon, D_c, H_0, \rho_g, \mu_g$ และ Ar และข้อมูลเป้าหมาย คือ Re_{mf} ในการฝึกสอนจะเลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นโดยกำหนดให้มีจำนวนชั้นแอบแฝงหนึ่งชั้น และทำการหาจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่เหมาะสมสำหรับการฝึกสอน เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นดัชนีวัดความแม่นยำของการใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยผลของจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย โดยจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่เลือกในงานวิจัยนี้คือ 27 นิวรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เนื่องจากเป็นจำนวนนิวรอนเริ่มต้นที่เริ่มทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าคงที่ และอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยรูปที่ 4.3 จะแสดงกราฟวิเคราะห์การถดถอยของกระบวนการ (a) Training (b) Validation (c) Testing และ (d) กระบวนการรวม ซึ่งเป็นกราฟแสดงข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างค่าเป้าหมาย และค่าทำนายจากโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งให้ค่า R เข้าใกล้ 1 ในกระบวนการรวม ซึ่งหมายถึงข้อมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ โดยตารางที่ 4.2 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ของน้ำหนักข้อมูลขาเข้าที่ i ถึงชั้นแอบแฝง j ($IW_{j,i}$) น้ำหนักของนิวรอนที่ j ในชั้นแอบแฝงถึงชั้นขาออก ($LW_{1,j}$) ไบแอสของข้อมูลขาเข้าที่ 1 ถึงนิวรอนที่ j ในชั้นแอบแฝง (B_1) และไบแอสชั้นขาออก (B_2) ซึ่งใช้ในการคำนวณข้อมูลขาออกที่จะให้สอดคล้องกับค่าเป้าหมายสำหรับการฝึกสอน คือ Re_{mf} โดยที่ $IW_{j,i}$ จะเป็นเมตริกซ์ขนาด 27×9 และ $LW_{1,j}$ จะเป็นเมตริกซ์ขนาด 1×27



รูปที่ 4.2 ผลของจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) และ ค่า R สำหรับการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮโดเซชันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 4.3 กราฟวิเคราะห์การถดถอยของกระบวนการ (a) Training (b) Validation (c) Testing และ (d) กระบวนการรวม

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของน้ำหนักและไบแอสที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

Neurons	$IW_{j,1}$	$IW_{j,2}$	$IW_{j,3}$	$IW_{j,4}$	$IW_{j,5}$	$IW_{j,6}$	$IW_{j,7}$	$IW_{j,8}$	$IW_{j,9}$	$LW_{1,j}$	B1	B2
1	0.2375	0.7276	0.3758	3.3133	-1.3919	4.2001	0.6846	-2.1609	-0.8849	-0.0290	-0.4769	-0.5397
2	-0.2921	-0.4747	-0.3757	-0.2266	-2.8690	0.9503	4.9584	0.0495	-0.9688	0.8775	1.4714	
3	1.6522	-0.6784	0.3549	1.9144	1.5510	0.8243	-2.8313	1.0596	-1.3149	-0.1721	0.2181	
4	-1.0492	0.1133	-1.6044	-0.7292	0.0314	0.7773	3.9185	-0.4750	-0.1664	-1.5734	2.3518	
5	1.3959	-2.4996	-2.1764	0.9189	-0.9509	0.4508	-0.3167	-1.1393	-1.1732	0.5193	-1.4788	
6	-0.6724	0.7407	0.5512	-4.7641	-1.3613	-1.4256	1.8237	-0.1147	1.9120	-0.1509	-0.3298	
7	1.1144	0.6537	0.4984	1.3691	1.4756	0.6336	1.5551	-0.2307	0.8975	-1.5286	-1.3197	
8	-2.2075	-0.2968	-0.8196	-1.9036	-1.9512	-1.2717	0.2290	-0.7705	1.5551	-0.4627	-0.0533	
9	-0.0646	-1.2742	-1.4505	-0.2340	-3.5379	0.8881	4.1637	-0.1226	-0.9112	-0.3461	-1.2783	
10	0.2879	0.9267	1.2268	-1.7429	-0.3035	0.4744	-0.0383	0.6539	0.8384	1.3444	-0.6497	
11	1.2655	0.2626	-0.8402	0.6580	-0.1967	3.2786	-0.1413	0.3040	-1.8195	0.0901	-1.2204	
12	-0.4047	-0.8765	-4.1814	1.4666	3.3681	0.6917	-1.8978	0.2123	-0.4322	-0.2258	0.0420	
13	0.5492	-0.0124	-0.6085	-1.8379	-0.9106	1.7638	-3.2232	0.3227	3.9037	0.0752	0.0972	
14	-0.0401	-1.2026	1.3909	1.9570	-1.3294	-0.4099	2.0498	0.3168	-1.3385	-0.5435	-1.2009	
15	0.4612	2.1904	-3.0484	-2.6981	1.6329	0.1629	-2.1966	-0.4227	-1.0435	-0.2497	-1.7939	
16	0.2266	-3.5741	0.3265	1.4126	-0.1079	-3.1334	-4.1176	1.0371	0.9163	0.0917	-2.6339	
17	-0.3806	-1.6585	-2.7598	0.6686	1.1026	1.1317	1.6724	-0.3622	-0.0752	0.8233	0.2002	
18	0.1621	0.6045	-1.0925	0.8364	0.3117	3.3489	2.1447	-0.4341	3.2633	-0.0302	1.4239	
19	1.0058	0.7446	0.9722	0.7595	-0.9702	1.9265	0.1679	-1.7064	2.0296	-0.1030	0.7394	
20	1.9535	1.0754	-0.0106	0.1882	0.6724	0.4781	1.2595	0.7673	-0.5490	0.6363	2.8791	
21	-0.6055	-1.6408	1.9332	-0.8857	1.8161	1.5696	1.3428	0.0243	-1.1382	0.1051	-0.9716	
22	-0.0650	0.0272	0.6605	2.1414	-3.7324	-1.7113	2.8768	-1.8935	2.5702	0.1717	-0.2867	
23	-1.8508	-0.4756	0.4847	-2.1947	-0.2916	-0.5479	1.1641	1.1440	-0.7745	0.5614	2.8190	
24	2.2250	1.4945	-0.3048	-0.5893	0.7721	0.3134	1.8730	1.0707	-4.2191	-0.5146	-0.2448	
25	1.6195	0.4538	-1.2894	1.3698	-3.4526	-0.7802	-1.5015	-1.1526	-0.5515	-0.0187	2.6982	
26	-0.2176	-0.5544	1.1840	0.6929	0.5035	-1.3506	0.8717	0.9342	1.1773	1.1660	-1.7007	
27	0.4480	2.3160	-2.4430	-2.0582	-3.5280	-1.8681	1.8723	0.0655	-2.1824	0.1471	-1.4473	

หมายเหตุ

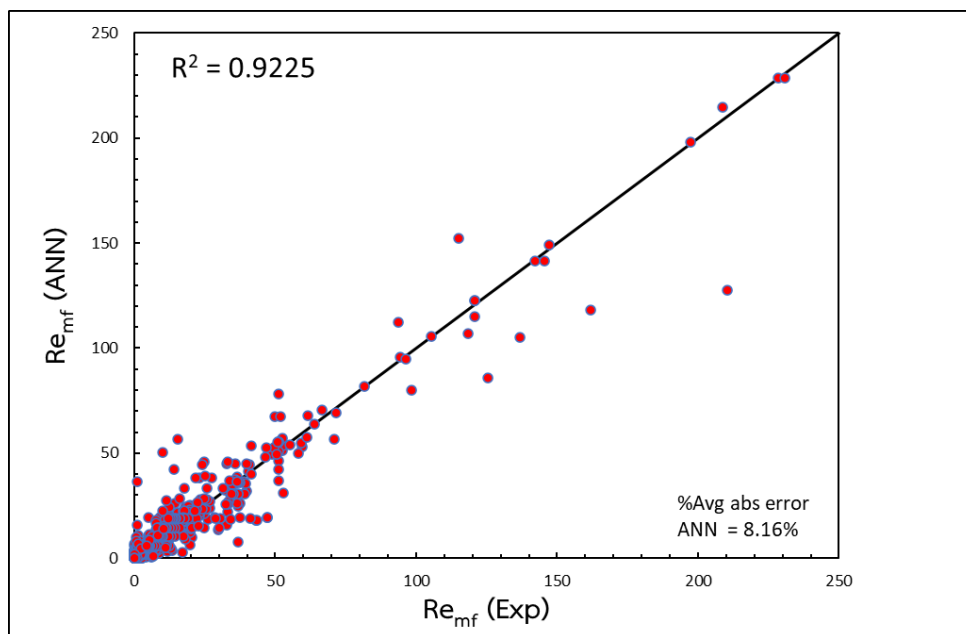
$LW_{1,j}$ เป็นเมตริกซ์ 1x27

(Row matrix)

B1 เป็นเมตริกซ์ 27x1

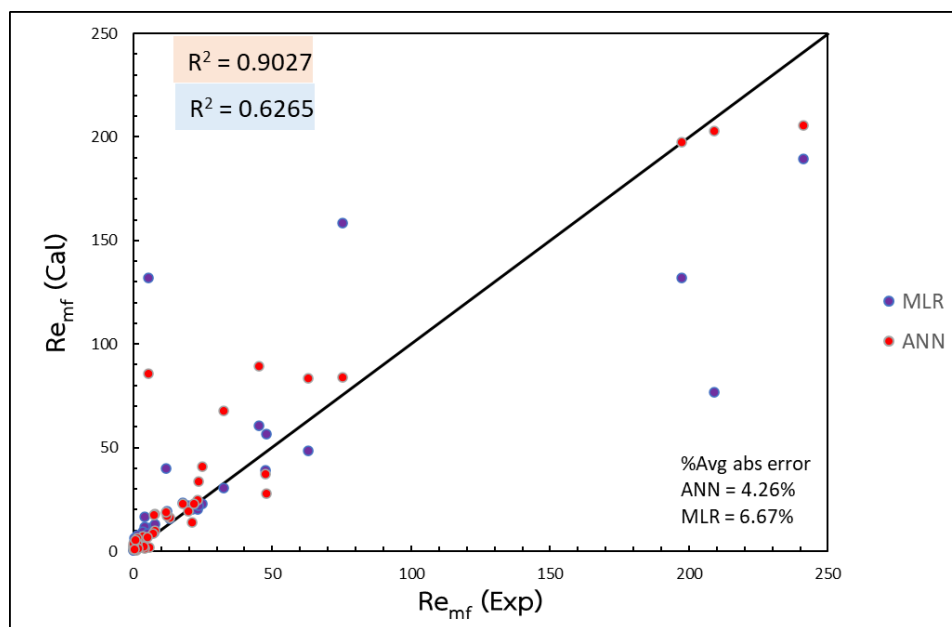
(Column matrix)

เมื่อพิจารณาผลจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยเปรียบเทียบกับผลจากข้อมูลที่ได้รวบรวม และ ผลจากการทำนายโดยใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ ดังสมการที่ 4.1 พบว่า มีร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์จากการใช้สหสัมพันธ์จากโครงข่ายประสาทเทียม เท่ากับ 8.16 ซึ่งน้อยกว่าการใช้สหสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และ R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9225 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีรวมถึงมีความเหมาะสมในการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากข้อมูลที่ได้รวบรวม และจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียม

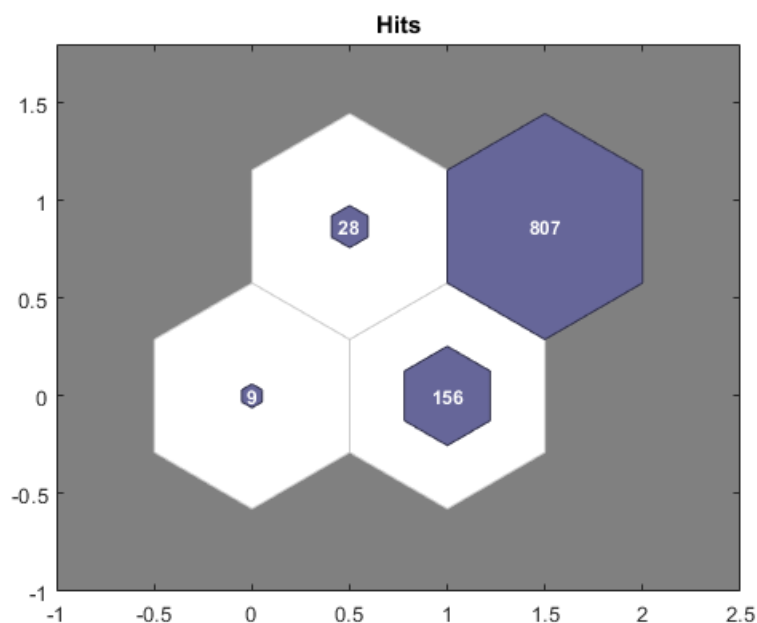
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และแบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ชุดข้อมูล 50 ชุดในการทดสอบ พบว่า การทดสอบผลการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์น้อยกว่าการทำนายโดยใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ ซึ่งบ่งบอกถึงความถูกต้อง และแม่นยำที่สูงกว่า เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้ และสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลขาเข้า และข้อมูลเป้าหมายได้เป็นอย่างดี ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการอิสระต่าง ๆ ที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก มักจะมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุอาจทำให้เกิดความไม่เหมาะสมกันของข้อมูล จาก R^2 ที่มีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียม บ่งบอกถึงข้อมูลเหล่านั้นมีความเหมาะสมกับการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกจากการใช้สหสัมพันธ์แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และ จากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียม

4.4 การวิเคราะห์กลุ่มข้อมูล (Clustering analysis)

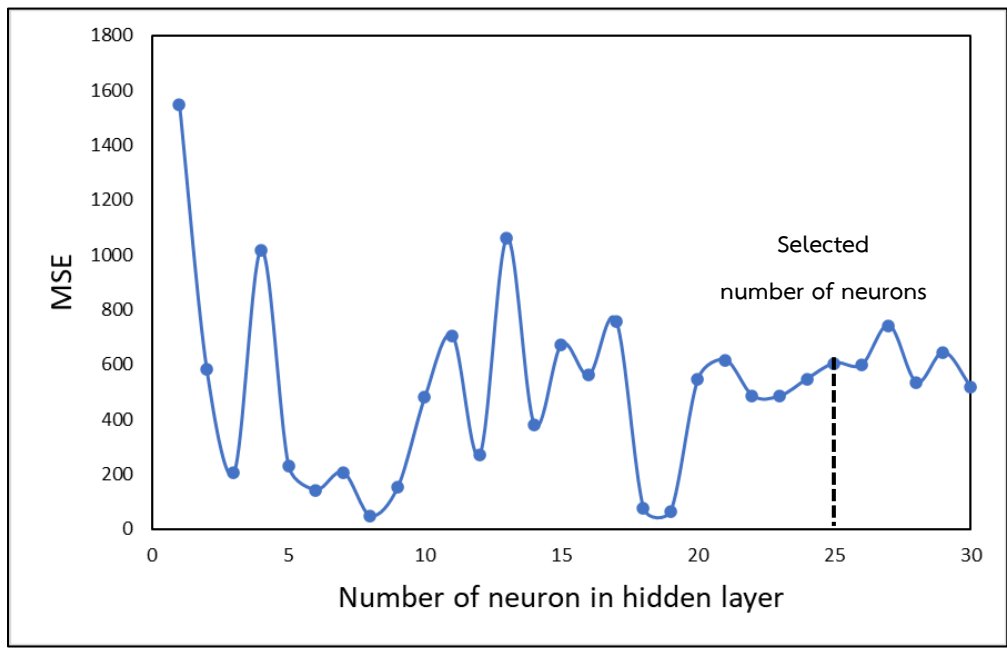
การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Clustering) เป็นการจัดกลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะเหมือนไว้ในกลุ่มเดียวกัน โดยการใช้อุปกรณ์โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูลโดยไม่มีการฝึกสอน (Self-Organizing Map, SOM) จากข้อมูลที่เป็นตัวแปรดำเนินการอิสระที่รวบรวมไว้ 1000 ชุดข้อมูล สามารถแบ่งประเภทของข้อมูลออกมาได้ 4 กลุ่ม จากการเลือกชั้นสำหรับการวิเคราะห์ในกระบวนการ SOM ที่จำนวน 2 ชั้น ซึ่งในแต่ละกลุ่มมีจำนวนชุดข้อมูลเท่ากับ 9 156 28 และ 807 ชุดข้อมูล ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งบ่งบอกถึงข้อมูลของตัวแปรดำเนินการอิสระ 1000 ชุดข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเป็นส่วนใหญ่คิดเป็นร้อยละ 80.7 ของข้อมูลทั้งหมด



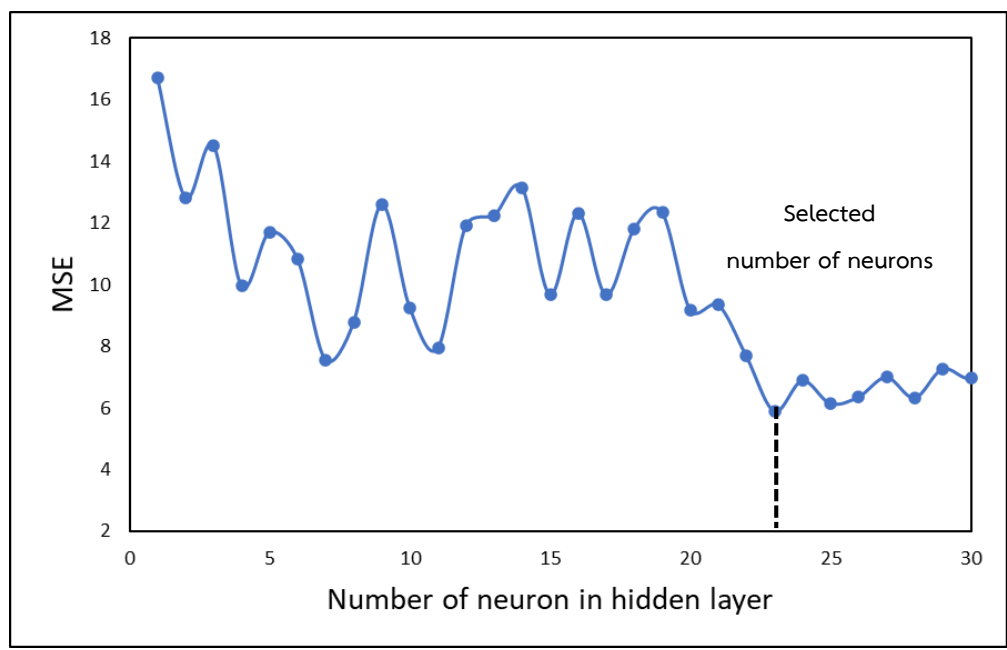
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการวิเคราะห์แบ่งกลุ่มข้อมูล Self-Organizing Map, SOM

ของข้อมูลที่ได้จากการรวบรวม 1000 ชุดข้อมูล

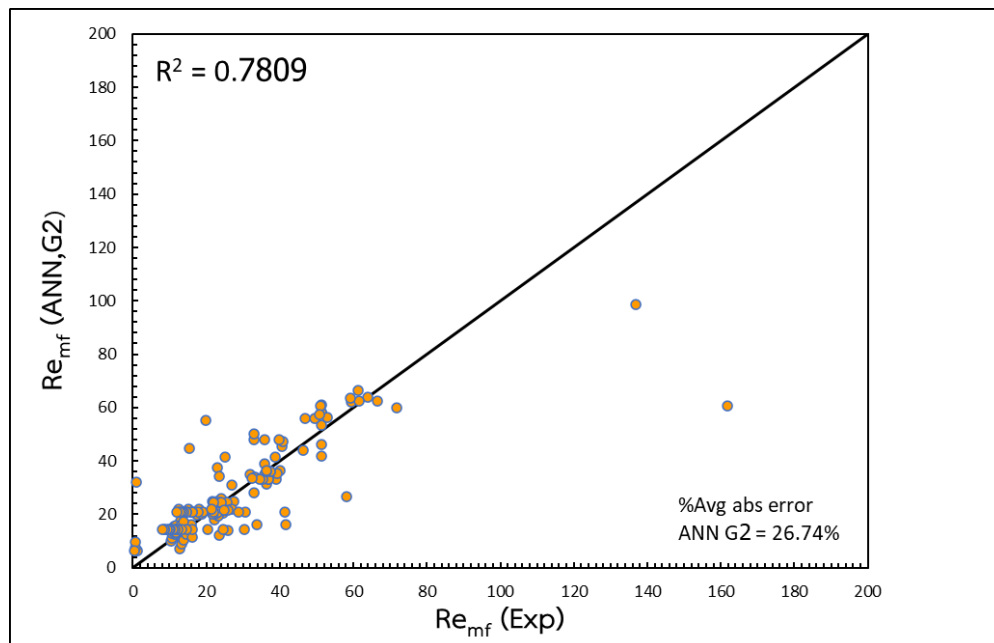
จากการวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูล ได้นำข้อมูลกลุ่มที่ 2 และ 4 มาสร้างแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบการดำเนินงานเร็วที่สุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยการกำหนดข้อมูลขาเข้าตัว ได้แก่ $\rho_p, d_p, \varphi, \varepsilon, D_c, H_0, \rho_g, \mu_g$ และ Ar และข้อมูลเป้าหมาย คือ Re_{mf} เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.2 โดยเลือกจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงสำหรับการฝึกสอนกลุ่มข้อมูลที่ 2 และ 4 อยู่ที่ 25 และ 20 นิวรอน ตามลำดับ



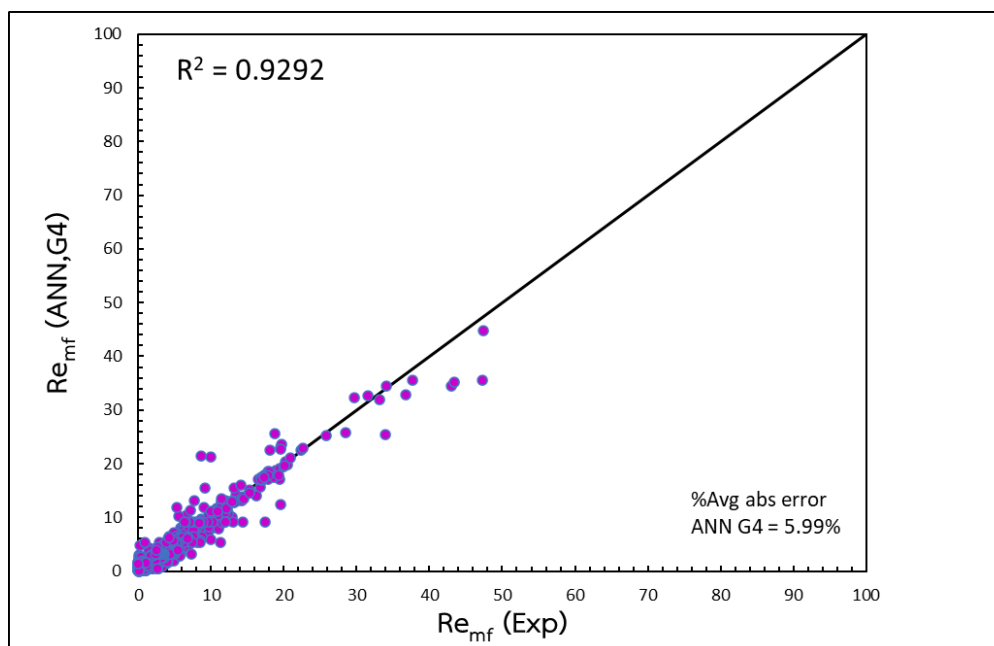
รูปที่ 4.7 ผลของจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) สำหรับการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2



รูปที่ 4.8 ผลของจำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝงที่มีต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) สำหรับการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4

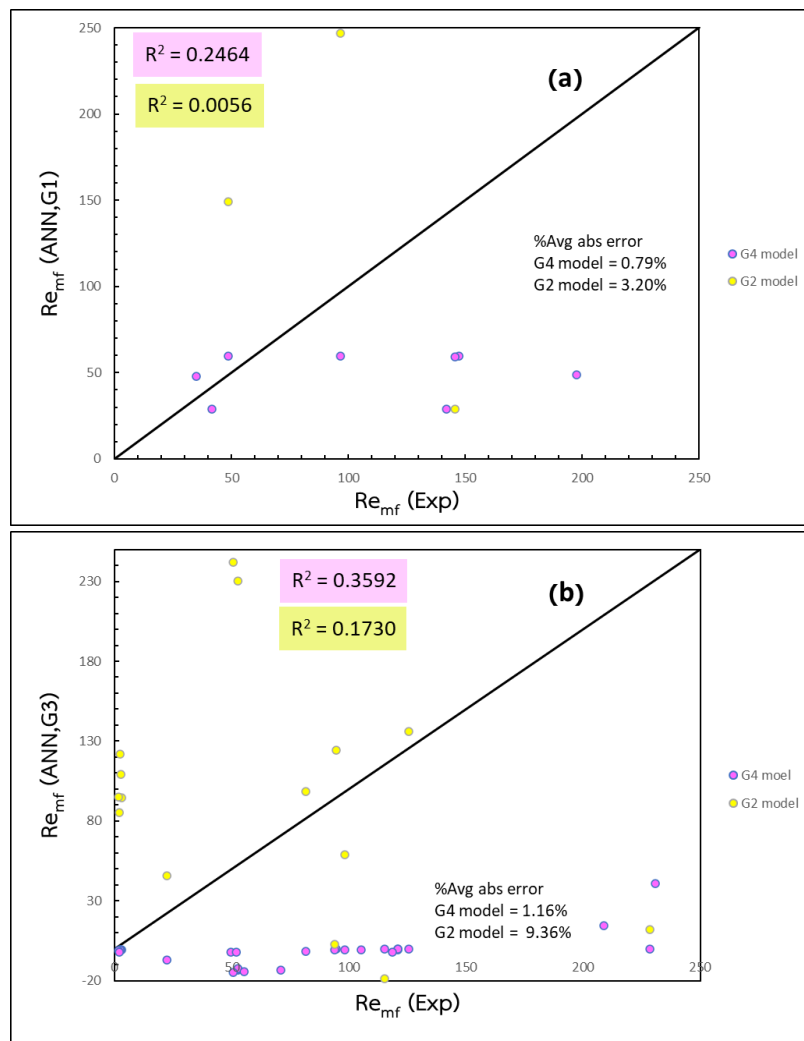


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากผลที่ได้รวบรวม และ จากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบระหว่างเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากผลที่ได้รวบรวม และ จากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4

เมื่อพิจารณาผลการใช้สหสัมพันธ์ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน นำมาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์ และผลจากข้อมูลที่ได้รวบรวมไว้ จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของกลุ่มข้อมูลที่ 2 มีค่าเท่ากับ 26.74 ซึ่งมีความมากกว่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของกลุ่มข้อมูลที่ 4 ที่มีค่าเท่ากับ 5.99 และ R^2 ของกลุ่มข้อมูลที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.7809 ซึ่งน้อยกว่ากลุ่มข้อมูลที่ 4 ที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9292 แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำและความเหมาะสมในการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มที่ 4 ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน เนื่องจากกลุ่มข้อมูล 4 มีจำนวนชุดข้อมูลมากกว่ากลุ่มข้อมูลที่ 2 และอีกสองกลุ่มที่เหลือ ซึ่งจำนวนชุดข้อมูลจะมีผลต่อการสร้างแบบจำลองในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

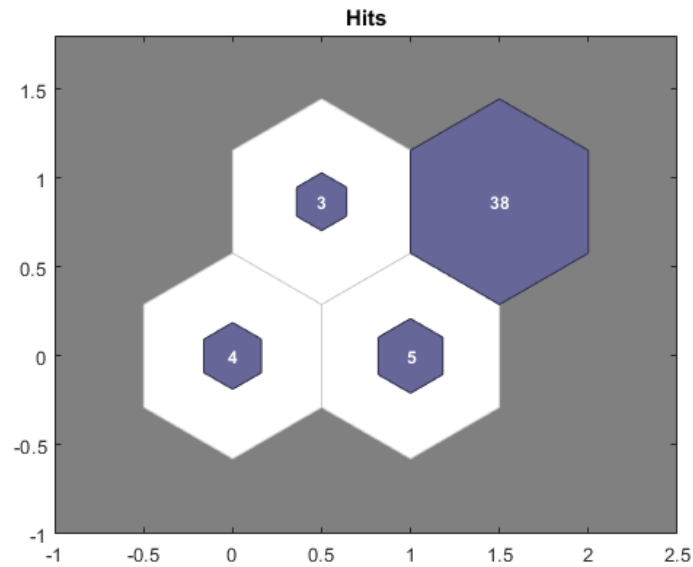


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลการทำนายของกลุ่มข้อมูลที่ 1 (a) และ 3 (b) เมื่อใช้สหสัมพันธ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2 และ 4

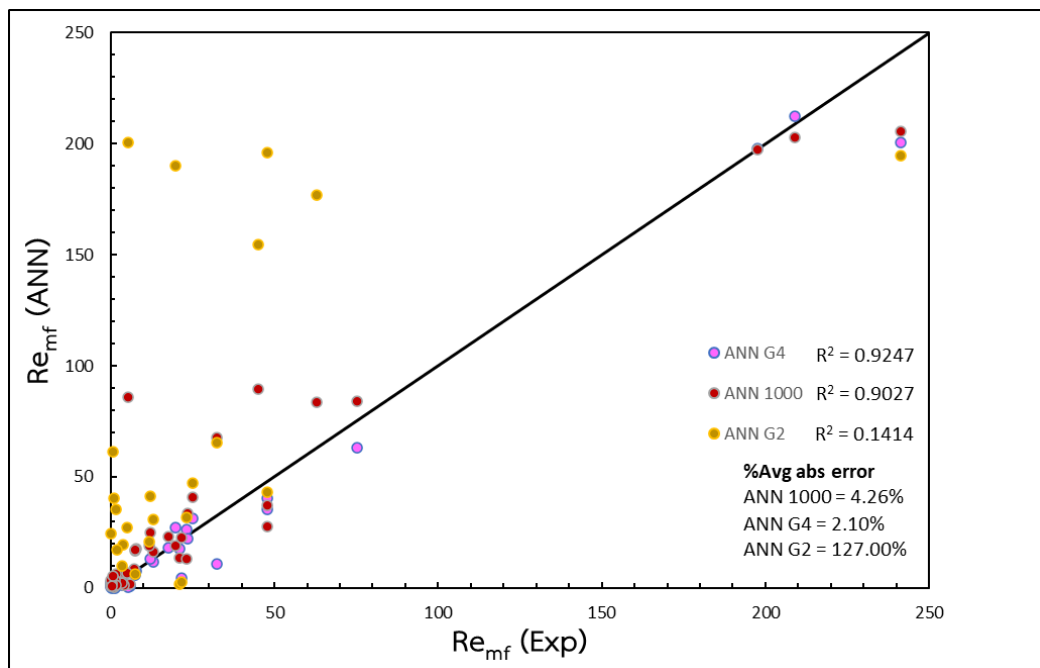
จากรูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการทำนายของข้อมูลในกลุ่มที่ 1 และ 3 จากการใช้สหสัมพันธ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2 และ 4 ของทั้งกลุ่มที่ 1 และ 3 พบว่า R^2 ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 มีค่าที่สูงกว่าจากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2 รวมถึงผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 มีค่าที่ต่ำกว่า เช่นเดียวกันทั้งสองกลุ่ม ซึ่งบ่งบอกได้ว่าข้อมูลในกลุ่มที่ 1 และ 3 มีความเหมาะสมในการใช้สหสัมพันธ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 อีกทั้งเมื่อพิจารณาที่ลักษณะของข้อมูลในแต่ละกลุ่ม พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของกลุ่มข้อมูลที่ 3 และกลุ่มข้อมูลที่ 4 มีค่าที่ใกล้เคียง ซึ่งอาจเป็นหนึ่งปัจจัยที่ทำให้กลุ่มข้อมูลที่ 3 มีความเหมาะสมในการใช้แบบจำลองของกลุ่มข้อมูลที่ 4 ในการทำนาย

นอกจากนี้ ได้ทดสอบผลการทำนายโดยใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมดก่อนทำการวิเคราะห์กลุ่มกับสหสัมพันธ์ที่ได้จากกลุ่มข้อมูลที่ 4 และ 2 กับข้อมูลสำหรับการทดสอบ 50 ชุดข้อมูล และได้ทำการวิเคราะห์ และจัดกลุ่มข้อมูลของข้อมูลสำหรับการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าข้อมูลสำหรับการทดสอบ 50 ชุดข้อมูล สามารถจัดกลุ่มได้ 4 กลุ่ม ซึ่งในแต่ละกลุ่มมีจำนวนชุดข้อมูลเท่ากับ 5 4 3 และ 38 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.13 พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่ได้จากการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมดก่อนการวิเคราะห์ และจัดกลุ่มมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.26 และจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มที่ 4 ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.10 ในขณะที่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2 มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 127 ซึ่งบ่งบอกถึงความแม่นยำในการใช้สหสัมพันธ์จากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 เพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากการวิเคราะห์ และจัดกลุ่มข้อมูลสำหรับการทดสอบซึ่งข้อมูลจะอยู่ในกลุ่มที่ 4 มากถึง 38 ชุดข้อมูลจาก 50 ชุดข้อมูล ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการใช้แบบจำลองของกลุ่มที่ 2 ในการทำนายเป็นอย่างมาก ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองของกลุ่มข้อมูลที่ 4 มีค่าต่ำที่สุด และใกล้เคียงกับการทำนายโดยใช้แบบจำลองของข้อมูลทั้งหมดก่อนทำการวิเคราะห์และจัดกลุ่ม

เมื่อพิจารณาที่ค่า R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 มีค่าเท่ากับ 0.9247 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า R^2 ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมดก่อนการวิเคราะห์ และแบ่งกลุ่มที่มีค่าเท่ากับ 0.9027 และ R^2 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2 ที่มีค่าเท่ากับ 0.1414 บ่งบอกว่าข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีความเหมาะสมกับสหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกันกับการพิจารณาจากร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย

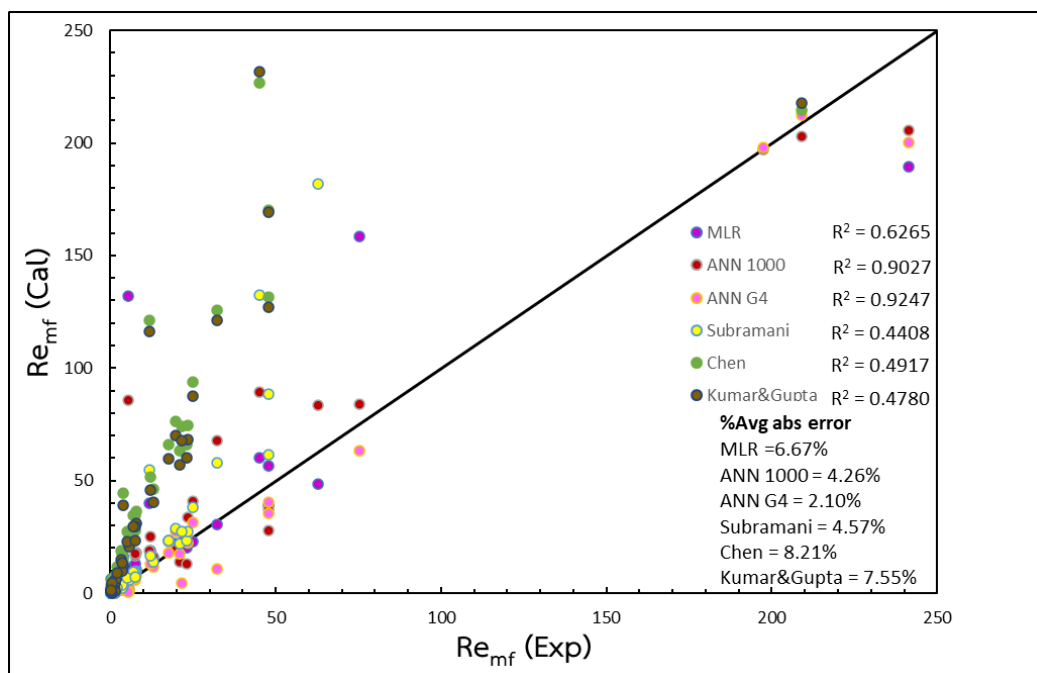


รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการวิเคราะห์แบ่งกลุ่มข้อมูล Self-Organizing Map, SOM ของข้อมูลสำหรับการทดสอบสหสัมพันธ์ 50 ชุดข้อมูล



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลการทำนายค่าเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมด และการจัดแบ่งกลุ่มของกลุ่มข้อมูลที่ 2 และ 4

เมื่อทำการพิจารณาผลการทำนายโดยใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมด และหลังการวิเคราะห์ และจัดกลุ่มเปรียบเทียบการสหสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยอื่นๆ ได้แก่ งานวิจัยของ Subramani และคณะ^[96] Chen และคณะ^[97] และ Kumar และ Gupta^[98] โดยใช้ข้อมูลสำหรับการทดสอบ 50 ชุดข้อมูล พบว่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 ที่ได้จากการวิเคราะห์และจัดกลุ่ม มีผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 2.10 รองลงมาคือแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมดก่อนการวิเคราะห์ และจัดกลุ่มอยู่ที่ร้อยละ 4.26 ในขณะที่สหสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Subramani และคณะ Chen และคณะ และ Kumar และ Gupta เมื่อนำมาทดสอบได้ผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 4.57 8.21 และ 7.55 ตามลำดับ รวมถึง R^2 ที่ได้มีค่าอยู่ในประมาณช่วง 0.44 ถึง 0.49 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งบ่งบอกได้ว่าสหสัมพันธ์จากงานวิจัยเหล่านี้มีความเหมาะสมน้อยกว่าข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากสหสัมพันธ์เหล่านี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคหรือสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมในช่วงการใช้งานเฉพาะที่ได้ระบุไว้ในแต่ละงานวิจัยนั้นๆ



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลการทำนายค่าเรย์โนลด์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ โครงข่ายประสาทเทียมก่อนและหลังการวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูล และจากงานวิจัยอื่นๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ข้อมูลทั้งหมด 1050 ชุดข้อมูล โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1000 ชุดข้อมูลสำหรับไปสร้างสหสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุและโครงข่ายประสาทเทียม และ 50 ชุดข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ และโครงข่ายประสาทเทียม

5.2 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกจากสหสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ

การสร้างสหสัมพันธ์ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก จะนำข้อมูลที่เป็นตัวแปรดำเนินการอิสระที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกมาใช้ในแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ ได้สหสัมพันธ์เป็น

$$\begin{aligned} Re_{mf} = & -33.91 + 6.56\rho_g + 0.0017\rho_g + 36862d_p + 5.41\varepsilon \\ & + 16.92D_c + 8.9\varphi + 9.74H_0 - 59842\mu_g + 0.000041Ar \end{aligned} \quad (4.1)$$

จากสหสัมพันธ์ที่ได้จะบ่งบอกถึงผลตัวแปรดำเนินการอิสระต่างๆ ซึ่งทุกพจน์ล้วนมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก โดยพจน์ที่ให้ผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ให้ค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 คือ พจน์ของตัวแปรไร้หน่วยอาร์คิมิดีส (Ar) ขนาดของอนุภาคของแข็งที่ใช้ (d_p) ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่ใช้ (ρ_p) ความหนาแน่นของแก๊สที่ใช้ (ρ_g) ค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคของแข็งที่ใช้ (φ) และ ความสูงเริ่มต้นของอนุภาคของแข็งในคอลัมน์ฟลูอิดไฮดรอลิก (H_0) เมื่อนำสหสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกโดยใช้ผลจากข้อมูลที่ได้รวบรวม พบว่า ผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 46.87 และเมื่อนำสหสัมพันธ์นี้ไปใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกโดยใช้ข้อมูลสำหรับทดสอบสหสัมพันธ์ พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 6.67

5.3 การทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากสหสัมพันธ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จะใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยการกำหนดข้อมูลขาเข้า ได้แก่ $\rho_p, d_p, \varphi, \varepsilon, D_c, H_0, \rho_g, \mu_g$ และ Ar และข้อมูลเป้าหมาย คือ Re_{mf} โดยใช้จำนวนนิวรอนในชั้นแอบแฝง 27 นิวรอน ซึ่งเป็นจำนวนนิวรอนเริ่มต้นที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าคงที่และยอมรับได้ เมื่อนำสหสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันโดยใช้ผลจากข้อมูลที่ได้รวบรวม พบว่า ได้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย เท่ากับ 8.16

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลสำหรับทดสอบสหสัมพันธ์ พบว่า ผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 4.26 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้สหสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้ และสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการอิสระต่าง ๆ และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันที่มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็น เชิงเส้นได้ดี ทำให้การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างแบบจำลองในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีความเหมาะสม และค่า R^2 ที่ได้จากการใช้สหสัมพันธ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เท่ากับ 0.9027 ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุที่มี R^2 เท่ากับ 0.6265

5.4 การวิเคราะห์กลุ่มข้อมูล (Clustering Analysis)

จากการวิเคราะห์และแบ่งกลุ่มข้อมูล (Clustering) ของข้อมูลที่ได้จากการรวบรวม 1000 ชุดข้อมูล โดยการใช้เครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และจัดกลุ่มข้อมูลโดยไม่มีการฝึกสอน (Self-Organizing Map, SOM) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มข้อมูล ซึ่งมีจำนวนชุดข้อมูลเท่ากับ 9 156 28 และ 807 ชุดข้อมูล ตามลำดับ

เมื่อนำกลุ่มข้อมูลที่ 4 และกลุ่มข้อมูลที่ 2 มาสร้างสหสัมพันธ์จากโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน โดยใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Toolbox) ของโปรแกรม MATLAB ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยการกำหนดข้อมูลขาเข้า ได้แก่ $\rho_p, d_p, \varphi, \varepsilon, D_c, H_0, \rho_g, \mu_g$ และ Ar และข้อมูลเป้าหมาย คือ Re_{mf} พบว่า การใช้สหสัมพันธ์ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9292 ซึ่งมีค่าที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 2 ที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.7969 แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำ และความเหมาะสมในการใช้สหสัมพันธ์ที่ได้จากการโครงข่าย

ประสาทเทียมของกลุ่มที่ 4 ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก และ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิกโดยใช้สหสัมพันธ์จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลกลุ่มข้อมูลที่ 4 และ สหสัมพันธ์จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมด พบว่า สหสัมพันธ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของกลุ่มข้อมูลที่ 4 ที่ได้หลังจากการวิเคราะห์และจัดกลุ่มมีความถูกต้อง และแม่นยำในการทำนาย จาก R^2 ที่มีค่าเท่ากับ 0.9247 และจากผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 2.10 ซึ่งน้อยกว่าการใช้สหสัมพันธ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของข้อมูลทั้งหมดก่อนการวิเคราะห์และจัดกลุ่ม อีกทั้งยังมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สหสัมพันธ์จากงานวิจัยอื่นๆ ที่มีผลร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ร้อยละ 4 ถึง 8 ซึ่งเป็นผลมาจากการไม่คำนึงถึงผลของค่าความเป็นทรงกลมที่มีต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก

5.5 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรทำการศึกษา และรวบรวมจำนวนชุดข้อมูลให้มีจำนวนมากขึ้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮดรอลิก
- 2) การฝึกสอนข้อมูลในการสร้างแบบจำลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม การวิเคราะห์การถดถอยควรมีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมากกว่า 0.9 ในทุกกระบวนการ

ภาคผนวก

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลตัวแปรตามและตัวแปรดำเนินการอิสระที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

Order	Reference	Particle	U_{mf} (m/s)	ρ_f (kg/m ³)	ρ_p (kg/m ³)	d_p (μ m)	ε (-)	D_c (m)	φ (-)	H_0 (m)	μ (Pa.s) ($\times 10^{-5}$)	Ar (-)	Re_{mf} (-)	
1	Fu, Z., et al. [31]	Magnetite	0.0950	1.18	4600	232	0.43	0.15	1.00	0.15	1.85	2266	1.60	
2		Sand	0.0490	1.18	2650	224	0.40	0.15	1.00	0.15	1.85	1175	0.80	
3		Sand	0.1240	1.18	2650	368	0.40	0.15	1.00	0.15	1.85	5208	3.30	
4		Sand	0.2020	1.18	2650	485	0.40	0.15	1.00	0.15	1.85	11923	7.10	
5		Sand	0.3350	1.18	2650	636	0.40	0.15	1.00	0.15	1.85	26885	15.40	
6		Sand	0.3970	1.18	2650	807	0.40	0.15	1.00	0.15	1.85	54924	23.10	
7		Gangue	0.0400	1.18	2100	215	0.40	0.15	1.00	0.15	0.15	1.85	823	0.60
8		Gangue	0.1090	1.18	2100	372	0.40	0.15	1.00	0.15	0.15	1.85	4263	2.90
9		Gangue	0.1870	1.18	2100	486	0.40	0.15	1.00	0.15	0.15	1.85	9505	6.50
10		Gangue	0.2460	1.18	2100	625	0.40	0.15	1.00	0.15	0.15	1.85	20216	11.10
11		Gangue	0.3410	1.18	2100	808	0.40	0.15	1.00	0.15	0.15	1.85	43681	19.90
12		Coal	0.0800	1.18	1300	396	0.33	0.15	1.00	0.15	0.15	1.85	3182	2.30
13		Coal	0.1350	1.18	1300	460	0.33	0.15	1.00	0.15	0.15	1.85	4988	4.50
14		Coal	0.1780	1.18	1300	617	0.33	0.15	1.00	0.15	0.15	1.85	12036	7.90
15	Formisani, B., et al. [28]	Ceramic spheres	0.4400	1.18	3760	701	0.47	0.10	1.00	0.17	1.85	51086	22.23	
16	Asif, M. [6]	Sand	0.0360	1.18	2664	550	0.50	0.06	1.00	0.50	1.85	17479	1.43	

17		Plastic particles	0.2650	1.18	1761	2550	0.52	0.06	0.87	0.50	1.85	1151254	48.70	
18		Plastic particles	0.3080	1.18	2480	593	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	17569	11.70	
19		Plastic particles	0.2020	1.18	2480	499	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	10468	6.46	
20		Plastic particles	0.1790	1.18	2480	428	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	6606	4.91	
21		Plastic particles	0.0570	1.18	2480	271	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	1677	0.99	
22		Plastic particles	0.0430	1.18	2480	223	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	934	0.61	
23		Plastic particles	0.0280	1.18	2480	172	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	429	0.31	
24		Plastic particles	0.0220	1.18	2480	154	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	308	0.22	
25		Ceramic spheres	0.4330	1.18	3760	605	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	28291	16.78	
26		Steel shots	0.1730	1.18	7600	243	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	3706	2.69	
27		Steel shots	0.4770	1.18	7600	439	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	21851	13.41	
28		Paudel, B. ^[59]	Walnut shell	0.5530	1.18	1200	856	0.48	0.15	1.00	0.15	1.85	29665	34.11
29			Sand	0.0740	1.18	2630	241	0.41	0.15	1.00	0.15	1.85	1448	1.28
30	Glass bead		0.1806	1.18	2500	383	0.44	0.15	1.00	0.15	1.85	4772	4.43	
31	Alumina		0.6538	1.18	3940	490	0.52	0.15	1.00	0.15	1.85	15750	20.52	
32	walnut (fine)		0.0045	1.18	1200	100	0.40	0.15	1.00	0.15	1.85	41	0.03	
33	corn cob		0.6080	1.18	1080	1040	0.48	0.15	1.00	0.15	1.85	41246	40.51	
34	Rezaei, H. ^[60]	ground chip	0.0850	1.20	1330	750	0.85	0.12	0.44	0.25	1.83	19880	4.21	
35		ground pellet	0.1520	1.20	1430	1310	0.63	0.12	0.73	0.25	1.83	113908	13.14	
36	Felipe, C. ^[26]	Sand I	0.0400	1.18	2480	193	1.00	0.11	1.00	0.22	1.85	606	0.49	

37		Sand II	0.1450	1.18	2480	373	1.00	0.11	1.00	0.22	1.85	4372	3.46
38		Sand III	0.4800	1.18	2480	727	1.00	0.11	1.00	0.22	1.85	32373	22.35
39		MCC I	0.0105	1.18	980	90	0.69	0.11	1.00	0.22	1.85	24	0.06
40		MCC II	0.0160	1.18	980	160	0.69	0.11	1.00	0.22	1.85	136	0.16
41		MCC III	0.0600	1.18	980	329	0.69	0.11	1.00	0.22	1.85	1185	1.26
42		Alumina	0.0070	1.18	2720	106	0.76	0.11	1.00	0.22	1.85	110	0.05
43		Fresh FCC	0.0038	1.18	1380	92	0.43	0.11	1.00	0.22	1.85	36	0.02
44		Spent FCC I	0.0035	1.18	1420	76	0.39	0.11	1.00	0.22	1.85	21	0.02
45	Bizhaem, H.K. ^[10]	Silicon dioxide	0.0170	1.18	2550	196	1.00	0.11	1.00	0.15	1.85	709	0.24
46		Silicon dioxide	0.0157	1.18	3860	95	1.00	0.11	1.00	0.15	1.85	122	0.11
47		Silicon dioxide	0.0210	1.18	2550	196	1.00	0.11	1.00	0.15	1.85	790	0.30
48		Aluminium oxide	0.0190	1.18	3860	95	0.67	0.11	1.00	0.15	1.85	122	0.13
49	Ali, S.S. ^[3]	Silicon dioxide	0.1183	1.18	2200	16.4	1.00	0.07	1.00	0.34	1.85	0.33	0.14
50	Cui, Y., et al. ^[16]	SiC	0.3300	1.18	3230	625	0.50	0.03	0.67	0.04	1.85	26781	13.21
51		SiC	0.8300	1.18	3230	1250	0.50	0.03	0.67	0.04	1.85	214250	66.44
52		SiC	0.9400	1.18	3230	1750	0.50	0.03	0.67	0.04	1.85	587901	105.34
53		SiC	0.2300	1.18	3230	625	0.50	0.03	0.67	0.04	1.85	26781	9.20
54		SiC	0.4700	1.18	3230	625	0.50	0.03	0.67	0.04	1.85	26781	18.81
55		SiC	0.7100	1.18	3230	625	0.50	0.03	0.67	0.04	1.85	26781	28.42
56		SiC	0.9400	1.18	3230	625	0.50	0.03	0.67	0.04	1.85	26781	37.62

57		SiC	1.1800	1.18	3230	625	0.50	0.03	0.67	0.04	1.85	26781	47.23
58	Zhong, W., et	Sand	0.5580	1.18	2700	1000	0.40	0.57	0.80	0.50	1.85	91690	35.73
59	al. ^[88]	Sand	0.3180	1.18	2700	500	0.40	0.57	0.80	0.50	1.85	11461	10.18
60	Zhou, C., et al. ^[87]	Magnetite powder	0.1230	1.21	4600	232	0.45	0.12	0.90	0.10	1.79	2119	1.92
61		Magnetite powder	0.1120	1.21	4600	232	0.45	0.12	0.90	0.10	1.79	2119	1.75
62		Magnetite powder	0.1080	1.21	4600	232	0.45	0.12	0.90	0.10	1.79	2119	1.69
63		Magnetite powder	0.1020	1.21	4600	232	0.45	0.12	0.90	0.10	1.79	2119	1.59
64		Magnetite powder	0.0350	1.21	4590	110	0.48	0.12	0.90	0.10	1.79	225	0.26
65		Magnetite powder	0.0310	1.21	4590	110	0.48	0.12	0.90	0.10	1.79	225	0.23
66		Magnetite powder+ Quat sand	0.0550	1.21	3514	158	0.47	0.12	0.90	0.10	1.79	511	0.58
67	Magnetite powder+ Quat sand	0.0490	1.21	3514	158	0.47	0.12	0.90	0.10	1.79	511	0.52	

68		Magnetite powder+ Quat sand	0.0410	1.21	3514	158	0.47	0.12	0.90	0.10	1.79	511	0.44
69		Magnetite powder+ Fine coal powder	0.0400	1.21	3758	136	0.46	0.12	0.90	0.10	1.79	349	0.37
70		Magnetite powder+ Fine coal powder	0.0360	1.21	3758	136	0.46	0.12	0.90	0.10	1.79	349	0.33
71		Magnetite powder+ Fine coal powder	0.0300	1.21	3758	136	0.46	0.12	0.90	0.10	1.79	349	0.27
72	Chauhan, V., et al. ^[12]	Coal ash	0.3300	1.20	2400	540	0.50	0.01	0.63	0.30	1.80	13724	11.88
73		Coal ash	0.3300	1.20	2400	540	0.50	0.01	0.63	0.30	1.80	13724	11.88
74		Coal ash	0.3300	1.20	2400	540	0.50	0.01	0.63	0.40	1.80	13724	11.88
75		Coal ash	0.4300	1.20	2400	870	0.48	0.01	0.63	0.20	1.80	57393	24.94
76		Coal ash	0.4300	1.20	2400	870	0.48	0.01	0.63	0.40	1.80	57393	24.94
77		Coal ash	0.5500	1.20	2400	1430	0.45	0.01	0.63	0.20	1.80	254863	52.43
78		Coal ash	0.5500	1.20	2400	1430	0.45	0.01	0.63	0.30	1.80	254863	52.43
79		Coal ash	0.5500	1.20	2400	1430	0.45	0.01	0.63	0.40	1.80	254863	52.43
80		Sand	0.0790	1.18	2650	293	0.42	0.10	0.86	0.50	1.85	2264	1.48

81	Fanelli, E. ^[24]	Copper powder	0.0967	0.99	8930	137	0.38	0.20	0.90	0.24	1.89	624	0.69
82	Deza, M., ^[19]	Glass bead	0.1990	1.18	2600	550	0.37	0.10	0.90	0.10	1.85	14753	7.02
83	Agu, C.E., et al. ^[1]	Limestone	0.1380	1.18	2837	293	0.51	0.10	0.84	0.64	1.85	2423	2.59
84		Glass	0.0815	1.18	2500	261	0.62	0.10	0.96	0.64	1.85	1509	1.36
85		Glass	0.0380	1.18	2500	188	0.63	0.10	0.96	0.64	1.85	564	0.46
86		Limestone	0.3924	1.18	2837	697	0.50	0.10	0.84	0.64	1.85	32623	17.51
87		Glass	0.2320	1.18	2500	624	0.60	0.10	0.96	0.64	1.85	20627	9.27
88		Sand	0.1650	1.18	2650	483	0.45	0.10	0.86	0.64	1.85	10140	5.10
89	Cluet, B., et al. ^[15]	Coarse Olivine	0.1370	1.18	3250	378	0.55	0.24	0.82	0.27	1.85	5961	3.32
90		Fine Olivine	0.0820	1.18	3250	237	0.55	0.24	0.78	0.27	1.85	1469	1.24
91	Petiraksakul A.	Milk	0.0800	1.13	1076	590	0.73	0.20	0.53	0.03	1.89	6816	3.73
92	Siripan M. ^[95]	Siliga gel	0.8600	1.01	680	3500	0.60	0.07	1.00	0.13	2.07	673017	147.12
93	in, H., J.	Resin	0.1900	1.18	1474	940	0.42	0.15	1.00	0.40	1.85	41560	11.44
94	Zhang, and B. Zhang, ^[39]	Glass beads	0.7200	1.18	2660	720	0.41	0.15	1.00	0.40	1.85	33716	33.20
95		Sand	0.1200	1.18	2560	300	0.51	0.15	0.71	0.40	1.85	2347	2.31
96	JOHARI, A. and M.R.	Sand [sieve no.10/20]	0.4200	1.18	2440	870	0.40	0.21	0.87	0.21	1.85	54561	23.40
97	TAIB ^[40]	Sand [sieve no.20/30]	0.2800	1.18	2430	670	0.40	0.21	0.90	0.21	1.85	24818	12.01

98		Sand [sieve no.30/60]	0.0900	1.18	2330	340	0.43	0.21	0.84	0.21	1.85	3110	1.96
99		Sand [sieve no.10/20]	0.4200	1.18	2440	870	0.40	0.21	0.87	0.17	1.85	54561	23.40
100		Sand [sieve no.20/30]	0.2800	1.18	2430	670	0.40	0.21	0.90	0.17	1.85	24818	12.01
101		Sand [sieve no.30/60]	0.0900	1.18	2330	340	0.43	0.21	0.84	0.17	1.85	3110	1.96
102		Sand [sieve no.10/20]	0.4200	1.18	2440	870	0.40	0.30	0.87	0.12	1.85	54561	23.40
103		Alumina fluorida	0.0023	1.19	3310	40.5	0.71	0.20	0.37	0.25	1.86	7	0.01
104	Vasconcelos, P.D.S. and	Alumina fluorida	0.0070	1.19	3336	59	0.72	0.20	0.36	0.25	1.86	23	0.03
105	A.L.A. Mesquita ^[18]	Alumina fluorida	0.0087	1.19	3387	72.6	0.72	0.20	0.37	0.25	1.86	44	0.04
106		Alumina fluorida	0.0157	1.19	3381	111.5	0.71	0.20	0.37	0.25	1.86	158	0.11
107	Son, S., et	Fe-catalyst	0.0140	0.40	2883	114.3	0.45	0.05	0.90	0.10	3.85	12	0.02
108	al. ^[73]	Al ₂ O ₃	0.0170	0.40	3980	63	0.60	0.05	0.90	0.10	3.85	3	0.01
109		Alumina	0.0450	1.18	2398	70	0.50	0.05	0.83	0.01	1.85	29	0.20

110	Tang, Z., et	Alumina	0.0490	1.18	2398	101	0.50	0.05	0.81	0.01	1.85	84	0.32
111	al. ^[76]	Alumina	0.0570	1.18	2398	146	0.48	0.05	0.48	0.01	1.85	257	0.54
112	Timsina, R. ^[77]	Sand	0.0930	1.23	2650	293	0.50	0.08	1.00	0.22	1.80	2471	1.85
113	Xu, C. and J. Zhu ^[80]	FCC catalyst	0.0035	1.20	1540	65	0.46	0.10	1.00	0.10	1.80	15	0.02
114		Glass beads	0.0030	1.20	2500	39	0.49	0.10	1.00	0.10	1.80	5	0.01
115		Glass beads	0.0430	1.20	2500	216	0.40	0.10	1.00	0.10	1.80	915	0.62
116	Xu, C.C. and J. Zhu ^[81]	Carborundum	0.0103	1.20	3180	82	0.47	0.10	0.92	0.10	1.80	64	0.06
117		Carborundum	0.0135	1.20	3180	94	0.47	0.10	0.95	0.10	1.80	96	0.08
118		Carborundum	0.0134	1.20	3180	95	0.47	0.10	0.94	0.10	1.80	99	0.08
119		Carborundum	0.0144	1.20	3180	117	0.50	0.10	0.89	0.10	1.80	185	0.11
120		Carborundum	0.0278	1.20	3180	162	0.49	0.10	0.90	0.10	1.80	491	0.30
121		Carborundum	0.0436	1.20	3180	192	0.48	0.10	0.99	0.10	1.80	817	0.56
122		Carborundum	0.0565	5.00	3180	225	0.48	0.10	1.00	0.10	1.80	5475	3.53
123		Iron Oxide	0.0182	1.20	5180	92	0.49	0.10	0.88	0.10	1.80	147	0.11
124		Glass beads	0.0637	1.20	2492	286	0.35	0.10	1.00	0.10	1.80	2117	1.21
125		Glass beads	0.1031	1.20	2492	396	0.33	0.10	1.00	0.10	1.80	5620	2.72
126		Sea Sand	0.1580	1.20	2639	518	0.36	0.10	1.00	0.10	1.80	13321	5.46
127		Sea Sand	0.1716	1.20	2639	549	0.35	0.10	1.00	0.10	1.80	15859	6.28
128	Socony beads	0.2357	1.20	1603	1006	0.33	0.10	1.00	0.10	1.80	59253	15.81	
129	Liao, L. ^[49]	Glass	0.0043	1.18	2500	256	0.44	0.04	1.00	0.10	1.85	1423	0.07
130		Polystyrene	0.0238	1.18	1050	300	0.04	0.04	1.00	0.10	1.85	961	0.46

131		Polystyrene	0.0888	1.18	1050	500	0.43	0.04	1.00	0.10	1.85	4449	2.84
132		Ovaline	0.0700	1.18	3400	256	0.55	0.04	0.76	0.10	1.85	1935	1.15
133		Sand	0.0444	1.18	2600	256	0.53	0.04	0.75	0.10	1.85	1480	0.73
134		Aluminum Oxide	0.0943	1.18	3900	256	0.53	0.04	0.74	0.10	1.85	2220	1.55
135		Glass	0.0536	1.18	2700	256	0.54	0.04	0.72	0.10	1.85	1537	0.88
136		Glass	0.2240	1.18	2100	300	0.54	0.04	0.72	0.10	1.85	1923	4.30
137		Polycarbonate	0.0841	1.18	1200	500	0.45	0.04	0.87	0.10	1.85	5086	2.69
138		Polyamid	0.0943	1.18	1100	380	0.50	0.04	0.87	0.10	1.85	2046	2.29
139		Polyamid	0.0891	1.18	1100	500	0.44	0.04	0.87	0.10	1.85	4661	2.85
140		Gupta, S., et al., ^[36]	Iron ore tailings	0.0834	1.18	2551	24.2	0.56	0.15	0.67	0.25	1.85	1
141	Zinc slime		0.0678	1.18	2748	18.2	0.57	0.15	0.59	0.25	1.85	1	0.08
142	Uranium		0.0783	1.18	2830	18.6	0.59	0.15	0.54	0.25	1.85	1	0.09
143	Uranium		0.0573	1.18	2677	16.7	0.56	0.15	0.47	0.25	1.85	0.42	0.06
144	Fly ash		0.0251	1.18	1622	108	0.52	0.15	0.83	0.25	1.85	69	0.17
145	Liu, H., et al.	SiO ₂	0.0340	1.20	2650	5.18	0.97	0.05	0.80	0.23	1.83	0.01	0.01
146	Ogata, K. ^[55]	Glass beads B	0.0127	1.18	2623	127	0.40	0.24	1.00	0.60	1.85	182	0.10
147		Glass beads A	0.0043	1.18	2523	53	0.40	0.24	1.00	0.60	1.85	13	0.01
148	Zhao, Y. ^[85]	Magnetite powder	0.0810	1.18	4600	350	0.45	0.11	1.00	0.12	1.85	6699	1.82

149		Magnetite powder	0.0760	1.18	4600	262.5	0.45	0.11	1.00	0.12	1.85	2826	1.28
150		Magnetite powder	0.0380	1.18	4600	112	0.45	0.11	1.00	0.12	1.85	220	0.27
151	Alsmari, T.A. ^[4]	Fine glass beads	0.0030	1.20	2700	38	0.40	0.15	1.00	0.54	1.83	5	0.01
152		Large glass bead	0.2200	1.20	2500	560	0.40	0.15	1.00	0.54	1.83	15562	8.13
153	Fotovat, F., et al. ^[30]	Fine sand	0.0500	1.18	2650	220	0.47	0.15	0.86	0.23	1.85	958	0.70
154		FCC	0.0040	1.18	1690	80	0.45	0.15	1.00	0.23	1.85	29	0.02
155		Sand	0.2200	1.18	2650	380	0.43	0.15	0.92	0.23	1.85	4938	5.35
156		Sand-Biomass	0.2400	1.18	2517	390	0.42	0.15	0.92	0.23	1.85	5070	5.99
157		Sand-Biomass	0.3500	1.18	2250	390	0.40	0.15	0.92	0.23	1.85	4532	8.74
158		Sand-Biomass	0.4400	1.18	1937	390	0.37	0.15	0.92	0.23	1.85	3901	10.99
159	Pérez, N.P., et al. ^[60]	Sugarcane bagasse+Sand	0.3100	1.18	2396	250	0.64	0.19	0.53	0.20	1.85	1271	4.96
160		Sugarcane bagasse+Sand	0.2000	1.18	2372	250	0.63	0.19	0.53	0.20	1.85	1259	3.20
161		Sugarcane bagasse+Sand	0.1800	1.18	2376	250	0.63	0.19	0.55	0.20	1.85	1261	2.88

162	Sugarcane bagasse+Sand	0.1700	1.18	2378	240	0.63	0.19	0.53	0.20	1.85	1116	2.61
163	Sugarcane bagasse+Sand	0.4200	1.18	2123	270	0.63	0.19	0.53	0.20	1.85	1419	7.26
164	Sugarcane bagasse+Sand	0.1600	1.18	2387	240	0.63	0.19	0.54	0.20	1.85	1121	2.46
165	Sugarcane bagasse+Sand	0.1700	1.18	2141	260	0.63	0.19	0.54	0.20	1.85	1278	2.83
166	Sugarcane bagasse+Sand	0.1800	1.18	2070	270	0.63	0.19	0.54	0.20	1.85	1383	3.11
167	Sugarcane bagasse+Sand	0.4000	1.18	2003	270	0.63	0.19	0.54	0.20	1.85	1339	6.92
168	Sugarcane bagasse+Sand	0.7200	1.18	1941	280	0.63	0.19	0.54	0.20	1.85	1447	12.91
169	Sugarcane bagasse+Sand	0.1700	1.18	2379	240	0.63	0.19	0.59	0.20	1.85	1117	2.61
170	Sugarcane bagasse+Sand	0.3200	1.18	2124	270	0.63	0.19	0.59	0.20	1.85	1420	5.53
171	Sugarcane bagasse+Sand	0.1600	1.18	2395	230	0.62	0.19	0.56	0.20	1.85	990	2.36

172	Sugarcane bagasse+Sand	0.1700	1.18	2157	240	0.62	0.19	0.56	0.20	1.85	1012	2.61
173	Sugarcane bagasse+Sand	0.1900	1.18	1962	240	0.62	0.19	0.56	0.20	1.85	921	2.92
174	Sugarcane bagasse+Sand	0.2000	1.18	1850	250	0.62	0.19	0.56	0.20	1.85	981	3.20
175	Sugarcane bagasse+Sand	0.2500	1.18	1751	250	0.62	0.19	0.56	0.20	1.85	929	4.00
176	Sugarcane bagasse+Sand	0.0600	1.18	2411	220	0.61	0.19	0.56	0.20	1.85	872	0.85
177	Sugarcane bagasse+Sand	0.0700	1.18	2189	200	0.61	0.19	0.56	0.20	1.85	595	0.90
178	Sugarcane bagasse+Sand	0.0700	1.18	1898	190	0.61	0.19	0.56	0.20	1.85	442	0.85
179	Sugarcane bagasse+Sand	0.0600	1.18	1676	180	0.61	0.19	0.56	0.20	1.85	332	0.69
180	Sugarcane bagasse+Sand	0.0300	1.18	2426	190	0.59	0.19	0.67	0.20	1.85	565	0.36
181	Sugarcane bagasse+Sand	0.0350	1.18	2221	160	0.59	0.19	0.67	0.20	1.85	309	0.36

182		Sugarcane bagasse+Sand	0.0300	1.18	1997	140	0.59	0.19	0.67	0.20	1.85	186	0.27
183	Girimonte, R., V. Vivacqua, and B. Formisani ^[34]	Glass beads	0.0090	1.18	2480	100	0.41	0.10	1.00	0.20	1.85	84	0.06
184		Glass beads	0.0180	1.18	2480	136	0.41	0.10	1.00	0.20	1.85	212	0.16
185		Glass beads	0.0230	1.18	2480	171	0.41	0.10	1.00	0.20	1.85	421	0.25
186		Glass beads	0.0520	1.18	2480	228	0.40	0.10	1.00	0.20	1.85	998	0.76
187		Glass beads	0.0680	1.18	2480	271	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	1676	1.18
188		Glass beads	0.0860	1.18	2480	327	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	2945	1.80
189		Glass beads	0.1230	1.18	2480	361	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	3962	2.84
190		Glass beads	0.0820	1.18	2480	319	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	2734	1.68
191		Glass beads	0.1710	1.18	2480	460	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	8197	5.04
192		Glass beads	0.2530	1.18	2480	588	0.38	0.10	1.00	0.20	1.85	17121	9.53
193		Ceramic	0.1030	1.18	3780	268	0.40	0.10	1.00	0.20	1.85	2471	1.77
194		Zirconium oxide	0.1240	1.18	6150	245	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	3072	1.95
195		Zirconium oxide	0.1400	1.18	6150	261	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	3714	2.34
196	Steel	0.1270	1.18	7520	204	0.40	0.10	1.00	0.20	1.85	2169	1.66	
197	Steel	0.1770	1.18	7520	261	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	4542	2.96	
198	Lead spheres	0.1630	1.18	8750	229	0.40	0.10	1.00	0.20	1.85	3569	2.39	
199	Lead spheres	0.2160	1.18	8750	272	0.39	0.10	1.00	0.20	1.85	5981	3.76	

200	Maurer, S., et	Alumina	0.0300	1.18	1538	289	0.47	0.15	0.80	0.49	1.85	1260	0.56
201	al. ^[52]	Dolomite	0.0440	1.18	2500	295	0.37	0.15	0.70	0.49	1.85	2179	0.83
202	Lee, J.-R., et al., ^[47]	NiO	0.2400	0.50	8200	2.25	0.90	0.05	1.00	0.25	3.19	0.0005	0.01
203		NiO	0.0700	0.50	8200	2.25	0.90	0.05	1.00	0.25	3.19	0.0005	0.00
204		NiO	0.1500	0.34	8200	2.25	0.90	0.05	1.00	0.25	4.08	0.0002	0.00
205		NiO	0.0300	0.34	8200	2.25	0.90	0.05	1.00	0.25	4.08	0.0002	0.00
206	Rasteh, M., F. Farhadi, and G. Ahmadi ^[63]	TiO ₂	0.1470	1.18	4500	165	0.44	0.07	0.78	0.05	1.85	687	1.55
207		TiO ₂	0.2240	1.18	4500	276	0.44	0.07	0.78	0.05	1.85	3213	3.96
208		TiO ₂	0.2840	1.18	4500	360	0.44	0.07	0.78	0.05	1.85	7131	6.55
209		TiO ₂	0.2620	1.18	4500	276	0.44	0.07	0.78	0.06	1.85	3213	4.63
210		TiO ₂	0.3310	1.18	4500	360	0.44	0.07	0.78	0.06	1.85	7131	7.63
211		TiO ₂	0.4150	1.18	4500	465	0.44	0.07	0.78	0.06	1.85	15368	12.36
212		TiO ₂	0.2250	1.18	4500	165	0.44	0.12	0.78	0.08	1.85	687	2.38
213		TiO ₂	0.4340	1.18	4500	360	0.44	0.12	0.78	0.08	1.85	7131	10.00
214		TiO ₂	0.5440	1.18	4500	465	0.44	0.12	0.78	0.08	1.85	15368	16.20
215		TiO ₂	0.2700	1.18	4500	165	0.44	0.15	0.78	0.10	1.85	687	2.85
216		TiO ₂	0.4130	1.18	4500	276	0.44	0.15	0.78	0.10	1.85	3213	7.30
217		TiO ₂	0.6530	1.18	4500	465	0.44	0.15	0.78	0.10	1.85	15368	19.44
218		NaCl	0.1550	1.18	2165	390	0.42	0.07	0.81	0.05	1.85	4361	3.87
219		NaCl	0.1970	1.18	2165	509	0.42	0.07	0.81	0.05	1.85	9694	6.42
220	NaCl	0.1390	1.18	2165	305	0.42	0.07	0.81	0.06	1.85	2086	2.71	

221		NaCl	0.1690	1.18	2165	390	0.42	0.07	0.81	0.06	1.85	4361	4.22
222		NaCl	0.2210	1.18	2165	509	0.42	0.07	0.81	0.06	1.85	9694	7.20
223		NaCl	0.1080	1.18	2165	193	0.42	0.12	0.81	0.08	1.85	528	1.33
224		NaCl	0.1980	1.18	2165	390	0.42	0.12	0.81	0.08	1.85	4361	4.94
225		NaCl	0.2500	1.18	2165	509	0.42	0.12	0.81	0.08	1.85	9694	8.15
226		NaCl	0.1440	1.18	2165	193	0.42	0.15	0.81	0.10	1.85	528	1.78
227		NaCl	0.2110	1.18	2165	305	0.42	0.15	0.81	0.10	1.85	2086	4.12
228		NaCl	0.2630	1.18	2165	390	0.42	0.15	0.81	0.10	1.85	4361	6.57
229		Dolomite	0.0800	1.18	2760	230	0.35	0.07	0.74	0.05	1.85	1140	1.18
230		Dolomite	0.1150	1.18	2760	330	0.35	0.07	0.74	0.05	1.85	3368	2.43
231		Dolomite	0.1510	1.18	2760	428	0.35	0.07	0.74	0.05	1.85	7349	4.14
232		Dolomite	0.1450	1.18	2760	330	0.35	0.07	0.74	0.06	1.85	3368	3.06
233		Dolomite	0.1900	1.18	2760	428	0.35	0.07	0.74	0.06	1.85	7349	5.21
234		Dolomite	0.2490	1.18	2760	553	0.35	0.07	0.74	0.06	1.85	15851	8.82
235		Dolomite	0.1150	1.18	2760	230	0.35	0.07	0.74	0.08	1.85	1140	1.69
236		Dolomite	0.2120	1.18	2760	428	0.35	0.07	0.74	0.08	1.85	7349	5.81
237		Dolomite	0.2740	1.18	2760	553	0.35	0.07	0.74	0.08	1.85	15851	9.70
238		Dolomite	0.1230	1.18	2760	230	0.35	0.12	0.74	0.10	1.85	1140	1.81
239		Dolomite	0.1750	1.18	2760	330	0.35	0.12	0.74	0.10	1.85	3368	3.70
240		Dolomite	0.3020	1.18	2760	553	0.35	0.12	0.74	0.10	1.85	15851	10.69
241		Ceramic beads	0.0150	1.20	3830	70	0.41	0.08	0.95	0.47	1.83	47	0.07

242	Chladek, J.,	Ceramic beads	0.3200	1.20	3810	515	0.40	0.08	0.95	0.47	1.83	18449	10.87
243	et al. ^[14]	Steel shot	0.2400	1.20	7790	290	0.42	0.08	0.80	0.25	1.83	6736	4.59
244	Pérez, N.P., et al., ^[61]	Sugarcane bagasse	0.0720	1.18	560.6	445	0.71	0.19	0.34	0.20	1.80	1761	2.10
245		Sugarcane bagasse	0.0550	1.18	605.2	225	0.71	0.19	0.54	0.20	1.80	246	0.81
246		Sugarcane bagasse	0.0450	1.18	484.6	75	0.73	0.19	0.55	0.20	1.80	7	0.22
247	Babu, M.P., P.	Resin	0.1830	1.18	1135	780	0.55	0.07	1.00	0.11	1.85	18280	9.14
248	Sai, and K.	Sand	0.5200	1.18	2650	780	0.40	0.07	0.86	0.11	1.85	42705	25.97
249	Krishnaiah ^[7]	Hematite	0.8000	1.18	4920	780	0.48	0.07	0.88	0.11	1.85	79303	39.96
250	Đuriš, M., et al. ^[22]	Quartz filtration sand	0.0250	1.20	2638	1800	0.42	0.14	0.70	0.03	1.83	545336	2.97
251		Quartz filtration sand	0.0230	1.20	2638	1700	0.43	0.14	0.69	0.03	1.83	459402	2.58
252		Quartz filtration sand	0.0230	1.20	2638	1583	0.47	0.14	0.67	0.03	1.83	370928	2.40
253		Quartz filtration sand	0.0170	1.20	2638	1545	0.47	0.14	0.71	0.03	1.83	344851	1.73
254		Quartz filtration sand	0.0200	1.20	2638	1500	0.42	0.14	0.71	0.03	1.83	315588	1.98

255		Quartz filtration sand	0.0156	1.20	2638	1283	0.44	0.14	0.70	0.03	1.83	197481	1.32
256		Quartz filtration sand	0.0130	1.20	2638	1201	0.50	0.14	0.72	0.03	1.83	161985	1.03
257		Quartz filtration sand	0.0131	1.20	2638	1098	0.45	0.14	0.73	0.03	1.83	123781	0.95
258		Quartz filtration sand	0.0105	1.20	2638	1000	0.48	0.14	0.75	0.03	1.83	93507	0.69
259		Quartz filtration sand	0.0093	1.20	2638	940	0.46	0.14	0.71	0.03	1.83	77666	0.58
260		Quartz filtration sand	0.0084	1.20	2638	781	0.47	0.14	0.72	0.03	1.83	44545	0.43
261		Quartz filtration sand	0.0064	1.20	2638	656	0.45	0.14	0.73	0.03	1.83	26397	0.28
262		Quartz filtration sand	0.0057	1.20	2638	560	0.47	0.14	0.77	0.03	1.83	16421	0.21
263		Quartz filtration sand	0.0046	1.20	2638	505	0.48	0.14	0.72	0.03	1.83	12043	0.15
264		Quartz filtration sand	0.0022	1.20	2638	359	0.48	0.14	0.87	0.03	1.83	4326	0.05
265		Silica sand	0.0365	1.18	2581	195	0.42	0.10	0.86	0.50	1.85	648	0.45

266	Zhang, H., et al. ^[84]	Silica sand	0.1140	1.18	2581	296	0.42	0.10	0.86	0.50	1.85	2265	2.15
267		Silica sand	0.2520	1.18	2600	421	0.43	0.10	0.86	0.50	1.85	6566	6.77
268		FCC	0.0021	1.18	1680	40	0.55	0.10	1.00	0.50	1.85	4	0.01
269		FCC	0.0014	1.18	1680	26	0.55	0.10	1.00	0.50	1.85	1	0.00
270		FCC	0.0032	1.18	1680	61	0.55	0.10	1.00	0.50	1.85	13	0.01
271		CaCO ₃	0.0980	1.18	2560	255	0.48	0.10	0.80	0.50	1.85	1437	1.59
272		CaCO ₃	0.1440	1.18	2560	360	0.48	0.10	0.80	0.50	1.85	4042	3.31
273		SiC	0.0036	1.18	3120	59	0.77	0.10	0.50	0.50	1.85	22	0.01
274	Kumar, S.H. and D. Murthy ^[45]	Jowar seeds	1.1300	1.16	1351	2810	0.34	0.10	1.00	0.08	1.87	975911	197.44
275		Polymer 1	0.8640	1.16	1110	2250	0.31	0.08	1.00	0.10	1.87	411552	120.88
276		Raagi seeds	0.6300	1.16	1379	1310	0.37	0.08	1.00	0.09	1.87	100930	51.32
277		Polymer 1	0.8640	1.16	1110	2250	0.31	0.10	1.00	0.11	1.87	411552	120.88
278		Raagi seeds	0.6300	1.16	1379	1310	0.37	0.10	1.00	0.15	1.87	100930	51.32
279		Polymer 1	0.8640	1.16	1110	2250	0.31	0.10	1.00	0.11	1.87	411552	120.88
280		Raagi seeds	0.6300	1.16	1379	1310	0.37	0.10	1.00	0.15	1.87	100930	51.32
281		Raagi seeds	0.6300	1.16	1379	1310	0.37	0.10	1.00	0.15	1.87	100930	51.32
282		Raagi seeds	0.6300	1.16	1379	1310	0.37	0.10	1.00	0.12	1.87	100930	51.32
283		Raagi seeds	0.6300	1.16	1379	1310	0.37	0.08	1.00	0.11	1.87	100930	51.32
284		Raagi seeds	0.6300	1.16	1379	1310	0.37	0.14	1.00	0.11	1.87	100930	51.32
285		Akhavan, A., et al. ^[2]	Silicon dioxide R974	0.0084	1.16	2200	12	0.98	0.04	1.00	0.60	1.76	0.14

286		Tio2 P25	0.0576	1.16	3800	21	0.97	0.04	1.00	0.60	1.76	1.30	0.09
287		Silicon dioxide RX50	0.0228	1.16	2200	40	0.88	0.04	1.00	0.60	1.76	5.18	0.07
288		Silicon dioxide A200	0.0336	1.16	2200	12	0.98	0.04	1.00	0.60	1.76	0.14	0.07
289	Singh, R. and G. Roy ^[72]	Dolomite	0.7100	1.18	2740	900	0.55	0.10	1.00	0.20	1.85	67861	40.94
290		Dolomite	0.6400	1.18	2740	780	0.54	0.10	1.00	0.20	1.85	44175	31.98
291		Dolomite	0.4900	1.18	2740	600	0.53	0.10	1.00	0.20	1.85	20107	18.83
292		Dolomite	0.2800	1.18	2740	426	0.52	0.10	1.00	0.20	1.85	7197	7.64
293		Dolomite	0.1500	1.18	2740	324	0.52	0.10	1.00	0.20	1.85	3166	3.11
294		Chromite ore	0.5100	1.18	4050	600	0.52	0.10	1.00	0.20	1.85	29724	19.60
295		Coal	0.3100	1.18	1500	600	0.54	0.10	1.00	0.20	1.85	11004	11.92
296	Kumoro, A., et al. ^[46]	River sand	0.0740	1.18	2630	241	0.41	0.10	0.94	0.05	1.85	1251	1.14
297		Rice Husk	0.6400	1.18	635	1560	0.86	0.10	0.18	0.05	1.85	81784	63.96
298		Corn cob	0.6100	1.18	1080	1040	0.52	0.10	0.71	0.05	1.85	41246	46.47
299	Marzocchella , A., et al. ^[51]	Silica sand	0.0170	1.18	2600	125	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	200	0.15
300		Glass bead	0.2200	1.18	2540	500	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	12521	7.92
301	Olivieri, G., A.	Silica sand	0.0220	1.18	2600	125	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	173	0.20
302	Marzocchella , and P. Salatino ^[57]	Silica sand	0.1900	1.18	2600	500	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	11041	6.09
303		Silica gel	0.0320	1.18	600	375	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	1246	0.87
304		Glass bead	0.2300	1.18	2540	500	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	12521	8.29

305	Geldart, D. ^[33]	alumina	0.5600	1.20	1360	1340	0.42	0.15	1.00	0.30	1.83	115941	49.51
306			0.5300	1.20	1360	1340	0.42	0.15	1.00	0.30	1.83	115941	46.85
307			0.4550	1.20	1380	1210	0.42	0.15	1.00	0.30	1.83	86622	36.32
308		Bagasse	0.6236	1.18	478.6	3555	0.84	0.19	0.32	0.20	1.85	729030	142.03
309		Bagasse	0.3165	1.18	483.29	1770	0.84	0.19	0.28	0.20	1.85	90864	35.89
310		Bagasse	0.1150	1.18	502.67	885	0.83	0.19	0.30	0.20	1.85	11815	6.52
311		Bagasse	0.0769	1.18	484.63	722	0.83	0.19	0.39	0.20	1.85	6184	3.56
312		Bagasse	0.0326	1.18	520.04	445	0.82	0.19	0.34	0.20	1.85	1554	0.93
313		Bagasse	0.0091	1.18	560.58	225	0.81	0.19	0.54	0.20	1.85	217	0.13
314		Bagasse	0.0011	1.18	605.21	75	0.76	0.19	0.55	0.20	1.85	9	0.01
315		Sand	0.0416	1.18	2585.3	225	0.42	0.19	0.78	0.20	1.85	1000	0.60
316		Polystyrene	0.0082	1.18	1018	2800	0.41	0.30	1.00	0.40	1.85	758659	145.43
317		Millet	0.0058	1.18	1330	1600	0.40	0.30	0.90	0.40	1.85	184993	59.48
318		Glass bean A	0.0062	1.18	2600	1300	0.38	0.30	1.00	0.40	1.85	194060	61.45
319	Glass bean B	0.0113	1.18	2600	1800	0.39	0.30	1.00	0.40	1.85	515138	115.14	
320	Parise, M., P. Kurka, and O. Taranto ^[58]	Microcrystallin e cellulose	0.0260	1.18	980	180	0.68	0.14	1.00	0.25	1.85	194	0.30
321		Microcrystallin e cellulose	0.0660	1.18	980	460	0.68	0.14	1.00	0.25	1.85	3237	1.94
322		Sand	0.0320	1.18	2650	180	0.40	0.14	0.86	0.25	1.85	525	0.37
323		Sand	0.1900	1.18	2650	460	0.40	0.14	0.86	0.25	1.85	8759	5.60

324	G.Wu et al. ^[79]	Silica sand	0.1100	1.18	2663	275	0.53	0.17	0.86	0.60	1.85	1881	1.94
325		Resin	0.2070	1.18	1448	670	0.44	0.17	1.00	0.60	1.85	14784	8.88
326	Formisani, B., et al. ^[29]	Bronze	0.1630	1.18	8750	229	0.85	0.05	1.00	0.05	1.85	3569	2.39
327		Bronze	0.2160	1.18	8750	272	0.85	0.05	1.00	0.05	1.85	5981	3.76
328	Lin, C.-L., T.-	Silica sand	0.1290	0.36	2600	715	0.50	0.09	0.86	0.18	11.33	263	0.30
329	H. Peng, and	Silica sand	0.1250	0.33	2600	715	0.50	0.09	0.86	0.18	13.26	174	0.22
330	W.-J. Wang ^[50]	Silica sand	0.1350	0.30	2600	715	0.50	0.09	0.86	0.18	15.29	120	0.19
331	Escudero, D. and T.J. Heindel ^[23]	Glass beads	0.2250	1.18	2600	550	0.46	0.10	1.00	0.05	1.85	14690	7.92
332		Glass beads	0.2100	1.18	2600	550	0.46	0.10	1.00	0.10	1.85	14690	7.40
333		Ground Walnut shell	0.2050	1.18	1300	550	0.57	0.10	1.00	0.05	1.85	7341	7.22
334		Ground Walnut shell	0.1900	1.18	1300	550	0.57	0.10	1.00	0.10	1.85	7341	6.69
335		Ground Corncob	0.1400	1.18	1000	550	0.63	0.10	0.71	0.05	1.85	5646	4.93
336		Ground Corncob	0.1450	1.18	1000	550	0.59	0.10	0.71	0.10	1.85	5646	5.11
337		Ground Corncob	0.1400	1.18	1000	550	0.60	0.10	0.71	0.15	1.85	5646	4.93

338		Ground Walnut shell	0.2000	1.18	1300	550	0.60	0.10	1.00	0.15	1.85	7341	7.04
339		Ground Walnut shell	0.1950	1.18	1300	550	0.58	0.10	1.00	0.20	1.85	7341	6.87
340		Ground Walnut shell	0.1950	1.18	1300	550	0.58	0.10	1.00	0.31	1.85	7341	6.87
341		Glass beads	0.2050	1.18	2600	550	0.45	0.10	1.00	0.15	1.85	14690	7.22
342		Ground Corncob	0.1400	1.18	1000	550	0.59	0.10	0.71	0.20	1.85	5646	4.93
343		Ground Corncob	0.1450	1.18	1000	550	0.59	0.10	0.71	0.31	1.85	5646	5.11
344		Bai, W., D. Chu, and Y. He ^[8]	agglomerated MWCNT	0.0124	0.00	150.22	480	0.46	0.05	0.80	0.30	1.76	0.73
345	agglomerated MWCNT		0.0111	0.00	150.22	480	0.46	0.05	0.80	0.30	2.43	0.25	0.00
346	agglomerated MWCNT		0.0078	0.00	150.22	480	0.46	0.05	0.80	0.30	3.45	0.07	0.00
347	agglomerated MWCNT		0.0073	0.00	150.22	480	0.46	0.05	0.80	0.30	3.77	0.05	0.00
348	vertical array MWCNT		0.0090	0.00	57.35	700	0.46	0.05	0.80	0.30	1.76	0.86	0.00

349		vertical array MWCNT	0.0086	0.00	57.35	700	0.46	0.05	0.80	0.30	2.43	0.29	0.00
350		vertical array MWCNT	0.0077	0.00	57.35	700	0.46	0.05	0.80	0.30	3.08	0.13	0.00
351		vertical array MWCNT	0.0058	0.00	57.35	700	0.46	0.05	0.80	0.30	3.77	0.06	0.00
352		vertical array MWCNT	0.0044	0.00	57.35	700	0.46	0.05	0.80	0.30	4.03	0.05	0.00
353	Sau, D., S. Mohanty, and K. Biswal [67]	Sago	0.5100	0.26	1303	1200	0.35	0.05	1.00	0.09	1.80	17703	8.84
354		Coal	0.3400	0.26	1545	1200	0.46	0.05	0.65	0.09	1.80	20992	5.89
355		Limestone	0.1700	0.26	2785	500	0.28	0.05	0.85	0.09	1.80	2737	1.23
356		Limestone	0.2000	0.26	2785	600	0.28	0.05	0.85	0.09	1.80	4730	1.73
357		Limestone	0.3400	0.26	2785	800	0.28	0.05	0.85	0.09	1.80	11213	3.93
358		Glass beads	0.6800	0.26	2300	1000	0.26	0.05	1.00	0.09	1.80	18086	9.82
359		Glass beads	1.3400	0.26	2300	2000	0.26	0.05	1.00	0.09	1.80	14468 5	38.71
360		Glass beads	2.1800	0.26	2300	3000	0.26	0.05	1.00	0.09	1.80	48831 1	94.47
361		Iron ore	0.1700	0.26	5025	500	0.38	0.05	0.79	0.09	1.80	4939	1.23
362		Iron ore	0.2000	0.26	5025	600	0.38	0.05	0.79	0.09	1.80	8535	1.73
363		Dolomite	0.3200	0.26	2785	717	0.36	0.05	0.79	0.09	1.80	8072	3.31

364		Coal	0.1900	0.26	1545	717	0.46	0.05	0.65	0.09	1.80	4478	1.97
365		Refractory material	0.2600	0.26	2610	717	0.44	0.05	0.69	0.09	1.80	7565	2.69
366		Sand	0.2600	0.26	2638	717	0.42	0.05	0.72	0.09	1.80	7646	2.69
367	Fang, S., et al. ^[25]	Micro glass beads	0.4030	1.18	1579	754	0.00	0.18	0.98	0.13	1.85	22955	19.46
368		Micro glass beads	0.3020	1.18	1498	590	0.00	0.18	0.97	0.13	1.85	10433	11.41
369		Micro glass beads	0.2320	1.18	1500	452	0.00	0.18	0.97	0.13	1.85	4698	6.71
370		Micro glass beads	0.1060	1.18	1420	221	0.00	0.18	0.90	0.13	1.85	520	1.50
371		Micro glass beads	0.1130	1.18	1471	158.5	0.00	0.18	0.99	0.13	1.85	199	1.15
372		Micro glass beads	0.4080	1.18	1579	754	0.00	0.05	0.98	0.16	1.85	22955	19.70
373		Micro glass beads	0.3280	1.18	1498	590	0.00	0.18	0.97	0.16	1.85	10433	12.39
374		Micro glass beads	0.2450	1.18	1500	452	0.00	0.18	0.97	0.16	1.85	4698	7.09

375	Micro glass beads	0.1250	1.18	1420	221	0.00	0.18	0.90	0.16	1.85	520	1.77
376	Micro glass beads	0.1160	1.18	1471	158.5	0.00	0.18	0.99	0.16	1.85	199	1.18
377	Micro glass beads	0.4130	1.18	1579	754	0.00	0.18	0.98	0.19	1.85	22955	19.94
378	Micro glass beads	0.3440	1.18	1498	590	0.00	0.18	0.97	0.19	1.85	10433	13.00
379	Micro glass beads	0.2490	1.18	1500	452	0.00	0.18	0.97	0.19	1.85	4698	7.21
380	Micro glass beads	0.1360	1.18	1420	221	0.00	0.18	0.90	0.19	1.85	520	1.92
381	Micro glass beads	0.1250	1.18	1471	158.5	0.00	0.18	0.99	0.19	1.85	199	1.27
382	Micro glass beads	0.4190	1.18	1579	754	0.00	0.18	0.98	0.22	1.85	22955	20.23
383	Micro glass beads	0.3610	1.18	1498	590	0.00	0.18	0.97	0.22	1.85	10433	13.64
384	Micro glass beads	0.2550	1.18	1500	452	0.00	0.18	0.97	0.22	1.85	4698	7.38

385		Micro glass beads	0.1490	1.18	1420	221	0.00	0.18	0.90	0.22	1.85	520	2.11
386		Micro glass beads	0.1340	1.18	1471	158.5	0.00	0.18	0.99	0.22	1.85	199	1.36
387		Micro glass beads	0.4330	1.18	1579	754	0.00	0.18	0.98	0.24	1.85	22955	20.91
388		Micro glass beads	0.3750	1.18	1498	590	0.00	0.18	0.97	0.24	1.85	10433	14.17
389		Micro glass beads	0.2580	1.18	1500	452	0.00	0.18	0.97	0.24	1.85	4698	7.47
390		Micro glass beads	0.1570	1.18	1420	221	0.00	0.18	0.90	0.24	1.85	520	2.22
391	Lee, J.-R., et al. ^[48]	NiO	0.0700	0.51	8200	2.25	0.29	0.05	1.00	0.25	3.20	0	0.00
392		NiO	0.0300	0.36	8200	2.25	0.15	0.05	1.00	0.25	4.08	0	0.00
393	Xu, Y., et al. ^[82]	glass bead	0.2100	1.20	2500	550	0.61	0.01	0.90	0.07	1.80	15090	7.70
394		glass bead	1.1746	1.20	2500	550	0.62	0.01	0.90	0.07	1.80	15090	43.07
395		glass bead	1.1849	1.20	2500	550	0.62	0.02	0.90	0.07	1.80	15090	43.45
396	Jiang, Y., et al. ^[38]	fibres	1.1000	1.20	500	3150	0.50	0.12	1.00	0.05	1.83	552308	228.60
397		fibres	1.1500	1.20	500	2752	0.53	0.12	1.00	0.05	1.83	368294	208.79
398		fibres	1.4000	1.20	500	2500	0.65	0.12	1.00	0.05	1.83	276102	230.90
399		sand	0.1400	1.18	2400	400	0.37	0.07	0.92	0.08	1.85	5211	3.59

400	Taib, M.R.	sand	0.2500	1.18	2400	530	0.37	0.07	0.92	0.08	1.85	12121	8.48
401	and A.C.	sand	0.3000	1.18	2400	600	0.37	0.07	0.92	0.08	1.85	17585	11.53
402	Kumoro ^[75]	sand	0.6000	1.18	2400	855	0.37	0.07	0.92	0.08	1.85	50886	32.85
403	Amarasinghe, W.S. ^[5]	Zirconia	0.0150	1.23	3830	69	0.49	0.08	1.00	0.24	1.80	47	0.07
404		Bronze	0.0700	1.23	7790	164	0.39	0.08	1.00	0.24	1.80	1278	0.78
405		Steel	0.2700	1.23	7800	290	0.42	0.08	1.00	0.24	1.80	7076	5.35
406	Mohanta, S., et al. ^[54]	magnetite	0.3583	1.20	5200	21.84	0.98	0.15	1.00	0.50	1.80	2	0.52
407		magnetite	0.2356	1.20	5200	4	1.00	0.15	1.00	0.50	1.80	0	0.06
408		magnetite	0.0453	1.20	5200	5.3	0.99	0.15	1.00	0.50	1.80	0	0.02
409		magnetite	0.0235	1.20	5200	6	0.16	0.15	1.00	0.50	1.80	0	0.01
410		magnetite	0.0176	1.20	5200	8.55	0.11	0.15	1.00	0.50	1.80	0	0.01
411	magnetite	0.0117	1.20	5200	0.69	0.10	0.15	1.00	0.50	1.80	0	0.00	
412	Joseph, G.G., et al. ^[41]	Lead-free glass	0.0180	1.00	2476	115.5	0.56	0.12	0.97	0.21	1.83	112	0.11
413		Lead-free glass	0.0560	1.00	2476	231	0.59	0.12	0.94	0.21	1.83	893	0.71
414		Polystyrene	0.0290	1.00	1064	231	0.57	0.12	0.98	0.21	1.83	383	0.37
415		Polystyrene	0.0400	1.00	1064	275	0.57	0.12	1.02	0.21	1.83	647	0.60
416	Bandara, J.,	sand	0.1000	1.18	2200	400	0.13	0.08	1.00	0.35	1.85	4743	2.54
417	M.S.	sand	0.1250	1.18	2200	450	0.15	0.08	1.00	0.35	1.85	6753	3.58
418	Eikeland, and	sand	0.1500	1.18	2200	500	0.16	0.08	1.00	0.35	1.85	9263	4.77
419	B.M.E.	sand	0.1750	1.18	2200	550	0.17	0.08	1.00	0.35	1.85	12329	6.12
420	Moldestad ^[9]	sand	0.2250	1.18	2200	600	0.20	0.08	1.00	0.35	1.85	16007	8.59

421		sand	0.2500	1.18	2200	650	0.21	0.08	1.00	0.35	1.85	20351	10.34
422		sand	0.2750	1.18	2200	700	0.22	0.08	1.00	0.35	1.85	25418	12.25
423		sand	0.3000	1.18	2200	750	0.23	0.08	1.00	0.35	1.85	31263	14.31
424		sand	0.3500	1.18	2200	800	0.24	0.08	1.00	0.35	1.85	37942	17.81
425		Ca	0.1500	1.18	1550	600	0.17	0.08	1.00	0.35	1.85	11275	5.73
426		Al ₂ O ₃	0.3700	1.18	3970	600	0.23	0.08	1.00	0.35	1.85	28892	14.12
427		TiO ₂	0.4000	1.18	4230	600	0.24	0.08	1.00	0.35	1.85	30785	15.27
428		Fe ₂ O ₃	0.4700	1.18	5242	600	0.25	0.08	1.00	0.35	1.85	38152	17.94
429	Rasteh, M., F. Farhadi, and A. Bahramian ^[64]	TiO ₂	0.0471	1.16	4500	132	0.44	0.07	0.78	0.05	1.86	373	0.39
430		TiO ₂	0.0488	1.16	4500	132	0.44	0.07	0.78	0.06	1.86	373	0.40
431		TiO ₂	0.0523	1.16	4500	132	0.44	0.07	0.78	0.08	1.86	373	0.43
432		TiO ₂	0.0559	1.16	4500	132	0.44	0.07	0.78	0.10	1.86	373	0.46
433		TiO ₂	0.0660	1.16	4500	170	0.44	0.07	0.78	0.05	1.86	796	0.70
434		TiO ₂	0.0684	1.16	4500	170	0.44	0.07	0.78	0.06	1.86	796	0.72
435		TiO ₂	0.0733	1.16	4500	170	0.44	0.07	0.78	0.08	1.86	796	0.78
436		TiO ₂	0.0784	1.16	4500	170	0.44	0.07	0.78	0.10	1.86	796	0.83
437		TiO ₂	0.0895	1.16	4500	216	0.44	0.07	0.78	0.05	1.86	1632	1.20
438		TiO ₂	0.0927	1.16	4500	216	0.44	0.07	0.78	0.06	1.86	1632	1.25
439		TiO ₂	0.0994	1.16	4500	216	0.44	0.07	0.78	0.08	1.86	1632	1.34
440		TiO ₂	0.1063	1.16	4500	216	0.44	0.07	0.78	0.10	1.86	1632	1.43
441		TiO ₂	0.1171	1.16	4500	283	0.44	0.07	0.78	0.05	1.86	3671	2.06

442		TiO2	0.1213	1.16	4500	283	0.44	0.07	0.78	0.06	1.86	3671	2.14
443		TiO2	0.1300	1.16	4500	283	0.44	0.07	0.78	0.08	1.86	3671	2.29
444		TiO2	0.1391	1.16	4500	283	0.44	0.07	0.78	0.10	1.86	3671	2.45
445		TiO2	0.0485	1.16	4500	132	0.44	0.09	0.78	0.05	1.86	373	0.40
446		TiO2	0.0505	1.16	4500	132	0.44	0.09	0.78	0.06	1.86	373	0.41
447		TiO2	0.0547	1.16	4500	132	0.44	0.09	0.78	0.08	1.86	373	0.45
448		TiO2	0.0591	1.16	4500	132	0.44	0.09	0.78	0.10	1.86	373	0.49
449		TiO2	0.0680	1.16	4500	170	0.44	0.09	0.78	0.05	1.86	796	0.72
450		TiO2	0.0708	1.16	4500	170	0.44	0.09	0.78	0.06	1.86	796	0.75
451		TiO2	0.0767	1.16	4500	170	0.44	0.09	0.78	0.08	1.86	796	0.81
452		TiO2	0.0828	1.16	4500	170	0.44	0.09	0.78	0.10	1.86	796	0.88
453		TiO2	0.0922	1.16	4500	216	0.44	0.09	0.78	0.05	1.86	1632	1.24
454		TiO2	0.0960	1.16	4500	216	0.44	0.09	0.78	0.06	1.86	1632	1.29
455		TiO2	0.1040	1.16	4500	216	0.44	0.09	0.78	0.08	1.86	1632	1.40
456		TiO2	0.1123	1.16	4500	216	0.44	0.09	0.78	0.10	1.86	1632	1.51
457		TiO2	0.1206	1.16	4500	283	0.44	0.09	0.78	0.05	1.86	3671	2.12
458		TiO2	0.1256	1.16	4500	283	0.44	0.09	0.78	0.06	1.86	3671	2.21
459		TiO2	0.1360	1.16	4500	283	0.44	0.09	0.78	0.08	1.86	3671	2.40
460		TiO2	0.1469	1.16	4500	283	0.44	0.09	0.78	0.10	1.86	3671	2.59
461		TiO2	0.0508	1.16	4500	132	0.44	0.11	0.78	0.05	1.86	373	0.42
462		TiO2	0.0533	1.16	4500	132	0.44	0.11	0.78	0.06	1.86	373	0.44

463		TiO2	0.0587	1.16	4500	132	0.44	0.11	0.78	0.08	1.86	373	0.48
464		TiO2	0.0643	1.16	4500	132	0.44	0.11	0.78	0.10	1.86	373	0.53
465		TiO2	0.0712	1.16	4500	170	0.44	0.11	0.78	0.05	1.86	796	0.75
466		TiO2	0.0748	1.16	4500	170	0.44	0.11	0.78	0.06	1.86	796	0.79
467		TiO2	0.0823	1.16	4500	170	0.44	0.11	0.78	0.08	1.86	796	0.87
468		TiO2	0.0902	1.16	4500	170	0.44	0.11	0.78	0.10	1.86	796	0.95
469		TiO2	0.0965	1.16	4500	216	0.44	0.11	0.78	0.05	1.86	1632	1.30
470		TiO2	0.1014	1.16	4500	216	0.44	0.11	0.78	0.06	1.86	1632	1.36
471		TiO2	0.1115	1.16	4500	216	0.44	0.11	0.78	0.08	1.86	1632	1.50
472		TiO2	0.1222	1.16	4500	216	0.44	0.11	0.78	0.10	1.86	1632	1.64
473		TiO2	0.1263	1.16	4500	283	0.44	0.11	0.78	0.05	1.86	3671	2.23
474		TiO2	0.1327	1.16	4500	283	0.44	0.11	0.78	0.06	1.86	3671	2.34
475		TiO2	0.1459	1.16	4500	283	0.44	0.11	0.78	0.08	1.86	3671	2.57
476		TiO2	0.1599	1.16	4500	283	0.44	0.11	0.78	0.10	1.86	3671	2.82
477		Sand	0.1156	1.16	2650	350	0.41	0.07	0.82	0.05	1.86	4089	2.52
478		Sand	0.1198	1.16	2650	350	0.41	0.07	0.82	0.06	1.86	4089	2.61
479		Sand	0.1284	1.16	2650	350	0.41	0.07	0.82	0.08	1.86	4089	2.80
480		Sand	0.1373	1.16	2650	350	0.41	0.07	0.82	0.10	1.86	4089	2.99
481		Sand	0.1495	1.16	2650	440	0.41	0.07	0.82	0.05	1.86	8123	4.09
482		Sand	0.1549	1.16	2650	440	0.41	0.07	0.82	0.06	1.86	8123	4.24
483		Sand	0.1659	1.16	2650	440	0.41	0.07	0.82	0.08	1.86	8123	4.54

484		Sand	0.1775	1.16	2650	440	0.41	0.07	0.82	0.10	1.86	8123	4.86
485		Sand	0.1763	1.16	2650	530	0.41	0.07	0.82	0.05	1.86	14197	5.82
486		Sand	0.1826	1.16	2650	530	0.41	0.07	0.82	0.06	1.86	14197	6.02
487		Sand	0.1956	1.16	2650	530	0.41	0.07	0.82	0.08	1.86	14197	6.45
488		Sand	0.2092	1.16	2650	530	0.41	0.07	0.82	0.10	1.86	14197	6.90
489		Sand	0.2285	1.16	2650	680	0.41	0.07	0.82	0.05	1.86	29985	9.67
490		Sand	0.2367	1.16	2650	680	0.41	0.07	0.82	0.06	1.86	29985	10.02
491		Sand	0.2535	1.16	2650	680	0.41	0.07	0.82	0.08	1.86	29985	10.73
492		Sand	0.2710	1.16	2650	680	0.41	0.07	0.82	0.10	1.86	29985	11.47
493		Sand	0.1191	1.16	2650	350	0.41	0.09	0.82	0.05	1.86	4089	2.59
494		Sand	0.1240	1.16	2650	350	0.41	0.09	0.82	0.06	1.86	4089	2.70
495		Sand	0.1343	1.16	2650	350	0.41	0.09	0.82	0.08	1.86	4089	2.93
496		Sand	0.1450	1.16	2650	350	0.41	0.09	0.82	0.10	1.86	4089	3.16
497		Sand	0.1540	1.16	2650	440	0.41	0.09	0.82	0.05	1.86	8123	4.22
498		Sand	0.1603	1.16	2650	440	0.41	0.09	0.82	0.06	1.86	8123	4.39
499		Sand	0.1736	1.16	2650	440	0.41	0.09	0.82	0.08	1.86	8123	4.75
500		Sand	0.1874	1.16	2650	440	0.41	0.09	0.82	0.10	1.86	8123	5.13
501		Sand	0.1815	1.16	2650	530	0.41	0.09	0.82	0.05	1.86	14197	5.99
502		Sand	0.1891	1.16	2650	530	0.41	0.09	0.82	0.06	1.86	14197	6.24
503		Sand	0.2046	1.16	2650	530	0.41	0.09	0.82	0.08	1.86	14197	6.75
504		Sand	0.2209	1.16	2650	530	0.41	0.09	0.82	0.10	1.86	14197	7.29

505		Sand	0.2353	1.16	2650	680	0.41	0.09	0.82	0.05	1.86	29985	9.96
506		Sand	0.2450	1.16	2650	680	0.41	0.09	0.82	0.06	1.86	29985	10.37
507		Sand	0.2651	1.16	2650	680	0.41	0.09	0.82	0.08	1.86	29985	11.22
508		Sand	0.2860	1.16	2650	680	0.41	0.09	0.82	0.10	1.86	29985	12.11
509		Sand	0.1247	1.16	2650	350	0.41	0.11	0.82	0.05	1.86	4089	2.72
510		Sand	0.1310	1.16	2650	350	0.41	0.11	0.82	0.06	1.86	4089	2.85
511		Sand	0.1440	1.16	2650	350	0.41	0.11	0.82	0.08	1.86	4089	3.14
512		Sand	0.1578	1.16	2650	350	0.41	0.11	0.82	0.10	1.86	4089	3.44
513		Sand	0.1612	1.16	2650	440	0.41	0.11	0.82	0.05	1.86	8123	4.42
514		Sand	0.1693	1.16	2650	440	0.41	0.11	0.82	0.06	1.86	8123	4.64
515		Sand	0.1861	1.16	2650	440	0.41	0.11	0.82	0.08	1.86	8123	5.10
516		Sand	0.2039	1.16	2650	440	0.41	0.11	0.82	0.10	1.86	8123	5.58
517		Sand	0.1901	1.16	2650	530	0.41	0.11	0.82	0.05	1.86	14197	6.27
518		Sand	0.1996	1.16	2650	530	0.41	0.11	0.82	0.06	1.86	14197	6.58
519		Sand	0.2194	1.16	2650	530	0.41	0.11	0.82	0.08	1.86	14197	7.24
520		Sand	0.2402	1.16	2650	530	0.41	0.11	0.82	0.10	1.86	14197	7.92
521		Sand	0.2464	1.16	2650	680	0.41	0.11	0.82	0.05	1.86	29985	10.43
522		Sand	0.2586	1.16	2650	680	0.41	0.11	0.82	0.06	1.86	29985	10.95
523		Sand	0.2841	1.16	2650	680	0.41	0.11	0.82	0.08	1.86	29985	12.02
524		Sand	0.3108	1.16	2650	680	0.41	0.11	0.82	0.10	1.86	29985	13.16
525		Dolomite	0.1488	1.16	2760	550	0.35	0.07	0.74	0.05	1.86	16525	5.09

526	Dolomite	0.1541	1.16	2760	550	0.35	0.07	0.74	0.06	1.86	16525	5.28
527	Dolomite	0.1651	1.16	2760	550	0.35	0.07	0.74	0.08	1.86	16525	5.65
528	Dolomite	0.1766	1.16	2760	550	0.35	0.07	0.74	0.10	1.86	16525	6.05
529	Dolomite	0.1787	1.16	2760	640	0.35	0.07	0.74	0.05	1.86	26037	7.12
530	Dolomite	0.1851	1.16	2760	640	0.35	0.07	0.74	0.06	1.86	26037	7.37
531	Dolomite	0.1983	1.16	2760	640	0.35	0.07	0.74	0.08	1.86	26037	7.90
532	Dolomite	0.2120	1.16	2760	640	0.35	0.07	0.74	0.10	1.86	26037	8.44
533	Dolomite	0.2202	1.16	2760	760	0.35	0.07	0.74	0.05	1.86	43600	10.42
534	Dolomite	0.2281	1.16	2760	760	0.35	0.07	0.74	0.06	1.86	43600	10.79
535	Dolomite	0.2443	1.16	2760	760	0.35	0.07	0.74	0.08	1.86	43600	11.55
536	Dolomite	0.2611	1.16	2760	760	0.35	0.07	0.74	0.10	1.86	43600	12.35
537	Dolomite	0.2429	1.16	2760	850	0.35	0.07	0.74	0.05	1.86	60996	12.85
538	Dolomite	0.2515	1.16	2760	850	0.35	0.07	0.74	0.06	1.86	60996	13.31
539	Dolomite	0.2693	1.16	2760	850	0.35	0.07	0.74	0.08	1.86	60996	14.25
540	Dolomite	0.2878	1.16	2760	850	0.35	0.07	0.74	0.10	1.86	60996	15.23
541	Dolomite	0.1532	1.16	2760	550	0.35	0.09	0.74	0.05	1.86	16525	5.25
542	Dolomite	0.1596	1.16	2760	550	0.35	0.09	0.74	0.06	1.86	16525	5.46
543	Dolomite	0.1727	1.16	2760	550	0.35	0.09	0.74	0.08	1.86	16525	5.91
544	Dolomite	0.1865	1.16	2760	550	0.35	0.09	0.74	0.10	1.86	16525	6.38
545	Dolomite	0.1840	1.16	2760	640	0.35	0.09	0.74	0.05	1.86	26037	7.33
546	Dolomite	0.1916	1.16	2760	640	0.35	0.09	0.74	0.06	1.86	26037	7.63

547		Dolomite	0.2073	1.16	2760	640	0.35	0.09	0.74	0.08	1.86	26037	8.26
548		Dolomite	0.2238	1.16	2760	640	0.35	0.09	0.74	0.10	1.86	26037	8.92
549		Dolomite	0.2267	1.16	2760	760	0.35	0.09	0.74	0.05	1.86	43600	10.73
550		Dolomite	0.2361	1.16	2760	760	0.35	0.09	0.74	0.06	1.86	43600	11.17
551		Dolomite	0.2554	1.16	2760	760	0.35	0.09	0.74	0.08	1.86	43600	12.08
552		Dolomite	0.2756	1.16	2760	760	0.35	0.09	0.74	0.10	1.86	43600	13.04
553		Dolomite	0.2501	1.16	2760	850	0.35	0.09	0.74	0.05	1.86	60996	13.23
554		Dolomite	0.2603	1.16	2760	850	0.35	0.09	0.74	0.06	1.86	60996	13.77
555		Dolomite	0.2816	1.16	2760	850	0.35	0.09	0.74	0.08	1.86	60996	14.90
556		Dolomite	0.3038	1.16	2760	850	0.35	0.09	0.74	0.10	1.86	60996	16.07
557		Dolomite	0.1604	1.16	2760	550	0.35	0.11	0.74	0.05	1.86	16525	5.49
558		Dolomite	0.1685	1.16	2760	550	0.35	0.11	0.74	0.06	1.86	16525	5.77
559		Dolomite	0.1852	1.16	2760	550	0.35	0.11	0.74	0.08	1.86	16525	6.34
560		Dolomite	0.2029	1.16	2760	550	0.35	0.11	0.74	0.10	1.86	16525	6.94
561		Dolomite	0.1926	1.16	2760	640	0.35	0.11	0.74	0.05	1.86	26037	7.67
562		Dolomite	0.2023	1.16	2760	640	0.35	0.11	0.74	0.06	1.86	26037	8.06
563		Dolomite	0.2223	1.16	2760	640	0.35	0.11	0.74	0.08	1.86	26037	8.86
564		Dolomite	0.2434	1.16	2760	640	0.35	0.11	0.74	0.10	1.86	26037	9.70
565		Dolomite	0.2374	1.16	2760	760	0.35	0.11	0.74	0.05	1.86	43600	11.23
566		Dolomite	0.2492	1.16	2760	760	0.35	0.11	0.74	0.06	1.86	43600	11.79
567		Dolomite	0.2737	1.16	2760	760	0.35	0.11	0.74	0.08	1.86	43600	12.95

568		Dolomite	0.2996	1.16	2760	760	0.35	0.11	0.74	0.10	1.86	43600	14.17
569		Dolomite	0.2618	1.16	2760	850	0.35	0.11	0.74	0.05	1.86	60996	13.85
570		Dolomite	0.2747	1.16	2760	850	0.35	0.11	0.74	0.06	1.86	60996	14.54
571		Dolomite	0.3017	1.16	2760	850	0.35	0.11	0.74	0.08	1.86	60996	15.96
572		Dolomite	0.3301	1.16	2760	850	0.35	0.11	0.74	0.10	1.86	60996	17.47
573		NaCl	0.0458	1.16	2165	223	0.42	0.07	0.81	0.05	1.86	864	0.64
574		NaCl	0.0474	1.16	2165	223	0.42	0.07	0.81	0.06	1.86	864	0.66
575		NaCl	0.0509	1.16	2165	223	0.42	0.07	0.81	0.08	1.86	864	0.71
576		NaCl	0.0544	1.16	2165	223	0.42	0.07	0.81	0.10	1.86	864	0.76
577		NaCl	0.0829	1.16	2165	330	0.42	0.07	0.81	0.05	1.86	2800	1.70
578		NaCl	0.0859	1.16	2165	330	0.42	0.07	0.81	0.06	1.86	2800	1.76
579		NaCl	0.0921	1.16	2165	330	0.42	0.07	0.81	0.08	1.86	2800	1.89
580		NaCl	0.0985	1.16	2165	330	0.42	0.07	0.81	0.10	1.86	2800	2.02
581		NaCl	0.1444	1.16	2165	485	0.42	0.07	0.81	0.05	1.86	8887	4.36
582		NaCl	0.1496	1.16	2165	485	0.42	0.07	0.81	0.06	1.86	8887	4.51
583		NaCl	0.1602	1.16	2165	485	0.42	0.07	0.81	0.08	1.86	8887	4.84
584		NaCl	0.1714	1.16	2165	485	0.42	0.07	0.81	0.10	1.86	8887	5.17
585		NaCl	0.1676	1.16	2165	552	0.42	0.07	0.81	0.05	1.86	13103	5.76
586		NaCl	0.1736	1.16	2165	552	0.42	0.07	0.81	0.06	1.86	13103	5.96
587		NaCl	0.1859	1.16	2165	552	0.42	0.07	0.81	0.08	1.86	13103	6.39
588		NaCl	0.1988	1.16	2165	552	0.42	0.07	0.81	0.10	1.86	13103	6.83

589		NaCl	0.0472	1.16	2165	223	0.42	0.09	0.81	0.05	1.86	864	0.65
590		NaCl	0.0491	1.16	2165	223	0.42	0.09	0.81	0.06	1.86	864	0.68
591		NaCl	0.0532	1.16	2165	223	0.42	0.09	0.81	0.08	1.86	864	0.74
592		NaCl	0.0575	1.16	2165	223	0.42	0.09	0.81	0.10	1.86	864	0.80
593		NaCl	0.0854	1.16	2165	330	0.42	0.09	0.81	0.05	1.86	2800	1.75
594		NaCl	0.0890	1.16	2165	330	0.42	0.09	0.81	0.06	1.86	2800	1.83
595		NaCl	0.0963	1.16	2165	330	0.42	0.09	0.81	0.08	1.86	2800	1.98
596		NaCl	0.1041	1.16	2165	330	0.42	0.09	0.81	0.10	1.86	2800	2.14
597		NaCl	0.1487	1.16	2165	485	0.42	0.09	0.81	0.05	1.86	8887	4.49
598		NaCl	0.1548	1.16	2165	485	0.42	0.09	0.81	0.06	1.86	8887	4.67
599		NaCl	0.1676	1.16	2165	485	0.42	0.09	0.81	0.08	1.86	8887	5.06
600		NaCl	0.1810	1.16	2165	485	0.42	0.09	0.81	0.10	1.86	8887	5.46
601		NaCl	0.1726	1.16	2165	552	0.42	0.09	0.81	0.05	1.86	13103	5.93
602		NaCl	0.1797	1.16	2165	552	0.42	0.09	0.81	0.06	1.86	13103	6.17
603		NaCl	0.1945	1.16	2165	552	0.42	0.09	0.81	0.08	1.86	13103	6.68
604		NaCl	0.2099	1.16	2165	552	0.42	0.09	0.81	0.10	1.86	13103	7.21
605		NaCl	0.0494	1.16	2165	223	0.42	0.11	0.81	0.05	1.86	864	0.69
606		NaCl	0.0519	1.16	2165	223	0.42	0.11	0.81	0.06	1.86	864	0.72
607		NaCl	0.0571	1.16	2165	223	0.42	0.11	0.81	0.08	1.86	864	0.79
608		NaCl	0.0626	1.16	2165	223	0.42	0.11	0.81	0.10	1.86	864	0.87
609		NaCl	0.0895	1.16	2165	330	0.42	0.11	0.81	0.05	1.86	2800	1.84

610		NaCl	0.0940	1.16	2165	330	0.42	0.11	0.81	0.06	1.86	2800	1.93
611		NaCl	0.1034	1.16	2165	330	0.42	0.11	0.81	0.08	1.86	2800	2.12
612		NaCl	0.1133	1.16	2165	330	0.42	0.11	0.81	0.10	1.86	2800	2.33
613		NaCl	0.1557	1.16	2165	485	0.42	0.11	0.81	0.05	1.86	8887	4.70
614		NaCl	0.1635	1.16	2165	485	0.42	0.11	0.81	0.06	1.86	8887	4.94
615		NaCl	0.1797	1.16	2165	485	0.42	0.11	0.81	0.08	1.86	8887	5.43
616		NaCl	0.1969	1.16	2165	485	0.42	0.11	0.81	0.10	1.86	8887	5.94
617		NaCl	0.1807	1.16	2165	552	0.42	0.11	0.81	0.05	1.86	13103	6.21
618		NaCl	0.1897	1.16	2165	552	0.42	0.11	0.81	0.06	1.86	13103	6.52
619		NaCl	0.2085	1.16	2165	552	0.42	0.11	0.81	0.08	1.86	13103	7.16
620		NaCl	0.2283	1.16	2165	552	0.42	0.11	0.81	0.10	1.86	13103	7.84
621	Seo, M.W., et al. ^[69]	Silica Sand	0.0650	1.18	2500	270	0.50	0.20	0.64	0.20	1.84	1683	1.13
622		Silica Sand	0.0460	0.74	2500	270	0.50	0.20	0.64	0.20	2.60	532	0.36
623		Silica Sand	0.0360	0.52	2500	270	0.50	0.20	0.64	0.20	3.30	232	0.15
624	D.C. Guío-Pérez ^[11]	Silica Sand	0.0260	1.18	2600	200	0.50	0.14	0.64	0.13	1.84	543	0.33
625	Gauthier, D. et al. ^[32]	River sand	0.5700	1.18	2640	900	0.47	0.14	0.77	0.28	1.84	65808	32.90
626		River sand	0.6200	1.18	2640	900	0.47	0.14	0.77	0.28	1.84	65808	35.78
627		River sand	0.6900	1.18	2640	900	0.47	0.14	0.77	0.28	1.84	65808	39.82
628	A. Delebarre. et al. ^[71]	River sand	0.0527	1.18	2640	183	0.47	0.19	0.77	0.07	1.84	553	0.62
629		River sand	0.0615	1.18	2640	183	0.47	0.19	0.77	0.26	1.84	553	0.72

630	Downmore, M., S.D. Jambgwa, and K.P. Kusaziwa ^[21]	Fused alumina	0.2300	1.09	4000	75	0.54	0.15	1.00	0.15	1.96	47	0.96
631		Fused alumina	0.1600	0.74	4000	75	0.54	0.15	1.00	0.15	2.60	18	0.34
632		Fused alumina	0.1150	0.52	4000	75	0.54	0.15	1.00	0.15	3.30	8	0.14
633		Fused alumina	0.1100	0.40	4000	75	0.54	0.15	1.00	0.15	3.90	4	0.09
634		Fused alumina	0.2400	1.09	4000	177	0.54	0.15	1.00	0.15	1.96	617	2.36
635		Fused alumina	0.2000	0.74	4000	177	0.54	0.15	1.00	0.15	2.60	240	1.01
636		Fused alumina	0.1550	0.52	4000	177	0.54	0.15	1.00	0.15	3.30	104	0.43
637		Fused alumina	0.1500	0.40	4000	177	0.54	0.15	1.00	0.15	3.90	58	0.27
638		Fused alumina	0.2900	1.09	4000	250	0.54	0.15	1.00	0.15	1.96	1739	4.03
639		Fused alumina	0.2250	0.74	4000	250	0.54	0.15	1.00	0.15	2.60	676	1.61
640		Fused alumina	0.1900	0.52	4000	250	0.54	0.15	1.00	0.15	3.30	294	0.75
641		Fused alumina	0.1700	0.40	4000	250	0.54	0.15	1.00	0.15	3.90	163	0.44
642		Fused alumina	0.3250	1.09	4000	320	0.54	0.15	1.00	0.15	1.96	3646	5.78
643		Fused alumina	0.2750	0.74	4000	320	0.54	0.15	1.00	0.15	2.60	1417	2.52
644		Fused alumina	0.2400	0.52	4000	320	0.54	0.15	1.00	0.15	3.30	617	1.22
645		Fused alumina	0.2100	0.40	4000	320	0.54	0.15	1.00	0.15	3.90	341	0.69
646		Fused alumina	0.3600	1.09	4000	500	0.54	0.15	1.00	0.15	1.96	13908	10.00
647		Fused alumina	0.3100	0.74	4000	500	0.54	0.15	1.00	0.15	2.60	5405	4.44
648	Fused alumina	0.2600	0.52	4000	500	0.54	0.15	1.00	0.15	3.30	2353	2.06	
649	Sau, D. ^[67]	Dolomite	0.3200	1.17	2785	717	0.36	0.50	0.79	0.13	1.85	34208	14.45
650	Khani, M. ^[42]	Quartz	0.1300	1.16	2650	400	0.48	0.05	0.86	0.11	1.86	5556	3.24

651	Quartz	0.2400	1.16	2650	600	0.48	0.05	0.86	0.11	1.86	18751	8.96
652	Quartz	0.3600	1.16	2650	800	0.48	0.05	0.86	0.11	1.86	44447	17.93
653	Glass beads	0.4400	1.16	2500	1000	0.30	0.05	1.00	0.11	1.86	81895	27.39
654	FCC	0.4500	1.16	1396	80	0.38	0.05	1.00	0.11	1.86	23	2.24
655	Quartz	0.0090	1.16	2650	400	0.48	0.05	0.86	0.11	1.86	5556	0.22
656	Quartz	0.1400	1.16	2650	600	0.48	0.05	0.86	0.11	1.86	18751	5.23
657	Quartz	0.2500	1.16	2650	800	0.48	0.05	0.86	0.11	1.86	44447	12.45
658	UF4 powder	0.3800	1.16	6700	800	0.47	0.05	0.91	0.11	1.86	112405	18.92
659	UF4 powder	0.3500	1.16	6700	1600	0.51	0.05	0.91	0.11	1.86	899243	34.86
660	Ceramic sphere	0.4700	1.16	1650	1700	0.45	0.05	1.00	0.11	1.86	265487	49.74
661	Limestone	1.1800	1.16	2782	500	0.28	0.05	0.82	0.11	1.86	11392	36.73
662	Limestone	0.6800	1.16	2782	700	0.28	0.05	0.82	0.11	1.86	31260	29.63
663	Limestone	0.2600	1.16	2782	1000	0.28	0.05	0.82	0.11	1.86	91137	16.18
664	Glass beads	0.3700	1.16	2500	1000	0.30	0.05	1.00	0.11	1.86	81895	23.03
665	FCC	0.5200	1.16	1396	80	0.38	0.05	1.00	0.11	1.86	23	2.59
666	Sand	0.7000	1.16	2612	450	0.46	0.05	0.70	0.11	1.86	7797	19.61
667	Sand	0.4800	1.16	2612	670	0.46	0.05	0.70	0.11	1.86	25735	20.02
668	Sand	0.0160	1.16	2612	1000	0.46	0.05	0.70	0.11	1.86	85565	1.00
669	Sand	0.1900	1.16	2612	1300	0.46	0.05	0.70	0.11	1.86	187987	15.38
670	Glass beads	0.3500	1.16	2500	1000	0.30	0.05	1.00	0.11	1.86	81895	21.79

671	Ceramic sphere	0.4900	1.16	1650	1700	0.45	0.05	1.00	0.11	1.86	265487	51.85
672	Limestone	0.5800	1.16	2782	500	0.28	0.05	0.82	0.15	1.86	11392	18.05
673	Limestone	0.7800	1.16	2782	700	0.28	0.05	0.82	0.15	1.86	31260	33.99
674	Limestone	0.5300	1.16	2782	1000	0.28	0.05	0.82	0.15	1.86	91137	32.99
675	Limestone	0.9600	1.16	2782	1200	0.28	0.05	0.82	0.15	1.86	157484	71.71
676	Sand	0.3100	1.16	2612	450	0.46	0.05	0.70	0.15	1.86	7797	8.68
677	Sand	0.4700	1.16	2612	670	0.46	0.05	0.70	0.15	1.86	25735	19.60
678	Sand	0.6400	1.16	2612	850	0.46	0.05	0.70	0.15	1.86	52548	33.86
679	Quartz	0.2300	1.16	2650	400	0.48	0.05	0.86	0.20	1.86	5556	5.73
680	Quartz	0.4100	1.16	2650	600	0.48	0.05	0.86	0.20	1.86	18751	15.31
681	Quartz	0.2800	1.16	2650	800	0.48	0.05	0.86	0.20	1.86	44447	13.94
682	Glass beads	0.8200	1.16	2500	1000	0.30	0.05	1.00	0.20	1.86	81895	51.04
683	Ceramic sphere	1.1200	1.16	1650	1700	0.45	0.05	1.00	0.20	1.86	265487	118.52
684	Sand	1.6900	1.16	2612	450	0.46	0.05	0.70	0.20	1.86	7797	47.34
685	Sand	0.6200	1.16	2612	670	0.46	0.05	0.70	0.20	1.86	25735	25.86
686	Sand	1.1000	1.16	2612	850	0.46	0.05	0.70	0.20	1.86	52548	58.20
687	Sand	2.2000	1.16	2612	1000	0.46	0.05	0.70	0.20	1.86	85565	136.94
688	Sand	2.6000	1.16	2612	1300	0.46	0.05	0.70	0.20	1.86	187987	110.40
689	Glass beads	2.6000	1.16	2500	1000	0.30	0.05	1.00	0.20	1.86	81895	161.84

690		FCC	0.1200	1.16	1396	80	0.38	0.05	1.00	0.20	1.86	23	0.60
691	Escudero, D. and T.J. Heindel ^[23]	Glass beads	0.2210	1.16	2600	550	0.30	0.10	1.00	0.05	1.86	14170	7.57
692		Glass beads	0.2210	1.16	2600	550	0.30	0.10	1.00	0.10	1.86	14170	7.57
693		Glass beads	0.2210	1.16	2600	550	0.30	0.10	1.00	0.15	1.86	14170	7.57
694		Glass beads	0.2210	1.16	2600	550	0.30	0.10	1.00	0.20	1.86	14170	7.57
695	Rezaei, H., S.	Ground chip	0.0850	1.16	1330	750	0.85	0.10	0.44	0.15	1.86	18373	3.97
696	Sokhansanj, and C.J. Lim ^[66]	Ground chip	0.0850	1.16	1330	750	0.85	0.10	0.44	0.25	1.86	18373	3.97
697		Ground chip	0.0850	1.16	1330	750	0.85	0.10	0.44	0.40	1.86	18373	3.97
698		Ground pellet	0.1450	1.16	1430	1310	0.63	0.10	0.73	0.25	1.86	105272	11.82
699	Bizhaem, H.K.	Silica	0.0170	1.16	2550	196	0.47	0.11	0.55	0.10	1.86	629	0.21
700	and H.B. Tabrizi ^[10]	Silica	0.0200	1.16	2550	196	0.47	0.11	0.55	0.12	1.86	629	0.24
701		Silica	0.0210	1.16	2550	196	0.47	0.11	0.55	0.15	1.86	629	0.26
702	Pérez, N.P., et al. ^[61]	Bagasse	0.0720	1.17	560.6	445	0.81	0.19	0.50	0.20	1.85	1658	2.03
703		Bagasse	0.0550	1.17	605.2	225	0.76	0.19	0.60	0.20	1.85	231	0.78
704		Bagasse	0.0450	1.17	484.6	75	0.83	0.19	0.70	0.20	1.85	7	0.21
705	Agu, C.E., et al. ^[1]	Glass	0.0900	1.16	2500	261	0.40	0.10	1.00	0.64	1.86	1456	1.46
706		Limestone	0.1550	1.16	2837	293	0.28	0.10	0.85	0.64	1.86	2338	2.83
707	Chauhan, V., et al. ^[12]	Coal ash	0.3300	1.20	2400	540	0.50	0.01	0.63	0.20	1.86	12808	11.48
708		Coal ash	0.3700	1.20	2400	540	0.50	0.01	0.63	0.30	1.86	12808	12.87
709		Coal ash	0.4900	1.20	2400	540	0.48	0.01	0.63	0.40	1.86	12808	17.04
710		Coal ash	0.4300	1.20	2400	870	0.48	0.01	0.63	0.20	1.86	53562	24.09

711		Coal ash	0.4500	1.20	2400	870	0.48	0.01	0.63	0.30	1.86	53562	25.21
712		Coal ash	0.4800	1.20	2400	870	0.48	0.01	0.63	0.40	1.86	53562	26.89
713		Coal ash	0.5500	1.20	2400	1430	0.45	0.01	0.63	0.20	1.86	237853	50.65
714		Coal ash	0.6000	1.20	2400	1430	0.45	0.01	0.63	0.30	1.86	237853	55.26
715		Coal ash	0.7700	1.20	2400	1430	0.45	0.01	0.63	0.40	1.86	237853	70.91
716	Korkerd, K., et al. ^[44]	Silica sand	0.0437	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	595	0.52
717		Silica sand	0.0291	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	419	0.27
718		Silica sand	0.0226	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	309	0.17
719		Silica sand	0.0474	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	595	0.56
720		Silica sand	0.0355	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	419	0.33
721		Silica sand	0.0258	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	309	0.19
722		Silica sand	0.0652	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	595	0.77
723		Silica sand	0.0560	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	419	0.52
724		Silica sand	0.0371	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	309	0.28
725		Silica sand	0.1879	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.04	1.86	8450	5.38
726		Silica sand	0.1556	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.04	2.07	5939	3.49
727		Silica sand	0.1204	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.04	2.27	4384	2.18
728		Silica sand	0.2192	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	8450	6.28
729		Silica sand	0.1618	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	5939	3.62
730		Silica sand	0.1348	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	4384	2.44
731		Silica sand	0.2385	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	8450	6.83

732		Silica sand	0.1884	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	5939	4.22
733		Silica sand	0.1439	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	4384	2.61
734		Silica sand	0.6531	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	67598	37.40
735		Silica sand	0.5494	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	47515	24.61
736		Silica sand	0.4903	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	35073	17.76
737		Silica sand	0.6813	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	67598	39.02
738		Silica sand	0.5715	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	47515	25.60
739		Silica sand	0.5125	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	35073	18.56
740		Silica sand	0.6877	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.15	1.86	67598	39.38
741		Silica sand	0.5989	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.15	2.07	47515	26.83
742		Silica sand	0.5329	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.15	2.27	35073	19.30
743		Silica sand	0.0347	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	595	0.41
744		Silica sand	0.0244	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	419	0.23
745		Silica sand	0.0193	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	309	0.14
746		Silica sand	0.0398	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	595	0.47
747		Silica sand	0.0269	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	419	0.25
748		Silica sand	0.0216	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	309	0.16
749		Silica sand	0.0611	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	595	0.72
750		Silica sand	0.0483	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	419	0.45
751		Silica sand	0.0320	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	309	0.24
752		Silica sand	0.1806	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	8450	5.17

753		Silica sand	0.1440	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	5939	3.23
754		Silica sand	0.1103	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	4384	2.00
755		Silica sand	0.2021	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	8450	5.79
756		Silica sand	0.1497	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	5939	3.35
757		Silica sand	0.1200	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	4384	2.17
758		Silica sand	0.2274	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	8450	6.51
759		Silica sand	0.1725	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	5939	3.86
760		Silica sand	0.1310	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	4384	2.37
761		Silica sand	0.6403	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.04	1.86	67598	36.67
762		Silica sand	0.5162	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.04	2.07	47515	23.13
763		Silica sand	0.4684	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.04	2.27	35073	16.96
764		Silica sand	0.6451	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	67598	36.94
765		Silica sand	0.5244	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	47515	23.49
766		Silica sand	0.4772	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	35073	17.28
767		Silica sand	0.6555	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	67598	37.54
768		Silica sand	0.5620	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	47515	25.18
769		Silica sand	0.4810	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	35073	17.42
770		Silica sand	0.0332	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	595	0.39
771		Silica sand	0.0255	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	419	0.24
772		Silica sand	0.0174	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	309	0.13
773		Silica sand	0.0378	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.11	1.86	595	0.45

774	Silica sand	0.0339	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.11	2.07	419	0.31
775	Silica sand	0.0252	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.11	2.27	309	0.19
776	Silica sand	0.0573	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.15	1.86	595	0.68
777	Silica sand	0.0437	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.15	2.07	419	0.40
778	Silica sand	0.0309	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.15	2.27	309	0.23
779	Silica sand	0.1786	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	8450	5.11
780	Silica sand	0.1291	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	5939	2.89
781	Silica sand	0.1055	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	4384	1.91
782	Silica sand	0.1910	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	8450	5.47
783	Silica sand	0.1390	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	5939	3.11
784	Silica sand	0.1158	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	4384	2.10
785	Silica sand	0.2212	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.15	1.86	8450	6.33
786	Silica sand	0.1713	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.15	2.07	5939	3.84
787	Silica sand	0.1265	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.15	2.27	4384	2.29
788	Silica sand	0.6347	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	67598	36.35
789	Silica sand	0.5013	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	47515	22.46
790	Silica sand	0.4555	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	35073	16.50
791	Silica sand	0.6429	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	67598	36.82
792	Silica sand	0.5067	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	47515	22.70
793	Silica sand	0.4645	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	35073	16.82
794	Silica sand	0.6513	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	67598	37.30

795		Silica sand	0.5528	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	47515	24.77
796		Silica sand	0.4789	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	35073	17.35
797		Silica sand	0.0260	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	595	0.31
798		Silica sand	0.0226	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	419	0.21
799		Silica sand	0.0191	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	309	0.14
800		Silica sand	0.0360	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	595	0.43
801		Silica sand	0.0308	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	419	0.29
802		Silica sand	0.0253	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	309	0.19
803		Silica sand	0.0466	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.15	1.86	595	0.55
804		Silica sand	0.0421	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.15	2.07	419	0.39
805		Silica sand	0.0270	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.15	2.27	309	0.20
806		Silica sand	0.1778	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	8450	5.09
807		Silica sand	0.1408	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	5939	3.15
808		Silica sand	0.1149	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	4384	2.08
809		Silica sand	0.1893	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	8450	5.42
810		Silica sand	0.1470	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	5939	3.29
811		Silica sand	0.1173	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	4384	2.12
812		Silica sand	0.2196	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	8450	6.29
813		Silica sand	0.1708	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	5939	3.83
814		Silica sand	0.1362	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	4384	2.47
815		Silica sand	0.5818	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	67598	33.32

816		Silica sand	0.5171	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	47515	23.17
817		Silica sand	0.4696	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	35073	17.01
818		Silica sand	0.6158	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	67598	35.26
819		Silica sand	0.5348	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	47515	23.96
820		Silica sand	0.4774	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	35073	17.29
821		Silica sand	0.6366	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	67598	36.45
822		Silica sand	0.5784	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	47515	25.91
823		Silica sand	0.4910	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	35073	17.79
824		Silica sand	0.0241	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	595	0.29
825		Silica sand	0.0234	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	419	0.22
826		Silica sand	0.0188	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	309	0.14
827		Silica sand	0.0331	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.11	1.86	595	0.39
828		Silica sand	0.0276	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.11	2.07	419	0.26
829		Silica sand	0.0212	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.11	2.27	309	0.16
830		Silica sand	0.0456	1.16	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	595	0.54
831		Silica sand	0.0432	1.01	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	419	0.40
832		Silica sand	0.0295	0.89	2650	190	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	309	0.22
833		Silica sand	0.1734	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	8450	4.97
834		Silica sand	0.1371	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	5939	3.07
835		Silica sand	0.1169	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	4384	2.12
836		Silica sand	0.1834	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	8450	5.25

837		Silica sand	0.1428	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	5939	3.20
838		Silica sand	0.1195	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	4384	2.16
839		Silica sand	0.2144	1.16	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	8450	6.14
840		Silica sand	0.1702	1.01	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	5939	3.81
841		Silica sand	0.1319	0.89	2650	460	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	4384	2.39
842		Silica sand	0.5801	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	1.86	67598	33.22
843		Silica sand	0.4820	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	2.07	47515	21.60
844		Silica sand	0.4673	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.05	2.27	35073	16.93
845		Silica sand	0.6041	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	1.86	67598	34.59
846		Silica sand	0.4917	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.07	47515	22.03
847		Silica sand	0.4767	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.10	2.27	35073	17.27
848		Silica sand	0.6353	1.16	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	1.86	67598	36.38
849		Silica sand	0.5528	1.01	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	2.07	47515	24.77
850	Zhou, W., et al. ^[88]	Magnetite powder	0.0064	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.40	1.86	41	0.03
851		Magnetite powder	0.0059	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.40	1.86	41	0.03
852		Magnetite powder	0.0050	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.40	1.86	41	0.02
853		Magnetite powder	0.0044	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.40	1.86	41	0.02

854	Magnetite powder	0.0055	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.40	1.86	41	0.03
855	Magnetite powder	0.0060	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.40	1.86	41	0.03
856	Magnetite powder	0.0080	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.40	1.86	41	0.04
857	Magnetite powder	0.0084	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.50	1.86	41	0.04
858	Magnetite powder	0.0073	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.50	1.86	41	0.03
859	Magnetite powder	0.0036	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.50	1.86	41	0.02
860	Magnetite powder	0.0043	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.50	1.86	41	0.02
861	Magnetite powder	0.0050	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.50	1.86	41	0.02
862	Magnetite powder	0.0070	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.50	1.86	41	0.03
863	Magnetite powder	0.0160	1.16	4600	65	0.45	0.15	0.90	0.50	1.86	41	0.05

864		Magnetite powder	0.1168	1.16	4600	232	0.45	0.15	0.90	0.30	1.86	1882	1.96
865		Magnetite powder	0.1078	1.16	4600	232	0.45	0.15	0.90	0.30	1.86	1882	1.81
866		Magnetite powder	0.1031	1.16	4600	232	0.45	0.15	0.90	0.30	1.86	1882	1.73
867		Magnetite powder	0.1031	1.16	4600	232	0.45	0.15	0.90	0.30	1.86	1882	1.73
868		Magnetite powder	0.1026	1.16	4600	232	0.45	0.15	0.90	0.30	1.86	1882	1.72
869		Magnetite powder	0.1017	1.16	4600	232	0.45	0.15	0.90	0.30	1.86	1882	1.70
870	Gauthier, D., S. Zerguerras, and G. Flamant ^[32]	Powder	0.0600	1.16	2000	282.5	0.68	0.14	1.00	0.28	1.86	1866	1.06
871		Powder	0.1200	1.16	3000	450	0.79	0.14	1.00	0.28	1.86	7545	3.36
872		Powder	0.5800	1.16	2500	900	0.74	0.14	1.00	0.28	1.86	60363	32.49
873		Powder	0.9200	1.16	3000	1425	0.79	0.14	1.00	0.28	1.86	240000	81.61
874		Powder	1.1200	1.16	4000	1800	0.84	0.14	1.00	0.28	1.86	480000	125.49
875	Feng, R., et al. ^[27]	Polystyrene	0.1460	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	5.06
876		Polystyrene	0.1400	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	4.86
877		Polystyrene	0.1350	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	4.68
878		Polystyrene	0.1240	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	4.30

879	Polystyrene	0.1040	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	3.61
880	Polystyrene	0.0990	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	3.43
881	Polystyrene	0.0950	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	3.30
882	Polystyrene	0.0910	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	3.16
883	Polystyrene	0.0870	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	3.02
884	Polystyrene	0.0850	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	2.95
885	Polystyrene	0.0780	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	2.71
886	Polystyrene	0.0780	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	2.71
887	Polystyrene	0.0760	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	2.64
888	Polystyrene	0.0730	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	2.53
889	Polystyrene	0.0670	1.16	1020	550	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	5703	2.32
890	Polystyrene	0.2570	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	11.35
891	Polystyrene	0.0200	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	0.88
892	Polystyrene	0.1910	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	8.43
893	Polystyrene	0.1690	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	7.46
894	Polystyrene	0.1420	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	6.27
895	Polystyrene	0.1250	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	5.52
896	Polystyrene	0.1190	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	5.25
897	Polystyrene	0.1170	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	5.17
898	Polystyrene	0.1080	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	4.77
899	Polystyrene	0.1090	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	4.81

900	Polystyrene	0.0990	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	4.37
901	Polystyrene	0.0930	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	4.11
902	Polystyrene	0.0920	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	4.06
903	Polystyrene	0.0890	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	3.93
904	Polystyrene	0.0870	1.16	1020	700	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	11758	3.84
905	Polystyrene	0.3080	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	17.48
906	Polystyrene	0.2530	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	14.36
907	Polystyrene	0.2290	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	13.00
908	Polystyrene	0.2110	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	11.98
909	Polystyrene	0.1800	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	10.22
910	Polystyrene	0.1690	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	9.59
911	Polystyrene	0.1570	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	8.91
912	Polystyrene	0.1500	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	8.51
913	Polystyrene	0.1390	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	7.89
914	Polystyrene	0.1310	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	7.44
915	Polystyrene	0.1270	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	7.21
916	Polystyrene	0.1240	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	7.04
917	Polystyrene	0.1140	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	6.47
918	Polystyrene	0.1130	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	6.41
919	Polystyrene	0.1110	1.16	1020	900	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	24989	6.30
920	Polystyrene	0.4250	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	30.29

921	Polystyrene	0.3460	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	24.66
922	Polystyrene	0.2860	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	20.38
923	Polystyrene	0.2260	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	16.11
924	Polystyrene	0.2040	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	14.54
925	Polystyrene	0.1860	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	13.26
926	Polystyrene	0.1730	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	12.33
927	Polystyrene	0.1590	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	11.33
928	Polystyrene	0.1540	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	10.98
929	Polystyrene	0.1430	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	10.19
930	Polystyrene	0.1370	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	9.76
931	Polystyrene	0.1320	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	9.41
932	Polystyrene	0.1210	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	8.62
933	Polystyrene	0.1190	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	8.48
934	Polystyrene	0.1140	1.16	1020	1130	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	49461	8.12
935	Polystyrene	0.4890	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	41.33
936	Polystyrene	0.3610	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	30.51
937	Polystyrene	0.3390	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	28.65
938	Polystyrene	0.2610	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	22.06
939	Polystyrene	0.2270	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	19.18
940	Polystyrene	0.2110	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	17.83
941	Polystyrene	0.1920	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	16.23

942		Polystyrene	0.1900	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	16.06
943		Polystyrene	0.1740	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	14.71
944		Polystyrene	0.1720	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	14.54
945		Polystyrene	0.1630	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	13.78
946		Polystyrene	0.1570	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	13.27
947		Polystyrene	0.1500	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	12.68
948		Polystyrene	0.1410	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	11.92
949		Reyes- Urrutia, A., et al. ^[65]	Sawdust	0.1390	1.18	280	900	0.53	0.14	0.66	0.10	1.84	7380
950	Sawdust		0.4100	1.18	260	2200	0.49	0.14	0.43	0.10	1.84	96000	59.31
951	Grape Stalk		0.5440	1.18	950	870	0.59	0.14	0.31	0.10	1.84	22700	31.55
952	Grape Stalk		0.6350	1.18	740	1250	0.51	0.14	0.48	0.10	1.84	52400	52.92
953	Grape Marc		0.4200	1.18	1100	810	0.45	0.14	0.50	0.10	1.84	21200	22.68
954	Olatunde, G., et al. ^[56]	Sawdust	0.8050	1.18	1470	1830	0.81	0.10	0.60	0.10	1.84	327000	98.21
955		Sawdust	0.6250	1.18	1470	1470	0.81	0.10	0.57	0.10	1.84	169000	61.25
956		Sawdust	0.5250	1.18	1470	1190	0.78	0.10	0.55	0.10	1.84	899000	41.65
957		Sawdust	0.4000	1.18	1470	840	0.80	0.10	0.51	0.10	1.84	316000	22.40
958		Sawdust	0.2900	1.18	1510	240	0.89	0.10	0.23	0.10	1.84	758000	4.64
959	McLaren, C., et al. ^[53]	Glass	0.8600	1.18	2500	1700	0.34	0.07	1.00	0.12	1.84	419975	93.75
960		Glass	0.5400	1.18	2500	1200	0.34	0.07	1.00	0.12	1.84	147714	41.55
961		Glass	0.2600	1.18	2500	625	0.34	0.07	1.00	0.12	1.84	20870	10.42
962		Glass	0.1700	1.18	2500	500	0.34	0.07	1.00	0.12	1.84	10685	5.45

963		Glass	0.1100	1.18	2500	375	0.34	0.07	1.00	0.12	1.84	4508	2.65
964		Zirconium Silicate	0.7200	1.18	4100	1100	0.96	0.07	1.00	0.12	1.84	186629	50.79
965		Zirconium Silicate	0.3100	1.18	4100	500	0.96	0.07	1.00	0.12	1.84	17527	9.94
966		Zirconium Oxide	0.4800	1.18	6000	700	0.40	0.07	1.00	0.12	1.84	70388	21.55
967		Zirconium Oxide	0.3400	1.18	6000	500	0.40	0.07	1.00	0.12	1.84	25652	10.90
968		Glass Bead	0.0300	1.18	2500	116	0.36	0.02	0.90	0.02	1.84	133	0.22
969		Glass Bead	0.0555	1.18	2500	231	0.36	0.02	0.90	0.02	1.84	1054	0.82
970		Glass Bead	0.0730	1.18	2500	275	0.36	0.02	0.90	0.02	1.84	1778	1.29
971		Glass Bead	0.1045	1.18	2500	385	0.36	0.02	0.90	0.02	1.84	4878	2.58
972		Glass Bead	0.1620	1.18	2500	462	0.36	0.02	0.90	0.02	1.84	8430	4.80
973	Rao, A., et al. ^[62]	Glass Bead	0.1915	1.18	2500	550	0.36	0.02	0.90	0.02	1.84	14222	6.75
974		Polystyrene	0.0590	1.18	1250	275	0.58	0.02	0.90	0.02	1.84	888	1.04
975		Polystyrene	0.0570	1.18	1250	328	0.58	0.02	0.90	0.02	1.84	1508	1.20
976		Glass Bead	0.0210	1.18	2500	116	0.36	0.02	0.90	0.10	1.84	133	0.16
977		Glass Bead	0.0535	1.18	2500	231	0.36	0.02	0.90	0.10	1.84	1054	0.79
978		Glass Bead	0.0650	1.18	2500	275	0.36	0.02	0.90	0.10	1.84	1778	1.15
979		Glass Bead	0.0995	1.18	2500	385	0.36	0.02	0.90	0.10	1.84	4878	2.46

980		Glass Bead	0.1440	1.18	2500	462	0.36	0.02	0.90	0.10	1.84	8430	4.27
981		Polystyrene	0.0367	1.18	1250	275	0.58	0.02	0.90	0.10	1.84	888	0.65
982		Polystyrene	0.0465	1.18	1250	328	0.58	0.02	0.90	0.10	1.84	1508	0.98
983		Glass Beads	0.0080	1.18	2760	103	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	103	0.05
984		Glass Beads	0.0070	1.18	2760	95	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	81	0.04
985		Glass Beads	0.0056	1.18	2760	85	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	58	0.03
986		Glass Beads	0.0053	1.18	2760	77.5	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	44	0.03
987		Glass Beads	0.0050	1.18	2760	69	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	31	0.02
988	Wong, A.C.-Y.	Glass Beads	0.0047	1.18	2760	58	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	18	0.02
989	^[78]	Glass Beads	0.0040	1.18	2760	49	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	11	0.01
990		Glass Beads	0.0030	1.18	2760	42	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	7	0.01
991		Glass Beads	0.0025	1.18	2760	30	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	3	0.00
992		Glass Beads	0.0020	1.18	2760	25	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	1	0.00
993		Glass Beads	0.0010	1.18	2760	20	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	1	0.00
994		Glass Beads	0.0080	1.18	2760	103	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	103	0.05
995	Bizhaem, H.K.	Silicon dioxide	0.0170	1.18	2550	196	0.98	0.11	1.00	0.10	1.84	657	0.24
996	and H.B.	Silicon dioxide	0.0070	1.18	2550	196	0.98	0.11	1.00	0.10	1.84	657	0.10
997	Tabrizi ^[10]	Silicon dioxide	0.0157	1.18	3860	95	0.99	0.11	1.00	0.10	1.84	113	0.11
998	Xu, C.C. and J. Zhu ^[81]	Lead shot	1.1307	1.20	10792	1280	0.32	0.10	1.00	0.10	1.80	822221	96.49

999	Grace, J. and G. Sun ^[35]	S-FCC	0.0028	1.18	1440	60	0.47	0.10	1.00	0.44	1.84	11	0.01
1000	Fu, Z.,et al. ^[31]	S-FCC	0.0026	1.18	1444	60	0.48	0.10	1.00	0.44	1.84	11	0.01

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลตัวแปรตามและตัวแปรดำเนินการอิสระที่ใช้ทดสอบแบบจำลองในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

Order	Particle	U_{mf} (m/s)	ρ_f (kg/m ³)	ρ_p (kg/m ³)	d_p (μ m)	ε (-)	D_c (m)	φ (-)	H_0 (m)	μ (Pa.s) ($\times 10^{-3}$)	Ar (-)	Re_{mf} (-)
1	Glass blend	0.3250	1.18	2480	631	0.42	0.10	1.00	0.17	1.85	21167	13.14
2	Coal	0.0320	1.18	1300	245	0.33	0.15	1.00	0.15	1.85	754	0.60
3	Magnetite powder	0.0330	1.21	4590	110	0.48	0.12	0.90	0.10	1.79	225	0.24
4	Sand [sieve no.20/30]	0.2800	1.18	2430	670	0.40	0.30	0.90	0.12	1.85	24818	12.01
5	Silica sand	0.0170	1.18	2600	125	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	200	0.15
6	Magnetite powder	0.0590	1.18	4600	187.5	0.45	0.11	1.00	0.12	1.85	1030	0.71
7	Sugarcane bagasse + Sand	0.4200	1.18	2118	2800	0.63	0.19	0.55	0.20	1.85	1578716	75.30
8	Ceramic	0.0840	1.18	3780	238	0.40	0.10	1.00	0.20	1.85	1731	1.28
9	Silica gel	0.4200	1.18	2053	780	0.67	0.07	0.90	0.11	1.85	33080	20.98
10	NaCl	0.0850	1.18	2165	193	0.42	0.07	0.81	0.05	1.85	528	1.05
11	CaCO ₃	0.1920	1.18	2560	470	0.48	0.10	0.80	0.50	1.85	8995	5.76
12	Manganese ore	0.6000	1.18	4800	600	0.57	0.10	1.00	0.20	1.85	35230	23.06
13	Polypropylene	0.1100	1.18	900	500	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	4432	3.96

14	Rapeseed	0.4900	1.18	1106	1525	0.46	0.17	1.00	0.60	1.85	133121	47.85
15	Mung bean	0.0107	1.18	1640	3200	0.42	0.30	1.00	0.40	1.85	1825199	241.26
16	River sand	0.1643	1.18	2450	350	0.35	0.10	0.94	0.05	1.85	3569	3.68
17	Coarse Olivine	0.1370	1.18	3250	378	0.55	0.24	0.82	0.27	1.85	5961	3.32
18	Jowar seeds	1.1300	1.16	1351	2810	0.34	0.08	1.00	0.11	1.87	975911	197.44
19	Coal ash	0.4300	1.20	2400	870	0.48	0.01	0.63	0.30	1.80	57393	24.94
20	Glass bead	0.2100	1.20	2500	550	0.61	0.01	0.90	0.07	1.80	15090	7.70
21	Sand	0.1400	1.18	2400	400	0.37	0.07	0.92	0.08	1.85	5211	3.59
22	Iron ore	0.3400	0.26	5025	800	0.38	0.05	0.79	0.09	1.80	20232	3.93
23	Micro glass beads	0.1430	1.18	1471	158.5	0.00	0.18	0.99	0.24	1.85	199	1.45
24	Fibers	1.4500	1.20	500	2184	0.68	0.12	1.00	0.05	1.83	184080	208.92
25	Magnetite	0.3583	1.20	5200	21.84	0.98	0.15	1.00	0.50	1.80	2	0.52
26	Polystyrene	0.0540	1.00	1064	327.5	0.58	0.12	0.99	0.21	1.83	1093	0.97
27	ZrO2	0.5200	1.18	5890	600	0.25	0.08	1.00	0.35	1.85	42869	19.85
28	Silica Sand	0.0360	0.40	2500	270	0.50	0.20	0.64	0.20	3.90	128	0.10
29	Fused alumina	0.2500	0.40	4000	500	0.54	0.15	1.00	0.15	3.90	1300	1.29
30	Quartz	0.5200	1.16	2650	1000	0.48	0.05	0.86	0.20	1.86	86811	32.37
31	Glass beads	0.2210	1.16	2600	550	0.30	0.10	1.00	0.31	1.86	14170	7.57
32	Silica sand	0.4890	0.89	2650	920	0.50	0.13	0.72	0.16	2.27	35073	17.71
33	Magnetite powder	0.1000	1.16	4600	232	0.45	0.15	0.90	0.30	1.86	1882	1.68

34	Polystyrene	0.1400	1.16	1020	1340	0.48	0.06	0.90	0.10	1.84	82478	11.83
35	Grape Marc	0.5500	1.18	1160	1300	0.62	0.14	0.65	0.10	1.84	92400	47.67
36	Zirconium Oxide	0.8900	1.18	6000	1100	0.40	0.07	1.00	0.12	1.84	273140	62.78
37	Glass Bead	0.1980	1.18	2500	550	0.36	0.02	0.90	0.10	1.84	14222	6.98
38	Glass Beads	0.0080	1.18	2760	103	0.42	0.15	0.90	0.10	1.84	103	0.05
39	Silica sand	0.0220	1.18	2600	125	0.42	0.12	1.00	0.56	1.85	173	0.20
40	Sand	0.4600	1.23	2650	750	0.50	0.08	1.00	0.22	1.80	41447	23.48
41	Glass	0.1560	1.18	2400	500	0.41	0.04	1.00	0.10	1.85	10176	4.99
42	Quartz filtration sand	0.0330	1.20	2638	2415	0.46	0.14	0.66	0.03	1.83	1317036	5.26
43	Spent FCC I	0.0070	1.18	1420	143	0.39	0.11	1.00	0.22	1.85	141	0.06
44	Walnut shells	0.1870	1.18	1300	620	0.52	0.10	0.60	0.10	1.85	10516	7.42
45	Millet	0.4300	1.18	1330	1640	0.41	0.15	0.90	0.40	1.85	199133	45.16
46	Sand [sieve no.30/60]	0.0900	1.18	2330	340	0.43	0.30	0.84	0.12	1.85	3110	1.96
47	Alumina fluoride	0.0417	1.19	3263	200	0.60	0.20	0.52	0.25	1.86	880	0.53
48	Alumina	0.0300	1.18	1538	289	0.47	0.15	0.80	0.49	1.85	1260	0.56
49	Silica sand	0.1290	0.36	2600	715	0.50	0.09	0.86	0.18	11.33	263	0.30
50	Coarse sand	0.4400	1.18	2650	770	0.49	0.15	0.86	0.23	1.85	41084	21.69

เมื่อ	Ar	คือ	ตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส (ไม่มีหน่วย)
	D_c	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ (เมตร)
	d_p	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)
	H_0	คือ	ความสูงเบดเริ่มต้น (เมตร)
	Re_{mf}	คือ	ค่าเรย์โนลด์์ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (ไม่มีหน่วย)
	U_{mf}	คือ	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (เมตรต่อวินาที)
	ε	คือ	สัดส่วนช่องว่าง (ไม่มีหน่วย)
	φ	คือ	ค่าความเป็นทรงกลม (ไม่มีหน่วย)
	ρ_g	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	μ	คือ	ค่าความหนืดของของไหล (ปาสคาลวินาที)

บรรณานุกรม

1. Agu, C.E., et al., *Determination of onset of bubbling and slugging in a fluidized bed using a dual-plane electrical capacitance tomography system*. Chemical Engineering Journal, 2017. **328**: p. 997-1008.
2. Akhavan, A., et al., *Enhanced fluidization of nanoparticles with gas phase pulsation assistance*. Powder Technology, 2015. **284**: p. 521-529.
3. Ali, S.S. and M. Asif, *Fluidization of nano-powders: Effect of flow pulsation*. Powder technology, 2012. **225**: p. 86-92.
4. Alsmari, T.A., J.R. Grace, and X.T. Bi, *Effects of superficial gas velocity and temperature on entrainment and electrostatics in gas–solid fluidized beds*. Chemical Engineering Science, 2015. **123**: p. 49-56.
5. Amarasinghe, W.S., et al., *Experimental study and CFD modelling of minimum fluidization velocity for geldart A, B and D particles*. 2017.
6. Asif, M., *Minimum fluidization velocities of binary-solid mixtures: model comparison*. International Journal of Chemical and Molecular Engineering, 2010. **4**(3): p. 243-247.
7. Babu, M.P., P. Sai, and K. Krishnaiah, *Continuous segregation of binary heterogeneous solids in fluidized beds*. Particuology, 2017. **35**: p. 93-100.
8. Bai, W., D. Chu, and Y. He, *The minimum fluidization velocity and dynamic characteristics of agglomerated carbon nanotube in a tapered fluidized bed at elevated temperature*. Chemical Engineering Research and Design, 2021. **168**: p. 239-253.
9. Bandara, J., M.S. Eikeland, and B.M.E. Moldestad, *Analysis of the effect of steam-to-biomass ratio in fluidized bed gasification with multiphase particle-in-cell CFD Simulation*. 2017.
10. Bizhaem, H.K. and H.B. Tabrizi, *Experimental study on hydrodynamic characteristics of gas–solid pulsed fluidized bed*. Powder technology, 2013. **237**: p. 14-23.
11. Cáceres-Martínez, L.E., D.C. Guío-Pérez, and S.L. Rincón-Prat, *Significance of the particle physical properties and the Geldart group in the use of correlations for the prediction of*

- minimum fluidization velocity of biomass–sand binary mixtures*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2021: p. 1-17.
12. Chauhan, V., et al., *Establishing fluidization parameters of different size of coal ash particles in bubbling fluidized bed*. Chemical Engineering Communications, 2021. **208**(2): p. 210-219.
 13. Chindapon, S. and A. Petiraksakul, *Drying models of rice milk in a verticle spray dryer*. Engineering and Applied Science Research, 2005. **32**(2): p. 155-171.
 14. Chladek, J., et al., *Fluidized bed classification of particles of different size and density*. Chemical Engineering Science, 2018. **177**: p. 151-162.
 15. Cluet, B., et al., *Segregation of wood particles in a bubbling fluidized bed*. Fuel processing technology, 2015. **133**: p. 80-88.
 16. Cui, Y., et al., *Experimental fluidization performances of silicon carbide in a fluidized bed*. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020. **154**: p. 108016.
 17. Datta, S., et al., *Co-gasification of high ash Indian coal-biomass blends in a pilot-scale fluidized bed gasifier*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2019: p. 1-8.
 18. de Vasconcelos, P.D.S. and A.L.A. Mesquita, *Minimum and full fluidization velocity for alumina used in the aluminum smelter*. International Journal of Engineering Business Management, 2011. **3**: p. 23.
 19. Deza, M., et al., *CFD modeling and X-ray imaging of biomass in a fluidized bed*. Journal of fluids engineering, 2009. **131**(11).
 20. Dhar, V., *Data science and prediction*. Communications of the ACM, 2013. **56**(12): p. 64-73.
 21. Downmore, M., S.D. Jambgwa, and 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, 2019. **233**(5): p. 1001-1012.

22. Đuriš, M., et al., *Prediction of bed expansion of polydisperse quartz sand mixtures fluidized with water*. Powder Technology, 2016. **289**: p. 95-103.
23. Escudero, D. and T.J. Heindel, *Bed height and material density effects on fluidized bed hydrodynamics*. Chemical Engineering Science, 2011. **66**(16): p. 3648-3655.
24. Fanelli, E., *CFD Hydrodynamics Investigations for Optimum Biomass Gasifier Design*. Processes, 2020. **8**(10): p. 1323.
25. Fang, S., et al., *Time-series analysis of the characteristic pressure fluctuations in a conical fluidized bed with negative pressure*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020.
26. Felipe, C. and S. Rocha, *Prediction of minimum fluidization velocity of gas–solid fluidized beds by pressure fluctuation measurements—analysis of the standard deviation methodology*. Powder technology, 2007. **174**(3): p. 104-113.
27. Feng, R., et al., *Influence of particle size distribution on minimum fluidization velocity and bed expansion at elevated pressure*. Powder technology, 2017. **320**: p. 27-36.
28. Formisani, B., R. Girimonte, and T. Longo, *The fluidization process of binary mixtures of solids: development of the approach based on the fluidization velocity interval*. Powder Technology, 2008. **185**(2): p. 97-108.
29. Formisani, B., R. Girimonte, and V. Vivacqua, *Fluidization of mixtures of two solids differing in density or size*. AIChE journal, 2011. **57**(9): p. 2325-2333.
30. Fotovat, F., et al., *A CPFD model for a bubbly biomass–sand fluidized bed*. Powder Technology, 2015. **275**: p. 39-50.
31. Fu, Z., et al., *Dry coal beneficiation by the semi-industrial Air Dense Medium Fluidized Bed with binary mixtures of magnetite and fine coal particles*. Fuel, 2019. **243**: p. 509-518.
32. Gauthier, D., S. Zerguerras, and G. Flamant, *Influence of the particle size distribution of powders on the velocities of minimum and complete fluidization*. Chemical Engineering Journal, 1999. **74**(3): p. 181-196.
33. Geldart, D., *Types of gas fluidization*. Powder technology, 1973. **7**(5): p. 285-292.

34. Girimonte, R., V. Vivacqua, and B. Formisani, *Extension of the model of binary fluidization to beds confined in a packing of coarse spheres*. Powder Technology, 2016. **297**: p. 275-282.
35. Grace, J. and G. Sun, *Influence of particle size distribution on the performance of fluidized bed reactors*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1991. **69**(5): p. 1126-1134.
36. Gupta, S., et al., *Prediction of minimum fluidization velocity for fine tailings materials*. Powder Technology, 2009. **196**(3): p. 263-271.
37. Hayashi, C., et al., *Data Science, Classification, and Related Methods: Proceedings of the Fifth Conference of the International Federation of Classification Societies (IFCS-96), Kobe, Japan, March 27–30, 1996*. 2013: Springer Science & Business Media.
38. Jiang, Y., et al., *EMMS-based solid stress model for the multiphase particle-in-cell method*. Powder Technology, 2020. **360**: p. 1377-1387.
39. Jin, H., J. Zhang, and B. Zhang, *The effect of vibration on bed voidage behaviors in fluidized beds with large particles*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2007. **24**(3): p. 389-397.
40. JOHARI, A. and M.R. TAIB, *Effect of sand sizes on the fluidization behavior in circular and rectangular columns*. Journal of Chemical and Natural Resources Engineering, 2007. **2**: p. 14-21.
41. Joseph, G.G., et al., *Experimental segregation profiles in bubbling gas-fluidized beds*. AIChE journal, 2007. **53**(11): p. 2804-2813.
42. Khani, M., *Models for prediction of hydrodynamic characteristics of gas-solid tapered and mini-tapered fluidized beds*. Powder technology, 2011. **205**(1-3): p. 224-230.
43. Kloosterman, J., et al., *Conceptual design of a fluidized bed nuclear reactor*. Nuclear science and engineering, 2001. **139**(2): p. 118-137.
44. Korkerd, K., et al., *Artificial neural network model for predicting minimum fluidization velocity and maximum pressure drop of gas fluidized bed with different particle size distributions*. South African Journal of Chemical Engineering, 2021.

45. Kumar, S.H. and D. Murthy, *Minimum superficial fluid velocity in a gas–solid swirled fluidized bed*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010. **49**(10): p. 1095-1100.
46. Kumoro, A., et al., *A new correlation for the prediction of minimum fluidization of sand and irregularly shape biomass mixtures in a bubbling fluidized bed*. International Journal of Applied Engineering Research, 2014. **9**(23): p. 21561-21573.
47. Lee, J.-R., et al., *Fluidization and mixing behaviors of Geldart groups A, B and C particles assisted by vertical vibration in fluidized bed*. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020. **149**: p. 107-856.
48. Lee, J.-R., et al., *Fluidization characteristics of fine cohesive particles assisted by vertical vibration in a fluidized bed reactor*. Chemical Engineering Journal, 2020. **380**: p. 122454.
49. Liao, L., *Influence of particle shape and bed height on fluidization*. 2013, University of Florida.
50. Escudero *Effect of particle size distribution on agglomeration/defluidization during fluidized bed combustion*. Powder technology, 2011. **207**(1-3): p. 290-295.
51. Marzocchella, A., et al., *Transient fluidization and segregation of binary mixtures of particles*. AIChE Journal, 2000. **46**(11): p. 2175-2182.
52. Maurer, S., et al., *Influence of interparticle forces on attrition and elutriation in bubbling fluidized beds*. Powder Technology, 2016. **291**: p. 473-486.
53. McLaren, C., et al., *Reduction in minimum fluidization velocity and minimum bubbling velocity in gas-solid fluidized beds due to vibration*. Powder Technology, 2021. **382**: p. 566-572.
54. Mohanta, S., et al., *Characteristics of minimum fluidization velocity for magnetite powder used in an air dense medium fluidized bed for coal beneficiation*. Particle & Particle Systems Characterization, 2012. **29**(4): p. 228-237.
55. Ogata, K., T. Hirose, and S. Yamashita, *Effect of particle properties on fluidized powder conveying in a horizontal channel*. Procedia engineering, 2015. **102**: p. 968-975.

56. Olatunde, G., et al., *Size measurement method for Loblolly Pine grinds and influence on predictability of fluidization*. Canadian Biosystems Engineering, 2016. **58**.
57. Olivieri, G., A. Marzocchella, and P. Salatino, *Segregation of fluidized binary mixtures of granular solids*. AIChE journal, 2004. **50**(12): p. 3095-3106.
58. Parise, M., P. Kurka, and O. Taranto, *The Gaussian spectral pressure distribution applied to a fluidized bed*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009. **48**(1): p. 120-125.
59. Paudel, B. and Z.-G. Feng, *Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles*. Powder technology, 2013. **237**: p. 134-140.
60. Pérez, N.P., et al., *Fluid dynamic study of mixtures of sugarcane bagasse and sand particles: Minimum fluidization velocity*. Biomass and bioenergy, 2017. **107**: p. 135-149.
61. Pérez, N.P., et al., *Prediction of the minimum fluidization velocity of particles of sugarcane bagasse*. Biomass and Bioenergy, 2018. **109**: p. 249-256.
62. Rao, A., et al., *The effect of column diameter and bed height on minimum fluidization velocity*. AIChE journal, 2010. **56**(9): p. 2304-2311.
63. Rasteh, M., F. Farhadi, and G. Ahmadi, *Empirical models for minimum fluidization velocity of particles with different size distribution in tapered fluidized beds*. Powder Technology, 2018. **338**: p. 563-575.
64. Rasteh, M., F. Farhadi, and A. Bahramian, *Hydrodynamic characteristics of gas–solid tapered fluidized beds: experimental studies and empirical models*. Powder Technology, 2015. **283**: p. 355-367.
65. Reyes-Urrutia, A., et al., *Fluidization of biomass: a correlation to assess the minimum fluidization velocity considering the influence of the sphericity factor*. Particulate Science and Technology, 2021: p. 1-21.
66. Rezaei, H., S. Sokhansanj, and C.J. Lim, *Minimum fluidization velocity of ground chip and ground pellet particles of woody biomass*. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018. **124**: p. 222-234.

67. Sau, D., S. Mohanty, and K. Biswal, *Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas–solid tapered fluidized beds*. Chemical Engineering Journal, 2007. **132**(1-3): p. 151-157.
68. Sazlı, M.H., *A brief review of feed-forward neural networks*. 2006.
69. Seo, M.W., et al., *The transition velocities in a dual circulating fluidized bed reactor with variation of temperatures*. Powder technology, 2014. **264**: p. 583-591.
70. Shao, Y., et al., *Minimum fluidization velocity of particles with different size distributions at elevated pressures and temperatures*. Chemical Engineering Science, 2020. **216**: p. 115-555.
71. Sharma, R., A. Delebarre, and B. Alappat, *Chemical -looping combustion—an overview and application of the recirculating fluidized bed reactor for improvement*. International journal of energy research, 2014. **38**(10): p. 1331-1350.
72. Singh, R. and G. Roy, *Prediction of minimum bubbling velocity, fluidization index and range of particulate fluidization for gas–solid fluidization in cylindrical and non-cylindrical beds*. Powder Technology, 2005. **159**(3): p. 168-172.
73. Son, S., et al., *Effect of inert particles on the synthesis of carbon nanotubes in a gas-solid fluidized bed reactor*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2007. **13**(2): p. 257-264.
74. Surbkar, R., T. Wongsiriamnuay, and 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, 2012. **8**(1): p. 24-33.
75. Taib, M.R. and A.C. Kumoro, *Effect of operating parameters on the minimum fluidisation velocity of an inclined fluidised bed*. Jurnal Teknologi, 2003. **38**(A): p. 25-36.
76. Tang, Z., et al., *Experimental study on fluidization characteristics of different-sized particles in a U-type reduction chamber*. Advanced Powder Technology, 2019. **30**(10): p. 2430-2439.
77. Timsina, R., et al., *Simulation of air-biomass gasification in a bubbling fluidized bed using CPFD model*. 2019.

78. Wong, A.C.-Y., *Use of angle of repose and bulk densities for powder characterization and the prediction of minimum fluidization and minimum bubbling velocities*. Chemical engineering science, 2002. **57**(14): p. 2635-2640.
79. Wu, G., et al., *Mixing Characteristics of Binary Mixture with Biomass in a Gas-Solid Rectangular Fluidized Bed*. Energies, 2019. **12**(10): p. 2011.
80. Xu, C. and J. Zhu, *Parametric study of fine particle fluidization under mechanical vibration*. Powder Technology, 2006. **161**(2): p. 135-144.
81. Xu, C.C. and J. Zhu, *Prediction of the minimum fluidization velocity for fine particles of various degrees of cohesiveness*. Chemical Engineering Communications, 2008. **196**(4): p. 499-517.
82. Xu, Y., et al., *CFD-DEM modeling the effect of column size and bed height on minimum fluidization velocity in micro fluidized beds with Geldart B particles*. Powder technology, 2017. **318**: p. 321-328.
83. Yan, S., et al., *Drag coefficient prediction for non-spherical particles in dense gas-solid two-phase flow using artificial neural network*. Powder Technology, 2019. **354**: p. 115-124.
84. Zhang, H., et al., *Powder attrition in gas fluidized beds*. Powder Technology, 2016. **287**: p. 1-11.
85. Zhao, Y., et al., *Fine coal dry cleaning using an air dense medium fluidized bed with improved magnetite medium*. Procedia engineering, 2015. **102**: p. 1133-1141.
86. Zhong, W., et al., *Fluidization of biomass particles in a gas- solid fluidized bed*. Energy & Fuels, 2008. **22**(6): p. 4170-4176.
87. Zhou, C., et al., *Studies on bed density in a gas-vibro fluidized bed for coal cleaning*. ACS omega, 2019. **4**(7): p. 12817-12826.
88. Zhou, W., et al., *Recycling iron from oolitic hematite via microwave fluidization roasting and magnetic separation*. Minerals Engineering, 2021. **164**: p. 106-851.
89. Jeff Leek (2013). *The key word in "Data Science is not Data, it is Science"*. Retrieved January 14,2021,from<https://web.archive.org/web/20140102194117/http://simplystatistics.org/2013/12/12/the-key-word-in-data-science-is-not-data-it-is-science/>

90. C.Kingkaew. (2014). REVIEW OF PREDICTIVE ANALYTICS FOR BIG DATA IN BUSINESS. Panyapiwat Journal Vol.5 Special (2014).
91. S. Plungsri. (2019). GROUP TECHNOLOGY FOR PRODUCT SIZE BY USING K-MEANS CLUSTERING FOR REDUCE PACKAGING COST. Retrieved May 7, 2021, from <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/bitstream/123456789/1580/1/58304205.pdf>
92. ธนาวุฒิ ประกอบผล. (2552). โครงข่ายประสาทเทียม. มฉก.วิชาการ, 12(24), หน้า 73 – 86.
93. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, พลูอิโดเซชัน, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ (2560).
94. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. Sieve analysis. Retrieved January 14, 2021, from <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1303/sieve-analysis>.
95. ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์, ณัชพล ไม้ซุน, ธนทัต ศิริสุวรรณโชติ, การศึกษาผลของการลดความชื้นในพลูอิโดซ์เบดและเบดบรรจุเพื่อการออกแบบเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่อง. Ladkrabang Engineering Journal, 2016. **33**(4): p. 1-7.
96. Subramani, H.J., M.M. Balaiyya, and L.R. Miranda, *Minimum fluidization velocity at elevated temperatures for Geldart's group-B powders*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007. **32**(1): p. 166-173.
97. Luo, Z., et al., *Fluidization characteristics of magnetite powder after hydrophobic surface modification*. International Journal of Mineral Processing, 2010. **94**(3-4): p. 166-171.
98. Kumar, A. and P. Sen Gupta: *Indian J. Technol.*, **12**, 225–228 (1974).