

การออกแบบการขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม

DESIGN OF FEED PELLET PNEUMATIC CONVEYOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบการขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม

DESIGN OF FEED PELLET PNEUMATIC CONVEYOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **ปีการศึกษา 2563** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

DESIGN OF FEED PELLET PNEUMATIC CONVEYOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาโทปีการศึกษา 2563 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบการขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม

DESIGN OF FEED PELLET PNEUMATIC CONVEYOR

ผู้จัดทำ

1. นางสาว อนูริดา ฉายาพัฒน์ รหัสประจำตัว 60011140
2. นาย อภิรัตน์ โอสถ รหัสประจำตัว 60011153
3. นาย อัครพล ฝึกแคเล็ก รหัสประจำตัว 60011176



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.อนุรัตน์ พิณโสภณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบการขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม

นางสาวนุชิตา ฉายาพัฒน์	รหัสประจำตัว	60011140
นายอภิรัตน์ โอส	รหัสประจำตัว	60011153
นายอัครพล ผักแคเล็ก	รหัสประจำตัว	60011176
ผศ.ดร.อุษณัฏ	พิณโสภณ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2563		

บทคัดย่อ

ปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้เป็นออกแบบเครื่องส่งอาหารเม็ดด้วยลม เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ในการขนส่งอาหารเม็ดระหว่างเครื่องทำอาหารเม็ดและเครื่องอบอาหารเม็ด การที่จะออกแบบเครื่องส่งอาหารเม็ดด้วยลมได้จริงจำเป็นต้องศึกษาการไหลของลมและอาหารเม็ดเพื่อประสิทธิภาพแรงเสียดทานของลมและของอาหารเม็ด เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์จึงแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานเป็น 4 หัวข้อดังนี้

1. การทดสอบสมรรถนะของพัดลม
2. การทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลม (f)
3. การทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s)
4. การออกแบบเครื่องขนส่งอาหารเม็ดด้วยลมสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

จากการทดลองได้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมที่มีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี 15.05% ได้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีค่าแตกต่างมากจากทฤษฎีซึ่งสาเหตุที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุมีความแตกต่างมากมีได้หลายประการ การกำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศคงที่ในการคำนวณ ,รูปทรงของอาหารเม็ดที่ไม่ได้เป็นทรงกลมและมีความชื้นสูง และตัวแฉกเปอร์ที่ติดไว้เพื่อหรืออัตราการไหลของลมทำให้อาหารเม็ดไหลยากขึ้น สาเหตุดังกล่าวล้วนทำให้การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าแตกต่างจากทฤษฎี

การออกแบบเครื่องขนส่งอาหารเม็ดด้วยลมพิจารณาจากจุดตัดของสมรรถนะพัดลมกับเฮดสูญเสียทั้งหมดของการไหล 2 เฟส ที่ได้จากการคำนวณจุดทำงานของเครื่องขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม ได้เฮดสูญเสียที่ 216 มิลลิเมตรน้ำและมีความเร็วลม 15.1 m/s เนื่องจากสถานการณ์โควิดทำให้ไม่มีเครื่องมือและอาหารเม็ดในการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขนส่งอาหารเม็ด จึงทดสอบโดยการสังเกตจากมิเตอร์ไฟฟ้าที่เครื่องทำงานโดยการขนส่งลมปล่าวที่ความเร็วลม 15.1 m/s ได้กำลังไฟ 1.1 kWh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

DESIGN OF FEED PELLET PNEUMATIC CONVEYOR

Anutida	Chayapat	60011140
Apirat	Osoth	60011153
Aukkarapol	Fukkalek	60011176
Asst.Prof.Dr.Unnat	Pinsopon	Advisor
Year 2563		

ABSTRACT

This project presents the design of pneumatic conveyor of feed pellet for the use in small-size animal feed pellet plants. The pneumatic conveyor was designed to be placed between the feed extruder machine and the pellet dryer. The study of two-phase flow of air-pellet and air-pellet friction factors were needed for the design. To achieve the project goal, the following four procedures were conducted.

1. Test of fan performance.
2. Experiment to find air friction factor in pipe (f).
3. Experiment to find pellet friction factor in pipe (λ_s).
4. Design of feed pellet pneumatic conveyor.

The value of air friction factor from obtained from experiment deviated for about 15% from the theoretical calculation. The value of pellet friction factor of solid obtained from experiment was much different from theoretical calculation. The difference between experimental and theoretical results was from vast reasons. Air density was assumed constant in all calculations. The pellet types are not the same for the experiment and the calculation. The feed pellet was not spherical-consistent in size, and was high in moisture content. The damper attached to regulate the air flow rate for the experiment inevitably caused blockage of the pellet flow.

The fan performance and the total dynamic head of the two-phase flow curves were then constructed. It was found from the calculation that at the operating condition of the pneumatic conveyor, the total head loss was 216 mm_{water} and the air velocity was 15.1 m/s. The pneumatic conveyor was capable of 200 kg/h feed rate and the electrical power to convey 1 ton of feed pellet is 1.1 kWh. Note that the power consumption of the fan only on air without feed was tested at the operating condition of the conveyor due to the problem of the feed raw material problem during the Covid-19 crisis.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.อุจน์นัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่ เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นางสาวอนุธิตา ฉายาพัฒน์
นายอภิรัตน์ โอสธ
นายอัศรพล ฝึกแคเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	viii
สารบัญรูป	ix

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปัญหา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	2

บทที่ 2 เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ต้นกำเนิดลม (Air mover)	3
2.1.1 ประเภทของต้นกำเนิดลม [5]	3
2.1.2 สมรรถนะของพัดลม (Fan performance) [10]	6
2.2 ท่อลำเลียงวัสดุ (Pneumatic conveying)	8
2.2.1 การไหลของอากาศในท่อ (Air flow) [5]	8
2.2.2 HEAD LOSS เนื่องจากการไหลของอากาศ (Air flow head loss) [5]	10
2.2.3 การไหลวัสดุ 2 เฟส (2 Phase flow) [6]	13
2) การไหลแบบหนาแน่น (Dense Phase)	13
2.2.3.1 พลศาสตร์การไหลของวัสดุ [6]	14
2.2.3.2 HEAD LOSS จากการไหลของวัสดุ (Particle head loss)	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1) เสดสูญเสียนื่องจากความเร่ง	18
2) เสดสูญเสียนื่องจากชนสง่วสดตามแนวตั้ง	19
3) เสดสูญเสียนื่องจากการไหลไปตามท่อ.....	19
2.3 อุปกรณ์จ่ายวัสดุ (Feeder) [6].....	22
2.3.1 หัวดูด (Suction Nozzle).....	23
2.3.2 วาล์วแบบล็อกสองชั้น (Gate Lock Valve).....	23
2.3.3 ตัวจ่ายวัสดุแบบคอคอด (venturi).....	24
2.3.4 โรตารีวาล์ว (Rotary Valve).....	25
2.3.5 สกรูพืดเตอร์ (Screw Feeder)	25
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	26
3.1 ระยะเวลาดำเนินการ.....	26
3.2 วางผังระบบขนส่ง	27
3.3 การออกแบบชุดทดลอง.....	28
3.3.1 ชุดทดลองการหาสมรรถนะของพัดลม.....	28
3.3.2 ชุดทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลม (f).....	29
3.3.3 ชุดทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s).....	30
3.4 การออกแบบเครื่องขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม.....	30
3.5 การออกแบบรัศมีความโค้งท่อ [3].....	31
3.6 ตัวจ่ายวัสดุแบบคอคอด (venturi).....	31
3.7 อาหารเม็ด.....	33
3.8 ส่วนประกอบของชุดทดลอง.....	35
บทที่ 4 การคำนวณจากทฤษฎี	38
4.1 ความหนาแน่นของลม (Density of air).....	40
4.2 อัตราการขนส่งวัสดุด้วยลม (Air flow rate and mass flow rate)	40
4.2.1 การคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราขนส่งวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศ (μ).....	40
4.2.2 การคำนวณความเร็วลมต่ำสุดในการไหลของท่อแนวราบ (saltation velocity).....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การคัดลอกหรือการนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้ทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหาในเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.3 การคำนวณความเร็วในการขนถ่ายวัสดุ (mass velocity)	41
4.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลม Friction(f) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัสดุ Solid friction (λ_s).....	41
4.3.1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลม Friction (f)	42
4.3.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ Solid friction (λ_s).....	43
4.4 คำนวณเสดสูญเสี่ยของลม (Head loss of air).....	45
4.4.1 การคำนวณเสดสูญเสี่ยในท่อตรง.....	45
4.4.2 การคำนวณหาเสดสูญเสี่ยในท่อจอ	45
4.4.3 การคำนวณหาเสดสูญเสี่ยรวมของระบบ	45
4.5 การคำนวณเสดสูญเสี่ยของการไหลของวัสดุ (Head loss of solid flow)	45
4.5.1 การคำนวณเสดสูญเสี่ยจากความเร่ง (Acceleration loss).....	46
4.5.2 การคำนวณเสดสูญเสี่ยจากการขนส่งวัสดุตามแนวตั้ง (Vertical loss)	46
4.5.3 การคำนวณเสดสูญเสี่ยจากการไหลไปตามท่อ (Pipe loss).....	46
4.5.4 การคำนวณเสดสูญเสี่ยเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง (Bend loss).....	46
4.5.5 เสดสูญเสี่ยรวมของการไหลของวัสดุ ($\Delta H_{T \text{ solid}}$).....	46
4.6 เสดสูญเสี่ยรวมของระบบการไหล 2 เฟส (ΔH_{system}).....	47
4.6.1 เสดสูญเสี่ยของการไหลของลม($\Delta H_{T \text{ air}}$).....	47
4.6.2 เสดสูญเสี่ยของการไหลของวัสดุ ($\Delta H_{T \text{ solid}}$)	48
4.6.3 เสดสูญเสี่ยของระบบการไหล 2 เฟส (ΔH_{system}).....	50
บทที่ 5 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	53
5.1 การทดลองที่ 1 การทดลองหาสมรรถนะของพัดลม	53
5.2 การทดลองที่ 2 การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลมและท่อ.....	56
5.3 การทดลองที่ 3 การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s).....	60
5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของพัดลมและเสดสูญเสี่ยจากการทดลอง.....	65
5.5 การออกแบบเครื่องส่งอาหารเม็ดด้วยลม.....	67
บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุปการวิจัย	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม ห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหาใดๆ โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

6.1 สรุปผลและการดำเนินงาน	69
6.2 ข้อเสนอแนะ	70
บรรณานุกรม.....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (K) [5]	12
ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์เฮดสูญเสียของท่อโค้ง [6]	20
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน ภาคการศึกษาที่ 1	26
ตารางที่ 3.2 แผนการดำเนินงาน ภาคการศึกษาที่ 2	26
ตารางที่ 3.3 การออกแบบบรัคมีความโค้งท่อ	31
ตารางที่ 4.1 Density and specific weight of air at 1 atmosphere pressure, at temperatures given as °C	40
ตารางที่ 4.2 Dynamic (absolute) and kinematic viscosity of air at 1 atmosphere pressure, at temperatures given as °C	42
ตารางที่ 4.3 เฮดสูญเสียของลม	47
ตารางที่ 4.4 เฮดสูญเสียของวัสดุ	48
ตารางที่ 4.5 เฮดสูญเสียของการไหล 2 เฟส	50
ตารางที่ 4.6 สรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	51
ตารางที่ 5.1 บันทึกผลการทดลองหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 1	54
ตารางที่ 5.2 บันทึกผลการทดลองหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 2	55
ตารางที่ 5.3 บันทึกผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลมและท่อ	57
ตารางที่ 5.4 ค่า Reynold number และ Friction factor	57
ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า Friction (f) จากการทดลอง จากสมการ Koo equation และจากสมการ Blasius equation	59
ตารางที่ 5.6 บันทึกผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของของวัสดุ (λ_s)	60
ตารางที่ 5.7 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(Re) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัสดุ (λ_s)	61
ตารางที่ 5.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s) จากการทดลองและจากการคำนวณ	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 พัดลม (Fan).....	3
รูปที่ 2.2 โบลเวอร์ (Blower).....	4
รูปที่ 2.3 เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor).....	4
รูปที่ 2.4 พัดลมแบบหมุนเหวี่ยงแบบใบพัดรัศมีตรง (Straight Blade) [5]	5
รูปที่ 2.5 พัดลมแบบหมุนเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งไปข้างหน้า (Forward Curved Blade Fans) [5]	5
รูปที่ 2.6 พัดลมแบบหมุนเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งไปข้างหลัง (Backward Curved Blade Fans) [5].....	5
รูปที่ 2.7 พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกนลักษณะที่ลมพัดเป็นสกรู (Tube Axial Fans) [5]	5
รูปที่ 2.8 พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกนลักษณะที่ลมพัดเป็นเส้นตรง (Vane Axial Fans) [5]	6
รูปที่ 2.9 AMCA 210 : Laboratory Methods of Testing Fans for Ratings [10].....	6
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงสมรรถนะของพัดลมที่ไม่เสถียร [5].....	7
รูปที่ 2.11 แสดงวิธีการวัดค่าเฮดสถิต (a) เฮดรวม (b) และเฮดจลน์ (c) [5].....	8
รูปที่ 2.12 การไหลแบบเบาบาง [6].....	13
รูปที่ 2.13 การไหลแบบหนาแน่น [6].....	13
รูปที่ 2.14 เม็ดพลาสติกที่ใช้ในสมการการคำนวณทางทฤษฎี.....	14
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_D และ Re_p [6].....	15
รูปที่ 2.16 จุดทำงานของกราฟเฮดและอัตราไหลของลม (operation point) [6].....	21
รูปที่ 2.17 กราฟระบบการขนส่งวัสดุด้วยลม [9].....	22
รูปที่ 2.18 หัวดูดวัสดุแบบเคลื่อนที่ [6].....	23
รูปที่ 2.19 วาล์วแบบล็อกสองชั้น (Gate Lock Valve) [6].....	23
รูปที่ 2.20 ลักษณะของตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรี [6].....	24
รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของโรตารีวาล์ว [9].....	25
รูปที่ 2.22 ตัวจ่ายวัสดุแบบสกรู [9]	25
รูปที่ 3.1 การวางผังของโรงงาน	27
รูปที่ 3.2 แผนภาพการออกแบบชุดทดลอง	28
รูปที่ 3.3 ภาพออกแบบชุดทดลองการหาสมรรถนะของพัดลม.....	29
รูปที่ 3.4 ภาพออกแบบชุดทดลองการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน(f)	29
รูปที่ 3.5 ภาพออกแบบชุดทดลองการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของไหล 2 สถานะ (λ_s).....	30
รูปที่ 3.6 ภาพจำลองเครื่องขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม.....	31
รูปที่ 3.7 ลักษณะของตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรี.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาทั้งหมด ไม่ให้นำไปใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 3.8 ภาพตัวจ่ายวัสดุที่ออกแบบ	33
รูปที่ 3.9 ภาพอาหารเม็ดที่ใช้ในการทดลอง	34
รูปที่ 3.10 ภาพน้ำหนักรอาหารเม็ดที่ยังไม่ผ่านการอบแห้ง	34
รูปที่ 3.11 ภาพน้ำหนักรอาหารเม็ดที่ผ่านการอบแห้ง.....	35
รูปที่ 3.12 PVC pipe.....	36
รูปที่ 3.13 Damper valve.....	36
รูปที่ 3.14 พัดลมตัวที่ 1 พัดลมแบบใบพัดโค้งไปข้างหน้า (Forward curved blade fan)	36
รูปที่ 3.15 พัดลมตัวที่ 2 พัดลม Vortex Ring Blower.....	37
รูปที่ 3.16 เครื่องวัดเฮดต่าง (Fluke 922).....	37
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณระบบขนส่งทางลม	39
รูปที่ 4.2 แผนภาพมูดี (Moody chart)	42
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Drag coefficient.....	43
รูปที่ 4.4 กราฟการสูญเสียเฮดของอากาศ.....	47
รูปที่ 4.5 กราฟการสูญเสียเฮดของวัสดุ.....	49
รูปที่ 4.6 เฮดสูญเสียของการไหล 2 เฟส.....	51
รูปที่ 5.1 ภาพชุดทดลองการหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 1	53
รูปที่ 5.2 กราฟสมรรถนะพัดลม 0.5 แรงม้า	54
รูปที่ 5.3 ภาพชุดทดลองการหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 2	55
รูปที่ 5.4 กราฟสมรรถนะพัดลม 1.5 แรงม้า	56
รูปที่ 5.5 ภาพชุดทดลองการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน(f).....	56
รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynold number และ Friction factor	58
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction (f) จากการทดลอง จากสมการ Koo equation และจากสมการ Blasius equation.....	59
รูปที่ 5.8 ภาพชุดทดลองการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s).....	60
รูปที่ 5.9 กราฟการขนส่งอาหารเม็ดจากการทดลอง	62
รูปที่ 5.10 การไหลแบบเบาบางที่อัตราไหล 0.038 m ³ /s.....	62
รูปที่ 5.11 การไหลแบบหนาแน่นที่อัตราไหล 0.016 m ³ /s	63
รูปที่ 5.12 กราฟการเปรียบเทียบเฮดสูญเสียจากทฤษฎีและการทดลอง	63
รูปที่ 5.13 กราฟระบบจากการทดลอง พัดลมตัวที่ 1	65
รูปที่ 5.14 กราฟระบบจากการทดลอง พัดลมตัวที่ 2	66
รูปที่ 5.15 ภาพมิเตอร์การไฟฟ้าที่เวลา 7.13 น.....	66
รูปที่ 5.16 ภาพมิเตอร์การไฟฟ้าที่เวลา 8.19 น.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดทั้งนี้ ลิขสิทธิ์นี้สงวนไว้โดยปรองบอง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 5.17 การออกแบบระบบขนส่งทางลม.....	68
รูปที่ 5.18 ระบบขนส่งทางลม.....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อาหารเม็ด (feed pellet) คือ อาหารสัตว์ทำมาจากปลาป่น (โปรตีน) แป้ง (คาร์โบไฮเดรต) และน้ำ บดผสมกันผ่านเครื่องทำอาหารเม็ด ก่อนที่จะถูกขนส่งไปอบแห้ง ดังนั้นการขนส่งอาหารเม็ดที่มีความชื้นจะทรงผลให้การขนส่งทำได้ยากขึ้น โดยทั่วไปจะต้องรออาหารเม็ดหล่นลงในกระบะรองอาหารเม็ดจนเต็ม แล้วใช้แรงงานคนเพื่อขนส่งอาหาร ปัญหาคือ

1. การส่งอาหารเม็ดที่ขนส่งผลให้อาหารเม็ดติดกัน
2. สิ้นเปลืองเวลาในการทำงาน
3. ได้อาหารเม็ดที่ไม่เป็นทรงกลมเนื่องจากการกดทับในกระบะ

ดังนั้นการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดคือการขนส่งที่รวดเร็ว และต่อเนื่อง การใช้ลมส่งผ่านท่อในการขนส่งจึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด การขนส่งโดยใช้ท่อนั้นมีใช้กันมานานแล้ว ในสมัยโบราณชาวจีนใช้ไม้ไผ่สำหรับชนก้าชธรรมชาติ ระบบขนส่งวัสดุด้วยลมมีหลักการทำงานที่ง่ายและเหมาะสมกับการขนส่งวัสดุปริมาณมวลซึ่งวัสดุจะอยู่ในรูปแบบเม็ดและผงไปตามท่อ

ในการออกแบบและสร้างระบบขนส่งวัสดุด้วยลม คณะผู้จัดทำเล็งเห็นความสำคัญในเรื่องของการลดต้นทุนการผลิต ความเร็วในการผลิต เพิ่มกำลังผลผลิต ทำให้สภาพการทำงานดีขึ้น ลดปริมาณของเสีย เพิ่มประโยชน์ของการใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ทำให้การรับจ่ายวัสดุเป็นไปตามต้องการ และที่สำคัญคือเพิ่มกำไร

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปัญหา

1. ออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลม (f) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอาหารเม็ด (λ_s)
2. ประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมและอาหารเม็ดที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ
3. ออกแบบและสร้างระบบขนส่งอาหารเม็ดด้วยลมที่ใช้งานในอุตสาหกรรมได้จริง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สร้างชุดทดลองที่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของไหลระหว่างลมกับท่อ และลมกับอาหารเม็ด และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้คำนวณตามสมการ แล้วมีความผิดพลาดที่รับได้ เพื่อไม่ว่ากรณีใดขอยังสืบ ลึกซึ้งกว่านี้ให้คำแนะนำ และแจ้งถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เพื่อที่จะออกแบบเครื่องให้ตรงตามวัตถุประสงค์ ผู้จัดทำต้องศึกษาในเรื่อง

1. ส่วนประกอบระบบขนส่งด้วยลม
2. เหน็ดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลในท่อ
3. เหน็ดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลของวัสดุ
4. เหน็ดสูญเสียดังกล่าวจากการไหลของไหล 2 เฟส
5. ตัวจ่ายวัสดุ
6. จุดทำงานของกราฟระบบ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการส่งอาหารโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 mm ถึง 7 mm ที่มีความหนาแน่นระหว่าง 400 kg/m^3 ถึง 700 kg/m^3
2. ศึกษาการส่งอาหารในช่วงความเร็วลม 8 m/s ถึง 20 m/s เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
3. ศึกษาการส่งอาหารที่มีอัตราการไหลไม่เกิน 200 kg/h

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

การขนส่งวัสดุปริมาณมวลหรืออาหารเม็ด คณะผู้จัดทำต้องการขนส่งอาหารเม็ดโดยใช้ความเร็วในช่วงการไหลเบาบางเพื่อลดการติดกันของเม็ดอาหาร และยังช่วยไล่ความชื้นออกจากอาหารเม็ดได้ จากการศึกษาพบว่ามีพารามิเตอร์บางค่าที่มีค่าแตกต่างกันในภูมิภาค ในการทดลองนี้จึงมุ่งหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมและของวัสดุ นำไปสู่การคำนวณหาเหน็ดสูญเสียดังกล่าวที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น การเปรียบเทียบเหน็ดที่ได้จากการทดลองและเหน็ดจากการคำนวณหาเปอเซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และหาความเร็วในการแบ่งเฟสของไหล 2 เฟสระหว่าง การไหลแบบหนาแน่นและการไหลแบบเบาบาง เนื่องจากสมการการคำนวณสามารถนำไปใช้ได้เฉพาะการไหลแบบเบาบางเท่านั้น และสุดท้ายคือออกแบบระบบขนส่งด้วยลมสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การขนส่งวัสดุเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายวัสดุในการผลิต ซึ่งถ้าพิจารณาจากในโรงงานแล้ว การขนส่งนับเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญ ดังนั้นการขนส่งวัสดุที่มีประสิทธิภาพช่วยเพิ่มกำลังการผลิต เพิ่มพื้นที่ทำงาน, ลดความเสียหายจากการขนส่ง และที่สำคัญคือลดต้นทุน การขนส่งวัสดุที่นิยมทั่วไป คือ 1. การขนส่งวัสดุด้วยสายพานลำเลียง ข้อดีคือความปลอดภัยในการขนส่งแต่ข้อเสียคือไม่สามารถส่งในทางที่ชันเพราะวัสดุจะไถลล้นเสียหาย 2. การขนส่งวัสดุด้วยเกลียวลำเลียง เหมาะกับวัสดุชิ้นเล็กและสามารถขนส่งชันทางชันได้ ไม่เหมาะกับวัสดุอ่อนนุ่มเนื่องจากจะทำให้วัสดุเสียหายเมื่อผ่านเกลียวลำเลียง 3. การขนส่งด้วยลมเหมาะกับวัสดุชิ้นเล็กและใช้กับวัสดุอ่อนนุ่มได้ไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นสำหรับการเลือกวิธีการขนส่งอาหารปลานั้นจะเลือกใช้การขนส่งวัสดุด้วยลมเนื่องจากอาหารปลามีความอ่อนนุ่ม มีขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นน้อย ระบบขนส่งด้วยลมมีส่วนประกอบเบื้องต้นที่สำคัญแบ่งได้ 3 ส่วน ได้แก่

- 1) ต้นกำเนิดลม (Air mover)
- 2) ท่อลำเลียงวัสดุ (Pneumatic conveying)
- 3) ตัวจ่ายวัสดุ (Feeder)

2.1 ต้นกำเนิดลม (Air mover)

2.1.1 ประเภทของต้นกำเนิดลม [5]

ต้นกำเนิดลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของอากาศมีด้วยกันหลายประเภทขึ้นกับลักษณะการใช้งาน ซึ่งจาก Japanese Society of Mechanical Engineers (JSME) ได้แบ่งประเภทของพัดลมได้ดังนี้

- 1) พัดลม (Fan) ใช้เรียกอุปกรณ์ที่ทำงานที่เฮดที่น้อยกว่า 1 เมตรน้ำ



รูปที่ 2.1 พัดลม (Fan)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) โบลเวอร์ (Blower) ใช้เรียกอุปกรณ์ที่ทำงาน ณ เหนือที่มากกว่า 1 เมตรน้ำ จนถึง 10 เมตรน้ำ



รูปที่ 2.2 โบลเวอร์ (Blower)

3) เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ใช้เรียกอุปกรณ์ที่ทำงาน ณ เหนือที่มากกว่า 1 บาร์หรือ 10 เมตรน้ำ



รูปที่ 2.3 เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor)

นอกจากการแบ่งตาม JSME ตามข้างต้นการแบ่งพัฒมสามารถแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศ แบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่

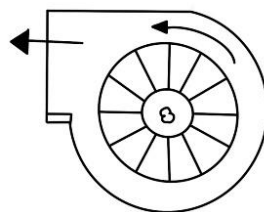
1) พัฒมแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal flow fan)

- แบบใบพัดรีตมีตรง (Straight Blade)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

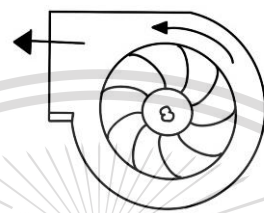
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



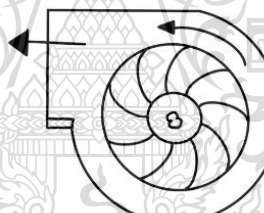
รูปที่ 2.4 พัดลมแบบหมุนเหวี่ยงแบบใบพัดรัศมีตรง (Straight Blade) [5]

- แบบใบพัดโค้งไปข้างหน้า (Forward Curved Blade Fans)



รูปที่ 2.5 พัดลมแบบหมุนเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งไปข้างหน้า (Forward Curved Blade Fans) [5]

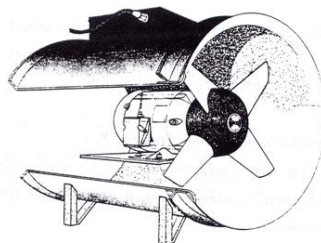
- แบบใบพัดโค้งไปข้างหลัง (Backward Curved Blade Fans)



รูปที่ 2.6 พัดลมแบบหมุนเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งไปข้างหลัง (Backward Curved Blade Fans) [5]

- 2) พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน (Axial Flow Fan)

- ลักษณะที่ลมพัดเป็นสกรู (Tube Axial Fans)



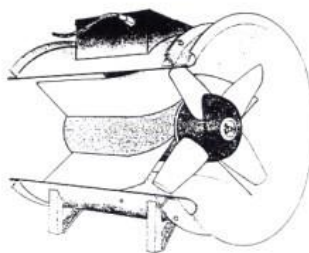
รูปที่ 2.7 พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกนลักษณะที่ลมพัดเป็นสกรู (Tube Axial Fans) [5]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะที่ลมพัดเป็นเส้นตรง (Vane Axial Fans)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

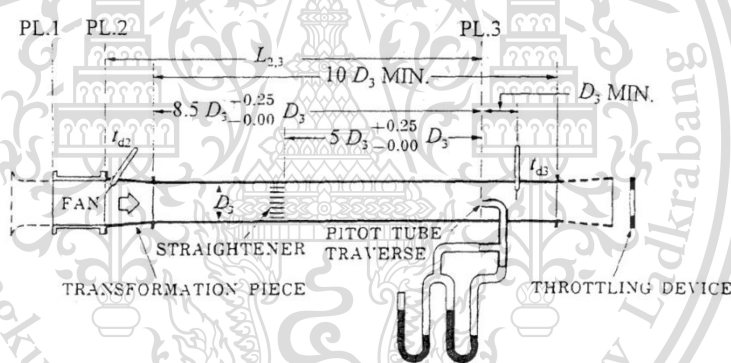
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.8 พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกนลักษณะที่ลมพัดเป็นเส้นตรง (Vane Axial Fans) [5]

2.1.2 สมรรถนะของพัดลม (Fan performance) [10]

การทดลองสมรรถนะพัดลมได้นำข้อมูลมาจากมาตรฐาน Air Movement and Control Association (AMCA) ที่เป็นที่ยอมรับของสากล จะมีวิธีการทดลองหาสมรรถนะหลายวิธี ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการทดลองหรือผังการทดลองตามรูปที่ 2.9 มีพัดลมที่ทดสอบติดอยู่ข้างหน้าด้วยตัวแปลงขนาดท่อ และท่อตรงยาว $10D$ (D คือขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ) และติดตั้ง pitot tube ที่ $8.5D$ และท้ายสุดติดตั้งตัวหรี่ลม (Damper) เพื่อลดความเร็วของลม (V_f)



รูปที่ 2.9 AMCA 210 : Laboratory Methods of Testing Fans for Ratings [10]

เฮดรวมของพัดลม H_T (mmH₂O) หาได้จากผลรวมของเฮดสถิตย์ที่ระนาบ PL.3 ,เฮดความเร็วที่ระนาบ PL.3 ,เฮดสูญเสียจากระยะระนาบ PL.2 ถึง PL.1 และลบด้วยเฮดรวมที่ PL.1 ดังสมการที่ (2.1) [10]

$$H_T = H_{S3} - H_{T1} + H_{V3} + f \left(\frac{L_{2,3}}{D} \right) H_{V3} \quad (2.1)$$

H_{T1} คือ เฮดรวมที่จุด PL.1 (mmH₂O)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H_{S3} คือ เฮดสถิตย์ที่จุด PL.3 (mmH₂O)

H_{V3} คือ เฮดจลน์ที่จุด PL.3 (mmH₂O)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อลม (mm)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

L_{2,3} คือ ระยะห่างจาก PL.2 ถึง PL.3 (mm)

กำลังลม (Air Power) สามารถหาได้จากสมการ (2.2) กำลังลม (P_A) คำนวณในระบบ SI มีเป็นหน่วย kW สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$P_A = \frac{Q \times H_T}{102} \quad (2.2)$$

P_A = กำลังลม (kW)

Q = อัตราการไหลของลมในท่อ (m^3/s)

H_T = เหน็ดรวม (mmH_2O)

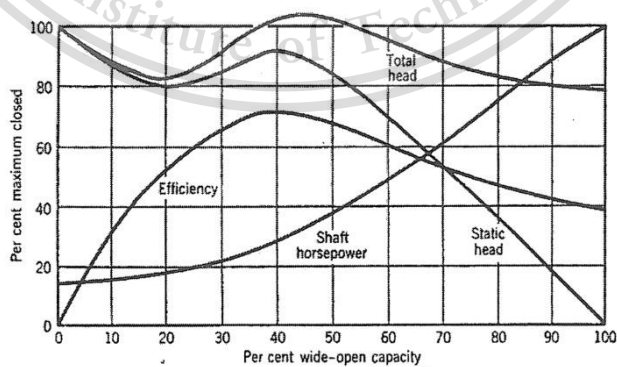
กำลังที่ให้กับต้นกำลัง(kW) หาได้จากสมการ (2.3)

$$\text{กำลังที่ต้องให้กับต้นกำลัง} = \frac{\text{กำลังลม}}{\eta_F \times \eta_T \times \eta_{\text{ต้นกำลัง}}} \quad (2.3)$$

η_F คือ ประสิทธิภาพพัดลม

η_T คือ ประสิทธิภาพการส่งกำลัง

$\eta_{\text{ต้นกำลัง}}$ คือ ประสิทธิภาพต้นกำลัง



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงสมรรถนะของพัดลมที่ไม่เสถียร [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จากรูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างหนึ่งของกราฟสมรรถนะของพัดลม สังเกตกราฟ Total head

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 30 -50% เป็นช่วงที่กราฟเว้าลงซึ่งในช่วงที่กราฟเว้าลงนี้ไม่เหมาะกับการเลือกเป็นจุดทำงานของ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

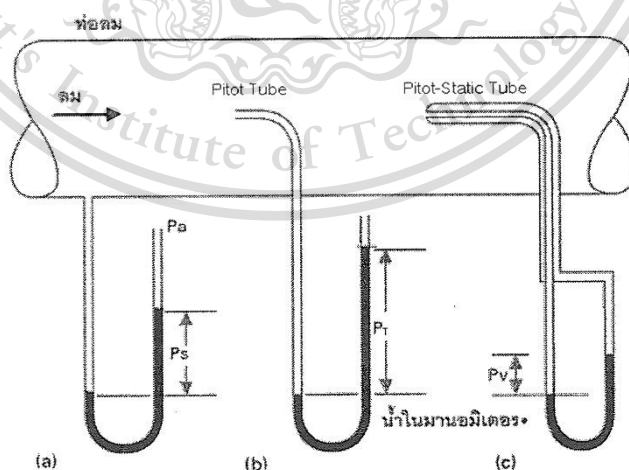
ระบบเพราะเป็นช่วงที่อัตราการไหลของลมจะแกว่ง ดังนั้นไม่ควรเลือกช่วงทำงานนี้ในการออกแบบระบบขนส่งทางลม

2.2 ท่อลำเลียงวัสดุ (Pneumatic conveying)

ท่อลำเลียงในระบบขนส่งด้วยลมเป็นหัวข้อสำคัญข้อหนึ่งที่ทำให้สามารถเลือกพัดลมได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น คือการคำนวณเฮดสูญเสียได้แม่นยำก็จะทำให้เลือกพัดลมได้ขนาดพอดีไม่กินไฟมากเกินไป ส่วนประกอบท่อลำเลียงประกอบไปด้วยท่อตรง ท่องอ ข้อต่อแยก ซึ่งในการขนส่งด้วยลมจะแยกพิจารณาระหว่างเฮดสูญเสีย 2 อย่างคือ 1)เฮดสูญเสียจากการไหลของลม 2)เฮดสูญเสียจากการไหลอาหารเม็ด(Particle flow) และสุดท้ายนำเฮดทั้งสองมารวมเป็นเฮดของการขนส่งด้วยลม

2.2.1 การไหลของอากาศในท่อ (Air flow) [5]

เฮดของอากาศ เฮดของลมที่ตำแหน่งต่างๆ ในท่อลม ประกอบด้วยความเฮดสถิต (Static head, H_S) เฮดจลน์ (Velocity head, H_V) และเฮดรวม (Total head, H_T) ซึ่งเป็นผลรวมของความเฮดสองค่าแรก รูปที่ 2.11 แสดงการวัดค่าของเฮดทั้งสาม เฮดสถิตสามารถวัดได้ด้วยมานอมิเตอร์ตามรูปที่ 2.11a เฮดรวมสามารถวัดได้ด้วยpitot tube แบบธรรมดาตามรูปที่ 2.11b และค่าเฮดจลน์วัดได้ด้วย Pitot-Static Tube ซึ่งต้องใช้ร่วมกับมานอมิเตอร์ตามรูปที่ 2.11c ท่อทั้งสามเป็นท่อขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับท่อลม ภายในบรรจุน้ำดังนั้นค่าที่วัดได้จากการวัด pitot tube และ มานอมิเตอร์ในโปรเจกต์นี้จะใช้หน่วย มิลลิเมตรน้ำ ทั้งหมด (mmH_2O) ซึ่งวัดจากความสูงที่แตกต่างระหว่างท่อฝั่งซ้ายและฝั่งขวาดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงวิธีการวัดค่าเฮดสถิต (a) เฮดรวม (b) และเฮดจลน์ (c) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ และดัดแปลงอย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

$$H_T = H_S + H_V \quad (2.4)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

H_T คือ เสดรวม (Total head, mmH₂O)

H_S คือ เสดสถิต (Static head, mmH₂O)

H_V คือ เสดจลน์ (Velocity head, mmH₂O)

อัตราการไหลของลม สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$Q_f = V_f A \quad (2.5)$$

Q_f คือ อัตราการไหลของลมในท่อ (m³/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อลม (m²)

V_f คือ ความเร็วลม (m/s)

การไหลในท่อสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. การไหลแบบราบเรียบ (Lamina Flow) จะเป็นการไหลที่มีรูปแบบของความเร็วในการไหล มีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางท่อแล้วความเร็วจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อใกล้ผนังท่อ

2. การไหลแบบแปรปรวน (Turbulent Flow) จะเป็นการไหลที่มีรูปแบบของความเร็วในการไหลไม่แน่นอน การไหลของลมอัดในระบบขนส่งวัสดุด้วยลมส่วนใหญ่จะมีการไหลแบบแปรปรวน

ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number, Re) ซึ่งเป็นเลขกำหนดแบบการไหลภายในท่อ การไหลแบบราบเรียบจะมีค่า $Re < 2300$ สำหรับการไหลแบบแปรปรวนจะมีค่า $Re > 4000$ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Re = \frac{DV_f \rho}{\eta} = \frac{DV_f}{\gamma} \quad (2.6)$$

Re คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (m)

V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)

η คือ ความหนืดของของไหล (Pa·s)

γ คือ ความหนืดจลน์ของของไหล (m²/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2 เฮดสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศ (Air flow head loss) [5]

การไหลของอากาศคือการอากาศถูกขับจากใบพัดของพัดลมทำให้อากาศเฮดสูงขึ้น เมื่อถูกส่งเข้าสู่ระบบท่อ จะมีความต้านทานต่อการไหลของอากาศ ซึ่งเรียกว่า การลดลงของเฮด (Pressure Drop) ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากความเสียดทานภายในของระบบท่อและข้อต่อต่าง ๆ ดังนั้นพัดลมจึงต้องสร้างความแตกต่างของเฮดรวม พลังงานหรือเฮดในระหว่างการไหลของของไหล ณ เวลาหนึ่งประกอบด้วยสามส่วน คือ เฮดเฮด เฮดความเร็วและ เฮดความสูง ซึ่งพิจารณาจากสมการพลังงานของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) ตามสมการที่ (2.7)

$$H = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V_f^2}{2g} \quad (2.7)$$

H คือ เฮดของเฮด (mmH₂O)

P คือ เฮดสถิตย (Pa)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s²)

V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)

Z คือ ความสูงเหนือระดับอ้างอิง

สำหรับของไหลที่ใช้สมการข้างต้น ถ้าเป็นอากาศ นั้นจะมีความหนาแน่น (ρ) น้อยมาก ทำให้เทอม Z ในสมการข้างต้นนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับสองเทอมที่เหลือ ดังนั้นจึงตัดเทอม Z ทิ้งไป ดังนั้นสมการที่ได้ คือ

$$H = \frac{P}{\rho g} + \frac{V_f^2}{2g} \quad (2.8)$$

เมื่อพิจารณาการไหลระหว่างจุดสองจุดในท่อลม เฮดทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลจะประกอบด้วย H_L คือเฮดการสูญเสียรวม ซึ่งจะประกอบด้วยเฮดสูญเสียเนื่องจากความฝืดในท่อลม H_{Lf} และเฮดสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ H_{Le} ดังสมการที่ (2.9)

$$H_L = H_{Lf} + H_{Le} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลีโอนัฐบาลวิไลรัตน์ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H_L คือ เฮดการสูญเสียรวม (mmH₂O)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

H_{Lf} คือ ความฝืดในท่อลม (mmH₂O)

H_{Le} คือ เหน็ดสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ (mmH₂O)

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานสามารถประมาณค่าได้ด้วยวิธีเดียวกันกับการสูญเสียเนื่องจากเหตความฝืดของเหลว โดยใช้สมการของ Darcy-Weisbach สมการที่ (2.10) ควบคู่กับการใช้ Moody's Diagram

$$H_{Lf} = f \times \frac{L}{D} \times H_v \quad (2.10)$$

f คือ สัมประสิทธิ์ของความฝืด ประมาณค่าได้จาก Moody's Diagram

L คือ ความยาวของท่อ (m)

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (m)

H_v คือ เหน็ดความเร็ว (mmH₂O)

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถหาได้จาก moody chart แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้สมการที่ได้จากการพิจารณาการไหลของลมแบบปั่นป่วนของสมการ Koo[9] ดังนี้

$$f = 0.0014 + 0.125\text{Re}^{-0.32} \quad (2.11)$$

f คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

Re คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์

และพิจารณาสมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ Blasius[9] ดังนี้

$$f = 0.0791\text{Re}^{-0.25} \quad (2.12)$$

f คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

Re คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เหน็ดความเร็วหรือเหน็ดจลน์ สมการที่จะใช้จะอยู่ในหน่วยมิลลิเมตรน้ำดังสมการ (2.13) การนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$H_v = \frac{500V_f^2}{g} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \quad (2.13)$$

H_v คือ เฮดความเร็ว (mmH₂O)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m³)

V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s²)

เฮดสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์จะมีการสูญเสียเฮดเช่นกัน การคำนวณเฮดสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ จะพิจารณาจากสมการ (2.14)

$$H_{Le} = K \times H_v \quad (2.14)$$

H_{Le} คือ เฮดสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ (mmH₂O)

K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์ ดูจากตารางที่ 2.1

H_v คือ เฮดความเร็ว (mmH₂O)

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (K) [5]

ชนิดของอุปกรณ์	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล(K)
ข้อต่อ 90°	
ข้อต่อกลม ผิวเรียบ	0.22
ข้อต่อกลม ต่อฉาก	1.20
ข้อต่อสี่เหลี่ยม ผิวเรียบ	1.18
ข้อต่อ T	
ไหลผ่านท่อหลัก	0.10
ไหลแยกออกจากท่อ	1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.3 การไหลวัสดุ 2 เฟส (2 Phase flow) [6]

การไหลของวัสดุ 2 เฟสคือการไหลของวัสดุผสมไปพร้อมกับอากาศ ความเข้าใจแรกๆ ของไหล 2 เฟสคือสมการที่ใช้ในการคำนวณหาเฮดสูญเสียรวมทั้งหมดของการไหล 2 เฟส (2 phase flow) จะต้องรวมกันระหว่างการไหลของลม (Air flow) กับการไหลของวัสดุ (Particle flow) ในเล่มโปเรเจนนี่จึงได้ทำการแบ่งเนื้อหาทั้งสองออกจากกันแล้วนำมาคิดรวมในท้ายที่สุด จุดสำคัญคือทุกสมการในการคำนวณเฮดการไหลของวัสดุ (Head of particle flow) ไม่สามารถใช้คำนวณการไหลแบบหนาแน่นได้ (Dense phase) หรือกล่าวอีกอย่างคือความเร็วลมต่ำสุดในการไหลของลม (V_f) ไม่ต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเคลื่อนที่แนวราบ (V_{st})

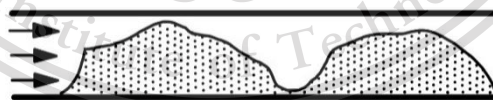
การแบ่งประเภทการไหลของวัสดุ สามารถแบ่งได้ตามปริมาณวัสดุที่ไหลไปพร้อมกับอากาศได้ 2 ประเภทดังนี้

1) การไหลแบบเบาบาง (Dilute phase) การไหลแบบนี้ใช้ปริมาณอากาศมาก เพื่อให้ลมในท่อมีความเร็วสูงมากพอที่จะสามารถพาวัสดุให้ลอยอยู่ในกระแสการไหลของลมได้ ในขณะที่ลมในท่อมืดต่ำ



รูปที่ 2.12 การไหลแบบเบาบาง [6]

2) การไหลแบบหนาแน่น (Dense Phase) เป็นการไหลที่มีปริมาณอากาศน้อยกว่า ทำให้ลมในท่อมืดต่ำ แต่ลมในท่อมืดสูง จึงไม่จำเป็นต้องทำให้วัสดุลอยอยู่ในกระแสการไหลของลม



รูปที่ 2.13 การไหลแบบหนาแน่น [6]

อัตราส่วนของการขนส่ง (μ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง อัตราไหลของมวลวัสดุ (m_s) ต่ออัตราไหลของมวลอากาศ (m_f) หากเป็นการไหลแบบเบาบางจะมีอัตราส่วนของการขนส่งที่น้อยหรือใกล้เคียง 1 แต่ถ้าอัตราส่วนมีค่ามากหรือเพราะอัตราไหลของวัสดุมีมาก ก็จะเป็นการไหลแบบหนาแน่น อัตราส่วนการไหลเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งบอกที่ลักษณะการไหลของวัสดุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ $\mu = \frac{m_s}{m_f}$ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้ (2.15)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

μ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของมวลวัสดุ (m_s) ต่ออัตราไหลของมวลอากาศ (m_f)

m_s คือ อัตราไหลของมวลวัสดุ (kg/s)

m_f คือ อัตราไหลของมวลอากาศ (kg/s)



รูปที่ 2.14 เม็ดพลาสติกที่ใช้ในสมการการคำนวณทางทฤษฎี

จากสมการความเร็วลมต่ำสุดในการไหลของท่อแนวราบที่ได้จากการทดลองขนส่งวัสดุของท่อขนาด 50, 100, 200 และ 400 mm กับวัสดุพลาสติกโพลีสไตรีน (Polystyrol-475k) ตามรูปที่ 2.14 ความหนาแน่น 1050 kg/m^3 เมื่อแทนค่าอัตราการขนส่งวัสดุ (μ) และขนาดอาหารเม็ด (d) จะได้ความเร็วต่ำสุดที่เป็นค่าที่แบ่งประเภทการไหลของวัสดุ เมื่อความเร็วลมมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุด การไหลของวัสดุเป็นการไหลแบบเบาบาง และในทางตรงกันข้ามเมื่อความเร็วลมมีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุด จะเป็นการไหลของวัสดุแบบหนาแน่น ได้ตามสมการ (2.16) [9]

$$V_{st} = \frac{1.1d+2.5}{\sqrt{101.44d+1.96\mu}} \cdot \sqrt{gD} \quad (2.16)$$

V_{st} คือ ความเร็วลมต่ำสุดในการไหลของท่อแนวราบ

μ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของมวลวัสดุ (m_s) ต่ออัตราไหลของมวลอากาศ (m_f)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุ (m)

2.2.3.1 พลศาสตร์การไหลของวัสดุ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การศึกษาการไหลของวัสดุในของไหลต้องย้อนไปดูการทดลองของนิวตันในปี 1710 ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม ก็ยังห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การศึกษา Drag force มีความสัมพันธ์ดังนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$F = C_D \frac{\rho_a}{2} (V_f - V_s)^2 A \quad (2.17)$$

F คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

C_D คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์

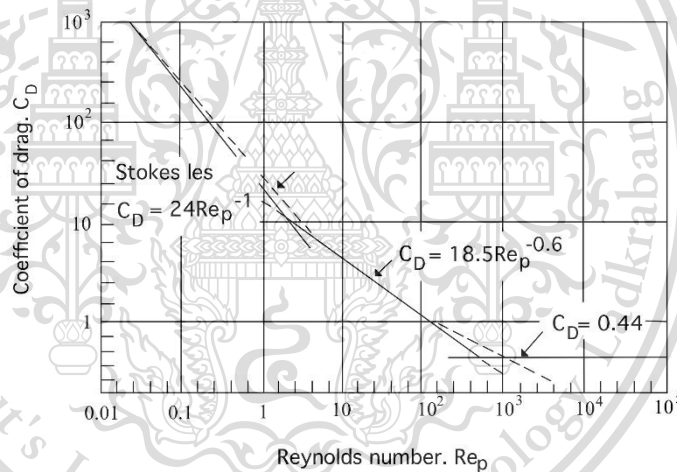
ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)

V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)

V_s คือ ความเร็วของวัสดุ (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m²)

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์รูปร่างของวัสดุ (C_D) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของวัสดุที่จะเป็นตัวกำหนดสถานะการไหลของวัสดุ (Flow region) ตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_D และ Re_p [6]

สามารถหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลของวัสดุได้ดังนี้

$$Re_p = \frac{V_f d}{\nu} \quad (2.18)$$

Re_p คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของวัสดุ

V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)

d คือ ขนาดของวัสดุ (m)

ν คือ ความหนืดจลน์ของของไหล (m²/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้ให้ด้วยประการเป็นเอกฉันท์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทราบสถานะการไหลของวัสดุ (Flow region) ทำให้เราสามารถหาสัมประสิทธิ์รูปร่างของวัสดุ (C_D) และความเร็วในการตกอิสระ (U_{f_0}) ซึ่งสามารถหาสถานะการไหลได้จากสมการ

$$K = d \cdot \left[\frac{g \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\eta^2} \right]^{1/3} \quad (2.19)$$

โดยค่า K ที่คำนวณจะระบุสถานะการไหล ดังนี้

$K < 3.3$	ช่วง Stoke
$3.3 < K < 43.6$	ช่วง Intermediate
$43.6 < K < 2360$	ช่วง Newton
$K > 2360$	ช่วง Supercritical

จากการคำนวณค่า K ทำให้ทราบสถานะการไหล (Flow regions) นำไปเลือกช่วงสมการเพื่อคำนวณหาความเร็วในการตกอย่างอิสระ (Terminal Velocity, U_{f_0}) ได้จากสมการที่แบ่งออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้

1. ช่วง Stoke ได้จากสมการ $U_{f_0} \cong \frac{gd^2(\rho_p - \rho_f)}{18\eta}$
2. ช่วง Intermediate ได้จากสมการ $U_{f_0} \cong \frac{0.153d^{0.14}}{\nu^{0.43}} \left[\frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0.71}$
3. ช่วง Newton ได้จากสมการ $U_{f_0} \cong 1.73 \cdot \left[\frac{gd(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0.5}$
4. ช่วง Supercritical ได้จากสมการ $U_{f_0} \cong 3.65 \cdot \left[\frac{gd(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0.5}$

โดยที่ตัวแปรต่างๆดังนี้

U_{f_0} คือ ความเร็วในการตกอิสระ (m/s)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุ (m)

การหาความเสียดทานของการไหลของวัสดุต้องการค่าฟรอนด์และฟรอนด์และฟรอนด์

ฟรอนด์เป็นตัวเลขที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนของความเฉื่อยของการไหลตั้งชื่อตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า William Froude ตั้งสมการดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$F_r = \frac{V_f^2}{g \cdot D} \quad (2.20)$$

- F_r คือ ฟรราวด์นัมเบอร์
 V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s²)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

ค่าฟรราวด์พาดิเคิล (F_{rp}) เป็นตัวแปรไร้มิติของการไหลของวัสดุ หาได้จากสมการ (2.21) เพื่อนำไปหาค่าความเสียดทานของวัสดุ

$$F_{rp} = \frac{U_{fo}^2}{g \cdot d} \quad (2.21)$$

- U_{fo} คือ ความเร็วในการตกอิสระ (m/s)
 F_{rp} คือ ฟรราวด์พาดิเคิล
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s²)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุ (m)

ความเสียดทานของการไหลของวัสดุ (Solid friction factor) ที่ได้จากการทดลองของ Stegmaier ดังนี้ [9]

$$\lambda_s = \frac{0.082 \cdot F_{rp}^{0.25}}{\mu^{0.3} \cdot F_r^{0.86}} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{0.1} \quad (2.22)$$

- λ_s คือ ความเสียดทานของการไหลของวัสดุ
 F_{rp} คือ ฟรราวด์พาดิเคิล
 F_r คือ ฟรราวด์นัมเบอร์
 μ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของมวลวัสดุ (m_s) ต่ออัตราไหลของมวลอากาศ (m_a)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุ (m)

2.2.3.2 เฮตสูญเสียจากการไหลของวัสดุ (Particle head loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การคำนวณโดยใช้พื้นฐานทางด้านกลศาสตร์ของไหลซึ่งมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก แต่ก็สามารถลดความซับซ้อนลงได้โดยการกำหนดความหนาแน่นของอากาศคงที่ ดังนั้นการนำผลการคำนวณและการทดลองในเล่มนี้ไปใช้กับสถานการณ์อื่นจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น การคำนวณแบ่งการหาเสดสูญเสียนในระบบการขนส่งวัสดุด้วยลมออกเป็นส่วนๆดังนี้

- 1.เสดสูญเสียนจากความเร่ง (Acceleration loss)
- 2.เสดสูญเสียนจากการขนส่งวัสดุตามแนวตั้ง (Vertical loss)
- 3.เสดสูญเสียนจากการไหลไปตามท่อ (Pipe loss)
- 4.เสดสูญเสียนจากการไหลผ่านท่อโค้ง (Bend loss)

1) เสดสูญเสียนเนื่องจากความเร่ง

ขณะที่วัสดุบรรจุอยู่ในถังเก็บจะอยู่ในสภาวะนิ่ง แต่เมื่อถูกจ่ายเข้าไปในระบบขนส่งวัสดุด้วยลมก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมอย่างทันที เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วที่ได้กำหนดไว้ ทำให้เกิดเสดสูญเสียนขึ้นทั้งจากวัสดุ ซึ่งจะสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ [6]

$$H_a = \frac{1000\rho_f V_s^2}{\rho_w g} \left(0.5 + \frac{\mu V_s}{V_f} \right) \quad (2.23)$$

H_a	คือ	เสดสูญเสียนเนื่องจากความเร่ง (mmH ₂ O)
ρ_f	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)
ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m ³)
V_s	คือ	ความเร็วของวัสดุ (m/s)
V_f	คือ	ความเร็วของลม (m/s)
g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s ²)
μ	คือ	อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของมวลวัสดุ (m _s) ต่ออัตราไหลของมวลอากาศ (m _f)

ความเร็วในการขนส่งวัสดุ (Mass velocity) มักมีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของอากาศ (V_f) หรือสามารถหาค่าประมาณด้วยสมการดังนี้ [6]

$$V_s = V_f(1-0.008d^{0.3}\rho_p^{0.5}) \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์ทั้งหมดจะให้อดแก่ผู้จัดทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ρ_p คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m³)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- V_s คือ ความเร็วของวัสดุ (m/s)
 V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุ (m)

2) เฮดสูญเสียเนื่องจากขนส่งวัสดุตามแนวตั้ง
 เป็นเฮดสูญเสียที่เกิดจากการขนส่งวัสดุขึ้นตามแนวตั้ง ซึ่งจะสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ
 ดังต่อไปนี้ [6]

$$H_z = \frac{1000\mu \cdot \rho_f \cdot z \cdot V_f}{\rho_w \cdot V_s} \quad (2.25)$$

- H_z คือ เฮดสูญเสียเนื่องจากขนส่งวัสดุตามแนวตั้ง (mmH₂O)
 μ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของมวลวัสดุ (m_s) ต่ออัตราไหลของมวลอากาศ (m_f)
 ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)
 ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m³)
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m³)
 z คือ ระยะทางขนส่งวัสดุตามแนวตั้ง (m)
 V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)

3) เฮดสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ
 เป็นเฮดสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างท่อกับอากาศ และระหว่างท่อกับ
 วัสดุซึ่งจะสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ ดังต่อไปนี้ [6]

$$H_L = \frac{500\rho_f \cdot V_f^2 \cdot L}{D \cdot \rho_w \cdot g} (\mu \cdot \lambda s) \quad (2.26)$$

- H_L คือ เฮดสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ (mmH₂O)
 μ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของมวลวัสดุ (m_s) ต่ออัตราไหลของมวลอากาศ (m_f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์โดยสถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง (Ladkrabang Institute of Technology) ซึ่ง
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม ห้ามใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)
 L คือ ความยาวของท่อ (m)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s²)
 λ_s คือ ความเสียหายของการไหลของวัสดุ

4) เหตุสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง

ในขณะที่วัสดุและอากาศไหลผ่านท่อโค้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลทันที เป็นผลทำให้ความเร็วของวัสดุและอากาศลดลง ดังนั้นเมื่อวัสดุและอากาศไหลออกจากท่อโค้งจะมีความเร็วต่ำเกินไป จำเป็นต้องมีการเร่งความเร็วให้กับวัสดุและอากาศให้มีความเร็วตามที่ได้ออกแบบไว้ จึงทำให้เกิดเหตุสูญเสียขึ้นในระบบ สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้ [6]

$$H_b = \frac{500N \cdot B \cdot \rho_f \cdot V_f^2 \cdot (1 + \mu)}{g \cdot \rho_w} \quad (2.27)$$

- H_b คือ เหตุสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง (mmH₂O)
 μ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของมวลวัสดุ (m_s) ต่ออัตราไหลของมวลอากาศ (m_f)
 ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)
 ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m³)
 N คือ จำนวนท่อโค้งในระบบ
 B คือ สัมประสิทธิ์เหตุสูญเสียของท่อโค้ง (ในตาราง)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s²)
 V_f คือ ความเร็วของลม (m/s)

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์เหตุสูญเสียของท่อโค้ง [6]

อัตราส่วนรัศมีความโค้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อโค้ง	B
2	1.5
4	0.75
6	0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

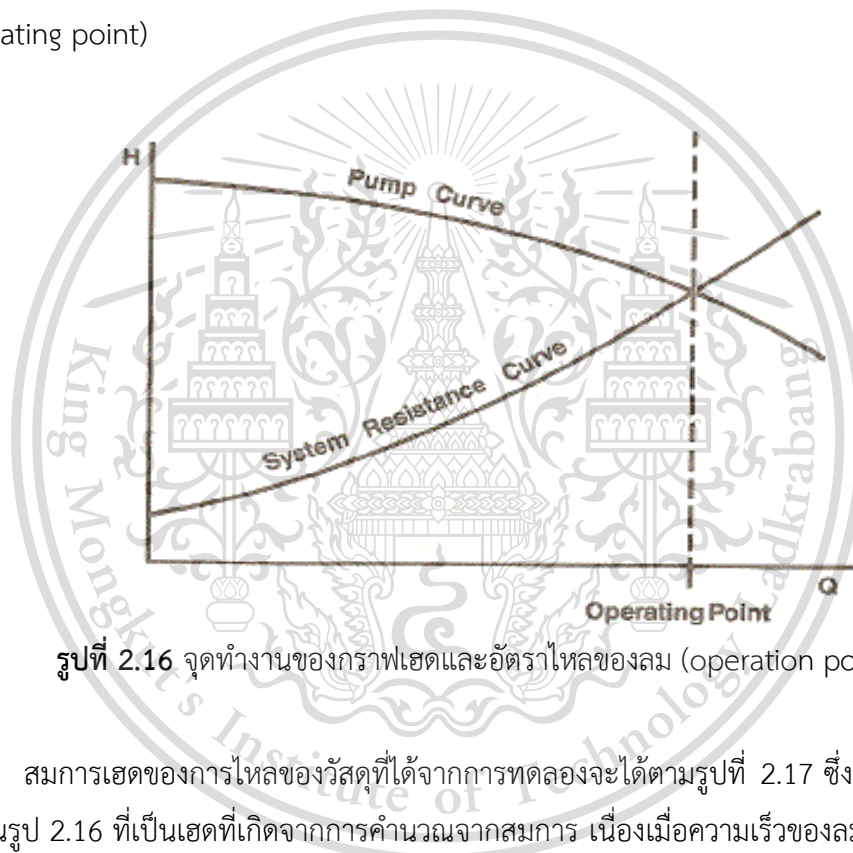
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เฮดสูญเสียรวม (ΔH_T) จะสามารถคำนวณได้จากการรวมเฮดสูญเสียของส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการคิดเฮดสูญเสียจากการไหลของวัสดุตั้งสมการ (2.28) และนำไปรวมกับเฮดสูญเสียของอากาศได้เฮดสูญเสียของระบบตั้งสมการ (2.29) ดังนี้

$$\Delta H_{T \text{ solid}} = \Delta H_a + \Delta H_z + \Delta H_L + \Delta H_b \quad (2.28)$$

$$\Delta H_{\text{system}} = \Delta H_{T \text{ air}} + \Delta H_{T \text{ solid}} \quad (2.29)$$

กราฟเฮดของระบบ System Head Curve (ΔH_{system}) เป็นผลรวมของเฮดสูญเสียของการไหลของอากาศและการไหลของวัสดุ เมื่อนำมาตัดกับสมรรถนะของพัดลมแล้วจะเกิดจุดทำงาน (Operating point)



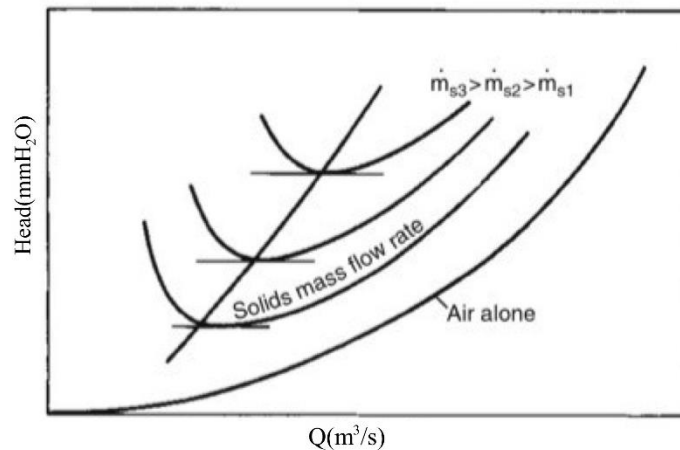
รูปที่ 2.16 จุดทำงานของกราฟเฮดและอัตราไหลของลม (operation point) [6]

สมการเฮดของการไหลของวัสดุที่ได้จากการทดลองจะได้ตามรูปที่ 2.17 ซึ่งแตกต่างจากเฮดที่อยู่ในรูป 2.16 ที่เป็นเฮดที่เกิดจากการคำนวณจากสมการ เนื่องเมื่อความเร็วของลมและอาหารเม็ดผ่านความเร็วต่ำสุด จะทำให้เกิดการไหลของวัสดุแบบหนาแน่นขึ้นทำให้เฮดเพิ่มสูงขึ้นตามรูปล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.17 กราฟระบบการขนส่งวัสดุด้วยลม [9]

จากรูปที่ 2.17 ในรูปนี้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฮดสูญเสียต่อความเร็วลมโดยมีเส้นกราฟทั้งหมด 4 กราฟคือ 1)เฮดที่เกิดจากลมอย่างเดียว 2)เฮดสูญเสียที่เกิดวัสดุที่อัตราการไหลของวัสดุน้อยที่สุด(m_{s1}) 3)เฮดสูญเสียที่เกิดวัสดุที่อัตราการไหลของวัสดุปานกลาง(m_{s2}) 4)เฮดสูญเสียที่เกิดวัสดุที่อัตราการไหลของวัสดุมากที่สุด(m_{s3}) จากรูปพบว่ากราฟเฮดจากลมจะมีรูปกราฟเป็นเส้นโค้งจากจุดศูนย์และเฮดที่เกิดเมื่อเทียบกับเส้นอื่นๆที่ความเร็วเดียวกันมีค่าน้อยสุด เมื่อสังเกตความแตกต่างระหว่างกราฟเฮดของวัสดุกับลมจะพบว่าเฮดของวัสดุมีลักษณะเส้นกราฟตัวยู และจุดกลับโค้งตัวยูจะเป็นจุดที่เรียกว่าจุดเปลี่ยนสถานะของการไหลของวัสดุ(จุดที่ความเร็วลมต่ำสุด) ทางซ้ายของตัวยูจะเป็นการไหลแบบหนาแน่น (Dense phase) ทางขวาของกราฟตัวยูจะเป็นการไหลแบบเบาบาง (Dilute phase) จากกราฟจะมีกราฟการไหลของวัสดุอยู่ด้วยกัน 3 กราฟ ซึ่งแต่ละกราฟมีความแตกต่างกันที่อัตราการไหลของวัสดุ อัตราการไหลวัสดุยิ่งมากเฮดโดยรวมของระบบจะมีค่ามากขึ้นหรือกล่าวอีกทางหนึ่งคืออัตราการไหลของวัสดุมากกราฟจะขยับขึ้นไปตามแนวแกนวายแบบเฉียงขวาตามรูปที่ 2.16 สาเหตุที่แนวโน้มของกราฟขยับไปทางขวาสาเหตุจากอัตราการไหลของวัสดุเมื่อมีค่ามากขึ้นหมายถึงความหนาแน่นในการไหลมากขึ้นตามไปด้วยทำให้เฮดสูญเสียและความเร็วลมค่าสุดท้ายที่ใช้ก็จำเป็นต้องเพิ่มมากขึ้นด้วย

2.3 อุปกรณ์จ่ายวัสดุ (Feeder) [6]

ชนิดของตัวจ่ายวัสดุ (Feeder) ตัวจ่ายวัสดุนอกจากจะใช้เป็นตัวจ่ายวัสดุเข้าไปในระบบแล้วในระบบเฮดต้องทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศที่มีความดันไหลผ่านอีกด้วย (Air Lock) ดังนั้นตัวจ่ายวัสดุจึงมีความสำคัญมากในระบบขนส่งวัสดุด้วยลม และอาจกล่าวได้ว่าตัวจ่ายวัสดุเป็นหัวใจสำคัญที่สุดของระบบก็ว่าได้ ซึ่งตัวจ่ายวัสดุ ที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไป มีดังนี้

1. หัวดูด (Suction Nozzle)

2. วาล์วแบบล็อกสองชั้น (Gate Lock Valve)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. แบบคอคอด (Venturi)
4. โรตารีวาล์ว (Rotary Valve)
5. สกรูฟีดเดอร์ (Screw Feeder)

2.3.1 หัวดูด (Suction Nozzle)

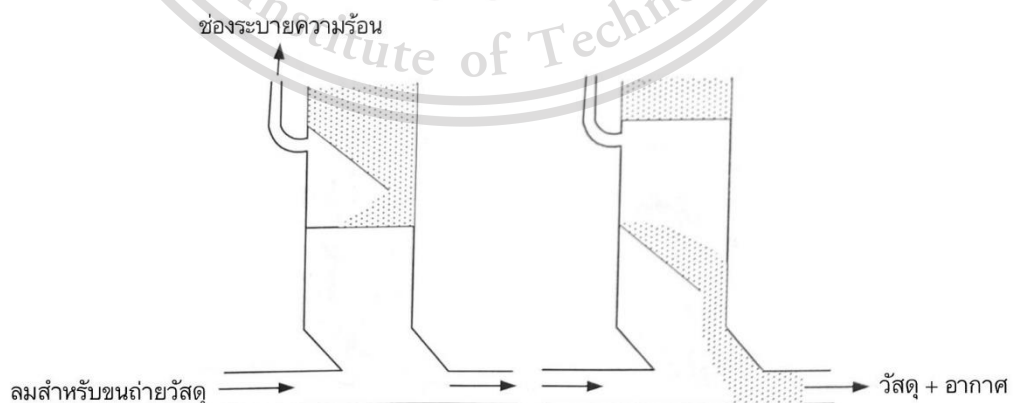
หัวดูดวัสดุในระบบขนส่งวัสดุด้วยลมนั้น ถูกจัดให้เป็นตัวจ่ายวัสดุเข้าไปในระบบขนส่งวัสดุด้วยลมชนิดที่ไม่สามารถควบคุมอัตราการจ่ายวัสดุได้ (Non-Controlled Feed Systems) แต่สามารถจ่ายวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous Feed) การใช้งานสามารถใช้หัวดูดที่เป็นทั้งเม็ดและผงได้ โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้ขนส่งวัสดุขึ้นจากเรือ กองวัสดุ หรือถังเก็บวัสดุ



รูปที่ 2.18 หัวดูดวัสดุแบบเคลื่อนที่ [6]

2.3.2 วาล์วแบบล็อกสองชั้น (Gate Lock Valve)

ใช้จ่ายวัสดุได้ทั้งในระบบเฮดและระบบสุญญากาศ แต่เป็นการจ่ายวัสดุเข้าไปในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากต้องมีการระบายเฮดออกในช่วงที่มีการเติมวัสดุจากห้องด้านบนของตัววาล์ว ดังรูปที่ 2.19 ก่อนจึงสามารถส่งวัสดุต่อไปได้ ซึ่งโดยปกติจะสามารถส่งวัสดุได้ 5-10 ครั้ง/นาที



รูปที่ 2.19 วาล์วแบบล็อกสองชั้น (Gate Lock Valve) [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมทางการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.3 ตัวจ่ายวัสดุแบบคอคอต (venturi)

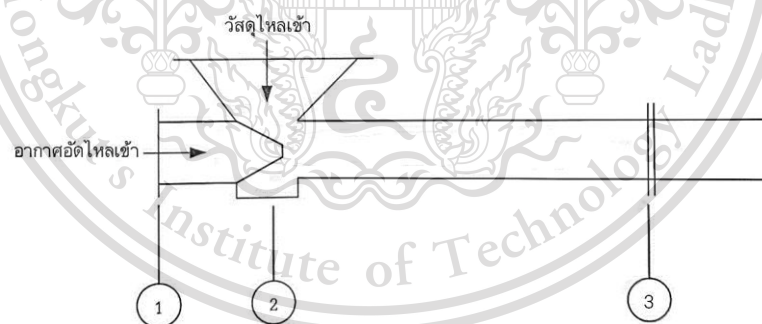
ตัวจ่ายวัสดุแบบคอคอตมีใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในการขนส่งของเหลว ของแข็ง และโคลน โดยใช้ลมอัดหรือของเหลวเป็นต้นกำลังขับ ในที่นี้จะกล่าวถึงการนำเอาตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรีมาใช้สำหรับขนส่งวัสดุปริมาณมวล ซึ่งวัสดุจะอยู่ในรูปเม็ดหรือผงละเอียด โดยใช้ลมอัดเป็นตัวนำพาไป

การทำงานของตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรีจะใช้ลมอัดไหลผ่านช่องแคบ ๆ เพื่อให้เกิดความเร็วสูง ซึ่งจะทำให้เกิดเฮดลบขึ้น จึงสามารถพาวัสดุเข้าไปในกระแสการไหลของอากาศได้ ซึ่งจากหลักการทำงานนี้ทำให้ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ แต่มีข้อเสียคือ มีการสูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมากเมื่ออากาศไหลผ่านช่องแคบ เพื่อให้เกิดความเร็วสูง และเกิดเฮดลบขึ้น ทำให้ตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรีมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ มีอัตราการขนถ่ายและระยะทางขนส่งต่ำ

การนำเอาตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรีไปใช้งานนั้นมีการประยุกต์ใช้งานเวนจูรีสำหรับการขนส่ง จุกขวด วัสดุการนำเอาตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรีไปใช้งานนั้นมีการประยุกต์ใช้งานเวนจูรีสำหรับการขนส่ง จุกขวด วัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และแตกหักง่าย เช่น มันฝรั่งทอด พร้อมทั้งยังมีการนำไปใช้สำหรับขนส่งวัสดุทางการเกษตรอื่น ๆ เช่น ข้าวมอลต์ บาเลย์ ซึ่งการใช้งานส่วนใหญ่แล้วจะจำกัดที่การขนส่งวัสดุแบบเบาบางเท่านั้น

ลักษณะของตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรี

ลักษณะของตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรีที่มีใช้กันอยู่สำหรับการขนส่งวัสดุปริมาณมวลนั้นมีรายละเอียดดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะของตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรี [6]

ลักษณะตัวจ่ายวัสดุจะประกอบไปด้วย ท่อลม (จุดที่ 1) ที่มีลักษณะเรียวเล็กลงโดยมีมุมเรียวรวมตั้งแต่ 25-45° เพื่อให้ลมไหลได้ด้วยความเร็วสูง ซึ่งจะสร้างบริเวณที่มีเฮดต่ำ (จุดที่ 2) ทำให้วัสดุสามารถไหลเข้ามาผสมกับลมได้ดี โดยวัสดุจะไหลผ่านท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางโตขึ้น โดยทั่วไปจะมีมุมขยายของท่อ 6-7° จนมีขนาดเท่ากับท่อขนส่งวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

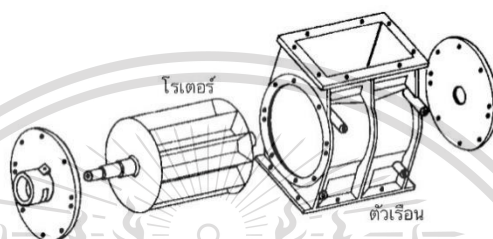
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.4 โรตารีวาล์ว (Rotary Valve)

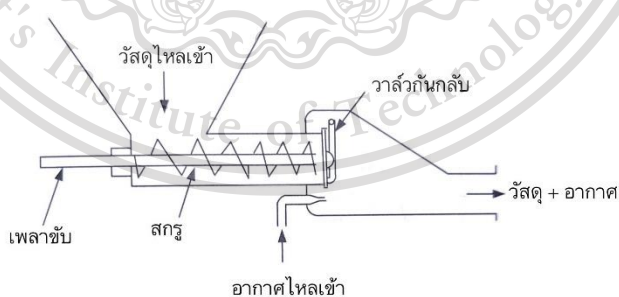
โรตารีวาล์วเป็นตัวจ่ายวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดในระบบขนส่งวัสดุด้วยลม การใช้งานโรตารีวาล์ว นั้นมีทั้งนำไปใช้ในการจ่ายวัสดุออกจากภาชนะเก็บกักวัสดุ เพื่อนำวัสดุไปยังขบวนการผลิต เช่น การจ่ายวัสดุเข้าไปในถังผสมวัสดุ เป็นต้น ซึ่งไม่ได้จ่ายวัสดุเข้าไปในบริเวณที่มีเฮดสูง และการจ่ายวัสดุเข้าไปในระบบขนส่งวัสดุด้วยลม ซึ่งในท่อนส่งวัสดุจะมีเฮดสูงกว่าเฮดบรรยากาศ โรตารีวาล์วจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ตัวโรเตอร์ (Rotor) และตัวเรือน (Casing) ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของโรตารีวาล์ว [9]

2.3.5 สกรูพืดเตอร์ (Screw Feeder)

ตัวจ่ายวัสดุแบบสกรูเป็นตัวจ่ายวัสดุที่สามารถจ่ายวัสดุเข้าไปในระบบเฮดปานกลางที่มีเฮดสูงได้ถึง 2.5 บรรยากาศ อัตราการจ่ายวัสดุจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วรอบของตัวสกรู ตัวสกรูจะมีระยะพิทช์ไม่คงที่เพื่อให้ตัวสกรูอัดวัสดุเกินอยู่ในรูปของท่อนวัสดุ ซึ่งท่อนวัสดุนี้จะทำหน้าที่คล้ายซีล ป้องกันการรั่วของอากาศ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ตัวจ่ายวัสดุแบบสกรู [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 ระยะเวลาดำเนินการ

การดำเนินงานที่ตีควรมีแผนการดำเนินงานที่ดี ดังนั้นนี่คือตารางแผนการดำเนินงานตั้งแต่วันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ.2563 ถึงวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ.2563 (16 สัปดาห์) สำหรับภาคเรียนที่ 1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน ภาคการศึกษาที่ 1

กิจกรรม/รายละเอียด กิจกรรม	ระยะเวลา (สัปดาห์ที่)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ทำความเข้าใจเกี่ยวกับ โปรเจค	/															
ประชุม เขียนแบบร่าง โปรเจค		/														
พบอาจารย์ที่ปรึกษา			/	/	/				/	/	/			/	/	/
ซื้ออุปกรณ์										/			/			
ทำการทดลอง สร้าง กราฟ										/			/	/		
ทำเล่มโปรเจค														/	/	
ส่งเล่มโปรเจค																/

สำหรับภาคการศึกษาที่ 2 ดำเนินงานตั้งแต่วันที่ 11 มกราคม พ.ศ.2564 ถึงวันที่ 15 พฤษภาคม 2564 พ.ศ.2564 (18 สัปดาห์)

ตารางที่ 3.2 แผนการดำเนินงาน ภาคการศึกษาที่ 2

กิจกรรม/ รายละเอียดกิจกรรม	ระยะเวลา (สัปดาห์ที่)																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ประชุม	/	/																
ซื้ออุปกรณ์								/	/		/							
ทำการทดลอง สร้าง กราฟ								/	/		/							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

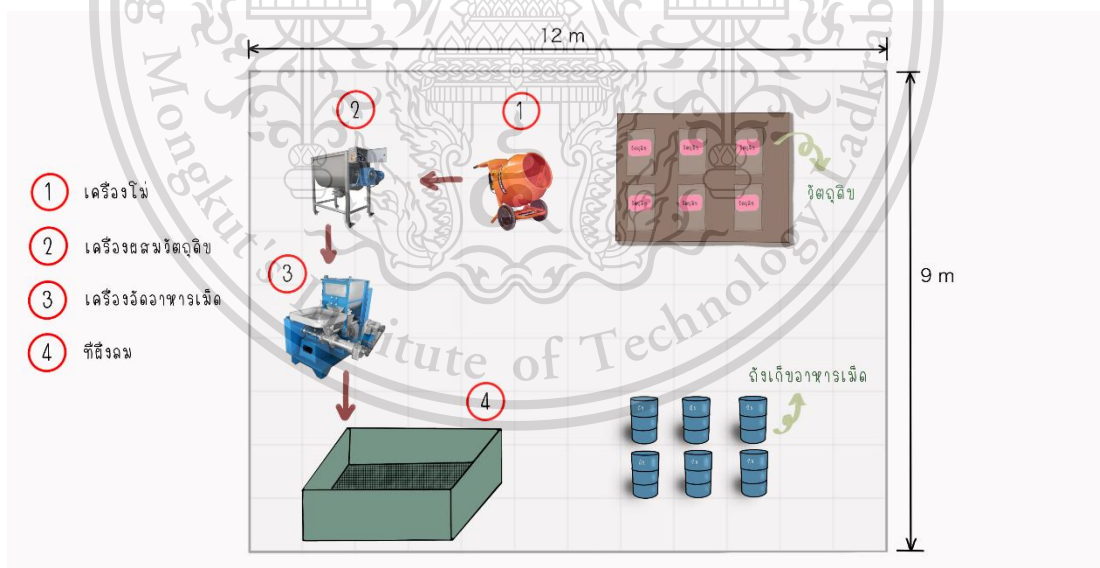
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำเล่มโปรเจค		/	/	/	/	/			/			/	/	/	/	/
ส่งเล่มโปรเจคให้ อาจารย์ที่ปรึกษา ตรวจ															/	/
ส่งเล่มโปรเจค																/

การดำเนินโปรเจคนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ 1. ออกแบบชุดทดลองและออกแบบระบบขนส่งที่เหมาะสมกับการใช้งาน 2. การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เกิดขึ้นจริงเพื่อนำไปปรับการคำนวณและทำให้ระบบขนส่งวัสดุสามารถใช้งานได้ถูกต้อง

3.2 วางผังระบบขนส่ง

การวางผังจะทำให้เห็นภาพการออกแบบได้ชัดเจน โดยโรงงานแห่งนี้มีเครื่องจักร 4 เครื่องตามภาพ โดยเครื่องที่ไม่ได้วางระบบขนส่งเพราะจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการควบคุมอยู่ตลอดคือเครื่องที่ 1, 2, และ 3 แต่หลังจากการเครื่องอัดอาหารเม็ด 3 ไปสู่ 4 เครื่องฝั่งลม ไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานในการขนส่งอาหาร ดังนั้นจึงเป็นที่มาของโปรเจคนี้



รูปที่ 3.1 การวางผังของโรงงาน

จากรูปที่ 3.1 เครื่องที่ 1 เป็นเครื่องโม่ปูนที่นำมาประยุกต์ในการนำวัตถุดิบ แป้ง โปรตีน น้ำ น้ำมัน มาผสมตามอัตราส่วนแบบหยาบก่อน คือผสมพอให้เข้ากัน ต่อไปจึงย้ายนำไปผสมในเครื่องที่ 2 จะเป็นการผสมหรือวนคให้ส่วนผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี เมื่อส่วนผสมของวัตถุดิบเป็นเนื้อเดียวแล้วจึงนำไปส่งต่อเครื่องที่ 3 เครื่องอัดอาหารเม็ดโดยเครื่องอัดอาหารเม็ดจะอัดอาหารผ่านเกลียวแล้วผ่านรู

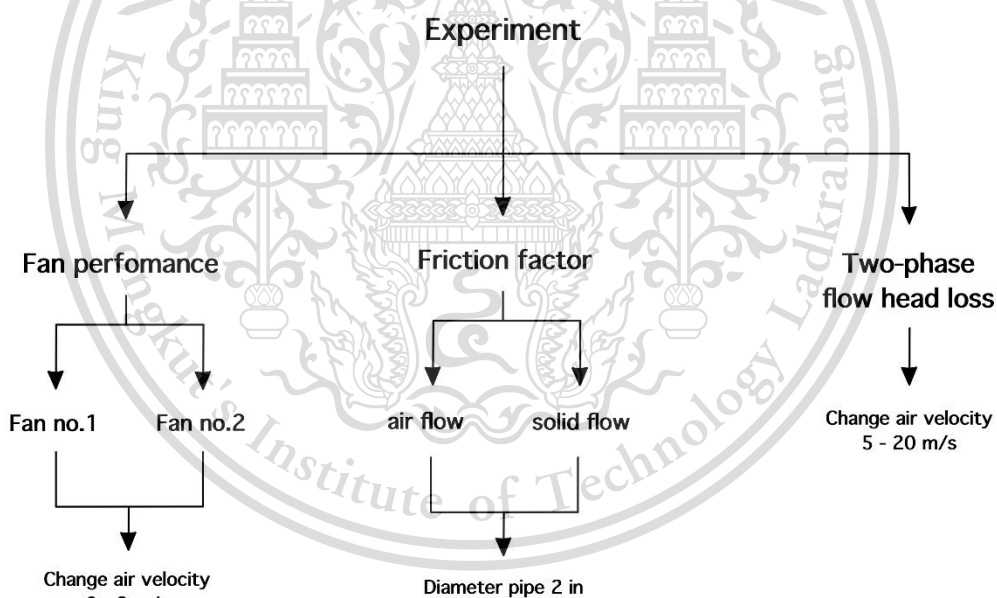
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เล็กๆ หลังจากนั้นใบมีดจะตัดขาดกลายเป็นอาหารเม็ดขนาดต่างๆตามขนาดรูที่กำหนด โดยอาหารเม็ดจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกสั้นๆ ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้กำหนดให้อาหารเม็ดเป็นทรงกลม เพื่อง่ายต่อการคำนวณ หลังจากอาหารเม็ดถูกตัดจะตกลงในกะบะ ซึ่งปกติจะใช้แรงงานคน เช่นเดียวกับทุกระบวนการในการขน แต่ในปริญญานิพนธ์นี้ต้องการเปลี่ยนจุดนี้ให้กลายเป็นระบบขนส่งทางลมไปสู่เครื่องฝั่งลม หลังจากฝั่งลมร้อนที่ให้ความร้อนด้วยแก๊ซหุงต้มจนอาหารเม็ดแห้งแล้ว จะนำไปเก็บถังอาหารเม็ดเป็นการจบกระบวนการผลิตอาหารเม็ด

3.3 การออกแบบชุดทดลอง

จากวัตถุประสงค์การทดลอง งานวิจัยนี้ต้องการหาความเสียดทาน 2 แบบคือ 1. ความเสียดทานของลม (f) 2. ความเสียดทานของวัสดุ (λ_s) เนื่องจากความเป็นจริงอาจมีความเสียดทานที่มากกว่าการคำนวณ ทำให้เราต้องทำการทดลองนี้ อีกวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการหาจุดทำงานระบบ เนื่องจากพัดลมที่ใช้ไม่มีกราฟเฮดสมรรถนะพัดลมจึงต้องหากราฟสมรรถนะพัดลม ซึ่งการทดลองเป็นไปตามแผนภาพด้านล่างนี้



รูปที่ 3.2 แผนภาพการออกแบบชุดทดลอง

3.3.1 ชุดทดลองการหาสมรรถนะของพัดลม

การทดลองสมรรถนะพัดลมได้นำข้อมูลมาจากมาตรฐาน Air Movement and Control Association (AMCA) วิธีการทดลองตามรูปที่ 2.9 มีระยะการติดตั้ง pitot tube ที่ 0.6 m ระยะติดตั้ง damper ที่ 0.7 m เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.0565 m (ขนาดของท่อ PVC 2 in) การไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

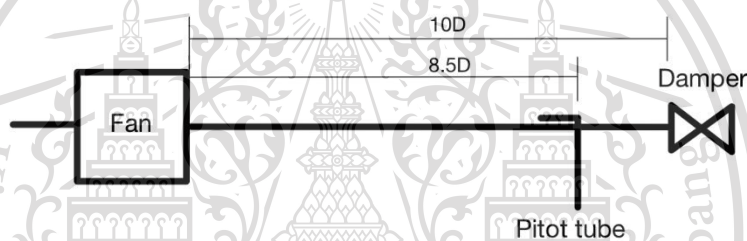
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ติดตั้ง damper เพื่อลดความเร็วของลม (V_f) เหนือรวมของพัดลม H_T (mmH₂O) หาได้จากผลรวมของเสียดังสมการที่ (2.1) ดังนี้

$$H_T = H_{S3} - H_{T1} + H_{V3} + f \left(\frac{L_{2,3}}{D} \right) H_{V3}$$

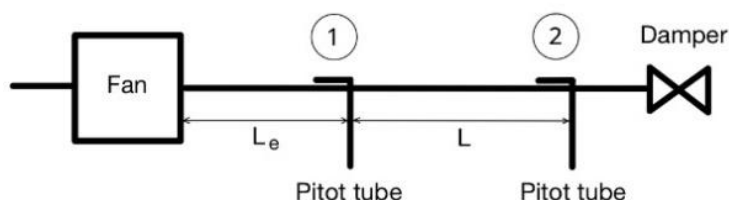
จากสมการ (2.1) เนื่องจากในการทดลองนี้มีระยะ $L_{2,3}$ ที่น้อยเพราะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้มีขนาดเล็ก ทำให้ความหนาแน่นที่ ระบาย PL.2 และระบาย PL.3 มีค่าใกล้เคียงกันจึงไม่พิจารณาผลกระทบความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากทำการทดลองและบันทึกผลการทดลองแล้ว จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดของพัดลมและอัตราการไหลของลม ด้านล่างนี้คือแผนภาพชุดทดลองสมรรถนะพัดลม ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลอง 2 ชุดกับพัดลมขนาด 0.5 แรงม้าและ 1.5 แรงม้า



รูปที่ 3.3 ภาพออกแบบชุดทดลองการหาสมรรถนะของพัดลม

3.3.2 ชุดทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลม (f)

สำหรับการทดลองนี้จะติดตั้ง pitot tube ที่วัดค่าโดยเครื่องวัดเฮดต่าง (Fluke 922) เนื่องจากมีเครื่องวัดเพียงเครื่องเดียว จึงใช้การวัดที่ละจุดคือวัดจุดที่ 1 แล้วบันทึกผล ย้ายเครื่องวัดมาจุดที่ 2 แล้วบันทึกผล ดังรูปที่ 3.4 โดยกำหนดให้ $L_e = 1$ m (ระยะที่ทำให้ลมไหลแบบ fully developed) และให้ $L = 2$ m จะทำการวัดเฮด(H) ที่ต่างกันของจุดที่ 1 และจุดที่ 2 และค่าความเร็วลมของลม(V_f) บันทึกผลการทดลอง เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฮดสูญเสียและอัตราไหลของลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ รูปที่ 3.4 ภาพออกแบบชุดทดลองการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน(f) ประโยชน์ด้านการค้า

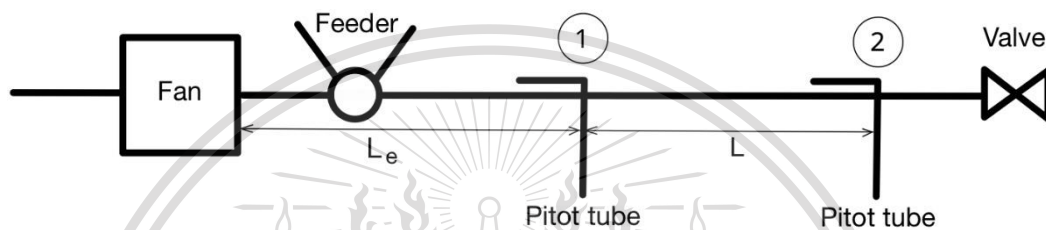
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.3 ชุดทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s)

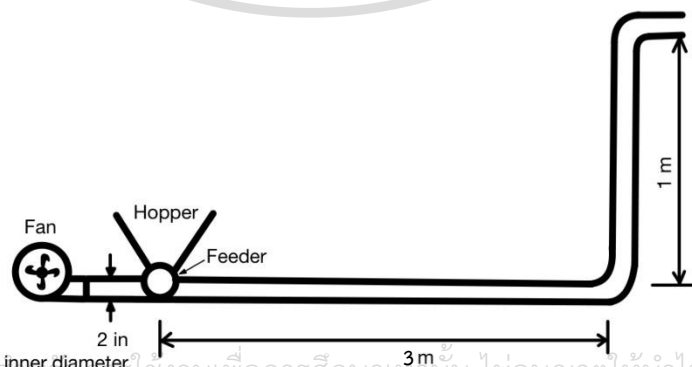
ในการทดลองนี้จะติดตั้งอุปกรณ์แบบเดียวกับการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมในท่อ แต่จะเพิ่มชุดตัวจ่ายวัสดุเข้าไปที่ทางออกของพัดลมด้วย ดังรูปที่ 3.5 โดยกำหนดให้ $L_e = 1$ m (ระยะที่ทำให้ลมไหลแบบ fully developed) และให้ $L = 2$ m จะทำการวัดเฮด(H) ที่ต่างกันของจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ความเร็วของลม(V_f) โดยใช้เครื่องวัดเฮดต่างและบันทึกผล แล้วนำมาคำนวณหาความเร็วของวัสดุ บันทึกผลการทดลองเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดสูญเสียและอัตราไหล และหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอาหารเม็ด



รูปที่ 3.5 ภาพออกแบบชุดทดลองการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของไหล 2 สถานะ (λ_s)

3.4 การออกแบบเครื่องขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม

การออกแบบติดตั้งเครื่องจักรสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องคำนึงถึงประหยัดพื้นที่ประหยัดต้นทุน เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด งานวิจัยนี้จึงเลือกการขนส่งวัสดุด้วยลมที่เหมาะสมกับการขนส่งระยะสั้น และได้ความเร็วในการขนส่งสูง จากกระยะเครื่องอัดอาหารเม็ดไปสู่เครื่องผึ่งลม มีระยะดังรูปที่ 3.6 ในความเป็นจริงแล้วสามารถเลือกพัดลมขนาดใหญ่ต่อกับท่อแล้วส่งอาหารผ่านตัว feeder โดยไม่จำเป็นต้องคำนวณ แต่งานวิจัยนี้ต้องการหาความเสียดทานที่ใกล้กับความจริงมากที่สุด และสามารถเลือกขนาดพัดลม ประเภทพัดลม ได้ขนาดที่เจาะจงมากที่สุด เพื่อลดต้นทุนของการผลิตระยะยาว

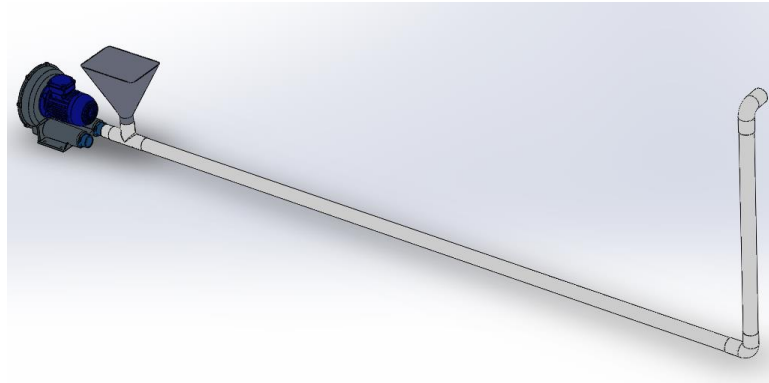


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.6 ภาพจำลองเครื่องขนส่งอาหารเม็ดด้วยลม

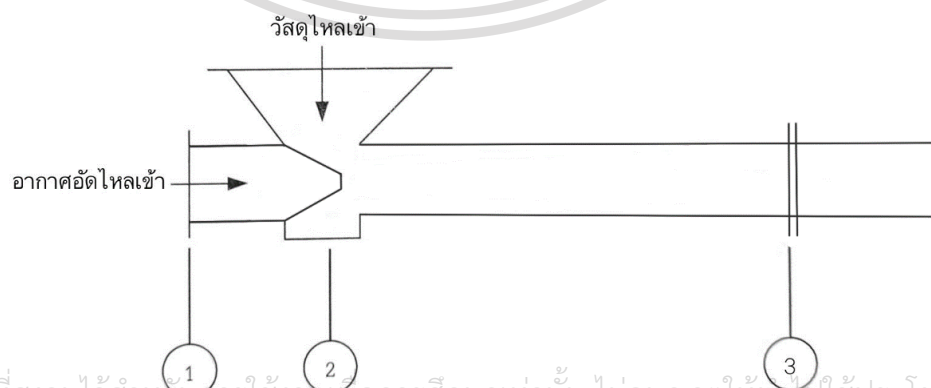
3.5 การออกแบบรัศมีความโค้งท่อ [3]

การออกแบบท่อรัศมีความโค้งของท่อ ควรออกแบบให้มีรัศมียาวกว่ามากกว่ารัศมีต่ำสุด

ตารางที่ 3.3 การออกแบบรัศมีความโค้งท่อ

ขนาดท่อ		รัศมีต่ำสุด		รัศมีเหมาะสม	
นิ้ว	มิลลิเมตร	ฟุต	เมตร	ฟุต	เมตร
2	51	1 ¾	0.5	2	0.6
3	76	2	0.6	3	0.9
4	102	3	0.9	4	1.2
5	127	3 ½	1	5	1.5
6	152	4	1.2	6	1.8

3.6 ตัวจ่ายวัสดุแบบคอขวด (venturi)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดรูปที่ 3.7 ลักษณะของตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรี ออกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบตัวจ่ายวัสดุคือการหาขนาดของหน้าตัดที่ลดลงจากขนาดท่อที่ใช้ในการขนส่งให้เพียงพอที่จะเกิดความดันดูดอาหารลงในระบบขนส่งด้วยลม จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่าจากหน้าตัดที่ 1 ซึ่งเป็นขนาดท่อที่ใช้ขนส่งอาหารเม็ด จะถูกบีบเล็กลงที่ระนาบที่ 2 โดยมุมที่แนะนำอยู่ที่ 25-45 องศา และระนาบนี้จะดูดอาหารเม็ดจากช่องวัสดุด้านบน ไปสู่ระนาบที่ 3 จากสมการที่ (2.7)

$$H_{S1} + \frac{V_1^2}{2g} = H_{S2} + \frac{(1+K)V_2^2}{2g}$$

$$H_{S2} = H_{S1} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{(K+1)V_2^2}{2g}$$

จากสมการจะเห็นว่า มี ตัวแปร K ติดอยู่ในพจน์ของเฮดความเร็ว ซึ่งค่า K คือค่าคงที่ในการออกแบบมุม 25-45 องศา เพื่อช่วยในการออกแบบเพราะเรื่องการออกแบบเวนจูรีเป็นเรื่องที่มีรายละเอียดที่มาก จะกำหนดให้ค่าคงที่ที่จำเป็นต่อการคำนวณดังนี้

$$K = 0.20$$

$$H_{S1} = 500 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$H_{S2} = -5 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$V_1 = 16.0 \text{ m/s}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$A_1 = 0.0025 \text{ m}^2 \quad (D_1 = 0.0565 \text{ m})$$

แทนค่าลงในสมการข้างต้นเพื่อที่จะหาความเร็วที่ผ่านคอคออด หลังจากได้ความเร็วแล้ว กำหนดให้อัตราการไหลของลมคงที่ ดังนั้นจะสามารถหาพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการทดคอคออดได้ (D_2)

$$-5 = 500 + \left(\frac{1}{19.62}\right) (16.0^2 - V_2^2(0.2 + 1))$$

$$v_2 = 89.6 \text{ m/s}$$

คำนวณหาขนาดของหัวฉีด ที่ทำให้ลมมีความเร็วตามที่ได้คำนวณไว้ ซึ่งจะคำนวณหาขนาดของหัวฉีด (D_2) เนื่องจากอัตราการไหลมีค่าคงที่

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$$

$$A_2 = \frac{0.0025 \times 16.0}{89.6}$$

$$A_2 = 0.00045 \text{ m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

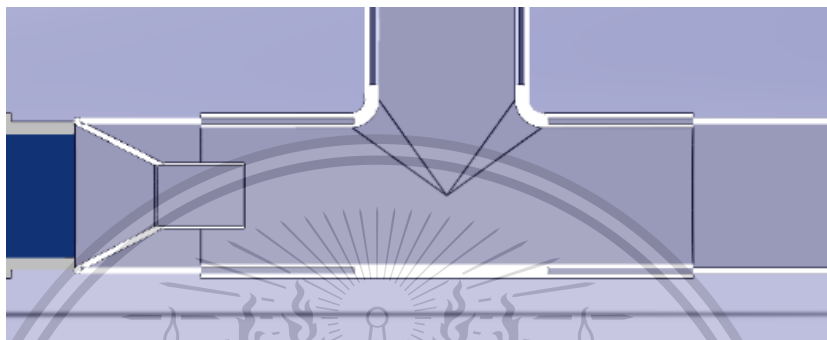
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$0.00045 = \frac{\pi D_2^2}{4}$$

$$D_2 = 0.024 \text{ m}$$

ดังนั้นจะต้องสร้างตัวจ่ายวัสดุให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดเป็น 2.4 cm เพื่อให้ตัวจ่ายวัสดุทำงานได้อย่างเหมาะสม ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ภาพตัวจ่ายวัสดุที่ออกแบบ

รูปที่ 3.8 คือการจ่ายจากท่อPVC 2นิ้ว ผ่านหัวลดขนาดคอคออด จาก 5.65 cm ไป 2.4 cm ทำให้เกิดความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ 5 mmH₂O เพื่อดูดอาหารเม็ดลงสู่ระบบขนส่งด้วยลม

3.7 อาหารเม็ด

อาหารเม็ดเป็นวัสดุที่ใช้ในระบบขนส่งด้วยลมในการศึกษานี้ จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ชี้ให้เห็นถึงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุที่เป็นวัตถุประสงค์ของปริิญาณิพนธ์นี้ เนื่องจากสมการที่ใช้สำหรับคำนวณในบทถัดไปเป็นสมการที่เกิดจากการทดลองขนส่งเม็ดพลาสติก (Polystyrol) ที่มีความหนาแน่น 1050 kg/m³ ในหัวข้อนี้จะหาคุณสมบัติของอาหารเม็ดที่ใช้ในการทดลอง คือ หาความหนาแน่นของอาหารเม็ด และความชื้นของอาหารเม็ด ในการทดสอบหาความชื้นนี้จำเป็นต้องนำเอาอาหารเม็ดที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ทดลองแทนเนื่องจากสถานการณ์โควิด ขนาดของอาหารเม็ด 13 mm ความหนาแน่นที่ได้จากขนาดเม็ดใหญ่หรือเล็กอนุมาณให้มีความหนาแน่นเท่ากันเนื่องจากส่วนผสมในการทำที่เหมือนกัน และให้วัสดุที่ใช้คืออาหารเม็ดมีลักษณะเป็นทรง ซึ่งในความเป็นจริงไม่มีอาหารเม็ดไหนเป็นทรงกลมอย่างแท้จริงตามรูปที่ 3.9 การทดลองหาความชื้นทำได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.9 ภาพอาหารเม็ดที่ใช้ในการทดลอง

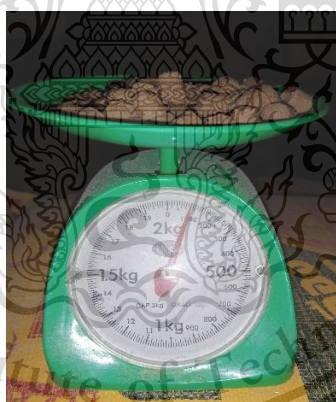
การหาปริมาณความชื้น (Moisture Content)

การหาปริมาณความชื้น โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยให้ความร้อนคงที่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเป็นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ให้น้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ค่าความชื้นที่ได้สามารถคำนวณจากน้ำหนักตัวอย่างที่ลดลง โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{(A-B)}{A} \times 100$$

A คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)

B คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)



รูปที่ 3.10 ภาพน้ำหนักอาหารเม็ดที่ยังไม่ผ่านการอบแห้ง

จากรูปที่ 3.10 คือน้ำหนักของอาหารเม็ดตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการอบแห้ง จำนวน 208 เม็ด มีน้ำหนัก 100 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.11 ภาพน้ำหนักอาหารเม็ดที่ผ่านการอบแห้ง

จากรูปที่ 3.11 คือน้ำหนักของอาหารเม็ดที่มีความชื้น จำนวน 208 เม็ด มีน้ำหนัก 80 g โดยที่อาหารเม็ดเป็นทรง สามารถคำนวณความชื้นของอาหารเม็ดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความชื้น (\%)} &= \frac{(A-B)}{A} \times 100 \\ &= \frac{(100-80)}{100} \times 100 \\ &= 20\% \end{aligned}$$

จากรูปที่ 3.9 คือน้ำหนักของอาหารเม็ดตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการอบแห้ง จำนวน 208 เม็ด มีน้ำหนัก(m) 100 g เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm คิดเป็นปริมาตรต่อ 1 เม็ดเท่ากับ(v) $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ จะสามารถคิดความหนาแน่นของอาหารเม็ดที่ใช้ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{v} \\ &= \frac{0.1}{208 \times 3.35 \times 10^{-8}} \\ &= 438 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

สรุปในอาหารเม็ดมีความชื้นที่ 20% และมีความหนาแน่น 438 kg/m^3 ความชื้นส่วนนี้อาจจะเป็นส่วนที่ทำให้อาหารเม็ดมีความเหนียวต่อการไหลในท่อมากกว่าเม็ดพลาสติก

3.8 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

- 1) ท่อตรงPVC เป็นท่อที่ใช้มากสุดในการส่งวัสดุด้วยลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.12 PVC pipe

2) ตัวหรือลิ่ม เพื่อปรับอัตราไหลมีหลายประเภทด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบ Ball valve ที่หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่สูง



รูปที่ 3.13 Damper valve

3) พัดลมตัวที่ 1 ในงานวิจัยนี้ใช้พัดลมแบบใบพัดโค้งไปข้างหน้าตัวนี้เป็นตัวแรกในการทดลอง spec : 220V, 50Hz, 250W



รูปที่ 3.14 พัดลมตัวที่ 1 พัดลมแบบใบพัดโค้งไปข้างหน้า (Forward curved blade fan)

4) พัดลมตัวที่ 2 คือ Vortex Ring Blower ท่อทางเข้าและออกขนาด 2 นิ้ว spec : 220V, 50Hz, 1100Wไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.15 พัดลมตัวที่ 2 พัดลม Vortex Ring Blower

5) เครื่องวัดเฮดต่าง (Fluke 922) คือ pitot tube ที่ทำการต่อเข้ากับเครื่องวัดดิจิทัลที่สามารถวัดค่าเฮด, ความเร็วลมและอุณหภูมิ



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดเฮดต่าง (Fluke 922)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

การคำนวณจากทฤษฎี

การพิจารณาระบบขนส่งด้วยลมที่นำเสนอในบทนี้ได้ทำการศึกษาวิธีที่เข้าใจง่ายและเป็นลำดับขั้นตอน เมื่อคำนวณสำเร็จสามารถที่จะนำไปเลือกใช้พัดลมในเบื้องต้นได้ แต่ในท้ายที่สุดยังคงต้องใช้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ทดลองขึ้นเองเพื่อความแม่นยำในการออกแบบ การคำนวณในบทนี้มีค่าการออกแบบดังนี้

T คือ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 36 °C

L คือ ระยะท่อทั้งหมด 3 m

Z คือ ระยะท่อแนวตั้ง 1 m

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2 นิ้ว (ท่อPVC 2 นิ้ว มีเส้นผ่านศูนย์กลางจริง 0.565 m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางอาหารเม็ด 4 mm

N คือ จำนวนข้อต่อ 2 ท่อน (ข้อต่อ 90°)

m_s คือ อัตราการไหลของอาหารเม็ด 200 kg/h

V_f คือ ความเร็วลมที่วัดในท่อขนาด 2 นิ้ว ความเร็ว 16 m/s (เป็นความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้จากพัดลมตัวที่ 2)

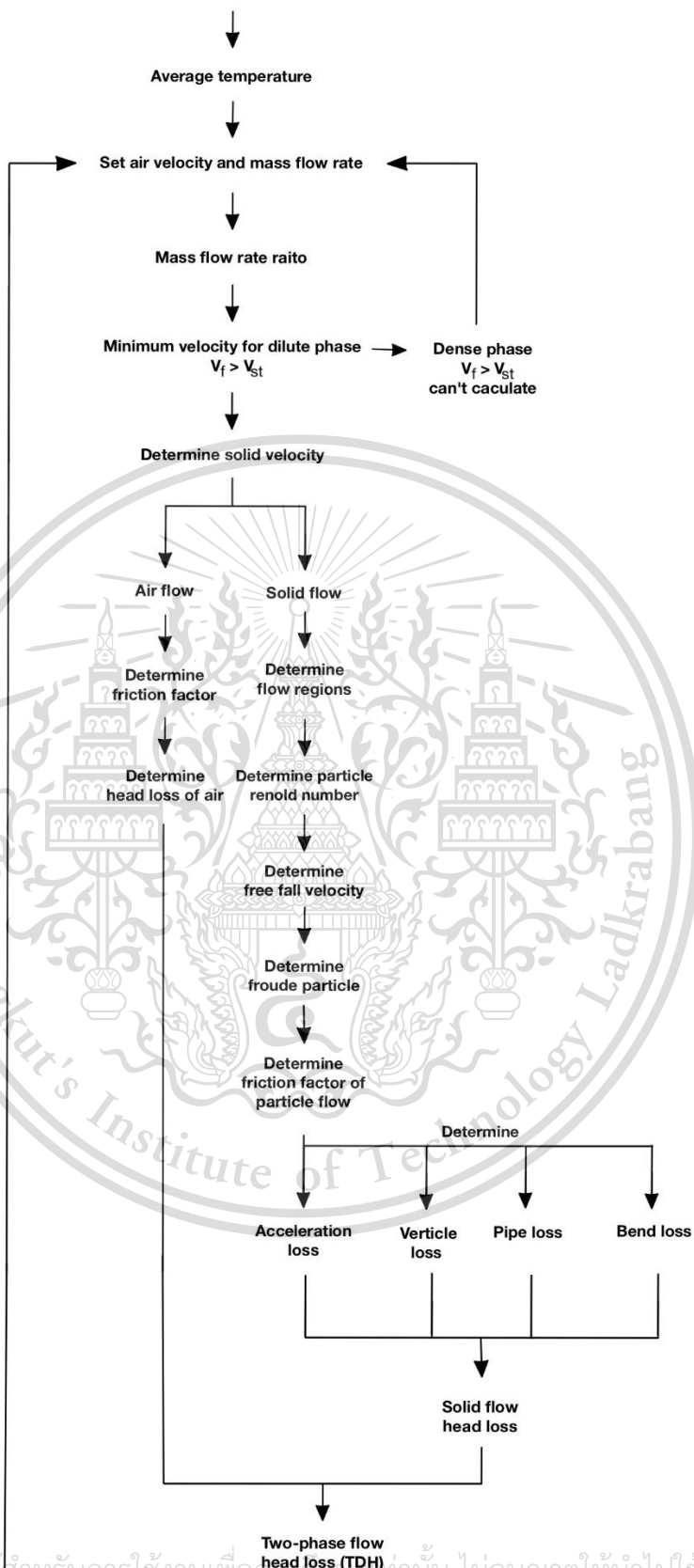
ขั้นตอนในการคำนวณสามารถดูได้จากรูปที่ 4.1 ซึ่งการคำนวณเริ่มจากการบันทึกอุณหภูมิและความหนาแน่นของวัสดุ หลังจากนั้นให้เลือกอัตราการไหลของวัสดุเพื่อที่จะหาอัตราส่วนการขนส่งเมื่อได้อัตราส่วนการขนส่งแล้วนำไปแทนหาความเร็วในการไหลของท่อในแนวราบของลม โดยความเร็วที่ได้จะเป็นตัวแบ่งการไหลของวัสดุ สมการที่ใช้คำนวณนี้ใช้สำหรับการไหลแบบเบาบางเท่านั้น ดังนั้นเมื่อเราเลือกความเร็วลมในการออกแบบน้อยกว่าความเร็วลมต่ำสุดก็จะไม่สามารถหาเฮดต่อได้ ให้เปลี่ยนความเร็วที่ออกแบบใหม่ เมื่อทราบความเร็วลมก็จะสามารถหาความเร็วของวัสดุ โดยปกติจะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วลม หลังจากนั้นทำการหาเฮด โดยแบ่งเป็นเฮดของลมอย่างเดียว และเฮดของวัสดุอย่างเดียว เมื่อหาเฮดทั้งคู่แล้วในท้ายที่สุดจะได้เฮดรวมระหว่างทั้งสอง หากนำไปพล็อตกราฟโดยติดตัวแปรความเร็วไว้จะได้กราฟโค้งหงายขึ้นโดยจุดเริ่มต้นกราฟเป็นความเร็วของลมที่ไหลในท่อแนวราบต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Pneumatic conveying calculation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณระบบขนส่งทางลม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1 ความหนาแน่นของลม (Density of air)

ตารางที่ 4.1 Density and specific weight of air at 1 atmosphere pressure, at temperatures given as °C

Temperature [°C]	Density				Specific weight		Thermal expansion coefficient [$\times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$]
	[kg/m^3]	[lb_m/ft^3]	[$\text{sl}/\text{ft}^3 \times 10^{-3}$]	[$\text{lb}_m/\text{gal}(\text{US liq})$]	[N/m^3]	[lb_f/ft^3]	
-75	1.783	0.1113	3.460	0.01488	17.49	0.11131	5.14
-50	1.582	0.0988	3.070	0.01320	15.52	0.09878	4.55
-25	1.422	0.0888	2.759	0.01187	13.94	0.08877	4.08
-15	1.367	0.0853	2.652	0.01141	13.40	0.08532	3.92
-10	1.341	0.0837	2.601	0.01119	13.15	0.08370	3.84
-5	1.316	0.0821	2.553	0.01098	12.90	0.08214	3.76
0	1.292	0.0806	2.506	0.01078	12.67	0.08063	3.69
5	1.268	0.0792	2.461	0.01059	12.44	0.07919	3.62
10	1.246	0.0778	2.418	0.01040	12.22	0.07780	3.56
15	1.225	0.0765	2.376	0.01022	12.01	0.07645	3.50
20	1.204	0.0752	2.336	0.01005	11.81	0.07516	3.43
25	1.184	0.0739	2.297	0.00988	11.61	0.07390	3.38
30	1.164	0.0727	2.259	0.00972	11.42	0.07269	3.32
40	1.127	0.0704	2.188	0.00941	11.06	0.07039	3.21
50	1.093	0.0682	2.120	0.00912	10.72	0.06822	3.12
60	1.060	0.0662	2.057	0.00885	10.40	0.06619	3.02

จากตารางที่ 4.1 ที่อุณหภูมิ 36°C จะได้ค่าความหนาแน่นของลม $\rho_f = 1.1418 \text{ kg/m}^3$ และจากหัวข้อ 3.7 อาหารเม็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม จะได้ความหนาแน่นของอาหารเม็ด $\rho_p = 438 \text{ kg/m}^3$

4.2 อัตราการขนส่งวัสดุด้วยลม (Air flow rate and mass flow rate)

4.2.1 การคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราขนส่งวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศ (μ)

จากสมการอัตราการไหลแทนค่าความเร็วลม 16 m/s และพื้นที่หน้าตัด 2.5×10^{-3} จากค่าคงที่เริ่มต้น

$$\begin{aligned} Q_f &= v_f A \\ Q_f &= 16 \times (2.5 \times 10^{-3}) \\ Q_f &= 0.0025 v_f = 0.040 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned} \quad (4.1)$$

จากสมการคำนวณอัตราการขนส่งลมแทนค่า $\rho_f = 1.1418 \text{ kg/m}^3$ และ $Q_f = 0.0025 v_f \text{ m}^3/\text{s}$

$$m_f = \rho_f Q_f$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต (4.2)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการทำงานของเครื่องอัดอาหารเม็ดทำงานที่ 200 kg/h จะได้ $m_s = 0.055 \text{ kg/s}$

จากสมการ

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{m_s}{m_f} \\ \mu &= \frac{0.055}{0.00285v_f} \\ \mu &= 19.298v_f = 1.16\end{aligned}\quad (4.3)$$

4.2.2 การคำนวณความเร็วลมต่ำสุดในการไหลของท่อแนวราบ (saltation velocity)

จากสมการความเร็วลมต่ำสุดในการไหลของท่อแนวราบที่เป็นจุดแบ่งการไหลแบบเบาบางและแบบหนาแน่น ได้จากการทดลองของ Rizk equation เมื่อแทนค่าอัตราการขนส่งวัสดุ (μ) และขนาดอาหารเม็ด (d)

จากสมการความเร็วลมต่ำสุดในการไหลของท่อแนวราบ

จะได้

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{1}{10^{1.44d+1.96}} \left(\frac{v_{st}}{\sqrt{gD}} \right)^{1.1d+2.5} \\ v_{st} &= \sqrt[1.1d+2.5]{10^{1.44d+1.96} \mu \cdot \sqrt{gD}} \\ v_{st} &= \sqrt[6.9]{10^{7.72} 19.298v_f \sqrt{9.81 \times 0.0565}} \\ v_{st} &= \sqrt[6.9]{16 \times 15.02} \\ v_{st} &= 10.0 \text{ m/s}\end{aligned}\quad (4.4)$$

4.2.3 การคำนวณความเร็วในการขนถ่ายวัสดุ (mass velocity)

จากสมการ

$$\begin{aligned}v_s &= v_f(1 - 0.008d^{0.3} \rho_p^{0.5}) \\ v_s &= v_f(1 - 0.008 \times 0.004^{0.3} \times 438^{0.5}) \\ v_s &= 0.968v_f = 15.48 \text{ m/s}\end{aligned}\quad (4.5)$$

4.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลม Friction(f) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัสดุ Solid friction (λ_s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลม Friction (f)

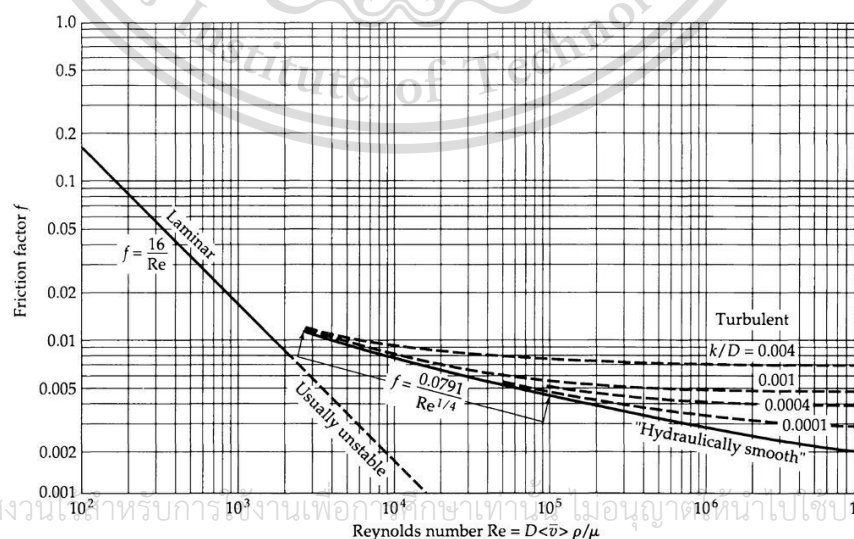
ตารางที่ 4.2 Dynamic (absolute) and kinematic viscosity of air at 1 atmosphere pressure, at temperatures given as °C

Temperature [°C]	Dynamic Viscosity				Kinematic Viscosity	
	[μPa s], [N s/m ² * 10 ⁻⁶]	[cP], [mPa s]	[lb _f s/ft ² * 10 ⁻⁶]	[lb _m /ft h]	[cSt], [m ² /s * 10 ⁻⁶]	[ft ² /s * 10 ⁻⁴]
-75	13.18	0.01318	0.2753	0.03188	7.40	0.796
-50	14.56	0.01456	0.3041	0.03523	9.22	0.992
-25	15.88	0.01588	0.3317	0.03842	11.18	1.203
-15	16.40	0.01640	0.3425	0.03966	12.01	1.292
-10	16.65	0.01665	0.3477	0.04028	12.43	1.338
-5	16.90	0.01690	0.3530	0.04089	12.85	1.383
0	17.15	0.01715	0.3582	0.04149	13.28	1.430
5	17.40	0.01740	0.3633	0.04209	13.72	1.477
10	17.64	0.01764	0.3685	0.04268	14.16	1.524
15	17.89	0.01789	0.3735	0.04327	14.61	1.573
20	18.13	0.01813	0.3786	0.04385	15.06	1.621
25	18.37	0.01837	0.3836	0.04443	15.52	1.671
30	18.60	0.01860	0.3885	0.04500	15.98	1.720
40	19.07	0.01907	0.3983	0.04614	16.92	1.822
50	19.53	0.01953	0.4080	0.04725	17.88	1.925
60	19.99	0.01999	0.4175	0.04835	18.86	2.030

จากตารางที่ 4.2 ที่อุณหภูมิ 36°C จะได้ค่า kinematic viscosity (ν) = 16.544x10⁻⁶ m²/s ในทางปฏิบัติจะเริ่มต้นด้วยการกำหนดความเร็วลมในการขนส่งวัสดุ ดังนั้นแทนค่าความเร็วลม $V_f = 16$ m/s และ $D = 0.0565$ หาค่าเรย์โนลด์สันัมเบอร์เพื่อจะเลือกสมการความเสียดทานที่จะเกิดจากสมการที่ (2.6)

$$Re = \frac{Dv}{\nu} = \frac{0.0565 \times 16.3}{16.544 \times 10^{-6}} = 5.566 * 10^4 \quad (4.6)$$

ได้ค่า $Re = 5.566 * 10^4$ เนื่องจาก $Re > 4000$ ดังนั้นเป็นการไหลแบบปั่นป่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาเอกสารหรือข้อมูลใดๆในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แผนภาพมูดี้ (Moody chart)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

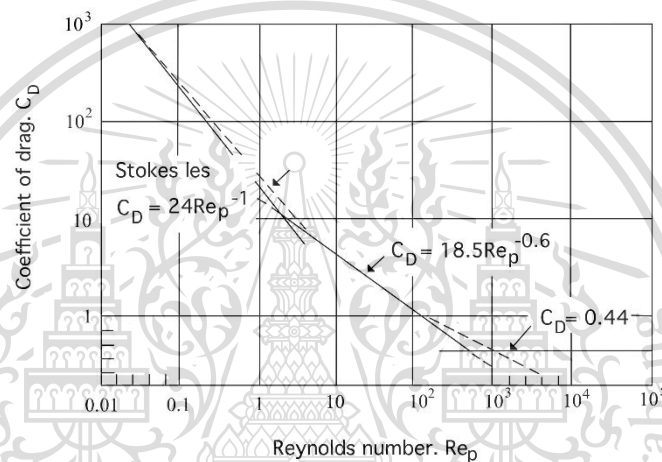
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากหัวข้อ 4.1.1 จะพบว่า การไหลของลมเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้น จากรูปที่ 4.3 เลือก Hydraulically smooth สำหรับท่อกลมไม่ขรุขระได้สมการคือสมการ Blasius สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อมีเรย์โนลด์นัมเบอร์ $4000 < Re < 10^5$

$$f = \frac{0.0791}{Re^{0.25}} \quad (4.7)$$

4.3.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ Solid friction (λ_s)

การคำนวณความเสียดทานของวัสดุ ต้องหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลของเม็ดอาหารก่อน เพื่อที่จะระบุสถานะการไหลของเม็ดอาหารแทนค่าในสมการที่ (2.50)



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Drag coefficient

จากสมการ

$$K = d \cdot \left[\frac{g \cdot \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\eta^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.8)$$

$$K = 0.004 \cdot \left[\frac{9.81 \cdot 1.14(438 - 1.14)}{0.00001875^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 96.2$$

โดยค่า K ที่คำนวณจะระบุช่วงในการคำนวณ ดังนี้

$K < 3.3$	ช่วง Stoke
$3.3 < K < 43.6$	ช่วง Intermediate
$43.6 < K < 2360$	ช่วง Newton
$K > 2360$	ช่วง Supercritical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.49) จะสามารถหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลของวัสดุได้ดังนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$Re_p = \frac{v_f d}{\gamma} = \frac{v_f \times (4 \times 10^{-3})}{16.544 \times 10^{-6}} = 241.779 v_f \quad (4.9)$$

$$Re_p = 1146$$

จากสมการ (2.55) สมการหาความเร็วในการตกอิสระของอาหารเม็ด โดยเลือกสมการช่วง Newton ดังนี้

$$U_{f_0} \cong 1.73 \cdot \left[\frac{gd(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{0.5} \quad (4.10)$$

แทนค่า $d = 13\text{mm}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $\rho_p = 438 \text{ kg/m}^3$, $\rho_f = 1.14 \text{ kg/m}^3$

$$U_{f_0} \cong 1.73 \cdot \left[\frac{9.81 \times 0.004(438 - 1.14)}{1.14} \right]^{0.5}$$

ความเร็วในการตกอิสระของอาหารเม็ด $U_{f_0} = 6.70 \text{ m/s}$

จากสมการหาค่าฟรเวดท์พาดิเคิล (Fr_p)

$$Fr_p = \frac{U_{f_0}^2}{g \cdot d} \quad (4.11)$$

$$Fr_p = \frac{6.70^2}{9.81 \times 0.004} = 1146.9$$

จากสมการหาค่าฟรเวดน์มเบอร์ (Fr_r)

$$Fr_r = \frac{v_f^2}{g \cdot D}$$

$$Fr_r = \frac{v_f^2}{9.81 \times 0.0565}$$

$$Fr_r = 1.804 v_f^2 = 461.8 \quad (4.12)$$

ความเสียดทานของวัสดุจากสมการ Solid friction factor ที่ได้จากการทดลองของ Stegmaier ดังนี้

$$\lambda_s = \frac{0.082 \cdot Fr_p^{0.25}}{\mu^{0.3} \cdot Fr_r^{0.86}} \cdot \left(\frac{D}{d} \right)^{0.1}$$

แทนค่าเพื่อหาค่า λ_s จะได้

$$\lambda_s = \frac{0.082 \times 1143.986^{0.25}}{\mu^{0.3} \times 1.804 v_f^{0.86}} \times \left(\frac{0.0565}{0.004} \right)^{0.1}$$

$$\lambda_s = \frac{0.621}{\mu^{0.3} 1.804 v_f^{1.72}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเร็วลม 16 m/s จะได้ความเสียดทานของวัสดุ (λ_s) = 0.0029

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4 คำนวณเฮดสูญเสียของลม (Head loss of air)

4.4.1 การคำนวณเฮดสูญเสียในท่อตรง

เฮดสูญเสียที่เกิดจากท่อเพียงอย่างเดียว จะสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.14) เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นฟังก์ชันกับความเร็วลม สมการผลลัพธ์จะยังติดตัวแปร f ไว้

$$\begin{aligned} h_{L,major} &= f \frac{L}{D} \cdot \frac{V_f^2}{2g} \cdot \frac{1000\rho_a}{\rho_w} \\ &= f \frac{3 \times V_f^2 \times 1.14 \times 1000}{2 \times 0.0565 \times 9.81 \times 997} \\ &= 3fV_f^2 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned} \quad (4.14)$$

4.4.2 การคำนวณหาเฮดสูญเสียในท่องอ

จากการออกแบบระบบส่งอาหารเม็ดด้วยลมจะมีท่องอ 90° จำนวน 2 จุด ซึ่งจะสามารถคำนวณหาเฮดสูญเสียได้จาก

$$h_{L,minor} = K_L \frac{V_f^2}{2g} \cdot \frac{1000\rho_a}{\rho_w} \quad (4.15)$$

ข้องอ 90° องศา ค่าจากตารางได้ $K_L = 1.2$ ซึ่งมีจำนวน 2 ท่อ

$$h_{L,minor} = 2 \times 1.2 \frac{V_f^2 \times 1.14 \times 1000}{19.62 \times 997}$$

$$h_{L,minor} = 0.139V_f^2 \text{ mmH}_2\text{O}$$

4.4.3 การคำนวณหาเฮดสูญเสียรวมของระบบ

จากการคำนวณข้างต้น เมื่อนำมารวมกันคือเฮดสูญเสียรวมของระบบดังนี้

$$h_{air} = h_{L,major} + h_{L,minor}$$

แทนค่าลงไปจะได้

$$h_{air} = 3fV_f^2 + 0.139V_f^2 \text{ mmH}_2\text{O}$$

4.5 การคำนวณเฮดสูญเสียของการไหลของวัสดุ (Head loss of solid flow)

เพื่อความง่ายในการการคำนวณเฮดสูญเสียของวัสดุ จะทำการแบ่งออกเป็นส่วนๆดังนี้

- 1.เฮดสูญเสียจากความเร่ง (Acceleration loss)
- 2.เฮดสูญเสียจากการขนส่งวัสดุตามแนวตั้ง (Vertical loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 3.เฮดสูญเสียจากการไหลไปตกิมท่อ (Pipe loss) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง 4.เฮดสูญเสียจากการไหลผ่านท่อโค้ง (Bend loss) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5.1 การคำนวณเฮดสูญเสียจากความเร่ง (Acceleration loss)

หาเฮดสูญเสียที่เกิดจากความเร่งได้จากสมการ

$$H_a = \frac{\rho_f V_s^2}{\rho_w g} \left(0.5 + \frac{\mu \cdot V_s}{V_f} \right) \quad (4.16)$$

แทนสมการ 4.5 ลงในสมการ 4.16 ได้

$$H_a = \frac{(V_f(1-0.008d0.3\rho_p0.5))^2}{997 \times 9.81^2} \left(0.5 + \frac{1.16 \cdot V_f(1-0.008d0.3\rho_p0.5)}{V_f} \right)$$

4.5.2 การคำนวณเฮดสูญเสียจากการขนส่งวัสดุตามแนวตั้ง (Vertical loss)

หาเฮดสูญเสียที่เกิดจากการขนส่งวัสดุตามแนวตั้งได้จากสมการ

$$H_z = \frac{\mu \cdot \rho_f \cdot z \cdot V_f}{\rho_w \cdot V_f(1-0.008d0.3\rho_p0.5)} \quad (4.17)$$

$$H_z = \frac{1.16 \cdot 1.14 \cdot 1 \cdot V_f}{997 \cdot V_f(1-0.008 \cdot 0.004 \cdot 0.3 \cdot 438 \cdot 0.5)} \text{ mmH}_2\text{O}$$

4.5.3 การคำนวณเฮดสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ (Pipe loss)

หาเฮดสูญเสียที่เกิดจากการไหลไปตามท่อจากสมการ

$$H_L = \frac{\rho_f \cdot V_f^2 \cdot L}{2 \cdot D \cdot \rho_w \cdot g} (\mu \cdot \lambda s) \quad (4.18)$$

$$H_L = \frac{1.14 \cdot V_f^2 \cdot 3}{2 \cdot 0.565 \cdot 9.81 \cdot 997} (1.16 \cdot \lambda s) \text{ mmH}_2\text{O}$$

4.5.4 การคำนวณเฮดสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง (Bend loss)

หาเฮดสูญเสียที่เกิดจากการไหลผ่านท่อโค้งจากสมการ

$$H_b = \frac{N \cdot B \cdot \rho_f \cdot V_f^2 \cdot (1 + \mu)}{2 \cdot g \cdot \rho_w} \quad (4.19)$$

$$H_b = \frac{2 \cdot 1.5 \cdot 1.14 \cdot V_f^2 \cdot (1 + 1.16)}{2 \cdot 9.81 \cdot 997} \text{ mmH}_2\text{O}$$

4.5.5 เฮดสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุ ($\Delta H_{T \text{ solid}}$)

นำเฮดสูญเสียทั้ง 4 มารวมด้วยกันจะได้ดังสมการ (4.20)

$$\Delta H_{T \text{ solid}} = \Delta H_a + \Delta H_z + \Delta H_L + \Delta H_b \quad (4.20)$$

เมื่อนำเฮดสูญเสียของลมและวัสดุมารวมกันจะได้ดังสมการ (4.21)

$$\Delta H_{\text{system}} = \Delta H_{T \text{ air}} + \Delta H_{T \text{ solid}} \quad (4.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.6 เฮดสูญเสียรวมของระบบการไหล 2 เฟส (ΔH_{system})

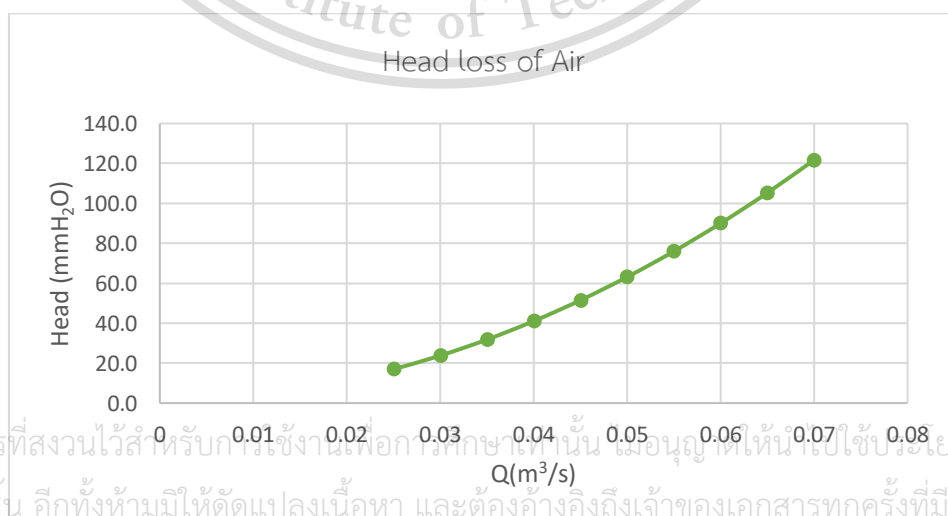
4.6.1 เฮดสูญเสียของการไหลของลม($\Delta H_{T air}$)

หาค่าเฮดสูญเสียของลม($\Delta H_{T air}$) ด้วยการแทนค่าความเร็วลมที่มากกว่าความเร็วต่ำสุดของการไหลในท่อ คือแทนความเร็วมากกว่า 10 m/s ลงไปในสมการจะได้ค่าดังตารางนี้

ตารางที่ 4.3 เฮดสูญเสียของลม

ความเร็วลม(m/s)	อัตราการไหล(m^3/s)	เรย์โนลด์นัมเบอร์(Re)	ความเสียดทาน(f)	เฮด(mmH ₂ O)
10	0.025	0.00581	0.00586	111.2
12	0.030	0.00556	0.00452	141.2
14	0.035	0.00535	0.00363	174.6
16	0.040	0.00517	0.00300	211.4
18	0.045	0.00502	0.00254	251.6
20	0.050	0.00489	0.00219	295.2
22	0.055	0.00477	0.00191	342.1
24	0.060	0.00467	0.00169	392.3
26	0.065	0.00458	0.00151	445.9
28	0.070	0.00450	0.00136	502.7

เมื่อนำสมการเฮดสูญเสียของลมและอัตราการไหลของลมมาสร้างกราฟจะได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 กราฟการสูญเสียเฮดของอากาศ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.4 ปกติเฮตสูญเสียของลมไม่ต้องพิจารณาความเร็วการไหลต่ำสุดในท่อกล่าวคือ กราฟจะเริ่มตั้งแต่จุดศูนย์เป็นต้นไป แต่เพื่อความไม่สับสนในปริยญาณพจน์นี้จึงใช้หลักเกณฑ์เดียวกับการไหลของวัสดุคือพิจารณาที่ความเร็วลมต่ำสุดในการไหลในท่อเป็นต้นไปจึงได้ผลดังภาพ

4.6.2 เฮตสูญเสียของการไหลของวัสดุ ($\Delta H_T \text{ solid}$)

หาค่าเฮตสูญเสียของวัสดุด้วยการแทนค่าความเร็วลมที่มากกว่าความเร็วต่ำสุดของการไหลในท่อ คือแทนความเร็วมากกว่า 10 m/s ลงไปในสมการจะได้ค่าดัง 3 ตารางนี้

ตารางที่ 4.4 เฮตสูญเสียของวัสดุ

ความเร็วลม(m/s)	ความเร็ววัสดุ(m/s)	อัตราการไหล(m ³ /s)	ฟรานัมเบอร์ Fr	ฟร้าวพาติเคิล Frp	เรย์โนลด์พาติเคิล Rep	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน λ_s
10	9.7	0.025	180.4	1144	2424.2	0.00586
12	11.6	0.03	259.8	1144	2909.1	0.00452
14	13.6	0.035	353.6	1144	3393.9	0.00363
16	15.5	0.040	461.9	1144	3878.8	0.00300
18	17.4	0.045	584.6	1144	4363.6	0.00254
20	19.4	0.050	721.7	1144	4848.5	0.00219
22	21.3	0.055	873.2	1144	5333.3	0.00191
24	23.2	0.060	1039.2	1144	5818.2	0.00169
26	25.2	0.065	1219.6	1144	6303.0	0.00151
28	27.1	0.070	1414.5	1144	6787.9	0.00136

ตารางที่ 4.4 เฮตสูญเสียของวัสดุ(ต่อ)

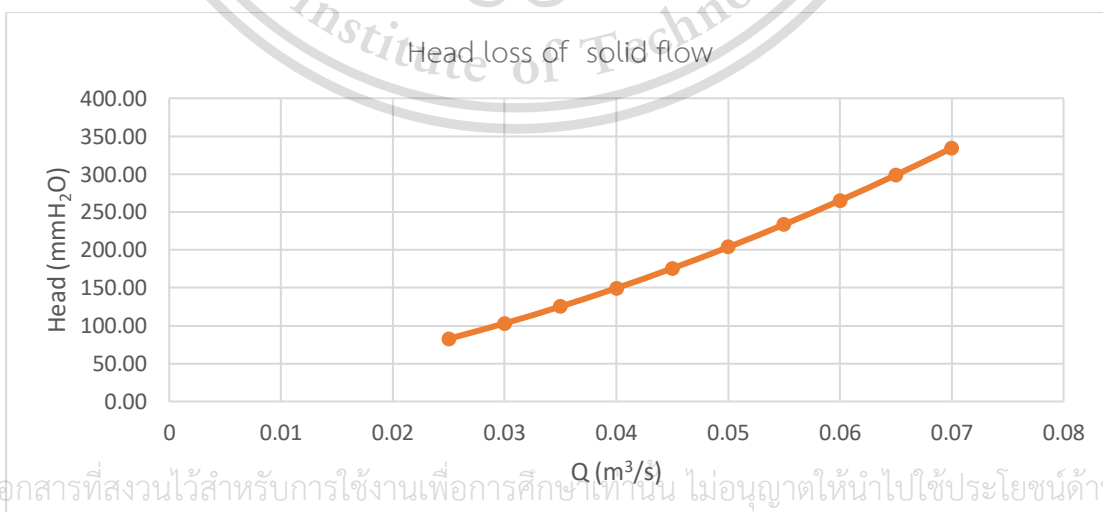
V_f (m/s)	μ	m_f (kg/s)	m_s (kg/s)	H_L (mmH ₂ O)	H_a (mmH ₂ O)	H_b (mmH ₂ O)	H_z (mmH ₂ O)	H_{solid} (mmH ₂ O)
10	1.925	0.029	0.055	3.49	25.82	51.14	2.27	82.7
12	1.604	0.034	0.055	3.23	32.29	65.57	1.9	103
14	1.375	0.04	0.055	3.03	39.21	81.39	1.62	125.3
16	1.203	0.046	0.055	2.86	46.55	98.62	1.42	149.5
18	1.07	0.051	0.055	2.73	54.34	117.24	1.26	175.6
20	0.963	0.057	0.055	2.61	62.56	137.26	1.14	203.6
22	0.875	0.063	0.055	2.51	71.22	158.67	1.03	233.4

24	0.802	0.069	0.055	2.42	80.32	181.49	0.95	265.2
26	0.74	0.074	0.055	2.34	89.85	205.71	0.87	298.8
28	0.688	0.08	0.055	2.26	99.82	231.32	0.81	334.2

ตารางที่ 4.4 เฮดสูญเสียของวัสดุ(ต่อ)

อัตราการไหล (m^3/s)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน λ_s	เฮดสูญเสียของวัสดุ (mmH_2O)
0.025	0.00586	82.73
0.030	0.00452	102.99
0.035	0.00363	125.25
0.040	0.00300	149.45
0.045	0.00254	175.56
0.050	0.00219	203.56
0.055	0.00191	233.43
0.060	0.00169	265.17
0.065	0.00151	298.77
0.070	0.00136	334.22

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 4.4 มาสร้างกราฟจะได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงรูปที่ 4.5 กราฟการสูญเสียเฮดของวัสดุ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.5 จุดต่ำสุดของกราฟคือความเร็วลม 10.0 m/s ที่อัตราไหล 0.025 m³/s มีเฮด 82.73 mmH₂O เป็นจุดเริ่มต้นของการไหลแบบเบาบางของวัสดุ

4.6.3 เฮดสูญเสียของการไหล 2 เฟส (ΔH_{system})

เมื่อนำเฮดสูญเสียทั้งสอง เฮดจากการไหลของลม และเฮดการไหลของไหล 2 สถานะมา รวมกันจะได้เฮดสูญเสียของการไหลแบบเบาบาง (Dilute phase) ในหน่วย มิลลิเมตรน้ำดังนี้

ตารางที่ 4.5 เฮดสูญเสียของการไหล 2 เฟส

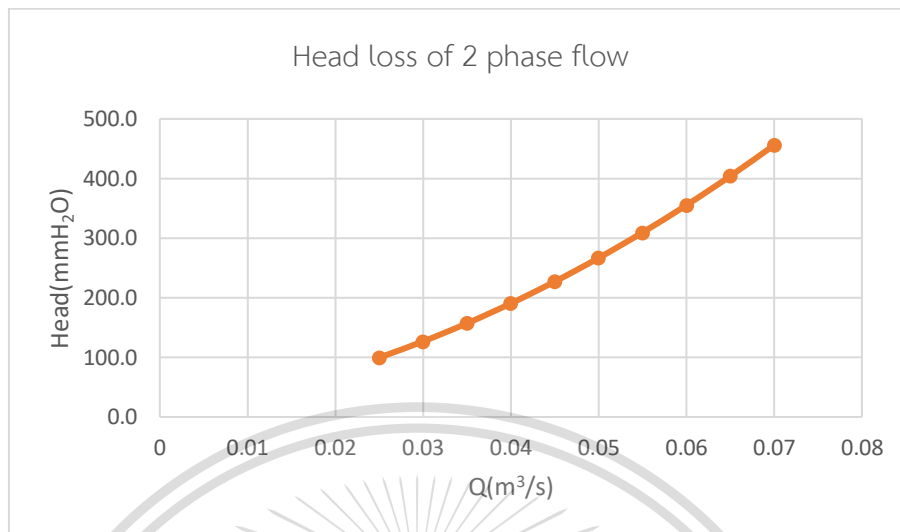
อัตราการไหล (m ³ /s)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน λ_s	เฮดสูญเสียของไหล 2 เฟส (mmH ₂ O)
0.025	0.00586	99.7
0.030	0.00452	126.8
0.035	0.00363	157.1
0.040	0.00300	190.5
0.045	0.00254	227.1
0.050	0.00219	266.7
0.055	0.00191	309.4
0.060	0.00169	355.2
0.065	0.00151	404.0
0.070	0.00136	455.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.5 นำอัตราการไหลและเฮดสูญเสียมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 เฮดสูญเสียของการไหล 2 เฟส

จากรูปที่ 4.6 จะพบว่าเฮดที่ได้จะมีกราฟลักษณะเป็นเส้นโค้งขึ้นซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.16 แล้วจะแตกต่างกัน สาเหตุที่รูปทั้งสองแตกต่างกันเพราะรูป 4.6 เป็นรูปที่เกิดจากการคำนวณในการคำนวณเฮดสูญเสียนี้จะสามารถหาได้เฉพาะการไหลแบบเบาบาง (Dilute phase) เท่านั้น ดังนั้นกราฟที่ได้จะเหมือนกับการพล็อตกราฟที่ 2.17 เพียงครั้งเดียว โดยแสดงเพียงกราฟทางด้านขวาของจุดความเร็วต่ำสุด ดังนั้นกราฟที่ได้จากทฤษฎีกับการทดลองจริงจึงแตกต่างกัน จากการคำนวณในบทที่ 4 สามารถสรุปเป็นตัวแปรที่ได้จากการออกแบบและค่าคงที่จะได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ตัวแปร	นิยาม	ปริมาณ	หน่วย
V_f	ความเร็วลม	16.0	m/s
V_s	ความเร็วของเม็ดอาหาร	15.4	m/s
T	อุณหภูมิที่ทำการทดลอง	36	°C
Le	ระยะการไหลเต็มท่อ	1.536	m
L	ความยาวรวมท่อ	3	m
Z	ระยะท่อแนวตั้ง	1	m
D	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ	0.0565	m
d	เส้นผ่าศูนย์กลางอาหารเม็ด	4	mm
m_f	อัตราการไหลของลม	0.0465	Kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษปรับและต้องชดเชยค่าเสียหายของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

m_s	อัตราการไหลของอาหารเม็ด	200	Kg/h
ρ_f	ความหนาแน่นอากาศ	1.1418	Kg/m ³
ρ_s	ความหนาแน่นอาหาร	438	Kg/m ³
f	ความเสียดทานของลม	0.0052	
λ_s	ความเสียดทานของของไหล 2 สถานะ	0.0029	
μ	อัตราการขนส่งอาหารเม็ด	1.16	
V_{st}	ความเร็วลมต่ำสุดในท่อแนวตรง	10	m/s



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

จากการออกแบบชุดทดลองในบทที่ 3 จะนำมาทำชุดทดลองจริงในบทนี้ โดยจะแบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลอง 1.การทดลองหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 2.การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมในท่อ 3.การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอาหารเม็ดในท่อ โดยแต่ละการทดลองจะใช้ pitot tube วัดเฮดที่จุดที่กำหนดไว้และหรี้แดมเปอร์เพื่อลดอัตราการไหลของลม ส่วนอัตราการไหลของวัสดุหรืออัตราการขนส่งจะคงที่ที่ 200 kg/h ในการทดลองจะมีอุปกรณ์การทดลองและตัวแปรควบคุมดังนี้

อุปกรณ์การทดลอง

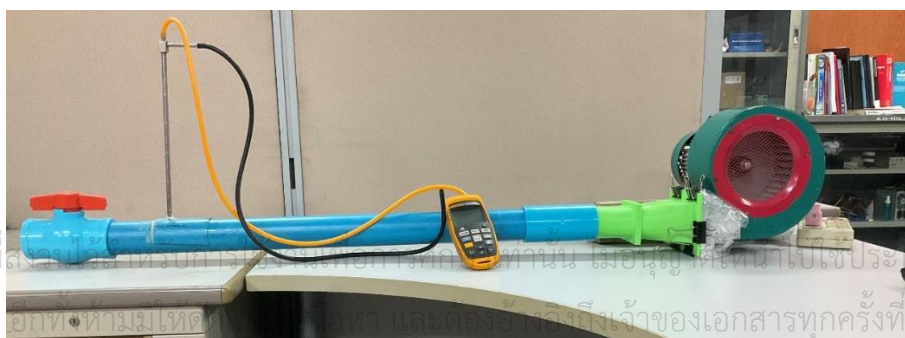
- 1.พัดลม (Fan)
- 2.เครื่องวัดเฮดต่าง (Differential pressure meter)
- 3.ท่อ (PVC pipe)
- 4.ตัวจ่ายอาหารเม็ด (Feeder)
- 5.ข้อต่อหรี้ลม (Damper)

ตัวแปรควบคุม

- 1.อัตราการขนส่งวัสดุ 200 kg/h
- 2.ขนาดท่อPVC 2 นิ้ว
- 3.ขนาดเม็ดอาหาร 4 mm
- 4.อุณหภูมิในการทดลอง 36 องศา

5.1 การทดลองที่ 1 การทดลองหาสมรรถนะของพัดลม

การทดลอง 1.1 การทดลองหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 1 โดยเครื่องวัดเฮดต่าง (Differential pressure meter, Fluke922)



รูปที่ 5.1 ภาพชุดทดลองการหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 1

This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use.

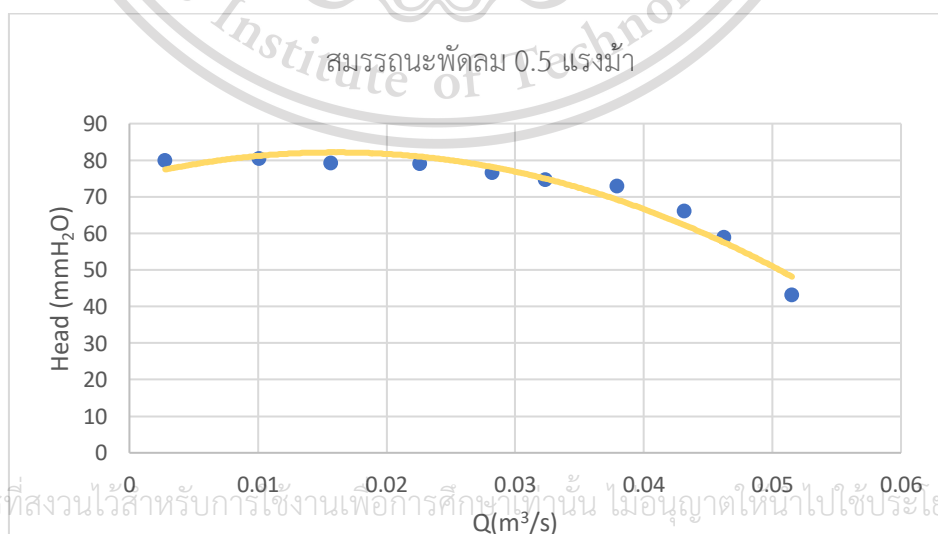
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วิธีการทดลอง

1. นำ Pitot tube ใส่ในท่อในตำแหน่งที่ปลายท่อโดยเว้นระยะ 0.6 เมตร จากพัดลม
2. วัดค่าความเร็วลม เสดสถิต และเสดทั้งหมด ที่จุด 1 และ จุด 2 โดยการหรีดแมเปอร์จาก อัตราการไหลมากไปหาอัตราการไหลน้อย
3. บันทึกค่าลงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 บันทึกผลการทดลองหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 1

หรีดแมเปอร์ครั้งที่	V (m/s)	Q (m ³ /s)	H _{static} (mmH ₂ O)	H _{dynamic} (mmH ₂ O)	H _{total} (mmH ₂ O)
1	1.11	0.0027	79.92	0.08	80
2	4.02	0.01	79.42	1.07	80.49
3	6.25	0.015	76.78	2.6	79.38
4	9.02	0.022	73.72	5.41	79.13
5	11.25	0.028	68.27	8.41	76.68
6	12.91	0.032	63.73	11.07	74.8
7	15.13	0.037	57.77	15.21	72.98
8	17.22	0.043	46.57	19.7	66.27
9	18.45	0.046	36.45	22.62	59.07
10	20.56	0.051	15.11	28.08	43.19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 กราฟสมรรถนะพัดลม 0.5 แรงม้า

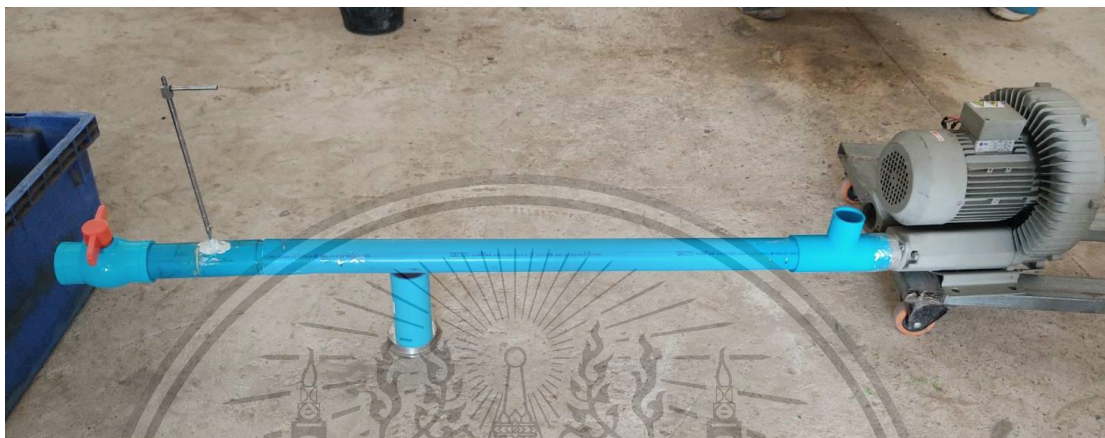
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากกราฟสมรรถนะพัดลมตัวแรกจะสังเกตว่าพัดลมตัวที่ 1 เมื่ออัตราไหลน้อยลงหรือความเร็วลมน้อย เหนดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ไม่เหมาะกับการขนส่งอาหารเม็ดที่มีเหนดสูงหรือการไหลแบบหนาแน่นเพราะจะไม่สามารถผลักอาหารเม็ดไปจนถึงปลายทางได้

การทดลอง 1.2 การทดลองหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 2 โดยเครื่องวัดเหนดต่าง

(Differential pressure meter, Fluke922)



รูปที่ 5.3 ภาพชุดทดลองการหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 2

วิธีการทดลอง

1. นำ Pitot tube ใส่ในท่อในตำแหน่งที่ปลายท่อโดยเว้นระยะ 0.6 เมตร จากพัดลม
2. วัดค่าความเร็วลม เหนดสถิต และเหนดทั้งหมด ที่จุด 1 และ จุด 2 โดยการหรีดแมเปอร์จากอัตราการไหลมากไปหาอัตราการไหลน้อย
3. บันทึกค่าลงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 บันทึกผลการทดลองหาสมรรถนะของพัดลมตัวที่ 2

หรีดแมเปอร์ครั้งที่	V (m/s)	Q (m ³ /s)	H _{static} (mmH ₂ O)	H _{dynamic} (mmH ₂ O)	H _{total} (mmH ₂ O)
1	5.20	0.0130	595.14	1.86	597.01
2	8.57	0.0214	579.06	4.90	583.95
3	10.25	0.0256	560.18	6.99	567.17
4	13.42	0.0336	472.64	12.47	485.11
5	14.70	0.0368	279.27	15.15	294.42
6	15.85	0.0397	90.80	17.60	108.40
7	15.95	0.0399	62.94	17.83	80.77

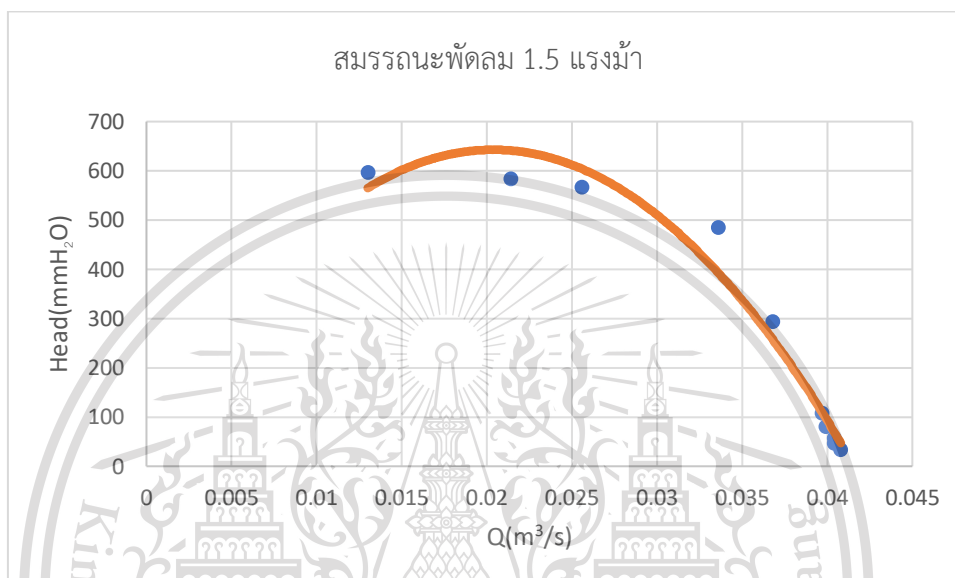
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้ผู้อื่นนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

8	16.13	0.0404	39.28	18.18	57.46
9	16.15	0.0404	28.79	18.30	47.09
10	16.30	0.0408	15.62	18.65	34.27

จากตารางผลการทดลองนำเฮดสูญเสีย (H_{total}) กับอัตราการไหล (Q) มาพล็อตกราฟ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.4 กราฟสมรรถนะพัดลม 1.5 แรงม้า

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าพัดลมตัวที่ 2 ต่างจากพัดลมตัวที่ 1 ตรงที่กราฟของพัดลมตัวที่ 2 มีความชันที่มากกว่าตัวที่ 1 อย่างชัดเจน ทำให้เมื่ออัตราการไหลของลมน้อย เฮดที่เกิดจะเพิ่มด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุจะใช้พัดลมตัวที่ 2

5.2 การทดลองที่ 2 การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลมและท่อ

การทดลอง 2 การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลมและท่อโดยเครื่องวัดเฮดต่าง (Differential pressure meter, Fluke922)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านวิศวกรรมเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 5.5 ภาพชุดทดลองการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วิธีการทดลอง

1. นำ Pitot tube ใส่ในท่อในตำแหน่งที่ 1 และ 2 โดยเว้นระยะห่าง 2 เมตร ($L=1.5$ m, $L=2$ m)
2. วัดค่าความเร็วลม เสดสถิต และเสดทั้งหมด ที่จุด 1 และ จุด 2 โดยการหรีดแมเปอร์จากอัตราการไหลมากไปหาอัตราการไหลน้อย
3. บันทึกค่าลงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 บันทึกผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลมและท่อ

หรีดแมเปอร์ครั้งที่	V (m/s)	Q (m ³ /s)	H _{static} (mmH ₂ O)		H _{dynamic} (mmH ₂ O)	H _{total} (mmH ₂ O)		H _{loss} (mmH ₂ O)
			จุดที่ 1	จุดที่ 2		จุดที่ 1	จุดที่ 2	
1	1.11	0.0027	79.99	79.92	0.08	80.07	80.00	0.07
2	4.02	0.010	80.11	79.42	1.07	81.19	80.49	0.70
3	6.25	0.015	77.95	76.78	2.59	80.54	79.38	1.17
4	9.02	0.026	76.29	73.72	5.40	81.69	79.13	2.56
5	11.25	0.028	73.28	68.27	8.41	81.69	76.68	5.01
6	12.91	0.032	69.09	63.73	11.07	80.16	74.80	5.36
7	15.13	0.037	63.83	57.77	15.21	79.04	72.98	6.06
8	17.22	0.043	53.21	46.57	19.70	72.91	66.27	6.64
9	18.45	0.046	44.38	36.45	22.61	66.99	59.07	7.93
10	20.56	0.051	24.55	15.11	28.08	52.63	43.19	9.44

เนื่องจากการทดลองจากจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2 เป็นท่อตรงจึงพิจารณาเพียงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสมการ (2.10) ได้สมการดังนี้

$$f = H_L \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{g \cdot \rho_w}{500 \cdot V^2 \cdot \rho_a}$$

$$f = H_L \frac{0.0565}{2} \cdot \frac{9.81 \cdot 997}{500 \cdot 1.14 \cdot V^2}$$

เมื่อแทนค่า H_{loss} ใน H_L และค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามสมการจะได้ค่า f (Friction factor) ตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 5.4 ค่า Reynold number และ Friction factor

Reynold number	Friction factor
3791.7	0.01207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

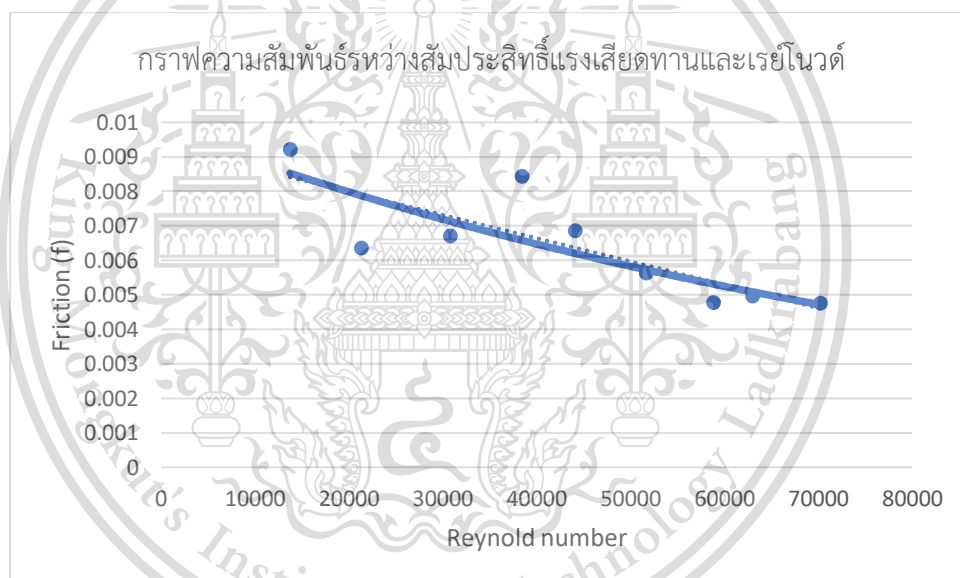
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาติดต่อแจ้งเบาะแสและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

13732.2	0.00920
21349.8	0.00634
30812.0	0.0067
38429.6	0.00842
44100.1	0.00684
51683.5	0.00563
58822.9	0.00476
63024.5	0.00495
70232.2	0.00475

จากตารางจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynold number และ Friction factor ดังนี้



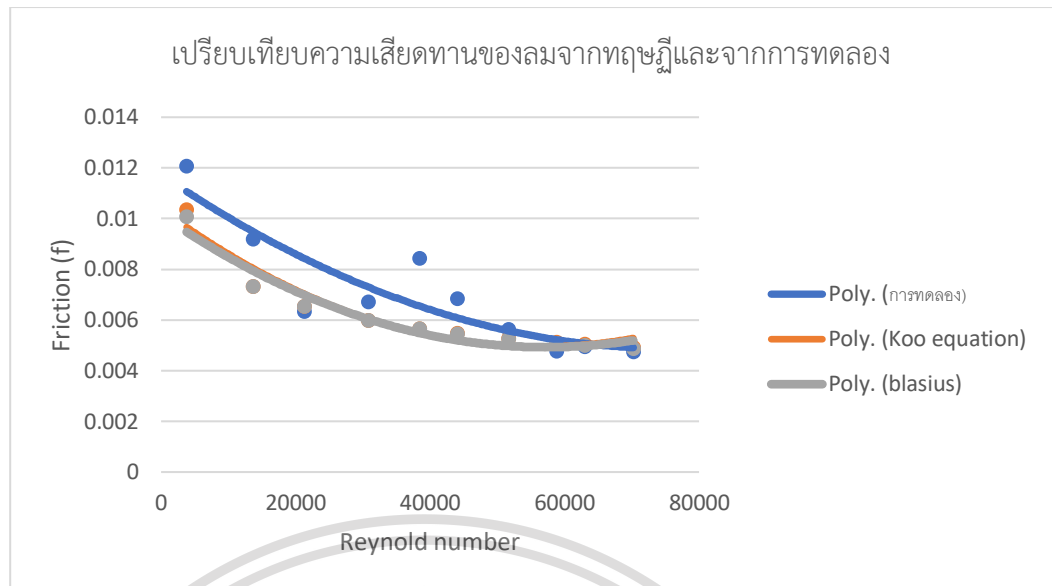
รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynold number และ Friction factor

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ Koo equation และ Blasius equation มาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการทดลองได้ดังกราฟข้างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction (f) จากการทดลอง จากสมการ Koo equation และจากสมการ Blasius equation

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า Friction (f) จากการทดลอง จากสมการ Koo equation และจากสมการ Blasius equation

Reynold number	Friction factor	Koo equation	% error	Blasius equation	% error
3791.7	0.01207	0.01035	16.65	0.01008	19.74
13732.2	0.00920	0.00733	25.56	0.00731	25.91
21349.8	0.00634	0.00655	3.15	0.00654	3.11
30812.0	0.00670	0.00598	12.11	0.00597	12.22
38429.6	0.00842	0.00566	48.66	0.00565	49.04
44100.1	0.00684	0.00548	24.81	0.00546	25.31
51683.5	0.00563	0.00528	6.66	0.00525	7.32
58822.9	0.00476	0.00512	7.05	0.00508	6.28
63024.5	0.00495	0.00504	1.78	0.00499	0.85
70232.2	0.00475	0.00492	3.37	0.00486	2.24

จากการทดลองที่ 2 จะพบว่า การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีความคลาดเคลื่อนจากสมการทั้ง 2 เท่ากับ 15.05% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลม (f) ที่ได้นี้จะใช้ได้เมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ที่มีเรย์โนลด์นัม (Re) เบอร์อยู่ในช่วง 3700 – 70200

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.3 การทดลองที่ 3 การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s)

การทดลองที่ 3 การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s) โดยเครื่องวัดหีดต่าง (Differential pressure meter, Fluke922)



รูปที่ 5.8 ภาพชุดทดลองการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s)

วิธีการทดลอง

1. นำ Pitot tube ใส่ในท่อในตำแหน่งที่ 1 และ 2 โดยเว้นระยะห่าง 2 เมตร
2. วัดค่าความเร็วลม เสดของของไหล 2 เฟส ที่จุด 1 และ จุด 2 โดยการหรีดแมเปอร์จากอัตราการไหลมากไปหาอัตราการไหลน้อย
3. บันทึกค่าลงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 บันทึกผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของของวัสดุ (λ_s)

ครั้งที่	V_f (m/s)	V_s (m/s)	Q (m ³ /s)	H 2 phase (mmH ₂ O)		Hair (mmH ₂ O)	H loss solid (mmH ₂ O)
				จุดที่ 1	จุดที่ 2		
1	5.1	4.9	0.012	306.10	78.70	0.55	226.84
2	5.5	5.3	0.013	283.37	59.05	0.63	223.69
3	6.5	6.3	0.016	263.70	46.56	0.85	216.30
4	7.5	7.3	0.018	245.08	64.11	1.09	179.88
5	8.0	7.7	0.020	211.21	59.91	1.22	150.08
6	8.8	8.5	0.022	191.34	70.39	1.44	119.51
7	10.1	9.8	0.025	206.08	68.28	1.83	135.97
8	12.1	11.7	0.03	246.49	70.69	2.51	173.28
9	13.9	13.5	0.034	329.90	142.28	3.20	184.42
10	15.3	14.8	0.038	358.38	144.06	3.79	210.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบการใช้งานเอกสารนี้ การนำเอกสารนี้ไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากค่าเสียดสูญเสีย (H_{Loss}) ที่ได้จากการทดลองนำไปลบด้วย เสียดสูญเสียจากลม(H_{Lf})และเสียดสูญเสียวัสดุจากความเร่ง(H_a) จะได้ด้วยเสียดสูญเสียจากความเสียดทานวัสดุ(H_L) ดังนี้

$$H_L = H_{Loss} - H_{Lf} - H_a$$

ดังนั้นสามารถหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุจากสมการ (2.23) โดยปรับสมการได้ดังนี้

$$\lambda_s = \frac{H_L \cdot D \cdot g \cdot \rho_w}{500 \cdot v_f^2 \cdot \mu \cdot \rho_f}$$

หลังจากแทนค่าต่างๆลงในสมการแล้วให้พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ความเร็วมากกว่าความเร็วการไหลต่ำสุด (V_{st}) ดังคำนวณสมการ (4.5) $V_{st} = 10$ m/s จะได้ตั้งตารางความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัสดุ (λ_s) ดังนี้

ตารางที่ 5.7 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(Re) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานวัสดุ (λ_s)

Velocity (V_f) (m/s)	Reynold (Re)	Friction of solid (λ_s)
5.1	17421.4	-
5.5	18787.8	-
6.5	22203.8	-
7.5	25619.7	-
8.0	27327.7	-
8.8	30060.5	-
10.1	34501.2	0.5384
12.1	41333.1	0.5748
13.9	47481.9	0.5157
15.3	52264.2	0.5358

} การไหลแบบหนาแน่น

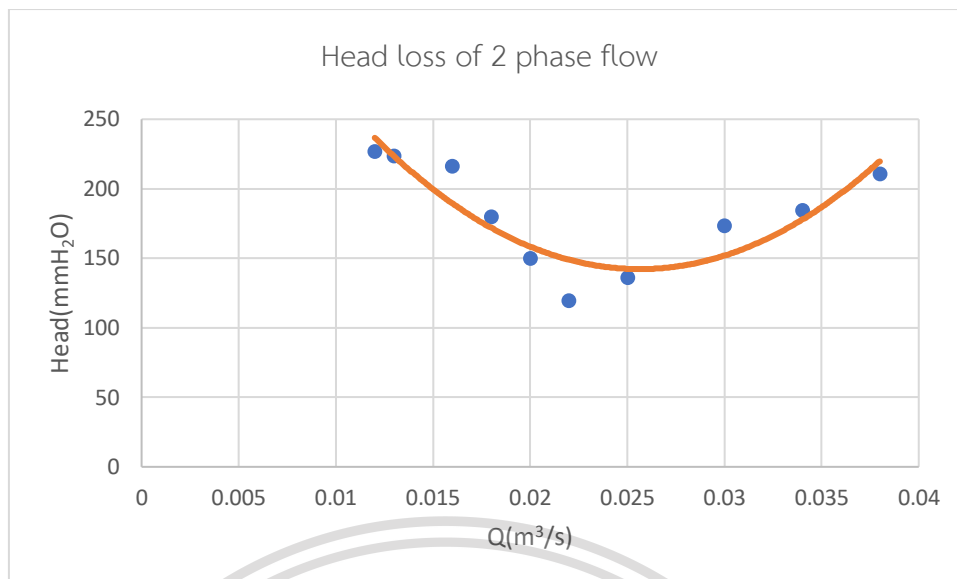
} การไหลแบบเบาบาง

จากการคำนวณความเร็วในการไหลต่ำสุด $V_{st} = 10$ m/s ในการทดลองจะพบว่าจุดต่ำสุดของกราฟการขนส่งอาหารเม็ดมีความเร็ว $V_{st} = 9.2$ m/s จากรูปที่ 5.9 เมื่อผ่านจุดต่ำสุดแล้วความเร็วของการขนส่งยิ่งลดจะทำให้ความดันรวมเพิ่มขึ้น โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 5.6 จะได้ตั้งกราฟดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.9 กราฟการขนส่งอาหารเม็ดจากการทดลอง

จากกราฟเฮดสูญเสียของการไหลของไหล 2 สถานะ พบว่าการไหลแบบเบาบางจะเกิดในขณะอากาศมีความเร็วสูง เมื่อลมมีความเร็วตกลงเรื่อยๆจนถึงจุดต่ำสุด จะพบว่าหลังจากนี้แม้ความเร็วลดลงแต่ความดันกลับสูงขึ้น ฝั่งการไหลความเร็วต่ำนี้จะเรียกการไหลแบบหนาแน่น สังเกตจากกราฟจะพบว่าจุดต่ำสุดของกราฟที่อัตราการไหลอากาศ $0.0235 \text{ m}^3/\text{s}$ หรือความเร็ว 9.2 m/s และจุดนี้จะเป็นจุดเปลี่ยนของการไหล 2 ประเภทดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 5.10 การไหลแบบเบาบางที่อัตราไหล $0.038 \text{ m}^3/\text{s}$

จากรูปที่ 5.10 เป็นการไหลแบบเบาบางที่ความเร็วลม 15.3 m/s อัตราการไหลของลม $0.038 \text{ m}^3/\text{s}$ อาหารเม็ดไหลแบบไม่เกาะกลุ่ม เกิดการกระดอนกระทบกับผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

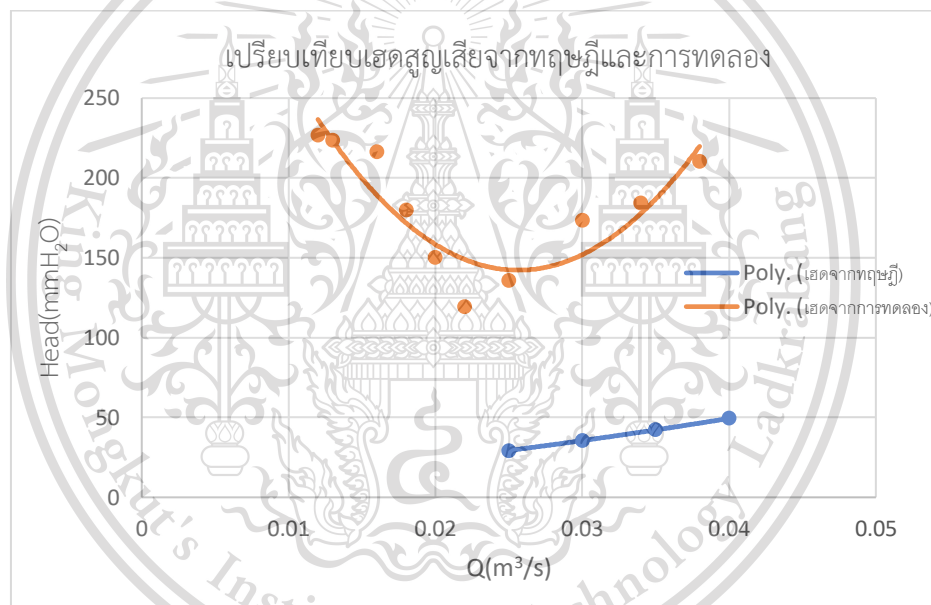
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.11 การไหลแบบหนาแน่นที่อัตราไหล $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$

จากรูปที่ 5.11 เป็นการไหลแบบหนาแน่นที่ความเร็วลม 6.5 m/s อัตราการไหลของลม $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$ อาหารไหลติดกันเป็นกลุ่ม เกิดการกระดอนเนื่องจากการกระทบกับผนังน้อย



รูปที่ 5.12 กราฟการเปรียบเทียบเฮดสูญเสียจากทฤษฎีและการทดลอง

จากรูปที่ 5.12 เป็นการเปรียบเทียบเฮดสูญเสียจากทฤษฎีและการทดลองข้อมูลที่น่ามาพล็อตกราฟเป็นข้อมูลจากตารางที่ 4.4 โดยนำเฮดสูญเสียจากความเร่งบวกกับเฮดสูญเสียจากท่อแนวราบตามสถานการณ์เดียวกับการทดลอง จากรูปที่ 5.12 พบว่ากราฟที่ได้มีความแตกต่างกันคือกราฟเฮดสูญเสียจากการทดลองลักษณะเป็นรูปตัวยูและกราฟจากทฤษฎีมีลักษณะโค้งขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.17 แล้วพบว่ากราฟเฮดสูญเสียจากการทดลองมีลักษณะคล้ายกันคือมีลักษณะโค้งแบบตัวยู แต่ที่แตกต่างชัดเจนคือกราฟที่ได้จากการทดลองสาเหตุจากที่สมการที่ใช้ไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารในฝั่งการไหลแบบหนาแน่นได้หรือฝั่งซ้ายของกราฟการทดลองที่จุดต่ำสุดของกราฟเป็นตัวไม่ว่ากรณีใดแบ่งการไหลเป็นแบบหนาแน่นและแบบเบาบาง นอกจากลักษณะรูปร่างของกราฟจากทฤษฎีและการใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทดลองจะแตกต่างกันแล้วเหตุสูญเสียที่เกิดขึ้นที่อัตราการไหลเดียวกันก็แตกต่างกันมากเช่นกัน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าตามไปด้วย ตั้งข้อสังเกตสาเหตุของความผิดพลาดนี้อาจจะเกิดจาก 1)จากความหนืดที่เกิดจากความชื้นของอาหารเม็ด 2)รูปร่างลักษณะเม็ดอาหารปลาที่ไม่เป็นทรงกลมเหมือนกับเม็ดพลาสติกในการทดลองนี้ สมมุติให้อาหารปลาเป็นทรงกลมอาจจะส่งผลกระทบต่อเฮดที่ได้ 3)ในความเป็นจริงการขนส่งด้วยความหนาแน่นของอากาศจะไม่คงที่แต่ในการทดลองนี้ได้สมมุติให้ความหนาแน่นของอากาศคงที่อาจจะส่งผลต่อเฮดที่เกิดขึ้น 4)แอมเปอร์ที่ใส่ไปในส่วนท้ายของท่อที่ทำหน้าที่ลดอัตราการไหลของลมอาจจะมีผลของเฮดที่เกิดจากข้อต่อที่ไม่ได้ถูกประเมินด้วยในขั้นตอนการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุข้างต้น แต่มีจุดที่การทดลองและทฤษฎีที่มีความใกล้เคียงกันคือความเร็วในการของลมต่ำสุดในท่อที่การทดลองได้ 9.2 m/s และจากทฤษฎีได้ 10 m/s มีความคลาดเคลื่อน 8% ซึ่งถือว่าค่อนข้างใกล้เคียงมาก

ตารางที่ 5.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ (λ_s) จากการทดลอง และจากการคำนวณ

Velocity (V_f) (m/s)	Reynold (Re)	Friction of air (f) ทดลอง	Friction of solid (λ_s) ทดลอง	Friction of solid (λ_s) คำนวณ	จำนวนเท่าของ λ_s
5.1	17421.4	0.00688	-	-	
5.5	18787.8	0.00675	-	-	
6.5	22203.8	0.00648	-	-	
7.5	25619.7	0.00625	-	-	
8.0	27327.7	0.00615	-	-	
8.8	30060.5	0.00600	-	-	
10.1	34501.2	0.00580	0.5384	0.00989	54.4
12.1	41333.1	0.00554	0.5748	0.00629	91.4
13.9	47481.9	0.00536	0.5157	0.00516	99.9
15.3	52264.2	0.00523	0.5358	0.00451	118.8

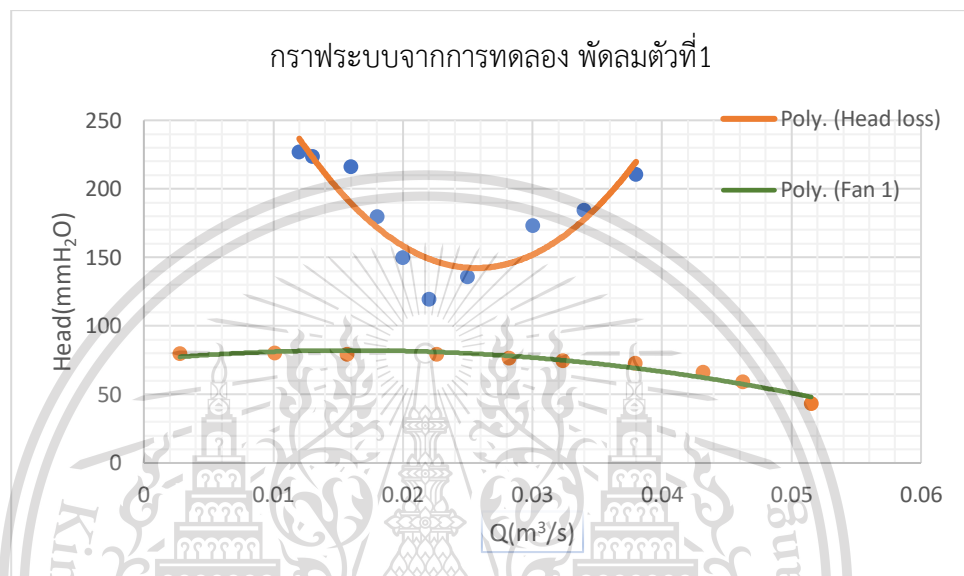
จากการทดลองที่ 3 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุจากการทดลองมีค่าเป็น 91.1 เท่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุจากการคำนวณ สาเหตุที่อาหารเม็ดมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่าเม็ดพลาสติกที่เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณ, ความหนาแน่นของลมที่ใช้เป็นค่าคงที่, ความชื้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ของเม็ดอาหารที่มีมากกว่า,รูปร่างของเม็ดอาหารที่ไม่เป็นทรงกลมหรือแฉกเป๋อร์ที่ใส่ไปในส่วนท้ายของท่อที่ทำหน้าที่ลดอัตราการไหลของลมเป็นส่วนในการเพิ่มเฮดทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีความผิดพลาดมาก

5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของพัดลมและเฮดสูญเสียจากการทดลอง



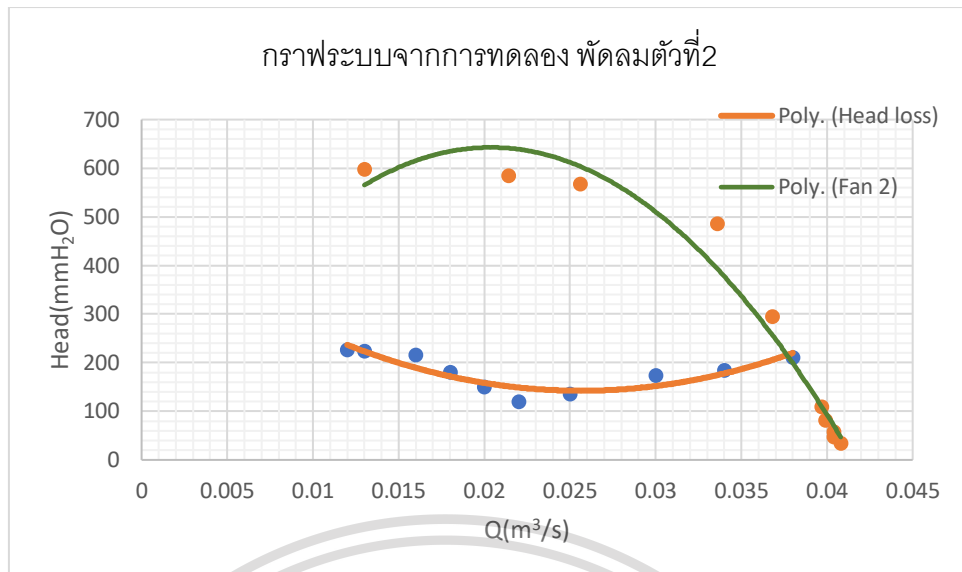
รูปที่ 5.13 กราฟระบบจากการทดลอง พัดลมตัวที่ 1

จากการทดลองสำหรับพัดลมตัวที่ 1 เป็นพัดลมแบบหอยโข่งต่อกับมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ซึ่งเป็นพัดลมขนาดเล็ก สร้างอัตราไหลได้มาก แต่สร้างแรงดันได้น้อย จากการทดลองพบว่ากราฟเฮดระบบการขนส่งอาหารเม็ดไม่สามารถขนส่งอาหารเม็ดได้จากกราฟข้างนี้ จะพบว่ากราฟทั้งสองไม่ตัดกันสรุปได้ว่าพัดลมแบบหอยโข่งขนาดเล็กไม่เหมาะสมกับงานด้านการขนส่งวัสดุด้วยลม หากต้องการใช้พัดลมแบบหอยโข่งจะต้องเป็นพัดลมที่สร้างกำลังลมได้มาก ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

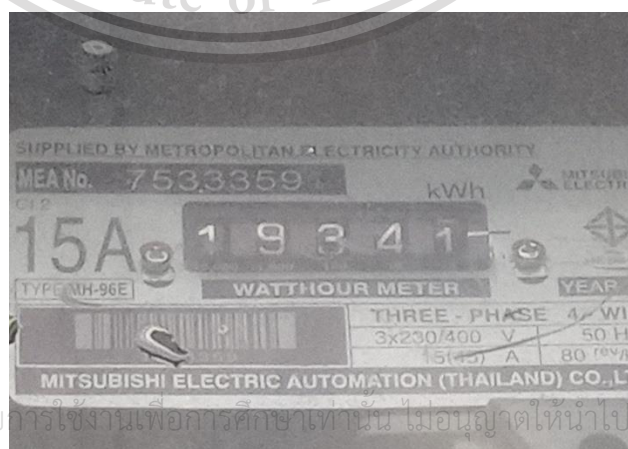
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.14 กราฟระบบจากการทดลอง พัดลมตัวที่ 2

สำหรับการเลือกใช้งานพัดลมที่เหมาะสมคือ จะต้องคำนวณเฮดที่ระบบต้องการ ซึ่งจะได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฮดของระบบและอัตราการไหลของลม การเลือกจุดทำงานที่ต้องการจะต้องนำกราฟเฮดของระบบที่ได้ไปวางซ้อนบนกราฟสมรรถนะของพัดลม ดังรูปที่ 5.14 คือกราฟสมรรถนะพัดลมตัวที่ 2 กับเฮดสูญเสียจากการทดลองได้จุดทำงานที่อัตราการไหลของลม $0.037 \text{ m}^3/\text{s}$ ความเร็วลม 15.1 m/s มีเฮดสูญเสีย $216 \text{ mmH}_2\text{O}$ เป็นการไหลแบบเบาบาง จะเห็นว่าพัดลมตัวนี้มีสมรรถนะที่สามารถใช้ขนส่งอาหารเม็ดตามระยะที่ต้องการได้อย่างสบาย จากจุดทำงานที่ได้นำไปคิดค่าไฟจะได้ดังนี้

เนื่องจากไม่สามารถจัดหาเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter) ในขณะทดลองเนื่องจากสถานการณ์ covid 19 ในการทดลองนี้จึงใช้การสังเกตกำลังไฟฟ้าจากมิเตอร์ของการไฟฟ้า โดยการเฝ้าดูมิเตอร์ในการขนส่งลมเปล่าเพียงอย่างเดียวที่ความเร็ว 15.1 m/s ซึ่งได้ผลดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15 ภาพมิเตอร์การไฟฟ้าที่เวลา 7.13 น.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.16 ภาพมิเตอร์การไฟฟ้าที่เวลา 8.19 น.

จากรูปที่ 5.15 ภาพมิเตอร์การไฟฟ้าตอนเริ่มวัดที่เวลา 7.13 น. จากรูปที่ 5.16 ภาพมิเตอร์การไฟฟ้าวัดที่เวลา 8.19 น. ปรับความเร็วลม 15.1 m/s สรุปล้างกำลังไฟไป 1.1 kWh

5.5 การออกแบบเครื่องส่งอาหารเม็ดด้วยลม

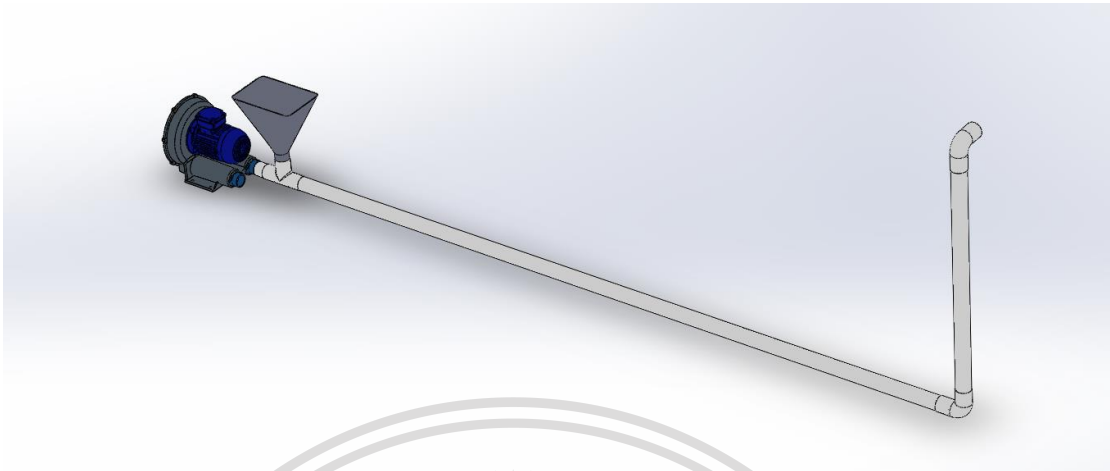
เนื่องจากปริมาณพอร์ชี่นี้ได้ทำการทดลองเพียงท่อที่มีขนาด 2 นิ้ว และอัตราการส่งที่ 200 kg/h ไม่สามารถเปลี่ยนตัวแปรต้นเรานี้ในชุดทดลองได้ทันก่อนโควิด 19 มาถึงเช่นเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เปลี่ยนขนาดเม็ดอาหาร เปลี่ยนอัตราการไหลของอาหารเม็ด ทำให้ข้อมูลที่น่าไปใช้มีจำกัด จึงได้ออกแบบและทดลองสร้างเครื่องส่งอาหารเม็ด โดยใช้พัดลมตัวที่ 2 มีกำลังขนาด 1.5 แรงม้า ส่งลมผ่านท่อตรง มีเฮดสูญเสีย 216 mmH₂O และอัตราการส่งที่ 200 kg/h จ่ายอาหารเม็ดด้วยตัวจ่ายแบบคอคอดที่ได้ออกแบบในบทที่ 3 เป็นระยะทางรวม 3 เมตร เนื่องจากสถานการณ์โควิดทำให้ไม่มีเครื่องมือและอาหารเม็ดในการทดสอบกำลังไฟที่ใช้ในการขนส่งอาหารเม็ด จึงทดสอบโดยการสังเกตจากมิเตอร์ไฟฟ้าที่เครื่องทำงานโดยการขนส่งลมปล่าวที่ความเร็วลม 15.1 m/s ได้กำลังไฟ 1.1 kWh



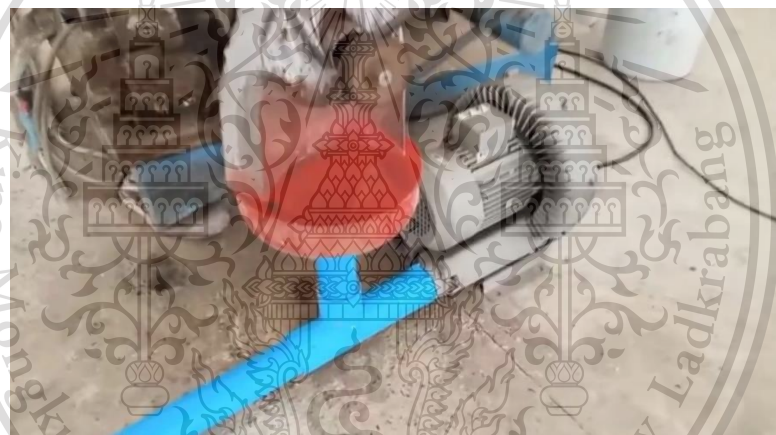
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ซึ่งจะมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.17 การออกแบบระบบขนส่งทางลม



รูปที่ 5.18 ระบบขนส่งทางลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 6

บทวิจารณ์และสรุปการวิจัย

6.1 สรุปผลและการดำเนินงาน

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งใจไว้ทุกประการ ซึ่งมีข้อสรุปดังนี้

1. ออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลม (f) และวัสดุ (λ_s) ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมและอาหารเม็ดที่ไหลในท่อร่วมกันหรือการไหลแบบ 2 เฟส จากการศึกษาวิธีการทดสอบสมรรถนะพัดลมและการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ลงมือทำชุดทดลองได้สำเร็จและนำสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีซึ่งเป็นที่น่าพอใจ แต่สำหรับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุมีความแตกต่างกันมาก

2. ประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมและอาหารเม็ดที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการคำนวณและการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของลมมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี 15.05 % แต่ที่น่าสนใจคือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุมีความแตกต่างกันมากถึง 100 เท่า สาเหตุที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอาหารเม็ดมีความคลาดเคลื่อนมากเนื่อง 1) จากสมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นสมการที่มาจาก การทดลองของเม็ดพลาสติกที่มีความหนืดและความชื้นน้อยกว่าอาหารเม็ด 2) แคมเปอร์ที่ทำหน้าที่ในการปรับอัตราไหลของลมเป็นตัวกักขวางการไหลของอาหารเม็ดอาจส่งผลทำให้เกิดเฮดสูญเสียจำนวนมากขึ้น โดยไม่ได้นำไปประเมินในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุ 3) รูปร่างลักษณะเม็ดอาหารปลาที่ไม่เป็นทรงกลมตามรูปที่ 3.9 ไม่เหมือนกับเม็ดพลาสติกตามรูปที่ 2.14 การทดลองนี้ สมมุติให้อาหารปลาเป็นทรงกลมอาจจะส่งผลกระทบต่อเฮดที่ได้ 4) ในความเป็นจริงการขนส่งด้วยลม ความหนาแน่นของอากาศจะไม่คงที่แต่ในการทดลองนี้ได้สมมุติให้ความหนาแน่นของอากาศคงที่ อาจจะส่งผลต่อเฮดที่เกิดขึ้น

3. ออกแบบและสร้างระบบขนส่งอาหารเม็ดด้วยลมที่ใช้งานในอุตสาหกรรมได้จริง จุดประสงค์ข้อสุดท้ายคือออกแบบระบบขนส่งด้วยลมที่ใช้ได้จริงที่ได้แสดงภาพแล้วตามบทที่ 5 โดยใช้พัดลมตัวที่ 2 ขนาด 1.5 แรงม้า ส่งลมผ่านท่อที่มีขนาด 2 นิ้ว ความเร็วลม 15.1 m/s มีเฮดสูญเสีย 216 mmH₂O และอัตราขนส่งที่ 200 kg/h จ่ายอาหารเม็ดด้วยตัวจ่ายแบบคอคอดที่ได้ออกแบบในบทที่ 3 เป็นระยะทางรวม 3 เมตร s เนื่องจากสถานการณ์โควิดทำให้ไม่มีเครื่องมือและอาหารเม็ดในการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขนส่งอาหารเม็ด จึงทดสอบโดยการสังเกตจากมิเตอร์ไฟฟ้าที่เครื่อง

เอกสารนี้เป็นงานโดยการขนส่งลมปลาวัดที่ความเร็วลม 15.1 m/s ได้กำลังไฟ 1.1 kWh นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานควรจะมีหลากหลายของชนิดของท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และเปลี่ยนอัตราการไหลของอาหารเม็ด รวมถึงความผิดพลาดที่เกิดจากข้อต่อที่ไม่ได้นำไปคิดในสมการเฮตซูญ เช่น แดมเปอร์ลดอัตราการไหล

2. การออกแบบระบบขนส่งด้วยลมควรมีความโค้งงอของข้อต่อที่มากกว่านี้ เพื่อลดเฮตที่ข้อต่อที่เป็นเฮตสูญเสียที่มากที่สุด

3. เพิ่มการทดลองหาค่า K ที่ข้อต่อแบบต่างๆ เช่น ข้อต่อตัวที ข้อต่อ 45 องศา ข้อต่อ 60 องศา และข้อต่อ 90 องศา

4. การทดลองควรให้อัตราการไหลของวัสดุเปลี่ยนแทนการเปลี่ยนอัตราการไหลของลม เพราะจะควบคุมได้ง่ายกว่า เนื่องจากการควบคุมอัตราการไหลของวัสดุเป็นการควบคุมจากภายนอกท่อ ไม่จำเป็นต้องใส่แดมเปอร์เพื่อหิวาร์วในท่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

- [1] ชนน สุสังกรณกาญจน์, วรรณพงศ์ ชุนโต และ ศุภกฤต สนธิศิริกฤต. (2560). **การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้เสียงเชื่อมเปลืองก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้**. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] บริษัท เอ็มแอนด์จี จำกัด. (2546). **ขนถ่ายวัสดุ ชุดที่ 2**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : นำอักษรการพิมพ์.
- [3] ปานมนัส ศิริสมบุญ. (2540). **วิศวกรรมการขนถ่ายวัสดุ (เล่ม 1)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. [ม.ป.ท.: ม.ป.พ.].
- [4] ปานมนัส ศิริสมบุญ. (2540). **วิศวกรรมการขนถ่ายวัสดุ (เล่ม 2)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. [ม.ป.ท.: ม.ป.พ.].
- [5] ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ใจกุศล. ความรู้เบื้องต้นระบบพัดลม. ใน สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. **เอกสาร Fluid Machinery ชุด 2 หน่วยที่ 4**. (หน้า 145-152). กรุงเทพฯ: สาขาวิชา.
- [6] พรชัย จงจิตรไพศาล (2548). **การขนส่งวัสดุด้วยลม**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [7] รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร. (2553). **กลศาสตร์ของไหล**. กรุงเทพฯ: วิทย์พัฒนา.
- [8] Bruce R. Munson, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebgsch & Alric P. Rothmayer (2013). **Fluid Mechanics**. 7th edition. Singapore: John Wiley & Sons.
- [9] G.E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus & L.S. Leung. (2009). **Pneumatic Conveying of Solids**. 3rd edition. London New York: Springer Science+Business Media.
- [10] The Executive Director Office [EDO]. (1999). **AMCA 210: Laboratory Methods of Testing Fans for Ratings**. Washington D.C.: EDO.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.