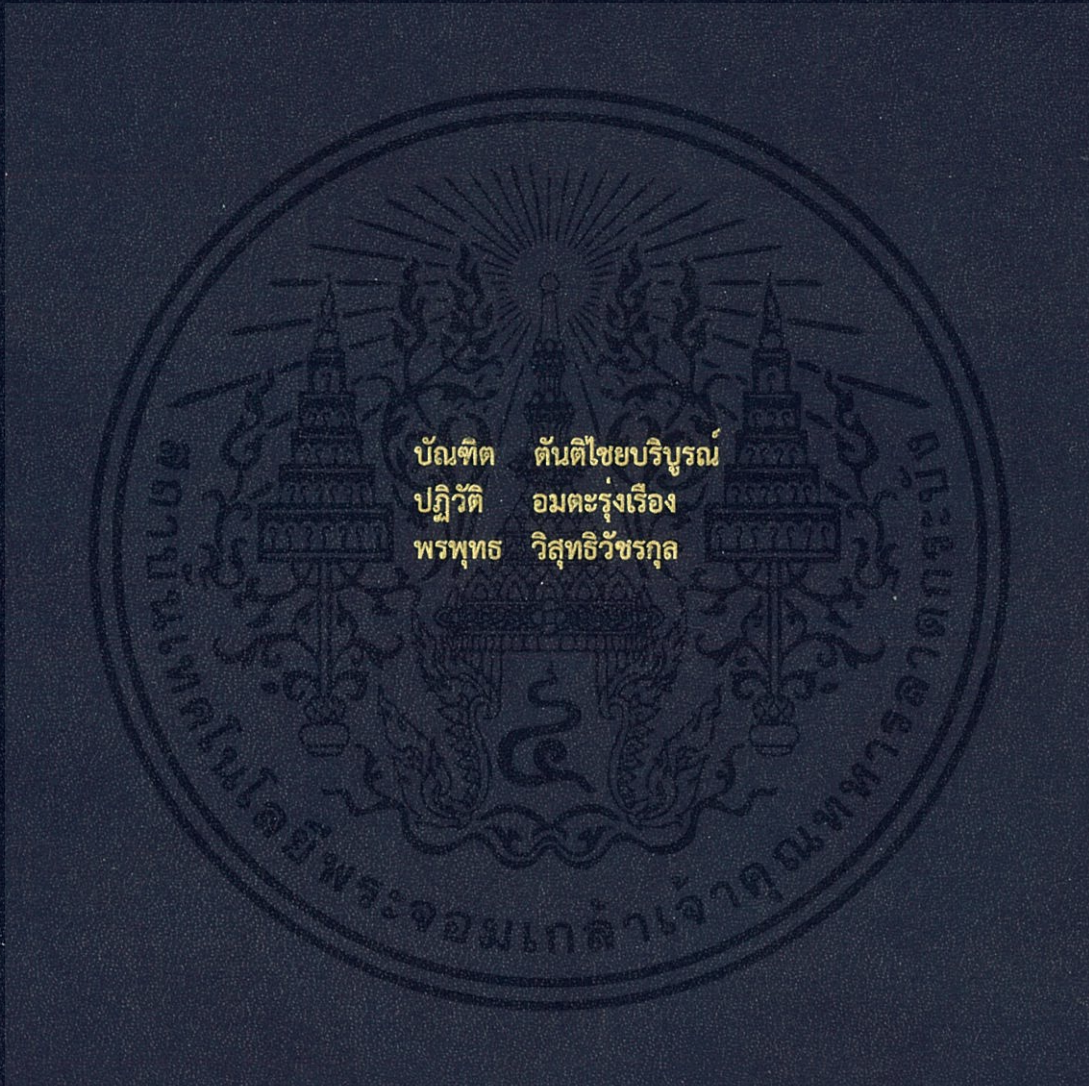


การพัฒนาระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล

DEVELOPING FUEL HANDLING SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล

DEVELOPING FUEL HANDLING SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPING FUEL HANDLING SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล

DEVELOPING FUEL HANDLING SYSTEM

ผู้จัดทำ

1. นายบัณฑิต ต้นโตไชยบริบูรณ์ รหัสประจำตัว 56010691
2. นายปฏิวัติ อมตะรุ่งเรือง รหัสประจำตัว 56010710
3. นางสาวพรพุทธ วิสุทธิวิชกรกุล รหัสประจำตัว 56010807

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จากรวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล

นายบัณฑิต	ตันติไชยบริบูรณ์	56010691
นายปฏิวัติ	อมตะรุ่งเรือง	56010710
นางสาวพรพุท	วิสุทธิวัชรกุล	56010807
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559		

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น ให้สามารถบดและจ่ายเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาขนาด 1 เมกกะวัตต์หรือจ่ายเชื้อเพลิงได้ในอัตรา 0.063 กิโลกรัมต่อวินาที โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษาคือไม้ยางพาราอัดเม็ด โดยใช้เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยงบดเชื้อเพลิง แล้วจึงขนส่งด้วยลมเข้าสู่ฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงผง ซึ่งจากระบบเดิมได้มีการติดตั้งเครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรองอยู่ด้านบนฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงผงและใช้ลมจากพัดลมระบบสุญญากาศขนส่งจากการใช้งานจริงพบว่าไม่สามารถขนส่งเชื้อเพลิงได้ตามอัตราที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับปรุงโดยการใช้พัดลมระบบแรงดันขนาด 1.5 กิโลวัตต์เข้ามาติดตั้งระหว่างเครื่องบดและฮอปเปอร์และได้นำไซโคลนแบบ Stairmand ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตรจำนวนสองตัวเข้ามาติดตั้งเพื่อทำการแยกอากาศออกจากเชื้อเพลิง และติดตั้งเครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 เมตรจำนวน 2 ถุงเพื่อกรองเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่ติดมากับอากาศที่ออกมาจากไซโคลน จากการทดลองหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจะส่งผลให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานลดลง โดยในอัตราการบดสูงสุด 0.059 กิโลกรัมต่อวินาทีของเครื่องบด จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดที่ 340 กิโลจูลต่อกิโลกรัม โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้น $SC = 94.394 X^{-0.447}$ ซึ่งเป็นสมการหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Consumption) ในช่วงอัตราการบดตั้งแต่ 0.021 กิโลกรัมต่อวินาทีถึง 0.059 กิโลกรัมต่อวินาที นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถใช้สมการคำนวณความเร็วลมของ Schade มาคำนวณหาความเร็วลมที่ต่ำที่สุดที่ควรใช้ได้จริงอีก การพัฒนาระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิงนี้จึงส่งผลให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อส่งเข้าเตาเผาขนาด 1 เมกกะวัตต์ตามข้อกำหนด

DEVELOPING FUEL HANDLING SYSTEM

Bundit	Tuntichaiboriboon	56010691
Patiwat	Amatarungrueng	56010710
Pornput	Wisuttiwatcarakul	56010807
Assoc.Prof.Dr.Jaruwat	Charoensuk	Advisor

Year 2559

Abstract

This project aims to develop pulverizing and feeding system for biomass for being able to pulverize and transport fuel at 1 Mega-watt thermal rate which corresponds to of 0.063 kilograms per second. The biomass fuel, wood pellets from rubber tree, will be pulverized by hammer mills to required size, then transported by pneumatic conveyor system to store in a dust fuel hopper. From the old system, bag filter was installed above the hopper to separate dust fuel and used air from the ID fan. In order to transport fuel at the required rate. Source of air supply has been improved by installing 1.5 kw fan between the grinder and the hopper. Moreover, two unit of 0.2 meter-diameter Stairmand Cyclones were installed to separate air from fuel and two units of 0.4 meter-diameter fabric filter were installed next to the cyclone unit to separate very small particle that still remain with air. From the experiment of the specific consumption of hammer mills, it was found that when increasing mass flowrate, the specific consumption was decreased by relationship specific consumption equation $SC = 94.394 X^{-0.447}$ kilo-Joule per kilo-gram by hammer mills at maximum rate of 0.059 Kilogram per second. It is also found that Schade's equation can be used to calculate the lowest possible air speed. The development of pulverizing and feeding system enable the system to work continuously for at 1 mega-watts according to system requirement

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ก็เพราะความกรุณาที่ให้ความช่วยเหลือของ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้และเป็นที่ปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์ และ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาโท ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม และช่วยให้ความรู้ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ นายพีรพัฒน์ เทพลิบ, นางสาวสิริธิดา สุขทั่ว, นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน, นายพงศนันท์ แก่นพรม และ นายนันทพล จันคง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้ ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอกราบขอบพระคุณ คณะอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนอย่างสุกความสามารถ

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

บัณฑิต ตันติไชยบริบูรณ์
ปฐวีดี อมตะรุ่งเรือง
พรพุท วิสุทธิวัชรกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 เหตุผลและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2.1 กระบวนการบดย่อยวัสดุ.....	5
2.2.2 สกรูขนถ่ายวัสดุ.....	5
2.2.3. ไฮโล.....	7
2.2.4 อุปกรณ์การขนส่งต่อเนื่องระบบลม.....	8
2.2.4.1 ชนิดของอุปกรณ์.....	9
2.2.5 การขนถ่ายวัสดุด้วยลม.....	10
2.2.5.1 ส่วนประกอบของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม.....	12
2.2.5.2 การแบ่งชนิดของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม.....	13
2.2.6 ความเร็วลมในการขนถ่ายวัสดุตามแนวตั้งและแนวระดับ.....	15
2.2.6.1 คุณสมบัติการไหลของวัสดุในท่อแนวตั้ง.....	15
2.2.6.2 คุณสมบัติการไหลของวัสดุในท่อแนวระดับ.....	17
2.2.7 การคำนวณความดันสูญเสียจากการไหลในท่อ.....	20
2.2.8 อุปกรณ์แยกวัสดุ/อากาศ.....	22
2.2.8.1. เครื่องคัดแยกอนุภาคแบบไซโคลน.....	22
2.2.8.2 เครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	36
3.1 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิง	36
3.2 การออกแบบสกรูลำเลียงขนส่งเชื้อเพลิง	36
3.3 การออกแบบระบบการบิด	40
3.4 การออกแบบระบบคัดแยกเชื้อเพลิงแบบไซโคลน	42
3.4.1 การออกแบบขนาดและสัดส่วนของไซโคลน	43
3.4.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลน	44
3.4.3 การคำนวณหาความดันตกของไซโคลน	46
3.5 การคำนวณและออกแบบเครื่องดักฝุ่นด้วยถุงกรอง	47
3.5.1 การเลือกใช้ผ้ากรอง	47
3.5.2 การคำนวณและออกแบบผ้ากรอง	47
3.5.3 การคำนวณหาความดันตกของเครื่องดักฝุ่นด้วยถุงกรอง	50
3.6 การคำนวณและออกแบบพัดลม	50
3.6.1 การคำนวณหาความดันตกในท่อ	50
3.6.2 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ของพัดลม	51
3.7 การออกแบบถังพักฮอปเปอร์	52
3.7.1 การคำนวณหาปริมาตรฮอปเปอร์และเวลาในการบรรจุเชื้อเพลิง	54
บทที่ 4 ขั้นตอนการทดลอง	55
4.1 การทดลองเพื่อหาขนาดของเชื้อเพลิง	55
4.2 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลน	55
4.3 การทดลองเพื่อหาความเร็วลมที่เหมาะสมสำหรับป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผา	56
4.4 การทดลองเพื่อหาอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะของเครื่องบิดและพัดลม	56
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	57
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองระบบบิดเชื้อเพลิง	57
5.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบิด	57
5.1.2 วิเคราะห์การทำงานของเครื่องบิด5	8
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองระบบคัดแยกเชื้อเพลิงแบบไซโคลน	58
5.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาความเร็วลมที่เหมาะสมสำหรับป้อน เชื้อเพลิงเข้าเตาเผา	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะของเครื่องบด และพัดลม.....	60
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	62
6.1 สรุปผลการวิจัย	62
6.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก.ตารางบันทึกผลการทดลอง	66
ภาคผนวก ข.รูปแสดงระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล	71



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียจากท่อโค้ง	22
2.2 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ High Efficiency.....	25
2.3 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ General Purpose.....	25
2.4 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง.....	31
3.1 ผลการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ.....	38
3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบด ยีห่อ Beide	41
3.3 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ High Efficiency.....	43
3.4 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ General Purpose.....	43
3.5 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนที่ออกแบบ.....	44
3.6 แสดงสัดส่วนของขนาดเชื้อเพลิงในช่วงต่างๆ	45
3.7 แสดงอัตราส่วนขนาดตัดและประสิทธิภาพในแต่ละช่วง.....	46
3.8 แสดงความยาวเทียบเท่าของอุปกรณ์.....	50

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะของสกรูขนถ่ายวัสดุ	6
2.2 แสดงลักษณะรูปแบบของไซโคล	7
2.3 แสดงลักษณะรูปแบบการไหลในฮอปเปอร์.....	7
2.4 แสดงลักษณะเกิดการกองเชื้อเพลิงภายในฮอปเปอร์.....	8
2.5 ลักษณะการไหลของวัสดุในท่อในรูปแบบการขนส่งแบบต่างๆ	14
2.6 แสดงลักษณะไดอะแกรมการไหลในท่อ	15
2.7 แสดงคุณลักษณะการไหลตามแนวตั้งของการขนถ่ายวัสดุด้วยลม	16
2.8 ทางเข้าตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Entry Inlet).....	23
2.9 ไซโคลนทางเข้าตามแนวแกน(Axial Entry Inlet).....	24
2.10 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไซโคลน.....	26
2.11 แสดงลักษณะเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง.....	30
2.12 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง	30
2.13 คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยที่ใช้ทำผ้ากรอง.....	32
3.1 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ	37
3.2 ภาพตัด และทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่าย.....	39
3.3 ลักษณะของสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ทำการออกแบบ	40
3.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องบด.....	41
3.5 แสดงเครื่องบด ยี่ห้อ Beide รุ่น YSDF 65*27.....	42
3.6 แสดงขนาดและสัดส่วนของไซโคลน.....	42
3.7 แสดงลักษณะไซโคลนจากการออกแบบ.....	44
3.8 แสดงชนิดของผ้ากรอง.....	47
3.9 ค่าสูงสุดของความเร็วในการกรองและความเร็วระหว่างถุงกรอง	48
3.10 แสดงลักษณะผ้ากรองบรรจุใน bag house.....	49
3.11 แสดงลักษณะของ Bag house จากการออกแบบ	49
3.12 แสดงลักษณะของพัดลมจากการออกแบบ.....	52
3.13 มุมกองวัสดุ	53
3.14 แสดงขนาดโครงสร้างของถังพักเชื้อเพลิง	53
3.15 แสดงลักษณะฮอปเปอร์จากการออกแบบ	54
5.1 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดของเชื้อเพลิงด้วยวิธีร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน	57
5.2 แสดงอัตราการไหลเชิงมวลภายในท่อเทียบกับความเร็วลม	59

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 แสดงความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้ากับอัตราไหลของเชื้อเพลิง	60
5.4 แสดงความสัมพันธ์อัตราสิ้นเปลืองจำเพาะกับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง	60



บทที่ 1

บทนำ

1.1 เหตุผลและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันพลังงานทางเลือกกำลังได้รับความสนใจเพื่อนำมาแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล อย่างเช่น ถ่านหิน น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานธรรมชาติเหล่านั้นเมื่อถูกใช้แล้วจะหมดไป ต้องใช้ระยะเวลาอันยาวนานกว่าจะถูกผลิตขึ้นมาใหม่โดยกระบวนการธรรมชาติ พลังงานชีวมวลทางเลือก อย่างเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (wood pellets) นั้นมีข้อดีคือ ก่อมลพิษน้อย และมีกำมะถันน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทำมาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และเศษไม้จากทางอุตสาหกรรม ซึ่งมีค่าความชื้นต่ำ มีซีไธนน้อย ให้อัตราการเผาไหม้สม่ำเสมอ สามารถเผาไหม้สมบูรณ์ และให้ความร้อนสูงกว่าพลังงานชีวมวลประเภทอื่น เหมาะแก่การใช้กับเตาเผาสำหรับอุตสาหกรรม เราจึงได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับเครื่องจักรลำเลียงเชื้อเพลิงที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้เพื่อได้พัฒนาและทำให้ระบบขนส่งเชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถนำมาใช้ได้จริงในอนาคต

จากเดิมระบบป้อนเชื้อเพลิงนั้นติดตั้งตัวกรองฝุ่นอยู่ในฮอปเปอร์ และใช้พัดลมดูดอากาศเพื่อขนส่งเชื้อเพลิงทั้งระบบ โดยการพัฒนาและการรักษาระบบป้อนครั้งนี้ คือ สามารถทำให้ระบบป้อนเชื้อเพลิงนั้นมีการกักเก็บเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาได้อย่างต่อเนื่อง และเพียงพอต่อความต้องการ โดยติดตั้ง พัดลมขนส่ง และ ตัวกรองฝุ่นแบบถุงกรองไว้นอกถังบรรจุเชื้อเพลิง เพื่อไม่ให้อุดตันและสามารถกรองฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากไม่ให้ออกสู่บรรยากาศภายนอก ข้อบกพร่องของระบบป้อนเชื้อเพลิงนี้เป็นโครงการทางวิศวกรรมในปีการศึกษาที่ผ่านมา

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ออกแบบและสร้างระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยอัตราการขนถ่าย 0.063 กิโลกรัมต่อวินาที

1.2.2 ทดสอบสมรรถนะระบบคัดแยกเชื้อเพลิง

1.2.3 ทดสอบหาความเร็วในระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหมาะสม

1.2.4 อัตราการไหลเชิงมวลสูงสุดเท่ากับ 0.063 กิโลกรัมต่อวินาที

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

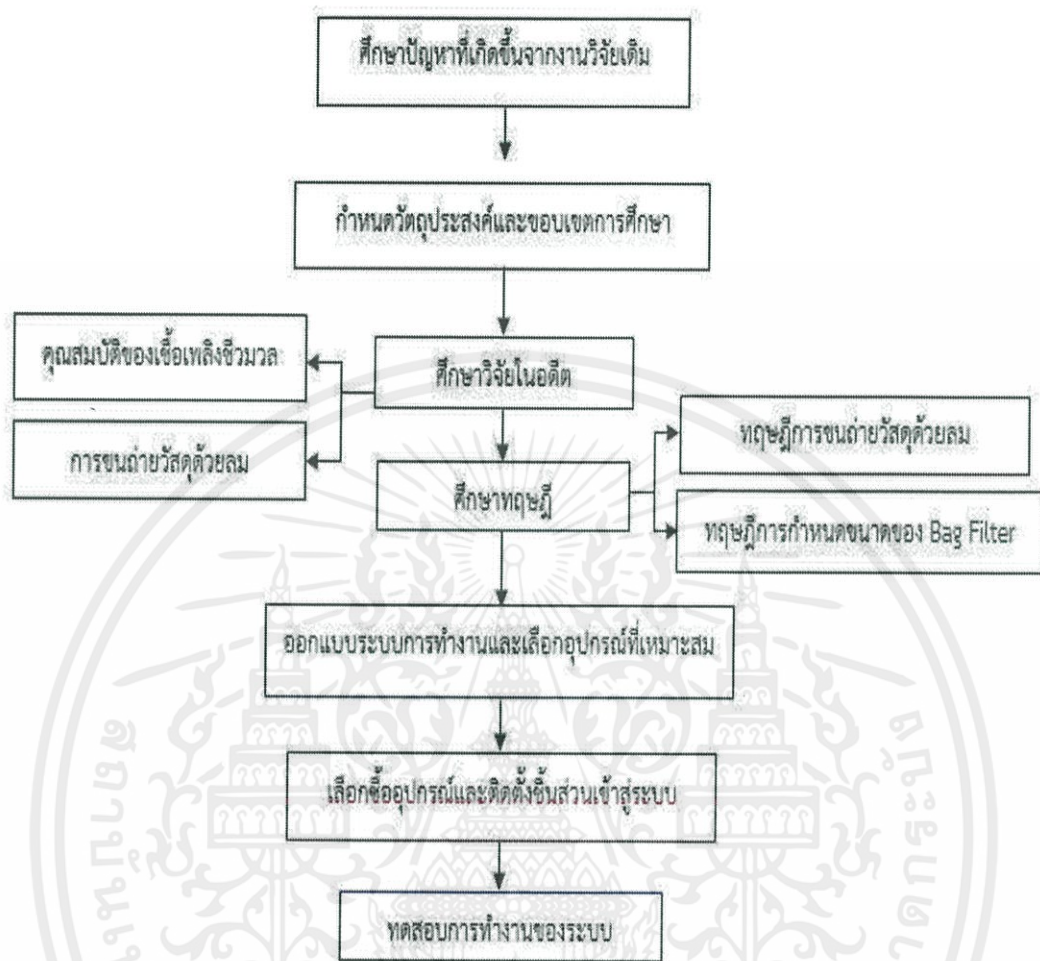
- 1.3.1 ใช้ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมขนถ่ายเชื้อเพลิงผงจากเครื่องบดเข้าสู่ฮอปเปอร์
- 1.3.2 วัสดุที่ใช้คือเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (ไม้ยางพารา)
- 1.3.3 ขนาดเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นมีขนาดไม่เกิน 1000 ไมครอน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถใช้ความรู้และประสบการณ์เพื่อพัฒนาระบบป้อนและบดเชื้อเพลิง
- 1.4.2 สามารถนำระบบป้อนและบดเชื้อเพลิงชนิดฝุ่นไปประยุกต์ใช้งานได้จริง
- 1.4.3 เพิ่มทักษะในการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าในระหว่างปฏิบัติงาน
- 1.4.4 ฝึกฝนทักษะในการวิเคราะห์ระบบเพื่อหาปัญหาของระบบและหาวิธีเพื่อแก้ไข้ปัญหา



1.5 ขั้นตอนของการศึกษา



รูปที่ 1.1 แสดงขั้นตอนของการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

L.M. Gomes และ A. L. Amarante Mesquita (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำนายความเร็วลมสำหรับชุดและขนถ่ายวัสดุในแนวนอนพบว่าในการขนถ่ายวัสดุละเอียด สมการที่ควรใช้คือสมการของ Rizk และสำหรับวัสดุหยาบ (รัศมีเฉลี่ยมากกว่า 200 micron และท่อขนาด 25-200 mm) ควรใช้สมการของ Rizk สมการของ Matsumoto et. al. และ สมการของ Cabrejos and Klingzing ทั้งนี้ควรทำการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณก่อนทุกครั้ง

Dr. L. Svarovsky (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับไซโคลอนพบว่า อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการคัดแยกฝุ่นของไซโคลอนมากกว่าผลของอุณหภูมิและความดัน นอกจากนี้แล้วการลดขนาดไซโคลอนจะทำให้ขนาดคัตไซส์ (Cut size diameter) มีขนาดเล็กลง แต่ในขณะเดียวกันก็จะมีแรงเสียดทานกระทำที่ผิวในของไซโคลอนมากขึ้นด้วยเช่นกัน

Fabio Luis Fassany และ Leonardo Goldstein Jr. (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับไซโคลอนสำหรับแยก ฟลูอิดไดซ์ คาทาไลซ์ แครกกิ่ง (FCC) ออกจากอากาศพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัสดุต่ออากาศแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพการคัดแยกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง จากนั้นค่าประสิทธิภาพการคัดแยกจะค่อยๆลดลง

Yi-Shun Chen และ Shu-San Hsiau (2009) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการก่อตัวของฝุ่นเค้กบนผิวผ้ากรองต่อประสิทธิภาพการจัดเก็บพบว่าเมื่อความหนาของฝุ่นเค้กเพิ่มขึ้น 1 mm ส่งผลให้ประสิทธิภาพการจัดเก็บเพิ่มขึ้น 0.686% ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มขึ้นของฝุ่นเค้กทำให้แรงเฉือนบนผิวเค้กมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาของเค้กลดลงเนื่องจากการลดลงของความเป็นของแข็งของเค้ก (Cake Solidosity) ความต้านทานจำเพาะของเค้ก (Specific Cake Resistance) และส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการจัดเก็บ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อเพิ่มความเร็วผิว (Filtration Superficial Velocity) จะทำให้ความเป็นของแข็งของเค้ก (Cake Solidosity) และความต้านทานจำเพาะของเค้ก (Specific Cake Resistance) เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วผิวเพิ่มขึ้นจะทำให้ฝุ่นเค้กเกาะตัวกันแน่นขึ้น กล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือความหนาและความเร็วผิวจะส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการจัดเก็บ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. กระบวนการบดย่อยวัสดุ

กระบวนการบดย่อยวัสดุ เป็นการลดขนาดให้ของแข็งมีขนาดเล็กลงทำได้ด้วยหลายวิธีการ เพราะวัสดุแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน การบดย่อยอาจแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ การย่อย (grinding) และการบด (milling) การย่อยและบดวัสดุก้อนใหญ่ให้แตกออกเป็นชิ้นนั้น ใช้แรง กด บีบ กระแทก และ แรงเสียดสี จนมีขนาดเล็ก

ประเภทของแรงที่ใช้ในการการลดขนาดวัสดุ

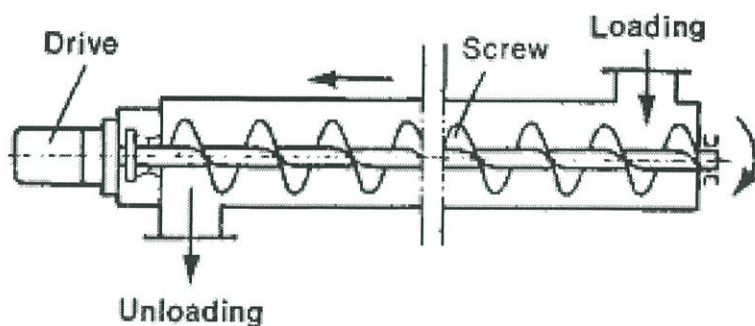
- 1) แรงอัด เป็นการใช้เพื่อลดขนาดของวัสดุแข็ง
- 2) แรงกระแทก เป็นการตี การตัดเพื่อให้วัสดุแยกออกจากกัน มีทั้งแบบละเอียด และหยาบ
- 3) แรงเฉือน ใช้ลดขนาดของวัสดุที่ผ่านการบดมาแล้ว โดยใช้แรงเสียดสีย่อยขนาดอีกครั้ง

เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง

เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer Mill) นั้นเป็นการใช้แรงกระแทก ในการย่อยวัสดุ วัสดุจะถูกกระแทกไปเรื่อยๆจนกว่าวัสดุจะมีขนาดเล็กกว่าตะแกรงแล้วถูกกระแทกออกมาจากห้องบด เราสามารถกำหนดขนาดตะแกรงให้เหมาะสมกับ ความสามารถเครื่องบด และ ขนาดของวัสดุที่ต้องการนำไปใช้ต่อ แต่ถ้าหากใช้ตะแกรงที่ไม่เหมาะสมกับเครื่องบด เช่นรูตะแกรงเล็กเกินไป เครื่องจะไม่มีที่ระบายลมทำให้ตะแกรงจะถูกอัดจนเสียหาย และเกิดการรั่วได้ หรือใช้ตะแกรงรูใหญ่เกินไปขนาดของวัสดุก็จะไม่สามารถนำไปใช้ต่อได้

2.2.2. สกรูขนถ่ายวัสดุ

สกรูขนถ่ายวัสดุ (Screw conveying) เป็นอุปกรณ์ขนถ่ายที่ใช้มาอย่างยาวนาน ใช้สำหรับขนถ่ายวัสดุโดยเมื่อก่อนใช้ถ่ายของเหลว และสิ่งปฏิกูล สกรูประกอบไปด้วย รางสกรู และใบเกลียว สิ่งสำคัญในการขนถ่ายของ สกรูคือมุมเอียงของสกรู ข้อดีของสกรูคือ ค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ขนถ่ายชนิดอื่น, ลักษณะการขนถ่ายเป็นการขนถ่ายแบบปิด ไม่มีสิ่งเจือปน, สร้างและประกอบไม่ยุ่งยาก และ สามารถใช้ขนถ่ายวัสดุได้หลายประเภท แต่ข้อเสียของสกรูคือ ไม่เหมาะกับการขนถ่ายวัสดุขนาดใหญ่ หรือเป็นเส้นใย หรือวัสดุเหนียว, ระยะทางขนถ่ายจำกัด และมีข้อจำกัดเรื่องประสิทธิภาพในมุมเอียงและมุมตั้ง



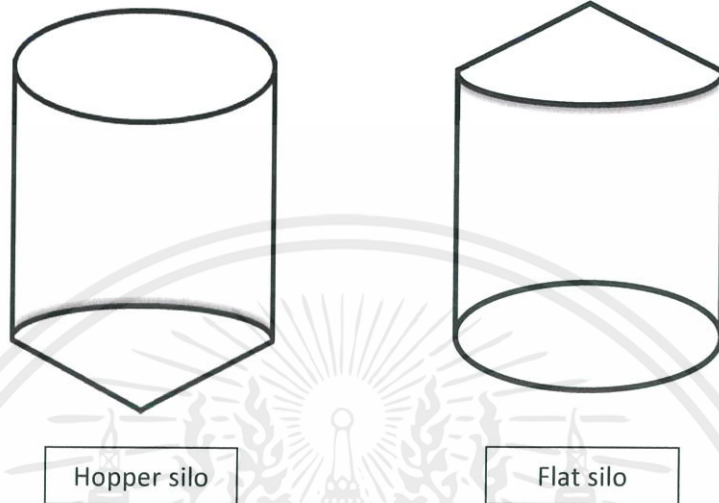
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของสกรูขนถ่ายวัสดุ [3]

หลักการใช้งานของสกรู คือเหมาะสำหรับขนถ่ายวัสดุที่สามารถไหลได้ดี คุณสมบัติของวัสดุขนถ่ายนั้นเป็นสิ่งสำคัญ เพราะสกรูลำเลียงที่ติดตั้งอยู่ที่เพลลาที่ผลัดต้นวัสดุไปตามส่วนล่างของราง การหมุนของใบเกลียวจะทำให้เกิดการยกวัสดุขึ้นของวัสดุ ทำให้วัสดุเลื่อนไหลไปข้างหน้าได้และการหมุนของใบเกลียวจะทำงานเสมือนลิ้นที่ทำหน้าที่ผลัดต้น และตัดเฉือนวัสดุจากการหมุนของใบเกลียว ทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างต่อเนื่อง

อัตราการขนถ่ายวัสดุขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุขนถ่ายหรือมวล อาจมีหน่วยเป็นตันต่อชั่วโมง หรือ กิโลกรัมต่อวินาที หรือ อาจจะเป็นวัน หรือ ชั่วโมงเลยก็ได้ นอกจากนี้ขณะการเคลื่อนตัวของวัสดุที่กำลังขนถ่ายนั้น อาจจะมีอากาศเข้าไปผสมด้วยทำให้ความหนาแน่นตอนขนถ่ายของวัสดุลดลง ดังนั้นการกำหนดความหนาแน่นสูงสุดของการขนถ่ายนั้นควรกำหนดที่ขณะวัสดุกำลังขนถ่าย และเวลาที่ขนถ่ายอาจมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่ทำให้อัตราการขนถ่ายไม่คงที่

2.2.3. ไชโล

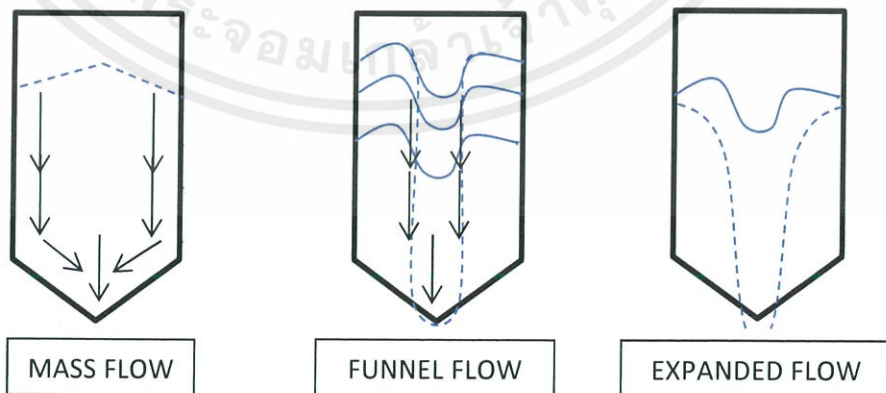
ไชโล ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน หมายความว่า สิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ ทำด้วยวัสดุที่แข็งแรงทนทาน ภายในมีระบบกันความชื้นและระบายอากาศเป็นต้น สำหรับเก็บผลิตผลทางเกษตรไว้ชั่วคราว ไชโล มี 2 แบบคือไชโลแบบกรวย (hopper silo) และไชโลแบบก้นเรียบ (flat silo)



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะรูปแบบของไชโล [3]

ฮอปเปอร์ หรือ ไชโลแบบกรวย ในอุตสาหกรรมนั้นสำหรับกักเก็บรักษาวัสดุผง ฮอปเปอร์ ต้องมีการออกแบบที่ง่ายต่อการใส่วัสดุผง และกรวยนั้นต้องออกแบบให้ง่ายต่อการถ่ายวัสดุผง ฮอปเปอร์ที่ออกแบบมานั้นจะส่งผลต่ออัตราการไหลและวัสดุผงที่ถูกกักเก็บไว้ การออกแบบฮอปเปอร์ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของ ฮอปเปอร์

รูปแบบการไหลในกรวยของฮอปเปอร์ มีสองประเภทหลักที่แตกต่างกัน คือ การไหลเชิงมวล (Mass Flow) และการไหลแบบกรวย (Funnel flow) และรูปแบบพิเศษที่รวมกันทั้งสองแบบคือ การไหลแบบแผ่ขยาย (Expanded flow) คือช่วงบนนั้นไหลแบบกรวย และช่วงล่างไหลแบบมวล



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะรูปแบบการไหลในฮอปเปอร์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

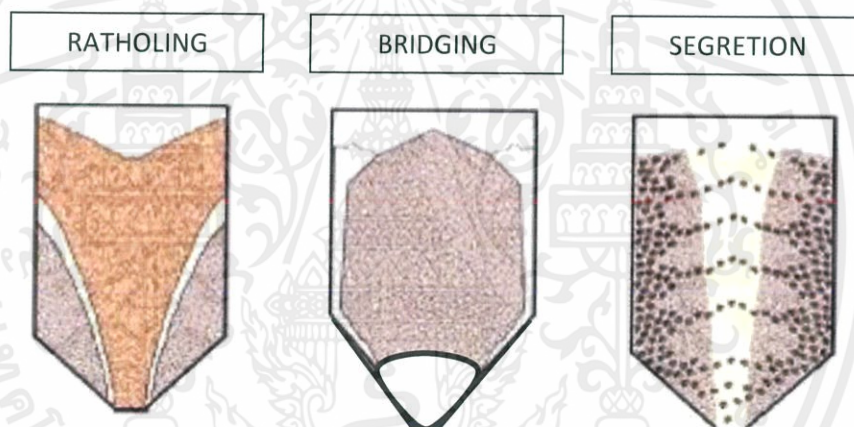
ลักษณะของฮอปเปอร์นั้นสามารถออกแบบได้หลายแบบตามลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้งานไม่จำเป็นต้องมีรูปแบบที่เหมือนกับรูปข้างต้น และแต่ละแบบก็จะมีลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน ปัญหาการออกแบบฮอปเปอร์

ปัญหาการออกแบบฮอปเปอร์นั้นปกติแล้วจะมีสองประเภทคือ ปล่อยวัสดุได้ไม่พอกจากไซโล และ วัสดุแบ่งแยกกันระหว่างการไหล เป็นปัญหาที่เราต้องแก้ไขหรือหลีกเลี่ยง มีลักษณะดังนี้

1) RATHOLING มีลักษณะเหมือนโพรงหนู เมื่อเราปล่อยเชื้อเพลิงลงมาจกไซโล กลับเกิดลักษณะเป็นโพรงและเชื้อเพลิงที่ไหลลงจะกดทับเชื้อเพลิงที่ติดอยู่ด้านข้าง ทำให้เกิดการอัดสะสมทำให้ขนถ่ายไม่สะดวก

2) BRIDGING คือไซโลมีการขนถ่ายเข้าไปทำให้เชื้อเพลิงที่มีความเหนียวนั้นเกิดการสะสมกดทับกันบริเวณทางออกมีลักษณะโค้ง คล้ายสะพาน ทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถไหลลงมาได้

3) SEGREGATION คือการที่เชื้อเพลิงไม่เหนียวพอที่จะเกาะตัวเป็นโดมได้ ทำให้อากาศแทรกเข้ามาเล็กน้อย ทำให้การไหลเป็นไปได้ช้าลงและเชื้อเพลิงไหลเป็นช่วงๆไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะเกิดการกองเชื้อเพลิงภายในฮอปเปอร์ [7]

การแก้ปัญหาการไหล

การแก้ปัญหาการไหล การออกแบบรูปทรงให้มุมห้กลาดเทจะช่วยแก้ปัญหาการขนถ่ายวัสดุผงจากไซโลให้มีประสิทธิภาพ ลดปัญหา RATHOLING การเพิ่มอุปกรณ์ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน เครื่องเคาะ เครื่องเขย่า หรือ แรงลมเพื่อสลายการเกาะตัวของเชื้อเพลิงผง การติดตั้งอุปกรณ์หมุนวน หรือขยับขึ้นลง ทำเชื้อเพลิงผงที่เกาะตัวกันนั้น แตกตัวและเคลื่อนที่ลงได้

2.2.4. อุปกรณ์การสั่นสะเทือนแบบลม

อุปกรณ์การสั่นสะเทือนแบบลมเป็นอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดการสั่นในตำแหน่งที่ติดตั้งโดยใช้ลมมีลักษณะเดียวกับระบบนิวแมติก

ข้อดีของอุปกรณ์สั่นระบบลม

- 1) มีประสิทธิภาพสูง แรงที่ได้เทียบกับพลังงานที่ใส่เข้าไป
- 2) โครงสร้างเป็นอะลูมิเนียมทำทำความสะอาดได้ง่าย ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี
- 3) ใช้ลมน้อย แรงสั่น และความถี่ สามารถปรับได้จากแรงลมที่ป้อนเข้าไป
- 4) โครงสร้างแข็งแรง การบำรุงรักษาต่ำ
- 5) มีรุ่นให้เลือกมาก
- 6) ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ รองรับ ATEX STANDARD ใช้ได้กับพื้นที่เฉพาะ

2.2.4.1 ชนิดของอุปกรณ์สั่นสะเทือน

ROTARY TYPE – การสั่นจากการหมุนที่มีแรงหนีศูนย์กลางไม่สมดุล

- 1) PNEUMATIC BALL VIBRATOR เป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงสั่นสะเทือนจากการหมุนวนของลูกบอลเหล็กทรงกลม แรงที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 13-405 kgs ที่ความถี่ 25500-10000 VPM
 - 2) PNEUMATIC ROLLER VIBRATOR เป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงสั่นสะเทือนจากการหมุนเหวี่ยงของลูกเหล็กทรงกระบอก แรงที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 107-1250 kgs ที่ความถี่ 25000-12500 VPM
 - 3) PNEUMATIC TURBINE VIBRATOR เป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงสั่นสะเทือนจากการหมุนของเฟืองเทอร์ไบน์ที่มีน้ำหนักไม่สมดุล แรงที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 13-1200 kgs ที่ความถี่ 14000-6300 VPM
- LINEAR TYPE – การสั่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกสูบ

- 1) PNEUMATIC PISTON VIBRATOR เป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกสูบแรงที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 3-100 kgs ที่ความถี่ 2400-9300 VPM
- 2) PNEUMATIC PISTON VIBRATOR (Heavy duty) เป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกสูบ เช่นเดียวกับรุ่น FP แต่แรงจะได้อีกมากกว่าถือว่าเป็นรุ่น HEAVY DUTY แรงที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 27-200 kgs ที่ความถี่ 2500-6000VPM

DIRECT IMPACT TYPE – เป็นแรงกระทำที่เกิดจากลูกสูบกระแทกโดยตรงที่ผนัง

- 1) PNEUMATIC KNOCKER หรือ AIR KNOCKER เป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงกระแทก โดยตรงกับผนังไซโลแต่ไม่ทำให้ผนังเสียหาย แรงที่ได้ มีขนาดตั้งแต่ 7-415 Nm/ครั้ง SK 30, 40, 60, 80, 100

การเลือกรุ่นอุปกรณ์สั่นสะเทือน VIBRATOR TYPE SELECTION

อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม PNEUMATIC VIBRATOR เหมาะกับงานเบาจนถึงงานปานกลาง อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบไฟฟ้า MOTOR VIBRATOR เหมาะกับงานเบาจนถึงงานหนักมาก การเลือกรุ่นอุปกรณ์สั่นสะเทือนมีปัจจัยที่ต้องทราบซึ่งใช้ได้กับทั้งอุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม PNEUMATIC VIBRATOR และอุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบไฟฟ้า ELECTRIC VIBRATOR (MOTOR VIBRATOR) จุดประสงค์ของการสั่นหรือเขย่า เพื่อต้องการให้เคลื่อนที่หรือไหลออกจากปากถังไซโล หรือเพื่อการร่อนหรือคัดแยกมีดังนี้

- 1) น้ำหนักของของที่ต้องการสิ้นเชิง
- 2) ขนาดของของ เช่น ทราหยาบละเอียด หินก้อนเล็กใหญ่ ดิน แป้ง
- 3) ความชื้น
- 4) ความหนาและพื้นที่ของผนังภาชนะ
- 5) สภาวะแวดล้อม
- 6) ข้อห้ามเรื่องการเกิดประกายไฟ

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ใช้ในการเลือกรุ่นอุปกรณ์สิ้นเชิงนี้เป็นเพียงแนวทางเพื่อให้เข้าถึงรุ่นที่น่าจะเหมาะสมเท่านั้น ลักษณะการวางการติดตั้งและลักษณะเฉพาะตัวของของที่จะทำการสิ้นเชิงก็มีส่วนสำคัญไม่น้อย

2.2.5. การขนถ่ายวัสดุด้วยลม

การขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นเป็นการนำลมเข้ามาใช้สำหรับขนส่งวัสดุในปริมาณมากๆ โดยเริ่มแรกนั้นจะใช้เป็นระบบลมสุญญากาศก่อน จากนั้นจึงมีการนำระบบลมความดันมาใช้ สำหรับระบบขนส่งวัสดุด้วยลมนั้นมีหลักการทำงานที่ง่ายและเหมาะกับการขนถ่ายวัสดุปริมาณมวล (Bulk Materials) มีใช้งานทั้งในอุตสาหกรรมการผลิต เกษตร และ เคมี ในบางกรณีอาจมีการนำก๊าซอื่น เช่น ก๊าซไนโตรเจน หรือ คาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ แทนลม สำหรับวัสดุที่อาจทำปฏิกิริยากับอากาศ สำหรับระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นจะมีข้อดีข้อเสีย ดังนี้

ข้อดี

- 1) การปฏิบัติงานนั้นมีความปลอดภัย ผู้ปฏิบัติงานจะได้รับอันตรายจากฝุ่นน้อยกว่า
- 2) วัสดุจะอยู่ในท่อที่มิดชิด ส่งผลให้บริเวณทำงานปลอดภัยมากขึ้น รวมถึงลดเสียงดังจาก

การขนถ่ายวัสดุด้วย

- 3) ประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับภาชนะบรรจุ เช่น กระสอบ เป็นต้น
- 4) ประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับแรงงาน
- 5) ลดการสูญเสียวัสดุจากการรั่วของภาชนะบรรจุ
- 6) บำรุงรักษาและควบคุมได้ง่าย
- 7) ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
- 8) ปรับเปลี่ยนทิศทางของการขนส่งได้ง่าย

ข้อเสีย

- 1) ใช้กำลังงานในการขนส่งสูง
- 2) เกิดการสึกหรอของท่อขนถ่ายได้ง่ายเมื่อขนถ่ายวัสดุที่มีความคม
- 3) การวางท่อวัสดุที่ผิดอาจทำให้วัสดุแตกหักเสียหายได้
- 4) ระยะทางในการขนถ่ายจำกัด

5) ต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญในการออกแบบ ใช้งาน และบำรุงรักษา เนื่องจากธรรมชาติของการขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นซับซ้อน

ชนิดของวัสดุที่สามารถขนถ่ายได้ด้วยระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม

โดยทั่วไประบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นสามารถขนถ่ายวัสดุได้แทบทุกชนิด โดยวัสดุที่มีขนาดโตมากขึ้น หรือมีความหนาแน่นที่มากขึ้น ก็จำเป็นที่จะต้องใช้ความเร็วลมในการขนส่งที่มากขึ้น โดยมีกฎพื้นฐานอยู่ที่ว่า “ท่อสำหรับขนส่งวัสดุนั้นควรมีขนาดอย่างน้อย 3 เท่า ของขนาดโตที่สุดของวัสดุที่ต้องการขนถ่าย เพื่อป้องกันการอุดตันของวัสดุในท่อขนถ่าย”

โดยชนิดของวัสดุ และระบบขนถ่ายที่เหมาะสมนั้นจะแบ่งตาม Geldart Classifier ดังนี้

วัสดุจะถูกแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

วัสดุชนิด A (Aeratable) เป็นวัสดุขนาดเล็กและความหนาแน่นน้อย (น้อยกว่า 1400 kg/m^3) เมื่ออากาศไหลผ่านวัสดุด้วยความเร็วค่าหนึ่งจะแสดงลักษณะที่ไหลได้เหมือนของไหล แต่เมื่อเพิ่มความเร็วลมขึ้นอีกจะเกิดฟองอากาศขึ้น

วัสดุชนิด B (Sandy) เมื่อมีอากาศไหลผ่านวัสดุจะมีลักษณะเหมือนของไหลนั้น ปริมาตรของวัสดุจะขยายตัวขึ้นเล็กน้อย และอาจเกิดฟองอากาศ

วัสดุชนิด C (Cohesive) เป็นวัสดุขนาดเล็กมาก เกาะตัวได้ดีทำให้ยากที่จะไหลได้เหมือนของไหล เมื่อให้อากาศไหลจากวัสดุมากพอจะทำให้เกิดโพรงอากาศตามแนวตั้งแล้ววัสดุอาจยกตัวเป็นชั้น (Square Nose Bubble)

วัสดุชนิด D (Spoutable Powder) เป็นวัสดุขนาดใหญ่มีความหนาแน่นสูง ในขณะที่วัสดุอยู่ในลักษณะไหลได้เหมือนของไหลนั้น วัสดุจะเกิดการไหลวน เรียกว่า Spouting ซึ่งสามารถตรวจสอบว่าวัสดุหนึ่งเป็นวัสดุชนิดใดจากสมการดังต่อไปนี้

วัสดุชนิด A กรณีที่ตรวจสอบแล้วไม่ใช่วัสดุชนิด C อาจเป็นวัสดุชนิด A ถ้า

$$d < \frac{22500}{\rho_p - \rho_f} \quad (2.1)$$

วัสดุชนิด B กรณีที่ตรวจสอบแล้วไม่ใช่วัสดุชนิด A หรือ C อาจเป็นวัสดุชนิด B ถ้า

$$d^2 < \frac{10^9}{\rho_p - \rho_f} \quad (2.2)$$

วัสดุชนิด C จะเป็นวัสดุชนิด C ก็ต่อเมื่อ

$$\rho_p - \rho_f > 1000 \text{ และ } d < 20$$

$$\text{หรือ } \rho_p - \rho_f > 1000 \text{ และ } d < \frac{20000}{\rho_p - \rho_f} \quad (2.3)$$

วัสดุชนิด D กรณีที่ตรวจสอบแล้วไม่ใช่วัสดุชนิด A หรือ C หรือ D อาจเป็นวัสดุชนิด D ถ้า

$$d^2 > \frac{10^9}{\rho_p - \rho_f} \quad (2.4)$$

เมื่อ ρ_p คือ ความหนาแน่นจริงของวัสดุ, kg / m^3
 ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg / m^3
 d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุ, m

2.2.5.1 ส่วนประกอบของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม

ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นประกอบด้วยส่วนประกอบเบื้องต้น 4 ชนิด คือ

1) ตัวต้นกำเนิดลม ตัวต้นกำเนิดลมนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและมีราคาสูงที่สุดในระบบ จึงควรเลือกตัวต้นกำเนิดลมให้เหมาะสมกับความดันในระบบที่ต้องการใช้ โดยในระบบความดันต่ำนั้นจะใช้ พัดลมหอยโข่ง Centrifugal Fan, Roots Blower ส่วนในระบบความดันสูงนั้นจะใช้ Compressor เป็นตัวต้นกำเนิดลม

2) ตัวจ่ายวัสดุเข้าท่อลำเลียง ตัวจ่ายวัสดุนั้นใช้สำหรับจ่ายวัสดุเข้าไปผสมกับลมที่ใช้ขนส่ง และมีความสำคัญที่สุดในระบบ หากสามารถจ่ายวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก็จะสามารถขนถ่ายวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน โดยตัวจ่ายวัสดุนั้น จะพาวัสดุที่อยู่นิ่งอยู่ในถังเก็บ เข้าสู่กระแสรอบไหลของลมขนถ่ายวัสดุ ทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม และเคลื่อนที่ไปกับลมในที่สุด โดยการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมนี้จะทำให้เกิดความดันสูญเสียในท่อขนถ่ายวัสดุ ดังนั้นในการขนถ่ายวัสดุในช่วงนี้ จึงควรใช้ท่อตรงที่วางอยู่ในแนวระดับที่มีความยาวหนึ่ง จากนั้นจึงต่อท่อโค้งตามที่ต้องการ เพื่อลดการเกิดความดันสูญเสีย

3) ท่อลำเลียงวัสดุ ในส่วนของท่อนี้การเลือกท่อนั้นจะขึ้นกับวัสดุที่ต้องการขนถ่าย ส่วนของท่อนั้นจะประกอบไปด้วย ท่อตรง ช่องอ และ วาล์ว การเลือกท่อนั้นจะต้องพิจารณาหลายๆ ส่วนประกอบกัน ทั้งความดัน อัตราการไหลของลม อัตราการขนถ่ายวัสดุด้วย โดยชนิดของวัสดุนั้น หากวัสดุที่ต้องการขนถ่ายเป็นวัสดุที่มีความคมมาก ก็ควรเลือกท่อที่แข็ง หรือมีการเคลือบผิวภายในที่หนาพอสมควร โดยส่วนที่เกิดการเสียหายได้ง่ายที่สุดคือช่องอ เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของโมเมนตัมจะทำให้วัสดุส่วนใหญ่ชนกับผนังและเกิดการสูญเสียพลังงาน ในการออกแบบจึงควรคำนึงถึงรัศมีของช่องอด้วย เพื่อลดการสึกหรอ และการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น

4) ตัวแยกวัสดุออกจากอากาศ ตัวแยกวัสดุออกจากอากาศนี้มีหลายชนิด โดยหลักการแล้ว จะเป็นการแยกลมที่ใช้ขนส่งและวัสดุออกจากกัน โดยวัสดุนั้นจะถูกนำไปเก็บที่ถังเก็บ และ ลมจะถูกระบายทิ้งสู่บรรยากาศ หรือนำกลับมาใช้ใหม่ก็ได้ โดยตัวแยกวัสดุออกจากอากาศที่นิยมนำมาใช้งานนั้นมี 2 ประเภท คือ ไส้โคลน และ เครื่องกรองฝุ่นแบบผ้ากรอง โดยการแยกวัสดุออกจากอากาศนี้ จะมีการเกิดความดันสูญเสียขึ้นมาอีกด้วย จึงควรออกแบบด้วยความรอบคอบเพื่อให้สูญเสียพลังงานน้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น

2.2.5.2 การแบ่งชนิดของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม

โดยทั่วไปแล้วเราจะแบ่งการขนถ่ายวัสดุด้วยลมเป็น 2 แบบ คือ

1) แบ่งตามปริมาณเฉลี่ยของวัสดุที่ไหลในท่อ ในการขนถ่ายวัสดุนั้นจะมีการจ่ายวัสดุเข้าไปในระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

- การขนถ่ายวัสดุแบบเบาบาง (Dilute Phase)
- การขนถ่ายวัสดุแบบไม่คงที่ (Medium Phase)
- การขนถ่ายวัสดุแบบหนาแน่น (Dense Phase)

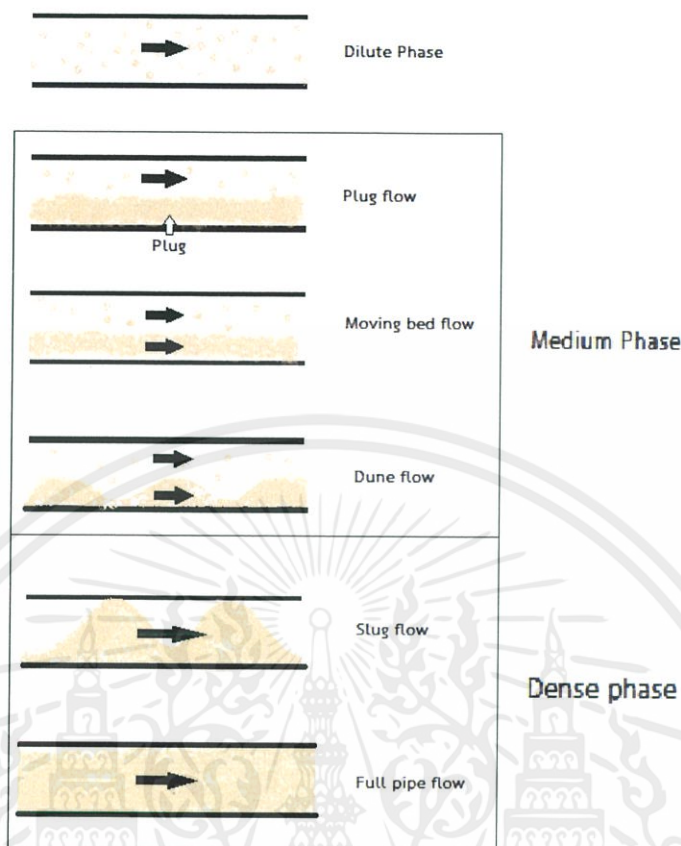
การแบ่งชนิดของการขนส่งนั้นสามารถแบ่งได้โดยใช้อัตราส่วน (ϕ) ระหว่างอัตราการไหลของวัสดุ (m_s) และอัตราการไหลของลม (m_f)

$$\phi = \frac{m_s}{m_f} \quad (2.5)$$

a. การขนถ่ายวัสดุแบบเบาบาง (Dilute Phase) จะใช้อากาศในปริมาณมวลที่มากกว่าปริมาณมวลของวัสดุ ส่งผลให้ วัสดุจะแขวนลอยไหลไปตามกระแสของอากาศ หากค่าความเร็วของลมมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการขนส่งวัสดุจะทำให้วัสดุแขวนลอยอยู่บนกระแสมทั้งหมด ไม่ตกลงมากองกันอยู่กันท่อ โดยทั่วไปแล้วการขนส่งแบบนี้จะมีค่า ϕ ไม่เกิน 15 (ขึ้นกับชนิดของวัสดุ)

b. การขนถ่ายวัสดุแบบไม่คงที่ (Medium Phase) จะเป็นการขนส่งที่เป็นช่วงของการขนส่งที่อยู่ระหว่าง Dense Phase และ Dilute Phase อาจมีการกอง การกิ้งไปภายในท่อ มีการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปในการขนส่งวัสดุด้วยลมจะหลีกเลี่ยงการขนส่งวัสดุในช่วงนี้ เนื่องจากอาจทำให้เกิดการสั่นของท่อ ส่งเสียงดัง หรืออาจส่งผลต่อโครงสร้างการวางท่อ

c. การขนถ่ายวัสดุแบบหนาแน่น (Dense Phase) จะใช้อากาศในปริมาณมวลที่น้อยกว่าปริมาณมวลของวัสดุ ทำให้ความเร็วของอากาศต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดของการขนส่งวัสดุ ในขณะที่ความดันสูง โดยทั่วไปจะมีค่า ϕ มากกว่า 15 (ขึ้นกับชนิดของวัสดุ) ลักษณะการไหลของแต่ละชนิดของการขนส่งแสดงดังรูปที่ 2.5

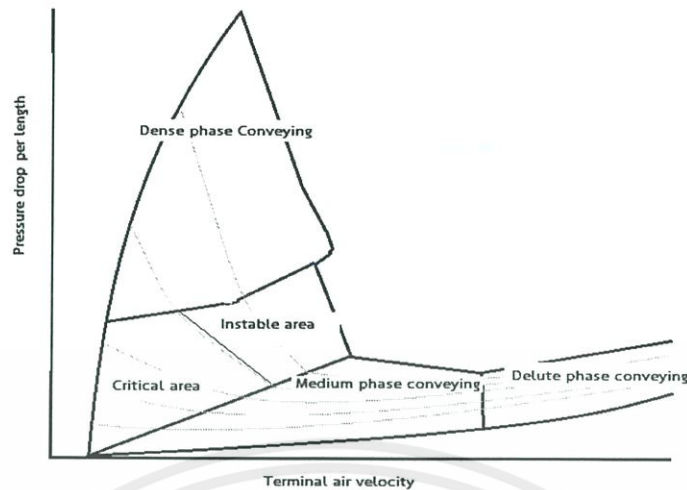


รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลของวัสดุในท่อในรูปแบบการขนส่งแบบต่างๆ [3]

2). แบ่งตามความดันในระบบ การแบ่งตามความดันในระบบสามารถแบ่งออกเป็นระบบย่อยๆ ได้ดังนี้

a. ระบบสุญญากาศ จะมีแหล่งจ่ายลมอยู่ที่ปลายทาง ทำงานโดยใช้พัดลมระบบสุญญากาศดูดวัสดุ ระบบนี้เหมาะกับการขนถ่ายวัสดุจากหลายแหล่งไปยังปลายทางแห่งเดียว ระบบสุญญากาศเป็นระบบที่ต้องใช้ความเร็วขั้นต่ำในการขนส่งสูงกว่าระบบแบบความดัน เนื่องจากความหนาแน่นของลมในระบบต่ำกว่า ข้อดีของระบบคือไม่มีการรั่วของวัสดุออกจากท่อเนื่องจากความดันในท่อต่ำกว่าความดันบรรยากาศ แต่ข้อเสียก็คือการที่ต้องการความเร็วลมต่ำที่สุดที่ใช้สำหรับขนถ่ายมากกว่าส่งผลให้ต้องใช้พลังงานมากกว่า และถ้ามีวัสดุไหลผ่านตัวแยกวัสดุไปได้ อาจจะสร้างความเสียหายให้แก่แหล่งจ่ายลมได้ ระบบนี้ยังเหมาะกับการขนถ่ายวัสดุที่อันตรายและวัสดุที่เป็นพิษอีกด้วย

b. ระบบความดัน จะมีแหล่งจ่ายลมอยู่ที่ต้นทาง โดยแหล่งจ่ายลมจะอยู่แยกกับถังเก็บวัสดุ ถังเก็บวัสดุจะมีตัวจ่ายวัสดุเข้าไปผสมกับกระแสลมสำหรับขนส่ง สามารถขนส่งไปยังหลายปลายทางได้ โดยที่แต่ละปลายทางนั้นจะต้องมีตัวแยกวัสดุออกจากอากาศ ข้อควรระวังของการขนถ่ายในระบบความดันคืออาจมีลมรั่วย้อนกลับไปสู่ถังเก็บวัสดุได้ อาจส่งผลให้ไม่ได้อัตราการขนถ่ายที่ต้องการ



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะไดอะแกรมการไหลในท่อ [7]

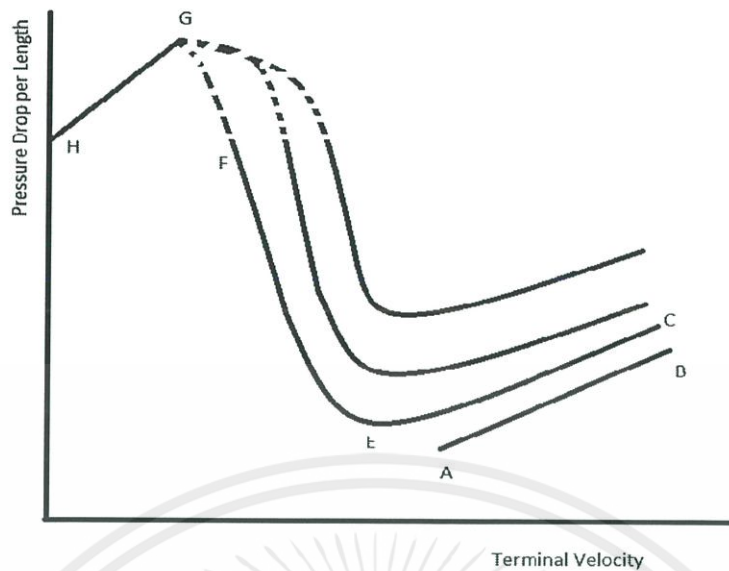
จากรูปที่ 2.6 แสดงถึงไดอะแกรมการไหลของท่อ โดยแกนตั้งคือความดันสูญเสียต่อความยาวท่อ และ แกนนอนคือความเร็วลมในท่อขนถ่ายวัสดุ โดยในแต่ละวัสดุจะมีไดอะแกรมในการไหลที่แตกต่างกัน แต่จะมีแนวโน้มเดียวกัน คือ เมื่อลดความเร็วลมลงมาเรื่อยๆ การขนส่งแบบเบาบางจะเริ่มเปลี่ยนเป็นการขนส่งแบบไม่คงที่ และความดันสูญเสียก็จะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นการขนส่งแบบหนาแน่น และจะมีความดันสูญเสียสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้ความดันสูญเสียในท่อต่ำที่สุดจะเรียกว่า “Saltation Velocity” สำหรับท่อแนวนอน และ “Choking Velocity” สำหรับท่อแนวตั้ง แต่โดยทั่วไป ความเร็ว Choking Velocity มักต่ำกว่า Saltation Velocity ดังนั้นในบางกรณีจึงมักใช้ Saltation velocity สำหรับกำหนดความเร็วขั้นต่ำในการขนถ่ายวัสดุ

2.2.6 ความเร็วลมในการขนถ่ายวัสดุตามแนวตั้งและแนวระดับ

ในการขนถ่ายวัสดุนั้นจำเป็นต้องมีการคำนวณหาความเร็วต่ำที่สุดสำหรับการขนถ่ายวัสดุในอัตราการไหลใดๆ เพื่อที่จะกำหนดรูปแบบการไหลของวัสดุว่าจะให้เป็นแบบเบาบาง หรือแบบหนาแน่น โดยหากความเร็วที่ใช้ขนส่งมีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดที่ต้องการ จะทำให้การขนส่งเป็นแบบหนาแน่น แต่ถ้าใช้ความเร็วมากกว่าความเร็วต่ำสุดก็จะเป็นการไหลแบบเบาบาง แต่ในการออกแบบนั้นเราควรออกแบบให้ความเร็วมากกว่าหรือน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดที่ได้จากการคำนวณในช่วงหนึ่งๆ ไม่ควรให้ค่าความเร็วที่นำมาใช้ตกอยู่ในช่วงที่ใกล้ความเร็วต่ำสุดที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากจะเป็นช่วงที่อยู่ในระหว่างการเปลี่ยนรูปแบบการไหล หรือ Medium Phase

2.2.6.1 คุณสมบัติการไหลของวัสดุในท่อแนวตั้ง

คุณสมบัติการไหลของวัสดุในท่อแนวตั้งนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยการเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความดันต่อความยาวท่อ กับความเร็วลมในการขนถ่ายวัสดุ



รูปที่ 2.7 แสดงคุณลักษณะการไหลตามแนวตั้งของการขนถ่ายวัสดุด้วยลม [7]

จากรูปที่ 2.7 เส้น AB คือ เส้นกราฟที่มีแต่ลมเปล่าไหล ไม่มีวัสดุไหลด้วย หากมีการจ่ายวัสดุเข้าไปที่ตำแหน่ง B ด้วยอัตราการขนถ่าย m_1 จะทำให้ความดันในระบบเพิ่มขึ้นไปที่ตำแหน่ง C ตำแหน่งนี้จะมีปริมาณวัสดุต่อมวลอากาศต่ำทำให้การไหลเป็นแบบเบาบาง (Dilute Phase) โดยความดันสูญเสียในระบบทั้งหมดจะประกอบไปด้วยความดันสูญเสียเนื่องจากอากาศ ความเสียดทาน และ น้ำหนักของวัสดุ โดยแสดงได้ดังสมการ

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{Total}} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{Air}} + \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{Friction}} + \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{Gravity}} \quad (2.6)$$

ความดันสูญเสียเนื่องมาจากแรงเสียดทานนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม เมื่อความเร็วของลมลดลง แรงเสียดทานจะลดลงด้วย แต่ถ้าหากความเร็วลมมากขึ้น แรงเสียดทานก็จะมากขึ้นด้วยเช่นกัน ความดันสูญเสียจากน้ำหนักของวัสดุนั้นจะแปรผันตามปริมาณของวัสดุในท่อ ถ้ามีปริมาณวัสดุในท่อมาก ความดันสูญเสียก็จะมากด้วยเช่นกัน

ต่อมาหากลดความเร็วลมลงไปที่จุด D ในขณะที่อัตราการขนถ่าย m_1 เท่าเดิมนั้นจะทำให้ความดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานลดลง แต่ความดันสูญเสียเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุนั้นจะมากขึ้นเนื่องจากปริมาณวัสดุเฉลี่ยในท่อมากขึ้นและที่จุด E นั้นความดันสูญเสียนั้นจะมีค่าต่ำที่สุด จากนั้นหากลมความเร็วลมลงอีกนั้นจะทำให้ความดันสูญเสยรวมมีค่ามากขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อลดความเร็วลมลงอีก จะเปลี่ยนลักษณะการไหลของวัสดุเป็น การไหลแบบหนาแน่น (Dense Phase) ซึ่งก็คือช่วง EF จากนั้นหากลดความเร็วลมอีกวัสดุจะรวมกันเป็นก้อน มีลักษณะการไหลแบบ Moving Bed ในช่วง FG ซึ่งหากลดความเร็วอีกจนต่ำกว่าจุด G ก็จะทำให้เกิดการอุดตันของท่อ

จุดที่มีความสำคัญในการออกแบบระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมคือจุด E เนื่องจากเป็นจุดที่แบ่งระหว่างการไหลแบบเบาบางกับการไหลแบบหนาแน่น โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ หรือจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดก็ได้

โดยจะมีสมการสำหรับการคำนวณหาความเร็วลมต่ำที่สุดสำหรับการขนถ่ายในแนวตั้ง (Choking Velocity) ที่จุด E ด้วย โดยจะยกสมการของ Yang และ Punwani มาใช้

สมการของ Yang

$$\frac{2g \cdot D(\epsilon_c^{-4.7} - 1)}{(V_c - U_{fo})^2} = 0.01 \quad (2.7)$$

เมื่อ V_c คือความเร็วขั้นต่ำในการขนถ่ายวัสดุแนวตั้ง, m/s

U_{fo} คือความเร็วในการตกอย่างอิสระ, m/s

ϵ_c คือตัวแปรช่องว่างของวัสดุ ในทางปฏิบัติใช้ 0.97

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s²

สมการของ Punwani

$$\frac{2g \cdot D(\epsilon_c^{-4.7} - 1)}{(V_c - U_{fo})^2} = 0.074 \left(\frac{\rho}{16}\right)^{0.77} \quad (2.8)$$

เมื่อ V_c คือความเร็วขั้นต่ำในการขนถ่ายวัสดุแนวตั้ง, m/s

U_{fo} คือความเร็วในการตกอย่างอิสระ, m/s

ϵ_c คือตัวแปรช่องว่างของวัสดุ ในทางปฏิบัติใช้ 0.97

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s²

ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ, kg/m³

ในการออกแบบนั้นควรกำหนดให้ความเร็วที่ใช้จริงสูงกว่าที่คำนวณ 1.5 เท่า สำหรับการขนถ่ายแบบเบาบาง และ 0.67 เท่า สำหรับการขนถ่ายแบบหนาแน่น

2.2.6.2 คุณสมบัติการไหลของวัสดุในท่อแนวระดับ

ในการออกแบบนั้นค่าความเร็วลมต่ำสุดสำหรับการขนส่งในแนวระดับ (Saltation Velocity) จะมีค่ามากกว่าค่าความเร็วต่ำสุดสำหรับการขนถ่ายในแนวตั้ง (Choking Velocity) ในการใช้งานจริงนั้นจะมียังท่อในแนวระดับและแนวตั้งปะปนกันอยู่ ดังนั้นในการออกแบบจึงควรใช้ความเร็วต่ำสุดสำหรับขนส่งวัสดุในแนวระดับมาออกแบบระบบ สำหรับการขนถ่ายวัสดุในแนวระดับนั้นมีค่าอธิบายจำกัดความของความเร็วลมต่ำที่สุดที่ใช้สำหรับขนถ่ายวัสดุในแนวระดับได้ 4 แบบ คือ

- 1) ความเร็วลมต่ำที่สุดที่ทำให้วัสดุกลิ้ง เลื่อนไถล หรือลอยอยู่ในกระแสลม
- 2) ความเร็วลมต่ำที่สุดที่ทำให้วัสดุกระเด็นไปในท่อ โดยไม่มีการกลิ้งหรือไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ความเร็วลมต่ำที่สุดที่ทำให้วัสดุที่วางนึ่งบนผิวท่อสามารถเคลื่อนที่ไปตามกระแสลมได้

4) ความเร็วลมต่ำที่สุดที่ทำให้วัสดุที่วางอยู่บนชั้นของวัสดุบนผิวท่อสามารถลอยไปตามกระแสการไหลได้

ในการออกแบบนั้นจะมีสมการสำหรับการคำนวณหลายสมการโดยที่แต่ละสมการนั้นจะมีที่มาต่างกัน จึงควรใช้ด้วยความระมัดระวัง และทำการทดสอบเทียบกับผลการคำนวณเสมอ

1) สมการของ Rizk ทำการทดลองโดยใช้ท่อขนาด 32 mm ทดลองกับวัสดุ Mustard bead, Grass bead, Steel bead และ Lead bead เขียนสมการได้เป็น

$$\mu = \frac{1}{10^x} \cdot \left(\frac{V_{st}}{\sqrt{gD}} \right)^y \quad (2.9)$$

โดยที่ $x = 1.44 d_p + 1.96$

$Y = 1.1 d_p + 2.5$

เมื่อ μ คือ อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศ

V_{st} คือ ความเร็วต่ำสุดในแนวระดับ, m

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ, mm

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

2) สมการของ Schade ทำการทดลองโดยใช้ท่อขนาด 50, 60, 80, 100, 120 และ 150 mm ทดลองกับวัสดุ Granular sand, Styropor, Rubber และ Polyester โดยในการทดลองจะใช้แผ่นประจวบไว้ที่ผิวล่างของท่อ เพื่อวัดการตกลงของวัสดุ

$$\frac{V_{st}}{\sqrt{gD}} = \mu^{0.11} \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0.025} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^{0.34} \quad (2.10)$$

เมื่อ d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ, m

V_{st} คือความเร็วขั้นต่ำในการขนถ่ายวัสดุในแนวนอน, m/s

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

μ คืออัตราส่วนระหว่างวัสดุต่ออากาศ, kg วัสดุ/ kg อากาศ

ρ_p คือความหนาแน่นจริงของวัสดุ, kg/m^3

ρ_f คือความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

3) สมการของ Geldart ทำการทดลองโดยใช้ท่อขนถ่ายขนาด 9.19 และ 12.52 mm ทดลองกับถ่านหินขนาดเฉลี่ย 8, 18 และ 26 micron การทดลองจะปรับความดันให้คงที่จากนั้นจะวัดปริมาณการขนถ่ายที่ความเร็วลมที่แตกต่างกัน โดยความเร็วลมที่สามารถขนถ่ายวัสดุได้มากที่สุดในการทดลองจะถือเป็นความเร็วลมที่ต่ำที่สุดสำหรับขนถ่ายวัสดุ จะได้สมการ

$$\text{สำหรับกรณี } \frac{m_s}{A \cdot D} > 47000$$

$$V_{st} = \frac{1.5 \left(\frac{m_s}{A} \right)^{0.465} \eta^{0.55}}{D^{0.01} \rho_p^{0.42}} \quad (2.11)$$

$$\text{สำหรับกรณี } \frac{m_s}{A \cdot D} < 47000$$

$$V_{st} = \frac{8.7 \left(\frac{m_s}{A} \right)^{0.302} D^{0.153} \eta^{0.55}}{\rho_p^{0.42}} \quad (2.12)$$

เมื่อ V_{st} คือความเร็วขั้นต่ำในการขนถ่ายวัสดุในแนวนอน, m/s

m_s คืออัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง, kg/s

A คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ, m²

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, μ

η คือ Dynamic Viscosity, kg/m.s

ρ_p คือความหนาแน่นของวัสดุ, kg/m³

จากสมการเหล่านี้สามารถนำไปใช้คำนวณหาความเร็วลมต่ำสุดสำหรับใช้ในการขนถ่ายได้ แต่สมการเหล่านี้ไม่ได้ทดลองกับวัสดุทุกชนิด และขนาดท่อทุกแบบ ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น ชนิดของวัสดุที่นำมาขนถ่ายนั้นจะมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการขนถ่ายวัสดุ ดังนั้นการนำความเร็วลมที่ได้จากสมการไปใช้จึงควรทำการทดลองเพื่อตรวจสอบผลการคำนวณด้วยทุกครั้ง

สำหรับการขนถ่ายในแนวเอียงนั้นไม่แนะนำให้ติดตั้งเนื่องจากจะเกิดความดันสูญเสียสูง โดยความดันสูญเสียนั้นจะมากกว่าการใช้ช่องอมุมฉากเสียอีก แต่หากจำเป็นต้องใช้ แนะนำให้ใช้มุมไม่เกิน 15 องศาจากแนวระดับ

2.2.7 การคำนวณความดันสูญเสียจากการไหลในท่อ

เมื่ออากาศและวัสดุไหลไปในท่อนั้น จะเกิดการสูญเสียความดันเกิดขึ้น โดยความดันสูญเสียนี้ จะมีผลต่อการกำหนดขนาดของพัดลมที่จะนำมาใช้ ความดันสูญเสียจะแบ่งเป็นสองชนิด คือ

1) Major Loss เกิดจากแรงเสียดทานในท่อสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta P_L = \frac{\rho_f V^2 L}{2D} (\lambda_f + \mu \lambda_s) \quad (2.13)$$

เมื่อ L คือ ความยาวรวมของท่อ, m,

V คือ ความเร็วของลมที่ใช้ขนส่ง, m/s

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหลที่ขนส่ง, kg/m^3

λ_f คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างท่อและอากาศ,

λ_s คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างท่อและวัสดุ

μ คือ อัตราส่วนระหว่างมวลวัสดุต่ออากาศ

สำหรับการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างท่อและวัสดุ (λ_s) จะใช้สมการต่อไปนี้

ในกรณีที่ขนาดวัสดุน้อยกว่า 0.5 mm

$$\lambda_s = \frac{2.1 F_{rp}^{0.25}}{\mu^{0.3} F_r} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.1} \quad (2.14)$$

ในกรณีที่ขนาดวัสดุมากกว่า 0.5 mm

$$\lambda_s = \frac{0.082 F_{rp}^{0.25}}{\mu^{0.3} F_r^{0.86}} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.1} \quad (2.15)$$

เมื่อ F_r คือ ฟรอนัมเบอร์ (Froude Number)

F_{rp} คือ ฟรอนัมเบอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการตกอย่างอิสระของวัสดุ

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุ, m

โดยฟรายนัมเบอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F_r = \frac{V^2}{gD} \quad (2.16)$$

$$F_{rp} = \frac{U_{fo}^2}{gd} \quad (2.17)$$

เมื่อ U_{fo} คือ ความเร็วในการตกอย่างอิสระของวัสดุ, m/s

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุ, m

2) Minor Loss เกิดจากความเร่ง การชนวัสดุขึ้นในแนวตั้ง การไหลผ่านท่อโค้ง สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง เกิดจากการที่วัสดุเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมอย่างกะทันหัน เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามลมได้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta P_a = \rho_f V^2 \left(0.5 + \frac{\mu V_s}{V} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ V_s คือ ความเร็วของวัสดุที่ถูกชนส่ง, m/s

และสามารถประมาณค่าความเร็วของวัสดุที่ถูกชนส่ง (V_s) ได้จากสมการ

$$V_s = V \left(1 - (0.008d^{0.3} \cdot \rho_p^{0.5}) \right) \quad (2.19)$$

เมื่อ ρ_p คือ ความหนาแน่นของวัสดุ, kg/m³

ความดันสูญเสียจากการชนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta P_z = \frac{\mu \cdot \rho_f \cdot g \cdot z \cdot V}{V_s} \quad (2.20)$$

เมื่อ g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s²

z คือ ความสูงที่วัสดุถูกยกขึ้นไป, m/s²

ความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อโค้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมอย่างทันทีทันใด ทำให้ความเร็วของวัสดุตกลงแล้วจึงถูกเร่งขึ้นมาใหม่อีกครั้ง ความดันสูญเสียนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta P_b = \frac{N \cdot B \cdot \rho_f V^2 (1 + \mu)}{2} \quad (2.21)$$

เมื่อ N คือ จำนวนท่อโค้งในระบบ

B คือ สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียจากท่อโค้ง

ตารางที่ 2.1 สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียจากท่อโค้ง [2]

อัตราส่วนรัศมีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโค้ง	B
2	1.5
4	0.75
>6	0.50

ความดันสูญเสียรวมเกิดจากการนำความดันสูญเสียจากส่วนต่างๆมารวมกันดังนี้

$$\Delta P_T = \Delta P_L + \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_z \quad (2.22)$$

2.2.8 อุปกรณ์แยกวัสดุ/อากาศ

อุปกรณ์แยกวัสดุออกจากอากาศที่ปลายทางของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมเป็นอีกอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากใช้สำหรับแยกวัสดุแล้วปล่อยอากาศทิ้งไป ซึ่งหากใช้อุปกรณ์แยกอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการอุดตันในระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม หรือ มีการปล่อยสารพิษเกินค่ามาตรฐานสิ่งแวดล้อม หรือกรณีเลวร้ายที่สุดคือเกิดการระเบิดขึ้นอันเนื่องมาจากความดันในระบบสูงจากการที่ระบบอุดตัน เพราะเหตุนี้ระบบนี้จึงควรออกแบบด้วยความระมัดระวัง ซึ่งในระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นจะนิยมใช้ตัวแยกวัสดุสองชนิด คือ ไชโคลน(Cyclone) และเครื่องกรองฝุ่นแบบผ้ากรอง(Bag Filter)

2.2.8.1 เครื่องคัดแยกอนุภาคแบบไชโคลน

หลักการออกแบบไชโคลน

ไชโคลน เป็นเครื่องมือคัดแยกอนุภาคออกจากอากาศโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศหมุนวน (Vortex) ซึ่งทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไชโคลน กระแสหมุนวนนี้จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณเกือบปลายกรวยไชโคลนและอากาศจะหมุนวน

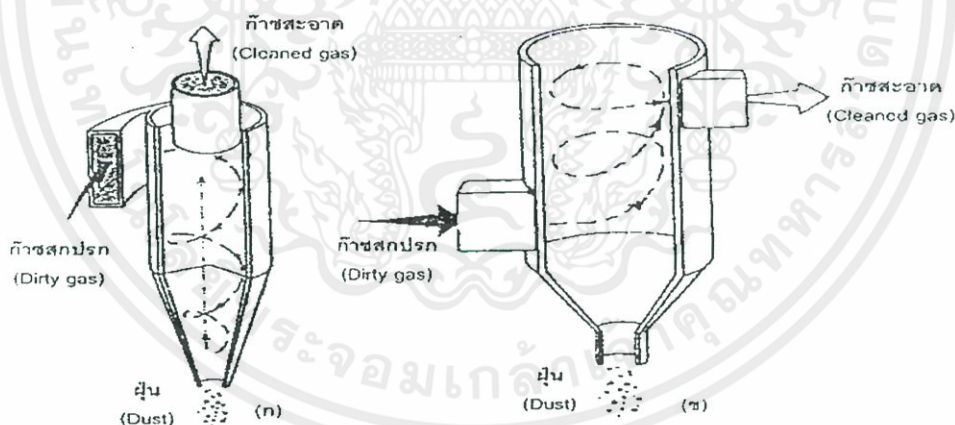
ย้อนกลับขึ้นมาเป็นกระแสอากาศหมุนวนที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม (Core Vortex) และเคลื่อนที่ไปยังทางออกด้านบนของไซโคลอน ดังนั้นไซโคลอนจึงมีกระแสอากาศหมุนวน 2 ชั้น (Double Vortex) สำหรับอนุภาคที่ถูกเหวี่ยงไปยังผนังไซโคลอนเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ลงไปยังส่วนล่างของไซโคลอนและออกไปยังทางออกด้านล่างเข้าสู่ถังพัก (Dust Bin) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากและอากาศก็จะหมุนวนออกไปที่ทางออกด้านบนของไซโคลอน โดยกลไกในการจับอนุภาคมี 2 อย่าง คือ

- 1) แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เกิดจากการทำให้เกิดกระแสอากาศหมุนวนซึ่งทำให้อนุภาคเหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลอน
- 2) แรงถ่วง (Gravity Force) เมื่ออนุภาคเกิดการหมุนวนและเคลื่อนที่ถึงผนังไซโคลอนแล้วอนุภาคที่หนักจะได้รับแรงถ่วงทำให้อนุภาคตกลงไปที่ถังพักด้านล่าง

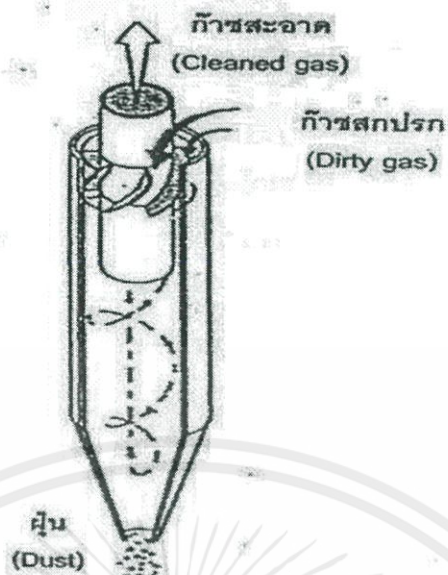
ชนิดของไซโคลอน

โดยจะแบ่งตามลักษณะของการหมุนและทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ จะแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

- 1) ไซโคลอนแบบทางเข้าตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Entry Inlet) ดังแสดงในรูปที่ 2.8
- 2) ไซโคลอนแบบทางเข้าตามแนวแกน (Axial Entry Inlet) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ทางเข้าตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Entry Inlet) [2]



รูปที่ 2.9 ไชโคลนทางเข้าตามแนวแกน(Axial Entry Inlet) [2]

อากาศจะไหลเข้าสู่ไชโคลนตามแนวเส้นสัมผัสและเกิดกระแสอากาศหมุนวน (Vortex) โดยท่อเข้าส่วนใหญ่ของไชโคลนจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งจะมีผนังภายในค้อยๆโค้งจากนั้นจะเป็นส่วนทรงกระบอกของตัวไชโคลน สำหรับไชโคลนที่มีทางเข้าตามแนวแกน อากาศและอนุภาคจะเข้าสู่ไชโคลนตามแนวแกนโดยผ่าน vanes ซึ่งลักษณะนี้จะใช้มากในมัลติไชโคลน โดยจะมีการทำงานขึ้นกับความเฉื่อยของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเมื่ออากาศเปลี่ยนทิศทาง ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางดังกล่าว โดยส่วนใหญ่แล้วในการเลือกจะเลือกใช้เหล็กคาร์บอนหรือโลหะในการทำไชโคลนหรือเซรามิกส์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทดลองหรือใช้งานในการคัดแยกอนุภาค, การกักความร้อน, การสึกหลอ แต่ผิวภายในต้องมีลักษณะที่เรียบเพื่อให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ดีและไม่เกิดแรงเสียดทาน นอกจากนี้ไชโคลนสามารถแบ่งออกเป็น แบบที่ใช้กันทั่วไป (Conventional Cyclones) และแบบที่มีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Cyclone) โดยจะแบ่งได้ทั้งหมด 3 ชนิด คือ ไชโคลนที่มีประสิทธิภาพสูง ไชโคลนที่ใช้กันทั่วไป และไชโคลนที่รับอัตราการไหลสูง (High Volume Cyclone)

โครงสร้างและสัดส่วนของไชโคลน

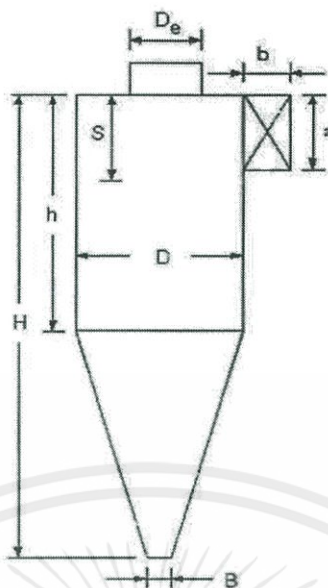
โครงสร้างและสัดส่วนของไชโคลนจะสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ ได้แก่ 1) แบบ High Efficiency และ 2) แบบ General โดยในไชโคลนแบบ 1) High Efficiency จะสามารถแยกประเภทออกได้ 2 แบบตามการออกแบบสัดส่วนของไชโคลน ได้แก่ 1.1) Stairmand และ 1.2) Swift โดยไชโคลนแบบ 2) General Purpose จะแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่ 2.1) Lapple, Swift, 2.2) Peterson และ 3.3) Whitby จะแสดงสัดส่วนของไชโคลนทั้ง 2 แบบ ได้แก่ แบบ High Efficiency แสดงในตารางที่ 2.2 และแบบ General Purpose ในตารางที่ 2.3 จะระบุสัดส่วนมาตรฐานของไชโคลนแสดงดังรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.2 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ High Efficiency [5]

ส่วนประกอบ	สัดส่วนไซโคลน (เมตร)	
	Stairmand	Swift
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	1.000	1.000
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500	0.440
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.200	0.210
ความยาวช่องทางออก (S)	0.500	0.500
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D _e)	0.500	0.400
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	1.500	1.400
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000	3.900
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.375	0.400

ตารางที่ 2.3 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ General Purpose [5]

ส่วนประกอบ	สัดส่วนไซโคลน (เมตร)		
	Lapple	Swift	Peterson & Whitby
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	1.000	1.000	1.000
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500	0.500	0.583
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.250	0.250	0.208
ความยาวช่องทางออก (S)	0.625	0.600	0.583
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D _e)	0.500	0.500	0.500
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	2.000	1.750	1.333
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000	3.750	3.170
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.250	0.400	0.500



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของไซโคลน [5]

การออกแบบไซโคลนโดยใช้โครงแบบ (Configuration) อื่นๆ นั้นจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- 1) $H \leq s$ เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นที่เข้ามาหลุดออกไปที่ท่อทางออก
- 2) $H \geq 3D$ เพื่อให้กระแสนอยู่ภายในกรวยไซโคลน
- 3) มุมส่วนโคนจะประมาณ 7-8 องศาเพื่อช่วยให้ฝุ่นไหลลงง่าย

การเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลนและกลไกการดักจับอนุภาคของไซโคลน

เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลนสามารถคำนวณได้โดยการ Integrate สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในสมการดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Second Law) แรงทั้งหมดที่กระทำต่อสมมูลของอนุภาคกับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาค โดยอนุภาคนั้นจะมีแรงที่หลากหลายมากระทำ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะพบว่าหลักๆ แล้วจะมีทั้งหมด 3 แรง และความเร็วที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค ดังนี้

1) แรงต้านอากาศ (Drag Force) คือแรงที่กระทำจะตรงกันข้ามกับทิศทางลมที่ผ่านโดยจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัตถุนั้นๆ อธิบายได้ว่าเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคทรงกลมจะเกิดแรงต้านอากาศในการเคลื่อนที่เพราะฉะนั้นทิศทางจะตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของของไหล โดยแรงต้านอากาศจะขึ้นกับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคกับของไหล, สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D), ความหนาแน่นของของไหล (ρ_f) และ พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค (A) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ และแรงต้านอากาศจะแสดงในสมการ 2.23

$$\bar{F}_D = \frac{1}{2} \rho_f A C_D (u_f - u_p)^2 \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2). แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) คือ แรงที่มีทิศตรงข้ามกับศูนย์กลาง อากาศที่เคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องมือที่รูปร่างโค้ง เช่น ไซโคลน จะทำให้เกิดกระแสอากาศหมุนวนภายในไซโคลน และเกิดแรงเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไซโคลนเนื่องจากโมเมนตัมอนุภาคจะสูญเสียพลังงานจลน์ ดังนั้นอนุภาคจะแยกออกจากกระแสอากาศ โดยแรงหนีศูนย์กลางจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่รอบจุดศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้มีแนวโน้มเคลื่อนที่ออกจากจุดกึ่งกลางของการหมุน โดยในสมการ 2.24 จะแสดงความสัมพันธ์แรงหนีศูนย์กลางกับความเร็วตามแนวเส้น ความเร็วเชิงมุม (ω) และรัศมีไซโคลน (R)

$$\bar{F}_c = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R \quad (2.24)$$

3) แรงโน้มถ่วง (Gravity Force) คือแรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกดึงดูดสิ่งของขนาดเล็ก สิ่งของต่างๆที่อยู่ในโลกจะมีแรงดึงดูดของโลกมากกระทำทำให้สิ่งของนั้นมีทิศทางลงสู่ด้านล่างที่ศูนย์กลางของโลก โดยนิยามของแรงโน้มถ่วงจะมีส่วนของน้ำหนักเกี่ยวข้องจะแสดงในสมการ 2.25 ในกรณีที่ไซโคลนมีการหมุนสูงๆ อัตราส่วนระหว่างแรงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วงของโลกจะอยู่ในช่วง 100 ถึง 20,000 ดังนั้นแรงโน้มถ่วงจึงมีอิทธิพลที่ไม่มากนักต่อการดักจับอนุภาค

$$\bar{F}_g = mg \quad (2.25)$$

ประสิทธิภาพการคัดแยกของไซโคลน

ประสิทธิภาพการคัดแยกของไซโคลนและความดันตกคร่อมคือตัวแปรที่สำคัญสำหรับการประเมินประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลน ความหมายประสิทธิภาพของไซโคลนแล้วคือความสามารถในการดักจับอนุภาคได้ ในขณะที่ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) คือพลังงานที่ไซโคลนต้องการเพื่อใช้ในการดำเนินการ ซึ่งในการออกแบบไซโคลนทั่วไปต้องการให้มีประสิทธิภาพในการคัดแยกที่สูงและมีความดันตกคร่อม(Pressure Drop) ต่ำ ในการหาประสิทธิภาพของไซโคลนจะต้องทำการคำนวณตัวแปรต่างๆแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ขนาดตัดอนุภาค (Cut Size Diameter) คือ ขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพ 50% นั่นคืออนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดตัดจะถูกไซโคลนจับด้วยประสิทธิภาพมากกว่า 50% ขนาดตัดของอนุภาคขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของแก๊สและอนุภาค ขนาดของไซโคลน และสภาวะการเดินเครื่อง (Operating Contains) สมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดตัดของอนุภาคได้จากสมการ 2.26 ของ Lapple (1951) โดยใช้หลักการสมดุลแรงเหวี่ยง (Centrifugal Force) และแรงต้านทางอากาศ (Drag Force) ที่กระทำในไซโคลน

$$d_{pc} = \left(\frac{9\mu_g b}{2\pi N_c V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{0.5} \quad (2.26)$$

เมื่อ d_{pc} คือ ขนาดตัดของอนุภาคที่เข้าสู่ไซโคลน, m
 μ_g คือ ความหนืดของอากาศ, kg/m·s
 b คือ ความกว้างของช่องทางเข้าไซโคลน, m/s
 N_c คือ จำนวนการหมุนประสิทธิภาพ
 V_i คือ ความเร็วของอากาศที่ช่องทางเข้าไซโคลน, m/s
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่น, kg/m³
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m³

2) ประสิทธิภาพในการดักเก็บอนุภาค (η_j) ได้มีสมการหลายอย่างเพื่อใช้หาประสิทธิภาพของไซโคลน ในรูป Fractional Efficiency หมายถึง สัดส่วนอนุภาคขนาดหนึ่งที่ถูกลดไซโคลนดักจับได้เมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดนั้นที่เข้าสู่ไซโคลน โดยจะใช้สมการ 2.27

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} \quad (2.27)$$

เมื่อ η_j คือ ประสิทธิภาพการแยกฝุ่นในช่วงขนาดที่สนใจ
 d_{pj} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฝุ่นในช่วงที่สนใจ, m

3) จำนวนการหมุนประสิทธิภาพ (N_e) คือจำนวนครั้งที่กระแสอากาศมีการหมุนวนในไซโคลน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.28

$$N_e = \frac{1}{a} \left(h + \frac{H-h}{2} \right) \quad (2.28)$$

เมื่อ a คือ ความสูงช่องทางเข้า, m
 H คือ ความสูงของไซโคลน, m
 h คือ ความสูงช่วงทรงกระบอกของไซโคลน, m

4) ประสิทธิภาพในการดักจับรวม (η) ในการคำนวณหาประสิทธิภาพรวมจะต้องหาการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ของฝุ่นที่เข้าสู่ไซโคลน ดังสมการ 2.29

$$\eta = \sum \eta_j f_j \quad (2.29)$$

เมื่อ f_j คือ สัดส่วนมวลของฝุ่นในแต่ละช่วงขนาดที่สนใจ, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความดันลดของไซโคลน

เป็นค่าที่บอกถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการคัดแยกอนุภาคในไซโคลน ค่าความดันลด (ΔP) หาได้จากสมการ Shepherd และ Lapple (1939) ดังนี้

$$N_H = 16 \frac{ab}{D_c^2} \quad (2.30)$$

- เมื่อ N_H คือ จำนวนเฮดของความเร็วทางเข้า
 D_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก, m
 a คือ ความสูงช่องทางเข้า, m
 b คือ ความกว้างของช่องทางเข้าไซโคลน, m

$$\Delta P = \rho_g \frac{V_i^2 N_H}{2g} \quad (2.31)$$

- เมื่อ ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่น, kg/m^3
 V_i คือ ความเร็วของอากาศที่ช่องทางเข้าไซโคลน, m/s
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

2.2.8.2 เครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง

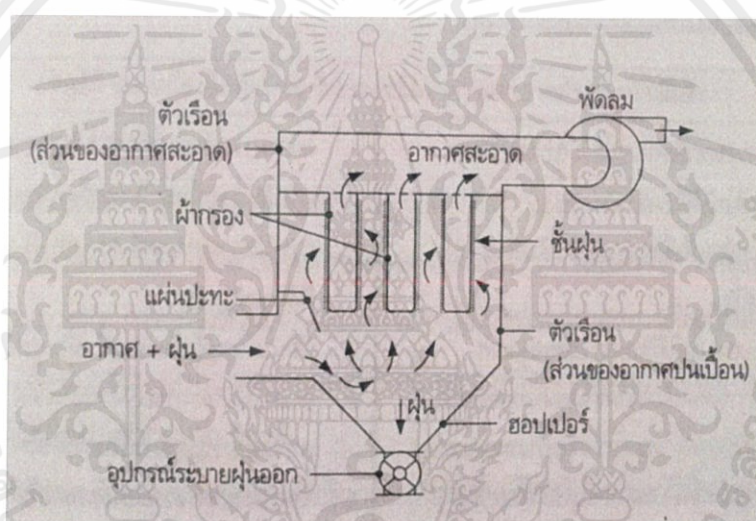
การกรอง (filtration) เป็นวิธีแยกอนุภาคออกจากกระแสแก๊สที่เก่าแก่และใช้กันแพร่หลายมากที่สุดวิธีหนึ่งโดยทั่วไปเครื่องกรองคือโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ประกอบด้วยสารที่เป็นเม็ดหรือเส้นใย ซึ่งจะกักกั้นอนุภาคไว้ให้แก๊สไหลผ่านช่องว่าง

การทำงานของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองจะอาศัยกลไกของการกรอง โดยอากาศปนเปื้อน (อากาศ + ฝุ่น) จะไหลผ่านผ้ากรอง (fabric) ซึ่งทำจากผ้าหรือวัสดุสังเคราะห์ วัสดุที่นำมาทำผ้ากรองต้องมีความละเอียดมากพอที่จะยอมให้เฉพาะอากาศเท่านั้นที่ไหลผ่านผ้ากรองไปได้ ส่วนฝุ่นจะติดอยู่ที่ผิวหน้าผ้ากรอง ชั้นฝุ่น (dust cake) ที่เคลือบติดบริเวณผิวของผ้ากรองจะทำให้ผ้ากรองค่อยๆ อุดตัน ส่งผลให้อากาศไหลผ่านผ้ากรองได้น้อยลง (มีความต้านทานในการไหลมากขึ้น) ดังนั้นจึงต้องมีการทำความสะอาดผ้ากรอง ผลจากการทำความสะอาดนี้จะทำให้ผิวหน้าของผ้ากรองสะอาดขึ้นและพร้อมทำหน้าที่กรองฝุ่นต่อไป

ผ้ากรองที่นำมาใช้กับกับเครื่องดักฝุ่นชนิดนี้อาจมีรูปแบบเป็นทรงกระบอกคล้ายถุงซึ่งเรามักเรียกกันว่า ถุงกรอง (filter bag) ซึ่งการจัดวางจะกระทำเป็นแถวต่อเนื่องกันไปจนเต็มตัวเรือนของเครื่องดักฝุ่น หรืออาจมีรูปแบบเป็นแผ่นเรียบที่ถูกนำมาพับทบไปมาคล้ายหีบเพลงซึ่งผ้ากรองลักษณะนี้จะช่วยให้มีพื้นที่ในการกรองมากกว่าความดันตกที่เกิดขึ้นก็จะมากตามไปด้วย



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง
(<http://www2.donaldson.com/tetratex/>, (2017))



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง [2]

จากรูปที่ 2.12 แสดงหลักการทำงานและส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง ซึ่งโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

- 1) ผ้ากรองหรือถุงกรอง
- 2) ตัวเรือน (Bag house) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเรือนในส่วนของอากาศปนเปื้อน (dirty air plenum) ซึ่งหมายถึงอากาศที่มีฝุ่นปะปนอยู่ และตัวเรือนในส่วนของอากาศ (cleaned air plenum) นอกจากนี้ยังรวมไปถึงฮอปเปอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่เก็บฝุ่นที่ถูกแยกออกจากอากาศด้วย
- 3) แผ่นปะทะ (baffle plate) ซึ่งทำหน้าที่กระจายการไหลของอากาศและฝุ่นให้ไหลเข้าสู่ผ้ากรองอย่างสม่ำเสมอในปริมาณใกล้เคียงกัน
- 4) พัดลม โดยอาจเป็นพัดลมที่ติดตั้งมาพร้อมกับตัวเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองหรืออาจเป็นพัดลมของระบบระบายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายประเภท เนื่องจากมีประสิทธิภาพการแยกฝุ่นถึง 99.9% หากมีการออกแบบและติดตั้ง รวมถึงมีการใช้งานอย่างถูกต้อง การที่เครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองมีประสิทธิภาพการยกฝุ่นสูงก็เป็นผลมาจากผิวหน้าของผ้ากรองได้รับการทำความสะอาดตลอดช่วงการทำงาน เครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรองยังสามารถดักฝุ่นที่มีขนาดเล็กหรือฝุ่นละเอียดเป็นอย่างดี ซึ่งขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ผ้ากรอง สำหรับข้อดีและข้อเสียของเครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรองเมื่อเทียบกับเครื่องดักฝุ่นชนิดอื่นสามารถดูได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง [5]

ข้อดี	ข้อเสีย
1.สามารถดักฝุ่นที่มีความละเอียดมากได้ดี	1.ไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพเมื่อเกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศที่ผิวหน้าของผ้ากรอง
2.ฝุ่นที่ถูกดักจับจะมีลักษณะแห้งซึ่งสามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการได้อีกครั้ง	2.การทำความสะอาดผ้ากรองทำได้ยากในกรณีฝุ่นที่มีลักษณะเหนียว
3.ประสิทธิภาพการแยกฝุ่นไม่ได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลและความหนาแน่นของอากาศ	3.ราคาของผ้ากรองจะแพง หากนำไปใช้กับงานที่มีอนุภาคสูงหรือฝุ่นมีความสามารถในการขัดสีสูง
4.ความดันตกที่เกิดขึ้นจะมีค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการแยกฝุ่นที่ได้	4.มีขนาดใหญ่ซึ่งต้องการพื้นที่ในการติดตั้งมาก

เส้นใยสำหรับทำผ้ากรอง

การพิจารณาเลือกใช้เส้นใยที่ทำผ้ากรองจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของฝุ่นและอากาศที่ไหลในระบบเป็นสำคัญโดยใช้เส้นใยที่ใช้กันจะมี 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยธรรมชาติ (natural fiber) และเส้นใยสังเคราะห์ (synthetic fiber) ในอดีตผ้ากรองส่วนมากมักทำจากเส้นใยธรรมชาติเช่น ฝ้าย (cotton) หรือขนสัตว์ (wool) ซึ่งมักจะมีราคาถูกแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของอนุภาคการใช้งานกล่าวคือ ได้สามารถใช้งานกับงานที่มีอนุภาคสูงเกิน 100 องศา นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังมีความสามารถในการต้านทานการขัดสีจากฝุ่นได้ไม่มาก ในปัจจุบัน เส้นใยสังเคราะห์ได้รับความนิยมในการนำมาทำผ้ากรองเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถนำไปใช้กับงานที่มีอนุภาคสูงกว่าผ้ากรองที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ และยังสามารถทนทานต่อปฏิกิริยาเคมีหรือการขัดสีจากฝุ่นได้ดีกว่า

เส้นใย	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°F)		ความต้านทานต่อ		
	ทำงานต่อเนื่อง	ทำงานเป็นช่วง	กรด	ด่าง	การขัดสี
Cotton	180	225	ไม่ดี	ดีมาก	ปานกลาง
Wool	200	250	ดี	ไม่ดี	ปานกลาง
Polypropylene	190	200	ดีมาก	ดีมาก	ดี
Nylon	200	250	ดี-ปานกลาง	ดีมาก	ดีมาก
Orion	240	260	ดีมาก	พอใช้	ปานกลาง
Dacron	275	325	ดี	พอใช้	ดีมาก
Nomex	400	425	พอใช้	ดีมาก	ดีมาก
Teflon	450	500	ดีมาก	ดีมาก	พอใช้
Fiberglass	500	550	ดี	ไม่ดี	พอใช้
P84	450	500	ดี	พอใช้	พอใช้
Ryton	375	450	ดีมาก	ดีมาก	ดี

รูปที่ 2.13 คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยที่ใช้ทำผ้ากรอง [2]

รูปที่ 2.13 จะแสดงให้เห็นถึงชนิดของเส้นใยที่ใช้ทำผ้ากรอง คุณสมบัติในการต้านทานกรดและด่างรวมถึงอุณหภูมิในการใช้งาน ข้อมูลที่ปรากฏในตารางดังกล่าวนี้เป็นเพียงแนวทางกว้างๆ สำหรับการเลือกใช้ผ้ากรองเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากผ้ากรองสามารถทำจากเส้นใยมากกว่าหนึ่งชนิดได้ เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานด้านอื่น เช่น ความแข็งแรง หรือความสม่ำเสมอของผิวหน้ากรอง เป็นต้น

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้ผ้ากรอง

โดยทั่วไป การเลือกใช้ผ้ากรองให้เหมาะสมกับงานจะต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบเป็นสำคัญนอกจากนี้ยังต้องอาศัยข้อมูลที่เกิดจากการทดสอบของผู้ผลิตมาประกอบด้วย โดยหากผู้ออกแบบมีข้อมูลข้างต้นรวมถึงประสบการณ์ที่มากพอก็จะช่วยให้เครื่องดักฝุ่นที่ออกแบบมาสามารถทำงานได้ด้วยประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่ต้นทุนการสร้างไม่สูงมากนัก โดยองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้ผ้ากรองจะมีอยู่หลายตัวคือ

1) คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของฝุ่นถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการเลือกใช้ผ้ากรองโดยคุณสมบัติดังกล่าวนี้ประกอบด้วย ความสามารถในการขัดสี ความสามารถในการกักกรอง หรือความสามารถในการเกาะตัวของฝุ่น เป็นต้น

2) สำหรับอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่เข้าสู่เครื่องดักฝุ่นก็มีความสำคัญเช่นกัน ในกรณีที่อากาศดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงมาก เช่น ในการกระบวนการผลิตยางมะตอย หรือกระบวนการทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นๆ ผ้ากรองที่ใช้ควรเป็นชนิดทนความร้อนซึ่งโดยปกติจะมีราคาค่อนข้างแพงสูง หากเป็นไปได้ควรทำการลดอุณหภูมิของอากาศลงก่อนที่จะไหลเข้าสู่เครื่องดักฝุ่นซึ่งการกระทำเช่นนี้จะช่วยให้ผ้ากรองที่ใช้ไม่จำเป็นชนิดที่ทนความร้อนมากซึ่งโดยทั่วไปจะมีราคาสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ต้องระวังไม่ให้ อุณหภูมิของอากาศลดต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำค้างซึ่งจะทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการควบแน่นและก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของฝุ่นตามมา รวมถึงอาจก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนภายในเครื่องดักฝุ่นขึ้นได้

ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง

1) อัตราการไหลของอากาศ การออกแบบหรือการหาขนาดของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองจะไม่สามารถกระทำได้หากไม่ทราบปริมาณหรืออัตราการไหลที่เข้าสู่เครื่องดักฝุ่น โดยปกติเราสามารถหาอัตราการไหลของอากาศได้ในขั้นตอนการออกแบบระบบระบายอากาศ โดยอัตราการไหลของอากาศจะเป็นตัวกำหนดขนาดเครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรอง หากอัตราการไหลอากาศมีมากก็จะส่งผลให้เครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองที่ใช้มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้เราจำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิ ปริมาณความชื้น รวมถึงความสามารถในการกัดกร่อน สิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดชนิดของวัสดุที่จะนำมาสร้างเครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรอง ชนิดของผ้ากรองที่ใช้รวมถึงอุปกรณ์ประกอบอื่นๆที่จำเป็น

2) อัตราส่วนอากาศต่อผ้ากรอง อัตราส่วนอากาศต่อผ้ากรอง หมายถึง อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่เครื่องดักฝุ่นต่อพื้นที่ผ้าที่ใช้ (cloth area) อัตราส่วนอากาศต่อผ้ากรองถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการออกแบบโดยจะเป็นตัวกำหนดปริมาณของผ้ากรองที่ใช้ซึ่งก็หมายถึงขนาดเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรอง จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนอากาศต่อผ้ากรองจะมีอิทธิพลต่อราคาและต้นทุนในการสร้างเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองเป็นอย่างมาก เนื่องจากราคาหรือต้นทุนส่วนใหญ่ของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองจะขึ้นอยู่กับปริมาณผ้ากรองที่ใช้ จากที่กล่าวมาจึงสามารถเขียนอัตราส่วนอากาศต่อผ้ากรองได้ดังสมการต่อไปนี้

$$A/C = \frac{Q}{A} \quad (2.32)$$

เมื่อ A/C คือ อัตราส่วนอากาศต่อพื้นที่ผ้ากรอง,

Q คือ อัตราการไหลของอากาศ, m^3/s

A คือ พื้นที่ของผ้ากรอง, m^2

จากสมการ 2.32 เมื่อพิจารณาจากหน่วยของอัตราการไหลของอากาศและหน่วยของพื้นที่ของผ้ากรองจะพบว่า หน่วยของอัตราส่วนอากาศต่อผ้ากรองหน่วยของอัตราส่วนมีค่าเทียบเท่าหน่วยของความเร็วดังนั้นสามารถเรียกอัตราส่วนของผ้ากรองว่าเป็น ความเร็วในการกรอง (V_f) ซึ่งหมายถึงความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวของผ้ากรอง

3) ความเร็วระหว่างถุงกรอง ความเร็วระหว่างถุงกรอง (V_c) หมายถึง ความเร็วของอากาศหรือก๊าซที่ไหลผ่านบริเวณช่องระหว่างถุงกรองแต่ละใบ ซึ่งโดยปกติจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการตกของฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกที่เกิดขึ้นในช่วงทำความสะอาดถุงกรอง หากความเร็วระหว่างถุงกรองมีมากเกินไปจะส่งผลให้ฝุ่นที่หลุดออกจากผิวหน้าของผ้ากรองจะถูกอากาศดังกล่าวพัดกลับไปติดที่ผิวหน้าของผ้ากรองอีกครั้งปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะทำให้พื้นที่กรองลดลงรวมถึงความดันตกหรือความต้านทานในการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งในที่สุดถุงกรองหรือผ้ากรองก็จะอุดตัน ประสิทธิภาพการแยกฝุ่นของเครื่องดักฝุ่นด้วยผ้ากรองก็ลดลง การประเมินค่าความเร็วระหว่างถุงกรองอาศัยสมการดังต่อไปนี้

$$V_c = \frac{Q}{A_{\text{housing}} - A_{\text{bag}}} \quad (2.33)$$

เมื่อ A_{housing} คือ พื้นที่ของ Bag house, m^2
 Q คือ อัตราการไหลของอากาศ, m^3 / s
 A_{bag} คือ พื้นที่ของผ้ากรอง, m^2

จากสมการ 2.33 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าคงที่ ความเร็วระหว่างถุงกรองจะขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างถุงกรองซึ่งก็หมายถึงพื้นที่หน้าตัดของกระแสการไหลของอากาศภายในเครื่องดักฝุ่น หากช่องว่างระหว่างถุงมีน้อย (ถุงกรองติดตั้งชิดกัน) ความเร็วของอากาศที่ไหลระหว่างถุงกรองได้รับความเสียหายจากการเสียดสีระหว่างถุงกรองด้วยกันเอง ปัญหานี้จะรุนแรงมากสำหรับเครื่องดักฝุ่นที่ทำความสะอาดผ้ากรองด้วยการพ่นอากาศอัด ทั้งนี้เนื่องจากถุงกรองจะถูกยึดที่ด้านบนในขณะที่ปลายด้านล่างจะเป็นอิสระ ดังนั้น จึงสามารถสัมผัสหรือเสียดสีกับถุงกรองที่อยู่ข้างเคียงได้ในช่วงทำความสะอาด

ความดันตกเครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรอง

ความดันตกของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรอง ถือเป็นตัวแปรสำคัญที่ผู้ออกแบบระบบระบายอากาศเฉพาะจุดจำเป็นต้องทราบ เนื่องจากความดันตกดังกล่าวนี้จะต้องถูกนำไปรวมกับความดันตกหรือความต้านทานในระบบท่อ เพื่อนำไปหาขนาดของพัดลมที่จะใช้ หากความดันตกของอากาศที่ไหลผ่านผ้ากรองมีค่ามาก พัดลมที่ใช้ก็จะต้องมีขนาดใหญ่ซึ่งใช้พลังงานมากโดยทั่วไปความดันตกของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรองจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ความร้อนในการกรอง หรืออัตราส่วนอากาศต่อผ้ากรอง ปริมาณฝุ่นที่ไหลมาพร้อมกับอากาศ ความเร็วระหว่างถุงกรองจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ความเร็วในการกรอง หรืออัตราส่วนอากาศผ้ากรอง ปริมาณฝุ่นที่ไหลมาพร้อมอากาศ ความเร็วระหว่างถุงกรอง ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (permeability) และความต้านทานของผ้ากรอง (fabric resistance)

ความต้านทานของผ้ากรองเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของผ้ากรองที่พยายามต้านทานการไหลของอากาศ โดยสามารถแสดงได้ในรูปความดันตกของอากาศที่ไหลผ่านผ้ากรองที่มีความเร็วในการกรองค่าหนึ่งภายใต้เงื่อนไขที่มีชั้นฝุ่นปรากฏบนผิวผ้ากรอง ผ้ากรองที่มีความต้านทานมากจะทำให้อากาศไหลผ่านได้น้อย จะเห็นว่า ความต้านทานของผ้ากรองจะสัมพันธ์กับความสามารถในการซึมผ่านอากาศ ซึ่งความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ หมายถึง ปริมาณของอากาศที่ไหลผ่านผ้ากรองใหม่หรือสะอาดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผ้ากรอง

ด้วยเหตุที่ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศและความต้านทานของผ้ากรองล้วนเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวของผ้ากรอง ดังนั้น ค่าความสามารถในการซึมผ่านของอากาศและความต้านทานของผ้ากรองจึงขึ้นกับชนิดของผ้ากรองซึ่งสามารถดูได้จากข้อมูลจำเพาะ (specification) ที่ผู้ผลิตผ้ากรองนั้นๆ จัดทำขึ้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติค่าความดันตกของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรองสามารถประเมินได้จากการเปรียบเทียบกับระบบที่มีการใช้เครื่องดักฝุ่นในลักษณะที่คล้ายคลึงกันดังที่กล่าว โดยความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกของอากาศที่ไหลผ่านผ้ากรองที่มีความต้านทานของผ้ากรอง และความเร็วในการกรอง สามารถแสดงจากสมการต่อไปนี้

$$\Delta P = K_f V_f^2 \quad (2.34)$$

เมื่อ

K_f คือ Fabric Resistant, Pa. s/m

V_f คือ ความเร็วในการกรองอากาศ, m/s

จากสมการ 2.34 พบว่า ความดันตกหรือความต้านทานการไหลของอากาศที่ผ่านผ้ากรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นหากผ้ากรองที่ใช้มีความต้านทานมากหรืออากาศที่ไหลผ่านผ้ากรองมีความเร็วมาก

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

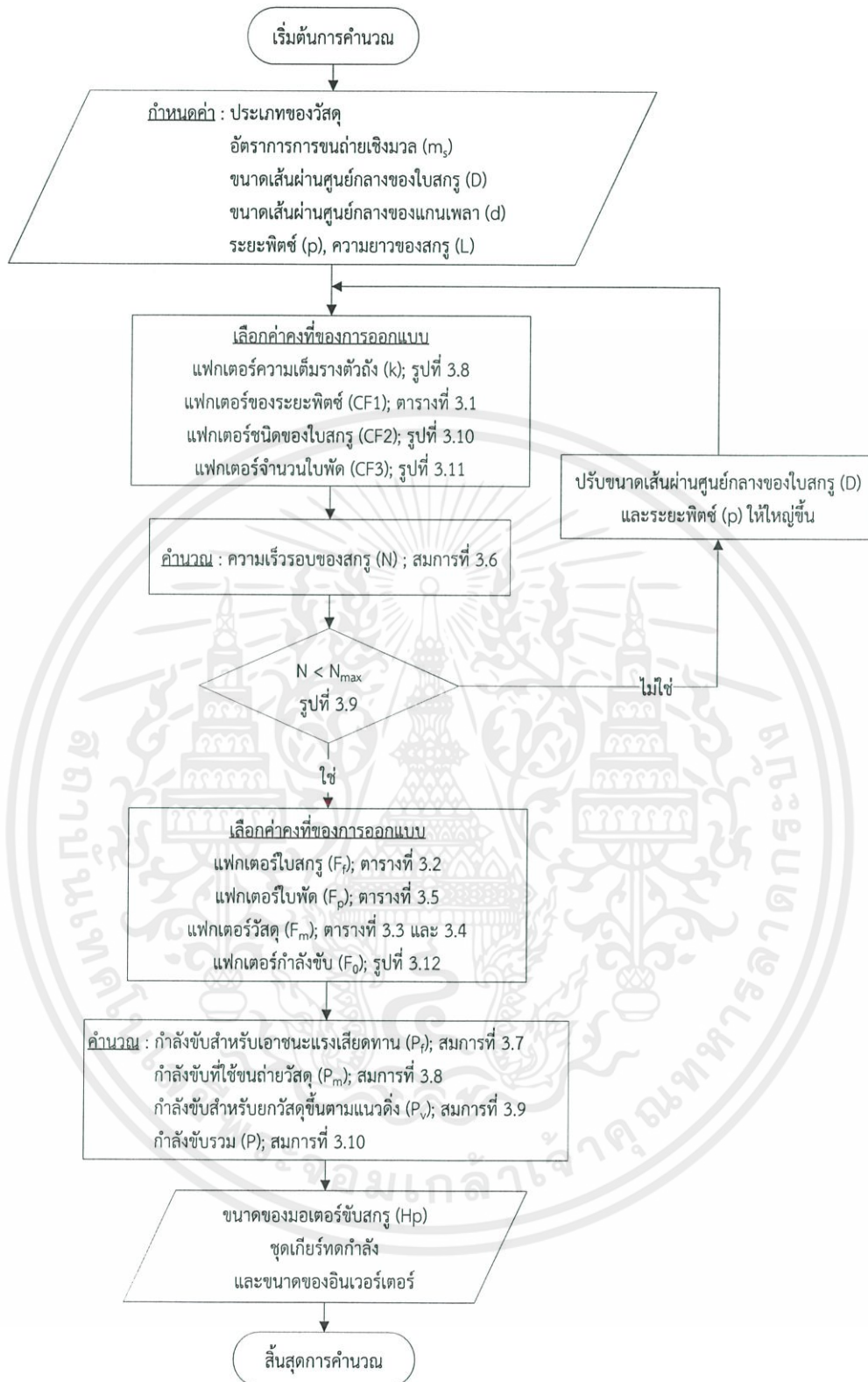
สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณและออกแบบระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งการออกแบบระบบนั้นควรจะออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชนิดของเชื้อเพลิงที่จะใช้ ซึ่งในที่นี้คือเชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยแนวคิดในการออกแบบจะเป็นการสร้างระบบโดยใช้ สกรูลำเลียง เครื่องบด ไซโคลน เครื่องดักกรองฝุ่นด้วยถุงกรอง ถังพักเชื้อเพลิง (hopper) และการขนถ่ายด้วยลม มาประยุกต์รวมกันในการออกแบบครั้งนี้ เพื่อให้สามารถป้อนระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าสู่เตาเผาใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง

3.1 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิง

ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิงภายในท่อ พบว่าสมการของ Schade ให้ความเร็วลมที่ 6.34 m/s และสมการของ Rizk ให้ความเร็วลมที่ 5.9 m/s ซึ่งทั้งคู่ให้ความเร็วลมที่ต่ำกว่าความเร็วลมที่ได้ทดลองจริงคือประมาณ 6.8 m/s สำหรับการขนถ่ายแบบเบาบางในท่อขนาด 2.5 นิ้วและจากการทดลองวัดความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบบแรงดันสำหรับขนส่งพบว่าสามารถทำความเร็วได้ถึง 21.7 m/s ซึ่งมากกว่าความเร็วที่ต้องการของระบบแต่ถือว่าเป็นผลดีกับการขนถ่ายเชื้อเพลิงในอัตราสูง

3.2 การออกแบบสกรูลำเลียงขนส่งเชื้อเพลิง

สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นหนึ่งในวิธีขนถ่ายวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นระบบที่มีความคงทน ง่ายต่อการบำรุงรักษา สามารถกำหนดอัตราการขนถ่ายได้ ขนถ่ายวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุหลากหลายชนิด ซึ่งในออกแบบสกรูขนถ่ายนั้นจำเป็นต้องทราบถึงสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ทำการขนถ่าย เพื่อนำไปใช้ในจำแนกประเภทของวัสดุ โดยประเภทของวัสดุนั้นจะเป็นตัวช่วยในการเลือกชนิดของสกรู วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปใบสกรู และช่วยกำหนดตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณขนาดของสกรูนั่นเอง ซึ่งวิธีการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุนั้น แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ [1]

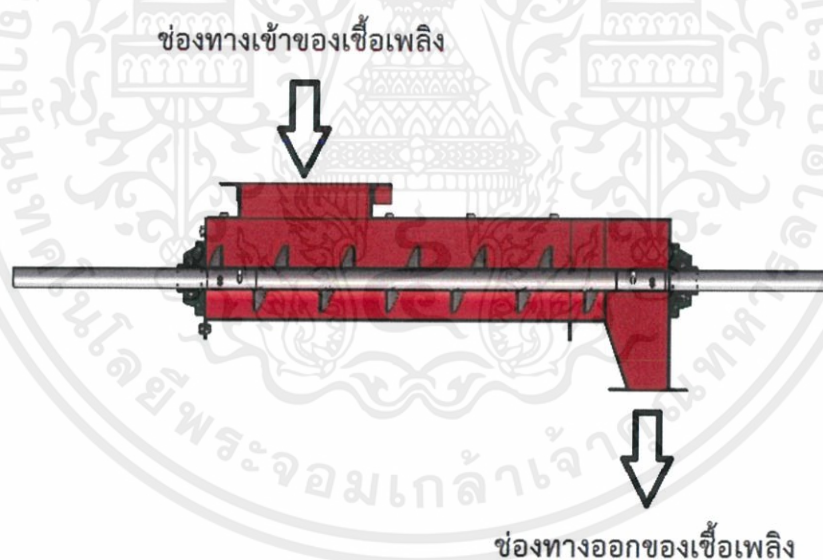
ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ [1]

Parameter	Symbol	Value	Unit
การคำนวณอัตราการขนถ่าย			
Fuel density	r	400.00	kg/m ³
อัตราการขนถ่ายเชิงน้ำหนัก	m _s	226.80	kg/h
ขนาด Diameter ของเกลียวสกรู	D	0.10	m
ขนาด Diameter ของแกนเพลลา	d	0.034	m
ระยะพิตช์	p	0.10	m
พื้นที่หน้าตัดของใบสกรู	A	0.007	m ²
แฟกเตอร์ความเต็มรางตัวถัง	k	0.30	
แฟกเตอร์ของระยะพิตช์	CF1	1	
แฟกเตอร์ชนิดของใบสกรู	CF2	1	
แฟกเตอร์จำนวนใบพิต	CF3	1	
<u>ความเร็วรอบของสกรูหมุน</u>	N	<u>45.38</u>	rev/min
การหาค่ากำลังขับ			
ความยาวขนถ่าย	L	1.50	m
กำลังขับสำหรับเอาชนะแรงเสียดทาน	P _f	102.65	Watt
แฟกเตอร์ใบสกรู	F _f	1	
แฟกเตอร์ใบพิต	F _p	1.29	
แฟกเตอร์วัสดุ	F _m	0.40	
กำลังขับที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ	P _m	0.48	Watt
แฟกเตอร์กำลังขับ	F ₀	2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

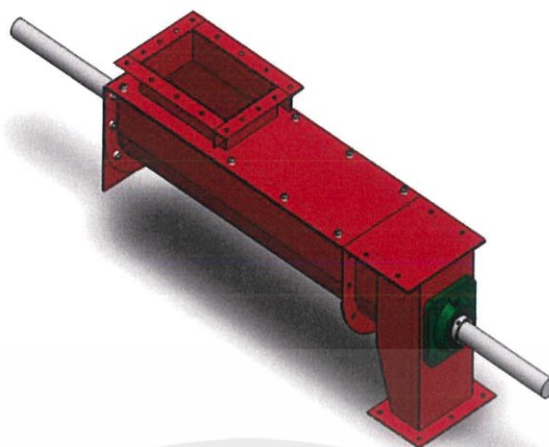
ประสิทธิภาพการส่งกำลัง	h	0.50	
กำลังขั้วรวม	P	412.50	Watt
		0.55	HP

เมื่อพิจารณาตารางที่ 3.1 จะพบว่าหากต้องทำการขนถ่ายเชื้อเพลิงด้วยอัตรา 226.8 kg/hr จะต้องใช้มอเตอร์ที่มีขนาด 0.55 HP เป็นอย่างน้อย และความเร็วรอบของสกรูจะอยู่ที่ 45.38 rev/min ซึ่งในที่นี้เลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1 HP ในการขับเพลลาของสกรู แต่ทว่ามอเตอร์โดยทั่วไปจะมีความเร็วรอบ 1450 rev/min ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz ดังนั้นจึงต้องทำการลดความเร็วรอบของมอเตอร์ลงเพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการใช้งาน ซึ่งได้เลือกใช้มอเตอร์เกียร์อัตราทด 1:10 ให้ความเร็วรอบลดลงเหลือ 145 rev/min แล้วจึงใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบโดยละเอียดอีกครั้ง เพื่อให้ง่ายต่อการปรับลดความเร็วรอบ ตามปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามตัวเลขความเร็วรอบที่คำนวณได้ในตารางที่ 3.1 นั้นยังเป็นเพียงค่าประมาณการเท่านั้น ซึ่งต้องทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายต่อความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายต่อไป



รูปที่ 3.2 ภาพตัด และทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่าย [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะของสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ทำการออกแบบ [1]

ทิศทางการขนถ่ายเชื้อเพลิง ช่องทางเข้า และออกของเชื้อเพลิงผ่านสกรูขนถ่ายแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยที่ลักษณะโดยรวมของสกรูขนถ่ายแสดงดังรูปที่ 3.3 จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสกรูขนถ่ายมีส่วนประกอบที่สามารถถอดประกอบได้หลายชิ้น เพื่อให้ง่ายต่อการซ่อมบำรุง

3.3 การออกแบบระบบการบด

โดยในการเลือกชนิดและประเภทของเครื่องบดนั้น ต้องคำนึงถึงประเภทของวัสดุที่จะนำมาบด ความละเอียดของผงวัสดุที่ต้องการ และกำลังในการบดให้สอดคล้องกับความต้องการในการบริโภคเชื้อเพลิงของหัวเผา ซึ่งประเภทของเครื่องบดของแห่งที่สนใจมีดังนี้

1) Hammer mill คือเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง มีลักษณะหัวบดเป็นหัวค้อนติดอยู่บนเพลลาอาศัยหลักการเหวี่ยงกระแทก ทำให้วัสดุแตกเป็นชิ้นเล็กๆ และมีตะแกรงเจาะรูเป็นตัวกรองให้เครื่องบด บดวัสดุให้ได้ขนาดตามต้องการจึงปล่อยออก

2) Ball mill คือ เครื่องบดแบบลูกบอลประกอบด้วยภาชนะปิดหลังหม้อบด หมุนอย่างช้าๆ ในแนวนอนภายในมีลูกบดที่เป็นบอลโลหะ อาศัยการกระแทกของลูกบดกับวัสดุที่ต้องการบด

3) Pin mill หลักการทำงานคือ วัสดุถูกใส่ลงมาจากบนสุดลงมาด้านล่าง โดยครั้งแรกจะถูกบดด้วย แรงเนื่องจากหัวบดที่หมุนอยู่ภายในจนเป็นผงละเอียด และร่วงลงด้านล่างผ่านตะแกรง ส่วนที่ไม่สามารถผ่านตะแกรงลงไปได้ต้องถูกหมุนต่อไปจนกว่าจะกลายเป็นผงและผ่านตะแกรงได้

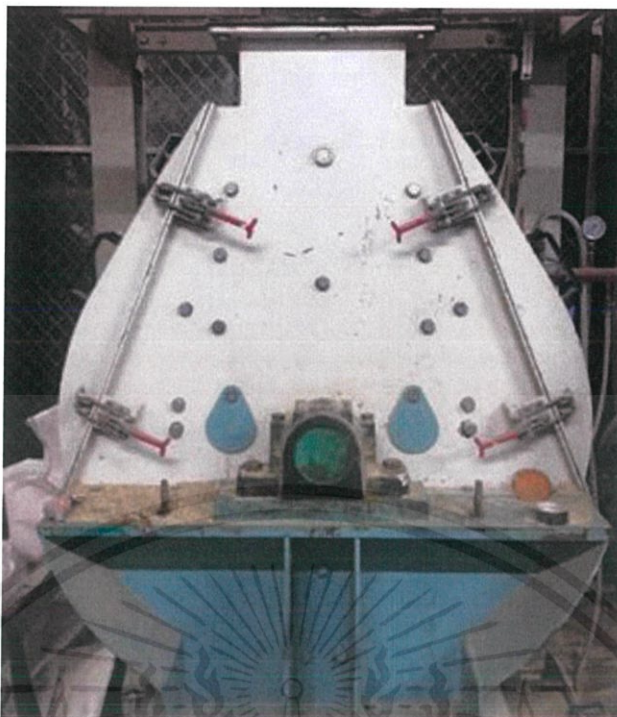
สิ่งที่พิจารณา	ชนิดเครื่อง		
	Hammer mill	Ball mill	Pin mill
ขนาดเครื่อง	ปานกลาง	ใหญ่	ปานกลาง
ความละเอียดของการบด	หยาบ	ปานกลาง	ละเอียด

รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องบด [1]

จากรูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบดังกล่าว จึงเลือกใช้เครื่องบดประเภท Hammer mill เนื่องจากสามารถบดเชื้อเพลิงได้ในอัตราการไหลของเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูง และขนาดของเชื้อเพลิงผงที่ได้จากการบดนั้นค่อนข้างหยาบแต่สามารถลดอนุภาคของเชื้อเพลิงได้เนื่องจากการติดตั้งตะแกรงเพื่อกำหนดขนาดของเชื้อเพลิงที่ต้องการ ซึ่งได้ติดตั้งตะแกรงขนาด 0.5 x 1.0 mm เมื่อพิจารณาข้อมูลจำเพาะของเครื่องบดยี่ห้อ Beide ดังแสดงในตารางที่ 3.2 พบว่าเครื่องบดรุ่น YSDF 65*27 มีกำลังการผลิต อยู่ในช่วงที่สามารถบด และป้อนเชื้อเพลิงผงเข้าสู่หัวเผาได้ในอัตรา 0.063 kg/s ซึ่งจะผลิตกำลังความร้อนได้ 1 MW

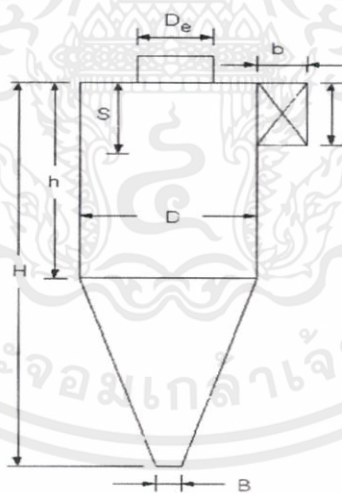
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบด ยี่ห้อ Beide

MODEL	CAPACITY (kg / hr)	POWER (Kw)	SPEED (RPM)	DIMENSION (W x D x H : cm)
YSDF 65*27	600 - 1200	22	2940	1500x1100x1120



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องบด ยี่ห้อ Beide รุ่น YSDF 65*27

3.4 การออกแบบระบบคัตแยกเชื้อเพลิงด้วยไซโคลน



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดและสัดส่วนของไซโคลน [5]

โดยในขนาดและสัดส่วนของไซโคลนนั้น ต้องคำนึงประเภทของวัสดุที่จะนำมาคัตแยก ข้อจำกัดด้านพื้นที่ติดตั้ง และความดันตกคร่อมของเครื่องมือ ซึ่งขนาดและสัดส่วนของไซโคลนที่สนใจ มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ High Efficiency [5]

ส่วนประกอบ	สัดส่วนไซโคลน (เมตร)	
	Stairmand	Swift
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	1.000	1.000
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500	0.440
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.200	0.210
ความยาวช่องทางออก (S)	0.500	0.500
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D _e)	0.500	0.400
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	1.500	1.400
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000	3.900
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.375	0.400

ตารางที่ 3.4 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ General Purpose [5]

ส่วนประกอบ	สัดส่วนไซโคลน (เมตร)		
	Lapple	Swift	Peterson & Whitby
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	1.000	1.000	1.000
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500	0.500	0.583
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.250	0.250	0.208
ความยาวช่องทางออก (S)	0.625	0.600	0.583
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D _e)	0.500	0.500	0.500
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	2.000	1.750	1.333
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000	3.750	3.170
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.250	0.400	0.500

จากตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบดังกล่าว จึงเลือกใช้ขนาดและสัดส่วนของ Stairmand ซึ่งเป็นขนาดและสัดส่วนของไซโคลนแบบ High Efficiency เนื่องจากสามารถคัดแยกอนุภาคเชื้อเพลิงฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมต่างๆ และมีข้อจำกัดในด้านพื้นที่การติดตั้งของไซโคลน

3.4.1 การออกแบบขนาดและสัดส่วนของไซโคลน

การออกแบบขนาดและสัดส่วนของไซโคลน ทางทีมงานวิจัยได้ประเมินทางด้านพื้นที่ติดตั้งจึงได้กำหนดขนาดความสูงไว้ 80 cm. และจากนั้นก็ใช้ขนาดและสัดส่วนของ Stairmand กำหนดขนาดส่วนต่างๆของไซโคลนได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.5 ขนาดและสัดส่วนของไซโคลนที่ออกแบบ [5]

ส่วนประกอบ	ขนาดสัดส่วนไซโคลน (m)
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	0.2000
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.1000
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.0400
ความยาวช่องทางออก (S)	0.1000
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D _e)	0.1016
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	0.3000
ความสูงทั้งหมด (H)	0.8000
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.0750



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะไซโคลนจากการออกแบบ [5]

3.4.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพการตัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลน

คำนวณหาจำนวนการหมุนประสิทธิภาพ (N_c) จากสมการ 2.28

$$N_c = \frac{1}{a} \left(h + \frac{H-h}{2} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_c = \frac{1}{0.1} \left(0.3 + \frac{0.8 - 0.3}{2} \right)$$

$$N_c = 5.5$$

คำนวณหาขนาดตัดของอนุภาคเชื้อเพลิง (d_{pc}) เมื่ออากาศมีความหนืด 1.82×10^{-5} kg/m-s และความหนาแน่นของอากาศและเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1.182 และ 373 kg/m³ ตามลำดับจากสมการ 2.26

$$d_{pc} = \left(\frac{9\mu_g b}{2\pi N_c V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{0.5}$$

$$d_{pc} = \left(\frac{9 \times 1.82 \times 10^{-5} \times 0.04}{2\pi \times 5.5 \times 15 (373 - 1.182)} \right)^{0.5}$$

$$d_{pc} = 5.83 \text{ } \mu\text{m}$$

หมายความว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงที่สามารถถูกแยกออกจากอากาศภายใน Cyclone ด้วยประสิทธิภาพการแยก 50% โดยเชื้อเพลิงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 5.83 μm จะมีโอกาสถูกแยกออกจากอากาศได้มากกว่า 50% ในขณะที่เชื้อเพลิงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5.83 μm จะมีโอกาสถูกแยกออกจากอากาศได้น้อยกว่า 50%

คำนวณหาประสิทธิภาพในการทำงานของไซโคลอน จากการศึกษาสมมติให้ขนาดของอนุภาคจัดอยู่ในช่วงต่างๆตามปริมาณดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงสัดส่วนของขนาดเชื้อเพลิงในช่วงต่างๆ

min Particle Size (μm)	max Particle Size (μm)	ขนาดเฉลี่ย (μm)	% โดยน้ำหนัก , f_j
0	74	37	13.26
75	149	112	8.06
150	179	164.5	8.88
180	299	239.5	16.12
300	354	327	8.48
355	424	389.5	8.34
425	1000	712.5	36.86

คำนวณหาประสิทธิภาพในการแยกฝุ่นของเชื้อเพลิงในแต่ละช่วงจากสมการ ได้ค่าแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงอัตราส่วนขนาดตัดและประสิทธิภาพในแต่ละช่วง

d_{pc}/d_{pj}	η_j	$\eta_j f_j$
0.158	0.976	12.938
0.052	0.997	8.038
0.036	0.999	8.869
0.024	0.999	16.110
0.018	1.000	8.477
0.015	1.000	8.338
0.008	1.000	36.858

จะได้ประสิทธิภาพในแยกเชื้อเพลิงของไซโคลน จากสมการ 2.29

$$\eta = \sum \eta_j f_j$$

จากการออกแบบระบบนี้สามารถแยกเชื้อเพลิงออกจากอากาศได้ ร้อยละ 99.62

3.4.3 การคำนวณหาความดันตกของไซโคลน

คำนวณจำนวนเฮดความเร็วทางเข้า (Number of inlet velocity head) จากสมการ 2.30

$$N_H = 16 \frac{ab}{D_c^2}$$

$$N_H = 16 \frac{0.5 \times 0.25}{0.1016^2}$$

$$N_H = 62$$

คำนวณความดันตกของไซโคลน จะมีความสัมพันธ์กับค่าจำนวนเฮดของความเร็วตามสมการ 2.31

$$\Delta P = \rho_g \frac{V_i^2 N_H}{2g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta P = 1.182 \times \frac{15^2 \times 62}{2 \times 9.81}$$

$$\Delta P = 840.10 \text{ Pa}$$

3.5 การคำนวณและการออกแบบเครื่องดักฝุ่นด้วยถุงกรอง

3.5.1 การเลือกใช้ผ้ากรอง

การเลือกใช้ผ้ากรองให้เหมาะสมกับงาน จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้ผ้ากรองคือ ชนิดและขนาดของฝุ่น คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของฝุ่น ความชื้นและอุณหภูมิที่เข้าสู่เครื่องดักฝุ่น ซึ่งชนิดของผ้ากรองที่สนใจมีดังนี้

Fabric	Maximum Temperature, °F	Acid Resistance	Fluoride Resistance	Alkali Resistance	Flex Abrasion Resistance
Cotton	180	Poor	Poor	Good	Very good
Polypropylene	200	Excellent	Poor	Excellent	Very good
Polyester	275	Good	Poor to fair	Good	Very good
Nomex	400	Poor to fair	Good	Excellent	Excellent
Teflon	450	Excellent	Poor to fair	Excellent	Fair
Fiberglass	500	Fair to good	Poor	Fair to good	Fair

รูปที่ 3.8 แสดงชนิดของผ้ากรอง [14]

จากรูปที่ 3.8 พบว่าการวิเคราะห์คุณสมบัติของผ้ากรองได้ทำการเลือกผ้าชนิด polyester เนื่องจากเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่ทนอุณหภูมิได้สูงในระดับหนึ่ง มีความทนทานและความเหนียว ทนต่อสภาพที่เป็นกรดและด่างได้ดี จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการดักกรองเชื้อเพลิงฝุ่นที่ออกมาจากไซโคลน

3.5.2 การคำนวณและการออกแบบผ้ากรอง

จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงมีความหนาแน่น 373 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของผงไม้แห้งและผงซีลี้อยู่ในตารางคำนวณค่าความเร็วในการกรองและความเร็วระหว่างถุงกรองได้ดังรูปที่ 3.9

ชนิดของฝุ่น (ฝุ่นแห้ง)	ความเร็วในการกรอง (V_f), fpm		ความเร็วระหว่าง ถุงกรอง (V_c), fpm	ความหนาแน่น lbm/ft ³
	ความดันต่ำ*	ความดันสูง**		
Perlite	3	9	175	10 - 20
Phosphate rock, ground	3	9	225	60 - 90
Plastic pellets	3.2	10	225	30 - 45
Plastic powder and resin	2.5	7	200	25 - 45
Potassium carbonate	2.5	7	200	50 - 80
Quartz	2.8	9	200	85
Refractory dust	3	9	200	60 - 85
Rock dust	3	9	225	80 - 90
Rubber dust	3	9	200	25 - 50
Salt	3	9	200	50 - 85
Sand	2.5	10	225	90 - 120
Sandblast dust	2.5	9	200	80 - 90
Sawdust, dry wood	10	17.5	175	10 - 25
Sawdust, fines	4	10	150	10 - 20
Silica	2.5	8	225	80 - 95
Slate	3.5	10	225	80 - 100
Soap, detergent	2	8	175	15 - 35
Soda ash	3	9	200	50 - 65
Spices	2.7	10	200	30 - 50
Steel, machine dust	3	10	225	80 - 150
Sugar	2	8	200	40 - 60
Talc	2.5	9	200	35 - 45
Titanium dioxide	2	7	175	45 - 50
Tobacco, ground	3.5	13	200	10 - 30
Urea formaldehyde	2.5	8	175	35 - 45
Wheat flour	2	10	175	30 - 45
Wood chips and dust	7.5	17.5	200	15 - 35
Zinc, metallic dust	2.5	8	250	200
Zinc oxide	2	7	200	25 - 55
Zirconium oxide	2.5	7	225	70 - 85

รูปที่ 3.9 ค่าสูงสุดของความเร็วในการกรองและความเร็วระหว่างถุงกรอง [2]

ซึ่งความเร็วในการกรองหรือเรียกอีกว่า อัตราส่วนในการกรองซึ่งจากตารางพบว่าความหนาแน่นเชื้อเพลิงมีความใกล้เคียงกับวัสดุผงซีลีออยหรือไม้แห้งเท่ากับ 10 cfm หรือ 3 m/min และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 0.06 m³/s ส่งนำมาคำนวณหาพื้นที่ถุงกรองผ้ากรองได้จากสมการ 2.32

$$A/C = V_f = \frac{Q}{A}$$

$$0.05 = \frac{0.06}{A}$$

$$A = 1.2 \text{ m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นปริมาณพื้นที่ผ้ากรองที่ต้องใช้อย่างน้อย 1.2 m^2 ซึ่งเราได้ทำการออกแบบผ้ากรองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 m และ สูง 1.0 m ซึ่งพื้นที่ผ้ากรองที่ออกแบบเท่ากับ 1.257 m^2 จากนั้นทำการสั่งผลิตผ้ากรองที่มีลักษณะดังกล่าว โดยข้อมูลจากทางผู้ผลิตพบว่าค่าผ้ากรองนั้นมีอัตราการซึมผ่านของอากาศ (Air Permeability) เท่ากับ $0.173 \text{ m}^3 \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ภายในตัว bag house จะบรรจุผ้ากรองจำนวน 2 ใบ ซึ่งพื้นที่ของผ้ากรองทั้งหมดเท่ากับ 2.153 m^2 เพราะฉะนั้นผ้ากรองสามารถรองรับปริมาณอากาศได้ $0.173 \text{ m}^3 \cdot \text{s}/\text{m}^2 \times 2.153 \text{ m}^2 = 0.425 \text{ m}^3 \cdot \text{s}$ ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอในรองรับการไหลของอากาศ



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะผ้ากรองบรรจุใน bag house



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของ Bag house จากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การคำนวณหาความดันตกของเครื่องดักฝุ่นด้วยถุงกรอง

ความดันตกของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องดักฝุ่นด้วยถุงกรอง เป็นตัวแปรสำคัญที่นำไปรวมกับความดันตกของระบบอื่นเพื่อนำไปหาขนาดของพัดลม โดยข้อมูลจากทางผู้ผลิต ค่าความต้านทานของผ้ากรอง เท่ากับ 166.47 Pa ต่อเมตรต่ออนาที ซึ่งสามารถคำนวณหาความดันตกได้จากสมการ 2.34

$$\Delta P = K_1 V_f$$

$$\Delta P = 166.47 \times 3.0 \times 2$$

$$\Delta P = 998.82 \text{ Pa}$$

3.6 การคำนวณและการออกแบบพัดลม

3.6.1 การคำนวณหาความดันตกในท่อ

ด้วยเหตุที่อากาศเป็นของไหลที่มีความหนืด ดังนั้น การไหลของอากาศผ่านระบบท่อจึงต้องมีความต้านทานเกิดขึ้นเสมอ โดยความต้านทานดังกล่าวนี้จะอยู่ในรูปของความฝืดหรือความเสียดทานระหว่างอากาศและผิวด้านในของท่อ ความต้านทานที่เกิดขึ้นจะทำให้พลังงานของอากาศที่ไหลในท่อซึ่งอยู่ในรูปความดันสถิตมีค่าลดลง สามารถหาได้จากการคำนวณต่อไปนี้

ตารางที่ 3.8 แสดงความยาวเทียบเท่าของอุปกรณ์ [3]

อุปกรณ์	k	จำนวนท่อ	ความยาวเทียบเท่า (m)
ข้อต่อ 45 องศาขนาด 2.5 นิ้ว	0.35	6	6.83
ข้อต่อ 45 องศาขนาด 4 นิ้ว	0.35	8	14.0
ข้อต่อลดขนาดท่อ	0.04	1	0.13
บอลวาล์วขนาด 2 นิ้ว	0.05	1	0.16
บอลวาล์วขนาด 4 นิ้ว	0.05	1	0.25

จากตารางที่ 3.8 ระบบการเดินท่อ ความยาวท่อขนาด 2.5 นิ้ว ทั้งหมดเท่ากับ 14.89 เมตร และความยาวท่อ 4 นิ้วทั้งหมดเท่ากับ 16.68 เมตร ซึ่งสามารถคำนวณหาความตกภายในท่อได้ดังสมการ 2.13

$$\Delta P = f \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g}$$

ความดันตกภายในท่อขนาด 2.5 นิ้ว

$$\Delta P = 0.02 \cdot \frac{14.89}{0.0065} \cdot \frac{15^2}{2(9.81)}$$

$$\Delta P = 52.56 \text{ Pa}$$

ความดันตกภายในท่อขนาด 4 นิ้ว

$$\Delta P = 0.02 \times \frac{16.68}{0.1} \times \frac{15^2}{2(9.81)}$$

$$\Delta P = 38.25 \text{ Pa}$$

ดังนั้นความดันตกภายในท่อทั้งหมดเท่ากับ 90.81 Pa

3.6.2 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ของพัดลม

ความดันตกภายในระบบทั้งหมดคือ $\Delta P_{\text{ระบบท่อ}} + \Delta P_{\text{ไต่สูง}} + \Delta P_{\text{เครื่องทักฝุ่น}}$ ซึ่งทั้งหมดเท่ากับ 1930.04 Pa หรือเท่ากับ 7.748 นิ้วน้ำ เนื่องจากการใช้งานจริงนั้นต้องใช้ในขนาดที่มากกว่าดังนั้นจึงคูณค่าความปลอดภัยด้วย 1.5 ดังนั้นความดันตกภายในระบบเท่ากับ 11.616 นิ้วน้ำ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 127.13 ft^3/s และประสิทธิภาพของพัดลมเท่ากับ 0.65 สามารถคำนวณหาขนาดมอเตอร์ของพัดลมได้จากสมการดังนี้

$$\text{BHP} = \frac{\text{CFM} \times \Delta P}{6356 \times \eta}$$

$$\text{BHP} = \frac{127.13 \times 11.616}{6356 \times 0.65}$$

$$\text{BHP} = 0.387\text{HP}$$

เนื่องจากพัดลมที่จัดหามาได้นั้นมีขนาด 1.5 kW และทำความเร็วลมในท่อขนาด 2.5 นิ้ว ที่ใช้สำหรับขนถ่ายเชื้อเพลิงผงจากเครื่องบดสู่ถังเก็บได้ที่ความเร็วลมประมาณ 21.7 m/s ซึ่งมากเกินไป ความต้องการของระบบแต่ถือว่าเป็นผลดีสำหรับการขนถ่ายเชื้อเพลิงในอัตราสูง



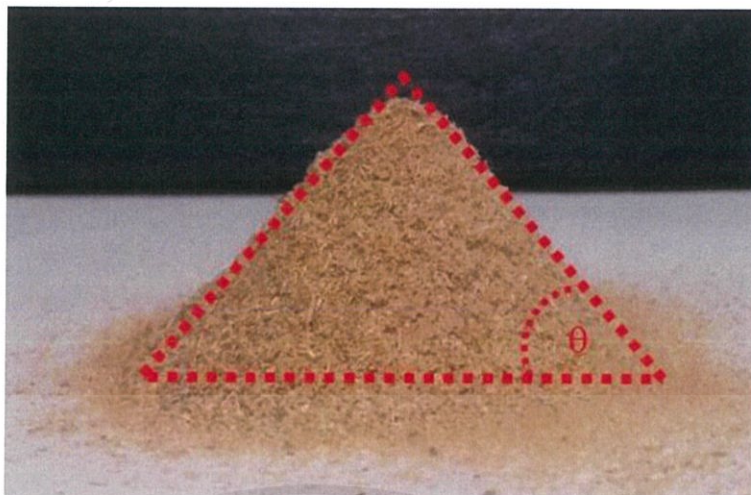
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของพัดลมจากการออกแบบ

ตารางที่ 3.9 แสดงข้อมูลเฉพาะของมอเตอร์พัดลม

BLADE TYPE	Hz	Speed (rpm)	Kw / HP	Cos ϕ
Backward curved blade	50	2840	1.5 / 2.0	0.85

3.7 การออกแบบถังพักฮอปเปอร์

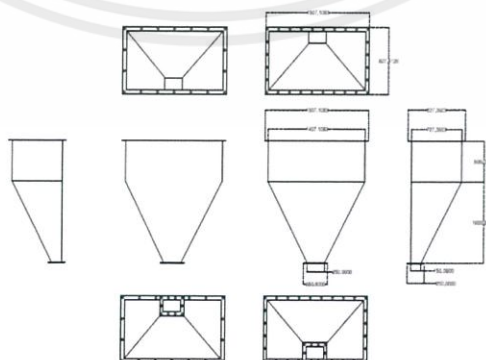
ในการออกแบบถังพักเชื้อเพลิงนั้น มีข้อควรพิจารณาก่อนทำการออกแบบดังนี้ ไม่ว่าจะเป็น ปริมาตรที่ต้องการสมบัติของวัสดุ ความหนาแน่น และมุมมองของวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 3.13 มุมกองวัสดุ [1]

มวลวัสดุเมื่อถูกเทออกจากภาชนะบรรจุก็จะเกิดการเลื่อนไหลกลายเป็นกองวัสดุตามธรรมชาติ มุมที่พื้นผิวของวัสดุกระทำกับพื้นราบจะ เรียกว่า มุมกองวัสดุ (angle of repose) ซึ่งมุมกองวัสดุนี้จะสามารถบอกถึงคุณสมบัติในการไหลของวัสดุ สามารถนำไปคำนวณหาปริมาตรของวัสดุที่อยู่บนอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ และในถังเก็บวัสดุได้อีกด้วย เมื่อพิจารณารูปที่ 3.13 แสดงมุมกองของกลุ่มตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลผง ซึ่งจากรูปจะพบว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวจะมีมุมกองของวัสดุ (θ) อยู่ที่ประมาณ 50 องศา ซึ่งมุมนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณปริมาตรถังพักเชื้อเพลิงต่อไป

จึงทำการออกแบบและจัดสร้างฮอปเปอร์สำหรับบรรจุเชื้อเพลิงผงให้มีความปลอดภัยและมีปริมาตรเพียงพอสำหรับการทดลองเผาเชื้อเพลิงที่ 1 MW ความร้อน อย่างต่อเนื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เมื่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผงมีค่าประมาณ 373 กก./ลบ.ม. โดยรูปทรงต้องคำนึงถึงการกองของเชื้อเพลิงผงให้น้อยที่สุดโดยพิจารณาถึงมุมกองเชื้อเพลิงตามธรรมชาติที่ประมาณ 50 องศา จึงออกแบบให้ด้านที่มีความลาดเอียงของถังพักทั้งสามด้านทำมุม 60 องศากับแนวระนาบ และสามารถติดตั้งอุปกรณ์สั่นเพิ่มเติมเพื่อลดการกองของเชื้อเพลิงและช่วยในการไหลของเชื้อเพลิงออกจากฮอปเปอร์ โดยที่ฮอปเปอร์ที่ออกแบบนั้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 แสดงขนาดโครงสร้างของถังพักเชื้อเพลิง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะฮอปเปอร์จากการออกแบบ [1]

3.7.1 การคำนวณหาปริมาตรของฮอปเปอร์และเวลาในการบรรจุเชื้อเพลิง

เมื่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 373 kg/m^3 ปริมาตรของฮอปเปอร์ที่ออกแบบไว้มีขนาด 1.868 m^3 และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเข้าสู่ฮอปเปอร์เท่ากับ 0.058 kg/s เพราะฉะนั้นสามารถบรรจุเชื้อเพลิงได้ 696.74 kg แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถใส่เชื้อเพลิงให้เต็มความจุได้ เนื่องการขนส่งเชื้อเพลิงซึ่งมวลผ่านไซโคลนสู่ฮอปเปอร์จะมีลักษณะการกองในรูปของภูเขารูปกรวย จึงประมาณความจุเชื้อเพลิงของฮอปเปอร์ไว้ที่

$$m = 0.898 \times 373 = 334.95 \text{ kg}$$

เพราะฉะนั้นฮอปเปอร์ใช้เวลาในการบรรจุเชื้อเพลิงเท่ากับ

$$T = \frac{334.95}{0.058} = 5677 \text{ S หรือ } 1 \text{ ชั่วโมง } 30 \text{ นาที}$$

บทที่ 4

ขั้นตอนการทดลอง

4.1 การทดลองหาขนาดของเชื้อเพลิง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดของเชื้อเพลิงภายหลังจากการบดซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

1. ตวงเชื้อเพลิงที่ได้จากการบด 200 กรัม
2. นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกัน โดยตะแกรงขนาดใหญ่อยู่ชั้นบน เรียงลำดับดังนี้

#425, #355, #300, #180, #150, #75, Sum

3. นำเชื้อเพลิงใส่ไปในตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่าใช้เวลาในการเขย่าประมาณ 20 นาที แล้วนำตะแกรงแต่ละอันไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรงร่วมกับเชื้อเพลิงที่ค้างอยู่บนตะแกรง หักลบน้ำหนักตะแกรงจะได้น้ำหนักของเชื้อเพลิง จดบันทึกค่า

4.2 การทดลองหาประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลน

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลนซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำภาชนะไปรองรับเชื้อเพลิงบริเวณใต้ไซโคลน
2. ทำการปรับความเร็วลมขาเข้าไซโคลนที่ 15 m/s ที่ทางเข้าไซโคลนโดยใช้ Hot wire meter วัดความเร็ว และใช้ Ball valve ปรับความเร็วลม
3. เปิดระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเวลา 30 นาที เพื่อความเสถียรภาพของอัตราการบด
4. ปรับความเร็วมอเตอร์สกรูฟีด โดยปรับกระแสไฟฟ้าที่ 2.8 Hz ซึ่งใช้ Inverter ในการปรับเป็นเวลา 8 นาที
5. ปิดระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลนำเชื้อเพลิงในภาชนะมาชั่งน้ำหนัก จดบันทึกค่า
6. ทำตามข้อ 1-4 จำนวน 3 ครั้งหาค่าเฉลี่ย แล้วบันทึกค่า

4.3 การทดลองหาความเร็วของลมที่เหมาะสมสำหรับป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเร็วของลมที่เหมาะสมสำหรับการขนส่งแบบเบาบาง (Dilute Phase) เพื่อป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาทำการทดลองโดยเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของสมการของ Rizk และสมการของ Schade โดยดำเนินการทดลองดังนี้

1. เตรียมเชื้อเพลิงผงใส่ไว้ในฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงผง
2. เปิดพัดลมสูญญากาศ (ID Fan) ด้านท้ายเตาเผา
3. เปิดพัดลมระบบแรงดันที่ 1 (Primary air Blower)
4. ปรับอัตราการไหลของลมโดยคำนวณจากความเร็วลมที่ต้องการ
5. ปรับความถี่ของสกรูพีด(Hz) โดยคำนวณจากอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่ต้องการ
6. สังเกตการณ์กองภายในห้องด้วยตาเปล่าจากท่อใส่ที่ติดตั้งในแนวนอน
7. จดบันทึกความเร็วของลม อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง และลักษณะการกองภายในห้อง แล้วจึงเปลี่ยนความเร็วลมหรืออัตราการไหลของเชื้อเพลิงตามต้องการ
8. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3-7

4.4 การทดลองหาอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะของเครื่องบดและพัสดม

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะของเครื่องบดและพัสดม ซึ่งข้อมูลนี้เป็นประโยชน์ทางด้านพลังงานที่สิ้นเปลืองภายในระบบซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

- 1.เตรียมอุปกรณ์ Clamp-on power meter และบรรจุเชื้อเพลิงลงใน Hopper
- 2.นำเซนวัด Clamp-on power meter คล้องสายไฟด้าน input และ output ของเครื่องบดแลพัสดม
- 3.เปิดเครื่องบดและพัสดมก่อน 5 นาทีเพื่อให้ระบบเดินเสถียร แล้วจึงปรับความเร็วมอเตอร์สกรูพีด โดยปรับกระแสไฟฟ้าเริ่มต้น 1 Hz ซึ่งใช้ Inverter ในการปรับ
- 4.จับเวลา 5 นาทีแล้วจึงบันทึกค่าของเครื่องบดและพัสดม
- 5.ทำตามข้อ 3-4 โดยปรับความเร็วมอเตอร์สกรูพีด โดยปรับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.18 Hz จนถึง 2.8 Hz แล้วบันทึกค่า

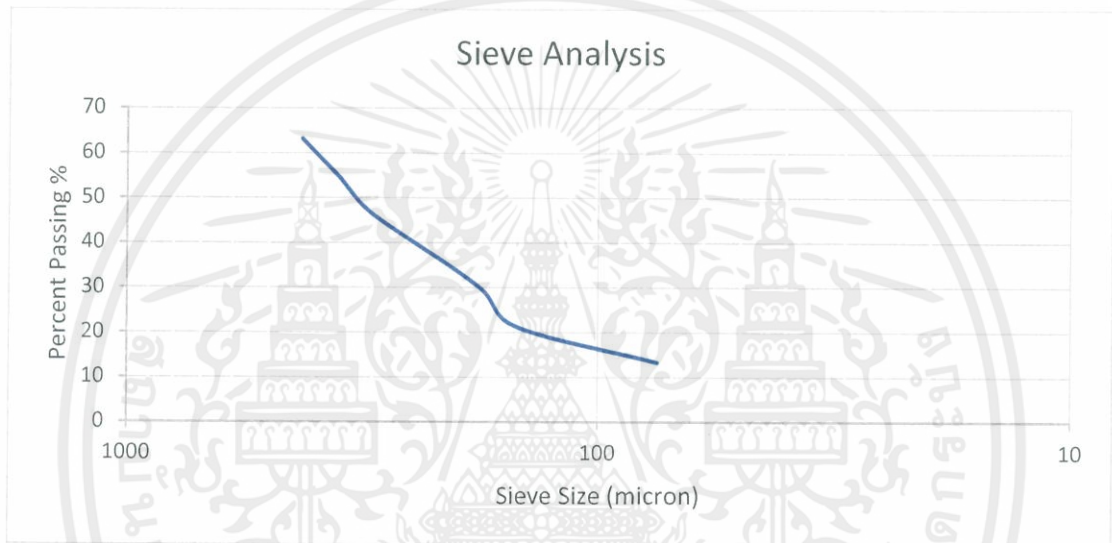
บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองระบบบดเชื้อเพลิง

การทดลองระบบบดเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านเครื่องบดที่ใช้ตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm และ 1.0 mm สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

5.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาขนาดของเชื้อเพลิงที่ผ่านการบด



รูปที่ 5.1 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดของเชื้อเพลิงด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จากรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่อนำตัวอย่างเชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรงที่มีขนาดรู 0.5 mm และ 1.0mm ซึ่งเชื้อเพลิงที่ผ่านตะแกรงนั้นจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 1 mm เมื่อนำไปทดสอบขนาดของเชื้อเพลิงที่แท้จริงผ่านวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) พบว่าเชื้อเพลิงจะมีขนาด 0.075 - 0.355 mm คิดเป็น 40.99% และขนาดเล็กกว่า 0.075 mm คิดเป็น 13.26% แสดงว่าเชื้อเพลิงที่ได้มีความละเอียดกว่าขนาดที่ต้องการคือขนาด 1 mm ซึ่งจะส่งผลดีต่อระบบการเผาไหม้ นั่นคือ ความละเอียดของเชื้อเพลิงชีวมวลทำให้พื้นที่ผิวในการเผาไหม้มีมากขึ้นเทียบกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่กว่าในปริมาตรที่เท่ากันทำให้ระบบเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นจากข้อมูลส่วนนี้จะถูกนำไปเป็นตัวแปรควบคุมในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟุนในอนาคต

5.1.2 วิเคราะห์การทำงานของเครื่องบด

จากความละเอียดของเชื้อเพลิงที่ระบบเผาต้องการนั้น การบดตะแกรงที่มีรูขนาด 0.5 mm และ 1.0 mm ซึ่งเริ่มต้นการใช้งานเครื่องบดนั้นอัตราการผลิตของเครื่องบดมีปริมาณน้อยต่อความต้องการเนื่องจากมีเชื้อเพลิงตกค้างอยู่ภายในเครื่องซึ่งรอการบดละเอียด ดังนั้นจำเป็นต้องบดการละเอียดประมาณ 1 ชั่วโมงเพื่อให้อัตราการผลิตนั้นเสถียรและให้อัตราการผลิตในปริมาณที่ต้องการ

5.2 วิเคราะห์ผลทดลองระบบคัดแยกเชื้อเพลิงแบบไซโคลน

การทดลองระบบคัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลนก่อนจะเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ โดยเป็นการคัดแยกเชื้อเพลิงออกจากอากาศ โดยการทดลองของระบบนี้ จะเป็นการทดลองหาประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลน สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

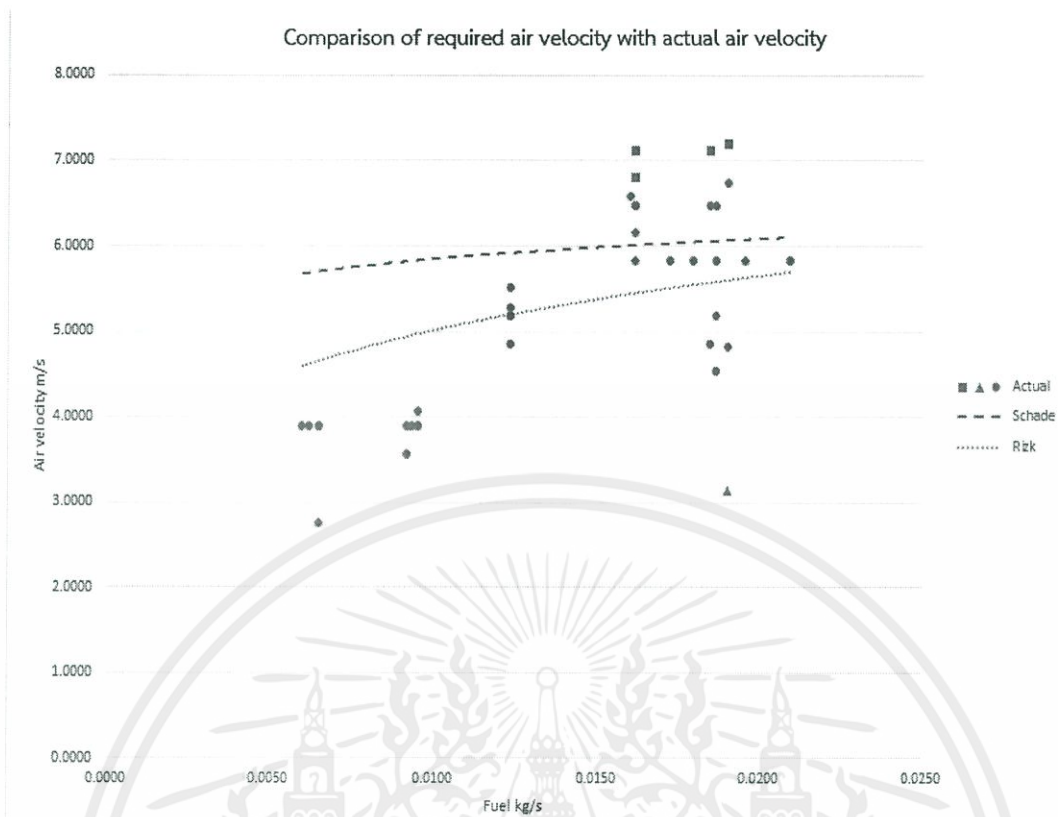
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองหาประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลน

เชื้อเพลิง (kg)	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ไซโคลนสามารถแยกได้ (kg)				ประสิทธิภาพการแยกสารของไซโคลน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.5 kg	0.492	0.496	0.493	0.493	98.60 %

จากตารางที่ 5.1 การทดลองหาประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงของไซโคลนพบว่า ประสิทธิภาพในการคัดแยกเชื้อเพลิงออกจากอากาศสูงเนื่องจากการอนุภาคเชื้อเพลิงโดยส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าขนาดตัดซึ่งมีผลทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงถูกคัดแยกออกจากอากาศได้ถึง 98.60% ซึ่งส่งผลดีต่อระบบการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล ในส่วนที่เหลือนั้นคืออนุภาคเชื้อเพลิงที่หลุดไปพร้อมกับอากาศซึ่งมีอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยน้อยกว่าขนาดตัด และเมื่อนำค่าประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงจากการทดลองเทียบกับค่าจากการคำนวณหาประสิทธิภาพการคัดแยกเชื้อเพลิงในบทที่ 3 คือ 99.62% พบว่าความผิดพลาดเท่ากับ 1.02 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

5.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาความเร็วของลมที่เหมาะสมสำหรับป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ความเร็วลมที่คำนวณได้จากสมการของ Rizk และสมการของ Schade ก็ยังได้การขนส่งด้วยลมในย่านของ Medium Phase ดังแสดงในรูปที่ 5.2 แสดงถึงความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมค่าเพื่อเพื่อให้ได้ความเร็วลมที่เหมาะสมสำหรับการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา เนื่องจากสมการของ Schade ให้ความเร็วขั้นต่ำที่สูงกว่าสมการอื่น จึงได้เลือกใช้สมการของ Schade มาเพื่อทำนายความเร็วลมที่เหมาะสมเพื่อป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา

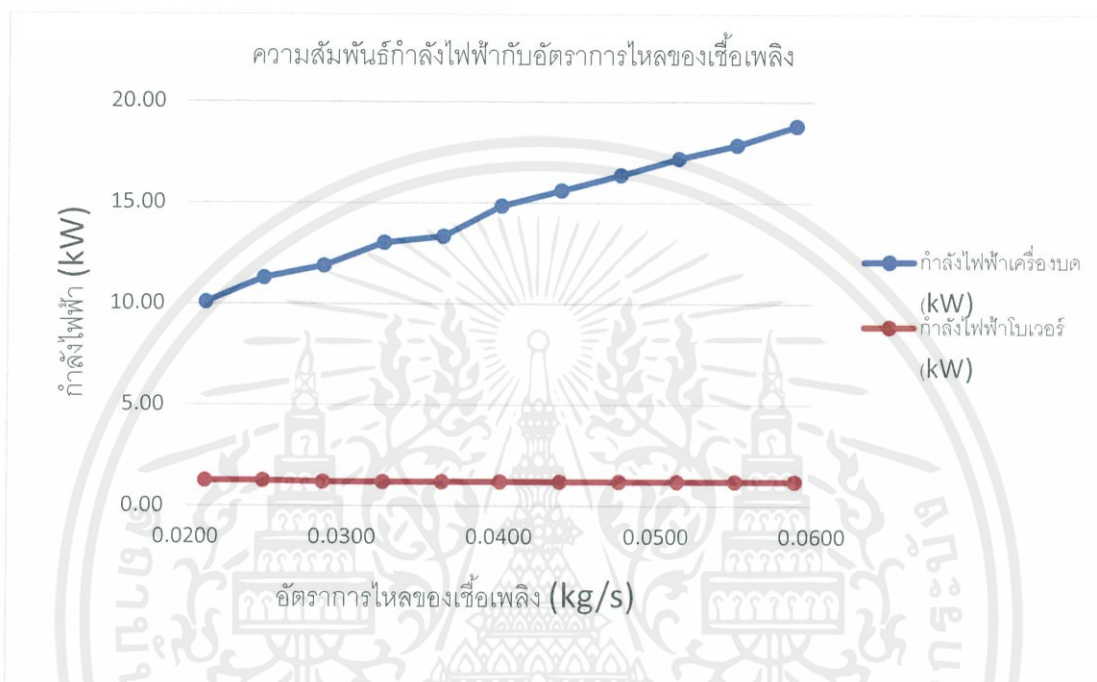


รูปที่ 5.2 แสดงอัตราการไหลเชิงมวลภายในท่อเทียบกับความเร็วลม

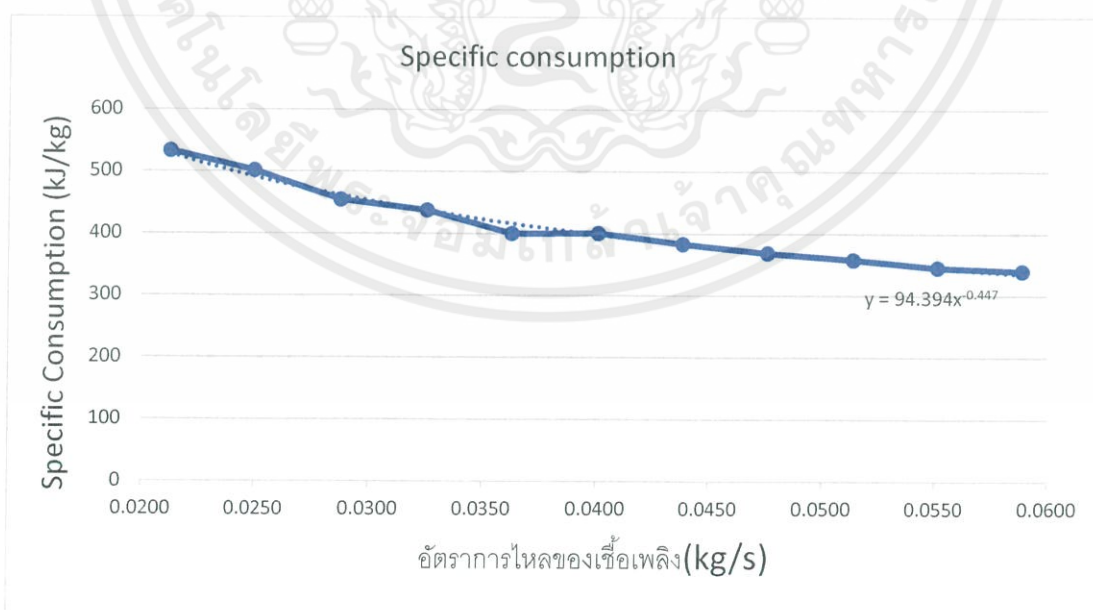
จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าการใช้สมการของ Schade (เส้นประ) มาคำนวณความเร็วลม จะได้ความเร็วที่มากกว่าการใช้สมการของ Rizk (จุดไข่ปลา) การใช้ความเร็วที่ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับสมการทั้งคู่จะทำให้การขนส่งนั้นตกอยู่ในสถานะการขนส่งที่ไม่คงที่ (Medium Phase) ส่งผลให้มีลักษณะการกองของวัสดุภายในท่อแบบไม่คงที่แสดงด้วยจุดวงกลมในรูปที่ 5.2 มีการกองสูงต่ำสลับกัน (Dune Flow) การใช้ความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วที่คำนวณได้มากจะยิ่งทำให้เกิดการตันภายในท่อขนส่งได้ง่ายและจะก่อให้เกิดการสั่นของท่ออีกด้วย จึงควรหลีกเลี่ยงการขนส่งในลักษณะนี้ โดยจุดวงกลมนั้นแสดงถึงจุดที่มีการขนส่งแบบไม่คงที่ มีการกองภายในท่อสูงต่ำสลับกัน (Dune Flow) ส่วนจุดสี่เหลี่ยมเป็นจุดที่ไม่มีการกองภายในท่อ หรือมีการกองน้อยมาก ส่วนจุดกากบาทนั้น แสดงถึงจุดที่มีการตันภายในท่อแล้ว ไม่สามารถขนส่งต่อได้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สมการของ Schade นั้นสามารถนำมาใช้ทำนายความเร็วของลมที่ต้องการได้ แต่ต้องมีการเผื่อค่าความเร็วไว้อย่างน้อย 1.5 เท่า เพื่อหลีกเลี่ยงการขนส่งแบบไม่คงที่ (Dune Flow) ทั้งนี้หากมีการนำสมการไปใช้คำนวณความเร็วขั้นต่ำสำหรับการขนส่งแวนอนของวัสดุชนิดอื่น ก็จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบประกอบด้วย เพื่อให้การขนส่งไม่ตกอยู่ในย่านของการขนส่งแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งจะทำให้ท่อขนส่งเกิดการเสียหายได้

5.4 วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะของเครื่องบดและพัสดม

การทดลองหาอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะของเครื่องบดและพัสดม นั้นเป็นการทดลองหาค่าการใช้พลังงานของเครื่องบดและพัสดมต่ออัตราการไหลเชิงมวลของระบบ สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้ากับอัตราไหลของเชื้อเพลิง



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์อัตราสิ้นเปลืองจำเพาะกับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณารูปที่ 5.3 พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ของสกรูพิดทำให้เชื้อเพลิงไหลมีปริมาณเข้าเครื่องบดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เครื่องบดใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้นด้วยเช่นกัน จากกราฟสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสกรูพิดและกระแสไฟฟ้าเป็นกราฟเส้นตรงดังสมการ $A = 1.306\text{Hz} + 14.286 \text{ Amp}$ และมีกำลังไฟฟ้างสมการ $P = 860.11\text{Hz} + 9402.27 \text{ Watt}$ และจากการพิจารณารูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสกรูพิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสไฟของเครื่องบดเพิ่มขึ้นตาม แต่ค่าของกระแสไฟพัสดลมีค่าคงที่เนื่องจากพัสดลมีอัตราการดูดที่คงที่จึงทำให้กระแสไฟมีค่าคงที่ เมื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้ามอเตอร์สามเฟส โดยค่าความต่างศักย์ของมอเตอร์สามเฟส 380 โวลต์ แสดงดังในรูปที่ 5.4 และเมื่อคำนวณหา Specific Consumption พบว่าเมื่อปรับค่าความถี่ของสกรูพิดเท่ากับ 1 Hz ทำให้เชื้อเพลิงไหลออกมา 0.021 kg/s และทำให้เครื่องบดและพัสดลมีกำลังไฟฟ้างรวมเท่ากับ 11.32 กิโลวัตต์ สามารถนำมาคำนวณหา Specific Consumption พบว่าเมื่อทำการบดเชื้อเพลิงปริมาณ 1 กิโลกรัม ต้องใช้พลังงาน 533 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และเมื่อทำการเพิ่มความถี่สกรูพิดให้จ่ายเชื้อเพลิงเร็วขึ้นจะทำให้ค่า Specific Consumption มากขึ้นและเมื่อนำค่า Specific Consumption ที่ได้มาเขียนกราฟดังกราฟที่ 5.3 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง จึงได้เส้นแนวโน้มได้สมการ $SC = 94.394 X^{-0.447}$ โดยที่ SC คือค่า Specific Consumption (kJ/kg) และ x คืออัตราการจ่ายเชื้อเพลิง (kg/s)

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่าเครื่องบดสามารถบดได้ในอัตราการบดสูงสุดที่ 0.059 kg/s ซึ่งหากทำการบดที่อัตราการขนส่งมากกว่านี้ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการอุดตันในเครื่องบดเนื่องจากมีเชื้อเพลิงที่ยังค้างอยู่ในห้องบด ทำให้เครื่องบดไม่สามารถทำงานได้ถึงอัตราการบดที่ต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบกักเก็บเชื้อเพลิงไว้ ก่อนจะนำไปใช้ระบบการเผาไหม้ซึ่งสามารถใช้เวลาเดินระบบขนส่งเชื้อเพลิงเพื่อกักเก็บเชื้อเพลิง 1 ชั่วโมง 30 นาที ต่อครั้ง โดยอัตราสิ้นเปลืองจำเพาะ (Specific consumption) ของเครื่องบดและพัดลม สามารถหาได้จากสมการ $SC = 94.394 X^{-0.447}$ และไซโคลนสามารถคัดแยกเชื้อเพลิงออกจากอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสกรูพืดสามารถขนส่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบเตาเผาได้ในอัตรา 0.063 kg/s ที่ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 16 m/s ซึ่งอยู่ช่วงความเร็วที่เหมาะสมในการขนส่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบเผาไหม้ ส่งผลให้ไม่มีการกองของเชื้อเพลิงในท่อ แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองระบบการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นพบว่า เมื่อทำการเดินระบบเป็นระยะเวลาที่ยาวนานถุงกรองภายใน Bag house นั้นเกิดการอุดตันและเกิดการกรองของเชื้อเพลิงฝุ่นบริเวณฮอปเปอร์ของ Baghouse จำเป็นต้องถอดถุงกรองและทำความสะอาด ดังนั้นจึงควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความสะอาดถุงกรองและเพิ่มระบบไหลเวียนเชื้อเพลิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชินภัทร ฐรการ. 2015. การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ฉัตรชัย นิยมล. 2005. ระบบกำจัดฝุ่นและการระบายอากาศ, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร.
- [3] พรชัย จงจิตรไพศาล. 2005 ระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยลม, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร.
- [4] วณิชพร คงนคร วิศรุต เฟ็งบุญมา และ ศรัณยู คงสวัสดิ์วรกุล. 2014. การพัฒนาระบบป้อนและบดเชื้อเพลิงต่อเนื่องสำหรับหัวเผาชนิดฝุ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] สิริธิดา สุขทั่ว (2017) การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและเส้นทางการเดินของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลในเครื่องคัดแยกอนุภาคแบบไซโคลอน วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] ASTM Standard C136. 2014. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI:10.1520/C0136- C0136M-14.
- [7] David Mills. 2004. Pneumatic Conveying Design Guide, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [8] John Dirgo and David Leith .1985 Cyclone collection efficiency : Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions. Aerosol Science and Technology. 4, 401-405.
- [9] L. M. Gomes and A. L. Amarante Mesquita. 2014. On the prediction of pickup and saltation velocities in pneumatic conveying. Brazillian Journal of Chemical Engineering. 31, 35-46.
- [10] Paul A. Funk, S. Ed Hughs, Greg A. Holt. 2000. Entrance velocity optimization for modified dust cyclones. Engineering and Ginning. 4, 178-182.

- [11] P.A. Funk, K. Elsayed, K.M. Yeater, G.A. Holt and D.P. Whitelock. 2015. Could cyclone performance improve with reduced inlet velocity. *Powder Technology*. 280, 211-218.
- [12] R. D. Marcus. 1990. *Pneumatic Conveying of Solids a theoretical and Practical approach*, Chapman and Hall, London.
- [13] W. B. Fraulknner and B. W. Shaw. 2005. Efficiency and pressure drop of cyclones across a range of inlet velocity. *Applied Engineering in Agriculture*. 22(1), 155-161.
- [14] Yi-Shun Chen, Shu-San Hsiau. 2008. Cake formation and growth in cake filtration. *Powder Technology*. 192, 217-224.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดลองเพื่อหาขนาดของเชื้อเพลิง (Sieve Analysis)

Sieve # (Micron)	Retain weight (g)	Retain Percent (%)	cumulative weight (g)	cumulative Percent %	Percent Passing (%)
425	74.22	36.86	74.22	36.86	63.14
355	16.8	8.34	91.02	45.21	54.79
300	17.06	8.47	108.08	53.68	46.32
180	32.46	16.12	140.54	69.81	30.19
150	17.87	8.88	158.41	78.68	21.32
75	16.22	8.06	174.63	86.74	13.26
Below 75	26.70	13.26	201.33	100.00	0.00

ตารางที่ ก.2 แสดงปริมาณเชื้อเพลิงที่บดได้เปรียบเทียบกับกันจากการติดตั้งตะแกรงต่างขนาด

Sieve # (Micron)	ตะแกรง 1.0 mm และ 1.0 mm Retain Weight (g)	ตะแกรง 0.5 mm และ 1.0 mm Retain Weight (g)
425	36.86	38.65
355	8.34	10.12
300	8.47	10.02
180	16.12	18.60
150	8.88	9.50
75	8.06	7.05
Below 75	13.26	6.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 แสดงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงเทียบกับความเร็วลมที่ใช้และความเร็วลมที่คำนวณได้ รวมถึงรูปแบบการไหล

อัตราการไหล เชิงมวลของ เชื้อเพลิง (kg/s)	อัตราการ ไหลเชิงมวล ของอากาศ (kg/s)	ความเร็ว ของอากาศ (m/s)	ความเร็วขั้นต่ำ จากสมการของ Rizk (m/s)	ความเร็วขั้นต่ำ จากสมการ ของ Schade (m/s)	รูปแบบ ของการ ไหล
0.0065	0.0104	2.7562	5.0804	5.8718	Dune
0.0095	0.0154	4.0678	5.0683	5.8671	Dune
0.0123	0.0199	5.2694	5.0676	5.8669	Dune
0.0160	0.0249	6.5811	5.1317	5.8917	Dune
0.0190	0.0272	7.1900	5.2760	5.9468	Dilute
0.0190	0.0255	6.7333	5.3908	5.9898	Dune
0.0190	0.0183	4.8257	6.0129	6.2134	Dune
0.0062	0.0147	3.8865	4.4720	5.6259	Dune
0.0065	0.0147	3.8865	4.5390	5.6540	Dune
0.0095	0.0147	3.8865	5.1446	5.8967	Dune
0.0065	0.0147	3.8865	4.5390	5.6540	Dune
0.0093	0.0147	3.8865	5.1061	5.8818	Dune
0.0123	0.0196	5.1820	5.0954	5.8777	Dune
0.0161	0.0245	6.4775	5.1736	5.9078	Dilute
0.0185	0.0270	7.1252	5.2386	5.9326	Dilute
0.0185	0.0184	4.8581	5.9395	6.1879	Dune
0.0190	0.0119	3.1416	6.9215	6.5138	Blockage
0.0060	0.0147	3.8865	4.4204	5.6040	Dune
0.0092	0.0147	3.8865	5.0800	5.8717	Dune
0.0092	0.0135	3.5626	5.2271	5.9282	Dune
0.0095	0.0147	3.8865	5.1446	5.8967	Dilute
0.0123	0.0196	5.1820	5.0954	5.8777	Dune
0.0123	0.0184	4.8581	5.2044	5.9196	Dune
0.0123	0.0208	5.5058	4.9952	5.8386	Dune
0.0161	0.0245	6.4775	5.1736	5.9078	Dune
0.0161	0.0233	6.1536	5.2614	5.9412	Dune

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) แสดงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงเทียบกับความเร็วลมที่ใช้และความเร็วลมที่คำนวณได้ รวมถึงรูปแบบการไหล

อัตราการไหล เชิงมวลของ เชื้อเพลิง (kg/s)	อัตราการ ไหลเชิงมวล ของอากาศ (kg/s)	ความเร็ว ของอากาศ (m/s)	ความเร็วขั้นต่ำ จากสมการของ Rizk (m/s)	ความเร็วขั้นต่ำ จากสมการ ของ Schade (m/s)	รูปแบบ ของการ ไหล
0.0161	0.0221	5.8297	5.3555	5.9767	Dune
0.0161	0.0257	6.8013	5.0915	5.8762	Dune
0.0161	0.0270	7.1252	5.0145	5.8462	Dune
0.0187	0.0245	6.4775	5.4256	6.0028	Dune
0.0187	0.0196	5.1820	5.8374	6.1520	Dune
0.0187	0.0172	4.5342	6.0986	6.2430	Dune
0.0187	0.0221	5.8297	5.6163	6.0728	Dune
0.0179	0.0221	5.8297	5.5443	6.0465	Dune
0.0172	0.0221	5.8297	5.4704	6.0194	Dune
0.0195	0.0221	5.8297	5.7002	6.1031	Dune
0.0209	0.0221	5.8297	5.8281	6.1487	Dune
0.0185	0.0245	6.4775	5.4049	5.9951	Dune

หมายเหตุ: Dune หมายถึงการไหลแบบไม่คงที่มีวัสดุกองสูงต่ำสลับกัน (Dune Flow) และ Dilute หมายถึงการไหลแบบเบาบางไม่มีการกองของวัสดุภายในท่อและ Blockage หมายถึงมีการอุดตันภายในท่อ

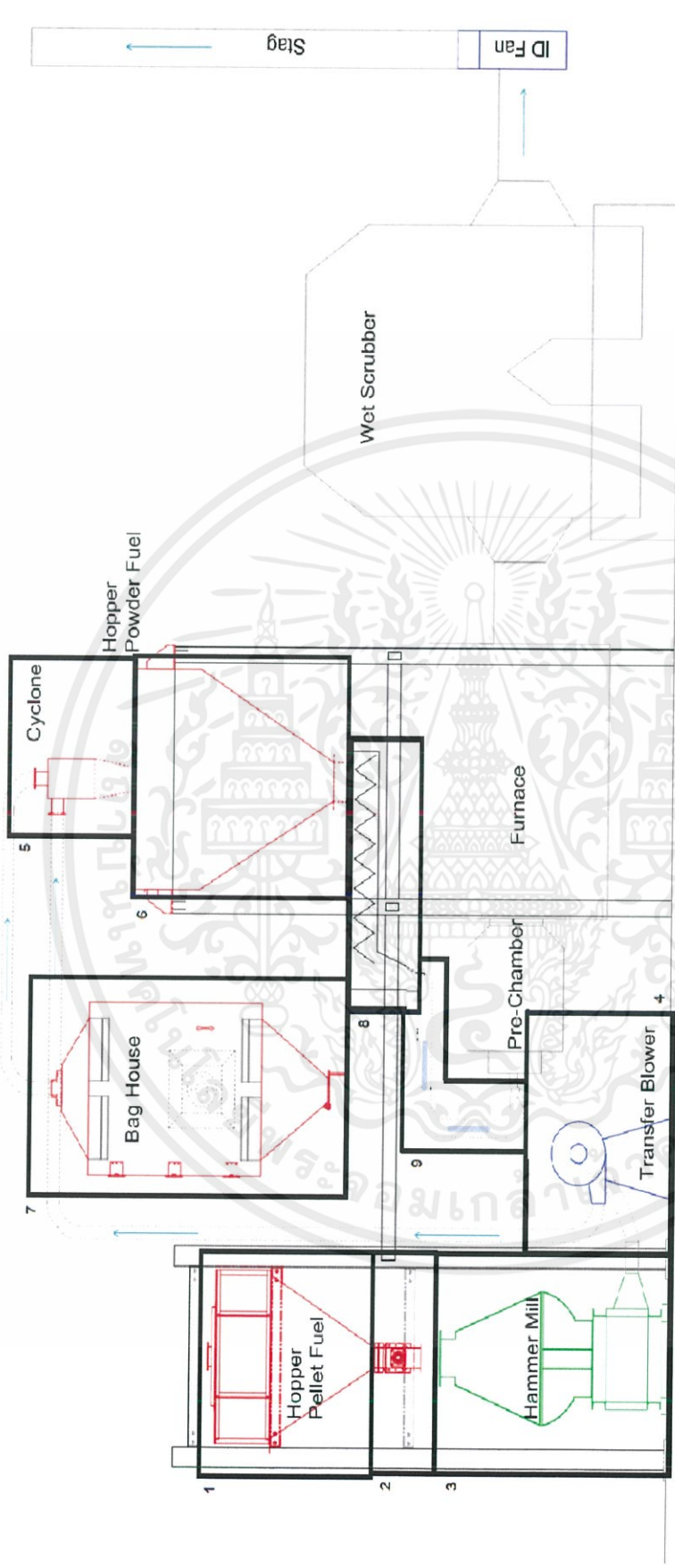
ตารางที่ ก.4 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องบดและพัลลคมระบบแรงดัน

อัตราการไหล (kg/s)	กำลังไฟฟ้าของเครื่องบด (kW)	กำลังไฟฟ้าของพัลลคมระบบแรงดันสำหรับขนส่ง (kW)	กำลังไฟฟ้ารวม (kW)	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Consumption)	การใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงเทียบกับความร้อนที่ได้ (%)
0.0212	10.07	1.25	11.32	533.1562	3.30%
0.0250	11.29	1.25	12.54	501.5661	3.10%
0.0288	11.88	1.18	13.06	454.2192	2.81%
0.0325	13.03	1.18	14.22	437.0551	2.70%
0.0363	13.33	1.18	14.51	399.8766	2.47%
0.0401	14.84	1.18	16.03	400.0832	2.48%
0.0438	15.60	1.18	16.78	382.9826	2.37%
0.0476	16.36	1.18	17.54	368.5878	2.28%
0.0514	17.18	1.18	18.36	357.5854	2.21%
0.0551	17.84	1.18	19.02	345.1008	2.14%
0.0589	18.79	1.18	19.98	339.2427	2.10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

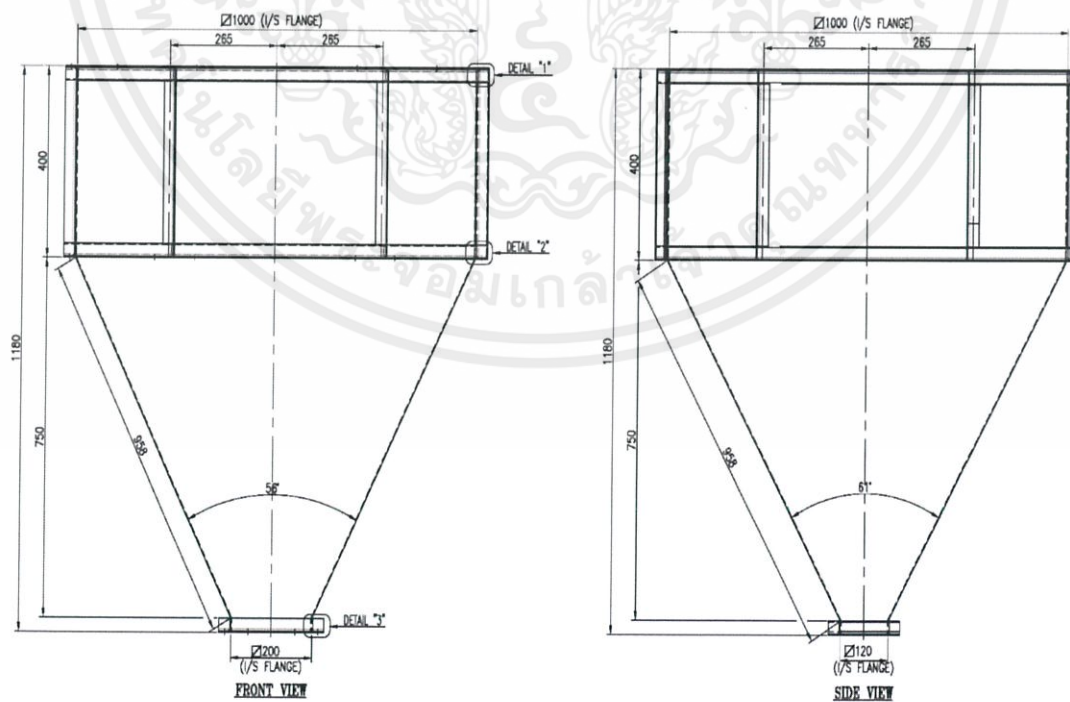


รูปที่ ข.1 แสดงการวางระบบทั้งหมด

หมายเหตุ : บริเวณส่วนที่มีการทำสัญลักษณ์คือ ระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล



รูปที่ ข.2 แสดงลักษณะฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Hopper pellet fuel)

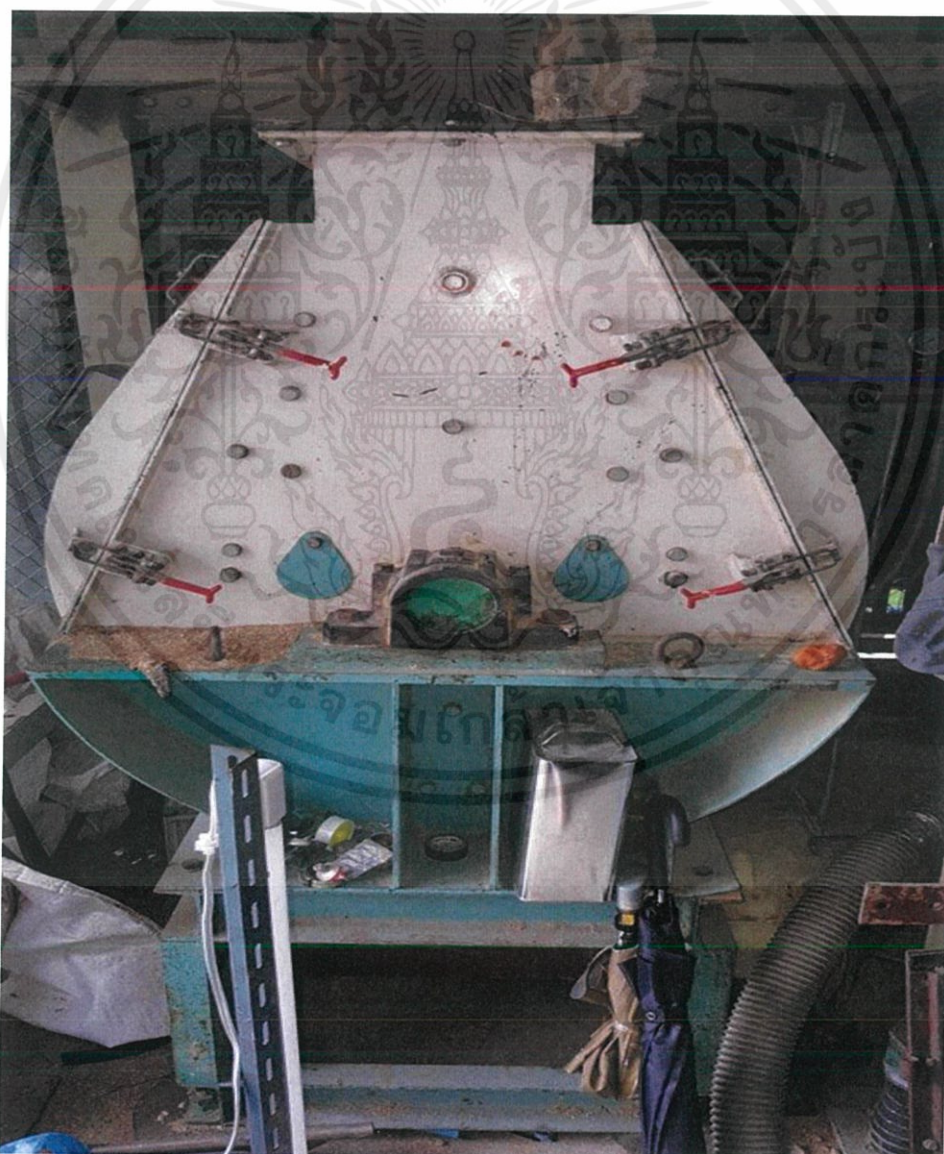


รูปที่ ข.3 แสดงขนาดของฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Hopper pellet fuel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 แสดงสกรูพืดสำหรับลำเลียงเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Screwfeed to Hammermill)



รูปที่ ข.5 แสดงลักษณะเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง (Hammer Mill)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 แสดงพัดลมระบบแรงดัน (Transfer Blower)



รูปที่ ข.7 แสดงลักษณะของไซโคลนโดยสัดส่วน Stairmand (Cyclone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.8 แสดงลักษณะฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงผง (Hopper Power Fuel)



รูปที่ ข.9 แสดงลักษณะเครื่องตักฝุ่นแบบผ้ากรอง (Bag House)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.10 แสดงลักษณะสกรูพืดลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง (Screwfeed to Pre Chamber)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้