



การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศและอนุภาคในระบบกระแสชน
โดยใช้พลศาสตร์ของไหล

Investigation of Air-Particle Motion Behavior in Impinging Stream
System Using Computation Fluid Dynamics

ปริญ ศรีแสง

Prin Srisang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2565



การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศและอนุภาคในระบบกระแสชน
โดยใช้พลศาสตร์ของไหล

Investigation of Air-Particle Motion Behavior in Impinging Stream
System Using Computation Fluid Dynamics

ปริญ ศรีแสง
Prin Srisang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศและอนุภาคในระบบกระแส ชนโดยใช้พลศาสตร์ของไหล
ชื่อ นามสกุล	ปริญญา ศรีแสง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

ระบบกระแสชนเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการอบแห้งวัสดุอนุภาคที่มีความชื้นที่ผิวสูง โดยการศึกษาในส่วนแรกของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาทดลองค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาค ในการทดลอง ใช้เม็ดเรซินเป็นวัสดุทดลองซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 มิลลิเมตร โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาค ได้แก่ อัตราการป้อนวัสดุ ที่ 50 60 และ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วอากาศเข้าที่ 20 25 และ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที และมุมของท่ออากาศเข้าที่ 0.5 และ 10 องศา จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุ ความเร็วอากาศเข้าและมุมของท่ออากาศเข้าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยนี้เป็นการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศและอนุภาคในระบบกระแสชนโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จากการศึกษาพบว่า การจำลองให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่อความสูงของห้องกระแสชนและขนาดของวัสดุอนุภาคเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบมีค่ามากที่สุดที่ 1.93 วินาที ที่อัตราการป้อนวัสดุ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วอากาศเข้าที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที และมุมของท่ออากาศเข้าที่ 10 องศา

คำสำคัญ : กระแสชน, ค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาค, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Thesis Title	Investigation of Air-Particle Motion Behavior in Impinging Stream System Using Computation Fluid Dynamics
Author	Prin Srisang
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major Program	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2022

ABSTRACT

Impinging stream was an alternative for drying high-moisture particulate materials. In the first part of the study, experimental study the particle mean residence time in an impinging stream system. The test material used in the study was resin with a diameter of approximately 0.4mm. The research examined the impact of various factors such as particle mass flow rates of 50, 60 and 70 kg/h; inlet air velocities of 20, 25 and 30 m/s and inlet pipes were inclined 0°, 5° and 10° on the particle mean residence time were investigated. The results found that an increase in the particle mass flow rates, inlet air velocity and angle of inlet pipes led to an increase in particle mean residence time. In the final part of the study, the behavior of air-particle motion in the impinging stream system was simulated using computation fluid dynamics. The results found that the model accurately predicted the experimental data. Moreover, an increase in the height of the chamber and particle size led to an increase in particle mean residence time. Under the specified operating conditions of particle mass flow rates of 70 kg/h, inlet air velocity of 30 m/s, and an inlet pipe inclination angle of 10°, the maximum value of particle mean residence time was about 1.93s.

Keywords : Impinging Stream, Particle Mean Residence Time, Computation Fluid Dynamics

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจาก ได้รับความกรุณาจาก ดร.ปวิวัติ คมวชิรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ที่ได้เสียสละเวลาถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่างๆ เพื่อให้งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และดร.ประกอบ ชาติภักต์ กรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้าน ทั้งการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่ช่วยแนะนำ เพิ่มเติมความรู้ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริมสนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ค่อยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในทางการศึกษา

ขอขอบคุณบริษัท เมโทรซิสเต็มส์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) แผนก Design & Engineering Solution (DES) สำหรับซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS Flow Simulation 2023 พร้อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ Dell Workstation และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาทดลองงานวิจัยนี้

ปริญ ศรีแสง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 คุณลักษณะของระบบกระแสน	5
2.2 สมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วน	7
2.3 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
3. วิธีดำเนินการวิจัย	13
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	13
3.2 เงื่อนไขและวิธีการทดลอง	19
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	21
3.4 วิธีดำเนินการจำลอง	22
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล	25
4.1 ผลการทดลอง	25
4.2 ผลการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	28
5. สรุปผล และข้อเสนอแนะ	34
5.1 สรุปผล	34
5.2 ข้อเสนอแนะ	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง บรรณานุกรม	35
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ	37
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง	44
ภาคผนวก ค ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	53
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	62



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ข.1	ค่าความหยาบผิวของวัสดุชนิดต่างๆ	47
ข.2	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน K ของการสูญเสียแรงเสียดทาน ในอุปกรณ์ท่อ	48
ข.3	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน K ของการสูญเสียของ พลังงานรองในอุปกรณ์ท่อ	51
ค.1	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 0 องศา ที่อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง	53
ค.2	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 0 องศา ที่อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง	54
ค.3	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 0 องศา ที่อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง	55
ค.4	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 5 องศา ที่อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง	56
ค.5	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 5 องศา ที่อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง	57
ค.6	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 5 องศา ที่อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง	58
ค.7	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 10 องศา ที่อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง	59
ค.8	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 10 องศา ที่อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง	60
ค.9	ผลการทดลองท่อมุมมองศา 10 องศา ที่อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง	61

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
2.1	แสดงพื้นฐานของระบบกระแสชุน	6
2.2	แสดงการเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคในระบบกระแสชุน	6
3.1	แผนภาพการจำลองพลศาสตร์ของไหลเทียบกับการทดลอง	14
3.2	แสดงแผนผังของเครื่องอบแห้งกระแสชุนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง	15
3.3	แบบ 3 มิติ ของเครื่องอบแห้งกระแสชุน	16
3.4	สารกรองเรซิน	17
3.5	ชุดป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียง	18
3.6	Power supply and Dimmer	19
3.7	การวัดความเร็วอากาศขาเข้า	19
3.8	ท่อมุมมองศาในห้องระบบ	20
3.9	การชั่งน้ำหนักของเม็ดเรซินที่ตกค้างในระบบ	22
3.11	โครงสร้าง Mesh โมเดลจำลอง 3 มิติ	23
4.1	ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที	25
4.2	ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที	26
4.3	ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที	26
4.4	ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 50 Kg / hr	27
4.5	ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 60 Kg / hr	27
4.6	ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 70 Kg / hr	28
4.7	เปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการจำลอง (CFD)	29
4.8	ผลของความสูงของขนาดห้องอบแห้งและขนาดอนุภาค	30
4.9	ตำแหน่งท่อด้านในที่มีการปรับมุมอากาศ	31
4.10	ความปั่นป่วนในระบบกระแสชุนระหว่างท่อมุมมองศาในการป้อน	32
4.11	การเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยวในระบบกระแสชุน ระหว่างท่อมุมมองศา	33
ข.1	Moody Diagram	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

Impinging stream dryers (ISD) เป็นเครื่องลดความชื้นแบบกระแสน้ำที่มีลักษณะเฉพาะที่พิสุจน์แล้วว่าเป็นทางเลือกที่ยอดเยียม สำหรับแพลนโครปชาจัดความชื้นที่พื้นผิวของวัสดุที่เป็นอนุภาคเนื่องจากการชนกันของกระแส [1] และอนุภาคในเครื่องเป่าอากาศการระเหยของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรอีกทั้งเป็นประโยชน์ในด้านการเกษตรโดยผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเช่นเมล็ดพันธุ์หลายชนิดจะมีความชื้นบริเวณผิวมากทางหนึ่งที่จะรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ก็คือการลดความชื้นหรือการอบแห้งก่อนที่จะนำไปเก็บรักษาต่อไป [1] การลดความชื้นโดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุที่ต้อง การทำแห้งเพื่อยืดอายุในการเก็บรักษาวัสดุนั้นๆเนื่องจากไม่มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือนำ ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดปริมาณและน้ำหนักเมื่อช่วยลดต้นทุนในการขนส่งและการเก็บรักษาซึ่งระบบลดความชื้นหรืออบแห้งมีหลายรูปแบบ เช่น เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary dryer) เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed dryer) เป็นต้น [2] เครื่องอบแห้งดังกล่าวจะใช้พลังงานมากและเวลานาน ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ (Impinging stream systems) เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้ง โดยการใช้เครื่องลดความชื้นแบบกระแสน้ำ [3-4]

โดยเทคนิคการลดความชื้นแบบกระแสน้ำ (Impinging Streams, IS) มาจากผลของแรงเฉือนและความปั่นป่วนของกระแสการไหลที่มีค่าสูงมากในบริเวณการชน (Impingement zone) กล่าวคือเมื่อกระแสของไหลความเร็วสูง 2 กระแสซึ่งไหลเข้าสู่ระบบในทิศทางตรงกันข้ามกัน เกิดการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน มวลสารและโมเมนตัมได้ เมื่อพิจารณาจากอนุภาคเดี่ยว โดยเมื่ออนุภาคปล่อยไปข้างหนึ่ง อนุภาคอันดับแรกก็จะถูกกระเด็นโดยลมอีกฝั่งหนึ่งจนเคลื่อนที่ไป เมื่อถึงบริเวณการชนก็จะมีกระแสอีกฝั่งหนึ่งมาต้านแต่ด้วยแรงเฉื่อยของ Particle จึงสามารถทะลุไปยังอีกกระแสหนึ่งได้หรือฝั่งตรงข้ามได้และเมื่อทะลุไปจนความเร็วเป็นศูนย์ และหลังจากนั้นกระแสน้ำตรงกันข้ามนั้นเพิ่มความเร็วให้ Particle ก็จะเคลื่อนที่ย้อนกลับไปอีก และก็จะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในลักษณะแบบนี้ไปอีกเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงความเร็วถึงค่าๆ หนึ่งอนุภาคนี้อาจจะหลุดจาก chamber ไป ซึ่งถ้าอนุภาคนี้อาจจะพุ่งเข้าไปอีกฝั่งได้ไกลอนุภาคนี้อาจจะสามารถเคลื่อนที่ กลับไป-กลับมา นานและหลายครั้ง ซึ่งถ้าบริเวณการชนมีแรงเฉือนเยอะและแรงเฉือนนี้มีผลทำให้ความต้านทานที่พื้นผิวของ Particle ลดลง เมื่อความต้านทานลง ความชื้นหรือน้ำที่อยู่ภายในวัสดุเมื่อมีแรงต้านที่ผิวน้อยก็จะ

เคลื่อนที่ออกมาบริเวณผิวได้ง่ายขึ้นเมื่อมันออกมาได้ง่ายขึ้นก็สามารถจะระเหยหรือหลุดออกไปจากพื้นที่ผิวได้เร็วขึ้น

[8] การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ตลอดจนศึกษาวิจัยโดยออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ ทำการโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งและใช้เรซิน (Resin) เป็นวัสดุทดลอง พบว่าปัญหาที่เกิดจากระบบการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งทำได้อย่างไม่สม่ำเสมอ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $880 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$

ทำการขยายท่อส่งวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งให้ใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนอุปกรณ์ป้อนวัสดุจากแบบเกลียว (Screw conveyor) เป็นแบบสายพานลำเลียง (Belt conveyor) โดยทำการปรับปรุงจากเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ [8] และได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่ได้ปรับปรุงใหม่ โดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดลอง พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $300 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $5,750 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$

และจากการศึกษา [7] พบว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสน้ำและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้งหลังจากออกจากบริเวณการชนจะมีค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยที่สูงขึ้น ซึ่งถ้าวัสดุมีเวลาอยู่ในระบบอบแห้งได้นานเพิ่มมากขึ้น ก็จะส่งผลให้กระบวนการลดความชื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกันซึ่งถ้าสามารถเพิ่มโอกาสให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสน้ำและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบน บนของห้องอบแห้งได้ น่าจะทำให้อนุภาคอยู่ในระบบได้นานเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การนำเอาเทคนิคการลดความชื้นต่างๆ แต่ระบบนี้ยังไม่แพร่หลายมากนัก นักวิจัยได้พยายามปรับปรุงให้ระบบกระแสน้ำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งส่วนใหญ่ยังอยู่ในห้องปฏิบัติการ การสร้างแบบจำลอง CFD จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบ ช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการลองผิดลองถูกในการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อลดความซับซ้อนและลดระยะเวลาในการจำลองปัญหาทำนายระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Residence time) ในปัจจุบันนักวิจัยได้ใช้แบบจำลอง CFD ศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบหลายสถานะ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่อวงการอุตสาหกรรม เช่น การอบแห้ง (Drying) การผสมวัสดุ (Mixing) ระบบลำเลียงวัสดุด้วยลม (Pneumatic conveyor) และการศึกษาการยึดเกาะกันของอนุภาคเปียก (Wet particle agglomerates) เป็นต้น นอกจากนี้แบบจำลอง CFD ยังช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของอนุภาคภายในระบบ ทำให้ทราบข้อจำกัดของอนุภาคผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งเพื่อป้องกันการเสียหายตลอดจนศึกษาพฤติกรรมผสมกันของอนุภาคในระหว่างการเกิดการชนเพื่อเลือกใช้ความเร็วอากาศที่เหมาะสม ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถนำไปใช้ในการออกแบบห้องอบแห้ง ทำให้ทราบตำแหน่งจุดอับ (Dead zone) ที่เกิดการกระจายไม่ทั่วถึง โดยที่แบบจำลอง CFD ของระบบกระแสน้ำ (Impinging steam) โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) จำลองการเคลื่อนที่ของ

อนุภาคจากกฎของนิวตัน (Newton's second law) โดยพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับห้องอบแห้ง ส่วนการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นจะวิเคราะห์ด้วยวิธี CFD เพื่อคำนวณอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับของไหล ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคภายในระบบกระแสและให้รายละเอียดมากกว่าการทดลองจริง สามารถเก็บรายละเอียดข้อมูลของการไหลที่ซับซ้อนได้โดยไม่รบกวนลักษณะทางกายภาพของการไหลและสามารถทดสอบเกินขอบเขตช่วงการทำงานจริงได้ซึ่งการทดลองจริงนั้นทำได้ยากหรืออาจต้องใช้งบประมาณสูงจึงเกิดความสนใจศึกษาถึงตัวแปรที่จะสามารถทำให้อนุภาคอยู่ในระบบได้นานขึ้น (Residence time)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศและวัสดุอนุภาคในระบบกระแส พลศาสตร์ของก๊าซ-ของแข็งและวิถีการไหล (Flow Trajectory) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ของวัสดุอนุภาคในระบบกระแสด้วยการศึกษาจากการจำลอง CFD โดยศึกษาทดลองอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการป้อนวัสดุ ความเร็วของอากาศขาเข้าและมุมเอียงของการชน และศึกษาการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศ และวัสดุอนุภาค และค่าคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาคในระบบ โดยศึกษาการจำลองปรับเปลี่ยนปริมาตรของห้องระบบกระแส ขนาดของท่อทางเข้าห้องระบบกระแสและขนาดของวัสดุอนุภาคเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่หลากหลายสถานการณ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศและวัสดุอนุภาคในระบบกระแส

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาคในระบบกระแส

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาทดลองอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการป้อนวัสดุ ความเร็วของอากาศขาเข้าและมุมเอียงของการชน ที่ส่งผลต่อค่าคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาคในระบบกระแส

1.3.2 ศึกษาการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศและวัสดุอนุภาค และค่าคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาคในระบบกระแส ที่เงื่อนไข อัตราการป้อนวัสดุ ความเร็วของอากาศขาเข้าและมุมเอียงของการชนและเปรียบเทียบกับผลการทดลองในแง่ของค่าคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาคในระบบ

1.3.3 ศึกษาการจำลองโดยปรับเปลี่ยนปริมาตรของห้องระบบกระแส และขนาดของวัสดุอนุภาค

1.3.4 วัสดุอนุภาคที่ใช้คือ เรซิน

1.3.5 การจำลองที่สภาวะคงตัว (steady state) และที่อุณหภูมิแวดล้อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอากาศและวัสดุอนุภาคในระบบกระแสชน

1.4.2 ได้เข้าใจถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาคในระบบกระแสชน

1.5 คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
τ	ค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบ, s
mp	ปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ, kg
Wp	อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, kg/s
μ_t	ค่าความหนืดของความปั่นป่วน
G_k	การสร้างพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน
G_b	การสร้างพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัว
ρ	ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
g	แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)
P	ความดัน (Pa)
k	Turbulent Kinetic Energy
μ	Turbulent Viscosity
ϵ	อัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (m^2 / s^2)
u_g	ความเร็วของการไหล m/s
u_p	ความเร็วของอนุภาค m/s
ρ_g	ความหนาแน่นของของไหล Kg/m^3
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาค Kg/m^3
F_D	แรงฉุดลากต่อหน่วยอนุภาค สามารถคำนวณได้จากสมการ
C_D	สัมประสิทธิ์แรงฉุดลาก
Re	Reynolds Number

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นข้อมูลและการทวนวรรณกรรมที่มีความคล้ายคลึงและใกล้เคียงกับการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้เป็นการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งภายในและต่างประเทศ ซึ่งได้เรียบเรียงมาแล้วโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนในส่วนแรกเป็นส่วนของทฤษฎีและสุดท้ายเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 คุณลักษณะของระบบกระแสชน

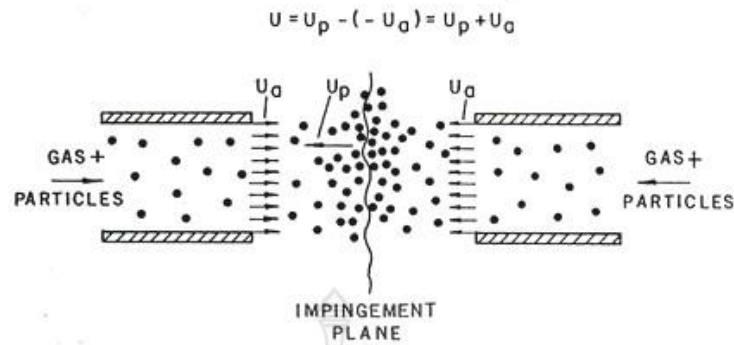
กระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนของของไหลไปยังวัสดุ สามารถพิจารณาได้ในเทอมของความต้านทานต่างๆ ได้แก่ ความต้านทานในส่วนของของไหล ซึ่งโดยปกติแล้วจะขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบและอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ในบางกรณียังมีความต้านทานบริเวณผิวของวัสดุซึ่งอาจเกิดจากสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ปกคลุมบริเวณผิวของวัสดุ ส่วนความต้านทานสุดท้ายคือความต้านทานภายใน โดยปกติทั่วไปแล้วจะพยายามที่จะลดความต้านทานบางส่วนหรือทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

ความต้านทานภายในอาจจะสามารถลดลงได้โดยการลดขนาดของวัสดุ หรือการเพิ่มเวลา การเคลื่อนที่ของวัสดุในระบบให้มากขึ้น ส่วนการลดลงของความต้านทานบริเวณผิวสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัสดุกับกระแสของไหล
2. การลดความหนาของฟิล์มของไหลที่ปกคลุมอยู่บริเวณผิวของวัสดุ
3. การให้วัสดุกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหลอย่างสม่ำเสมอ
4. การเพิ่มแรงจากภายนอกมากระทำเช่น แรงเฉื่อย

ระบบกระแสชนสำหรับกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อน ตามข้อเสนอแนะที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น โดยอาศัยลักษณะการไหลที่พิเศษคือ การนำกระแสของ ไหลสองกระแสหรือมากกว่ามาชนกัน ซึ่งอาจมีการนำวัสดุเข้าสู่ระบบผ่านกระแสของไหลทางใดทางหนึ่งหรือทั้งสองทางก็ได้ แสดงดังรูปที่ 2.1

จากผลของการชนกันระหว่างกระแสของไหลทั้งสองกระแส ความเร็วสัมพัทธ์ของวัสดุเมื่อเทียบกับกระแสของไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่วัสดุเคลื่อนที่สวนกระแสตรงกันข้าม กระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนจะเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว

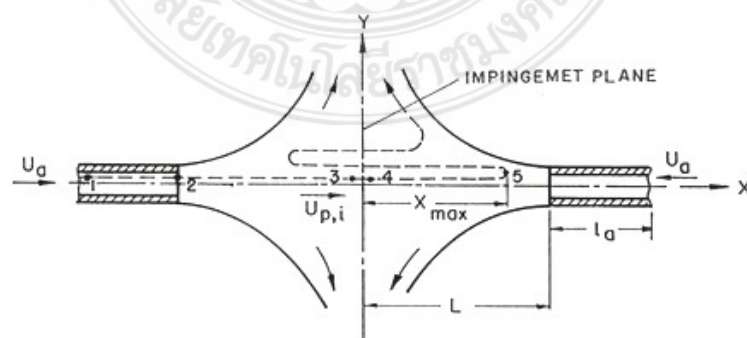


รูปที่ 2.1 พื้นฐานของระบบกระแสน [3]

สำหรับการเคลื่อนที่ ของวัสดุนั้นเริ่มต้นจากการที่วัสดุถูกเร่งให้มีความเร็วมากขึ้นโดยกระแสของไหลที่นำวัสดุเข้าสู่ระบบ จนกระทั่งผ่านเข้าสู่ระนาบการชน (Impingement plane) วัสดุจะเคลื่อนที่เข้าไปสู่กระแสนตรงกันข้าม ด้วยแรงเฉื่อย และวัสดุจะถูกดันจากกระแสนตรงกันข้ามให้ค่อยๆมีความเร็วลดลง จนกระทั่งอยู่ใน สภาวะหยุดนิ่ง จากนั้นวัสดุจะถูกเร่งให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกจากกระแสนดังกล่าว วัสดุจะมีเคลื่อนที่ กลับไปกลับมาในบริเวณการชน (Impingement Zone) จนความเร็วของวัสดุลดลงและถูกพาให้ออก จากห้องอบแห้งในที่สุด

2.1.1 การเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคเดี่ยวในระบบกระแสน

โดยปกติทั่วไปจะมีแรงอยู่สามแรงที่กระทำต่อวัสดุขณะเคลื่อนที่ในกระแสนของไหล ได้แก่ 1. แรงจากภายนอก (External force) ซึ่งอาจจะเป็นแรงโน้มถ่วงหรือแรงเหวี่ยง 2. แรงลอยตัว (Buoyancy force) จะกระทำขนานกับแรงจากภายนอกแต่มีทิศทางตรงกันข้าม 3. แรงฉุดลาก (Drag force) จะเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัสดุ ซึ่งขนานกับการเคลื่อนที่ของวัสดุแต่มีทิศทาง ตรงกันข้าม หากพิจารณากรณีการเคลื่อนที่ของวัสดุในแนวระนาบหนึ่งมิติ โดยทั่วไปจะพบว่า แรงจาก ภายนอก และ แรงลอยตัว จะมีน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงฉุดลาก



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคในระบบกระแสน [3]

หากพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคเดี่ยวในระบบกระแสชน ซึ่งเริ่มต้นด้วยการป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบที่จุดที่ 1 ความเร็วเริ่มต้นของวัสดุจะมีค่าเป็นศูนย์ ($U_p = 0$) และกำหนดความเร็วสัมพัทธ์ให้เท่ากับ $U = U_o - U_p$ เมื่อ U_o คือ ความเร็วของของไหล และกำหนดให้ทิศทางจากจุดที่ 1 ไปทางขวามีค่าเป็นบวก แสดงดังภาพที่ 2 วัสดุจะถูกเร่งโดยกระแสของไหลที่นำเข้าสู่ระบบ เมื่อวัสดุอยู่ที่จุดที่ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่วัสดุอยู่ใกล้กับกระบวนาการชนมากที่สุด ความเร็วของวัสดุจะเท่ากับความเร็วของกระแสของไหล ($U_p = U_o$) ดังนั้นความเร็วสัมพัทธ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($U = 0$) จากนั้นวัสดุจะเริ่มเคลื่อนที่สวนทางเข้าไปยังกระแสดตรงกันข้ามที่จุดที่ 4 ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีความเร็วสัมพัทธ์มากที่สุดโดยจะมีค่าเท่ากับ $U = -U_o - U_o = -2U_o$ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วสัมพัทธ์อย่างมีนัยสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนในระบบกระแสชน

2.1.2 การคำนวณการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

การทดลองหาค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบ (Mean resident time) ใช้เม็ดเรซิน เป็นวัสดุทดลอง ค่าเวลาเฉลี่ยดังกล่าวสามารถหาได้จากการวัดปริมาณของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Hold-up) และค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้ง โดยค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบหาได้จากสมการ [3]

$$\tau = \frac{m_p}{W_p} \quad (2.1)$$

เมื่อ

τ	คือ	ค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบ, s
m_p	คือ	ปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ, kg
W_p	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, kg/s

2.2 สมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วน

สมการพื้นฐานของสมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการโมเมนตัม (Momentum equation) สามารถเขียนสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ (Tensor) ได้ดังนี้

โดยที่ ρ เป็นความหนาแน่น U เป็นความเร็วของของไหล p เป็นค่าความดันและ μ เป็นค่าความหนืด

2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.2)$$

2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g \quad (2.3)$$

2.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) เป็นแบบจำลองที่ช่วยในการคำนวณสมการความต่อเนื่องและสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS) ในการไหลแบบปั่นป่วน โดยจะใช้ในการหาค่า Reynolds stress ซึ่งในการคำนวณนั้นไม่จำเป็นต้องหาค่า Fluctuation แต่จะสนใจเพียงค่าเฉลี่ยของการไหลเท่านั้น โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ดีนั้นต้องสามารถคำนวณพฤติกรรมของการไหลในลักษณะต่างๆ ได้อย่างแม่นยำรวมทั้งช่วยประหยัดหน่วยความจำแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันอยู่ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมีอยู่หลายแบบด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Turbulence model ที่นิยมใช้ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนก็คือ $k - \varepsilon$ model ซึ่งเป็นแบบจำลองนี้ก็มียุทธวิธีแบบเดียวกัน แต่รูปแบบที่ได้รับความนิยมกันมากที่สุดก็คือ แบบจำลองของ Launder and Spalding (1974) ที่เรียกว่า Standard $k - \varepsilon$ model ดังสมการ (2.4)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} + (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดยที่ μ_t คือค่าความหนืดของความปั่นป่วน (turbulent or eddy viscosity) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad C_{3\varepsilon} = 1.3, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

G_k แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน

G_b แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัว, Y_M แสดงถึงการมีส่วนร่วมของการขยายตัวที่ผันผวนในการบีบอัด ความปั่นป่วนต่ออัตราการกระจายตัวโดยรวม

โดยค่า ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศมีหน่วยเป็น (kg/m^3), i, j จะเป็นตัวแสดงมิติการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์ความเร็วอากาศ, u คือ ค่าความเร็วอากาศ (m/s), g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$), P คือ ความดัน (Pa), k คือ Turbulent Kinetic Energy และ μ คือ Turbulent Viscosity, \mathcal{E} คือ อัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (m^2 / s^2)

2.2.4 สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค

สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการสมดุลแรงที่กระทำกับวัสดุอนุภาค ซึ่งจะแสดงในรูปแบบของ Lagrangian การสมดุลสามารถที่จะพิจารณาได้จากเทอมทางซ้ายมือจากแรงกระทำกับอนุภาคในเทอมขวามือ สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u_g - u_p) + \frac{g_i}{\rho} (\rho_p - \rho_g) \quad (2.5)$$

โดยที่ u_g คือ ความเร็วของการไหล m/s

u_p คือ ความเร็วของอนุภาค m/s

ρ_g คือ ความหนาแน่นของของไหล Kg/m^3

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค Kg/m^3

g_i คือ แรงโน้มถ่วง m/s^2

F_D คือ แรงฉุดลากต่อหน่วยอนุภาค สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F_D = \frac{18\mu c_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24} \quad (2.6)$$

สำหรับสัมประสิทธิ์แรงฉุดลาก (grad coefficient : C_D) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}} \quad (2.7)$$

โดยที่ a_1, a_2 และ a_3 เป็นค่าคงที่ของสมการที่ใช้สำหรับอนุภาคที่เป็นทรงกลม (Morsi and Alexander) และสำหรับเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p |u_p - u_g|}{\mu} \quad (2.8)$$

2.3 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ระบบกระแสน้ำจัดว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ และจากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงข้อดีต่างๆ สำหรับการลดความชื้นแต่ยังไม่มีการวิจัยการสร้างแบบจำลอง CFD ของระบบกระแสน้ำ (Impinging steam) ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบ ช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดความซับซ้อนจากการสร้างเครื่องต้นแบบจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคตเนื่องจากระบบนี้ยังไม่แพร่หลายมากนักสำหรับประเทศไทย

ซึ่งจากผลการวิจัยต่างๆ กล่าวว่าระบบอบแห้งด้วยกระแสน้ำซึ่งต่อมาได้มีนักวิจัยอีกหลายท่านที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในรูปแบบต่างๆ

Tamir, A. [3] รายงานว่าการศึกษาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัสดุ เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ และการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งกระแสน้ำ ผลจากการศึกษาพบว่า ปริมาตรประสิทธิผลของการถ่ายเทมวลและความร้อนไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของห้องอบแห้งแต่ขึ้นอยู่กับปริมาตรระหว่างท่อทางเข้าห้องอบแห้งสองด้าน นอกจากนี้ยังพบว่า เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heat transfer coefficient) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนวัสดุ

Tamir, A. [3] ศึกษาการอบแห้งวัสดุอนุภาคในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ โดยใช้วัสดุทดสอบคือ Millet Seed ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 25-30% มาตรฐานแห้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยกับ 1.5 และ 1.9 mm และมีความหนาแน่นกับ 1,153 kg/m ส่วนอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งคงที่โดยที่อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศขาเข้าห้องอบแห้ง ส่วนการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งนั้นจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากการที่มวลของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Hold up of particles) มากขึ้น ย่อมแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่มากกว่าด้วย

Kudra, T.; and Mujumdar, A.S. [4] ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการทดสอบเครื่องอบแห้งและเปรียบเทียบลักษณะในการอบแห้งวัสดุอนุภาคของเครื่องอบแห้งกระแสน้ำกับเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ เช่น ฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed dryer), เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer) เครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบสั่น (Vibrofluidized bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) โดยในการจำแนกประเภทของเครื่องแบบกระแสน้ำนั้นจะขึ้นอยู่กับ

ขนาดและ ทิศทางการไหลของของไหล จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของ เครื่องอบแห้งกระแสด่วนสูงกว่า

เครื่องอบแห้งชนิดอื่นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 260-112, 500 W/mk ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าประมาณ 1,000-6,000 W/mk (Master,1979) และสำหรับสเปาต์เตคเบดและเครื่องอบแห้งแบบไซโคลนมีค่าประมาณ 5,800 W/mk [3] เครื่องอบแห้งกระแสด่วนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรม เช่นการอบแห้งของเหลวชั้น โดยสามารถป้อนวัสดุได้ถึง 1,250-1,900 kg/h

Kitron, Y. and Tamir, A. [5] ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งกระแสด่วนแบบแกนเดี่ยวซึ่งวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ Mullet seed ซึ่งมีความหนาแน่น 1153 kg/m และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.9×10 m. โดยการทดลองอบแห้งด้วยอัตราการอบแห้งที่คงที่ พบว่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนภาระ (Loading ratio) ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Hold-up of the particle) และอัตราการไหลของอากาศ (Air Flow rate) มีค่าเพิ่มมากขึ้น

Khomwachirakul, P et al. [10] รายงานว่าได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า ความเร็วอากาศร้อนขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และระยะห่างในการชนที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสด่วนในแง่ของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (Volumetric water evaporation rate) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยใช้เรซิน (Rasin) ที่มีความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 81% - 85% (d.b.) เป็นวัสดุตัวอย่างในการทดลอง จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าของอากาศส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วของอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราการระเหยของน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และ $880 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$ ตามลำดับ

Sathapornprasath, K et al. [8] ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ตลอดจนศึกษาวิจัยโดยออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบกระแสด่วน ทำการโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งและใช้เรซิน (Resin) เป็นวัสดุทดลอง พบว่าปัญหาที่เกิดจากระบบการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งทำได้อย่างไม่สม่ำเสมอ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $880 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$

ทำการขยายท่อส่งวัสดุเข้าสู่เครื่องอบแห้งให้ใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนอุปกรณ์ป้อนวัสดุจากแบบเกลียว (Screw conveyor) เป็นแบบสายพานลำเลียง (Belt conveyor) โดยทำการปรับปรุงจากเครื่องอบแห้งแบบกระแสด่วนของ Sathapornprasath, K et al. [8] และได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่ได้ปรับปรุงใหม่โดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดลอง พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิง

ปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $300 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่าประมาณ $5,750 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$

และจากการศึกษาของ Min Du [7] พบว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้งหลังจากบริเวณการชนจะมีค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยที่สูงขึ้น ซึ่งถ้าวัสดุมีเวลาอยู่ในระบบอบแห้งได้นานเพิ่มมากขึ้น ก็จะส่งผลให้กระบวนการลดความชื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกันซึ่งถ้าสามารถเพิ่มโอกาสให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้งได้ น่าจะทำให้อนุภาคอยู่ในระบบได้นานเพิ่มขึ้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

จากในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินการและวิจัยที่ประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ทดลอง วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องระบบกระแสแบบต่างๆ ชนิดของวัสดุ วิธีการทดสอบ การออกแบบอุปกรณ์ป้อนวัสดุ ผ่านการทบทวนวรรณกรรมจากวารสารวิชาการและงานวิจัยต่าง ๆ

3.1.1.2 ศึกษาข้อมูลวิธีการทดลองการกำหนดค่าตัวแปรในการทดลองเก็บข้อมูลทำการปรับตั้งระยะห่างการชนที่กำหนดในห้องก่อนการเดินเครื่อง

3.1.1.3 การกำหนดตัวแปร ระเบียบวิธีวิจัย แนวทางวิจัย กรอบการวิจัย และการวางแผน การเตรียมการดำเนินงานทดลองและจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

3.1.1.4 ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks และสร้างเครื่องระบบกระแส เพื่อใช้ในการดำเนินงานทดลอง

3.1.1.5 ทำการทดลองหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ จากเครื่องระบบกระแสที่สร้างขึ้น

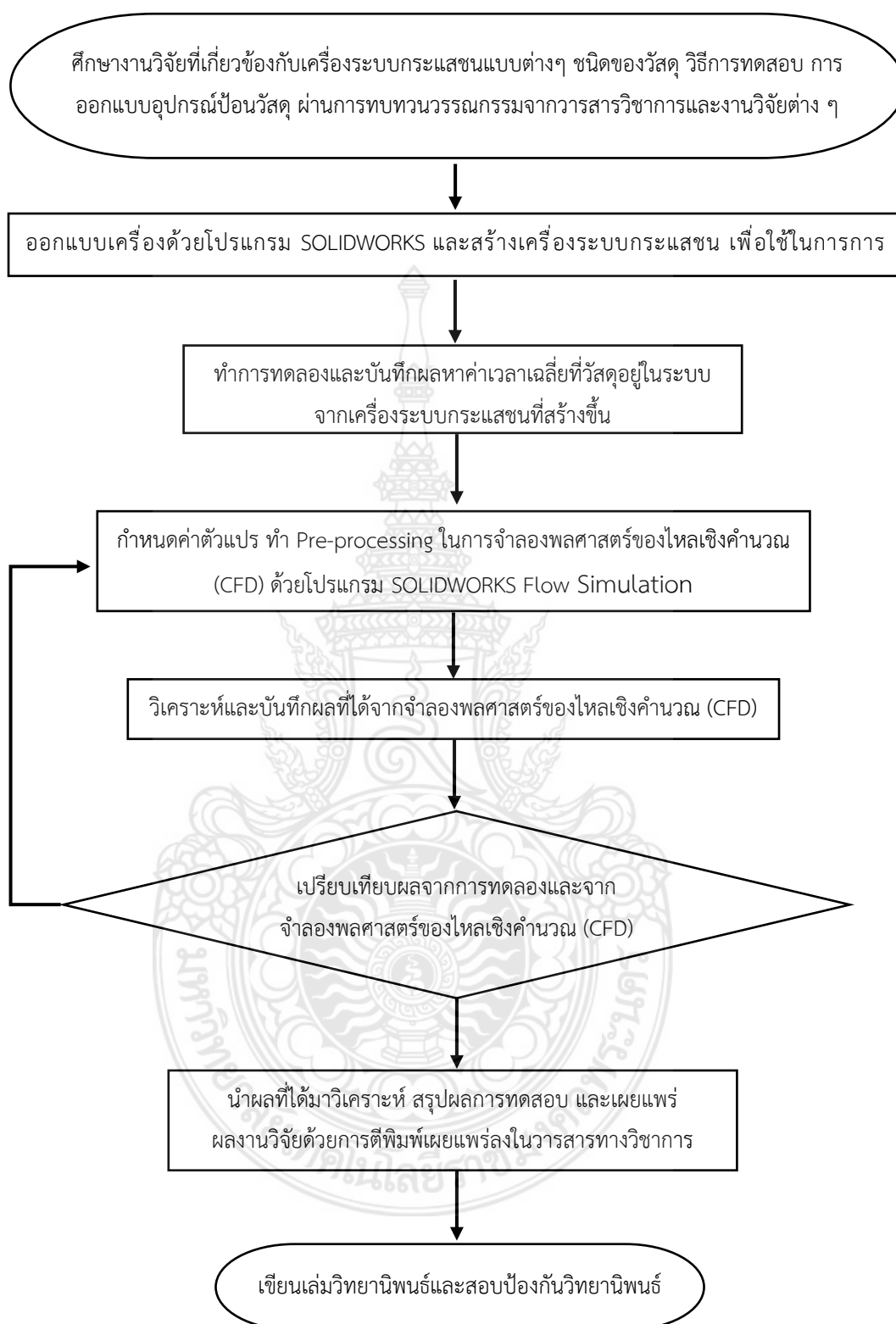
3.1.1.6 ศึกษาข้อมูลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation กระบวนการทำ Pre-processing ที่ต้องให้ความสำคัญ เช่น การกำหนด Materials Properties, การทำ Element Mesh control

3.1.1.7 เปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองเครื่องระบบกระแสและจากจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

3.1.1.8 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ สรุปผลการทดสอบ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

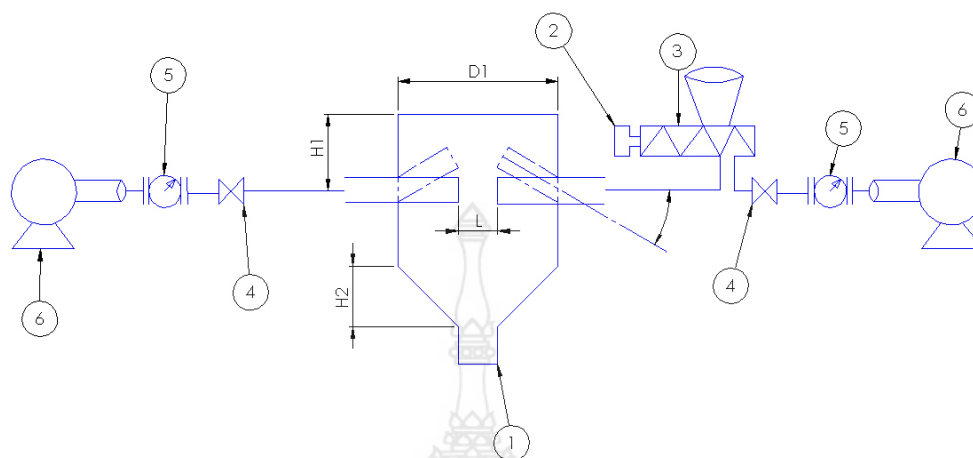
3.1.1.9 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการ

3.1.1.10 สอบป้องกันวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.1 แผนภาพการจำลองพลศาสตร์ของไหลเทียบกับการทดลอง

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย



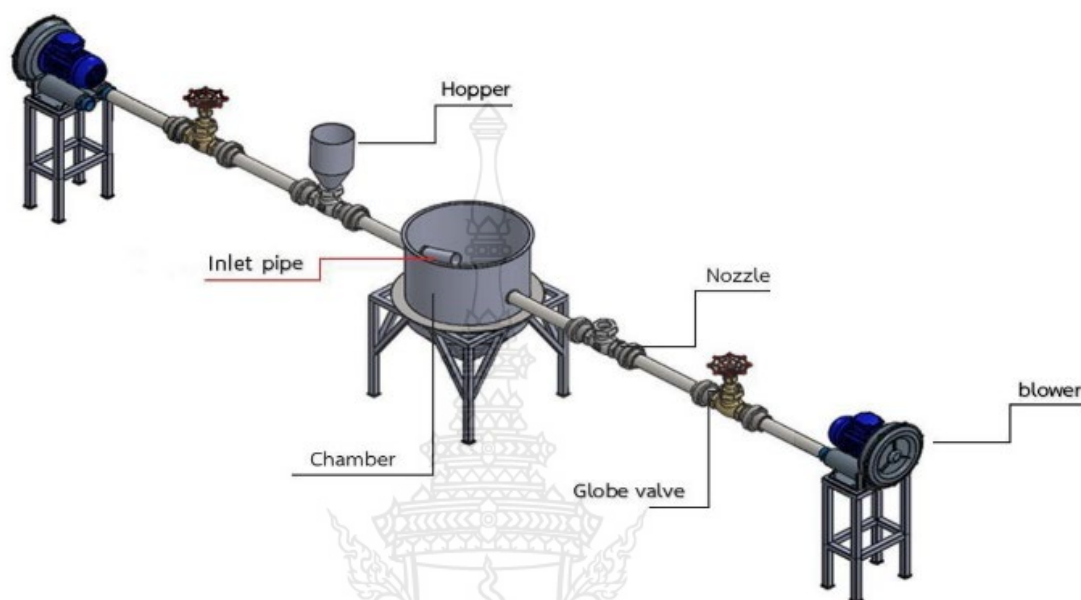
รูปที่ 3.2 แผนผังของเครื่องอบแห้งกระแสนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย จากรูปที่ 3.2 มีดังนี้

1. ห้องอบแห้ง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.8 เมตร (ท่อขนาด 2 นิ้ว) ท่อที่ยื่นเข้าตรงระยะห่างการชนระหว่างท่อ 15 cm. ที่ป้อนตรงจากฮอปเปอร์
2. มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนสายพานสายพานควบคุมอัตราการป้อนได้
3. ชุดป้อนวัสดุแบบสายพานควบคุมอัตราการป้อนโดยใช้แรงดันที่มอเตอร์ไฟฟ้า
4. โกลบวาล์ว (Globe valve) ขนาด DN 50mm จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าของระบบกระแสน
5. เครื่องวัดความเร็วลมและอุณหภูมิ ยี่ห้อ Tasi รุ่น TA-8163 ช่วงความเร็วลมที่สามารถวัดได้ 0.3 – 30 m/s ค่าความละเอียดของความเร็วลม 0.1 m/s ค่าความแม่นยำ 5% +/- 0.1 m/s
6. พัดลมความดันสูง ริงโบลเวอร์ (Ring blower) ยี่ห้อ SHINI รุ่น RB-310 จำนวน 2 เครื่อง ให้กำลังที่ 1 แรงม้า 3 เฟส กระแส 1.83 A สร้างปริมาตรลมสูงสุด 2.8 m³/min ความเร็วรอบสูงสุดที่ 2,800 รอบต่อนาที

แผนผังของเครื่องระบบกระแสน ที่ใช้ในงานทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย ริงโบลเวอร์ (Ring blower) ยี่ห้อ SHINI รุ่น RB-310 จำนวน 2 เครื่อง โกลบวาล์ว (Globe valve) ขนาด DN 50mm จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าของระบบกระแสน ถึงปล่อยวัสดุอนุภาค (Hopper) รับวัสดุที่ตกลงมาจากสายพานลำเลียงเพื่อเข้าสู่ระบบ ห้องระบบ (Chamber) ทำจากแผ่นเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร ท่ออากาศเข้า (Inlet pipe) ระยะห่างระหว่างปลายท่อเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยท่อทางเข้าทั้งสองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร เครื่องซึ่ง

น้ำหนักดีจิตอลสามารถชั่งของน้ำหนักได้สูงสุดถึง 5 กิโลกรัม มีความละเอียด 1 กรัม รองรับ 4 หน่วย
วัดมาตรฐาน คือ กรัม ปอนด์ ออนซ์ และกิโลกรัม ขนาด 22×16 เซนติเมตร

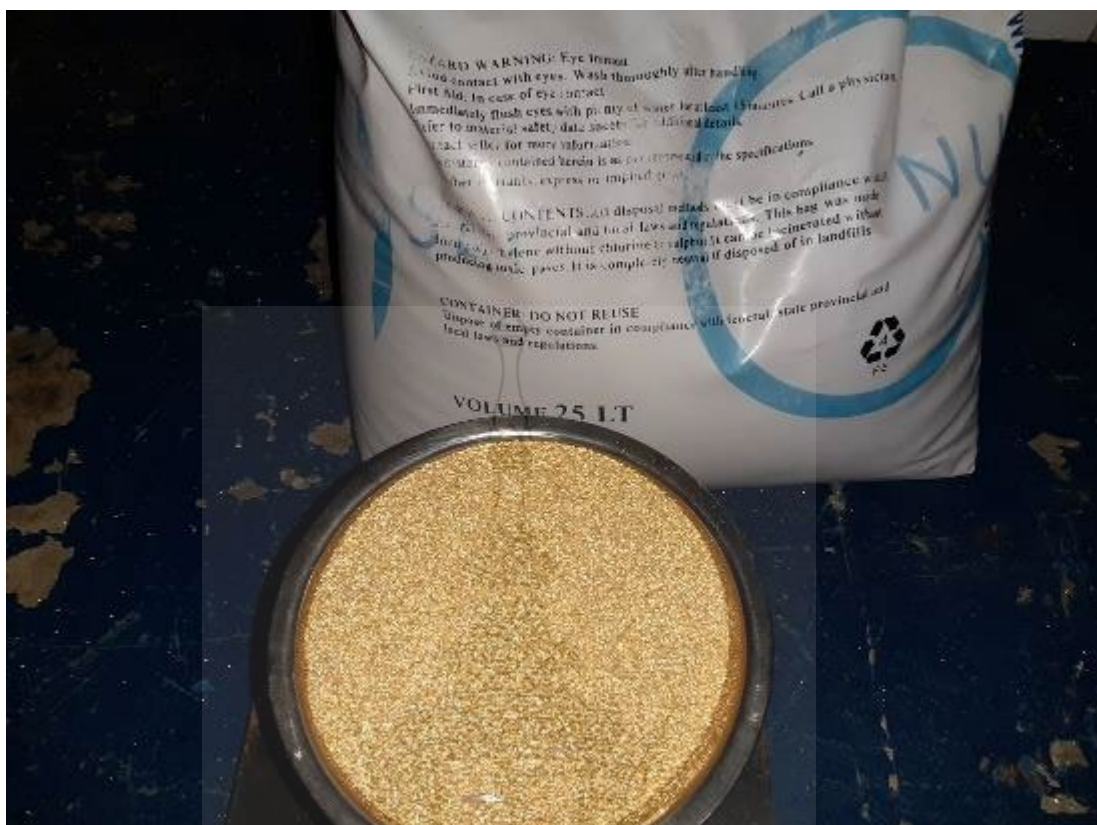


รูปที่ 3.3 แบบ 3มิติ ของเครื่องอบแห้งกระแสขน

อุปกรณ์ป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียง (Belt conveyor) ที่สามารถควบคุมอัตราการป้อนวัสดุ โดยการปรับความเร็วรอบของสายพานลำเลียงด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ควบคุมซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าว คือ Dimmer ประเภท DC 12 – 24 โวลต์ 30 แอมป์ Dimmer อินพุต DC 12 – 24 โวลต์เอาท์พุต 1 ช่อง 360 วัตต์ 12 - 24 โวลต์ (0 - 30 แอมป์) การใช้พลังงานคงที่ 1 วัตต์ ขนาดประมาณ 85x65x20 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการทำงาน -20 ~ 60 องศาเซลเซียส สำหรับกำหนดอัตราการป้อนวัสดุ

3.1.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เม็ดเรซิน (Resin) ยี่ห้อฮิวโอเซป รุ่น FD100NA ความหนาแน่นประมาณ 1.275 g/ml เป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบระบบกระแสขน โดยเม็ดเรซินที่นำมาทดลองนั้นที่มีขนาดประมาณ 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีลักษณะเม็ดทรงกลมขนาดเล็กสีเหลืองโดยเม็ดเรซินนั้นจะมีความชื้นอยู่จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาทดลอง เพราะจะทำให้เม็ดเรซินจะเกาะติดตามสายพานลำเลียงและผนังภายในท่อส่งวัสดุและห้องถึง ดังนั้นจึงนำเม็ดเรซินไปทำการไล่ความชื้นก่อนทำการทดลอง



รูปที่ 3.4 เม็ดเรซิน (Resin)

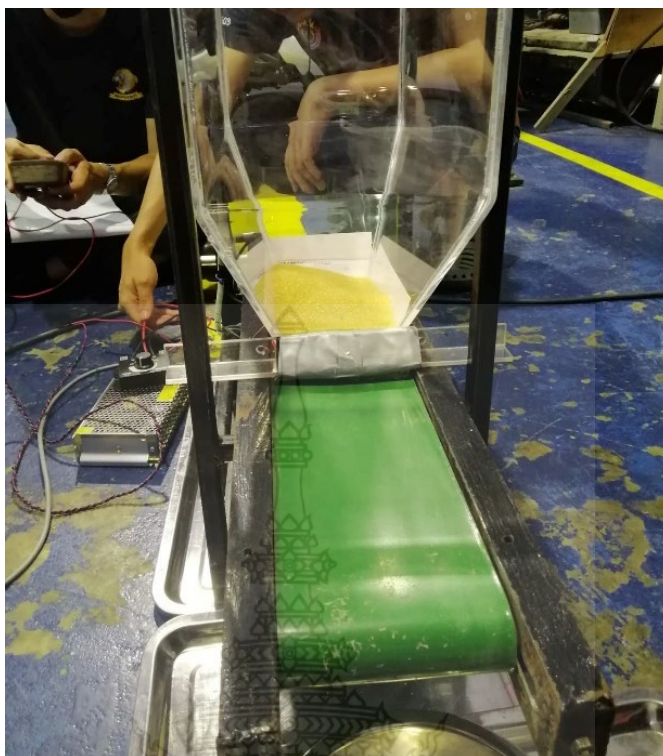
3.1.4 ชุดเครื่องป้อนวัสดุ

อัตราการป้อนวัสดุ นี้เป็นตัวแปรหนึ่งที่จะมีผลกระทบต่อค่าเวลาเฉลี่ยของเครื่องระบบกระแสขนแนวเอียงโดยอัตราการป้อนวัสดุที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้ค่าเวลาเฉลี่ยที่เหมาะสม โดยในการทดลอง จะใช้ระบบสายพานลำเลียงที่สามารถควบคุมอัตราการความเร็วรอบได้ เพื่อเข้ามาช่วยในการป้อนวัสดุให้มีความเที่ยงตรงสม่ำเสมอ สำหรับการทดลองเพื่อหาอัตราการป้อนวัสดุมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

จากรูปที่ 3.5 เครื่องป้อนวัสดุจะประกอบจะไปด้วยสายพานลำเลียงวัสดุพื้นเรียบ มอเตอร์ไฟฟ้า และ ถังใส่วัสดุเพื่อปล่อยลงสายพาน สามารถปรับอัตราการป้อนวัสดุได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า

1) มอเตอร์ไฟฟ้า

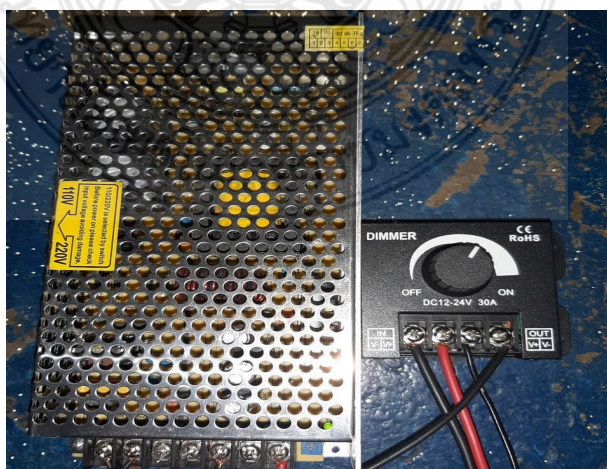
การป้อนวัสดุ สารกรองเรซิน หรือ เรซิน (Resin) เข้าสู่เครื่องระบบกระแสขนโดยใช้ อุปกรณ์ป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียง (Belt conveyor) ที่สามารถควบคุมอัตราการป้อนวัสดุโดย การปรับความเร็วรอบของสายพานลำเลียงด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ควบคุมซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้างกล่าว คือ Dimmer DC 12 – 24 โวลต์ 30 แอมป์ สำหรับการทดลอง ครั้งนี้ได้กำหนดอัตราการป้อนวัสดุไว้ที่ 50 60 และ 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 ชุดป้อนวัสดุแบบสายพานลำเลียง

2) ตัวควบคุมแบบปรับค่าได้

จากรูปที่ 3.5 Dimmer ประเภท DC 12 - 24 โวลต์ 30 แอมป์ Dimmer อินพุต DC 12 - 24 โวลต์ เอาท์พุต 1 ช่อง 360 วัตต์ 12 - 24 โวลต์ (0 - 30 แอมป์) การใช้พลังงานคงที่ 1 วัตต์ ขนาดประมาณ 85x65x20 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการทำงาน -20 ~ 60 องศาเซลเซียส



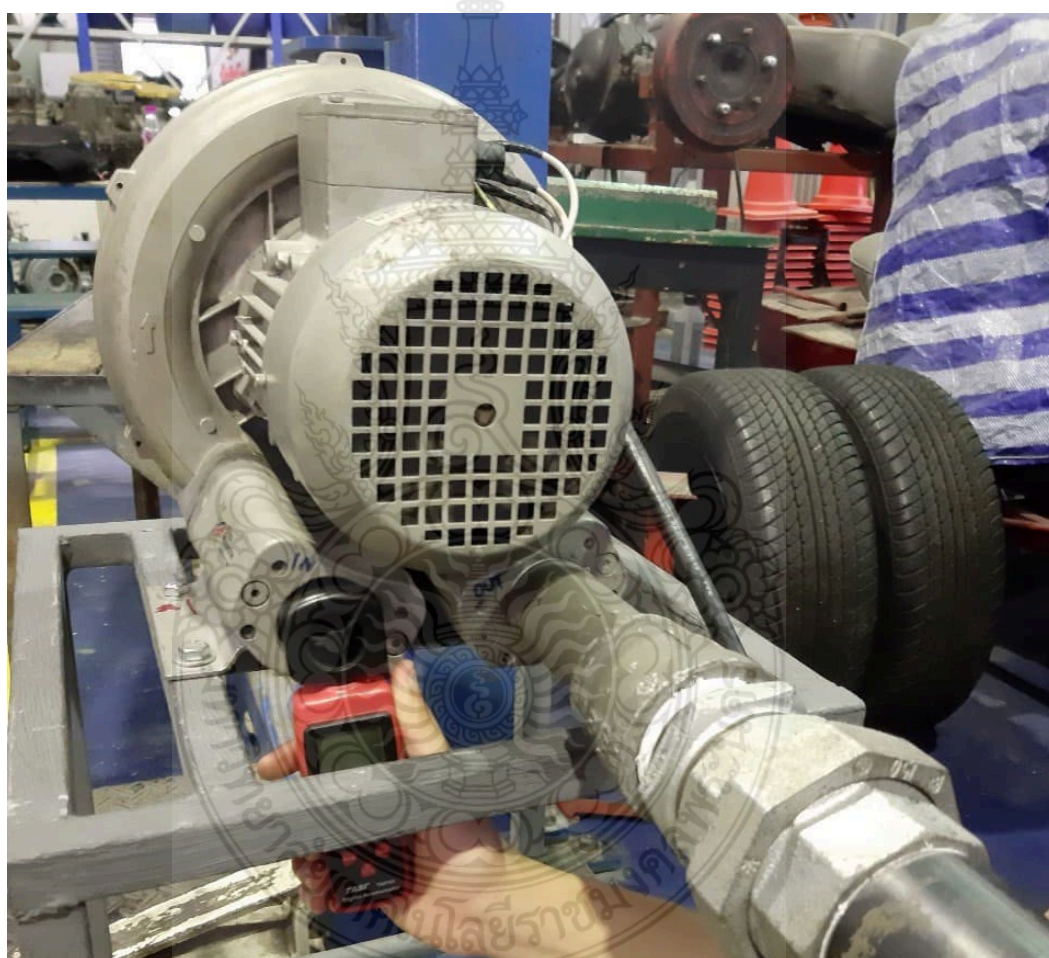
รูปที่ 3.6 Power supply and Dimmer

3.2 เงื่อนไขและวิธีการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้มีเงื่อนไขทั้งหมด 27 เงื่อนไข จึงกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่จะมีผลกระทบต่ออัตราค่าเฉลี่ยของเวลา โดยจะมีการควบคุมและปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ตามรายละเอียดดังนี้

3.2.1 กำหนดให้อัตราการไหลของอากาศขาเข้า

เท่ากับ 20, 25 และ 30 เมตร/วินาที



รูปที่ 3.7 การวัดความเร็วอากาศขาเข้า

ความเร็วอากาศขาเข้าสามารถปรับได้โดยปรับที่โกลบวาล์ว (Globe valve) เทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร็วลม ในรูปที่ 3.7

3.2.2 กำหนดให้อัตราการป้อนวัสดุ

เท่ากับ 50 60 และ 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง โดยการปรับความเร็วรอบ ของชุดป้อนวัสดุแบบ สายพานลำเลียงที่ Dimmer ปรับแรงดันไฟฟ้า ในรูปที่ 3.6

3.2.3 กำหนดให้ท่อมุมมองศาในการป้อน

ที่ 0, 5 และ 10 องศา



รูปที่ 3.8 ท่อมุมมองศาในห้องระบบ

มุมมองศาต่อในการป้อน สามารถกำหนดได้โดยเปลี่ยนชุดต่อต้านโน ที่สร้างให้เปลี่ยนชุดปลายท่อเอียงต้านโนได้ ในรูปที่ 3.8

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) กำหนดตัวแปรในการเก็บข้อมูลตามเงื่อนไขที่ทำการทดลอง
- 2) เปิดสวิตช์เครื่องโบลเวอร์และทำการปรับความเร็วอากาศหน้าท่อทางเข้าให้ได้ตามที่กำหนดโดยการปรับโกลบวาล์วที่แต่ละด้านของท่อส่งอากาศขาเข้า
- 3) ทำการป้อนเม็ดเรซินที่เตรียมไว้ตามอัตราการป้อนตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้กำหนดไว้อย่างต่อเนื่อง
- 4) เมื่อระบบอยู่ในภาวะที่คงตัว จะทำการหยุดป้อนเม็ดเรซินและปิดสวิตช์เครื่องโบลเวอร์พร้อมปิดรูทางออกอากาศของถังด้านล่าง ในระหว่างที่โบลเวอร์และเครื่องป้อนวัสดุหยุดทำงานนั้นจะมีเม็ดเรซินบางส่วนตกค้างอยู่ภายในระบบ
- 5) ทำการเปิดสวิตช์เครื่องโบลเวอร์อีกครั้งเพื่อเป่าเม็ดเรซินที่ตกค้างอยู่ภายในของระบบออกมาให้หมด
- 6) นำเม็ดเรซินที่ตกค้างอยู่ในระบบไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าผลการทดลอง
- 7) นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปทำการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบตามสมการ

3.5.1 การหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

ขั้นตอนแรกจะกำหนดค่าตัวแปรในการทดลองเก็บข้อมูลทำการปรับตั้งระยะห่างการชนที่กำหนดในท้องก่อนการเดินเครื่อง จากนั้นเปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงและทำการปรับความเร็วของอากาศในท่อส่งวัสดุให้ได้ตามที่กำหนด จากนั้นทำการป้อนเม็ดเรซินตามอัตราไหลที่กำหนดเข้าสู่เครื่องอย่างต่อเนื่องและรอจนกว่าระบบอยู่ในสภาวะคงตัว จากนั้นจะหยุดการป้อนเม็ดเรซินเข้าเครื่องพร้อมกับปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงพร้อมกันอย่างทันที ซึ่งในขณะนี้จะมีเม็ดเรซินคงอยู่ในท่อวัสดุและถัง ซึ่งต้องนำเม็ดเรซินดังกล่าวออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณของเม็ดเรซินที่คงอยู่ในระบบ ซึ่งทำได้โดยนำภาชนะรองรับที่ชั่งน้ำหนักแล้วมาคอยรองรับเม็ดเรซินตรงบริเวณทางออกของถัง จากนั้นเปิดเครื่องเป่าลมแรงดันสูงเพื่อให้อากาศพาเม็ดเรซินที่ตกค้างอยู่ในระบบออกมาและนำเม็ดเรซินที่รองรับได้ทั้งหมดมาชั่งน้ำหนักก็จะทำให้รู้ถึงปริมาณของเม็ดเรซินที่คงอยู่ในระบบ นำค่าปริมาณของเม็ดเรซินดังกล่าวมาคำนวณหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ อย่างไรก็ตามการหาปริมาณวัสดุที่คงอยู่ในระบบนั้น [5] ได้แนะนำไว้ว่าการหาปริมาณดังกล่าว อาจมีความแม่นยำค่อนข้างน้อย เนื่องจากต้องหยุดป้อนวัสดุเข้าระบบและหยุดเดินเครื่องเป่าลม แรงดันสูงพร้อมกันอย่าง

ทันทีทันใด ซึ่งในทางปฏิบัติอาจทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงควรทดลองไม่ น้อยกว่า 3 ครั้งซ้ำที่แต่ละเงื่อนไขสภาวะการทำงาน



รูปที่ 3.9 การชั่งน้ำหนักของเม็ดเรซินที่ตกค้างในระบบ

นำเม็ดเรซินที่รองรับได้ทั้งหมดมาชั่งน้ำหนักก็จะทำให้รู้ถึงปริมาณของเม็ดเรซินที่คงอยู่ในระบบ นำค่าปริมาณของเม็ดเรซินดังกล่าวมาคำนวณหาค่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ ในรูปที่ 3.9

3.4 วิธีดำเนินการจำลอง

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) รูปแบบในการศึกษาและวิจัยในงานวิจัยนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์และความสามารถทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองสนามการไหลที่ซับซ้อน เพื่อทำนายพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำนายระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Residence time) ในระบบกระแสน โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองส่วน คือ การทดลองจากเครื่องกระแสน และจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

3.4.1 แบบจำลองกระบวนการ

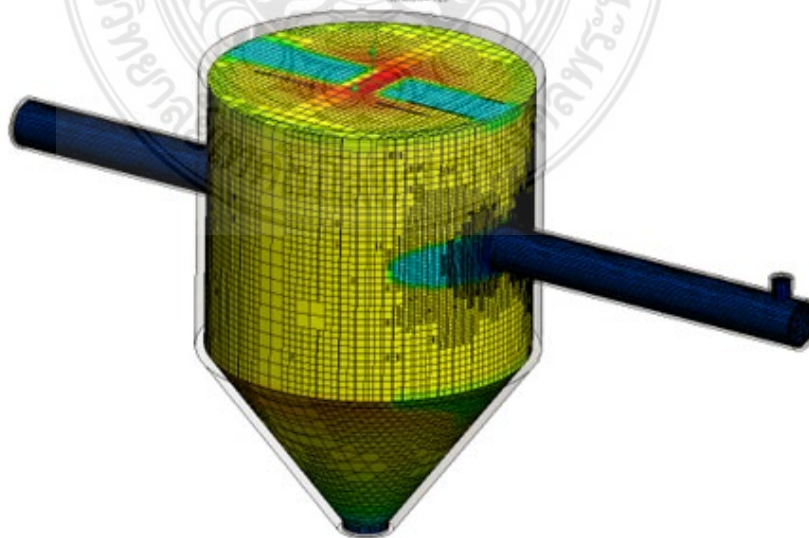
สมมติฐานของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้

1. ของไหลไม่มีความหนืด
2. อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเดียวกันทั้งหมด
3. ไม่พิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค
4. ไม่พิจารณาการการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอนุภาคกับอนุภาค

3.4.2 การกำหนดตัวแปรการจำลอง

ในการจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation บนเครื่อง Dell Workstation Xeon E3-1505M v6 3.00GHz 4 Cores 8 Threads แรม 32 GB โดยช่วงแรกกำหนดค่าตัวแปรเหมือนกันกับการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลและใช้ประโยชน์จากการจำลองเพิ่มเติมตัวแปรเกินขอบเขตช่วงการทำงานจริงได้อีก ในการจำลองนี้ได้ตัวแปรอีก 2 ค่า เช่น ปรับขนาดความสูงของห้อง Chamber ขนาด 40 ซม. ขนาด 50 ซม. และขนาด 60 ซม. อีกตัวแปรเป็นการกำหนดเม็ด Particle ขนาด Size 0.2, 0.4 และ 0.8 มม.

แบบจำลองที่ถูกแบ่งโครงสร้าง Mesh ใน SOLIDWORKS Flow Simulation 2023 โดย การศึกษานี้ได้เลือกการใช้จำนวน Mesh ที่เหมาะสมที่สุดจาก ระดับความละเอียดในโปรแกรม[21] ด้วยวิธีการเปรียบเทียบความแตกต่างจากผลลัพธ์ที่ได้ ระหว่าง 4 ระดับความละเอียดที่ 17,959 , 42,697 , 232,161 และ 577,031 เซลล์ ความแตกต่างในแง่ของความเร็วของของไหลที่ทางออกของแบบจำลอง ซึ่งต่างกันเพียง 6% ดังนั้น เพื่อลดเวลาจำลอง จำนวน Mesh 232,161 เซลล์จึงถูกนำมาใช้ในการจำลอง โครงสร้าง Mesh ของเครื่องกระแสดุน แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้าง Mesh โมเดลจำลอง 3 มิติ

3.4.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

เงื่อนไขเริ่มต้น

$$t = 0, u = 0, v = 0, w = 0$$

เงื่อนไขของของไหลที่ทางเข้า

ความเร็วอากาศ m/s

ความเข้มข้นของความชื้นปน 5%

เงื่อนไขของอนุภาค

อัตราการป้อนอนุภาค $\text{kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

อุณหภูมิของอนุภาค $^{\circ}\text{C}$

ขนาดของอนุภาค μm

เงื่อนไขการไหลออกนอกขอบเขต

ค่าความดันบรรยากาศ (0.1013 MPa)

เงื่อนไขที่ผนัง

ผนังพิจารณาแบบไม่ลื่น

เงื่อนไขการจำลอง

เงื่อนไข	การทดลอง	การจำลอง
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางอนุภาค (mm)	0.4	0.2, 0.4, 0.8
ขนาดความสูงห้องอบแห้ง (cm)	50	40, 50, 60
ความเร็วของอากาศขาเข้า (m/s)	20, 25, 30	
อัตราการป้อนของวัสดุ (kg/h)	50, 60, 70	

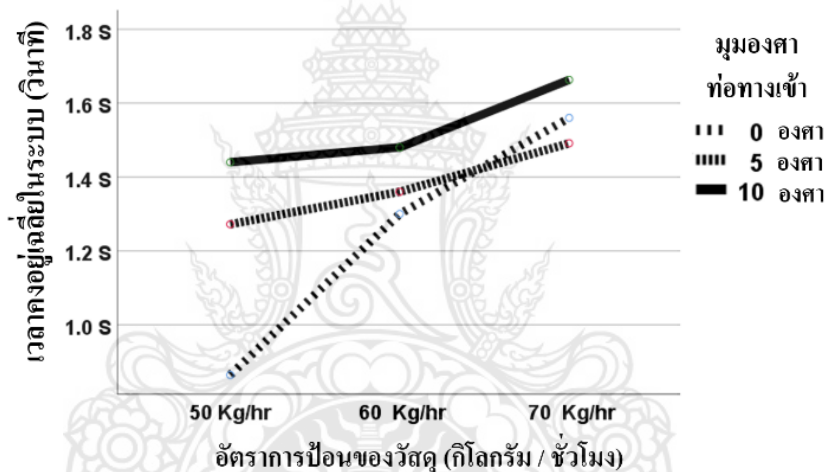
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

หลังจากการทดลองป้อนวัสดุ (เม็ดเรซิน) เข้าสู่ระบบกระแสช่น ด้วยสภาวะที่แตกต่างกันโดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาคในเครื่องกระแสช่นได้แก่ ความเร็วของอากาศขาเข้า มุมองศาท่อ อัตราการป้อนวัสดุ ขนาดของห้องอบแห้งและขนาดของวัสดุอนุภาค

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยในระบบกระแสช่น



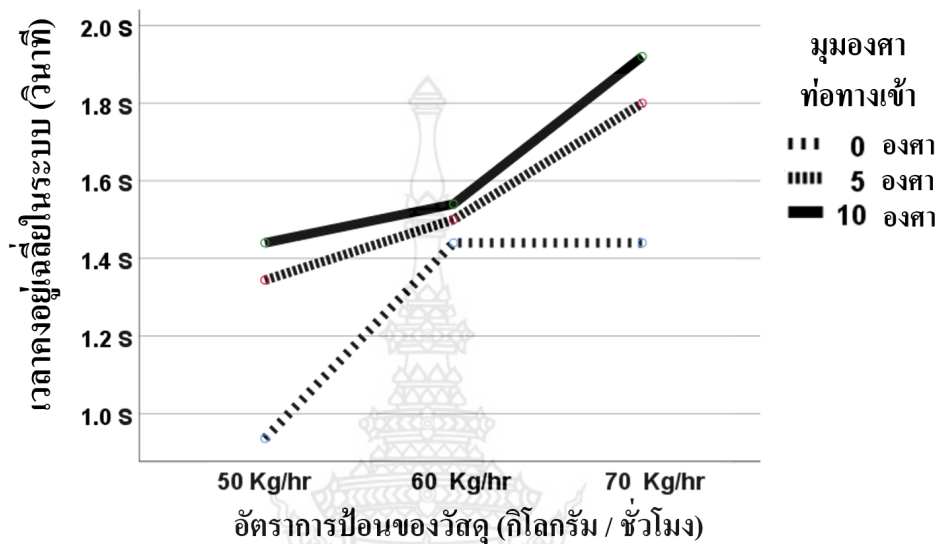
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเมื่อป้อนวัสดุทางเดียวที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที

รูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 แสดงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบกระแสช่น เมื่อความเร็วอากาศขาเข้าคงที่ จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการป้อนที่สูงขึ้นจะทำให้มีวัสดุคงอยู่ในระบบมากขึ้น วัสดุจึงมีเวลาอยู่ในห้องกระแสช่นเป็นเวลาเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อมุมองศาของท่อทางเข้าเอียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก

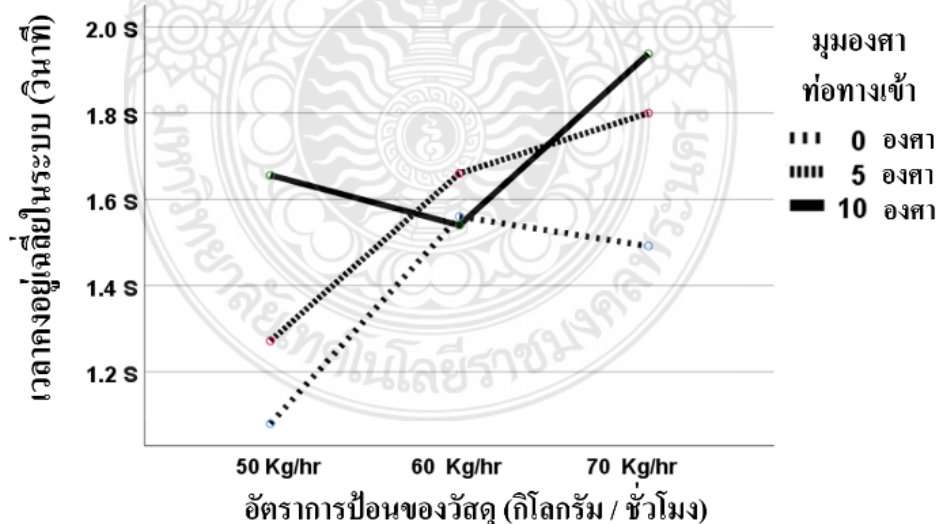
จากที่มุมองศาที่สูงขึ้นช่วยทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสช่นและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้ง ซึ่งจะทำให้วัสดุมีเวลาอยู่ในห้องกระแสช่นเป็นเวลาเพิ่มมากขึ้น

รูป 4.3 กรณีเงื่อนไขการทดลองของความเร็วของอากาศขาเข้า ที่ 30 เมตร/วินาที อัตราการป้อนที่ 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง ผลของการทดลองมีค่าไม่เป็นไปตามแนวโน้มเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ

ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเก็บวัสดุที่ค้างอยู่ในระบบนั้นต้องหยุดระบบพร้อมกันได้แก่ ความเร็วของอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุจึงอาจเกิดความผิดพลาดจากการหยุดไม่พร้อมกันจึงส่งผลให้ผลการทดลองที่เงื่อนไขนี้ไม่เป็นไปตามแนวโน้ม

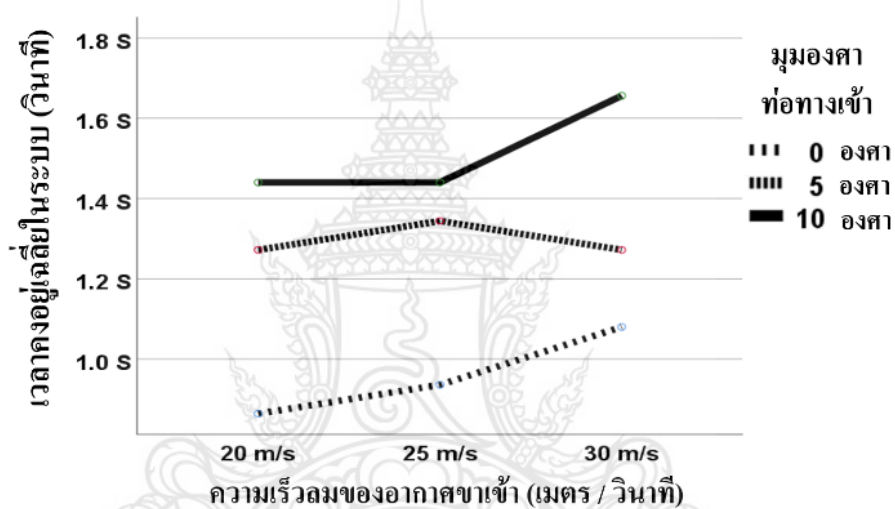


รูปที่ 4.2 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเมื่อป้อนวัสดุทางเดียวที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที

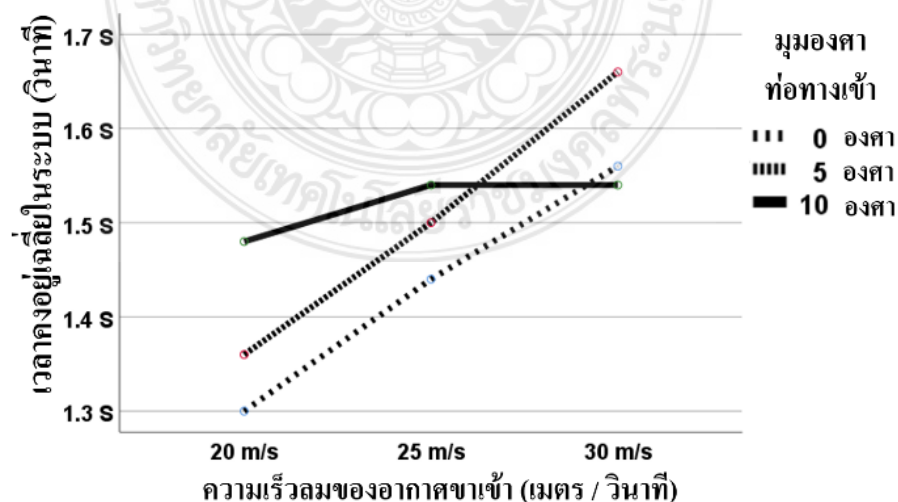


รูปที่ 4.3 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเมื่อป้อนวัสดุทางเดียวที่ความเร็วของอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที

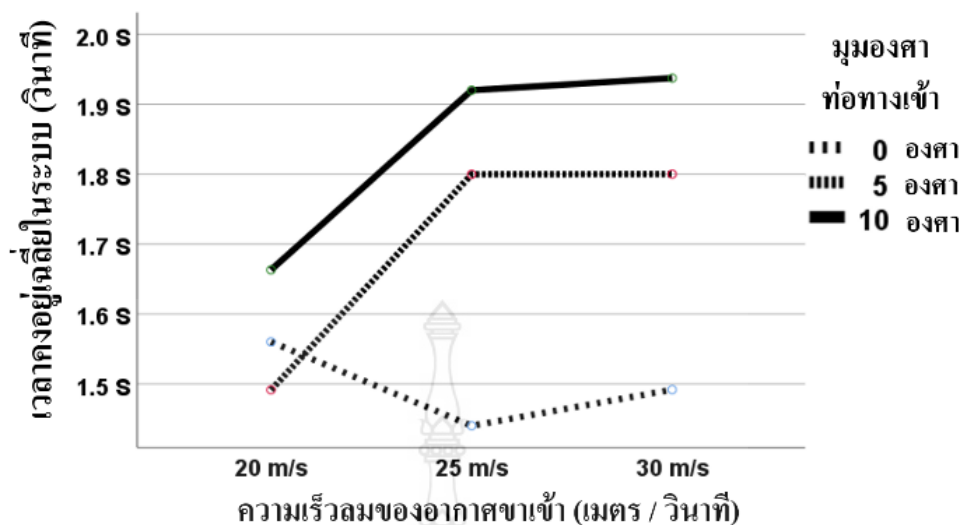
รูปที่ 4.4 4.5 และ 4.6 แสดงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบกระแสลมเมื่ออัตราการป้อนวัสดุคงที่ จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วอากาศขาเข้าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มโมเมนตัมให้กับวัสดุสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสของไหลตรงกันข้ามเข้าไปได้ วัสดุจึงมีเวลาคงอยู่เฉลี่ยในระบบได้นานขึ้น ขณะที่เมื่อมุมมองขาของท่อทางเข้าเอียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งเหตุผลได้อธิบายไว้แล้ว โดยในงานวิจัยนี้ค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีค่ามากที่สุดที่ 1.93 วินาที ที่เงื่อนไขความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที อัตราการป้อนวัสดุ 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง และมุมมองขาของท่อทางเข้าที่ 10 องศา



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 50 กิโลกรัม / ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบเมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 60 กิโลกรัม / ชั่วโมง



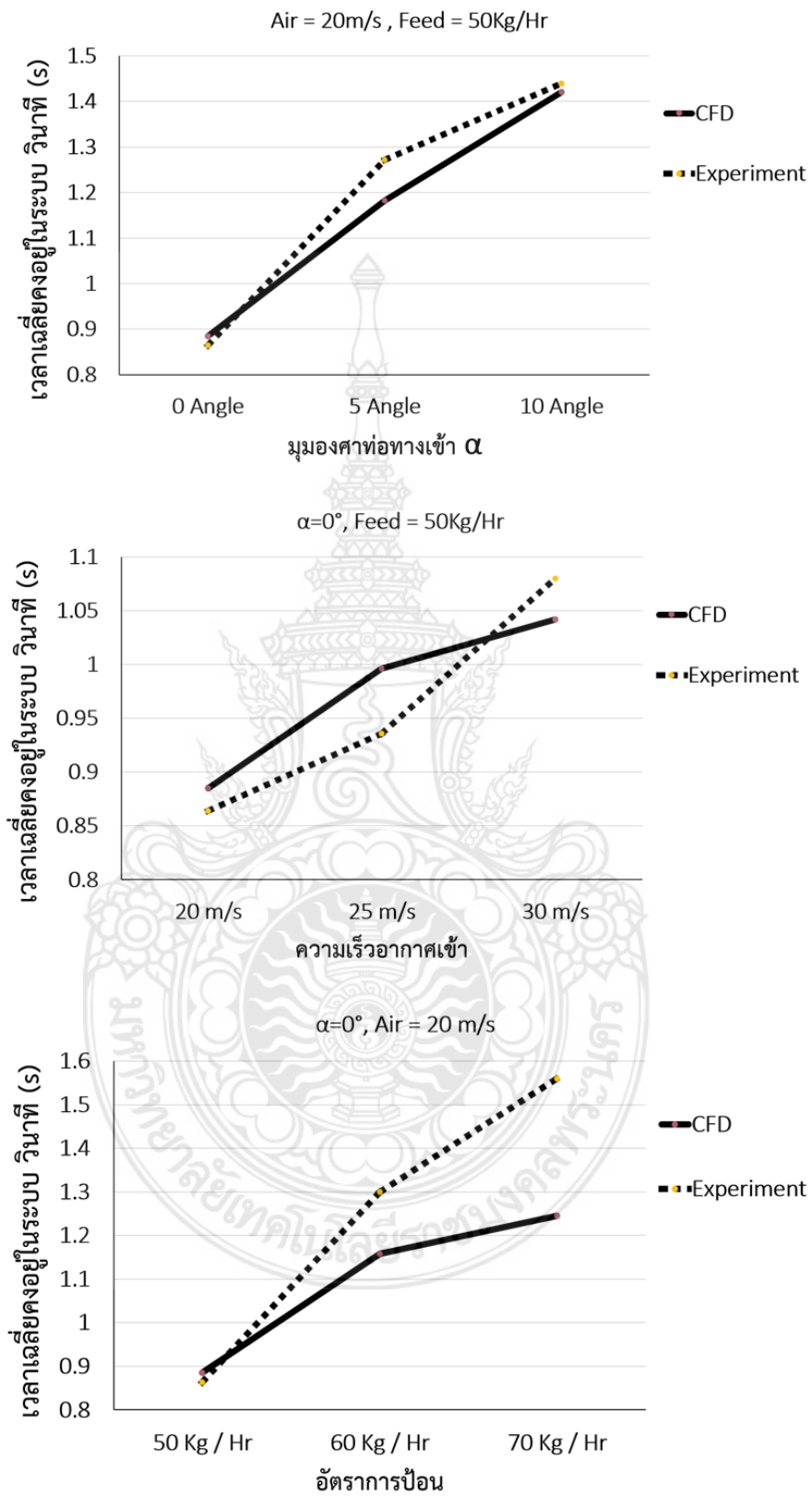
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยวัสดุอยู่ในระบบ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 70 กิโลกรัม / ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.4 4.5 และ 4.6 แสดงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบกระแสขนเมื่ออัตราการป้อนวัสดุคงที่ จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มโมเมนตัมให้กับวัสดุสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสของไหลตรงกันข้ามเข้าไปได้ วัสดุจึงมีเวลาคงอยู่เฉลี่ยในระบบได้นานขึ้น ขณะที่เมื่อมุมมองขาของท่อทางเข้าเอียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งเหตุผลได้อธิบายไว้แล้ว โดยในงานวิจัยนี้ค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีค่ามากที่สุดที่ 1.93 วินาที ที่เงื่อนไขความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที อัตราการป้อนวัสดุ 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง และมุมมองขาของท่อทางเข้าที่ 10 องศา

4.2 ผลการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

4.2.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง

จากรูปที่ 4.7 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อมุมมองขาของท่อทางเข้าเอียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่มุมมองขาที่สูงขึ้นช่วยทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสขนและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้ง ซึ่งจะทำให้วัสดุมีเวลาอยู่ในห้องกระแสขนเป็นเวลาเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเร็วอากาศขาเข้าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มโมเมนตัมให้กับวัสดุสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสของไหลตรงกันข้ามเข้าไปได้ วัสดุจึงมีเวลาคงอยู่เฉลี่ยในระบบได้นานขึ้น ขณะที่เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้น

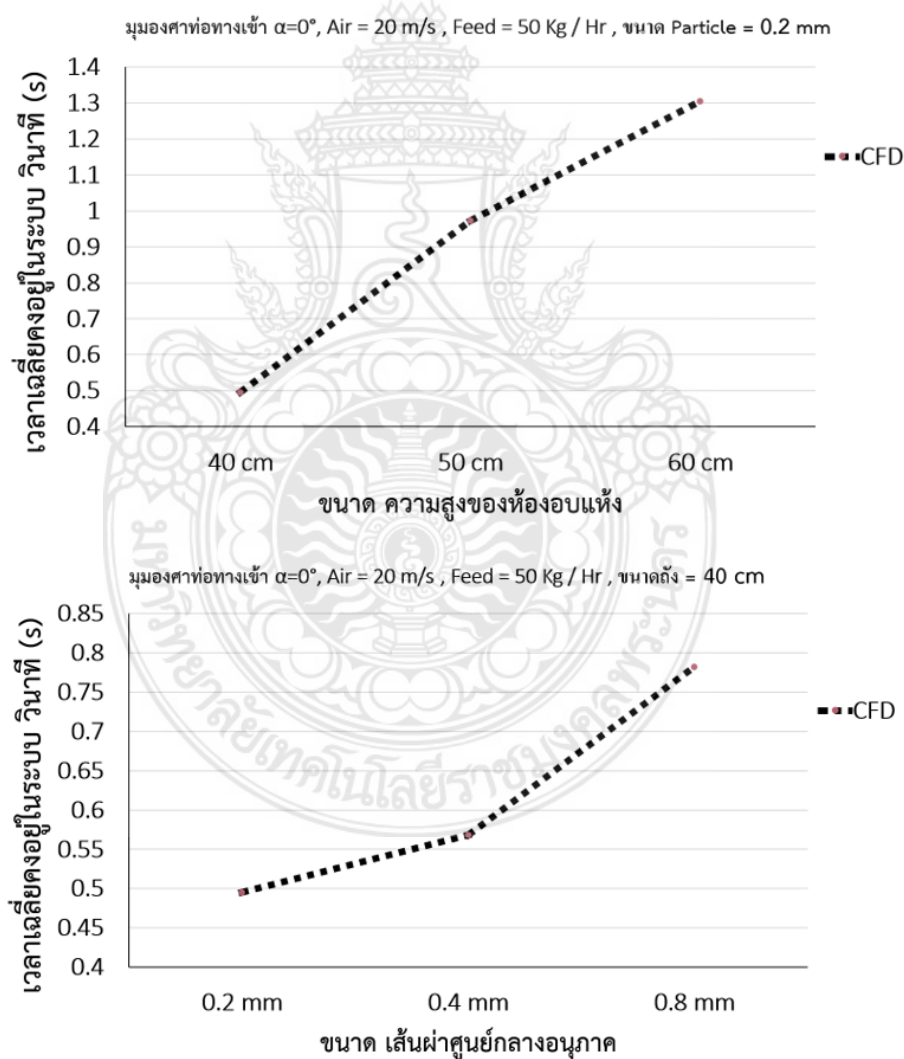


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการจำลอง (CFD) กำหนดตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วของอากาศเข้า อัตราการป้อนวัสดุ มุมองศาท่อในการป้อน

ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการป้อนที่สูงขึ้นจะทำให้มีวัสดุคงอยู่ในระบบมากขึ้น วัสดุจึงมีเวลาอยู่ในห้องกระแสดวนเป็นเวลานานมากขึ้น นอกจากนี้ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการจำลอง พบว่าค่าที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

4.2.2 ผลการจำลองเพิ่มเติมในส่วนของผลกระทบของขนาดความสูงของห้องอบแห้งและขนาดของอนุภาค

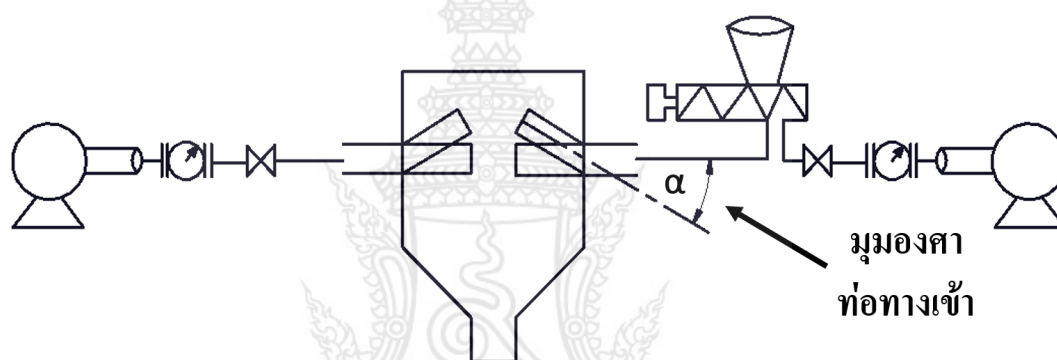
ในการจำลองนี้ได้เพิ่มตัวแปรอีก 2 ค่า ได้แก่ปรับขนาดความสูงของห้องอบแห้ง ขนาด 40 50 และ 60 cm และตัวแปร ขนาดของวัสดุอนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 0.4 และ 0.8 mm



รูปที่ 4.8 ผลของขนาดความสูงของขนาดห้องอบแห้งและขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบกระแสดวน

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลกระทบของตัวแปรต่างๆจากการจำลอง ที่มีต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบกระแส จากผลการจำลองพบว่า เมื่อขนาดของถังสูงขึ้นส่งผลให้เวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ให้กับวัสดุอนุภาคให้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อขนาดของวัสดุอนุภาคมีขนาดที่มากขึ้น ทำให้วัสดุอนุภาคมีค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยในระบบได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของความเฉื่อยของวัสดุอนุภาค วัสดุอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีความเฉื่อยเพิ่มขึ้น จะทะลุไปยังกระแสการไหลตรงข้ามได้มากขึ้น จึงทำให้มีระยะการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าคงอยู่ของวัสดุที่เพิ่มมากขึ้น

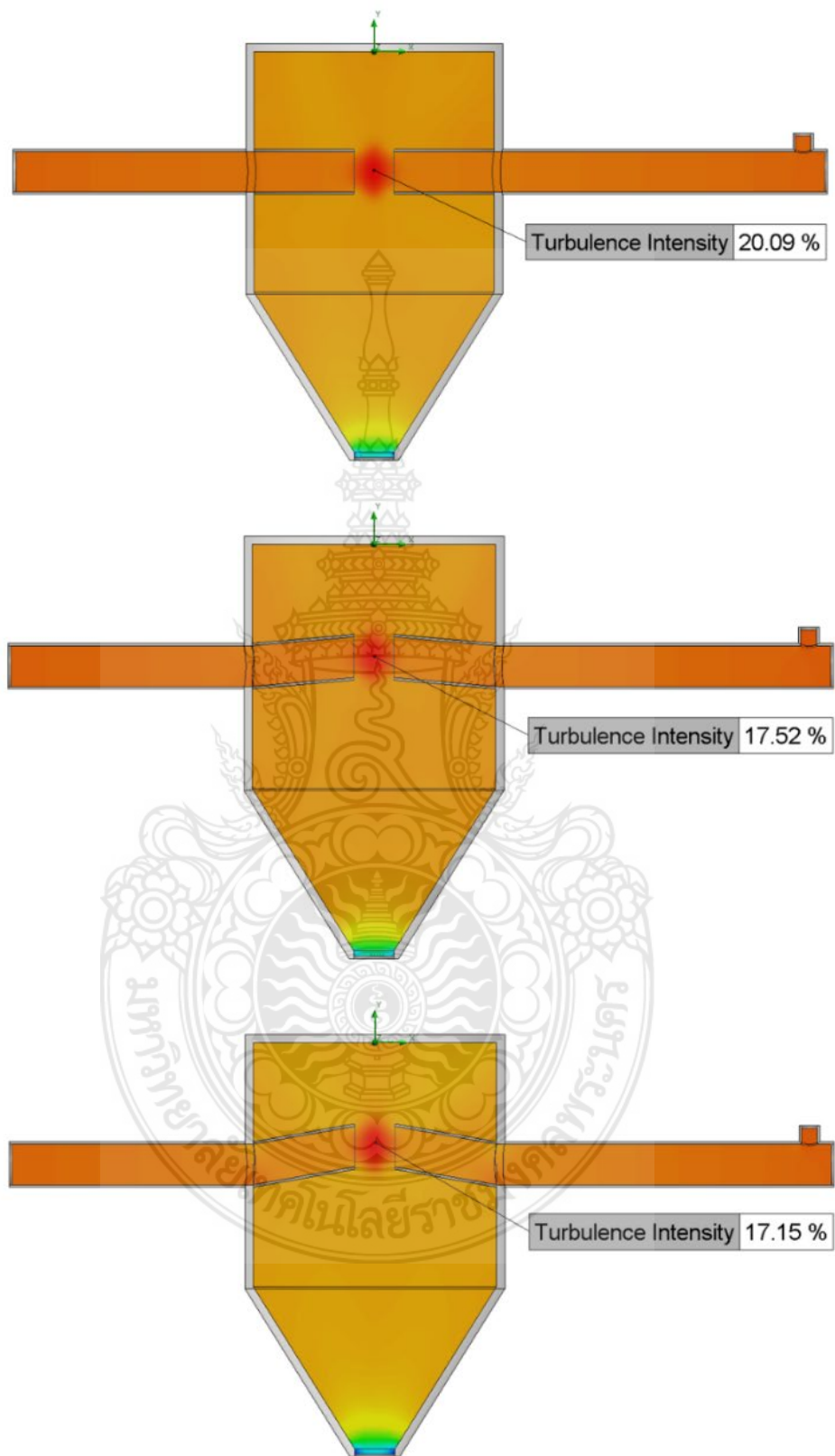
4.2.3 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศและอนุภาค



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งท่อด้านในที่มีการปรับมุมมอง

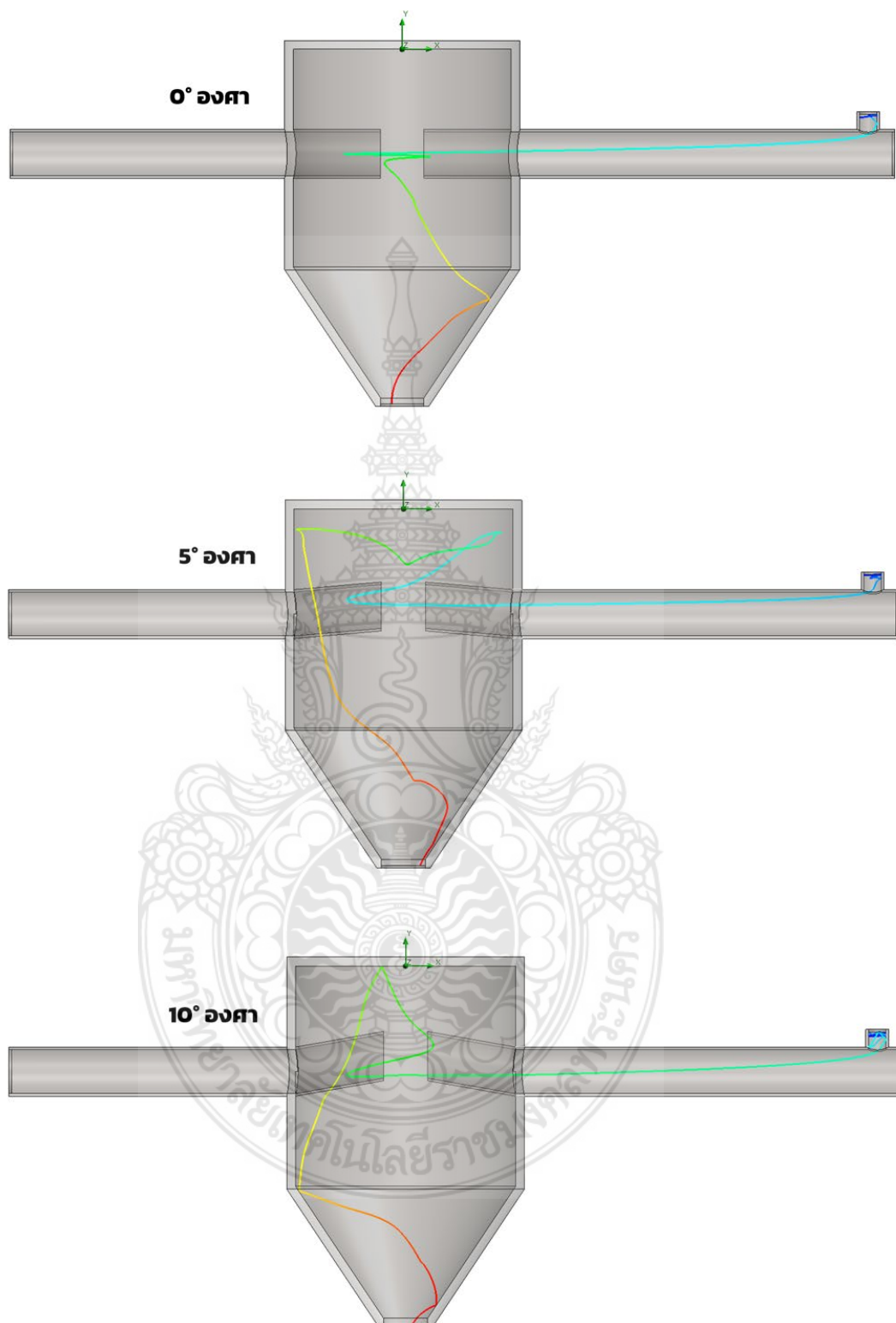
จากรูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งการปรับมุมมอง และรูปที่ 4.10 แสดงความปั่นป่วนของการไหลของอากาศ ในห้องกระแสจะเห็นได้ว่าที่บริเวณการชนของกระแสอากาศทั้งสองจะอยู่ตรงกลางห้องกระแส บริเวณนี้จะเกิดความปั่นป่วนสูงสุดอันเนื่องมาจากการปะทะกันของกระแสการไหลของอากาศ ซึ่งผลของความปั่นป่วนของกระแสการไหลของอากาศช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลสารที่สูงขึ้น จากการศึกษาจะเห็นว่าที่มุมมอง 0° องศา ความเข้มของความปั่นป่วนจะมีค่าสูงสุดและจะมีแนวโน้มลดลงเพื่อมุมมองของท่อที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าวัสดุอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ทะลุไปยังกระแสการไหลตรงข้าม แล้วเคลื่อนที่ย้อนกลับและหลุดออกจากบริเวณการชน จากการจำลอง[20] จะพบว่าเมื่อมุมมองของท่อที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออนุภาคหลุดออกจากบริเวณการชน อนุภาคจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ข้างบนของห้องกระแส ซึ่งส่งผลให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ได้เพิ่มมากขึ้นก่อนที่จะหลุดออกจากห้องกระแส ซึ่งส่งผลให้อนุภาคมีค่าเวลาคงอยู่ในระบบได้นานมาก



รูปที่ 4.10 ความปั่นป่วนของอากาศในระบบกระแสระหว่างท่อมุมมองตาในการป้อนที่ 0, 5 และ

10 องศา



รูปที่ 4.11 การเคลื่อนที่ของอนุภาคเดียวในระบบบอบแห้งแบบกระแสน ระหว่างท่อมองศาในการ
ป้อนที่ 0°, 5° และ 10° องศา

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทดลองค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบกระแสชน การทดลองกระทำโดยใช้อัตราการป้อนวัสดุ 3 ค่า ได้แก่ 50 60 และ 70 kg/h ความเร็วอากาศขาเข้า 3 ค่า ได้แก่ 20 25 และ 30 m/s และมุมเอียงของท่ออากาศขาเข้าห้องกระแสชน 3 ค่า ได้แก่ 0° , 5° และ 10° จากการศึกษาพบว่า ที่ความเร็วอากาศขาเข้าคงที่ เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้น สำหรับที่อัตราการป้อนวัสดุคงที่ เมื่อความเร็วอากาศขาเข้าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อมุมของท่ออากาศขาเข้าเอียงเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบมีค่ามากที่สุดที่ 1.93 วินาที ที่เงื่อนไขการทดลอง อัตราการป้อนวัสดุ 70 kg/h ความเร็วอากาศขาเข้า 30 m/s และมุมของท่ออากาศขาเข้าที่ 10° สำหรับการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าการจำลองให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลอง ขณะที่เมื่อความสูงของห้องกระแสชนและขนาดของวัสดุอนุภาคเพิ่มขึ้นทำให้ค่าเวลาคงอยู่ของวัสดุอนุภาคในระบบกระแสชนมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

- 1) ห้องกระแสชนควรที่จะมีบริเวณที่สามารถสังเกตวัสดุในห้องอบแห้งได้เพราะจะได้ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุและทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลอง
- 2) ควรศึกษานำแบบจำลองความปั่นป่วนแบบอื่นเพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมและให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองให้มากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] ปฏิวัติ คมวชิรกุล. (2554). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบ พาหะลม. ปรินญาณิพนธ์ วศ.ม. (การจัดการทาง วิศวกรรม). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาลัยวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [2] ัญญาพร ปัตตาซารี, 2553, การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสำหรับวัสดุทางการเกษตร, วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร
- [3] Tamir, A., 1989, Process and phenomena in impinging-stream reactors, In Chemical Engineering Progress. V.85. pp, 53-61.
- [4] Kudra, T.; & Mujumdar, A.S. (1989).
- [5] Kitron, Y. and Tamir, A. 1988 “Performance of a coaxial gas-solid two impinging stream (TIS) reactor hydrodynamics, residence time distribution, and drying heat transfer. Industrial & Engineering Chemistry Research.
- [6] ร้อยตรีวุฒิมพงษ์ แต่งตี, 2554, การศึกษาความเป็นไปได้ ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเทคนิคกระแสน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [7] Min Du, Changsui Zhao, Bin Zhou, Hongwei Guo, Yingli Hao (2011). A modified DSMC method for simulating gas – particle two-phase impinging streams.
- [8] Sathapornprasath, K, Devahastin, S. & Sophonronarit, S. (2007). Performance Evaluation of an Impinging Stream Dryer for Particulate Materials. In Drying Technology. V25. Pp. 1121-1128.
- [9] Xiao, Y.L & Eckehard, S. (2006). Mean resident time and hole-up of solids in rotary kilns. In Chemical Engineering Science. V.61. pp.5276-5181.
- [10] Khomwachirakul, P., Devahastin, S., Swasdisevi, T., Sophonronarit, S. 2016. Simulation of flow and drying characteristics of high moisture particles in an impinging stream dryer via CFD DEM. Drying Technology 34, 403-419.
- [11] สิทธิกันต์ นุ่นหนู, 2551, การจำลองสนามการไหลของอนุภาคของไหลภายในเครื่องแยกละเอียดแบบแผ่นคลื่น, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

- [12] พิพัฒน์พงษ์ วัฒนวันยู, 2014, การศึกษาการออกแบบและสร้างไซโคลนสำหรับเตาชีวมวลแบบอากาศไหลลง, ภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์, วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต
- [13] พลกฤษณ์ คุ้มกล้า, 2017, อิทธิพลของพารามิเตอร์ในการดำเนินการของเครื่องอบแห้งกระแสนที่มีต่อการลดความชื้น การสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพข้าวหนึ่ง, สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [14] K. L. Iroba, (2011). Particle velocity profiles and residence time distribution in mixed-flow grain dryers. In *Granular Matter*. V13. pp.159–168
- [15] Wu, Y. (2007). RESIDENCE TIME OF PARTICLES AND ITS DISTRIBUTION. *Impinging Streams*, pp. 67–90.
- [16] Leina Hua, (2014). CFD simulation of solids residence time distribution in a CFB Riser. In *Chemical Engineering Science* V.117. pp. 264-282
- [17] Genong Li, (2010). VARIOUS APPROACHES TO COMPUTE FLUID RESIDENCE TIME IN MIXING SYSTEMS. In *ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. FEDSM-ICNMM2010-30771
- [18] Nahid Ghasemi, (2010). CFD simulation of solid–liquid flow in a two impinging streams cyclone reactor: Prediction of mean residence time and holdup of solid particles. In *Chemical Engineering and Processing* V.49. pp. 1277-1283
- [19] Yuan Wu, (2010). Features of Impinging Streams Intensifying Processes and Their Applications. In *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Chemical Engineering* Volume 2010, Article ID 681501
- [20] *SolidWorks Flow Simulation Student Workbook*, (2010). Running the Calculation. pp.17-22
- [21] Technical reference *SOLIDWORKS Flow Simulation*, (2023). Automatic Parameters Definition (APD). pp.135-137

ภาคผนวก ก

บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ

**THE 6th RMUTP
CONFERENCE ON ENGINEERING
AND TECHNOLOGY 2022**

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 6

**“NEW FRONTIERS OF ENGINEERING
SCIENCE TECHNOLOGY AND INNOVATION”**

27 พฤษภาคม 2565
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ISBN (E-Book) : 978-974-625-949-1



สารบัญ

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล		
ME01	ผลของปริมาณเกลือโซเดียมต่อสมบัติของฟิล์มจากเปลือกทุเรียน กมลทิพย์ คำมูล ดวงฤทัย ซาติศรี ศศิธร แก้วมาลา อภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล เดชาวัต มั่นกลาง และ ประยูร จอมหล้าพีรติกุล	1
ME02	การพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ ชาญจิต วรรณนุรักษ์	5
ME03	การจำลองค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของข้าวเปลือกในระบบกระแสขนแบบวิถีโค้ง ปิติ ชันโพธิ์ ปฏิวัติ คมวชิรกุล กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์ และ ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย	9
ME04	การศึกษาและออกแบบชุดเครื่องซึ่งสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา กฤษฎา เบ้าทอง, อีร์พันธ์ เชื้อกลีการ, วีรวิทย์ ทรงไชยทินวัฒน์ และ วิชยา อากาศเวท	13
ME05	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความดันในกะโหลกศีรษะด้วยวิธี Non-Invasive โดยอาศัยความดันในลูกตา ความดันเลือดไปเลี้ยงสมอง และ ความดัน โลหิตเฉลี่ย กฤษนันท์ เจริญสุข และ อุทัย อึ้งเจริญ	17
ME06	การสร้างแบบจำลอง และออกแบบตัวควบคุมสำหรับ Aero-Pendulum โดยใช้ตัว ควบคุม Proportional-Integral-Derivative และ Sliding-mode ครรชิต กาวานานท์ และ กฤษนันท์ เจริญสุข	23
ME08	การออกแบบระบบบังคับเลี้ยวสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา สถาพร วันนาพอ อีร์วิติ อินทร์เฉลิม วรรณธิดา แซ่ลือ อัญญา วงษ์ยอด และ ณัฐกิตติ์ ฤทธิทอง	28
ME09	ตู้เย็นจำลองขนาดเล็กทำความเย็นโดยใช้แผ่นเพลเทียร์ อานนท์ ดีอุดม อนันต์ เต็มเปี่ยม ปฏิวัติ คมวชิรกุล ทีเชษฐ์ บุญญาลัย ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และ ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย	32
ME10	การตรวจสอบเครื่องยนต์ สำหรับอากาศยานปีกหมุน โดยเครื่องตรวจสอบสภาพ ภายในอากาศยาน วุฒิชัย เหมาะใจ ภักจิรา จินประชา และ ปิยธิดา โกมลวรรณะ	36
ME11	การศึกษาทดลองผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบ กระแสขน ปริญ ศรีแสง ปฏิวัติ คมวชิรกุล อนันต์ เต็มเปี่ยม และ พลรัชต์ บุญมี	40



เกียรติบัตรฉบับนี้มอบไว้เพื่อแสดงว่า

ปริญ ศรีแสง ปฎิวัติ ดมวชิรกุล อนันต์ เต็มเปี่ยม

และ พลริชต์ บุญมี

บทความเรื่อง

การศึกษาทดลองผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ย

ของอนุภาคในระบบกระแสชน

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 6
 (6th RMUTP Conference on Engineering and Technology)

ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2565

ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 (รูปแบบออนไลน์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธนะ)

รักษาราชการแทน

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม

6th RMUTP Conference on Engineering and Technology

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทว. พระนคร ครั้งที่ 6
 Proceedings of the 6th RMUTP Conference on Engineering and Technology

การศึกษาทดลองผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบกระแสชน Experimental study of the effects of operating parameters on particle mean residence time in an impinging stream system

ปริญ ศรีแสง¹, ปฎิวัติ คมวชิรกุล¹, อนันต์ เต็มเปี่ยม¹ และพลรัชต์ บุญมี¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ด.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-Mail: PONGAMORN-5@o365.mmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทดลองค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบกระแสชน ในการทดลองใช้เม็ดเรซินเป็นวัสดุทดลองซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 mm โดยทำการศึกษาค้นคว้าทดลองตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราการป้อนวัสดุ ที่ 50 และ 70 kg/h ความเร็วอากาศขาเข้าที่ 20, 25 และ 30 m/s และมุมของท่ออากาศขาเข้าที่ 0, 5 และ 10 องศา จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุ ความเร็วอากาศขาเข้าและมุมของท่ออากาศขาเข้าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบมีค่ามากที่สุดที่ 1.93 วินาที ที่อัตราการป้อนวัสดุ 70 kg/h ความเร็วอากาศขาเข้าที่ 30 m/s และมุมของท่ออากาศขาเข้าที่ 10 องศา

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งกระแสชน, การอบแห้ง, ค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุอนุภาค

Abstract

The objective of this research was to experimental study the particle mean residence time in an impinging stream system. In this study, resin with diameter around 0.4 mm was used as a test material. The effect of various parameters including particle mass flow rates of 50, 60 and 70 kg/h; inlet air velocities of 20, 25 and 30 m/s and inlet pipes were inclined 0°, 5° and 10° on the particle mean residence time were investigated. The results found that an increase in the particle mass flow rates, inlet air velocity and angle of inlet pipes led to an increase in particle mean residence time. The maximum value of particle mean residence time was about 1.93 s when operating condition at particle mass flow rates of 70 kg/h, inlet air velocity of 30 m/s and inlet pipe was inclined 10°.

Keywords: Impinging stream dryer, Drying,

Mean residence time;

1. บทนำ

การลดความชื้นหรือการอบแห้งของวัสดุนั้น มีหลายวิธี เช่น เครื่องอบแห้งแบบ โรตารี (Rotary dryer) เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) หรือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed dryer) เป็นต้นซึ่งเครื่องอบแห้ง ดังกล่าวจะใช้พลังงานมากและเวลานาน ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการอบแห้งขึ้นมาใหม่โดยอาศัยหลักการของระบบกระแสชน (Impinging stream system) เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้งตามการศึกษาของ [1-4]

หลักการพื้นฐานของกระแสชน หรือ Impinging stream คือการนำกระแสตั้งแต่ 2 กระแสที่ประกอบด้วยของแข็งและแก๊สอยู่ในระบบให้ไหลในทิศทางตรงกันข้ามด้วยความเร็วสูงและก่อให้เกิดการชน ส่งผลให้กระแสเกิดการชนในบริเวณตรงกลางของระบบ กระแสที่ใช้อาจเป็นกระแสลมร้อนหรือ กระแสไอน้ำยิ่งยวด และให้วัสดุที่ต้องการลดความชื้นอยู่ในบริเวณตรงกลางของกระแส และเกิดการถ่ายเทความร้อนทำให้วัสดุมีความชื้นลดลงจากความปั่นป่วน (Turbulent intensity) ในบริเวณการชนสูง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การถ่ายเทมวลและความร้อน [5] และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะยิ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากการที่มวลของวัสดุที่อยู่ในระบบ (Mean residence time of particles) นานขึ้น [3] นอกจากนี้เวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบ มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของกระแส (ระหว่างอัตราการป้อนวัสดุและอัตราการไหลของอากาศ) คือ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยทั้งนี้ก็เป็นผลเนื่องมาจากพลังงานจลน์ของวัสดุมีค่ามากขึ้นย่อมส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่กลับไปที่บนมาได้มากขึ้น [6-7]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าอัตราการลดความชื้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบ กล่าวคือถ้าวัสดุอนุภาคอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้น จะทำให้วัสดุมีความชื้นลดลงมากขึ้นเช่นกัน และจากการศึกษาของ Du et al. [8] พบว่า อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสชนและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้ง หลังออกจากบริเวณการชนจะมีค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยที่สูงขึ้น ซึ่งถ้าวัสดุมีเวลาอยู่ในระบอบอบแห้งได้นานเพิ่มมากขึ้น ก็จะส่งผลให้กระบวนการลดความชื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งถ้าสามารถเพิ่มโอกาสให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสชนและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้งได้นานจะทำให้อนุภาคอยู่ในระบบได้นานเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงมุมของท่ออากาศขาเข้าโดยให้มีมุมเอียงขึ้น อัตราการ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 6
 Proceedings of the 6th RMUTP Conference on Engineering and Technology

ป้อนวัสดุ และความเร็วอากาศขาเข้า ที่มีผลต่อค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบกระแสขน

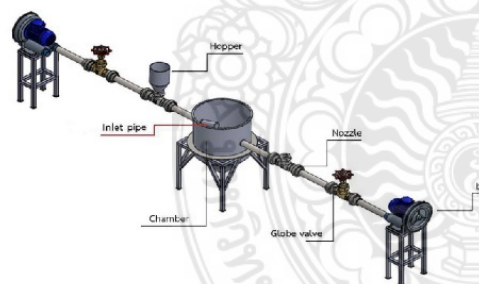
2. อุปกรณ์ และ วิธีการ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เม็ดเรซิน (Resin) ยี่ห้อนู โอเซา รุ่น FDI00NA ความหนาแน่นประมาณ 1.275 กรัม/มิลลิเมตร เป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบระบบกระแสขน โดยเม็ดเรซิน [9] ที่นำมาทดลองนี้ที่มีขนาดประมาณ 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีลักษณะเม็ดทรงกลมขนาดเล็กละเอียด โดยเม็ดเรซินนั้นจะมีความชื้นอยู่จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาทดลอง เพราะจะทำให้เม็ดเรซินจะเกาะติดตามสายพานลำเลียงและผนังภายในท่อส่งวัสดุและห้องถัง ดังนั้นจึงนำเม็ดเรซินไปทำการไล่ความชื้นก่อนทำการทดลอง

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

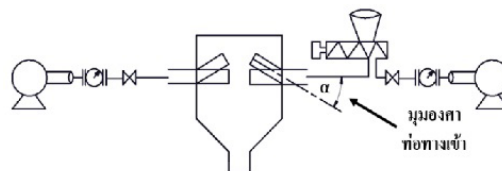
แผนผังของเครื่องระบบกระแสขน ที่ใช้ในงานทดลองนี้แสดงดังภาพที่ 3.2 ประกอบด้วย (1) ริงโบลเวอร์ (Ring blower) จำนวน 2 เครื่องให้กำลังที่ 1 แรงม้า ความเร็วรอบสูงสุดที่ 2,800 รอบต่อนาที (2) โกลบวาล์ว (Globe valve) จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของอากาศขาเข้าของระบบกระแสขน (3) หัวฉีด (Nozzle) จำนวน 2 ชิ้นควบคุมทิศทางลมให้เข้าไปที่ห้องระบบเพื่อไม่ให้ลมดันขึ้นด้านบน (4) ถังปล่อยวัสดุอนุภาค (Hopper) รั่ววัสดุที่ตกลงมาจากสายพานลำเลียงเพื่อเข้าสู่ระบบ (5) ห้องระบบ (Chamber) ทำจากแผ่นเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร (6) ท่ออากาศขาเข้า (Inlet pipe) ระยะห่างระหว่างปลายท่อเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยท่อทางเข้าทั้งสองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์ต่างๆ ของระบบกระแสขน

2.3 การกำหนดตัวแปรการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้มีเงื่อนไขทั้งหมด 27 เงื่อนไข จึงกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่จะมีผลกระทบคือ อัตราค่าเฉลี่ยของเวลา โดยจะมีการควบคุมและปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ตามรายละเอียดดังนี้ กำหนดให้อัตราการไหลของอากาศขาเข้าเท่ากับ 20, 25 และ 30 เมตร/วินาที กำหนดให้อัตราการป้อนวัสดุเท่ากับ 50, 60 และ 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง โดยการปรับความเร็วรอบของชุดไอพ่นวัสดุแบบสายพานลำเลียง กำหนดให้มุมองศาในการป้อนที่ 0, 5 และ 10 องศา



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งมุมมองเสาท่อทางเข้าในระบบกระแสขน

2.4 ขั้นตอนการทดลอง

กำหนดตัวแปรในการเก็บข้อมูลตามเงื่อนไขที่ทำการทดลอง เม็ดวัสดุเครื่องโบลเวอร์และทำการปรับความเร็วอากาศหน้าท่อทางเข้าให้ได้ตามที่กำหนดโดยการปรับโกลบวาล์วที่แต่ละด้านของท่อส่งอากาศขาเข้า ทำการป้อนเม็ดเรซินที่เตรียมไว้ตามอัตราการป้อนตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้กำหนดไว้อย่างต่อเนื่อง เมื่อระบบอยู่ในภาวะที่คงตัว จะทำการหยุดไอพ่นเม็ดเรซินและปิดสวิทช์เครื่องโบลเวอร์พร้อมปิดรูทางออกอากาศของถังด้านล่าง ในระหว่างที่โบลเวอร์และเครื่องไอพ่นวัสดุหยุดทำงานนั้นจะมีเม็ดเรซินบางส่วนตกค้างอยู่ภายในระบบ ทำการเปิดสวิทช์เครื่องโบลเวอร์อีกครั้งเพื่อเป่าเม็ดเรซินที่ตกค้างอยู่ภายในของระบบออกมาให้หมด นำเม็ดเรซินที่ตกค้างอยู่ในระบบไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าผลการทดลอง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปทำการหาค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบตามสมการ

2.5 การกำหนดค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบกระแสขน

การทดลองหาค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบกระแสขนสามารถประเมินได้จาก [10]

$$\tau = \frac{m_p}{W_p}$$

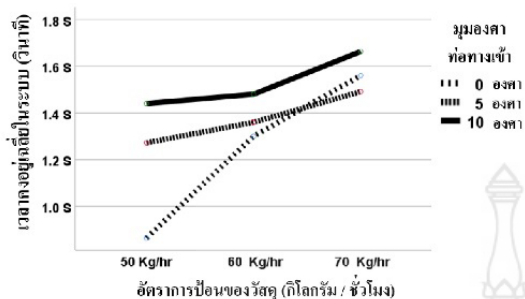
เมื่อ	
τ	คือ ค่าเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบ,
m_p	คือ ปริมาณของวัสดุที่คงอยู่ในระบบ, kg
W_p	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, kg/s

3. ผลการวิจัย

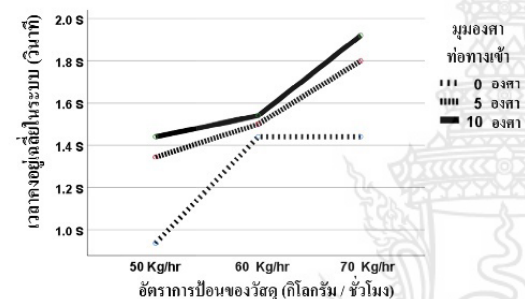
จากรูปที่ 3.1 3.2 และ 3.3 แสดงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อเวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบกระแสขนเมื่อความเร็วอากาศขาเข้าคงที่ จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไอพ่นที่สูงขึ้นจะทำให้มีวัสดุคงอยู่ในระบบมากขึ้น วัสดุจึงมีเวลาอยู่ในห้องกระแสขนเป็นเวลานานมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อมุมมองเสาของท่อทางเข้าเอียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่มุมมองเสาที่สูงขึ้นช่วยทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบกระแสขนและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของห้องอบแห้ง ซึ่งจะทำให้วัสดุมีเวลาอยู่ในห้องกระแสขนเป็นเวลานานมากขึ้น

บทความวิจัย

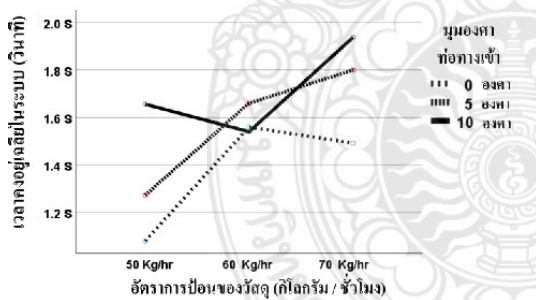
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 6
 Proceedings of the 6th RMUTP Conference on Engineering and Technology



รูปที่ 3.1 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 50 กิโลกรัม / ชั่วโมง



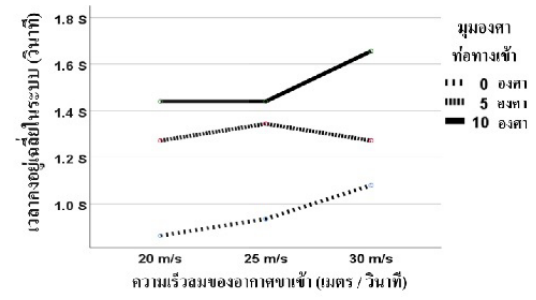
รูปที่ 3.2 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 60 กิโลกรัม / ชั่วโมง



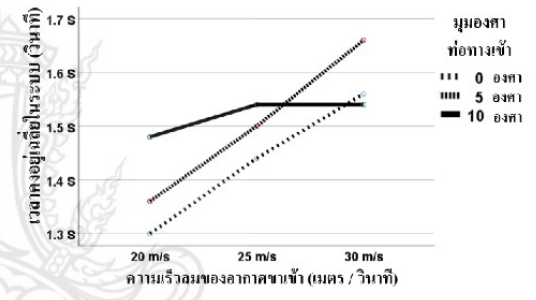
รูปที่ 3.3 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 70 กิโลกรัม / ชั่วโมง

จากรูปที่ 3.4 3.5 และ 3.6 แสดงผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบ กระแสลมเมื่ออัตราการป้อนวัสดุคงที่ จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วอากาศเข้าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เวลาเฉลี่ยของวัสดุในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วอากาศเข้าที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มโมเมนตัมให้กับวัสดุสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านกระแสของไหลตรงกันข้ามเข้าไปได้ วัสดุจึงมีเวลาเฉลี่ยอยู่ในระบบได้นานขึ้น ขณะที่มุมองศาของท่อทางเข้าเดิมเพิ่มมากขึ้น ทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งเหตุผลได้

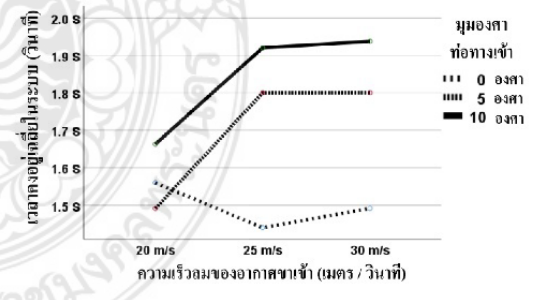
อธิบายไว้แล้ว โดยในงานวิจัยนี้ค่าเวลาเฉลี่ยของวัสดุในระบบมีค่ามากที่สุดที่ 1.93 วินาที ที่เงื่อนไขความเร็วอากาศเข้า 30 เมตร/วินาที อัตราการป้อนวัสดุ 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง และมุมองศาท่อทางเข้าที่ 10 องศา



รูปที่ 3.4 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 50 กิโลกรัม / ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 60 กิโลกรัม / ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ เมื่ออัตราการป้อนของวัสดุ 70 กิโลกรัม / ชั่วโมง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทดลองค่าเวลาเฉลี่ยของอนุภาคในระบบกระแสลม การทดลองกระทำโดยใช้อัตราการป้อนวัสดุ 3 ค่า ได้แก่ 50 60 และ 70 kg/h ความเร็วอากาศเข้า 3 ค่า ได้แก่ 20 25 และ 30 m/s และมุมเอียงของท่ออากาศเข้าห้องกระแสลม 3 ค่า ได้แก่ 0°, 5° และ 10° จากการศึกษพบว่า ที่ความเร็วอากาศเข้าคงที่ เมื่ออัตราการป้อน

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 6
Proceedings of the 6th RMU/TP Conference on Engineering and Technology

วัสดุเพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุอยู่ในระบบได้นานเพิ่มมากขึ้น สำหรับที่อัตราการป้อนวัสดุคงที่ เมื่อความเร็วอากาศเข้าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อมุมของท่ออากาศเข้าเอียงเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เวลาคงอยู่เฉลี่ยของวัสดุในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าเวลาคงอยู่เฉลี่ยของอนุภาคในระบบมีค่ามากที่สุดที่ 1.93 วินาที ที่เงื่อนไขการทดลอง อัตราการป้อนวัสดุ 70 kg/h ความเร็วอากาศเข้า 30 m/s และมุมของท่ออากาศเข้าที่ 10 องศา

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาทดลองงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปฏิวัติ คมวชิรกุล. (2554). การออกแบบหัวปลีอกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม. ปริญญาโท วิศวกรรม. (การจัดการทางวิศวกรรม). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [2] ัญญาพร ปัดดาขารี, 2553. การศึกษาพหุระณะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสำหรับวัสดุทางการเกษตร, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร
- [3] Tamir, A., 1989, Process and phenomena in impinging-stream reactors, In Chemical Engineering Progress. V.85, pp. 53-61.
- [4] Kudra, T.; & Mujumdar, A.S. (1989). Impinging stream dryers
- [6] Kitron, Y. and Tamir, A. 1988 "Performance of a coaxial gas-solid two impinging stream (TIS) reactor hydrodynamics, residence time distribution, and drying heat transfer. Industrial & Engineering Chemistry Research.
- [7] ร้อยศรีวิฬิงษ์ แจงดี, 2554, การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเทคนิคกระแสน, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [8] Min Du, Changsui Zhao, Bin Zhou, Hongwei Guo, Yingli Hao (2011). A modified DSMC method for simulating gas – particle two-phase impinging streams.
- [9] Sathapornprasath, K, Devahastin, S. & Soponronarit, S. (2007). Performance Evaluation of an Impinging Stream Dryer for Particulate Materials. In Drying Technology. V25. Pp. 1121-1128.
- [10] Xiao, Y.L. & Eckchard, S. (2006). Mean resident time and hole-up of solids in rotary kilns. In Chemical Engineering Science. V.61. pp.5276-5181.

ภาคผนวก ข
ข้อมูลผลการทดลอง

การคำนวณระบบบอบแห้งแบบกระแสน

สามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศของท่อทางเข้า (เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อทางเข้าเท่ากับ 2 in) คำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}V_a &= \text{พื้นที่หน้าตัด } m^2 \times \text{ความเร็วลมสูงสุด } m/s \\ &= \left(\frac{\pi}{4}\right)(0.0574)^2(40) \\ &= 0.104 \text{ m}^3/s\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m_a &= \text{อัตราการไหลของปริมาตร } m^3/s \times \text{ความหนาแน่นของอากาศ } kg/m^3 \\ &= (0.104)(1.164) \\ &= 0.121 \text{ m}^3/s\end{aligned}$$

1. ความดันสูญเสียของท่อและอุปกรณ์

ท่อเหล็กดำ (ท่อแป็บดำ) 2 in

$$\begin{aligned}Re &= \frac{\rho v D}{\mu} \\ &= \frac{(1.164)(30)(0.0574)}{(1.846)(10)^{-5}} \\ &= 108,581.148\end{aligned}$$

แฟกเตอร์ความหยาบของท่อเหล็กดำ (ท่อแป็บดำ)

$$\varepsilon = 0.045 \text{ mm}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.045}{57.4}$$

$$= (7.84)(10)^{-4}$$

จาก Moody diagram

$$\frac{\varepsilon}{D} = (7.84)(10)^{-4}$$

$$Re = 108,581.148$$

แฟกเตอร์ความเสียดทาน

$$f = 0.021$$

$$\Delta P = (f) \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v}{1.29} \right)^2$$

$$= (0.021) \left(\frac{3.34}{0.0574} \right) \left(\frac{30}{1.29} \right)^2$$

$$= 660.871 \text{ Pa}$$

Three - way ขนาด 2 in

$$\Delta P = K \left(\frac{v}{1.29} \right)^2$$

$$= (0.38) \left(\frac{30}{1.29} \right)^2 (2)$$

$$= 411.033 \text{ Pa}$$

Globe valve ขนาด 2 in

$$\Delta P = K \left(\frac{v}{1.29} \right)^2$$

$$= (6.5) \left(\frac{30}{1.29} \right)^2 (2)$$

$$= 7,030.827 \text{ Pa}$$

Socket valve

$$\Delta P = K \left(\frac{v}{1.29} \right)^2$$

$$= (0.08) \left(\frac{30}{1.29} \right)^2 (2)$$

$$= 86.533 \text{ Pa}$$

Nozzzle

$$\begin{aligned}\Delta P &= K\left(\frac{v}{1.29}\right)^2 \\ &= (0.07)\left(\frac{30}{1.29}\right)^2 (2) \\ &= 75.717 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Union

$$\begin{aligned}\Delta P &= K\left(\frac{v}{1.29}\right)^2 \\ &= (0.08)\left(\frac{30}{1.29}\right)^2 (4) \\ &= 173.067 \text{ Pa}\end{aligned}$$

ความดันสูญเสียของท่อและอุปกรณ์

$$\begin{aligned}&= 660.871 + 411.033 + 7,030.827 \\ &+ 86.533 + 75.17 + 173.067 \\ &= 8,438.048 \text{ Pa}\end{aligned}$$

2. ความดันสูญเสียของห้องอบแห้งกระแสน (Tamir ,1994)

$$\begin{aligned}\Delta P &= (0.5)(\rho_a)(U_{a,0})^2 \\ &= (0.5)(1.164)(30)^2 \\ &= 523.8 \text{ Pa}\end{aligned}$$

3. ความสูญเสียรวมทั้งหมดของระบบอบแห้งแบบกระแสนแนวโค้ง

ความดันสูญเสียรวม = ท่อและอุปกรณ์ + ห้องอบแห้งกระแสน

$$= 8,438.048 + 523.8$$

$$= 8,961.848 \text{ Pa}$$

4. การคำนวณหาขนาดพัดลมแรงดันสูง (Mr.Kitti Sathapornprasath ,2006)

$$\begin{aligned}
 P_{fan} &= \frac{m_a \Delta P}{\rho_a \eta_{fan}} \\
 &= \left(\frac{(0.121)(8,961.848)}{(1.164)(0.8)} \right) \\
 &= 1,164.501 \text{ Watt} \\
 &= 1.562 \text{ HP}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.1 ค่าความหยาบผิวของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	ความหยาบของวัสดุ ϵ (mm)
Riveted steel	3
Concrete	0.3-3
Wood	0.3
Cast iron	0.25
Galvanized iron	0.15
Stainless steel	0.045
Rubber	0.025
Fiberglass	0.005
Carbon steel/Wrought iron	0.045
Drawn tubing-Glass,Plastic	0.0015
Copper	0.0015
Aluminium	0.0015
PVC	0.0015

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน K ของการสูญเสียแรงเสียดทานในอุปกรณ์ท่อ

Friction Losses in Pipe Fittings													
Resistance Coefficient K (use in formula $h_f = Kv^2/2g$)													
Fitting	LD	Nominal Pipe Size											
		1/2"	3/4"	1	1-1/4"	1-1/2"	2	2-1/2"-3	4	6	8-10	12-16	18-24
		K Value											
Angle Valve	55	1.48	1.38	1.27	1.21	1.16	1.05	0.99	0.94	0.83	0.77	0.72	0.66
Angle Valve	150	4.05	3.75	3.45	3.30	3.15	2.85	2.70	2.55	2.25	2.10	1.95	1.80
Ball Valve	3	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
Butterfly Valve							0.86	0.81	0.77	0.68	0.63	0.35	0.30

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน K ของการสูญเสียแรงเสียดทานในอุปกรณ์ท่อ (ต่อ)

Friction Losses in Pipe Fittings													
Resistance Coefficient K (use in formula $h_f = Kv^2/2g$)													
Fitting	LD	Nominal Pipe Size											
		1/2"	3/4"	1	1-1/4"	1-1/2"	2	2-1/2"-3	4	6	8-10	12-16	18-24
		K Value											
Gate Valve	8	0.22	0.20	0.18	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
Globe Valve	340	9.2	8.5	7.8	7.5	7.1	6.5	6.1	5.8	5.1	4.8	4.4	4.1
Plug Valve Branch Flow	90	2.43	2.25	2.07	1.98	1.89	1.71	1.62	1.53	1.35	1.26	1.17	1.08
Plug Valve Straightaway	18	0.48	0.45	0.41	0.40	0.38	0.34	0.32	0.31	0.27	0.25	0.23	0.22

Friction Losses in Pipe Fittings														
Resistance Coefficient K (use in formula $h_f = Kv^2/2g$)														
Fitting	LD	Nominal Pipe Size												
		1/2"	3/4"	1	1-1/4"	1-1/2"	2	2-1/2"-3	4	6	8-10	12-16	18-24	
		K Value												
Plug Valve 3-Way Thru-Flow	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36	
Standard Elbow	90°	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	45°	16	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	long radius 90°	16	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
Close Return Bend	50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.90	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60	

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน K ของการสูญเสียแรงเสียดทานในอุปกรณ์ท่อ (ต่อ)

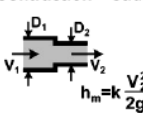

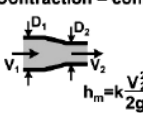
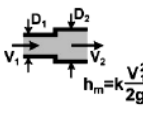
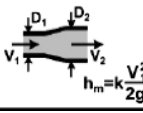
Friction Losses in Pipe Fittings														
Resistance Coefficient K (use in formula $h_f = Kv^2/2g$)														
Fitting		LD	Nominal Pipe Size											
			1/2"	3/4"	1	1-1/4"	1-1/2"	2	2-1/2"-3	4	6	8-10	12-16	18-24
		K Value												
Standard Tee	Thru-Flow	20	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
	Thru-Branch	60	1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72
90 Bends, Pipe Bends, Flanged Elbows, Butt-Welded Elbows	r/d=1	20	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
	r/d=2	12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14
	r/d=3	12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14
	r/d=4	14	0.38	0.35	0.32	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	0.21	0.20	0.18	0.17
	r/d=6	17	0.46	0.43	0.39	0.37	0.36	0.32	0.31	0.29	0.26	0.24	0.22	0.20
	r/d=8	24	0.65	0.60	0.55	0.53	0.50	0.46	0.43	0.41	0.36	0.34	0.31	0.29
	r/d=10	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	r/d=12	34	0.92	0.85	0.78	0.75	0.71	0.65	0.61	0.58	0.51	0.48	0.44	0.41
	r/d=14	38	1.03	0.95	0.87	0.84	0.80	0.72	0.68	0.65	0.57	0.53	0.49	0.46
	r/d=16	42	1.13	1.05	0.97	0.92	0.88	0.80	0.76	0.71	0.63	0.59	0.55	0.50
	r/d=18	45	1.24	1.15	1.06	1.01	0.97	0.87	0.83	0.78	0.69	0.64	0.60	0.55
	r/d=20	50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.90	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60
Mitre Bends	a=0°	2	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
	a=15°	4	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05
	a=30°	8	0.22	0.20	0.18	0.18	0.17	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
	a=45°	15	0.41	0.38	0.35	0.33	0.32	0.29	0.27	0.26	0.23	0.21	0.20	0.18

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน K ของการสูญเสียแรงเสียดทานในอุปกรณ์ท่อ (ต่อ)

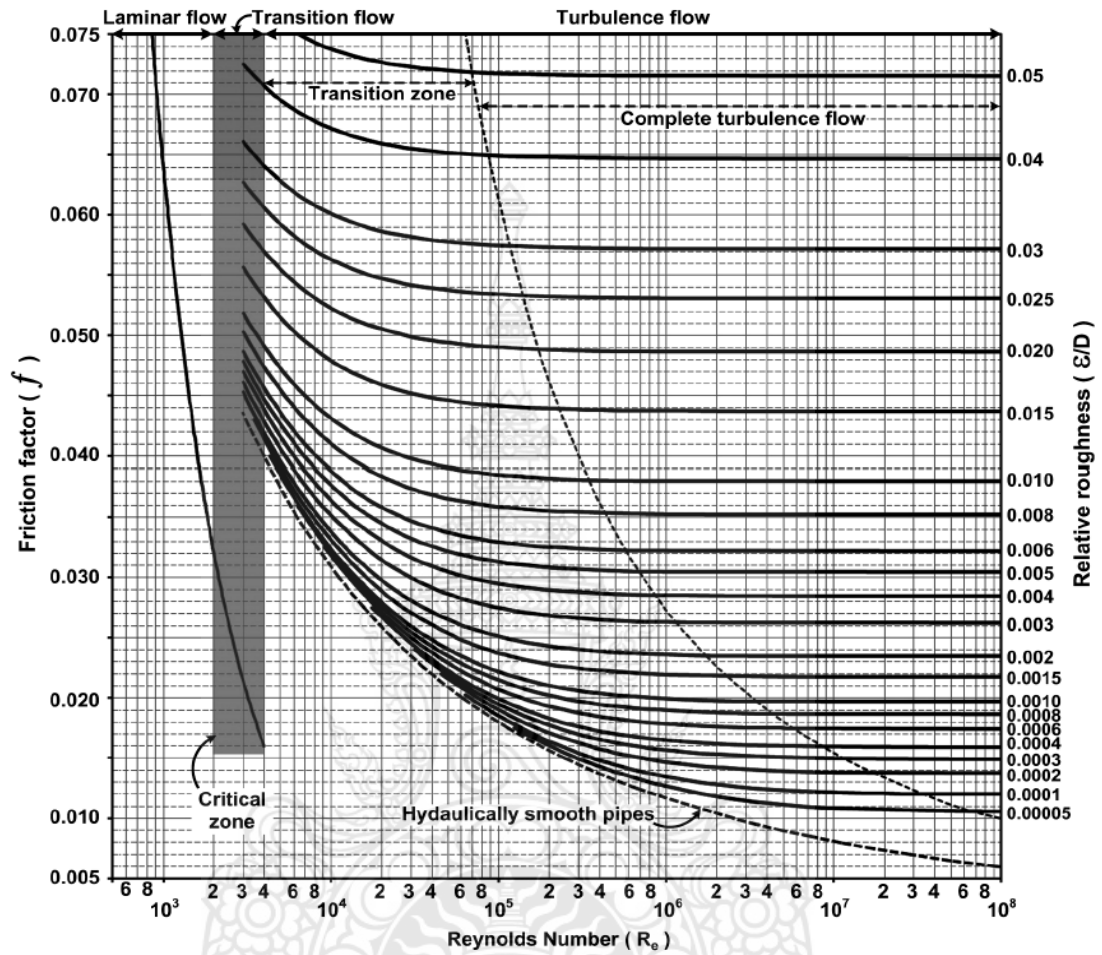
Friction Losses in Pipe Fittings														
Resistance Coefficient K (use in formula $h_f = Kv^2/2g$)														
Mitre Bends	a=60°	25	0.68	0.63	0.58	0.55	0.53	0.48	0.45	0.43	0.38	0.35	0.33	0.30
	a=75°	40	1.09	1.00	0.92	0.88	0.84	0.76	0.72	0.68	0.60	0.56	0.52	0.48
	a=90°	60	1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72

Note: Fittings are standard with full openings.

ตารางที่ ข.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน K ของการสูญเสียของพลังงานรองในอุปกรณ์ท่อ

Type of Component or Fitting : K	Type of Component or Fitting : K	Type of Component or Fitting : K
Pipe Entrance (Reservoir to Pipe)	Globe valve - fully open : 10.0	Cross
Square Connection : 0.50	Gate valve	Line flow : 0.50
Rounded Connection : 0.20	- fully open : 0.39	Branch flow : 0.75
Re-entrant (pipe juts into tank) : 1.00	- 3/4 open : 1.10	
Pipe Exit (Pipe to Reservoir)	- 1/2 open : 4.80	Mitered bend (θ)
Square Connection : 1.00	- 1/4 open : 27.0	15° : 0.05
Rounded Connection : 1.00	Ball Valve	30° : 0.10
Re-entrant (pipe juts into tank) : 1.00	- fully open : 0.05	45° : 0.20
Contraction – sudden	- 2/3 open : 5.50	60° : 0.35
 $D_2/D_1=0.80$: 0.18	- 1/3 open : 200	90° : 0.80
$D_2/D_1=0.50$: 0.37	Angle valve - fully open : 4.30	90° smooth bend
$D_2/D_1=0.20$: 0.49	Check valve – conventional : 4.00	 Bend radius/D = 4 : 0.16-0.18
Contraction – conical	Check valve – clearway : 1.50	Bend radius/D = 2 : 0.19-0.25
 $D_2/D_1=0.80$: 0.05	Check valve – ball : 4.50	Bend radius/D = 1 : 0.35-0.40
$D_2/D_1=0.50$: 0.07	Butterfly valve - fully open : 1.20	Elbows
$D_2/D_1=0.20$: 0.08	Cock - straight through : 0.50	Threaded Regular 90° : 1.50
Expansion – sudden	Foot valve – hinged : 2.20	Threaded Regular 45° : 0.40
 $D_2/D_1=0.80$: 0.16	Foot valve – poppet : 12.5	Threaded Long Radius 90° : 0.70
$D_2/D_1=0.50$: 0.57	Tee	Flanged Regular 90° : 0.30
$D_2/D_1=0.20$: 0.92	Line flow : 0.30-0.40	Flanged Long Radius 90° : 0.20
Expansion – conical	Branch flow : 0.75-1.80	Flanged Long Radius 45° : 0.20
 $D_2/D_1=0.80$: 0.03	Flanged, Line Flow : 0.20	
$D_2/D_1=0.50$: 0.08	Flanged, Branch Flow : 1.00	180° Return Bends
$D_2/D_1=0.20$: 0.13	Threaded, Line Flow : 0.90	Flanged : 0.20
	Threaded, Branch Flow : 2.00	Threaded : 1.50
	Threaded Union : 0.08	

ภาพของการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน



รูปที่ ข.1 Moody Diagram

ภาคผนวก ค
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองท่อมุมมอง 0 องศา ที่อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.011	0.792
2	0.012	0.864
3	0.013	0.936
รวม	0.012	0.864
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.013	0.936
2	0.014	1.008
3	0.012	0.864
รวม	0.013	0.936
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.015	1.080
2	0.014	1.008
3	0.014	1.008
รวม	0.014	1.032

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองท่อมุมมอง 0 องศา ที่อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.022	1.320
2	0.022	1.320
3	0.021	1.260
รวม	0.022	1.300
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.024	1.440
2	0.023	1.380
3	0.025	1.500
รวม	0.024	1.440
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.029	1.740
2	0.026	1.560
3	0.023	1.380
รวม	0.026	1.560

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองท่อมุมมอง 0 องศา ที่อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.028	1.440
2	0.028	1.440
3	0.027	1.389
รวม	0.028	1.423
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.028	1.440
2	0.029	1.491
3	0.027	1.389
รวม	0.028	1.440
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.032	1.646
2	0.030	1.543
3	0.025	1.286
รวม	0.029	1.492

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองท่อมุมมอง 5 องศา ที่อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.019	1.368
2	0.017	1.224
3	0.017	1.224
รวม	0.018	1.272
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.021	1.512
2	0.017	1.224
3	0.018	1.296
รวม	0.019	1.344
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.020	1.440
2	0.016	1.152
3	0.017	1.224
รวม	0.018	1.272

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองท่อมุมมองฯ 5 องศา ที่อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.021	1.260
2	0.024	1.440
3	0.023	1.380
รวม	0.023	1.360
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.022	1.320
2	0.027	1.620
3	0.026	1.560
รวม	0.025	1.500
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.030	1.800
2	0.026	1.560
3	0.027	1.620
รวม	0.028	1.660

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองท่อมุมมอง 5 องศา ที่อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.026	1.337
2	0.030	1.543
3	0.031	1.594
รวม	0.029	1.491
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.036	1.851
2	0.036	1.851
3	0.033	1.697
รวม	0.035	1.800
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (5 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.036	1.851
2	0.034	1.749
3	0.035	1.800
รวม	0.035	1.800

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองท่อมุมมองฯ 10 องศา ที่อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.023	1.656
2	0.017	1.224
3	0.020	1.440
รวม	0.020	1.440
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.019	1.368
2	0.021	1.512
3	0.020	1.440
รวม	0.020	1.440
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 50 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.022	1.584
2	0.022	1.584
3	0.025	1.800
รวม	0.023	1.656

ตารางที่ ค.8 ผลการทดลองท่อมุมมองฯ 10 องศา ที่อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.025	1.500
2	0.026	1.560
3	0.023	1.380
รวม	0.025	1.480
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.022	1.320
2	0.030	1.800
3	0.025	1.500
รวม	0.026	1.540
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 60 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.024	1.440
2	0.028	1.680
3	0.025	1.500
รวม	0.026	1.540

ตารางที่ ค.9 ผลการทดลองท่อมุมมองฯ 10 องศา ที่อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ความเร็วอากาศขาเข้า 20 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.032	1.646
2	0.032	1.646
3	0.033	1.697
รวม	0.032	1.663
ความเร็วอากาศขาเข้า 25 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.040	2.057
2	0.037	1.903
3	0.035	1.800
รวม	0.037	1.920
ความเร็วอากาศขาเข้า 30 เมตร/วินาที กับ อัตราการป้อน 70 กิโลกรัม/ชั่วโมง (10 องศา)		
ครั้งที่	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)	เวลาเฉลี่ยของวัสดุ (วินาที)
1	0.042	2.160
2	0.037	1.903
3	0.034	1.749
รวม	0.038	1.937

