การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงผงก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้

INVESTIGATION ON FACTORS AFFECTING TRANSPORTATION BEFORE ENTERING TO THE COMBUSTION CHAMBER

ชนน สุสังกรกาญจน์
วรรณพงศ์ ขุนโต
ศุภกฤต สนธิศิริกฤตย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงผงก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้

INVESTIGATION ON FACTORS AFFECTING TRANSPORTATION BEFORE ENTERING TO THE COMBUSTION CHAMBER

ชนน สุสังกรกาญจน์

วรรณพงศ์ ขุนโต

ศุภกฤต สนธิศิริกฤตย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATION ON FACTORS AFFECTING TRANSPORTATION BEFORE ENTERING TO THE COMBUSTION CHAMBER

CHANON SUSANGKARAKAN

WANNAPONG KHUNTO

SUPAKIT SONTISIRIKIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงผงก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้

INVESTIGATION ON FACTORS AFFECTING TRANSPORTATION BEFORE ENTERING TO THE COMBUSTION CHAMBER

ผู้จัดทำ

1. นาย ชนน สุสังกรกาญจน์ รหัสประจำตัว 57010237
2. นาย วรรณพงศ์ ขุนโต รหัสประจำตัว 57011109
3. นาย ศุภกฤต สนธิศิริกฤตย์ รหัสประจำตัว 57011257

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงผงก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้

นายชนน สุสังกรกาญจน์ 57010237
นายวรรณพงศ์ ขุนโต 57011109
นายศุภกฤต สนธิศิริกฤตย์ 57011257
รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น ให้สามารถจ่ายเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาขนาด 500กิโลวัตต์ได้อย่างราบรื่นและมีความน่าเชื่อถือสูง เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษาคือไม้ยางพาราอัดเม็ด โดยใช้เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยงบดเชื้อเพลิง จากนั้นขนส่งด้วยลมเข้าสู่ฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงผงและลำเลียงเข้าสู่ท่อนำเชื้อเพลิงเพื่อจ่ายเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งระบบเดิมพบว่าเชื้อเพลิงเกิดการอัดตัวแน่นในฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงผง เนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิงและระยะเวลาในการเก็บเชื้อเพลิงในฮอปเปอร์รวมถึงระบบขนส่งเชื้อเพลิงเกิดการติดขัดเนื่องจากเกิดการกองของเชื้อเพลิงภายในท่อนำเชื้อเพลิงเนื่องจากลมในท่อมีความเร็วไม่เพียงพอสำหรับการพาเชื้อเพลิงผงให้ลอยอยู่ในกระแสลม ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงโดยการติดตั้งตัวสั่นสะเทือนและหัวฉีดอากาศเพื่อทำลายโครงสร้างการอัดตัวแน่นในฮอปเปอร์ รวมถึงออกแบบและติดตั้งหัวฉีดอากาศเข้าไปในห้องผสมเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มโมเมนตั้มและความเร็วของอากาศเพื่อลดปัญหาการกองของเชื่อเพลิงผงภายในท่อนำเชื้อเพลิง อีกทั้งในระบบเก่า โบลเวอร์มีกำลังไม่พอสำหรับการลำเลียงเชื้อเพลิงที่อัตรา 500 kW (ปัจจุบันปฏิบัติการสูงสุดที่ 300 kW)ผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ปัญหาโดยทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสร์ของการไหลแบบเบาบางของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นเพื่อทำนายความเร็วและความดันสูญเสียในระบบ และนำค่าที่ได้มาพัฒนาระบบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATION ON FACTORS AFFECTING TRANSPORTATION BEFORE ENTERING TO THE COMBUSTION CHAMBER

Chanon Susangkarakan 57010237
Wannapong Khunto 57011109
Supakit Sontisirikit 57011257
Assoc.Prof.Dr.JaruwatCharoensuk Advisor
Year 2560

ABSTRACT

This project aims to develop feeding system for biomass that enables the effective transportation of fuel at 500 kilo-watts. The biomass fuel, wood pellets from rubber, will be pulverized by hammer mills to ensure appropriate size, and transported by pneumatic conveyor system to be stored in dust fuel hopper. Based on the current feeding system, pulverized fuel in hopper silo tends to get condensed due to the humidity and storage time, as well as impaired pneumatic system caused by the condensation of fuel in the pipe system, as a result of inadequate velocity to deliver the pulverized biomass fuel. Therefore, the researchers devised means of improving the current system by designing and installing nozzle in mixing chamber, which will help enhance momentum and velocity of air to reduce the condensation of the fuel in the feeding system. Vibrator and fluidizer have also been installed to destroy the condensation structure of fuel in hopper silo. Furthermore, the blower in the current feeding system does not deliver adequate power to be operated at 500 kilo-watts (currently at only 300 kilo-watts). The study on mathematical models of dilute phase to predict mixture velocity and pressure drop in feeding system is, therefore, deemed necessary to develop feeding system in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ก็เพราะความกรุณาที่ให้ความช่วยเหลือของ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้และเป็นที่ปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม และช่วยให้ความรู้ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ นายฉัตรเฉลิม แก้วชมภู ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภิรัตนากูล นายโชติรวี ฉัตรพัฒนศิริ และ ดร.นภศูล วงษ์วานิช ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงงานนี้ ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงานนี้ และขอกราบขอบพระคุณ คณะอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ และอบรมสั่งสอนอย่างสุดความสามารถ

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆ ด้านอันหาเปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ชนน สุสังกรกาญจน์
วรรณพงศ์ ขุนโต
ศุภกฤต สนธิศิริกฤตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 เหตุผลและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 การขนถ่ายวัสดุด้วยลมเบื้องต้น	7
2.2 การแบ่งชนิดของระบบขนส่งวัสดุด้วยลม	9
2.3 ไดอะแกรมการไหลในท่อ	12
2.4 ความเร็วลมในการขนถ่ายวัสดุตามแนวดิ่งและแนวระดับ	13
2.5 การคำนวณความดันสูญเสียในการไหลแบบเบาบางของการขนถ่ายวัสดุด้วยลมโดยใช้แบบจำลองไฮโดรไดนามิกส์	17
2.6 ไซโล	23
2.7 อุปกรณ์การสั่นสะเทือนระบบลม	25
2.8 ฟลูอิไดเซชัน หรือ การก่อสภาพการไหล	26
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	29
3.1 ระบบชุดทดลองเดิม	29
3.2 การปรับปรุงแก้ไขระบบ	32
3.2.1 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับกำลังเผา 500 kW	32
3.2.2 การออกแบบและแก้ไขระบบดูดเชื้อเพลิงในเครื่องบด	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.2.3 การออกแบบและแก้ไขอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน 34

3.2.4 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์สำหรับพัดลมของระบบอากาศปฐมภูมิ 34

3.2.5 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิง 36

3.2.6 การคำนวณหาความดันสูญเสียในท่อส่งเชื้อเพลิง 37

3.2.7การคำนวณหาแรงที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์สั่นสะเทือนด้วยลม 39

3.2.8การออกแบบสกรูลำเลียงขนส่งเชื้อเพลิง 42

3.2.9การคำนวณและการออกแบบเครื่องก่อสภาพของไหล 44

บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 46

4.1 วัตถุประสงค์ 46

4.2 แนวทางการทดลอง 46

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 47

4.4ขั้นตอนการทดลอง 47

4.4.1 การศึกษาการไหลของเชื้อเพลิงผงในไซโล 47

4.4.2 การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงโดยใช้ฟลูอิไดเซอร์เบด 48

4.4.3การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องสั่นสะเทือน 48

4.4.4การสอบเทียบค่าของสกรูขนส่งเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู้ห้องเผาไหม้เมื่อใช้ควบคู่กับเครื่องป้องกันการติดขัดที่เหมาะสม 48

4.4.5ศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงโดยใช้ท่อยืดหยุ่นขนาด 3 นิ้ว 48

4.4.6ศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงโดยใช้ท่อยืดหยุ่นขนาด 2.5 นิ้ว 49

บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง 50

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองการศึกษาการไหลของเชื้อเพลิงในไซโล 50

5.1.1ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้เครื่องมือป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโล 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

5.1.2 ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิง 51

5.1.3วิเคราะห์ผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโลแบบสั่นสะเทือน 52

5.1.4 ผลการสอบเทียบค่าของสกรูขนส่งเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู้ห้องเผาไหม้เมื่อใช้ควบคู่กับเครื่องสั่นสะเทือน 53

5.2 การวิเคราะห์ลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิง 53

5.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ ในท่อแบบยืดหยุ่นขนาด 3 นิ้ว โดยใช้อัตราความร้อนสูงสุดไม่เกิน 500 kw 54

5.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ ในท่อแบบยืดหยุ่นขนาด 2.5 นิ้ว โดยใช้อัตราความร้อนสูงสุดไม่เกิน 500 kW 60

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 67

6.1 สรุปผลการทดลอง 67

6.1.1 ผลการแก้ปัญหาการอัดตัวแน่นของเชื้อเพลิงในไซโล โดยใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดแบบสั่นสะเทือน 67

6.1.2 ผลการแก้ปัญหาการอุดตันของเชื้อเพลิงในลำเลียงอากาศปฐมภูมิ 68

6.2 ข้อเสนอแนะ 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุของเชื้อเพลิง	32
3.2 อัตราการไหลของอากาศ	33
3.3 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามส่วน	33
3.4 แสดงอัตราเร็วของท่อที่กิโลวัตต์ความร้อนต่างๆ	36
3.5 แสดงค่าแฟกเตอร์ความโค้ง	38
3.6 เปรียบเทียบความดันสูญเสียที่ส่อส่งเชื้อเพลิง ในแต่ละสภาวะ	39
3.7 แสดงการเลือกใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนด้วยลม	40
3.8 ผลการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ	42
3.9 ผลการเปรียบเทียบอัตราการป้อนเชื้อเพลิง	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบเบื้องต้นที่สำคัญของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม	8
2.2 ลักษณะการไหลของวัสดุในท่อในรูปแบบการขนส่งแบบต่าง ๆ	10
2.3 ไดอะแกรมการไหลในท่อ	14
2.4 แสดงลักษณะรูปแบบของไซโล	23
2.5 แสดงลักษณะรูปแบบการไหลในฮอปเปอร์	24
2.6 แสดงลักษณะเกิดการกองเชื้อเพลิงภายในฮอปเปอร์	24
2.7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม	25
2.8 แสดงตัวอย่างการใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม	26
2.9 แสดงตัวอย่างการใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม แบบ AIR KNOCKER	26
2.10 แสดงลักษณะทั่วไปของฟลูอิดไดส์เซชัน	27
2.11 แสดงกราฟระหว่างความดันสูญเสียที่ท้องพื้นกับความเร็วของอากาศ	27
3.1 แผนภาพรวมของระบบผลิตความร้อนจากชีวมวลฝุ่น	29
3.2 แผนภาพองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง	30
3.3 ลักษณะถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง (hopper) และสกรูลำเลียงติดตั้งเข้ากับโครงสร้าง	30
3.4 อุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้	31
3.5 โบลเวอร์ และวาล์วปรับอัตราการไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง	31
3.6 การออกแบบระยะติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน	34
3.7 แบบจำลองไซโลกักเก็บ	40
3.8 กราฟ log scale แสดงความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นกับอัตราส่วนความถี่	41
3.9 แสดงถึงการจำแนกอนุภาคในสภาวะอากาศที่อุณหภูมิห้อง	44
3.10 แสดงไดอะแกรมการไหลของอนุภาคของแข็ง	45
5.1ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้เครื่องมือป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโล	50
5.2 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเชื้อเพลิงกับความดันที่ใช้ในอุปกรณ์ป้องกันการติดแบบสั่นสะเทือน เมื่อทดลองที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 2.42 Hz	51
5.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่คำนวณได้ทางทฤษฎีกับอัตราการไหลที่เกิดขึ้น	52
5.4 แสดงถึงผลการสอบเทียบค่าของสกรูขนส่งที่ความถี่ต่างๆ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

5.5 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 150 kW 54

5.6 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 200 kW 55

5.7 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 250 kW 56

5.8 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 300 kW 57

5.9 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 350 kW 58

5.10 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 400 kW 59

5.11 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 450 kW 60

5.12 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 150 kW 61

5.13 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 200 kW 62

5.14 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 250 kW 63

5.15 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 300 kW 64

5.16 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 350 kW 65

5.17 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 400 kW 66

5.18 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 450 kW 67

5.19 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 500 kW 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 เหตุผลและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานชีวมวลทางเลือกกำลังได้รับความสนใจในการนำมาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล แหล่งพลังงานชีวมวลทางเลือกที่หาได้ง่าย อย่างเช่น พลังงานชีวมวลอัดเม็ด (wooden pellets) ซึ่งทำมาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และเศษไม้จากอุตสาหกรรม ซึ่งมีค่าความชื้นน้อย มีขี้เถ้าน้อย ให้อัตราการเผาสม่ำเสมอ เหมาะแก่การใช้กับเตาเผาสำหรับอุตสาหกรรม เราจึงได้ศึกษาและการทดลองเกี่ยวกับเครื่องจักรลำเลียงเชื้อเชื้อเพลิงที่ใช้ที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้เพื่อพัฒนาและทำให้ระบบขนส่งเชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อทำให้เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถนำมาใช้ได้จริงในอนาคต

เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการต่อเนื่องจากปีที่แล้ว ซึ่งเตาเผาเชื้อเพลิงมีอัตราในการเผาไหม้ที่ 300 KW และยังไม่สามารถขนส่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง เป้าหมายของการพัฒนาระบบในครั้งนี้คือ สามารถลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เผาได้อย่างต่อเนื่อง และเพิ่มอัตราการเผาไหม้ในอัตราที่สูงขึ้น แต่ปัญหาที่พบในปัจจุบันคือ เกิดการอัดตัวแน่นของเชื้อเพลิงในไซโล และการอุดตันของเชื้อเพลิงในท่อลำเลียง ส่งผลให้การไม่สามารถลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการลำเลียงเชื้อเพลิงจะเป็นการแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โครงการพัฒนานี้สามารถพัฒนาประสิทธิภาพในการลำเลียงเชื้อเพลิงให้ดีขึ้น เพื่อรองรับต่ออัตราการใช้งานที่สูงขึ้นในอนาคต

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของเชื้อเพลิงในไซโลขณะที่ทำการลำเลียงเชื้อเพลิง เพื่อทำการปรับปรุงระบบจ่ายเชื้อเพลิงให้มีเสถียรภาพมากขึ้น

1.2.2 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการที่เกี่ยวข้องกับการขนถ่ายวัสดุด้วยลม และนำบทพิสูจน์ของแบบจำลองดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับระบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 ศึกษาพฤติกรรมการไหลของเชื้อเพลิงชนิดผงภายในท่อลำเลียงเชื้อเพลิง เพื่อทำการปรับปรุงระบบท่อลำเลียงให้สามารถลำเลียงเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอัดตัวแน่นของเชื้อเพลิงในไซโล นอกเหนือจากความชื้นสะสมในเชื้อเพลิงแล้ว ระยะเวลาในการสะสมเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้ยังเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการอัดตัวของเชื้อเพลิง ซึ่งการใช้แรงกระตุ้นที่เหมาะสมในการทำลายโครงสร้างของเชื้อเพลิงนั้น จะช่วยให้เชื้อเพลิงถูกลำเลียงออกจากไซโลได้ต่อเนื่อง ส่งผลให้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง

และปัจจัยที่สำคัญในการขนส่งวัสดุด้วยลมนั้น นอกเหนือจากความดันสูญเสียซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างอากาศกับผนังท่อลำลียงแล้ว ยังมีความดันสูญเสียจากแรงเสียดทานระหว่างเชื้อเพลิงกับผนังท่อ และแรงต้านอากาศของเชื้อเพลิง ซึ่งการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาถึงปัจจัยดังกล่าวนี้ จะสามารถคำนวณค่าความเร็วลมที่เพียงพอต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง และมุมของท่อที่เหมาะสมกับการลำเลียงเชื้อเพลิง นอกจากนี้แล้ว บทพิสูจน์ของแบบจำลองดังกล่าวจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผงในอัตราที่สูงขึ้นได้ในอนาคต

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ทำการศึกษาในส่วนของไซโลเก็บเชื้อเพลิงและท่อลำเลียงเชื้อเพลิง

1.4.2 ใช้ระบบลำเลียงวัสดุด้วยลมปฐมภูมิในการขนถ่ายเชื้อเพลิงชีวมวลผงจากไซโลเข้าสู่ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง

1.4.3 วัสดุที่ใช้คือเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (ไม้ยางพารา)

1.4.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นมีขนาดไม่เกิน 1 mm

1.4.5 อัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงสูงสุด 0.030939 Kg/s หรือเทียบเท่าอัตราความร้อน 500 KW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการลำเลียงเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

1.5.2 ทำการตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบลำเลียงเชื้อเพลิง ระบบการเก็บเชื้อเพลิง

1.5.3 เก็บข้อมูลการทำงานของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิที่อัตราความร้อน 300 KW

1.5.4 ออกแบบการคำนวณสำหรับการลำเลียงเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิที่อัตราความร้อน 400 KW และ 500 KW

1.5.5 ออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการลำเลียงเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิ

1.5.6 ทำการสอบเทียบและติดตั้งอุปกรณ์วัด

1.5.7 ตรวจสอบการทำงานว่าสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์

1.5.7 วิเคราะห์ผลการพัฒนาระบบลำเลียงเชื้อเพลิง

1.5.8 สรุปผลการดำเนินโครงการ

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถใช้ความรู้และประสบการณ์เพื่อพัฒนาระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลในท่ออากาศปฐมภูมิ

1.6.2 สามารถพัฒนาระบบลำเลียงเชื้อเพลิงให้สามารถลำเลียงเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่องตามวัตถุประสงค์

1.6.3 สามารถนำระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมจริง

1.6.4 เพิ่มทักษะในการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าในระหว่างปฏิบัติงาน

1.6.5 ฝึกฝนทักษะในการวิเคราะห์ระบบเพื่อทราบปัญหาของระบบและหาวิธีในการแก้ไขปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นในด้านการออกแบบ และพัฒนาระบบการลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยอากาศให้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง สำหรับหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งชนิดผงขนาดไม่เกิน 500 kW โดยการปรับปรุงส่วนกักเก็บเชื้อเพลิง รวมถึงการทดสอบหาความเร็วอากาศที่ใช้ลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลในท่ออากาศปฐมภูมิที่เหมาะสม ซึ่งในการออกแบบนั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการทำงาน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งต้องศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด คุณสมบัติ และปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันการละเมิดสิทธิบัตรของผู้วิจัยท่านอื่น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันนั้นมีนักวิจัยทั้งได้ศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ผู้วิจัยกำลังศึกษาจำนวนมาก อาทิเช่น

ปี	ผู้วิจัย	สิ่งที่น่าสนใจ
1964	Andrew W. Jenike	ศึกษาการออกแบบไซโลกักเก็บเพื่อง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคืออัตราการไหลปล่อยของสิ่งที่กักเก็บไว้ในไซโล ซึ่งพื้นที่ช่องว่างของอากาศกับสิ่งของที่กักเก็บก็มีผลต่อการออกแบบไซโลเช่นกัน
1997	Karsten H.K. Wodrich	ศึกษาการใช้โปรแกรมในการออกแบบระบบลำลียงด้วยอากาศแบบเบาบางทั้งแบบใช้ลมผลักและแบบใช้สูญญากาศ
2007	Robert P. Hesketh	ศึกษาการเกิดการก่อสภาพของไหลภายในหอทดลอง พร้อมทั้งวัดค่าความดันซึ่งเป็นปริพันธ์โดยตรงกับอัตราการไหลของอนุภาคภายในหอทดลอง และคำนวณค่าการก่อตัวสภาพของไหลต่ำที่สุดจากข้อมูลการทดลองและเปรียบเทียบกับการคำนวณจากทางทฤษฎี
2010	Xu Chuanlong และคณะ	ในการขนถ่ายถ่านหินด้วยลมของท่อแนวนอนและใช้ ECT ในการเฟ้าดูรูปแบบการไหล พบว่าการเพิ่มความเร็วในท่อแนวนอนจะทำให้การไหลเปลี่ยนจากเต็มท่อเป็นการไหลแบบแบ่งชั้น และเทอมของความดันและความหนาแน่นสามารถนำมาประกอบการอธิบายลักษณะการไหลได้
2011	Xingliang Cong และคณะ	ได้ทำการเปรียบเทียบการขนถ่ายวัสดุในท่อแนวตั้งโดยใช้ CO2 และอากาศเป็นตัวขนถ่าย พบว่าในแง่ของลักษณะการไหลจะให้ผลที่ไม่แตกต่างกันคือเมื่อเกิด Gas slug จะสามารถตรวจวัดลูกคลื่นความดันขนาดใหญ่ได้ แต่ที่อัตราขนถ่ายถ่านหินเท่ากัน ความเร็วของวัสดุและความดันแตกต่างของ CO2 จะน้อยกว่าอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Guan Qingliang และคณะ	ได้ศึกษารูปแบบการไหลของการลำเลียงด้วยลมสำหรับถ่านหินผงในท่อแนวนอน โดยถ่านหินบดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 69 ไมครอนและมีความหนาแน่นที่ 1444 kg / m3 โดยทดลองการลำเลียงผงด้วยลมโดยเงื่อนไขแรงดันสูงสุดที่ 0.84 MPa ซึ่งรูปแบบการไหลและความดันแตกต่างในท่อจะใช้วิธีการวัดด้วยเทคโนโลยี ECT จะแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการที่ครอบคลุมของรูปแบบการไหลกับความเร็วของอากาศที่ลดลงบริเวณผิวหน้าของผงในท่อ เมื่อความดันแตกต่างมีความผันผวนในรูปแบบที่แตกต่างกัน ลักษณะการไหลและความผันผวนของความดันแตกต่าง มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความผันผวนของความดันแตกต่างกันเป็นตัวแปรที่สำคัญในการคาดการณ์รูปแบบการไหลในท่อแนวนอน
2013	Maryna Zinchenko	ศึกษาเกี่ยวกับความเร็วของอณุภาคในระบบลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยลม
2014	Yi Yang และคณะ	ได้ทำการศึกษาออกแบบการขนส่งด้วยลมสำหรับชีวมวลผงระดับไมครอน ซึ่งนำความดันในเชิงบวกมาใช้และทำการขนถ่ายในสภาวะหนาแน่น ซึ่งจะทำให้มั่นใจได้ว่ามีเสถียรภาพและความต่อเนื่องในช่วงขนส่ง แนวคิดของการออกแบบการขนถ่ายชีวมวลผง พิจารณาจากหลายปัจจัย เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความถ่วงจำเพาะที่ลดลงและความหนืดที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการขนถ่ายผงถ่านหิน จะเห็นว่าสำหรับชีวมวลผงจะมีความหนาแน่นต่ำกว่า มีความหนืดมากกว่า นิ่มกว่าและมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ง่ายกว่าถ่านหิน ในการลำเลียงในท่อพบว่าเมื่อลมที่ใช้ในการขนถ่ายชีวมวลผงไม่ได้ถูกทำให้แห้ง ผงชีวมวลจะเกาะบริเวณผนังท่อและอัดตัวได้ง่าย นำไปสู่การอุดตันในท่อขนส่งและอัดตัวในไซโลจนไม่ล่วงหล่นลงสู่ระบบลำเลียง หากใช้ท่อหัวฉีด by pass ช่วยในการลำเลียงพบว่า สภาวะของการลำเลียงผงชีวมวลจะเป็นแบบหนาแน่นที่มีเสถียรภาพและความต่อเนื่องหากอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในย่าน 24-32 Nm3/h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2015	S. M. El-Behery	ได้ทำการศึกษาการไหลของแก๊สและอนุภาคของแข็งในท่อลำเลียงแบบแนวตั้ง โดยใช้รูปแบบของไหลสองชนิดแบบคงที่ในหนึ่งมิติ ซึ่งรูปแบบการไหลดังกล่าวถูกแก้ด้วยวิธีตัวแปรอนุรักษ์สำหรับสถานะของแก๊ส และใช้วิธีการของรุงเงย์-กุตต้าอันดับที่สี่ (Fourth order Runge-Kutta) โดยการทำนายความดันสูญเสียนั้นจะเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองและการทำนายของออย์เลอเลี่ยน-ลากรานเจียน (Eulerian-Lagrangian predictions) ซึ่งพบว่าความดันสูญเสียจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการไหล ขนาด และความหนาแน่นของอนุภาคเพิ่มขึ้น และความดันสูญเสียจะลดลงเมื่อความดันรวมของระบบสูงขึ้น

จากผลงานวิจัยที่ได้ศึกษามาข้างต้นนั้นเราได้ทราบว่า การเลือกใช้อุปกรณ์การก่อตัวที่เหมาะสมจะสามารถป้องกันการก่อตัวของเชื้อเพลิงภายในไซโลซึ่งทำให้การถ่ายเทเชื้อเพลิงสามาถทำได้อย่างต่อเนื่อง การเพิ่มความเร็วในท่อแนวนอนจะทำให้การไหลเปลี่ยนจากเต็มท่อเป็นการไหลแบบแบ่งชั้น และเทอมของความดันและความหนาแน่นสามารถนำมาประกอบการอธิบายลักษณะการไหลได้ ในการลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นสามารถใช้อากาศทั่วไปได้แทนที่จะใช้แก๊สโมเลกุลเดียว รวมถึงชีวมวลผงจะมีความหนาแน่นต่ำกว่า มีความหนืดมากกว่า นิ่มกว่าและมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ง่ายกว่าถ่านหิน ในการลำเลียงในท่อพบว่าเมื่อลมที่ใช้ในการขนถ่ายเชื้อชีวมวลผงไม่ได้ถูกทำให้แห้ง ผงชีวมวลจะเกาะบริเวณผนังท่อและอัดตัวง่าย นำไปสู่การอุดตันในท่อขนส่งได้

ดังนั้น ถ้าสามารถทำนายถึงความดันสูญเสียในการลำเลียงเชื้อเพลิง และความเร็วที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิงที่อัตราการป้อนขนาด 0.03094 kg/sได้ ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นและความต้องการอัตราเร็วลมนั้นจะส่งผลให้เราสามารถออกแบบระบบลำเลียงเชื้อเพลิงให้สามารถป้อนเชื้อเพลิงที่กำลังผลิต 500 kW ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้ จะนำเสนอถึงทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบชุดลำเลียงและกักเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลผง ได้แก่ การขนถ่ายด้วยลม ความเร็วในการขนถ่ายวัสดุด้วยลม ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ในส่วนของสกรูขนถ่ายวัสดุ เชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้ และเครื่องมือวัดการไหล สามารถศึกษาได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตตามเอกสารอ้างอิง [1] เพื่อให้เห็นถึงความสำคัญในการสร้างระบบลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้

2.1 การขนถ่ายวัสดุด้วยลมเบื้องต้น [1]

ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมมีหลักการทำงานที่ง่ายและเหมาะสำหรับการขนถ่ายวัสดุปริมาณมวล (Bulk Material) ซึ่งจะอยู่ในรูปของเม็ดและผง ไปตามท่อลมที่มีความดันบวกหรือความดันลบ (สูญญากาศ) และยังสามารถขนวัสดุต่างๆได้มากมายทั้งในอุตสาหกรรมการผลิต ทางการเกษตร เคมีภัณฑ์ ฯลฯ ในบางกรณีอาจใช้ก๊าซไนโตรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ แทนลมได้

ข้อดี

1) การปฏิบัติงานนั้นมีความปลอดภัย เนื่องจากเป็นการขนส่งในระบบปิด
2) วัสดุจะอยู่ในท่อที่มิดชิด ส่งผลให้บริเวณทำงานปลอดภัยมากขึ้น
3) ประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับแรงงาน
4) ลดการสูญเสียวัสดุจากการรั่วของภาชนะบรรจุ
5) บำรุงรักษาและควบคุมได้ง่าย
6) ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
7) ปรับเปลี่ยนทิศทางของการขนส่งได้ง่าย โดยการเปลี่ยนทิศทางของท่อขนถ่ายวัสดุ

ข้อเสีย

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

ในความจริงแล้ววัสดุที่มีลักษณะแห้งเป็นเม็ดหรือผงที่ใช้ในระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมได้ทั้งสิ้น ปัจจุบันมีการใช้ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมสำหรับก้อนหินที่มีขนาดใหญ่ถึง 70 มม., ไก่ที่ยังมีชีวิต วัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

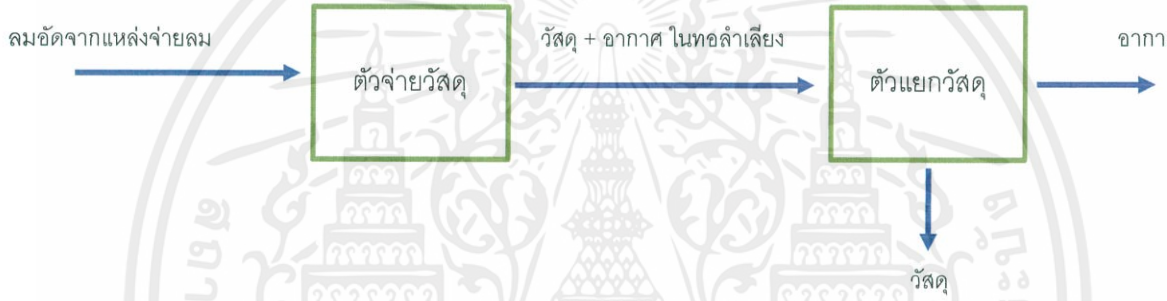
ที่มีรูปร่างต่างๆ ซึ่งมีขนาดโตขึ้นหรือมีความหนาแน่นมากขึ้นก็จะต้องใช้ความเร็วลมในการขนมากขึ้น ซึ่งมีกฎอยู่ว่า “ขนาดท่อขนถ่ายนวัสดุจะต้องมีขนาดอย่างงนี้อยที่สุดเท่ากับ 3 เท่าของขนาดวัสดุที่โตที่สุดที่จะขน เพื่อป้องกันการอุดตันของวัสดุในท่อขนถ่าย” โดยส่วนประกอบเบืองต้นของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมอาจแบ่งได้เป็น 4 ส่วน ซึ่งระบบต่าง ๆ จะมีการจัดเรียงส่วนปรกอบทั้ง 4 ส่วนนี้ต่างกันออกไป ส่วนประกอบหลักได้แก่

1) ตัวต้นกำเนิดลม (Air Mover)

2) ตัวจ่ายวัสดุเข้าไปในท่อลำเลียง (Feeding System)

3) ท่อลำเลียงวัสดุ (Pipe Line)

4) ตัวแยกวัสดุ/อากาศ (Separation System)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบเบื้องต้นที่สำคัญของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม

2.1.1 ตัวต้นกำเนิดลม

ตัวต้นกำเนิดลมเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูงที่สุดในระบบจึงควรเลือกใช้ตัวต้นกำเนิดลมให้เหมาะสมกับความดันในระบบ ตัวต้นกำเนิดลมทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานในการพาวัตถุให้ไหลไปตามท่อ โดยที่ใช้ในระบบความดันต่ำ เช่นพัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Fan), Roots Blower ใส่วนระบบที่ใช้ความดันสูง เช่น คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

2.1.2 ตัวจ่ายวัสดุเข้าไปในท่อลำเลียง

อาจกล่าวได้ว่าตัวจ่ายวัสดุเข้าสู่ท่อลำเลียงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในระบบ เนื่องจากถ้าตัวจ่ายวัสดุสามารถจ่ายวัสดุเข้าสู่ท่อลำเลียงได้อย่างมีระสิทธิภาพ ก็จะทำให้การขนถ่ายวัสดุทั้งระบบมีประสิทธิภาพตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ท่อลำเลียงวัสดุ

ประกอบไปด้วยท่อส่งขนาดต่าง ๆ วาล์ว ข้องอ และอื่น ๆ ตามแต่การออกแบบของระบบนั้น ๆ การเลือกขนาดท่อนั้น ต้องพิจารณาตัวแปลหลายตัวประกอบกัน เช่น ความดัน อัตราการไหลของลม อัตราการขนถ่ายวัสดุ และคุณสมบัติของวัสดุ

2.2.4 ตัวแยกวัสดุ/อากาศ

ในส่วนนี้วัสดุและลมจะถูกแยกออกจากกัน วัสดุอาจถูกเก็บไว้ในถังวัสดุส่วนลมจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ

2.2 การแบ่งชนิดของระบบขนส่งวัสดุด้วยลม [1]

เราสามารถแบ่งชนิดของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมได้หลายชนิด แต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิดดังนี้

2.2.1 แบ่งตามปริมาณวัสดุโดยเฉลี่ยที่ไหลในท่อ

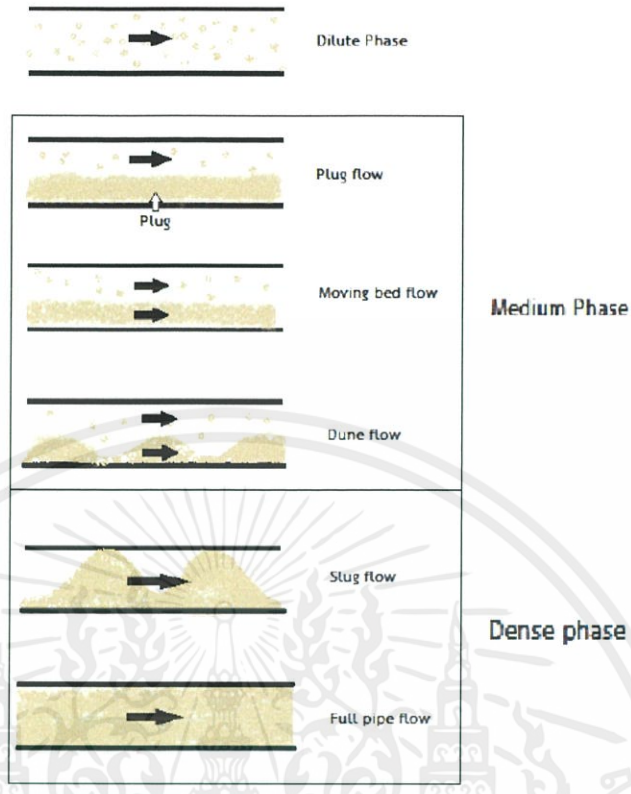
การแบ่งชนิดของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมแบบนี้เป็นที่นิยมกันมากที่สุด ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ การไหลแบบเบาบาง (Dilute Phase or Lean Phase) และ การไหลแบบหนาแน่น (Dense Phase) เราอาจใช้ค่า Phase Density เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างลักษณะการไหลของวัสดุได้ โดยที่ ϕ จะเป็นอัตราส่วยระหว่างอัตราการไหลของมวลวัสดุ (m_s) ต่ออัตราการไหลของมวลอากาศ (m_f)

$$\phi = \frac{m_s}{m_f} \tag{2.1}$$

1. **ระบบการไหลแบบเบาบาง** (Dilute Phase) จะใช้ปริมาณอากาศมากกว่าทำให้มีความเร็วในท่อสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่จะสามารถพาวัสดุให้ลอยอยู่ในกระแสการไหลของลมได้ ขณะที่ความดันต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า Phase Density ไม่เกิน 15 (ขึ้นกับชนิดของวัสดุด้วย) ซึ่งการไหลแบบนี้จะเป็นการไหลแบบคงที่ (Steady Flow)

2. **ระบบการไหลแบบหนาแน่น** (Dense Phase) จะมีปริมาณอากาศที่น้อยกว่าทำให้ความเร็วในท่อต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดที่จะสามารถพาวัสดุให้ลอยอยู่ในกระแสการไหลของลมได้ ขณะที่ความดันสูง และมีการไหลของวัสดุที่อาจคงที่ หรือไม่คงที่ก็ได้ โดยทั่วไปจะมีค่า Phase Density มากกว่า 15 (ขึ้นกับชนิดของวัสดุด้วย) ลักษณะการไหลของวัสดุแสดงในรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลของวัสดุในท่อในรูปแบบการขนส่งแบบต่าง ๆ

a. การขนถ่ายวัสดุแบบเบาบาง (Dilute Phase) จะใช้อากาศในปริมาณมวลที่มากกว่าปริมาณมวลของวัสดุ ส่งผลให้ วัสดุจะแขวนลอยไหลไปตามกระแสของอากาศ หากค่าความเร็วของลมมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการขนส่งวัสดุจะทำให้วัสดุแขวนลอยอยู่บนกระแสลมทั้งหมด ไม่ตกลงมากองกันอยู่ก้นท่อ โดยทั่วไปแล้วการขนส่งแบบนี้จะมีค่า Ø ไม่เกิน 15 (ขึ้นกับชนิดของวัสดุ)

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

c. การขนถ่ายวัสดุแบบหนาแน่น (Dense Phase) จะใช้อากาศในปริมาณมวลที่น้อยกว่าปริมาณมวลของวัสดุ ทำให้ความเร็วของอากาศต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดของการขนส่งวัสดุ ในขณะที่ความดันสูง โดยทั่วไปจะมีค่า Ø มากกว่า 15 (ขึ้นกับชนิดของวัสดุ) ลักษณะการไหลของแต่ละชนิดของการขนส่งแสดงดังรูปที่ 2.2

2.3.2 แบ่งตามความดันในระบบ

การแบ่งชนิดของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมแบบนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมกันมาก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นระบบย่อยๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระบบสูญญากาศ (Vacuum System) เหมาะกับการขนถ่ายวัสดุจากหลายแหล่งไปยังปลายทางแห่งเดียว แต่เราสามารถทำให้ระบบสามารถขนถ่ายวัสดุจากต้นทางหลายแห่งไปยังปลายทางหลายแห่งได้โดยการเดินท่อให้เหมาะสม ระบบสูญญากาศเป็นระบบที่ต้องใช้ความเร็วเขนถ่ายสูงกว่าระบบความดันเนื่องจากความหนาแน่นของลมในระบบต่ำกว่า และใช้ความดันสูญญากาศไม่เกิน 12 in-Hg ข้อดีคือหากเกิดการรั่วขึ้นวัสดุจะไม่ฟุ้งกระจายออกสู่บรรยากาศภายนอก

2. ระบบความดัน (Pressure System) จะมีถังเก็บวัสดุที่มีตัวจ่ายวัสดุเข้าไปในท่อลำเลียงพร้อมกับมีแหล่งจ่ายลมเข้าไปในท่อผสมกับวัสดุ เพื่อส่งวัสดุไปยังปลายทางที่อาจมีหลายแห่งได้โดยปลายทางแต่ละแห่งจะมีตัวแยกวัสดุกับอากาศ ข้อควรระวังคือ ตัวจ่ายวัสดุอาจจะมีลมรั่วกลับไปยังถังเก็บวัสดุผ่านตัวจ่ายวัสดุได้ ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถขนถ่ายวัสดุได้ตามต้องการ ระบบความดันยังสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น
   - ระบบความดันต่ำ ใช้ความดันสูงถึง 14.7 PSIG
   - ระบบความดันปานกลาง ใช้ความดันสูงระหว่าง 15-45 PSIG
   - ระบบความดันสูง ใช้ความดันสูงระหว่าง 45-125 PSIG

3. ระบบผสม ระหว่างระบบความดันกับระบบสูญญากาศ (Combined Positive-Negative Pressure) จะใช้แหล่งจ่ายลมเพียงตัวเดียวทำหน้าที่ทั้งดูดและเป่าวัสดุ จึงสามารถขนถ่ายวัสดุจากต้นทางหลายแห่ง ไปยังปลายทางหลายแห่งได้ ข้อดีของระบบนี้คือ ใช้แหล่งจ่ายลมเพียงตัวเดียว ท่อทางดูดของระบบโดยทั่วไปควรจะสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ เนื่องจากระบบสูญญากาศเมื่อเทียบกับระบบความดันแล้วจะมีการใช้พลังงานมากกว่า เนื่องจากระบบสูญญากาศจะมีความหนาแน่นของลมต่ำกว่าระบบของความดัน

4. ระบบปิด (Closed Loop System) ระบบปิดนี้จะใช้ก๊าซชนิดอื่นที่ไม่ใช่อากาศ เช่น ไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังนำเอาก๊าซที่ใช้ในการขนถ่ายแล้วกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากการใช้ก๊าซอื่นจะมีค่าใช้จ่ายมากขึ้นจึงได้ชื่อว่าระบบปิด ส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะการขนถ่ายด้วยความดันแบบเบาบาง (Dilute Phase) แต่สำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยระบบสูญญากาศหรือแบบหนาแน่น (Dense Phase) ก็สามารถทำงานได้เช่นกัน ระบบนี้จะเหมาะสำหรับวัสดุแห้ง วัสดุที่เป็นพิษ หรือวัสดุที่สามารถระเบิดได้ รวมไปถึงวัสดุที่ไม่ต้องการให้สัมผัสกับความชื้นในอากาศด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 แบ่งตามความดันของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม

จะแบ่งตามชนิดของแหล่งจ่ายลมที่ใช้ในระบบโดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิดคือ

1. ระบบที่ใช้พัดลม (Fan System) โดยพัดลมที่ใช้จะเป็นพัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Fan) ซึ่งจะทำความดันสูงสุดได้ไม่เกิน 20 kPa ซึ่งจะใช้กับการขนถ่ายวัสดุที่มีอัตราการขนถ่ายไม่สูงมากนักและระยะทางขนถ่ายใกล้ๆ
2. ระบบที่ใช้โบลเวอร์ (Positive Displacement Blower System) ซึ่งจะทำความดันสูงสุดได้ไม่เกิน 100 kPa
3. ระบบที่ใช่คอมเพรสเซอร์ (Single Stage Compressor System) ซึ่งจะทำความดันสูงสุดได้ไม่เกิน 250 kPa
4. ระบบความดันสูง (High Pressure System) ซึ่งจะทำความดันสูงสุดได้ไม่เกิน 700 kPa

2.2.4 แบ่งตามการจ่ายวัสดุ

แบ่งตามความสามารถในการจ่ายวัสดุของอุปกรณ์จ่ายวัสดุในระบบ โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

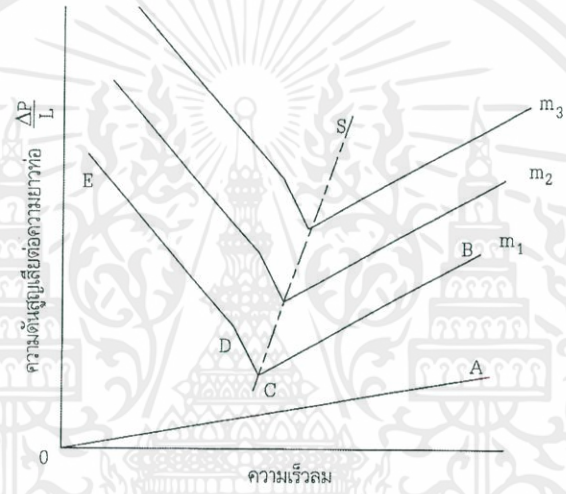
1. ระบบที่สามารถควบคุมอัตราการจ่ายวัสดุได้ (Controlled Feed System) โดยระบบนี้จะใช้อุปกรณ์จ่ายวัสดุที่ควบคุมการจ่ายได้โดยตรง เช่น โรตารีวาล์ว สกรู เป็นต้น
2. ระบบที่ไม่สามารถควบคุมอัตราการจ่ายวัสดุได้ (Non-Controlled Feed System) จะมีตัวจ่ายที่ไม่สามารถควบคุมการจ่ายวัสดุได้ โดยระบบนี้จะใช้อุปกรณ์จ่ายวัสดุที่ควบคุมการจ่ายได้โดยตรง เช่น หัวดูด ถังจ่ายวัสดุ วาล์วล็อกสองชั้นและตัวจ่ายวัสดุแบบเวนจูรี เป็นต้น

2.3 ไดอะแกรมการไหลในท่อ (State Diagram) [2]

จากรูปที่ 2.22 จะเห็นว่าในแกนตั้งเป็นความดันสูญเสียต่อความยาวของท่อส่วนในแกนนอนจะเป็นความเร็วลมในท่อขนถ่ายวัสดุ โดยมี m_1, m_2 และ m_3 เป็นอัตราการขนถ่านวัสดุโดยที่ $m_1<m_2<m_3$ เส้น 0A จะแสดงถึงความสูญเสียเนื่องจากลมอย่างเดียวไหลไปในท่อขนถ่ายวัสดุที่ตำแหน่ง A เมื่อมีการจ่ายวัสดุเข้าไปในท่อด้วยอัตราการจ่ายวัสดุ m_1 จะทำให้ความดันในระบบเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ตำแหน่ง B จากนั้นถ้าลดความเร็วของลมลงโดยที่อัตราการขนถ่ายวัสดุคงที่ ก็จะทำให้ความดันในระบบลดลงจนถึงจุด C จะเป็นจุดที่ความเร็วลมยังสามารถพาวัสดุให้ไหลไปในท่อโดยวัสดุยังลอยอยู่ในกระแสการไหลของลมได้ เรียกว่า Saltation Velocity สำหรับท่อในแนวนอน และเรียกว่า Choking Velocity สำหรับท่อแนวตั้ง และที่จุดนี้จะเป็นจุดที่มีความดันต่ำสุดในระบบอีกด้วย จากจุด C ถ้าความเร็วลมลดลงอีกจนอยู่ในช่วง CD วัสดุจะไม่สามารถลอยตัวอยู่ในกระแสการไหลของลมได้ ในบางกรณีวัสดุจะกองตัวที่พื้นผิวท่อด้านล่างแล้วทำให้พื้นที่หน้าตัดท่อลดลง ทำให้ลมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลอยู่เหนือวัสดุมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนสามารถไหลโดยมีการไหลแบบเบาบางบนชั้นวัสดุอีกทีหนึ่ง เรียกว่า Stable Stationary Bed แต่ในบางกรณีวัสดุจะตกลงที่พื้นผิวท่อด้านล่างเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนปิดหน้าตัดท่อทั้งหมดและถ้าความดันลมไม่เพียงพอก็จะเกิดการอุดตันของวัสดุในท่อ แต่ถ้าความดันเพียงพอลมจะผลักวัสดุให้กระจายออกไปทำให้ความดันในระบบไม่คงที่เรียกว่า Moving Bed ดังนั้นโดยทั่วไปเราจะไม่ให้มีการขนถ่ายวัสดุโดยมีความเร็วอยู่ในช่วงนี้ หลังจากนั้นถ้าความเร็วลมลดลงอีกในช่วง DE วัสดุที่กองตัวที่พื้นผิวท่อจะแยกตัวออกจากกันและมีการไหลแบบหนาแน่นและคงที่ Stable Dense Phase จากรูปที่ 2.20 ถ้าลากเส้นระหว่างจุดที่มีความเร็วลมต่ำสุดที่จะพาวัสดุให้ไหลไปได้ในท่อ เราจะได้เส้นแบ่งระหว่างการไหลเบาบาง (ทางขวาของเส้น) และการไหลแบบหนาแน่น (ทางซ้ายของเส้น)



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมการไหลในท่อ (State Diagram) [1]

จึงพอสรุปได้ว่าระบบที่มีความดันต่ำสุด (จุด C) ซึ่งจุดนี้เป็นจุดแบ่งลักษณะการไหลแบบเบาบางและแบบหนาแน่น โดยทางขวามือของจุดนี้จะมีลักษณะการไหลแบบเบาบาง ส่วนทางขวามือของจุดนี้จะมีลักษณะการไหลแบบหนาแน่น และจะมีช่วง Unstable Area ซึ่งวัสดุจะเกิดการไหลแบบหนาแน่นและแบบเบาบางสลับกันไป ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนกับท่อขึ้นจึงไม่เหมาะสมที่จะให้มีการขนถ่ายวัสดุในช่วงนี้ ซึ่งช่วงนี้จะอยู่ทางซ้ายมือของจุดที่มีความดันต่ำสุดในระบบ(ช่วง CD) ข้อสังเกตุจากรูปที่ 2.3 พบว่าในช่วงการไหลแบบหนาแน่นถ้าเราเพิ่มปริมาณอากาศหรือเพิ่มความดันให้กับระบบจะทำให้สามารถขนถ่ายวัสดุได้มากขึ้น แต่ในช่วงการไหลแบบเบาบางการเพิ่มการไหลของอากาศอาจทำห้ขนถ่ายวัสดุได้น้อยลงเนื่องจากการไหลแบบวกวน

2.4 ความเร็วลมในการขนถ่ายวัสดุตามแนวดิ่งและแนวระดับ [2]

ในการขนถ่ายวัสดุนั้นจาเป็นต้องมีการคานวณหาความเร็วต่ำที่สุดสาหรับการขนถ่ายวัสดุใน อัตราการไหลใด ๆ เพื่อที่จะกาหนดรูปแบบการไหลของวัสดุว่าจะให้เป็นแบบเบาบาง หรือแบบหนาแน่น โดยหากความเร็วที่ใช้ขนส่งมีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดที่ต้องการ จะทาให้การขนส่งเป็นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่น แต่ถ้าใช้ความเร็วมากกว่าความเร็วต่ำสุดก็จะเป็นการไหลแบบเบาบาง แต่ในการออกแบบนั้นเราควรออกแบบให้ความเร็วมากกว่าหรือน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดที่ได้จากการคานวณในช่วงหนึ่งๆ ไม่ควรให้ค่าความเร็วที่นามาใช้ตกอยู่ในช่วงที่ใกล้ความเร็วต่ำสุดที่ได้จากการคานวณ เนื่องจากจะเป็นช่วงที่อยู่ในระหว่างการเปลี่ยนรูปแบบการไหล หรือ Medium Phase

2.4.1 คุณลักษณะการไหลของวัสดุในท่อแนวดิ่ง

ในการคำนวณออกแบบระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมมีความยุ่งยากซับซ้อนมากเนื่องจากมีตัวแปรเป็นจำนวนมาก และความเร็วลมที่จุดถ่ายวัสดุจะต้องมากเพียงพอสำหรับการพาวัสดุให้ไหลไปในท่อได้ ความเร็วขนถ่ายวัสดุจะมีค่ามากกว่าความเร็วลมต่ำสุดในการไหลแบบเบาบาง และมีค่าน้อยกว่าความเร็วลมต่ำสุดในการไหลแบบหนาแน่น ดังนั้นการหาความเร็วลมต่ำสุดจริงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบ โดยความเร็วลมต่ำสุดในท่อแนวดิ่งเรียกว่า Choking Velocity (V_c)

ในปัจจุบันมีสมการที่ได้จากการทดลองมากมาย โดยจะขอยกสมการที่มีค่าความเบี่ยงเบนจากค่าที่ได้จากการทดลองน้อยที่สุด 2 สมการดังต่อไปนี้

สมการของ Yang

$$\frac{2gD(\varepsilon_c^{-4.7}-1)}{(\mathrm{v}_c-\mathrm{U}_{fo})^2}=0.01 \qquad (2.2)$$

สมการของ Punwani

$$\frac{2gD(\varepsilon_c^{-4.7}-1)}{(\mathrm{v}_c-\mathrm{U}_{fo})^2}=0.0074\left(\frac{\rho}{16}\right)^{0.77} \qquad (2.3)$$

เมื่อ V_c คือ ความเร็วขั้นต่ำในการขนถ่ายวัสดุแนวดิ่ง, m/ s

U_{fo} คือ ความเร็วในการตกอย่างอิสระ, m/ s

ε_c คือ ตัวแปรช่องว่างของวัสดุ ในทางปฏิบัติใช้ 0.97

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m^2/ s

ในการออกแบบนั้นควรกาหนดให้ความเร็วที่ใช้จริงสูงกว่าที่คำนวณ 1.5 เท่า สาหรับการขนถ่ายแบบเบาบาง และ 0.67 เท่า สาหรับการขนถ่ายแบบหนาแน่น

2.4.2 คุณลักษณะการไหลของวัสดุในท่อแนวระดับ

ในการออกแบบนั้นค่าความเร็วลมต่ำสุดสำหรับการขนส่งในแนวระดับ(Saltation Velocity) จะมีค่ามากกว่าค่าความเร็วต่ำสุดสาหรับการขนถ่ายในแนวดิ่ง (Choking Velocity) ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานจริง นั้นจะมีทั้งท่อในแนวระดับและแนวดิ่งปะปนกันอยู่ ดังนั้นในการออกแบบจึงควรใช้ความเร็วต่ำสุด สาหรับขนส่งวัสดุในแนวระดับมาออกแบบระบบ

สาหรับการขนถ่ายวัสดุในแนวระดับนั้นมีคาอธิบาย คาจากัดความของความเร็วลมต่ำที่สุดที่ใช้สาหรับขนถ่ายวัสดุในแนวระดับได้ 4 แบบ คือ

1) ความเร็วลมต่ำที่สุดที่ทาให้วัสดุกลิ้ง เลื่อนไถล หรือลอยอยู่ในกระแสลม
2) ความเร็วลมต่ำที่สุดที่ทาให้วัสดุกระเด็นไปในท่อ โดยไม่มีการกลิ้งหรือไถล
3) ความเร็วลมต่ำที่สุดที่ทาให้วัสดุที่วางนิ่งบนผิวท่อสามารถเคลื่อนที่ไปตามกระแสลมได้
4) ความเร็วลมต่ำที่สุดที่ทาให้วัสดุที่วางอยู่บนชั้นของวัสดุบนผิวท่อสามารถลอยไปตาม กระแสการไหลได้

ในการออกแบบนั้นจะมีสมการสาหรับการคานวณหลายสมการโดยที่แต่ละสมการนั้นจะมี ที่มาต่างกัน จึงควรใช้ด้วยความระมัดระวัง และทาการทดสอบเทียบกับผลการคานวณเสมอ

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

$$\mu = \frac{1}{10^{x}} \cdot \left(\frac{V_{st}}{\sqrt{gD}}\right)^{y} \qquad (2.4)$$

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^2 / s

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

$$\frac{V_{st}}{\sqrt{gD}} = \mu^{0.11} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0.025} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)^{0.34} \qquad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ, m

V_{st} คือ ความเร็วขั้นต่ำในการขนถ่ายวัสดุในแนวนอน, m/ s

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/ s^2

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

μ คือ อัตราส่วนระหว่างวัสดุต่ออากาศ, kg วัสดุ/ kg อากาศ

ρ_p คือ ความหนาแน่นจริงของวัสดุ, kg / m^3

ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg / m^3

3) สมการของ Geldart ทาการทดลองโดยใช้ท่อขนถ่ายขนาด 9.19 และ 12.52 mm ทดลอง กับถ่านหินขนาดเฉลี่ย 8, 18 และ 26-micron การทดลองจะปรับความดันให้คงที่จากนั้นจะวัดปริมาณการขนถ่ายที่ความเร็วลมที่แตกต่างกัน โดยความเร็วลมที่สามารถขนถ่ายวัสดุได้มากที่สุดใน การทดลองจะถือเป็นความเร็วลมที่ต่ำที่สุดสาหรับขนถ่ายวัสดุ จะได้สมการ

สาหรับกรณี $\frac{m_s}{A \bullet D} > 47000$

$$V_{st} = \frac{1.5\left(\frac{m_s}{A}\right)^{0.465} \eta^{0.55}}{D^{0.01} \rho_p^{0.42}} \qquad (2.6)$$

สำหรับกรณี $\frac{m_s}{A \bullet D} < 47000$

$$V_{st} = \frac{8.7\left(\frac{m_s}{A}\right)^{0.302} D^{0.153} \eta^{0.55}}{\rho_p^{0.42}} \qquad (2.7)$$

เมื่อ V_{st} คือ ความเร็วขั้นต่ำในการขนถ่ายวัสดุในแนวนอน, m/s

m_s คือ อัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง, kg / s

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

η คือ Dynamic Viscosity, kg / m.s

ρ_p คือ ความหนาแน่นของวัสดุ, kg / m^3

จากสมการเหล่านี้สามารถนำไปใช้คำนวณหาความเร็วลมต่ำสุดสำหรับใช้ในการขนถ่ายได้ แต่สมการเหล่านี้ไม่ได้ทดลองกับวัสดุทุกชนิด และขนาดท่อทุกแบบ ซึ่งในการใช้งานจริงนั้น ชนิดของวัสดุที่นำมาขนถ่ายนั้นจะมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการขนถ่ายวัสดุ ดังนั้นการนำความเร็วลมที่ได้จากสมการไปใช้จึงควรทำการทดลองเพื่อตรวจสอบผลการคำนวณด้วยทุกครั้ง

สำหรับการขนถ่ายในแนวเอียงนั้นไม่แนะนำให้ติดตั้งเนื่องจากจะเกิดความดันสูญเสียสูง โดยความดันสูญเสียนั้นจะมากกว่าการใช้ข้องอมุมฉากเสียอีก แต่หากจำเป็นต้องใช้ แนะนำให้ใช้มุมไม่เกิน 15 องศาจากแนวระดับ

2.5 การคำนวณความดันสูญเสียในการไหลแบบเบาบางของการขนถ่ายวัสดุด้วยลมโดยใช้แบบจำลองไฮโดรไดนามิกส์

2.5.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

การขนถ่ายวัสดุด้วยลมของของแข็งสามารถอธิบายผ่านสมการสมดุลของมวล สมการโมเมนตัมในสภาวะอุณหภูมิคงที่ สมาการการไหลถาวรแบบหนึ่งมิติ โดยพิจารณาจากการไหลแบบเบาบางของของแข็งและของผสม สมการความต่อเนื่องของแก๊สและของแข็งคือ

$$\frac{d}{dx}(\varepsilon \rho_g v_g) = 0 \tag{2.8}$$

$$\frac{d}{dx}((1-\varepsilon)\rho_s v_s) = 0 \tag{2.9}$$

เมื่อ ε คือ อัตราส่วนช่องว่าง (void fraction)

v_g คือ ค่าความเร็วของแก๊ส

v_s คือ ค่าความเร็วของของแข็ง

ρ_g คือ ค่าความหนาแน่นของแก๊ส

ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความสมดุลของปริมาณการเคลื่อนที่ของของผสม โดยเทียบกับค่าความเสียดทานของผนังท่อคือ

$$(1-\varepsilon)\rho_s v_s \frac{dv_s}{dx} + \varepsilon\rho v_g \frac{dv_g}{dx} + (\rho_s(1-\varepsilon) + \varepsilon\rho_g)g\sin(\theta) = -\frac{dP}{dx} - F_g - F \qquad (2.10)$$

เมื่อ θ คือ องศาที่ท่อกระทำกับพื้นราบ

P คือ ค่าความดัน

F_g คือ ค่าแรงเสียดทานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรระหว่างแก๊สกับผนังท่อ

F_s คือ ค่าแรงเสียดทานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรระหว่างอนุภาคกับผนังท่อ

และสมการที่มีส่วนช่วยในการคำนวณความเสียดทานของของแข็งในแบบจำลองนี้อีกสมการหนึ่งคือ

$$-\frac{1}{2}\rho_s \frac{d}{dx}(v_g - v_s)^2 = -F_d - g\rho_s \sin(\theta) - \frac{F_g}{1-\varepsilon} \qquad (2.11)$$

เมื่อ F_d คือ ค่าแรงต้านที่กระทำกับหนึ่งหน่วยปริมาตรของอนุภาคโดยแก๊ส

แรงเสียดทานลัพธ์ที่กระทำระหว่างแก๊สกับผนังท่อสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F_g = \frac{f_g \rho_g v_g^2}{2D} \qquad (2.12)$$

เมื่อ f_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแก๊ส ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ กับค่าความขรุขระของท่อ ซึ่งถูกอธิบายโดยสมการของ Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{f_g}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{f_g}}\right) \qquad (2.13)$$

ผลกระทบของการสูญเสียเนื่องจากการไหล (Head loss) ในระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม เนื่องจากแรงเสียดทานขออนุภาคที่กระทำกับผนัง ถูกศึกษาโดย Yang และคณะ ความสัมพันธ์ต่อจากนี้ถูกใช้ในการคำนวณแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของของแข็งกับผนังท่อตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_s = 0.02925\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\left[\frac{(1-\varepsilon)v_g}{\sqrt{gD}}\right]^{-1.15} \quad (2.14)$$

$$f_s = 0.00315\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\left[\frac{\mathrm{Re}_t}{\mathrm{Re}_p}\right]^{-0.979} \quad (2.15)$$

$$f_s = \frac{1}{217(1-\varepsilon)+1}\left\{3.13x10^{-5}Ga^{0.26}\left(S^{0.5}Fr_p^{-0.25}Ga^{0.16}(DR)+1.55x10^{-3}Fr_u^{0.5}\right)\right\} \quad (2.16)$$

เมื่อ f_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของของแข็ง

DR คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

S คือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเสียงในของแข็ง (u)กับความเร็วปกติของอนุภาค(V_S)

โดยสมการที่ (2.14) ใช้ในการคำนวณกรณีท่อในแนวนอน และสมการที่เหลือใช้ในการคำนวณท่อในแนวตั้ง ค่าตัวเลขของฟรูด (Froude) (Fr_p และ Fr_u) ค่าตัวเลขของกาลิเลโอ (Galileo) (Ga) และตัวเลขของเรย์โนลด์ (Reynolds) (Re_t และ Re_p) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Fr_p = v_s^2 / gd_p \quad (2.17)$$

$$Fr_u = u^2 / gd_p \quad (2.18)$$

$$Ga = gd_p^3\rho_g^2 / \mu_g^2 \quad (2.19)$$

$$\mathrm{Re}_t = dU_t\rho_g / \mu_g \quad (2.20)$$

$$\mathrm{Re}_p = d(v_g - v_s)\rho_g / \mu_g \quad (2.21)$$

เมื่อ ค่า U_t คือ ค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาค โดยพบว่าค่าของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผนังคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_p = \frac{f_s \rho_s (1-\varepsilon) v_s^2}{2D} \tag{2.22}$$

ค่าแรงต้านอากาศสำหรับอนุภาคทรงกลมและอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมหาได้จากสมการของ Dzido et al

$$F_d = \frac{3}{4} C_{Ds} \frac{\rho_g (v_g - v_s)^2}{d_p} \varepsilon^{-2.65} \tag{2.23}$$

$$F_{d\varphi} = \frac{3}{4} C_{Ds\varphi} \frac{\rho_g (v_g - v_s)^2}{\varphi d_p} \varepsilon^{-2.65} \tag{2.24}$$

เมื่อ d_p คือ ค่าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

d_v คือ ค่าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงปริมาตรของอนุภาค

F คือ แรงต้านอากาศที่เกิดจากของไหลไหลผ่านอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของอนุภาค

C_{Ds} คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันของสมการตัวเลขของเรย์โนลด์ โดยสำหรับค่าตัวเลขของเรย์โนลด์มีค่ามากกว่า 1000 ค่า C_{Ds} จะมีค่าคงที่ และสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_{Ds} = \frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1 + 0.15\mathrm{Re}_p^{0.687}\right) \qquad \mathrm{Re} < 1000$$
$$C_{Ds} = 0.44 \qquad \mathrm{Re} > 1000 \tag{2.25}$$

สำหรับอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลม คำนวณค่า $C_{Ds\varphi}$ ได้จากสมการ

$$C_{Ds\varphi} = \frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left[1 + \left(8.171\exp(-4.0655\varphi)\right)\mathrm{Re}_p^{0.0964+0.5565\varphi}\right] + \frac{73.69\,\mathrm{Re}_p \exp(-5.0748\varphi)}{\mathrm{Re}_p + 5.378\exp(6.2122\varphi)} \tag{2.26}$$

สมการที่ (2.26) แม่นยำในกรณีที่ φ มากกว่า 0.67 และค่าตัวเลขของเรย์โนลด์ในกรณีอนุภาคไม่เป็นทรงกลมคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\varepsilon \rho_g d_p (v_g - v_s)}{\mu_g} \tag{2.27}$$

เมื่อ μ_g คือค่าสัมประสิทธิความหนืดของของไหล

2.5.2 คำตอบเชิงตัวเลข

จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) ถูกรวบรวมและแสดงอยู่ในเชิงพีชคณิตของฟังก์ชันของอัตการเคลื่อนที่ของของแข็ง (W_s) และแก๊ส (W_g)

$$(1-\varepsilon)\rho_s v_s = (1-\varepsilon_1)\rho_s v_{s1} = W_s \tag{2.28}$$

$$\varepsilon \rho_g v_g = \varepsilon_1 \rho_{g1} v_{g1} = W_g \tag{2.29}$$

เมื่อ ε_1 คือ ค่าความพรุนเริ่มต้น

v_{s1} คือ ค่าความเร็วของของแข็งขณะเริ่มต้น

v_{g1} คือ ค่าความเร็วของแก๊สขณะเริ่มต้น

ρ_{g1} คือ ค่าความหนาแน่นของแก๊สขณะเริ่มต้น

แก๊สถูกพิจารณาเป็นแก๊สอุดมคติ และ เฟสของของแข็งและแก๊สถูกพิจารณาเป็นของไหลบีบอัดไม่ได้ โดยเขียนในรูปของสมการหาค่าได้จริง (state equation) ดังนั้นสมการที่ (2.28) และ (2.29) จะได้

$$\varepsilon = 1 - (1-\varepsilon_1)\frac{v_{s1}}{v_s} \tag{2.30}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\frac{v_g}{v_{g1}} = \frac{P_1}{P} \tag{2.31}$$

เมื่อ P คือ ค่าความดันเริ่มต้นของระบบในส่วยป้อน

เมื่อนำสมการที่ (2.30) และ (2.31) แทนค่าลงในสมการ (2.10) และ (2.11) สมการทั้งสองจะถูกแปลงเป็นสมการไร้ตัวแปรโดยใช้ค่าดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{\varepsilon}=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1},\bar{v}_g=\frac{v_g}{v_{g1}},\bar{v}_s=\frac{v_s}{v_{s1}},\bar{P}=\frac{P}{P_1},R=\frac{\rho_s}{\rho_{s1}},F=\frac{gL}{v_{g1}^2}\sin(\theta),C=\frac{P_1}{\rho_{g1}v_{g1}^2},s=\frac{v_{s1}}{v_{g1}} \quad (2.32)$$

โดยผลลัพธ์ที่ถูกเขียนในรูปของค่าตัวแปรเริ่มต้นถูกเขียนอยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$\bar{\varepsilon}=\frac{1}{\varepsilon_1}\left(1-\frac{1-\varepsilon_1}{\bar{v}_s}\right) \quad (2.33)$$

$$\bar{v}_g=\frac{1}{\bar{\varepsilon}\bar{P}} \quad (2.34)$$

$$\frac{d\bar{v}_s}{d\bar{x}}=A_1\{-[F(R(1-\varepsilon_1\bar{\varepsilon})+\bar{P}\varepsilon_1\bar{\varepsilon})+\frac{2Lf_g\bar{P}\bar{\varepsilon}\varepsilon_1\bar{v}_g^{-2}}{D}+\frac{Lf_sR\left(1-\bar{\varepsilon}\varepsilon_1\right)s^2\bar{v}_s^{-2}}{2D}]+$$
$$\left(C\bar{\varepsilon}\bar{P}^2-\varepsilon_1\right)\{-\frac{3}{4}\frac{L\varepsilon_1^{-2.65}}{d_p}\frac{C_{Ds}\bar{P}(\bar{v}_g-s\bar{v}_s)}{R}\varepsilon^{-2.65}+\frac{F}{(\bar{v}_g-s\bar{v}_s)}+\frac{Ls^2f_s}{2D(\bar{v}_g-s\bar{v}_s)}\frac{R}{R}\bar{v}_s^{-2}\}\} \quad (2.35)$$

$$\frac{d\bar{P}}{d\bar{x}}=\frac{A_2\left[F(R(1-\bar{\varepsilon}\varepsilon_1)+\bar{P}\bar{\varepsilon}\varepsilon_1)+\frac{2Lf_g\bar{P}\bar{\varepsilon}\varepsilon_1\bar{v}_g^{-2}}{D}+\frac{Lf_sR(1-\bar{\varepsilon}\varepsilon_1)s^2\bar{v}_s^{-2}}{2D}\right]}{\bar{\varepsilon}\bar{v}_s^{-2}\left(C\bar{\varepsilon}\bar{P}^2-\varepsilon_1\right)} \quad (2.36)$$

เมื่อ

$$A_1=\frac{\left(\varepsilon_1\bar{\varepsilon}\bar{v}^{-2}\right)}{[s\varepsilon_1\bar{\varepsilon}\bar{v}_s^{-2}(Rs(1-\varepsilon_1)-(C\bar{\varepsilon}\bar{P}^2-\varepsilon_1))-\left(1-\varepsilon_1\right)\left(C\bar{P}\right)]} \quad (2.37)$$

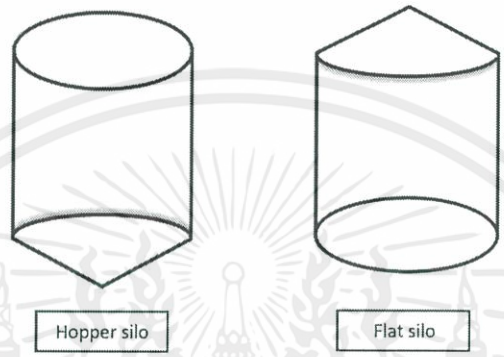
$$A_2=\bar{P}(1-\varepsilon_1)(1-R(\bar{\varepsilon}s\bar{v}_s)^2\bar{P})\frac{d\bar{v}_s}{d\bar{x}}-\left(\bar{\varepsilon}\bar{P}\bar{v}_s\right)^2$$

เมื่อ ค่าสภาวะเริ่มต้น ($v_g=v_{g1}$, $v_s=v_{s1}$, $\varepsilon=\varepsilon_1$, $P=P_1$) บน $x=x_0$ นั้นต้องทราบค่า งานตีพิมพ์บางฉบับกล่าวถึงข้อมูลของค่าเริ่มต้นที่ถูกวัดในส่วนบริเวณที่ถูกทดสอบ ซางทำให้เราสามารถเปรียบเทียบค่าคำตอบเชิงตัวเลขกับข้อมูลจากการทดลองในบริเวณที่มีการเร่งความเร็วจนถึงบริเวณการไหลสมบูรณ์ (total developed flow zone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ไซโล [3]

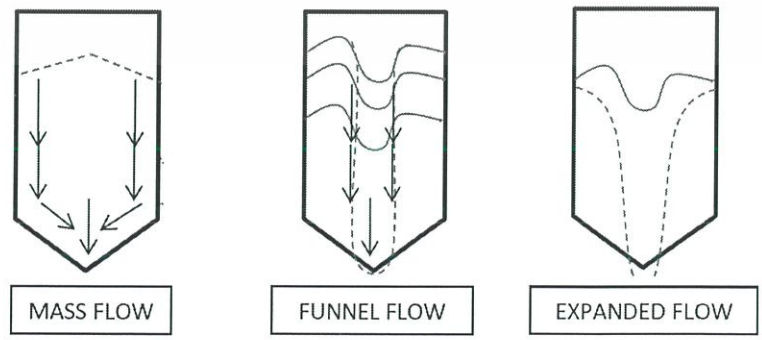
ไซโล ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน หมายความว่า สิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ ทาด้วยวัสดุที่แข็งแรงทนทาน ภายในมีระบบกันความชื้นและระบายอากาศเป็นต้น สาหรับเก็บผลิตผลทางเกษตรไว้ชั่วคราว ไซโล มี 2 แบบคือไซโลแบบกรวย (hopper silo) และไซโลแบบก้นเรียบ (flat silo)



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะรูปแบบของไซโล [3]

ฮอปเปอร์ หรือ ไซโลแบบกรวย ในอุตสาหกรรมนั้นสาหรับกักเก็บรักษาวัสดุผง ฮอปเปอร์ต้องมีการออกแบบที่ง่ายต่อการใส่วัสดุผง และกรวยนั้นต้องออกแบบให้ง่ายต่อการถ่ายวัสดุผง ฮอปเปอร์ที่ออกแบบมานั้นจะส่งผลต่ออัตราการไหลและวัสดุผงที่ถูกกักเก็บไว้ การออกแบบฮอปเปอร์ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของ ฮอปเปอร์

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



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะรูปแบบการไหลในฮอปเปอร์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

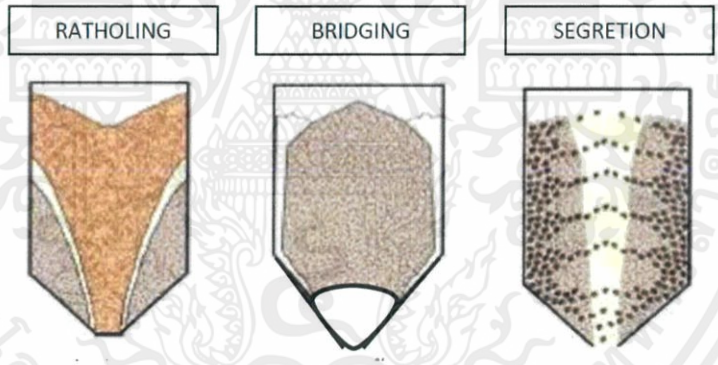
ลักษณะของฮอปเปอร์นั้นสามารถออกแบบได้หลายแบบตามลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้งานไม่จาเป็นต้องมีรูปแบบที่เหมือนกับรูปข้างต้น และแต่ละแบบก็จะมีลักษณะการไหลที่แตกต่างกันปัญหาการออกแบบฮอปเปอร์

ปัญหาการออกแบบฮอปเปอร์นั้นปกติแล้วจะมีสองประเภทคือ ปล่อยวัสดุได้ไม่พอจากไซโล และ วัสดุแบ่งแยกกันระหว่างการไหล เป็นปัญหาที่เราต้องแก้ไขหรือหลีกเลี่ยง มีลักษณะดังนี้

1) RATHOLING มีลักษณะเหมือนโพรงหนู เมื่อเราปล่อยเชื้อเพลิงผงลงมาจากไซโล กลับเกิดลักษณะเป็นโพรงและเชื้อเพลิงผงที่ไหลลงจะกดทับเชื้อเพลิงผงที่ติดอยู่ด้านข้าง ทาให้เกิดการอัดสะสมทาให้ขนถ่ายไม่สะดวก

2) BRIDGING คือไซโลมีการขนถ่ายช้าไปทาให้เชื้อเพลิงที่มีความเหนียวนั้นเกิดการสะสมกดทับกันบริเวณทางออกมีลักษณะโค้ง คล้ายสะพาน ทาให้เชื้อเพลิงไม่สามารถไหลลงมาได้

3) SEGREGATION คือการที่เชื้อเพลิงไม่เหนียวพอที่จะเกาะตัวเป็นโดมได้ ทาให้อากาศแทรกเข้ามาเล็กน้อย ทาให้การไหลเป็นไปได้ช้าลงและเชื้อเพลิงไหลเป็นช่วงไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะเกิดการกองเชื้อเพลิงภายในฮอปเปอร์ [3]

การแก้ปัญหาการไหล

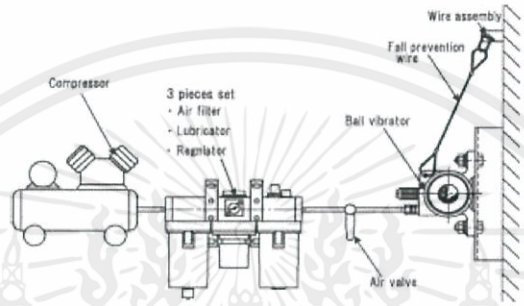
การแก้ปัญหาการไหล การออกแบบรูปทรงให้มุมหักลาดเทจะช่วยแก้ปัญหาการขนถ่ายวัสดุผงจากไซโลให้มีประสิทธิภาพ ลดปัญหา RATHOLING การเพิ่มอุปกรณ์ทาให้เกิดการสั่นสะเทือน เครื่องเคาะ เครื่องเขย่า หรือ แรงลมเพื่อสลายการเกาะตัวของเชื้อเพลิงผง การติดตั้งอุปกรณ์หมุนวนหรือขยับขึ้นลง ทาเชื้อเพลิงผงที่เกาะตัวกันนั้น แตกตัวและเคลื่อนที่ลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม (PNEUMATIC VIBRATOR, AIR VIBRATOR)

อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ก่อให้เกิดการสั่นในตาแหน่งที่ติดตั้ง โดยใช้ลม ในลักษณะเดียวกับอุปกรณ์นิวมาติก ซึ่งผู้วิจัยในครั้งก่อนได้ทำการเลือกใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนด้วยลมที่เหมาะสมไว้ในวิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตแล้ว [3]

การติดตั้งอุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม

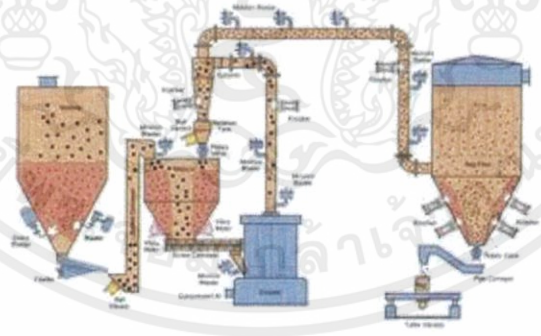


รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม

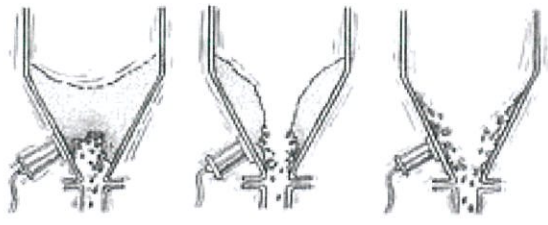
ตัวอย่างของการใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือน

อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม PNEUMATIC VIBRATOR เหมาะกับงานเบามากจนถึงงานปานกลาง

อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบไฟฟ้า MOTOR VIBRATOR เหมาะกับงานเบาจนถึงงานหนักมาก



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม



รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม แบบ AIR KNOCKER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของอุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม PNEUMATIC VIBRATOR

- มีตั้งแต่ขนาดเล็กกว่ากล่องไม้ขีดจนถึงขนาดใหญ่สาหรับปากถังไซโล
- ใช้กับสถานที่ที่ต้องการความปลอดภัยจากไฟฟ้า explosion proof
- ปรับแรงและรอบการสั่นได้ง่าย
- มีน้าหนักเบา
- การซ่อมบำรุงต่ำ

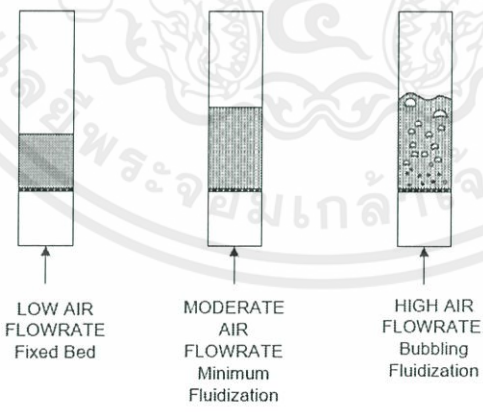
ข้อดีของอุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบไฟฟ้า MOTOR VIBRATOR **มอเตอร์สั่น มอเตอร์เขย่า**

- ติดตั้งสะดวก
- มีประสิทธิภาพสูงต่อพลังงานที่ใส่เข้าไป
- สามารถปรับการติดตั้งให้เป็นลักษณะการโยกในแนวเส้นตรงหรือโยกแบบส่ายได้
- การซ่อมบำรุงต่ำ

2.8 ฟลูอิไดเซชัน หรือ การก่อสภาพของไหล [9]

2.12.1 ทฤษฎีมูลฐานของฟลูอิไดเซชัน หรือ การก่อสภาพของไหล

กระบวนการการก่อสภาพของไหลเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อก๊าซหรือของเหลววิ่งผ่านเบด (หอทดลอง)ของอนุภาคของแข็งซึ่งถูกรองรับด้วยด้วยแผ่นตะแกรง เมื่อแรงของความต้านทานกระทำกับอนุภาคของอากาศที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านเบดของอนุภาคนั้นมีค่าเท่ากับน้ำหนักของตัวเบด จะทำให้ผงอนุภาคเหล่านั้นกลายเป็นอนุภาคแขวนลอยและเบดจะมีพฤติกรรมเป็นดั่งของเหลว

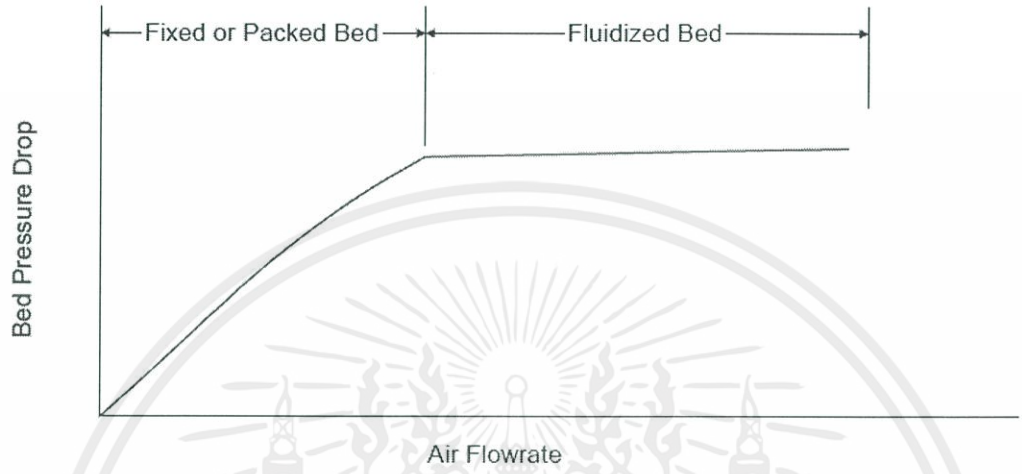


รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะทั่วไปของฟลูอิดไดส์เซชัน [9]

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเร็วของแก๊สมีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วการก่อสภาพของไหล จะเกิดเบดนิ่งและไม่มีการขยับตัวของอนุภาคใดๆ แต่เมื่อความเร็วแก๊สเอาชนะค่าต่ำสุดของการก่อสภาพของไหลได้ เบดจะเริ่มขยายตัวและเกิดฟองอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วลมที่สืบเนื่องมาจากความดันสูญเสียที่มีค่าเท่ากับน้ำหนักของท้องเบดนั้นบ่งบอกถึงความเร็วน้อยสุดของการก่อสภาพของไหล ที่ความเร็วลมนี้อนุภาคที่เบดทั้งหมดจะลอยขึ้นโดยกระแสลม ในระบบดังกล่าวสามารถประมาณค่าความเร็วของการก่อสภาพของไหลจากกราฟระหว่างความดันสูญเสียกับความเร็วของอากาศ



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟระหว่างความดันสูญเสียที่ท้องพื้นกับความเร็วของอากาศ [9]

ดังที่ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเหนือค่าต่ำสุดของความเร็วการก่อสภาพของไหลเบดของสสารจะมีพฤติกรรมเป็น การก่อสภาพของไหลแบบสม่ำเสมอ การก่อสภาพของไหลแบบฟองอากาศ และการก่อสภาพของไหลแบบเจือจางตามลำดับ โดยอนุภาคผงนี้สามารถถูกเคลื่อนย้ายได้ด้วยกระแสลม

การก่อสภาพของไหลของอนุภาคผงนั้นสามารถใช้กับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่มีค่าสูงระหว่างแก๊สกับของแข็งได้

ค่าความเร็วของการก่อสภาพของไหลสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของของแข็งภายในหอทดลองและแรงที่เกิดขึ้นโดยแรงดันที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของหอทดลอง

$$\Delta P A_c = W = A_c L_{mf}(1-\varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \qquad (2.38)$$

จากสมการที่ 2.38 พบว่ามีความยากลำบากในการหาอัตราส่วนของช่องว่างของค่าน้อยสุดของการก่อสภาพของไหล ที่เป็นค่าสัมพันธ์กันของเส้นผ่านศูนย์กลาของอนุภาค รูปร่าง และชนิดของอนุภาค ดังนั้นสมการที่ใช้ในการหาค่าต่ำสุดของความเร็วของการก่อสภาพของไหลคือ

$$\mathrm{Re}_{p,mf} = [(33.7)^2 + 0.0408 Ar]^{0.5} - 33.7 \qquad (2.39)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathrm{Re}_{p,mf} = \frac{D_p \upsilon_{mf} \rho_g}{\mu} \tag{2.40}$$

โดยค่าคงที่ของอาร์คิมิดีสหรือกาลิเลโอ คือ อัตราส่วนระหว่างแรงโน้มถ่วงกับแรงเสียดทาน

$$Ar_{p,mf} = \frac{D_p^3 \rho_g \left(\rho_s - \rho_g\right) g}{\mu^2} \tag{2.41}$$

2.8.2 ประเภทของการก่อสภาพของไหล

2.8.2.1 การก่อสภาพของไหลสองสถานะ (Two-phase fluidization)

หมายความว่า ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยของสองสถานะ คือ ของแข็งกับของเหลว ขแงไหลนี้อาจจะเป็นแก๊สหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้น การก่อสภาพของไหลสองสถานะยังแบ่งออกได้อีก 2 ประเภทคือ

1. แก๊สการก่อสภาพของไหล
2. การก่อสภาพของไหลของของเหลว

2.8.2.2 การก่อสภาพของไหลสามสถานะ (Three-phase fluidization)

หมายความว่า ภายในหอทดลองหรือเบดจะประกอบไปด้วยของสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สำหรับการก่อสภาพของไหลสามสถานะนี้ เป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากการก่อสภาพของไหลสองสถานะ

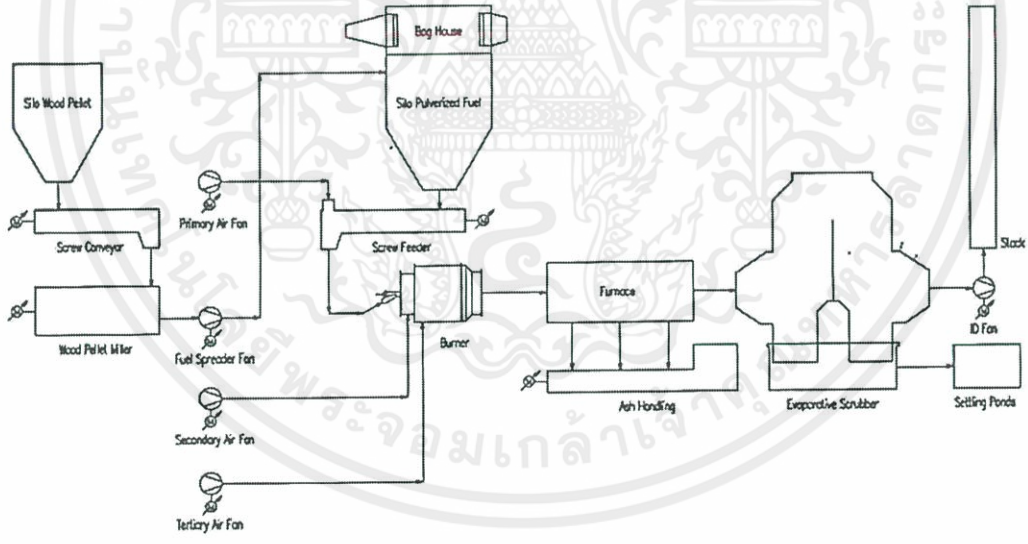
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การคำนวณและการออกแบบ

เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการต่อเนื่อง จึงขออ้างถึงการศึกษาข้อควรปรับปรุงของระบบเดิม เพื่อที่จะสามารถคำนวณและออกแบบระบบขนส่งชีวมวล ซึ่งการออกแบบระบบนั้นควรออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชนิดของเชื้อเพลิงที่จะใช้ ในที่นี้คือเชื้อเพลิงชีวมวลโดยแนวคิดในการออกแบบจะเป็นการสร้างระบบโดยใช้ สกรูลำเลียง เครื่องบด ไซโคลน เครื่องดักกรองฝุ่นด้วยถุงกรอง ถังพักเชื้อเพลิง (hopper) และการขนถ่ายด้วยลม มาประยุกต์รวมกันในการออกแบบครั้งนี้ เพื่อทาให้สามารถป้อนระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าสู่เตาเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งออกแบบท่อดูดเชื้อเพลิง ออกแบบนมหนู (nozzle) ในท่อลมลำดับที่หนึ่ง (primary air) และ การเลือกขนาดโบลเวอร์ (Blower)

3.1 ระบบชุดทดลองเดิม

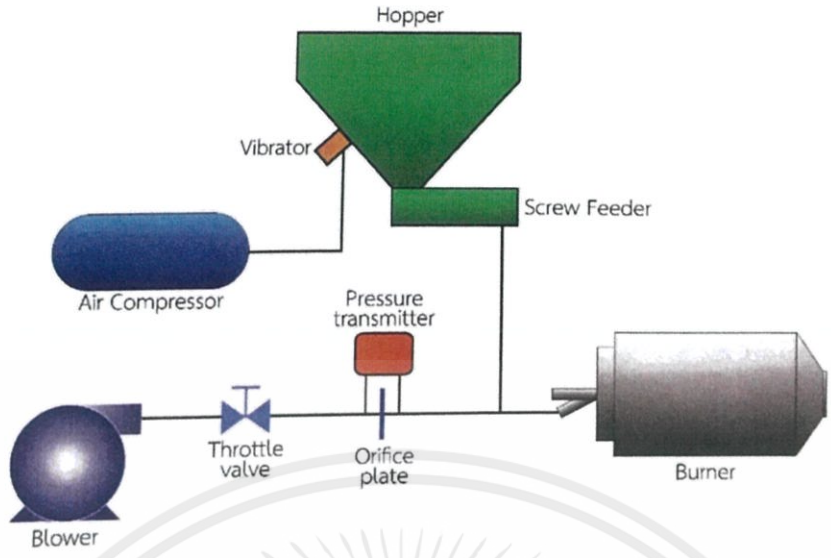
ระบบชุดทดลองเดิมมีระบบการทำงานดังรูปที่ 3.1



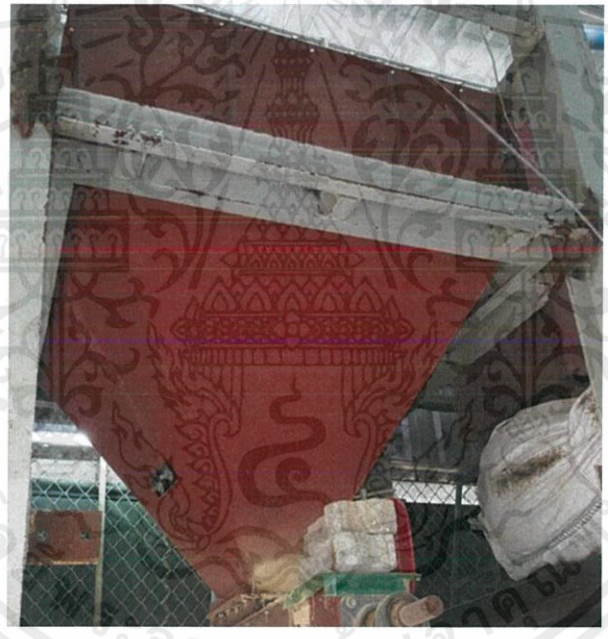
รูปที่ 3.1 แผนภาพรวมของระบบผลิตความร้อนจากชีวมวลฝุ่น

สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ระบบป้อนเชื้อเพลิงถือเป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างมาก และเป็นระบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยหลายส่วน ซึ่งองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง แสดงดังภาพที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



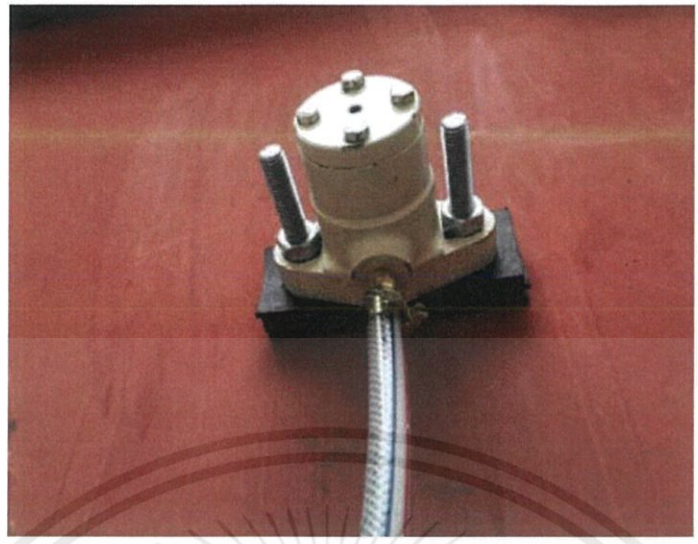
รูปที่ 3.2 แผนภาพองค์ประกอบย่อยของระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง



รูปที่ 3.3 ลักษณะถังพักเชื้อเพลิงชีวมวล (hopper)

สำหรับถังพักเชื้อเพลิง และสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่แสดงในภาพที่ 3.3 นั้นถูกสร้างขึ้นตามแบบสั่งผลิตในรายงานฉบับเก่า [1] ซึ่งตามแบบดังกล่าวมีความจุประมาณ 0.5 m^3 สามารถสำรองเชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับการทดสอบการเผาไหม้ที่อัตรา 1 MW ได้นานสูงสุดถึง 45 นาที นอกจากนี้บริเวณผนังด้วนข้างของถังพักเชื้อเพลงได้ถูกติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมชนิดเคาะ หรือทุบโดยตรง (Impact hammer) โดยใช้ลมจากเครื่องอัดอากาศที่ความดัน 4 bar_g เพื่อให้การไหลของเชื้อเพลิงในถังพักเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และลดการติดค้างของเชื่อเพลิงในถังพัก ซึ่งลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับถังพักเชื้อเพลิง แสดงดังภาพที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้

เชื้อเพลิงชีวมวลผงจะถูกควบคุมอัตราการขนถ่ายด้วยความเวรอบของสกรูขนถ่าย และจะถูกส่งเข้าห้องเผาไหม้ด้วยวิธีการขนถ่ายด้วยลม ดังภาพที่ 3.5

รูปที่ 3.5 โบลเวอร์ และวาล์วปรับอัตราการไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง

แสดงลักษณะของโบลเวอร์ (blower) สำหรับอากาศส่วนที่หนึ่ง ซึ่งเป็นอากาศที่นำเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และลักษณะของวาล์วปีกผีเสื้อที่ให้สำหรับควบคุมอัตราการไหลของอากาศ เพื่อให้ได้ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ในย่านต่างๆ เมื่อเชื้อเพลิงถูกลำเลียงผ่านสกรูลำเลียงแล้วจะตกสู่ห้องโรยเชื้อเพลิง (mixing box) ซึ่งเป็นกล่องที่มีหน้าที่ผสมอากาศและเชื้อเพลิงผง เชื้อเพลิงที่จกลงมาจากสกรูขนถ่ายจะถูกอากาศเหนี่ยวนำให้เข้าสู่ห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การปรับปรุงแก้ไขระบบ

3.2.1 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับกำลังเผา 500 kW

3.2.1.1 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับกำลังเผา 500 kW

สามารถคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง ($\dot{m}_{fuel}$) ได้จากสมการ

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q}{LHV} \tag{3.1}$$

เนื่องจากต้องการพลังงานความร้อนที่ 500 kW โดยใช้เชื้อเพลิงผงซึ่งเป็นไม้ยางพาราอัดแท่งที่มีค่าความร้อน 16,161 kJ/kg จะพบว่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้สำหรับกำลังเผา 500 kW คือ 0.03094 kg/s

3.2.1.2 การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับกำลังเผา 500 kW

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้ยางพารา ที่ผ่านการบดแล้วถูกคัดแยกแล้ว จากนั้นนำไปวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุ [2] แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุของเชื้อเพลิง

คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง (%)	สภาพน้ำหนักแห้ง (%)
ความชื้น	5.81	-
สารระเหย	76.68	81.41
ถ่านคงตัว	15.23	16.16
เถ้า	2.28	2.43
ไฮโดรเจน	6.31	6.01
คาร์บอน	45.42	48.22
ไนโตรเจน	0.45	0.48
ออกซิเจน	45.52	42.86
ซัลเฟอร์	0.00	0.00
ค่าความร้อนสูง	4,180	4,440
ค่าความร้อนต่ำ	3,860	4,100

การคำนวณหาอัตราของอากาศทั้งสามส่วน ต้องทำการวิเคราะห์การดุลสมการสตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ เมื่อทราบองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุดังตารางที่ 4.1 แล้วจากสมการที่ (3.11) สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงคือ

$$C_{0.038}H_{0.057}N_{0.0003}O_{0.025} + H_{0.0065}O_{0.0032} + 0.039(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.038CO_2 + 0.032H_2O + 0.15N_2 \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคำนวณหาค่าอัตรากับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี $(A/F)_{stoic}$ จากสมการที่ (3.13) จะได้ $(A/F)_{stoic} = 5.41$

การจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้อากาศส่วนเกินตามทฤษฎีที่ 15% เมื่อทราบอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่กำลังความร้อน 500 kW แล้วนำไปคำนวณหาอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง (Φ_{fuel}) ตามสมการที่ (2.14) และจะสามารถหาอัตราไหลเชิงมวลได้จากสมการที่ (2.13) อัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรของอากาศแสดงได้ดังตารางที่ (3.2) อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และตติยภูมิ ในการจำลองและการทดลองจะควบคุมอัตราส่วนที่ร้อยละ 25 65 และ 10 ตามลำดับ ที่สัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินตามทฤษฎีแสดงดังตารางที่ (3.3)

ในส่วนของการทดลอง จะใช้พัดลมเป็นอุปกรณ์สร้างอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วนซึ่งถูกควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) โดยใช้ differential transmitter เป็นอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิส (Orifice plate) ที่ผ่านการเขียนโปรแกรมควบคุม อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแต่ละส่วนที่สัมพันธ์กับความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิส คำนวณจากสมการที่ (3.2) สำหรับอากาศปฐมภูมิ

$$\dot{m}_{air} = 0.022879\sqrt{\Delta p} \tag{3.3}$$

ตารางที่ 3.2 อัตราการไหลของอากาศ (ความหนาแน่นของอากาศ = 1.18 kg/m^3

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินตามทฤษฎี (%)	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)	อัตราไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)
15	0.38474	0.32605

*เมื่อ สมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่อากาศส่วนเกิน 15% คือ

$$C_{0.038}H_{0.057}N_{0.0003}O_{0.025} + H_{0.0065}O_{0.0032} + 0.059(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.038CO_2 + 0.032H_2O + 0.22N_2 + 0.019O_2$$

ตารางที่ 3.3 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามส่วน

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินตามทฤษฎี (%)	อากาศปฐมภูมิ (kg/s) (25%)	อากาศทุติยภูมิ (kg/s) (65%)	อากาศตติยภูมิ (kg/s) (10%)
15	0.09619	0.25008	0.03847

3.2.2 การออกแบบและแก้ไขระบบดูดเชื้อเพลิงในเครื่องบด

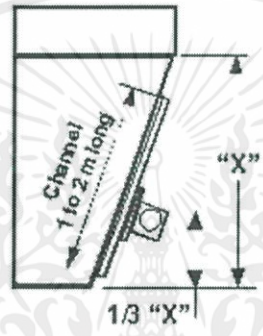
เนื่องจากชุดทดลองแบบเดิมมีกำลังในการดูดต่ำและไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากใช้ท่อปลายเปิดพื้นที่หน้าตัด 0.003167 ตารางเมตร ส่งผลให้ความเร็วในการดูดเชื้อเพลิงไม่เพียงพอต่ออัตราบดของเครื่องบด จึงเกิดการก่อตัวสะสมอยู่ภายในเครื่องบดและทำให้อุดตันได้ จึงทำการออกแบบท่อดูดเชื้อเพลิงโดยการใช้ท่อปลายปิด และเจาะรูรอบท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูละ 0.000078540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเมตร จำนวน 30 รู ซึ่งสอดคล้องกับสมการอัตราการไหล เมื่อพื้นที่หน้าตัดลดลงจะทำให้ค่าความเร็วในการดูดเชื้อเพลิงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนจากลมมีค่ามากขึ้นจึงนำพาเชื้อเพลิงเข้าสู่ท่อดูดได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพียงพอต่ออัตราการไหล

3.2.3 การออกแบบและแก้ไขอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน

ชุดทดลองแบบเก่ามีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนที่ไม่ตรงไปตามแบบจึงทำให้เชื้อเพลิงบดละเอียดโรยตัวชิดกันมากขึ้นทำให้เกิดการอุดตันในไซโลเก็บเชื้อเพลิง จึงทำการออกแบบและคำนวณแก้ไขระยะการติดตั้งของอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 การออกแบบระยะติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน

โดยระยะ X มีค่าเท่ากับ 95 เซนติเมตร ดังนั้นระยะที่ควรติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนคือ 1/3 ของ 95 เซนติเมตร คือ 31.67 เซนติเมตร หรือประมาณ 31.7 เซนติเมตร ซึ่งพบว่าอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนติดตั้งต่ำกว่าระยะที่คำนวณได้ จึงทำการแก้ไขระบบ

3.2.4 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์สำหรับพัดลมของระบบอากาศปฐมภูมิ

หา Head loss เมื่อ

- ท่อ PVC มีค่าความขรุขระ = 0.0015 ที่อุณหภูมิ T = 25 องศาเซลเซียส
- ท่อ Flexible มีค่าความขรุขระ = 0.07 ที่อุณหภูมิ T = 25 องศาเซลเซียส
- ท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว D = 0.1016 ความยาว 0.32 เมตร
- ท่อ PVC ขนาด 3 นิ้ว D = 0.0762 ความยาว 2.01 เมตร
- ท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว D = 0.0508 ความยาว 0.15 เมตร
- ท่อ Flexible ขนาด 3 นิ้ว D = 0.0762 ความยาว 2.0 เมตร
- ท่อ Flexible ขนาด 2.5 นิ้ว D = 0.0562 ความยาว 2.0 เมตร
- Nozzle ขนาด 4 นิ้ว x 3 นิ้ว ค่า K_l = 0.3881

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Nozzle ขนาด 3 นิ้ว x 2 นิ้ว ค่า K_l = 0.8603
- Diffuser ขนาด 2 นิ้ว x 3 นิ้ว ค่า K_l = 0.2557
- วาล์วปีผีเสื้อขนาด 2 นิ้ว ค่า K_l = 0.86
- ออริฟิส ค่า K_l = 5.38
- ท่องอรัศมีความโค้ง 60 ค่า K_L = 0.125
- ท่องอรัศมีความโค้ง 30ค่า K_L = 0.15
- ท่องอรัศมีความโค้ง 20 ค่า K_L = 0.175
- ท่องอรัศมีความโค้ง 44 ค่า K_L = 0.15
- ท่องอรัศมีความโค้ง 58 ค่า K_L = 0.175
- ท่องอรัศมีความโค้ง 23 ค่า K_L = 0.15
- ความเร็วของอากาศในท่อ = 6.44 m/s

โดยค่าความดันสูญเสียสามารถคำนวณได้จากสมการ

Total Head loss = Major loss + Minor loss

$$h_t = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} + \sum K_L \frac{v^2}{2g} \qquad (3.4)$$

หา Major loss จากสมการ $h_f = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g}$ โดยหาค่า f จากตาราง Moody diagram โดยหาจาก

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho VD}{\mu} \qquad (3.5)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{1.181 \times 6.44 \times 0.1016}{1.85 \times 10^{-5}} = 41769.3$$

$$\text{ความขรุขระ} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0015}{0.1016} = 1.47 \times 10^{-5}$$

จาก Moody diagram ได้ค่า f คือ 0.0259

คำวนณในทำนองเดียวกันกับท่อ PVC ขนาด 3 นิ้ว และ 2 นิ้ว จะได้ค่า Friction factor เท่ากับ 0.0245 และ 0.0219 ตามลำดับ และท่อ Flexible ขนาด 3 นิ้ว และ 2.5 นิ้ว จะได้ค่า Friction factor เท่ากับ 0.0274 และ 0.0265 ตามลำดับ จะได้ค่า $h_f = 5.18$ เมตร

หาค่า Minor loss จากสมการ $\frac{K_L V^2}{2g}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัว Nozzle ขนาด 4 นิ้ว x 3 นิ้ว $= \frac{0.3881 \times 6.44^2}{2 \times 9.81} = 0.82$ เมตร

และอุปกรณ์ชนิดอื่นๆสามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันจะได้ค่า Minor loss ของ Nozzle ขนาด 3 นิ้ว x 2 นิ้ว, Diffuser ขนาด 2 นิ้ว x 3 นิ้ว, วาล์วปีกผีเสื้อขนาด 2 นิ้ว, ออริฟิส, ท่องอรัศมี 60, ท่องอรัศมี 30, ท่องอรัศมี 20, ท่องอรัศมี 44, ท่องอรัศมี 58 และท่องอรัศมี 23 ดังนี้ 1.82 เมตร, 0.54 เมตร, 1.82 เมตร, 11.37 เมตร, 0.26 เมตร, 0.32 เมตร, 0.37 เมตร, 0.32 เมตร, 0.37 เมตร, 0.32 เมตร ตามลำดับ

จะได้ค่า Minor loss คือ 18.32 เมตร ดังนั้น Total head loss คือ 23.50 เมตร

หา ΔP จากสมการ

$$\Delta P = \rho g \Delta h \tag{3.6}$$

$$\Delta P = 1.181 \times 9.81 \times 23.50 = 272.36 \text{ Pa}$$

3.2.5 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิง

ในการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิงภายในท่อ โดยใช้สมการของ Rizk สำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มม. และ 63.5 มม. ให้ความเร็วลมวิกฤตดังตารางที่ 3.4

	ท่อส่งเชื้อเพลิงขนาด 80 มม.		ท่อส่งเชื้อเพลิงขนาด 63.5 มม.	
kW	Velocity (m/s)	Rizk Vst (m/s)	Velocity (m/s)	Rizk Vst (m/s)
100	2.3885	4.5910	3.7911	6.5444
150	2.3885	5.3166	3.7911	4.7367
200	3.1847	5.3166	5.0548	4.7367
250	3.9809	5.3166	6.3185	4.7367
300	4.7771	5.3991	7.5822	4.8102
350	5.5732	5.3166	8.8459	4.7367
400	6.3694	5.3166	10.1096	4.7367
450	7.1656	5.3166	11.3733	4.7367
500	7.9618	5.3166	12.6370	4.7367

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราเร็วของท่อที่กิโลวัตต์ความร้อนต่างๆ

ซึ่งความเร็วของอากาศในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มม. จะพ้นความเร็ววิกฤต ที่ 350 kW และเมื่อลดขนาดท่อลงเหลือ 63.5 มม. ความเร็วของอากาศในท่อจะพ้นความเร็ววิกฤตที่ 200 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การคำนวณหาความดันสูญเสียในท่อส่งเชื้อเพลิง

การคำนวณความดันตกคร่อมในท่อส่งเชื้อเพลิงจะคำนวณโดยให้ความหนาแน่นของอากาศและความเร็วของอากาศในท่อคงที่ เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณลง

การคำนวณในวิธีนี้จะแบ่งค่าความดันสูญเสียในท่อส่งเชื้อเพลิงออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง (Acceleration loss)
2. ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ (Pipe loss)
3. ความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อโค้ง (Bend Loss)

3.2.6.1 ความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง

หาได้จากสมการ

$$\Delta P_a = \rho_f \cdot v^2 (0.5 + \frac{\mu \cdot v_s}{v}) \tag{3.7}$$

สำหรับท่อขนาด 80 มม. ที่ 300 kW

ρ_f = 1.12 kg/m^3

v = 12.63 m/s

v_s = 12.42 m/s

μ = 0.73

จะได้

$$\Delta P_a = 1.12 \cdot 12.63^2 (0.5 + \frac{0.73 \cdot 12.42}{v}) \tag{3.8}$$

ΔP_a = 139.33 Pa

3.2.6.2 ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ (Pipe loss)

หาได้จากสมการ

$$\Delta P_L = \frac{\rho_f \cdot \mu \cdot L}{2 \cdot D} (\lambda_f + \mu \cdot \lambda_s) \tag{3.9}$$

โดยค่า λ_s หาได้จาก

$$\lambda_s = \frac{2.1 \cdot F_{rp}^{0.25}}{\mu^{0.3} \cdot F_r} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{0.1} \tag{3.10}$$

โดย

$$F_{rp} = \frac{U_{fo}^2}{g \cdot d} \qquad F_r = \frac{v^2}{g \cdot D} \tag{3.11}$$

จะได้

F_{rp} = 8.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F_r = 203.25

สำหรับท่อขนาด 80 มม. ที่ 300 kW

L = 1.82 m

D = 0.08 m

λ_s = 0.0399

λ_f = 0.02

จะได้

$$\Delta P_L = \frac{1.12 \cdot 0.73 \cdot 1.96}{2 \cdot 0.0635}(0.02 + 0.73 \cdot 0.0.9)$$

ΔP_L = 0.42 Pa

3.2.6.3 ความดันสูญเสียจากการไหลผ่านท่อโค้ง

หาได้จากสมการ

$$\Delta P_b = \frac{N \cdot B \cdot \rho_f \cdot v^2 \cdot (1+\mu)}{2} \qquad (3.12)$$

N = จำนวนท่องอในระบบ

B = สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียของท่อโค้ง (ตารางที่ 3.5)

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าแฟกเตอร์ความโค้ง

อัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโค้ง	B
2	1.5
4	0.75
>6	0.5

ส่วนโค้งที่ 1 (รัศมีความโค้ง 0.60 m)

N = 1

B = 0.5

จะได้

$$\Delta P_b = \frac{1 \cdot 0.5 \cdot 1.12 \cdot 12.63^2 \cdot (1+0.73)}{2}$$

$$\Delta P_b = \Delta P_{b1} + \Delta P_{b2}$$

ΔP_{b1} = 75.93 Pa

ส่วนโค้งที่ 2 (รัศมีความโค้ง 1.9 m)

N = 1

B = 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\Delta P_b = \frac{1 \cdot 0.5 \cdot 1.12 \cdot 12.63^2 \cdot (1+0.73)}{2}$$

$$\Delta P_{b2} = 75.93 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_b = \Delta P_{b1} + \Delta P_{b2} = 75.93 + 75.93 = 151.86$$

ความดันสูญเสียรวมของท่อส่งเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านสูญกลาง 80 มม. ที่ 300 kW

$$\Delta P_t = \Delta P_a + \Delta P_L + \Delta P_b \qquad (3.13)$$

$$\Delta P_t = 139.33 + 0.42 + 151.86 = 291.61 \text{ Pa}$$

จากค่าความดันสูญเสียที่ได้สามารถนำไปพิจารณาในการเลือกเครื่องเป่าลมให้เหมาะสมกับระบบขนถ่ายเชื้อเพลิงด้วยลมต่อไป โดยเครื่องเป่าลมที่จะนำมาติดตั้งจะต้องสร้างอัตราการไหลได้ตามที่ต้องการภายใต้อิทธิพลของความดันสูญเสียที่สภาวะสูงสุด (500 kW)

คูณค่า Safety factor 3.5 จะได้ $\Delta P = (272.36 + 291.61) \times 3.5 = 1868.89$ Pa

หาขนาดของมอเตอร์พัดลม

$$\text{กำลังมอเตอร์} = \Delta P \times Q = 1868.89 \times 0.0481$$

จะได้กำลังมอเตอร์ที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนโบลเวอร์เพื่อเอาชนะการสูญเสียภายในท่อคือ 94.9 วัตต์

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบความดันสูญเสียที่ส่อส่งเชื้อเพลิง ในแต่ละสภาวะ

ท่อส่งเชื้อเพลิงขนาด 80 มม.					ท่อส่งเชื้อเพลิงขนาด 63.5 มม.			
kW	Dpa	DPl	DPb	DPt	Dpa	DPl	DPb	DPt
100	6.05	3.55	4.63	14.23	15.3	1.47	11.7	28.47
150	7.56	7.2	5.42	20.18	19.1	2.94	13.67	35.71
200	13.5	4.11	5.39	23	23.04	2.94	39.67	65.65
250	21.02	15.19	9.62	45.83	47.27	1.17	37.9	86.34
300	31.14	2.06	22.04	55.24	62.18	0.87	22.04	85.09
350	42.4	1.56	30.05	74.01	78.76	0.68	74.3	153.74
400	55.36	1.24	39.18	95.78	97.11	0.56	39.18	136.85
450	70.16	1.01	49.66	120.83	117.41	0.48	123.07	240.96
500	86.72	0.86	61.38	148.96	139.33	0.42	151.86	291.61

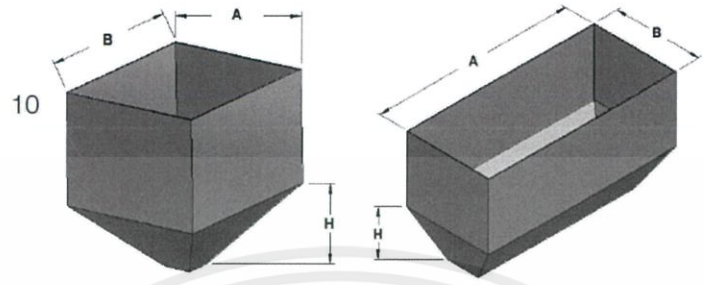
3.2.7 การคำนวณหาแรงที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์สั่นสะเทือนด้วยลม

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F = \frac{\text{BULK MATERIAL WEIGHT}}{10} \qquad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $F = \frac{15.53}{10} = 1.55$ จะเท่ากับน้ำหนักของเชื้อเพลิงในไซโลในส่วนเคลื่อนย้าย (ส่วนลาดเอียงของไซโล) และ 10 คือ ค่าคงที่ของแรงจากอุปกรณ์สั่นสะเทือน



รูปที่ 3.7 แบบจำลองไซโลกักเก็บ

BULK MATERIAL WEIGHT = B (ft) x A (ft) x H (ft) x 1/3 x ความหนาแน่นของวัสดุในหน่วย lbs/ft³

จะได้

$$\text{BULK MATERIAL WEIGHT} = B \times A \times H \times 1/3 \times 23.09$$

$$\text{BULK MATERIAL WEIGHT} = 358.58 \text{ lb}$$

$$F = \frac{358.58}{10} = 35.85 \text{ lbf}$$

$$= 159.5 \text{ N}$$

แรงที่ได้ใช้สำหรับการเลือกอุปกรณ์สั่นสะเทือนด้วยลมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยอุปกรณ์สั่นสะเทือนด้วยลมที่เลือกใช้จะต้องสร้างแรงสั่นสะเทือนได้ไม่น้อยกว่าค่าที่ได้ และจะต้องสามารถทำงานในช่วงความดันที่เหมาะสมกับปั๊มลมที่มีอยู่ (1 - 5 บาร์)

ตารางที่ 3.7 แสดงการเลือกใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนด้วยลม

Model	Vibrations 1000 vpm 2 bar	6 bar	Force N 2 bar	6 bar	air consumption l/min 2 bar	6 bar	A Length mm	C SW mm	D Thread	E Inlet	F Outlet	Weight g
FPLF-12-XS	6	11,5	22	68	0,8	15	50	37	M-8	1/8"	1/8"	105
FPLF-12-S	6,2	9,3	34	92	0,8	25	71	34	M-8	1/8"	1/8"	150
FPLF-12-M	5	6,7	34	74	0,5	19	81	34	M-8	1/8"	1/8"	174
FPLF-12-L	4	5,4	32	81	1	20	94	34	M-8	1/8"	1/8"	205
FPLF-18-S	5	7,7	66	187	5	57	81	42	M-10	1/8"	1/8"	289
FPLF-18-M	4	5,9	68	188	4	52	94	42	M-10	1/8"	1/8"	342
FPLF-18-L	3,1	4,6	64	206	5	46	109	42	M-10	1/8"	1/8"	405
FPLF-25-S	3,6	5,5	126	416	13	93	98	50	M-12	1/8"	1/4"	525
FPLF-25-M	3	4,2	142	504	23	87	116	50	M-12	1/8"	1/4"	640
FPLF-25-L	2,4	3,7	186	594	18	93	136	50	M-12	1/8"	1/4"	774
FPLF-35-S	3,8	5,8	294	1038	23	162	98	65	M-12	1/4"	1/4"	880
FPLF-35-M	3	4,6	248	1080	24	141	116	65	M-12	1/4"	1/4"	1065
FPLF-35-L	2,4	3,6	282	1066	38	135	136	65	M-12	1/4"	1/4"	1295
FPLF-50-M	1,85	2,8	490	1660	48	192	L 154	A 90	C 8,8	F 1/4"	F_1 1/4"	3050
FPLF-60-M	1,95	2,7	610	2170	90	275	L 154	A 110	C 8,8	F 1/4"	F_1 3/8"	4100
FPLF-95-M	1,8	2,8	1620	6150	170	490	L 156	A 150	C 13,0	F 3/8"	F_1 3/8"	9400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Force vibration) โดยสมมติให้ระบบเป็นแบบไม่มีแรงเสียดทาน จะได้สมการอนุพันธ์ดังนี้

$$m\ddot{x} + kx = F\sin(\omega t) \tag{3.15}$$

หรือ

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = f_0 \sin(\omega t) \tag{3.16}$$

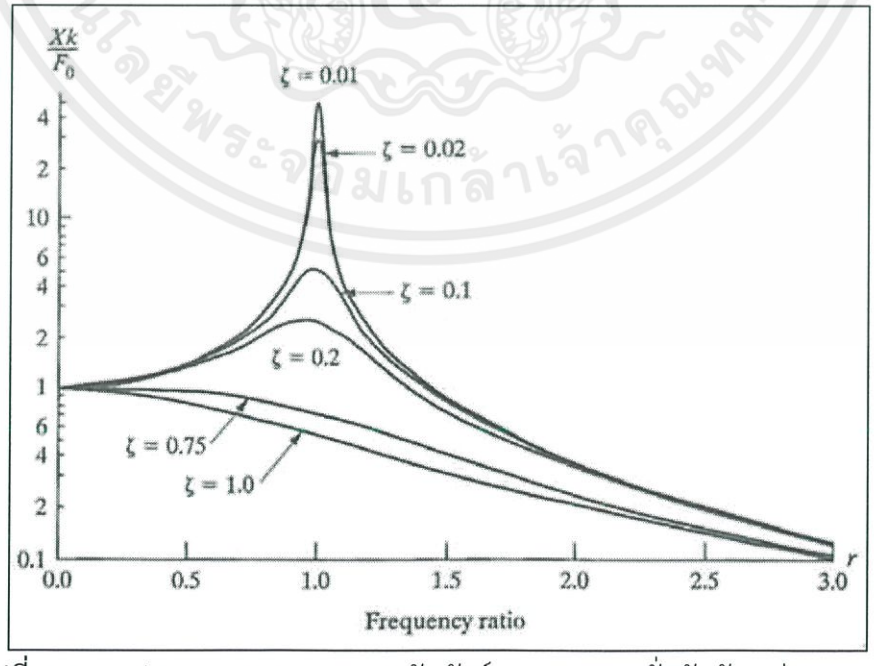
จะได้สมการการเคลื่อนที่คือ

$$x(t) = \frac{v_0}{\omega_n}\sin(\omega_n t) + (x_0 - \frac{f_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)})\cos(\omega_n t) + \frac{f_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)}\cos(\omega t) \tag{3.17}$$

ซึ่งขนาดในการสั่นสูงสุด คือ

$$x = \frac{f_0}{\left(\omega_n^2 - \omega^2\right)} \tag{3.18}$$

ซึ่งเราพบว่า หากความถี่ของอุปกรณ์สั่นสะเทือนมีขนาดใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติที่ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดน้อยๆ ขนาดการสั่นจะมีขนาดเข้าใกล้อนันต์ดังภาพ



รูปที่ 3.8 กราฟ log scale แสดงความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นกับอัตราส่วนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความถี่ธรรมชาติ $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

K คือ ค่านิจของสปริง คำนวณจากรูปร่างและชนิดวัสดุ โดย

$$k = \frac{EA}{L} \tag{3.19}$$

เนื่องจากมีจุดยึด 4 จุด และเหล็กที่ให้ทำจุดยึดใช้มาตรฐาน ss400 คำนวณค่า K ได้

k = 6.612 GN/m

มวลไซโล อ้างอิงจาก Cad Catia = 272.44 kg มวลเชื้อเพลิงสูงสุด 255.3 kg

ω_n = 35103 rev/min

จากข้อมูลจำเพาะของเครื่องสั่นสะเทือนสามารถสร้างการสั่นสูงสุดได้ที่ rev/min ซึ่งพบว่าไม่สามารถสร้างความถี่ได้ถึงความถี่ธรรมชาติได้ แต่จากทฤษฎีพบว่า หากใช้ค่าความถี่ของเครื่องสั่นสะเทือนสูงขึ้น จะทำให้ขนาดการสั่นสูงขึ้นด้วย แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์สร้างการสั่นสะเทือนและเครื่องปรับความดันอากาศ สามารถใช้งานได้ในย่านความดัน 1-5 bar ฉะนั้น ค่าความดันลมที่เหมาะสมต่อการใช้งานจากการคำนวณคือ 5 bar

3.2.8 การออกแบบสกรูลำเลียงขนส่งเชื้อเพลิง

สกรูขนถ่ายวัสดุเป็นหนึ่งในวิธีขนถ่ายวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นระบบที่มีความคงทน ง่ายต่อการบำรุงรักษา สามารถกำหนดอัตราการขนถ่ายได้ ขนถ่ายวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุหลากหลายชนิด ซึ่งในการออกแบบสกรูขนถ่ายนั้นจำเป็นต้องทราบถึงสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ทำการขนถ่าย เพื่อนำไปใช้ในการจำแนกประเภทของวัสดุ โดยประเภทของวัสดุนั้นจะเป็นตัวช่วยในการเลือกชนิดของสกรู วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปใบสกรู และช่วยการกำหนดตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณขนาดของสกรูนั้นเอง

ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณเพื่อออกแบบสกรูขนถ่ายวัสดุ

การคำนวณอัตราการขนถ่าย

Parameter	Symbol	Value	Unit
ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	ρ	312	kg/m^3
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวสกรู	D	0.10	m
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเพลา	d	0.034	m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะพิตช์	p	0.10	m
พื้นที่หน้าตัดของใบสกรู	A	0.007	m^2
แฟกเตอร์ของระยะพิตช์	CF1	1	-
แฟกเตอร์ของใบสกรู	CF2	3.7	-
แฟกเตอร์จำนวนใบพัด	CF3	1.25	-
แฟกเตอร์ความเต็มราง	k	0.23	-
ความเร็วรอบของสกรูขนถ่ายที่ 300 kW	N	1.69	Hz
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 300 kW	m_s	0.01856	kg/s

จากตารางที่ 3.7 จะพบว่าเมื่อทำการป้อนเชื้อเพลิงที่การสร้างความร้อน 300 kW พบว่าค่าของแฟกเตอร์ความเต็มรางมีค่าเท่ากับ 0.234374 ซึ่งต่างไปจากทางทฤษฎีที่กำหนดไว้ 1.902%

ตารางที่ 3.9 ผลการเปรียบเทียบอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

kW	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/s)	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงตามทฤษฎี (kg/s_{th})	ค่าความคลาดเคลื่อน	%ความคลาดเคลื่อน
200	0.01238	0.011101	0.115255	11.52548
250	0.01547	0.014657	0.055461	5.546077
300	0.01856	0.018214	0.019018	1.901824
350	0.02166	0.02177	0.005058	0.505798
400	0.02475	0.025327	0.022767	2.276721
450	0.02784	0.028775	0.032505	3.250515
500	0.03094	0.032332	0.043049	4.30489
550	0.03403	0.035888	0.051782	5.178154
600	0.03713	0.039445	0.058686	5.868592
650	0.04022	0.043001	0.064681	6.468077
700	0.04331	0.046558	0.06976	6.975975
750	0.04641	0.050114	0.073918	7.391829
800	0.0495	0.053671	0.077712	7.771202

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

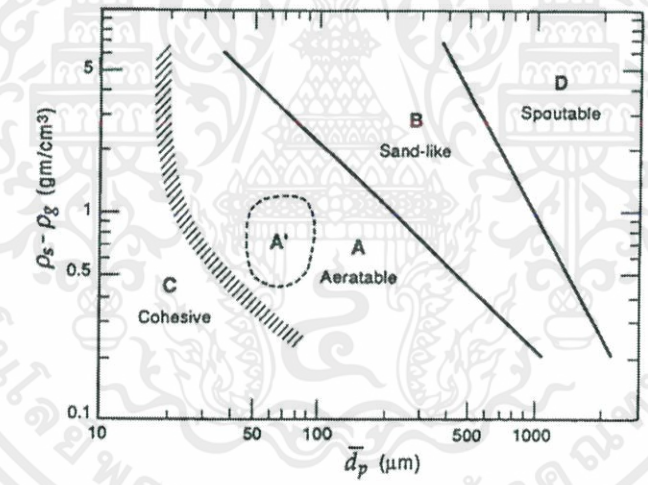
850	0.0526	0.057227	0.080859	8.085947
900	0.05569	0.060784	0.083803	8.380313
950	0.05878	0.06434	0.086421	8.642135
1000	0.06188	0.067897	0.088618	8.8618

จากตารางที่ 3.8 พบว่าอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงตามทฤษฎีที่คิดจากแฟกเตอร์ความเต็มรางกับอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองวัดเทียบของสกรูขนส่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 6.055% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

3.2.9 การคำนวณและการออกแบบเครื่องก่อสภาพของไหล (Fluidization)

การคำนวณความเร็วลมที่ทำให้วัสดุผงประพฤติตัวเป็นของเหลว Fluidization

จากการจำแนกวัสดุในรูป 1 โดยใช้ผลต่างระหว่างความหนาแน่นและขนาดเชื้อเพลิงเฉลี่ย พบว่าเชื้อเพลิงผงบดละเอียดถูกจัดอยู่ในกลุ่ม A'



รูปที่ 3.9 แสดงถึงการจำแนกอนุภาคในสภาวะอากาศที่อุณหภูมิห้อง

หาค่าความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้วัสดุประพฤติตัวเป็นของไหล จากสมการ

$$\mathrm{Re}_{p,mf} = (33.7^2 + 0.0408Ar)^{0.5} - 33.7 \tag{3.15}$$

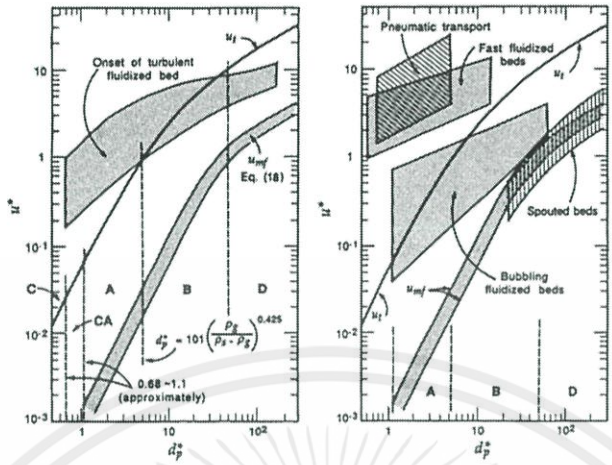
$$Ar_{p,mf} = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \tag{3.16}$$

ซึ่ง

$$\mathrm{Re}_{p,mf} = \frac{D_p v_{mf} \rho_g}{\mu} \tag{3.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่าความเร็วอากาศต่ำสุดที่ 0.8220 mm/s เพื่อที่จะใช้ในการยกเชื้อเพลิงขนาด 65.92 micron



รูปที่ 3.10 แสดงไดอะแกรมการไหลของอนุภาคของแข็ง

หาค่าความเร็วสูงสุดที่จะไม่ทำให้วัสดุไม่เกิดฟองอากาศขณะที่ทำให้วัสดุประพฤติตัวเป็นของไหล ซึ่งค่า d_p^* หาจาก

$$d_p^* = (Ar_{p,mf})^{1/3} \tag{3.18}$$

$$u^* = \frac{\mathrm{Re}_p}{\left(Ar_{p,mf}\right)^{1/3}} \tag{3.19}$$

$$\mathrm{Re}_p = \frac{D_p u_0 \rho_g}{\mu} \tag{3.20}$$

จะได้ค่า u_0 หรือค่าเความเร็วสูงสุดที่จะไม่ทำให้วัสดุไม่เกิดฟองอากาศขณะที่ทำให้วัสดุประพฤติตัวเป็นของไหลคือ 1.492 mm/s เพื่อที่จะใช้ในการยกเชื้อเพลิงขนาด 65.92 micron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของเชื้อเพลิงผงในไซโล และระยะเวลาที่เชื้อเพลิงจะเกิดการอัดตัวแน่นในไซโล
2. เพื่อทดสอบว่าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโลสามารถป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงได้จริง
3. เพื่อตรวจสอบลักษณะการลำเลียงเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อทดสอบหาความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิง

4.2 แนวทางการทดลอง

1. ศึกษาพฤติกรรมการไหลของเชื้อเพลิงในไซโล
   1.1) ทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้เครื่องมือป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโล
   1.2) การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงโดยใช้ฟลูอิไดเซอร์เบด
   1.3) การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงโดยใช้หัวฉีดอากาศใต้ไซโล
   1.4) การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงโดยใช้ระบบสั่นสะเทือน
   1.5) การปรับปรุงค่าอัตราการป้อนของของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานร่วมกับการเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิง
2. ศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิง
   2.1) การทดสอบการกองของเชื้อเพลิงบนท่อลำเลียงเชื้อเพลิงแบบเก่า
   2.2) การทดสอบการกองของเชื้อเพลิงบนท่อลำเลียงเชื้อเพลิงแบบใหม่ตามที่ออกแบบมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.3.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเชื้อเพลิงในไซโล

1. ชุดสกรูลำเลียงพร้อมอินเวอเตอร์
2. นาฬิกาจับเวลา
3. ตาชั่งน้ำหนัก
4. ระบบฟลูอิไดเซอร์เบด
5. หัวฉีดอากาศ
6. อุปกรณ์สร้างการสั่นสะเทือน
7. ปั๊มลม
8. อุปกรณ์ปรับความดัน (Regulator)

4.3.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสม

1. โบลเวอร์แบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง
2. Pressure Transmitter
3. Orifice plate
4. ชุดสกรูลำเลียงพร้อมอินเวอเตอร์
5. ท่อลำเลียงเชื้อเพลิงแบบยืดหยุ่น
6.ระบบเผาไหม้และพัดลมเหนี่ยวนำ
7.อุปกรณ์วัดมุม (compass in iPhone7)

4.4 ขั้นตอนการทดลอง

4.4.1 การศึกษาการไหลของเชื้อเพลิงผงในไซโล

1. บรรจุเชื้อเพลิงในไซโลจนถึงระดับทดลอง โดยอยู่ในช่วงระหว่างเซนเซอร์วัดระดับ บน-ล่าง
2. เปิดสกรูลำเลียง โดยปรับกระแสไฟฟ้าตามเงื่อนไขการดำเนินงานจริง (2.42 Hz หรือที่ค่าความร้อน 300 kW) โดยใช้ Inverter ในการปรับค่า
3. จับเวลา 1 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิง บันทึกผล
4. ทำข้อ 2-3 จนครบเวลา 10 นาที
5. บรรจุเชื้อเพลิงในไซโลจนถึงระดับทดลอง ตามข้อที่ 1 ทิ้งเชื้อเพลิงไว้ในไซโล 48 ชั่วโมง
6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2, 3, และ 4 เปรียบเทียบผลกับกรณีที่ไม่มีการทิ้งเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงโดยใช้ฟลูอิไดเซอร์เบด

1. บรรจุเชื้อเพลิงในไซโลจนถึงระดับทดลอง โดยอยู่ในช่วงระหว่างเซนเซอร์วัดระดับ บน-ล่าง
2. เปิดฟลูอิไดเซอร์เบด
3. เปิดสกรูลำเลียง โดยปรับกระแสไฟฟ้าตามเงื่อนไขการดำเนินงานจริง (2.42 Hz ที่ 300 kW) ซึ่งจะใช้ Inverter ในการปรับ
4. จับเวลา 1 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิง บันทึกผล
5. ทำข้อ 3-4 จนครบเวลา 10 นาที และเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี

4.4.3 การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องสั่นสะเทือน

1. บรรจุเชื้อเพลิงในไซโลจนถึงระดับทดลอง โดยอยู่ในช่วงระหว่างเซนเซอร์วัดระดับ บน-ล่าง
2. เปิดเครื่องสั่นสะเทือน โดยใช้ความดันลมที่ 1,2,3,4 และ 5 บาร์
3. เปิดสกรูลำเลียง โดยปรับกระแสไฟฟ้าตามเงื่อนไขการดำเนินงานจริง (2.42 Hz ที่ 300 kW) ซึ่งจะใช้ Inverter ในการปรับ
4. จับเวลา 1 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิง บันทึกผล
5. ทำการทดลองที่ความดันละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยที่แต่ละความดัน เปรียบผลการทดลองในแต่ละค่าความดัน และเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี

4.4.4 การสอบเทียบค่าของสกรูขนส่งเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู้ห้องเผาไหม้เมื่อใช้ควบคู่กับเครื่องป้องกันการติดขัดที่เหมาะสม

1. เปรียบเทียบผลการทดลองในข้อ 4.4.2, 4.4.3 และ 4.4.4 แล้วเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานเพื่อการติดขัดของเชื้อเพลิง
2. ทำการสอบเทียบสกรูลำเลียง ทดสอบโดยใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 เฮิรตซ์
3. ทำการป้อนเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบมอเตอร์ตามข้อที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำค่าความเร็วมอเตอร์ละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยในแต่ละครั้ง
4. เขียนกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยที่หาได้จากข้อ 3 และความเร็วรอบมอเตอร์

4.4.5 ศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิง โดยใช้ท่อยืดหยุ่นขนาด 3 นิ้ว

1. ติดตั้งระบบท่อลำเลียงอากาศปฐมภูมิ โดยใช้ท่อลำเลียงเชื้อเพลิงแบบยืดหยุ่นขนาด 3 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เติมเชื้อเพลิงในไซโลจนถึงระดับที่ทำการทดลอง
3. เปิดระบบลมปฐมภูมิด้วยสภาวะที่ใช้คำนวณใน
4. เปิดสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง ที่อัตราการป้อนที่ 100 kw
5. สังเกตลักษณะการไหลของเชื้อเพลิง และวัดปริมาณการกองของเชื้อเพลิงในท่อแต่ละจุด บันทึกผล
6. ปรับค่าความเร็วรอบมอเตอร์ของสกรูลำเลียง จนถึงอัตราการป้อนที่ 150 , 200 ,250 ,300 ,350 ,400 ,450 และ 500 kw และบันทึกผลการกองของเชื้อเพลิงตามข้อ 5

7.เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณ

4.4.6 ศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิง โดยใช้ท่อยืดหยุ่นขนาด 2.5 นิ้ว

ทำการทดลองเหมือนข้อ 4.4.6 แต่ในข้อที่ 1 เปลี่ยนมาให้ท่อท่อยืดหยุ่นขนาด 2.5 นิ้วแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

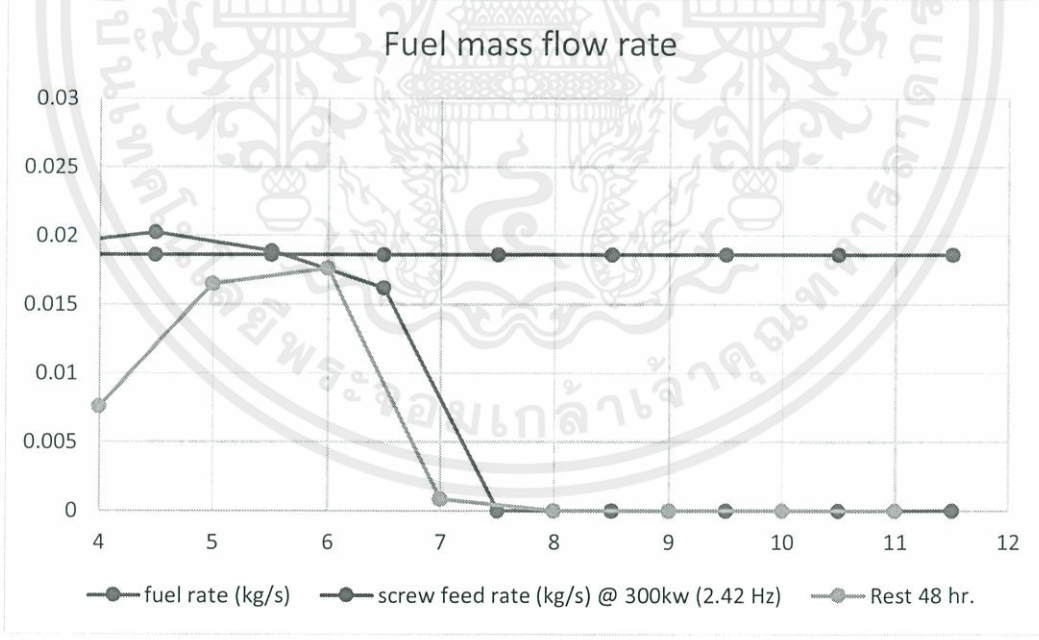
วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองการศึกษาการไหลของเชื้อเพลิงในไซโล

การศึกษาการไหลของเชื้อเพลิงในไซโลเป็นการศึกษาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงผ่านทางสกรูลำเลียงที่ค่าความเร็วรอบมอเตอร์สกรูลำเลียง 2.42 Hz หรือเทียบเท่ากับอัตราป้อนของเชื้อเพลิงที่ 300 kw สำหรับไซโลอุดมคติ เพื่อสังเกตการอัดตัวแน่นและการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโลกักเก็บเชื้อเพลิง

5.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้เครื่องมือป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโล

การศึกษานี้ต้องการเปรียบเทียบอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ออกจากไซโลโดยไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโล กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจากไซโลอุดมคติ



รูปที่ 5.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่คำนวณได้จากทฤษฎีกับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง เมื่อทดลองที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 2.42 Hz

จากรูปที่ 5.1 เส้นกราฟสีส้มแสดงถึงอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงที่คำนวณได้ตามทฤษฎี เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงในกรณีที่ไม่มีการทิ้งเชื้อเพลิงไว้หลังการบด พบว่าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

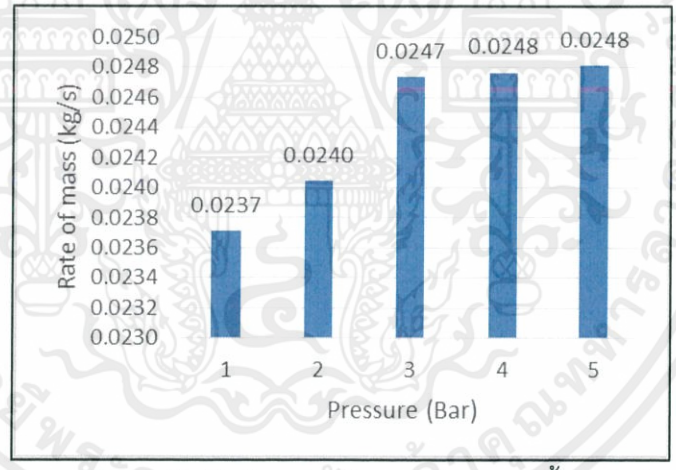
นาทีที่ 5 เริ่มเกิดการอัดตัวแน่นของเชื้อเพลิงในไซโลจึงทำให้อัตราการไหลค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์นาทีที่ 8

เส้นกราฟสีเทาแสดงถึงอัตราการไหลของเชื้อเพลิงกรณีที่มีการทิ้งไว้หลังจากบดไปแล้ว 48 ชั่วโมง พบว่าเชื้อเพลิงมีการอัดตัวไวกว่ารูปแบบแรก ซึ่งการก่อตัวนี้เกิดจากความชื้นของตัวเชื้อเพลิงและเกิดการอัดตัวด้วยน้ำหนักของเชื้อเพลิงตามธรรมชาติของเชื้อเพลิง

5.1.2 ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้งานเครื่องป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิง

การศึกษานี้ต้องการเปรียบเทียบอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิง โดยการทำลายโครงสร้างการอัดตัวของเชื้อเพลิง กับอัตราการไหลของไซโลอุดมคติ อุปกรณ์ที่นำมาใช้คือในการป้องกันการติดขัดแบบสั่นสะเทือน

5.1.2.1 การเปรียบเทียบอัตราการไหลของเชื้อเพลิงกับค่าความดันที่ใช้ในอุปกรณ์ป้องกันการติดขัดแบบสั่นสะเทือน



รูปที่ 5.2 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเชื้อเพลิงกับความดันที่ใช้ในอุปกรณ์ป้องกันการติดแบบสั่นสะเทือน เมื่อทดลองที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 2.42 Hz

จากรูปที่ 5.2 พบว่าอัตราการไหลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงเมื่อใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงที่ความดัน 1 bar มีค่าเท่ากับ 0.0237 kg/s ที่ความดัน 2 bar มีค่าเท่ากับ 0.0240 kg/s ที่ความดัน 3 bar มีค่าเท่ากับ 0.0247 kg/s ที่ความดัน 4 bar มีค่าเท่ากับ 0.0248 kg/s และที่ความดัน 5 bar มีค่าเท่ากับ 0.0248 kg/s

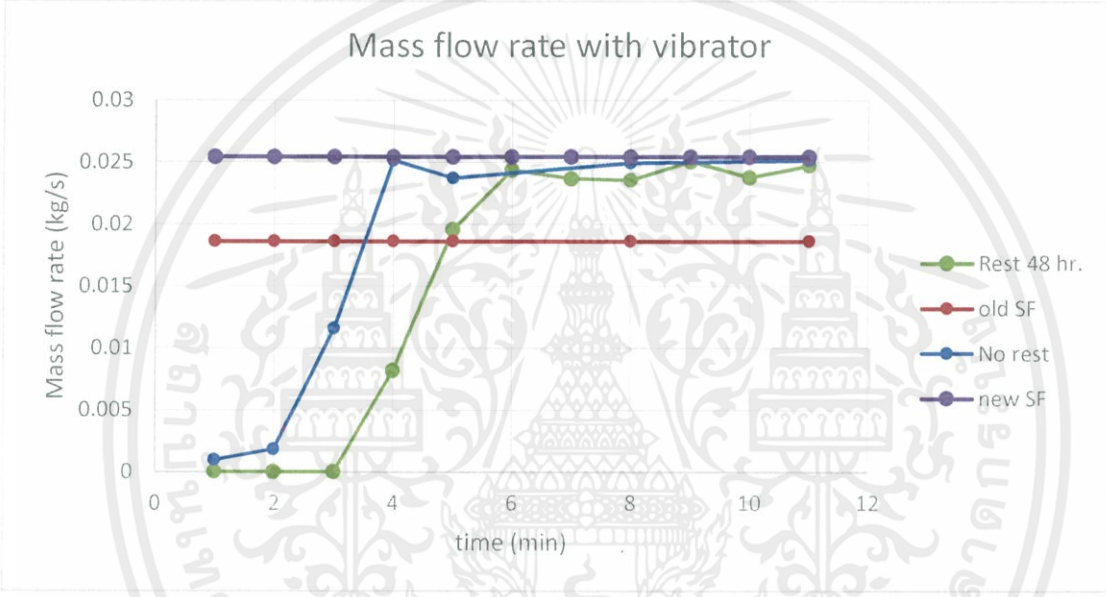
จากผลการทดลอง พบว่าที่ความดัน 3 bar คือค่าความดันลมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้งานกับอุปกรณ์ป้องกันการติดแบบสั่นสะเทือน เนื่องจากสามารถให้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงสูง และใช้ความดันลมต่ำกว่า ซึ่งถ้าหากใช้ความดันลมที่ 4 หรือ 5 bar จะทำให้ปั๊มลมไม่สามารถคงความดันไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้นาน อีกทั้งอัตราการป้อนสูงกว่าแค่ 0.0001 kg/s เมื่อเทียบกับการใช้ความดันลมที่ 3 bar จึงไม่คุ้มค่าต่อการใช้งาน

5.1.3 วิเคราะห์ผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโลแบบสั่นสะเทือน

การศึกษานี้ต้องการเปรียบเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงในกรณีที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิง กับกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิง เพื่อวัดประสิทธิภาพของเครื่องสั่นสะเทือน



รูปที่ 5.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่คำนวณได้ทางทฤษฎีกับอัตราการไหลที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 5.3 กราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดแบบสั่นสะเทือนโดยไม่มีการทิ้งเชื้อเพลิงไว้ในไซโล และกราฟสีเทาแสดงถึงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดแบบสั่นสะเทือนโดยมีการทิ้งเชื้อเพลิงไว้ในไซโลเป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนทำการทดลอง และกราฟเส้นสีส้มแสดงถึงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสำหรับไซโลอุดมคติ

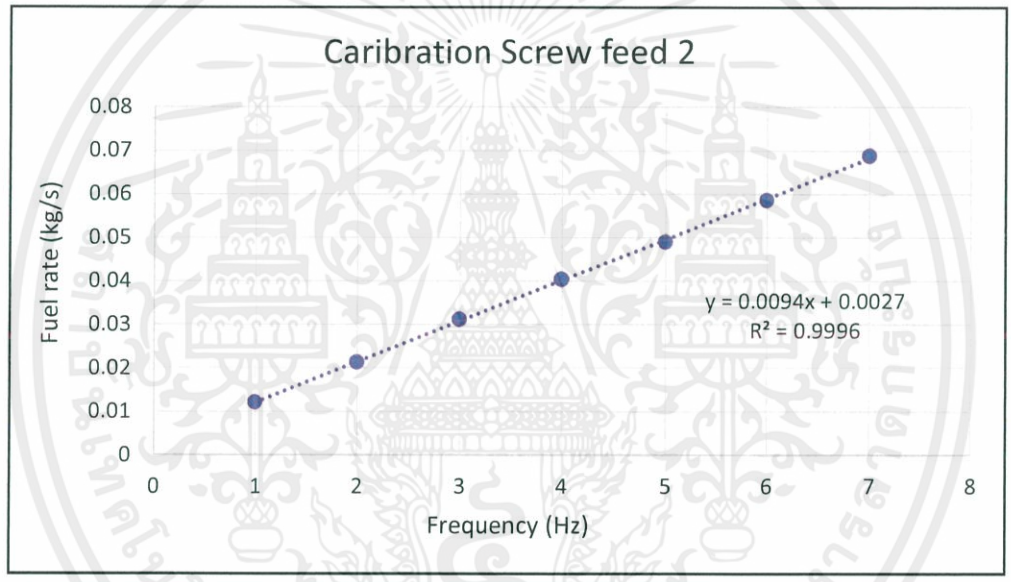
จากการทดลองพบโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันแบบสั่นสะเทือนที่ความดัน 3 bar และใช้ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 2.42 Hz พบว่ากรณีที่มีการทิ้งเชื้อเพลิงไว้ ช่วงเวลาที่ 4-11 นาที เชื้อเพลิงมีอัตราการไหลที่คงที่ ด้วยอัตราการไหลเฉลี่ย 0.0247 kg/s และ กรณีที่มีการทิ้งเชื้อเพลิงทิ้งไว้ 48 ชั่วโมงก่อนเริ่มทำการทดลองนั้น ในช่วงเวลาที่ 5-10 นาที เชื้อเพลิงมีอัตราการไหลที่คงที่ ด้วยอัตราการไหลเฉลี่ย 0.0242 kg/s และอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงในไซโลอุดมคติ อัตราการไหลเฉลี่ย 0.0186 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าการใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดแบบสั่นสะเทือนจะสามารถแก้ปัญหาการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโลได้เป็นอย่างดี แต่ผลกระทบที่ตามมาคือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ถูกลำเลียงออกจากสกรูมีอัตราที่มากกว่าอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงจากไซโลแบบอุดมคติ ดังนั้น เพื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ถูกต้อง จึงต้องทำการสอบเทียบสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง เมื่อทำงานคู่กับเครื่องสั่นสะเทือน

5.1.4 ผลการสอบเทียบค่าของสกรูขนส่งเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู้ห้องเผาไหม้เมื่อใช้ควบคู่กับเครื่องสั่นสะเทือน

จากข้อ 5.1.3 พบว่าการใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดของเชื้อเพลิงในไซโล ส่งผลให้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีอัตราที่มากกว่าการป้อนเชื้อเพลิงจากไซโลอุดมคติ ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้ทำการสอบเทียบสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงใหม่ เพื่อให้ได้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.4 แสดงถึงผลการสอบเทียบค่าของสกรูขนส่งที่ความถี่ต่างๆ

จากรูปที่ 5.4 แสดงถึงผลการสอบเทียบค่าของสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงได้ โดยเป็นไปตามสมการ $y = 0.0094x + 0.0027$ เมื่อค่า x คือค่าความถี่ของสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงในหน่วย Hz และ ค่า y คือค่าของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงในหน่วย kg/s

5.2 การวิเคราะห์ลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อหาค่าความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิง

การศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิ เป็นการศึกษาเพื่อหาความเร็วลมที่เหมาะสมต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงผง โดยปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง ซึ่งในการทดลองผู้ทดลองได้ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15 % และใช้อัตราส่วนการแบ่งอากาศระหว่างอากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ ตติยภูมิ ในอัตราส่วน 25 : 65 : 10

5.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ ในท่อแบบยืดหยุ่นขนาด 3 นิ้ว โดยใช้อัตราความร้อนสูงสุดไม่เกิน 500 kw

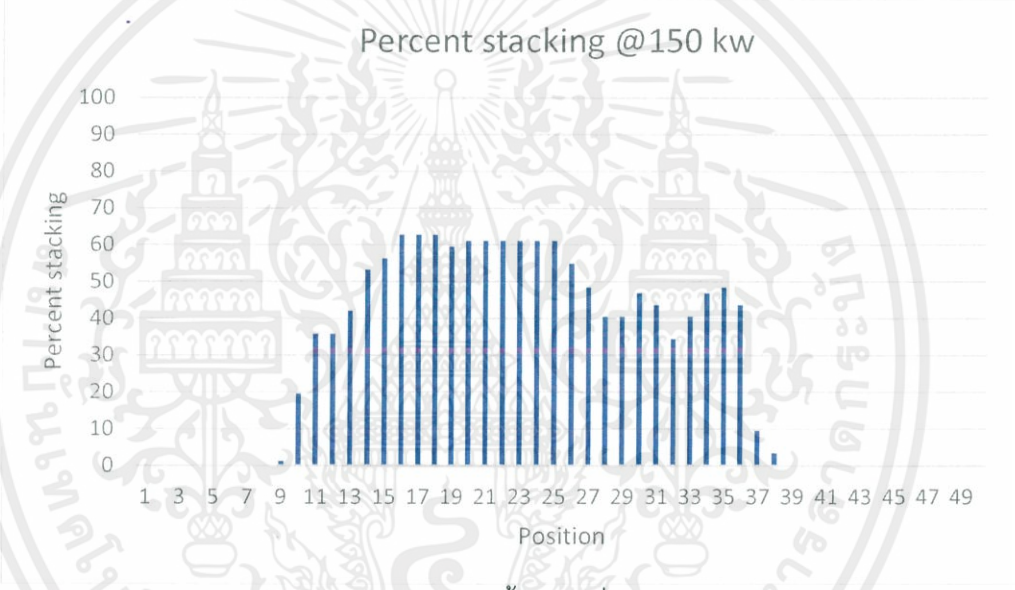
5.2.1.1 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน150 kW

-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0093 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0122 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 2.4325 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 5.3166 m/s



รูป 5.5 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 150 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.5 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 27.18 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 3.8611 m/sและตำแหน่งที่ 16 ถึง 18 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6.4978 m/s

5.2.1.2 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 200 kW

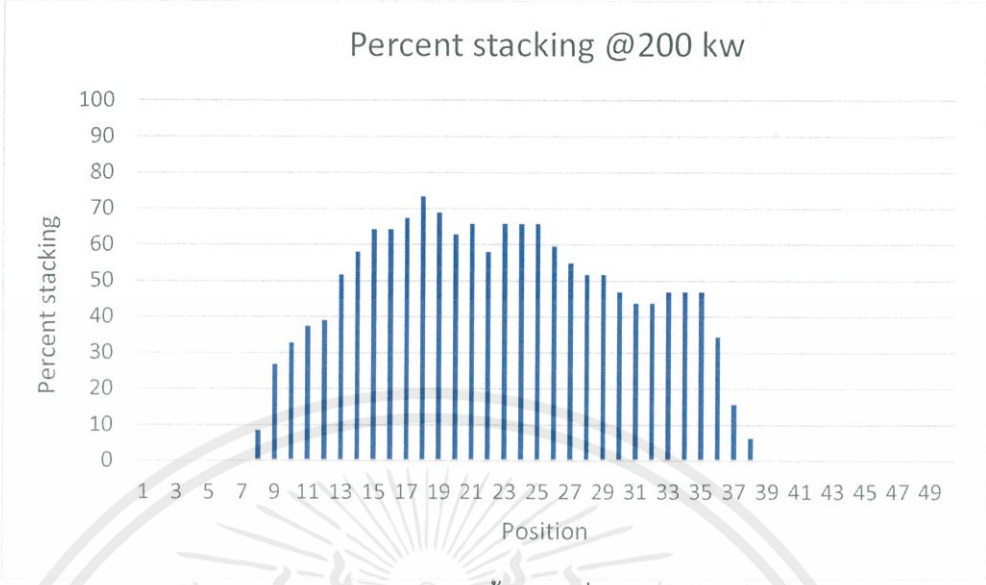
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0124 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0163 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 3.2433 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 5.3166 m/s



รูป 5.6 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 200 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.6 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 30.46 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 5.6164 m/s และตำแหน่งที่ 18 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12.1458 m/s

5.2.1.3 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 250 kW

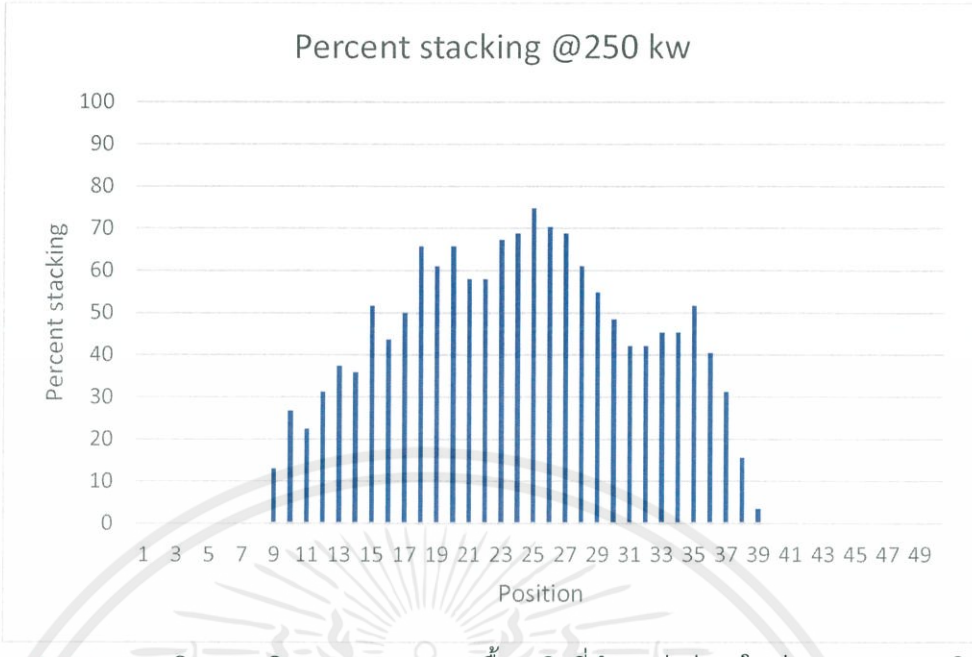
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0155 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0204 m3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 4.0541 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 5.3166 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.7 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 250 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.7 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 29.02 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 6.8551 m/s และตำแหน่งที่ 25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 16.0848 m/s

5.2.1.4 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 300 kW

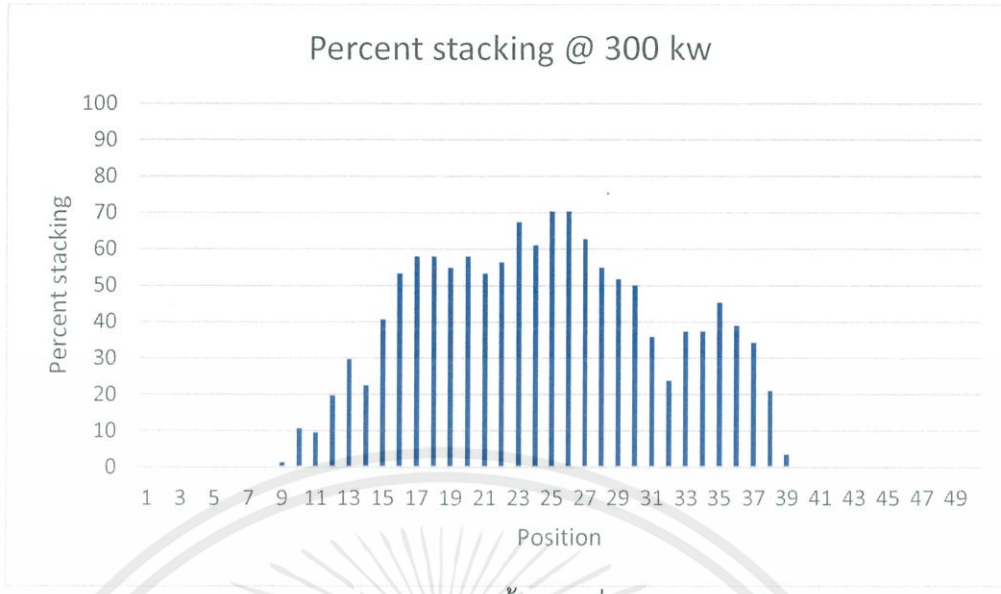
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0186 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0245 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 4.8650 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 5.3991 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.8 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 300 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.8 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 25.79 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 5.0969m/s และตำแหน่งที่ 25 และ 26 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5.4486 m/s

5.2.1.5 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 350 kW

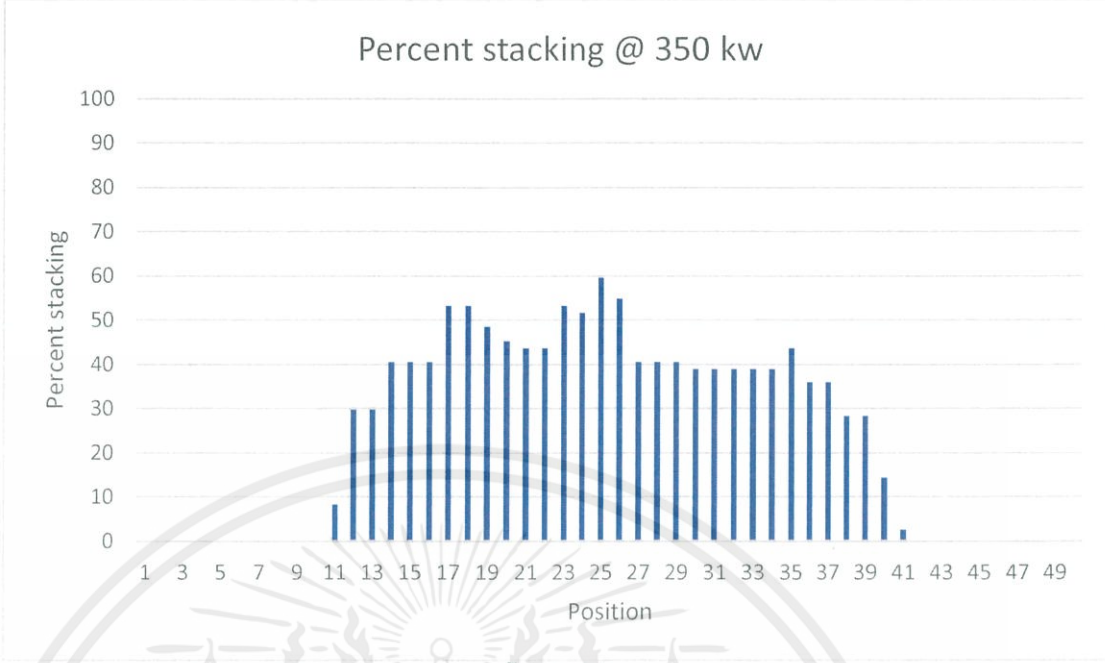
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0217 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0285 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 5.6758 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 5.3166 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.9 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 350 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.9 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 24.00 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 5.9146 m/s และตำแหน่งที่ 25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6.2410 m/s

5.2.1.6 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 400 kW

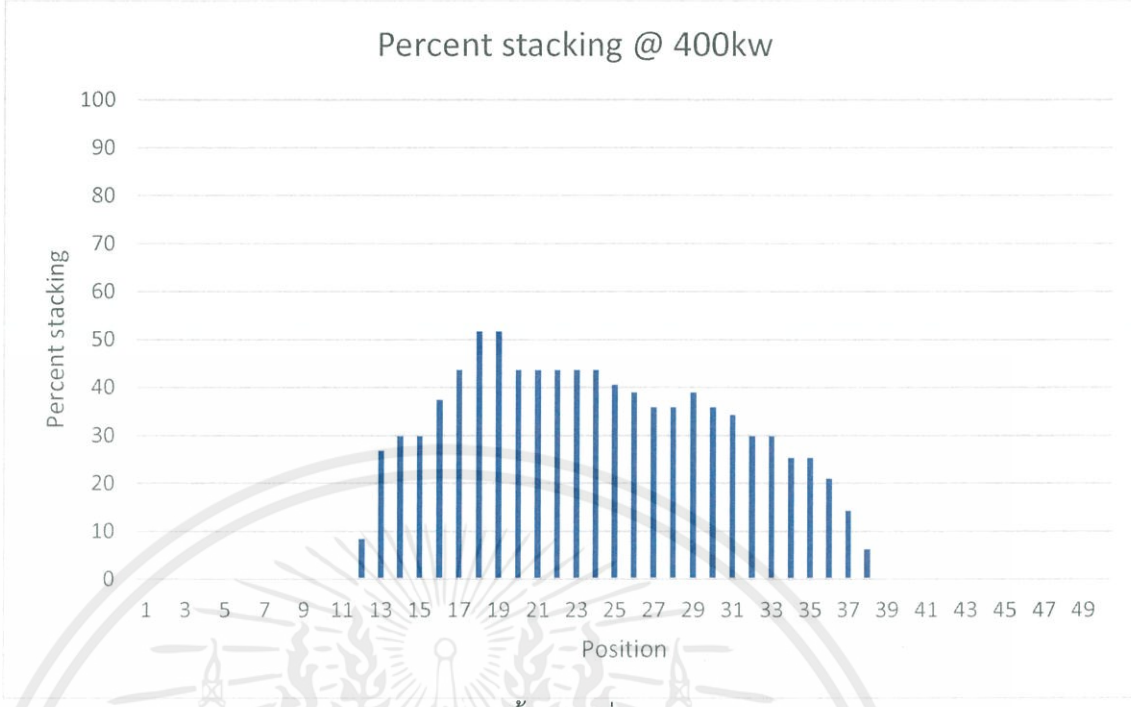
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0248 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0326 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 6.4866 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 5.3166 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.10 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 400 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.10 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 18.16 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 8.4101 m/s และตำแหน่งที่ 18 และ 19 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 13.3975 m/s

5.2.1.7 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 450 kW

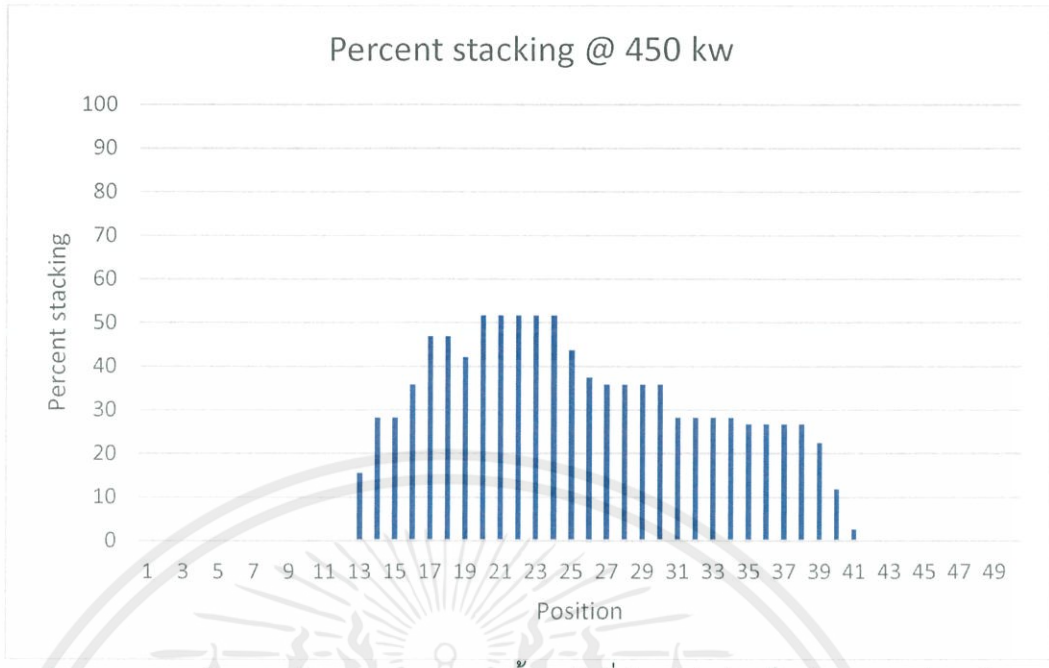
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0278 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0367 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 7.2974 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 5.3166 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.11 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 450 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.11 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 19.64 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 9.6985 m/s และตำแหน่งที่ 20 ถึง 24 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 15.0825 m/s

5.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศในท่ออากาศปฐมภูมิ ในท่อแบบยืดหยุ่นขนาด 2.5 นิ้ว โดยใช้อัตราความร้อนสูงสุดไม่เกิน 500 kW

5.2.2.1 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 150 kW

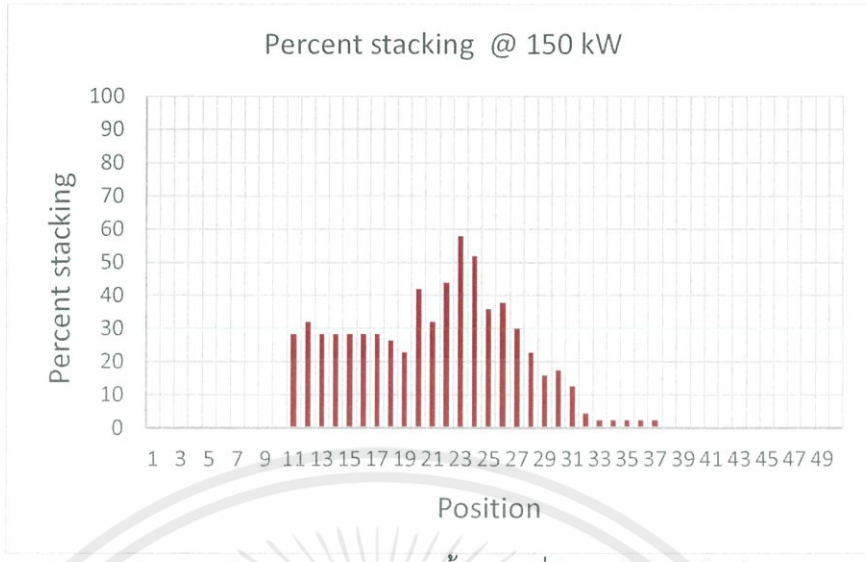
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0093 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0122 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 3.8608 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 4.7367 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.12 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 150 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.12 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 13.31 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 4.6447 m/s และตำแหน่งที่ 23 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9.1288 m/s

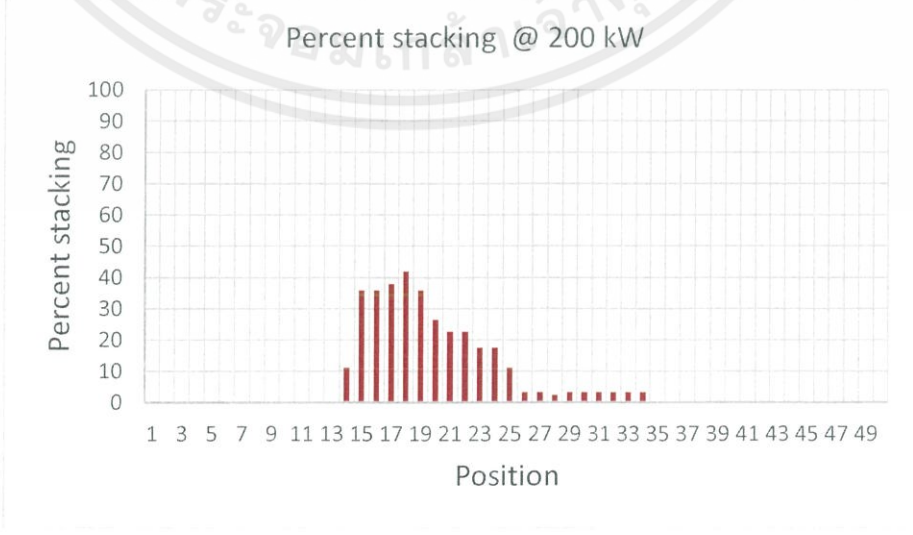
5.2.2.2 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 200 kW

-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0124 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0163 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 5.1478 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 4.7367 m/s



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.13 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 200 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.13 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 6.89 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 5.6432 m/s และตำแหน่งที่ 18 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8.8439 m/s

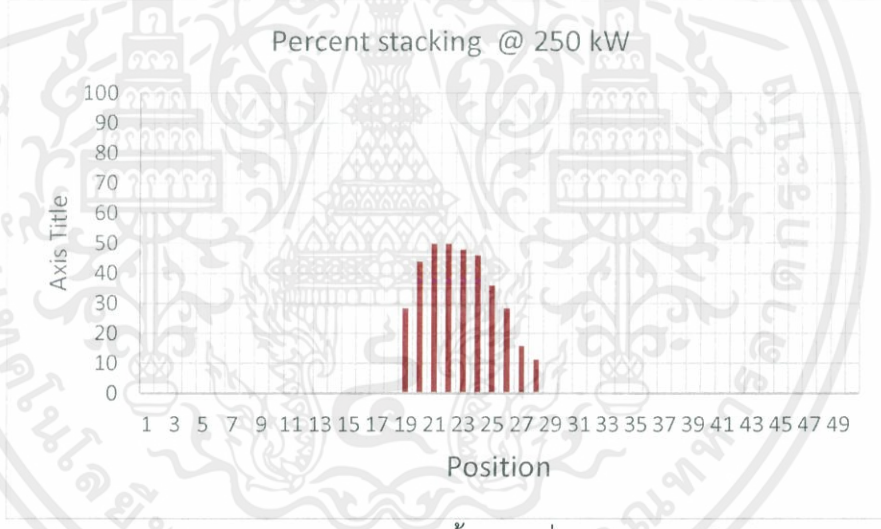
5.2.2.3 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 250 kW

-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0155 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0204 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 6.4347m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 4.7367 m/s



รูป 5.14 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 250 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.14 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 7.13 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 6.5474 m/s และตำแหน่งที่ 21 และ 22 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7.1568 m/s

5.2.2.4 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 300 kW

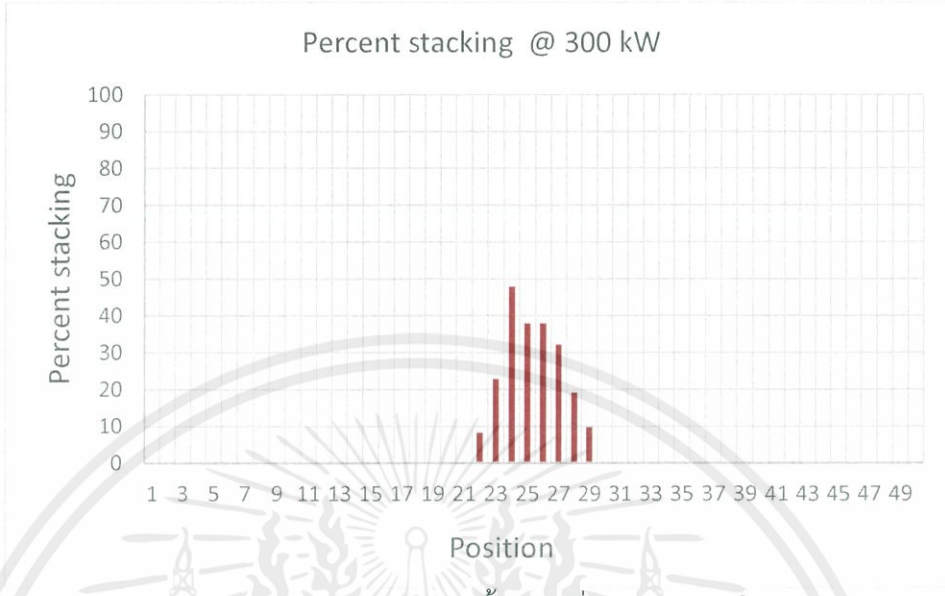
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0186 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0245 m^3/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 7.7217 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 4.8102 m/s



รูป 5.15 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 300 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.15 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 4.31 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 8.2415 m/s และตำแหน่งที่ 24 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 14.8190 m/s

5.2.2.5 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 350 kW

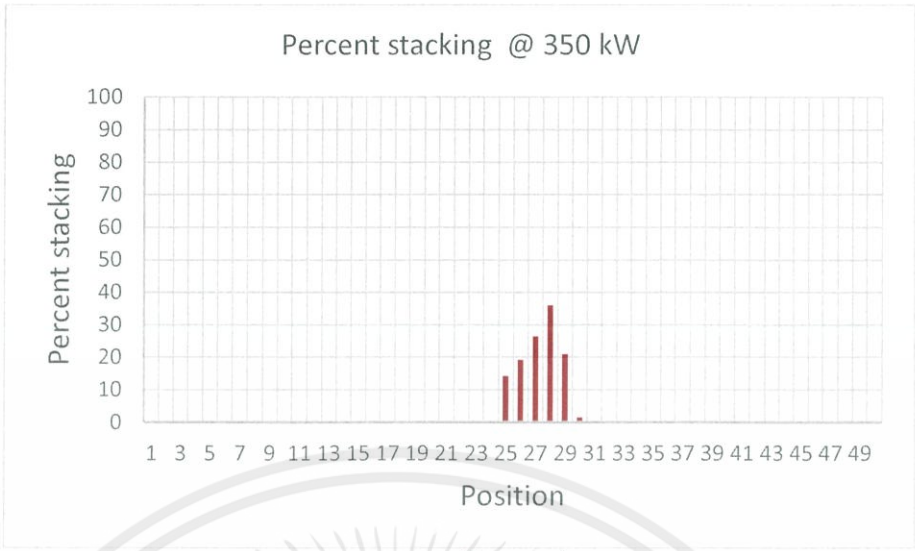
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0217 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0285 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 9.0086 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 4.7367 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.16 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 350 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.16 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 2.36 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 9.2812 m/s และตำแหน่งที่ 28 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 14.0336 m/s

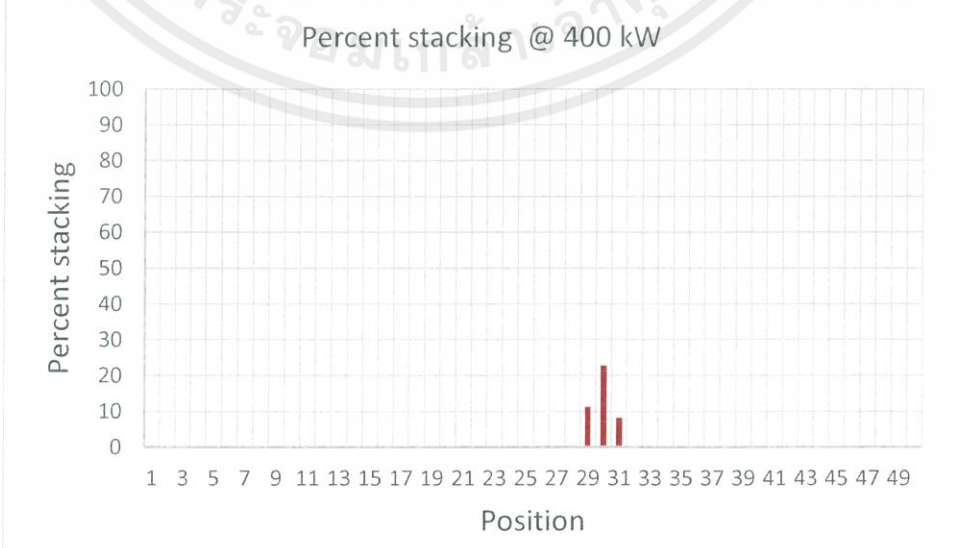
5.2.2.6 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 400 kW

-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0248 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0326 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 10.2956 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 4.7367 m/s



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5.17 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 400 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.17 พบว่าปริมาณการกองเฉลี่ยของเชื้อเพลิงมีปริมาณเท่ากับ 0.84 % เทียบกับปริมาตรของท่อลำเลียงเชื้อเพลิง โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อมีค่าเท่ากับ 10.5885 m/s และตำแหน่งที่ 30 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมากที่สุด มีค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 13.3146 m/s

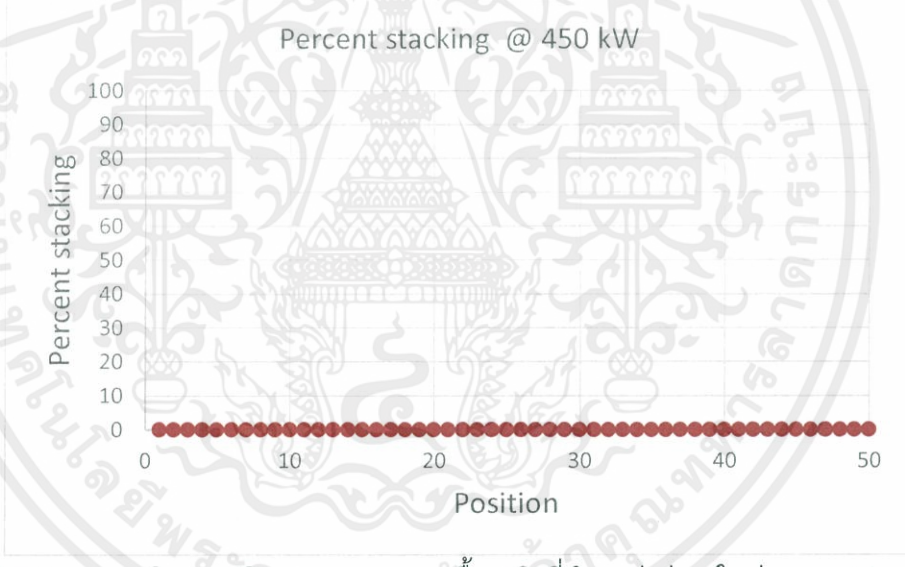
5.2.2.7 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 450 kW

-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0278 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0367 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 11.5825 m/s

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 4.7367 m/s



รูป 5.18 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 450 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.18 พบว่าไม่พบการกองของเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิ โดยความเร็วลมเฉลี่ยในท่อจึงมีค่าเท่ากับ 11.5825 m/s

5.2.2.8 ปริมาณการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่อ ที่อัตราความร้อน 500 kW

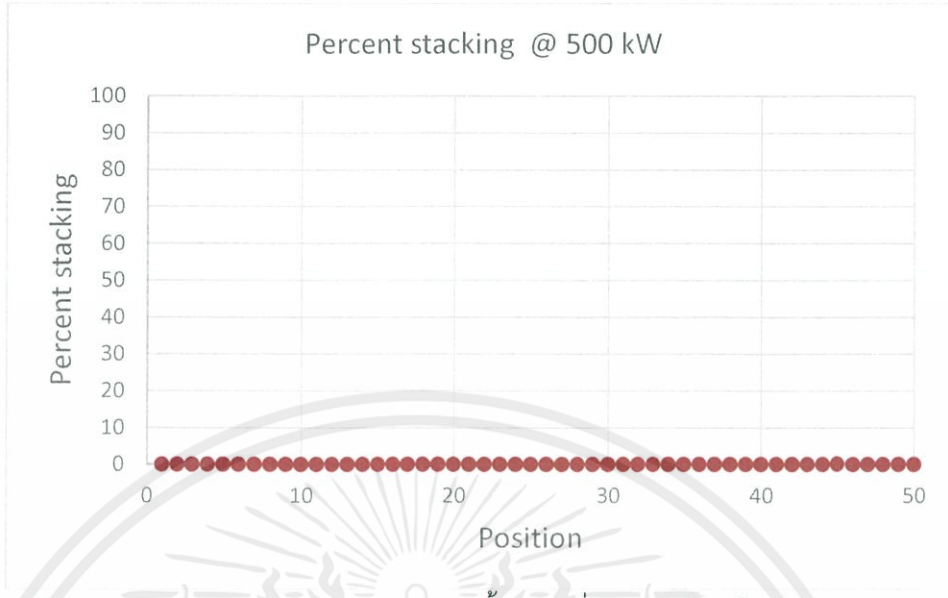
-ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง 0.0309 kg/s

-อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0408 m^3/s

-ความเร็วลมขาเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิ 12.8694 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ค่าความเร็วลมวิกฤติ 4.7367 m/s



รูป 5.19 แผนภูมิแสดงปริมาณการกองของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆในท่ออากาศปฐมภูมิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราความร้อน 500 kW

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.19 ไม่พบการกองของเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิ ความเร็วลมเฉลี่ยในท่อจึงมีค่าเท่ากับ 12.8694 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การทดลองนี้มุ่งเน้นถึงเสถียรภาพในการลำเลียงเชื้อเพลิงชนิดผงจากไซโลกักเก็บเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่านทางท่ออากาศปฐมภูมิ เพื่อให้การเผาไหม้สามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง ภายใต้ข้อจำกัดของการเผาไหม้ที่อัตราความร้อนไม่เกิน 500 kW โดยใช้อากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และตติยภูมิในสัดส่วน 25 : 65 : 10

การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากการศึกษาและการทดลองพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระต่อการลำเลียงเชื้อเพลิง ได้แก่ การอัดตัวแน่นของเชื้อเพลิงในไซโล อันเนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคและระยะเวลาในการสะสม ส่งผลให้เชื้อเพลิงถูกลำเลียงออกจากไซโลได้อย่างไม่ต่อเนื่อง และการอุดตันของเชื้อเพลิงในท่อลำเลียงอากาศปฐมภูมิ อันเนื่องจากความเร็วลมในท่ออากาศปฐมภูมิไม่เหมาะสมต่อการนำพาเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ส่งผลให้เกิดการกองตัวของเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิ ซึ่งถ้าปริมาณการสะสมเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการอุดตันในท่อได้

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 ผลการแก้ปัญหาการอัดตัวแน่นของเชื้อเพลิงในไซโล โดยใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดแบบสั่นสะเทือน

หัวข้อนี้ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอัตราการป้อนเชื้อเพลิงระหว่างการทำงานโดยไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันติดขัด และการใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดแบบสั่นสะเทือน โดยเปรียบเทียบที่อัตราเร็วของมอเตอร์สกรูลำเลียง 2.42 Hz หรือเทียบเท่าอัตราความร้อน 300 kW ของไซโลอุดมคติ พบว่า เมื่อไม่มีการใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัด เชื้อเพลิงจากเกิดการอัดตัวแน่นในไซโลทั้งกรณีที่มีการทิ้งเชื้อเพลิงและไม่มีการทิ้งเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นผลมาจากการกดทับโดยน้ำหนักของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเชื้อเพลิงในไซโลกลายเป็นโครงสร้างการอัดตัวแน่น ส่งผลให้ไม่สามารถลำเลียงเชื้อเพลิงออกจากไซโลได้ตามปริมาณที่ต้องการ และการใช้อุปกรณ์ป้องกันการติดขัดแบบสั่นสะเทือน สามารถทำลายโครงสร้างการอัดตัวแน่นของเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี โดยอ้างอิงจากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1.3 พบว่า อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงมีอัตราคงที่ทั้งกรณีมีการทิ้งเชื้อเพลิงและไม่มีการทิ้งเชื้อเพลิง แต่ปัญหาที่ตามมาคือ อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงที่สูงกว่ากรณีปกติ จึงต้องทำการสอบเทียบสกรูลำเลียงใหม่ ซึ่งผลการสอบเทียบค่าของสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงได้ โดยเป็นไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ y = 0.0094x + 0.0027 เมื่อค่า x คือค่าความถี่ของสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงในหน่วยเฮิรตซ์ และ ค่า y คือค่าของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที

6.1.2 ผลการแก้ปัญหาการอุดตันของเชื้อเพลิงในลำเลียงอากาศปฐมภูมิ

หัวข้อนี้ได้การทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการกองของเชื้อเพลิงในท่อลำเลียงอากาศปฐมภูมิขนาด 3 นิ้ว และ 2.5 นิ้ว ที่อัตราการความร้อน 150 , 200, 250 , 300, 350, 400, 450 และ 500 kW พบว่า ในท่อลำเลียงอากาศปฐมภูมิขนาด 3 นิ้ว ความเร็วลมขาเข้าท่อจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วลมวิกฤตที่อัตราความร้อน 350 kW ซึ่งยังพบการกองของเชื้อเพลิงในท่อ แต่พบว่าปริมาณการกองของเชื้อเพลิงมีปริมาณที่น้อยลงเมื่ออัตราความร้อนสูงขึ้น แต่ในทางทฤษฎีไม่ควรพบการกองของเชื้อเพลิงในท่อเมื่อความเร็วลมในท่อสูงเกินความเร็ววิกฤต แต่ในทางปฏิบัติพบว่ามีเชื้อเพลิงที่กองอยู่ในอัตราความร้อนก่อนหน้า ส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ไหลมากับอากาศปะทะกับกองเชื้อเพลิงเดิม ส่งผลให้เชื้อเพลิงยังคงกองตัวอยู่ในท่อ ผู้ทดลองคาดการณ์ว่า หาใช้เวลาในการทดลองนานขึ้นหรือเพิ่มความเร็วลมให้สูงขึ้น จะช่วยให้กองเชื้อเพลิงดังกล่าวถูกทำลายได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางการทดลอง ทำให้ไม่สามารถเพิ่มปัจจัยดังกล่าวได้ ส่วนท่อลำเลียงอากาศปฐมภูมิขนาด 2.5 นิ้ว ความเร็วลมขาเข้าท่อจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็ววิกฤตที่อัตราความร้อน 200 kW แต่ยังคงพบการกองของเชื้อเพลิง แต่ที่อัตราความร้อน 450 kW ไม่พบการกองของเชื้อเพลิงในท่ออากาศปฐมภูมิ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วลมในท่ออากาศปฐมภูมิโดยการลดขนาดท่อลำเลียง ส่งผลให้อัตราการกองของเชื้อเพลิงลดลงได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเผาไหม้ หากใช้ท่อขนาดเล็กกว่านี้ก็จะช่วยให้การลำเลียงเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นกว่าเดิม แต่การใช้ท่อขนาดเล็กลงจะส่งผลให้ความดันสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ในการติดตั้งไซโลและห้องเผาไหม้ จึงทำให้ในการทดลองมีความจำเป็นที่ต้องใช้ท่อยืดหยุ่นได้ ส่งผลให้ความดันสูญเสียในระบบสูงขึ้น ดังนั้น หากสามารถย้ายตำแหน่งไซโลหรือห้องเผาไหม้ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมได้ จะสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ท่อยืดหยุ่น และจะทำให้ความดันสูญเสียในระบบลดลงได้
2. ห้องผสมเชื้อเพลิงระหว่างอากาศปฐมภูมิกับสกรูลำเลียงมีรูปทรงที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ความดันสูญเสียเยอะ และอาจทำให้เกิดการอุดตันในห้องผสมเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นการออกแบบห้องผสมเชื้อเพลิงให้มีรูปทรงเหมาะสมกับขนาดท่อที่ใช้ จะสามารถช่วยลดความดันสูญเสียได้
3.ระบบการบดเชื้อเพลิงยังไม่สามารถบดเชื้อเพลิงให้ทันต่อความต้องการได้ ดังนั้น หากระบบการบดเชื้อเพลิงสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จะสามารถยกระดับอัตราความร้อนให้สูงขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] บัณฑิต ตันติไชยบริบูรณ์ ปฏิวัติ อมตะรุ่งเรือง และ พรพุทธ วิสุทธิวัชรกุล. 2016. **การพัฒนาระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล.** ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง.

[2] พรชัย จงจิตรไพศาล. 2005 **ระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยลม**, สานักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร.

[3] พีรพัฒน์ เทพลิบ. 2017. **การพัฒนาระบบควบคุมการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผงขนาด 1 MW** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[4] Andrew W. Jenike. 1964. **Solids Notes 10**. George G. Chase. The University of Akron.

[5] ASTM Standard C136. 2014. **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**, ASTM International, West Conshohocken, PA,

[6] Guan Qingliang. 2011. **Experimental Study on Dense-phase Pneumatic Conveying of Coal Powder at High Pressures**. *Clean Energy.* Pages 50–67

[7] Karsten H.K. Wodrich. 1997. **A DESIGN PROGRAMME FOR DILUTE PHASE PNEUMATIC CONVEYORS.** Thesis MScEng. Mechanical and Mechatronic Engineering. University of Stellenbosch

[8] Maryna Zinchenko. 2013. **Determination of Particle Velocities in Pneumatic Conveying.** Telemark University College. Faculty of Technology.

[9] Robert P. Hesketh. 2007. **Fluidization.** Prepared for the Process Fluid Transport. Students that contributed to this project since its inception are Michael Carney,

[10] Luiz Moreira Gomes, Hugo Mesquita and Lázaro J. S. Silva. 2009. **PRESSURE DROP CALCULATION IN DILUTE PHASE PNEUMATIC CONVEYING SYSTEMS USING A HYDRODYNAMIC MODEL.** 20th International Congress of Mechanical Engineering. Gramado, RS, Brazil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดลองเพื่อหาขนาดของเชื้อเพลิง (Sieve Analysis)

No.	diameter	weight sieve	sieve+soil	soil	cumulative retained	cumulative retained %	finer	ave dia	%by mas
8	2.360	717.98	718.04	0.06	0.06	0.0299	99.9701	2.36	0.0299
10	2.000	472.77	472.88	0.11	0.17	0.0848	99.9152	1.59	0.0549
16	1.180	636.32	636.65	0.33	0.50	0.2495	99.7505	0.89	0.1647
30	0.600	591.34	593.21	1.87	2.37	1.1828	98.8172	0.5125	0.9333
40	0.425	572.21	596.01	23.80	26.17	13.0608	86.9392	0.3625	11.8780
50	0.300	572.24	622.82	50.58	76.75	38.3041	61.6959	0.225	25.2433
100	0.150	513.22	582.08	68.86	145.61	72.6706	27.3294	0.1125	34.3664
200	0.075	318.83	353.28	34.45	180.06	89.8638	10.1362	0.0565	17.1932
400	0.038	298.05	315.88	17.83	197.89	98.7623	1.2377	0.019	8.8985
pan	0.000	470.80	473.25	2.45	200.34	99.9850	0.0150	0.019	1.2227
				total	200.37	100.0000	0.0000	AVG 0.022	97.5795

ตารางที่ ก. 2 ตารางแสดงผลการคำนวณความเร็วลมในท่อส่งเปรียบเทียบกับความเร็วลมวิกฤตจากสมการของ Risk ในท่อขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มม.

kW	Air 1 (m3/s)	Fuel (kg/s)	pipe dimeter (m)	cross section (m^2)	Velocity (m/s)	Rizk V_{st} (m/s)	ลักษณะการไหล
100	0.012	0.0062	0.08	0.0050	2.3885	4.5910	Bed Flow
150	0.012	0.0093	0.08	0.0050	2.3885	5.3166	Bed Flow
200	0.016	0.0124	0.08	0.0050	3.1847	5.3166	Bed Flow
250	0.02	0.0155	0.08	0.0050	3.9809	5.3166	Bed Flow
300	0.024	0.0186	0.08	0.0050	4.7771	5.3991	Bed Flow
350	0.028	0.0217	0.08	0.0050	5.5732	5.3166	Dilute Flow
400	0.032	0.0248	0.08	0.0050	6.3694	5.3166	Dilute Flow
450	0.036	0.0278	0.08	0.0050	7.1656	5.3166	Dilute Flow
500	0.04	0.0309	0.08	0.0050	7.9618	5.3166	Dilute Flow

หมายเหตุ : Bed Flow คือลักณะการไหลแบบผสม คือมีการกองของวัสดุบริเวณด้านล่างของท่อเรียกว่า Bed และการไหลของวัสดุด้านบน Bed จะเป็นแบบเบาบาง Dilute Flow คือการไหลแบบเบาบางโดยไม่เกิดการกองของวัสดุที่ก้นท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. 3 ตารางแสดงผลการคำนวณความเร็วลมในท่อส่งเปรียบเทียบกับความเร็วลมวิกฤตจากสมการของ Risk ในท่อขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มม.

หมายเหตุ : Bed Flow คือลักณะการไหลแบบผสม คือมีการกองของวัสดุบริเวณด้านล่างของท่อเรียกว่า Bed และการไหลของวัสดุด้านบน Bed จะเป็นแบบเบาบาง Dilute Flow คือการไหลแบบเบาบางโดยไม่เกิดการกองของวัสดุที่ก้นท่อ

kW	Air 1 (m3/s)	Fuel (kg/s)	pipe dimeter (m)	cross section (m^2)	Velocity (m/s)	Rizk V_{st} (m/s)	ลักษณะการไหล
100	0.012	0.0062	0.0635	0.0032	3.7911	6.5444	Bed Flow
150	0.012	0.0093	0.0635	0.0032	3.7911	4.7367	Bed Flow
200	0.016	0.0124	0.0635	0.0032	5.0548	4.7367	Dilute Flow
250	0.02	0.0155	0.0635	0.0032	6.3185	4.7367	Dilute Flow
300	0.024	0.0186	0.0635	0.0032	7.5822	4.8102	Dilute Flow
350	0.028	0.0217	0.0635	0.0032	8.8459	4.7367	Dilute Flow
400	0.032	0.0248	0.0635	0.0032	10.1096	4.7367	Dilute Flow
450	0.036	0.0278	0.0635	0.0032	11.3733	4.7367	Dilute Flow
500	0.04	0.0309	0.0635	0.0032	12.6370	4.7367	Dilute Flow

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงผลการสอบเทียบสกรูลำเลียงตัวที่ 1

Hz	kg/s			
	1 (max)	2	3 (min)	avg
0.5	0.00655	0.006483	0.00395	0.005661
1	0.01925	0.018617	0.018517	0.018794
1.5	0.03525	0.031417	0.028383	0.031683
2	0.044383	0.044017	0.043617	0.044006
2.5	0.057417	0.056417	0.05665	0.056828
3	0.068083	0.06775	0.06665	0.067494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงผลการสอบเทียบสกรูลำเลียงตัวที่ 2

Hz	Mass Fow Rate (kg/s)			
	1	2	3	ave
1	0.016	0.008833	0.011317	0.01205
2	0.021067	0.021633	0.0212	0.0213
3	0.031933	0.030333	0.0311	0.031122
4	0.040333	0.040767	0.04	0.040367
5	0.048567	0.049833	0.048267	0.048889
6	0.058733	0.058967	0.057867	0.058522
7	0.0682	0.068967	0.069033	0.068733

ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงการคำนวณเชื้อเพลิงคงเหลือในไซโลระหว่างการปฏิบัติการ

kW	Time (min)	Fuel used (kg)	SUM (kg)	Fuel Remain (kg)
100	15	5.65455	5.65455	249.64545
150	15	8.686755	14.34131	240.958695
200	15	11.20284	25.54415	229.755855
250	15	14.493105	40.03725	215.26275
300	30	33.50226	73.53951	181.76049
350	15	19.525275	93.06479	162.235215
400	15	22.29942	115.3642	139.935795
450	15	25.073565	140.4378	114.86223
500	30	55.69542	196.1332	59.16681
Σ	165			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ตารางแสดงเปอร์เซ็นการกองของเชื้อเพลิงภายในท่อส่ง เทียบกับความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มม.)

kW / Node	เปอร์เซ็นการกองของเชื้อเพลิง							
	100	150	200	250	300	350	400	450
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.0000	0.0000	8.2894	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	4.2768	1.2188	26.6987	12.9799	1.2188	0.0000	0.0000	0.0000
10	31.1919	19.5501	32.7162	26.6987	10.5617	0.0000	0.0000	0.0000
11	31.1919	35.7978	37.3530	22.3507	9.4060	8.2894	0.0000	0.0000
12	25.2316	35.7978	38.9163	31.1919	19.5501	29.6801	8.2894	0.0000
13	43.6444	42.0630	51.5914	37.3530	29.6801	29.6801	26.6987	15.5257
14	45.2298	53.1818	57.9370	35.7978	22.3507	40.4866	29.6801	28.1820
15	59.5133	56.3556	64.2021	51.5914	40.4866	40.4866	29.6801	28.1820
16	59.5133	62.6470	64.2021	43.6444	53.1818	40.4866	37.3530	35.7978
17	67.2838	62.6470	67.2838	50.0000	57.9370	53.1818	43.6444	46.8182
18	65.7481	62.6470	73.3012	65.7481	57.9370	53.1818	51.5914	46.8182
19	62.6470	59.5133	68.8081	61.0837	54.7701	48.4086	51.5914	42.0630
20	57.9370	61.0837	62.6470	65.7481	57.9370	45.2298	43.6444	51.5914
21	57.9370	61.0837	65.7481	57.9370	53.1818	43.6444	43.6444	51.5914
22	57.9370	61.0837	57.9370	57.9370	56.3556	43.6444	43.6444	51.5914
23	57.9370	61.0837	65.7481	67.2838	67.2838	53.1818	43.6444	51.5914
24	57.9370	61.0837	65.7481	68.8081	61.0837	51.5914	43.6444	51.5914
25	57.9370	61.0837	65.7481	74.7684	70.3199	59.5133	40.4866	43.6444
26	54.7701	54.7701	59.5133	70.3199	70.3199	54.7701	38.9163	37.3530
27	42.0630	48.4086	54.7701	68.8081	62.6470	40.4866	35.7978	35.7978
28	42.0630	40.4866	51.5914	61.0837	54.7701	40.4866	35.7978	35.7978
29	34.2519	40.4866	51.5914	54.7701	51.5914	40.4866	38.9163	35.7978
30	34.2519	46.8182	46.8182	48.4086	50.0000	38.9163	35.7978	35.7978
31	34.2519	43.6444	43.6444	42.0630	35.7978	38.9163	34.2519	28.1820
32	42.0630	34.2519	43.6444	42.0630	23.7818	38.9163	29.6801	28.1820
33	42.0630	40.4866	46.8182	45.2298	37.3530	38.9163	29.6801	28.1820
34	45.2298	46.8182	46.8182	45.2298	37.3530	38.9163	25.2316	28.1820
35	45.2298	48.4086	46.8182	51.5914	45.2298	43.6444	25.2316	26.6987

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

36	26.6987	43.6444	34.2519	40.4866	38.9163	35.7978	20.9397	26.6987
37	11.7537	9.4060	15.5257	31.1919	34.2519	35.7978	14.2378	26.6987
38	0.0000	3.4074	6.1851	15.5257	20.9397	28.1820	6.1851	26.6987
39	0.0000	0.0000	0.0000	3.4074	3.4074	28.1820	0.0000	22.3507
40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.2378	0.0000	11.7537
41	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.6023	0.0000	2.6023
42	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
43	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
44	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
45	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
46	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
47	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
48	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
49	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

หมายเหตุ : ท่อส่งเชื้อจะเพลิงถูกแบ่งเป็น 50 Node เท่า ๆกันเพื่อการวัดความสูงของกองเชื้อเพลิงตลอดความยาวท่อ โดยแต่ละ Node มีความยาว 3.64 cm

ตารางที่ ก.8 ตารางแสดงเปอร์เซ็นการกองของเชื้อเพลิงภายในท่อส่ง เทียบกับความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มม.)

kW / Node	เปอร์เซ็นการกองของเชื้อเพลิง							
	150	200	250	300	350	400	450	500
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	28.2054	0	0	0	0	0	0	0
12	32.0065	0	0	0	0	0	0	0
13	28.2054	0	0	0	0	0	0	0
14	28.2054	11.0548	0	0	0	0	0	0
15	28.2054	35.8833	0	0	0	0	0	0
16	28.2054	35.8833	0	0	0	0	0	0
17	28.2054	37.8445	0	0	0	0	0	0
18	26.3390	41.8019	0	0	0	0	0	0
19	22.687	35.8833	28.2054	0	0	0	0	0
20	41.8019	26.3390	43.7940	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

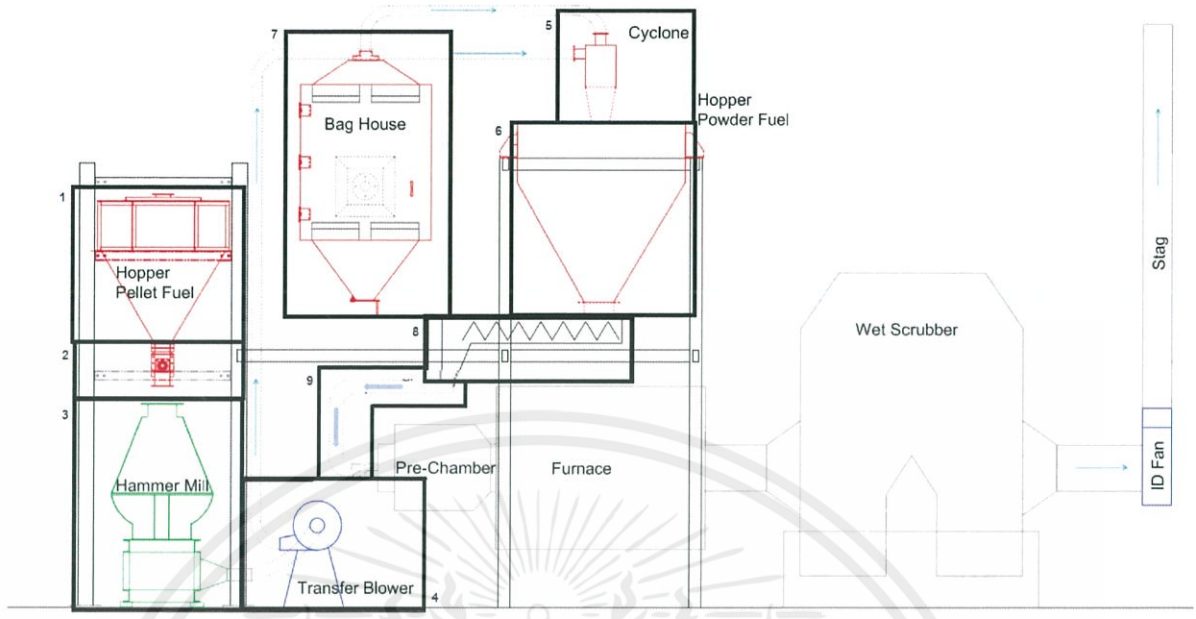
21	32.0065	22.687	49.799	0	0	0	0	0
22	43.7940	22.687	49.7994	8.1774	0	0	0	0
23	57.8001	17.4512	47.7948	22.687	0	0	0	0
24	51.8043	17.4512	45.7923	47.7948	0	0	0	0
25	35.8833	11.0548	35.8833	37.8445	14.1577	0	0	0
26	37.8445	3.28919	28.2054	37.8445	19.1603	0	0	0
27	30.0954	3.28919	15.7825	32.0065	26.3390	0	0	0
28	22.68	2.29875	11.0548	19.1603	35.8833	0	0	0
29	15.7825	3.28919	0.17527	9.5854	20.9065	11.0548	0	0
30	17.4512	3.28919	0	0.1752	1.42903	22.687	0	0
31	12.5804	3.28919	0	0	0	8.1774	0	0
32	4.38343	3.28919	0	0	0	0	0	0
33	2.29875	3.28919	0	0	0	0	0	0
34	2.29875	3.28919	0	0	0	0	0	0
35	2.29875	0	0	0	0	0	0	0
36	2.29875	0	0	0	0	0	0	0
37	2.29875	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0
ave	13.31	6.89	7.13	4.31	2.36	0.84	0	0

หมายเหตุ : ท่อส่งเชื้อจะเพลิงถูกแบ่งเป็น 50 Node เท่า ๆกันเพื่อการวัดความสูงของกองเชื้อเพลิงตลอดความยาวท่อ โดยแต่ละ Node มีความยาว 3.64 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ภาพแสดงระบบขนส่งเชื้อเพลงชีวมวล

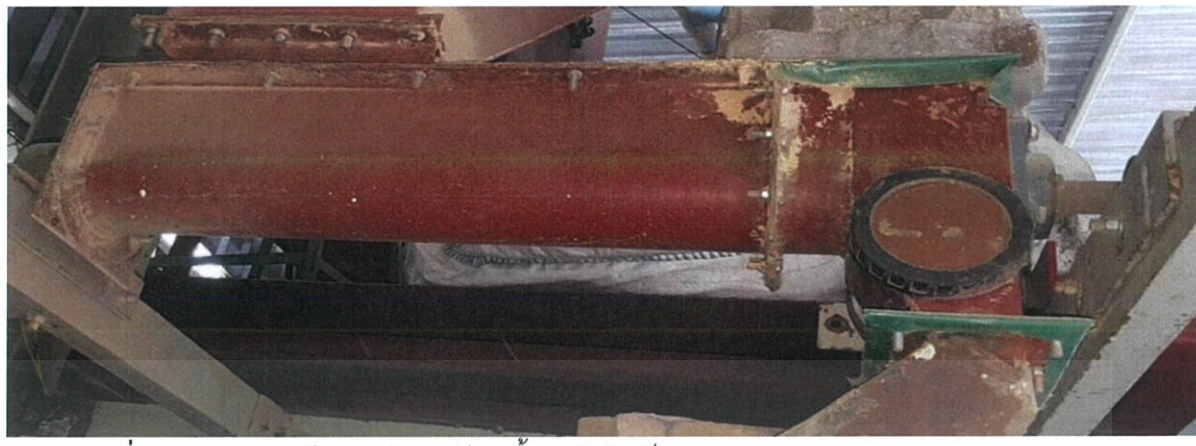
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



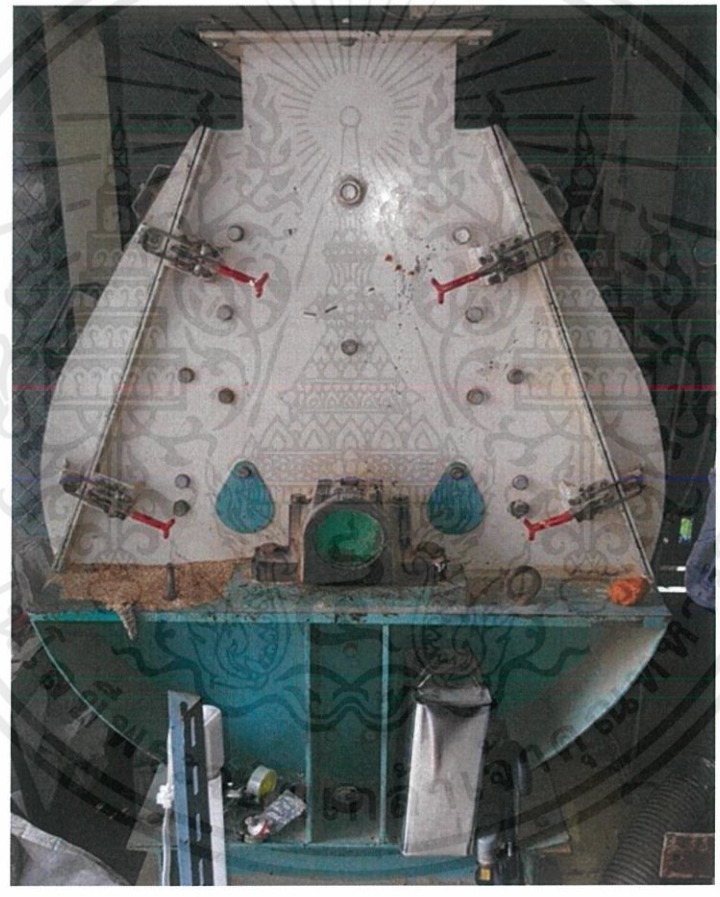
รูปที่ ข.1 ภาพแสดงระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทั้งระบบ (1) ฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงชีวมวล (2) สกรูลำเลียงเชื้อเพลิงตัวที่ 1 (เข้าสู่หม้อบด) (3) หม้อบดเชื้อเพลิง (4) โบรวเวอร์ขนส่งเชื้อเพลิงผง (5) ไซโคลน (6) ไซโลเก็บเชื้อเพลิงผง (7) แบคเฮาส์ (8) สกรูลำเลียงตัวที่ 2 (เข้าสู่ห้องเผาไหม้) (9) ท่อส่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้

รูปที่ ข.2 แสดงลักษณะฮอปเปอร์เก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Hopper pellet fuel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

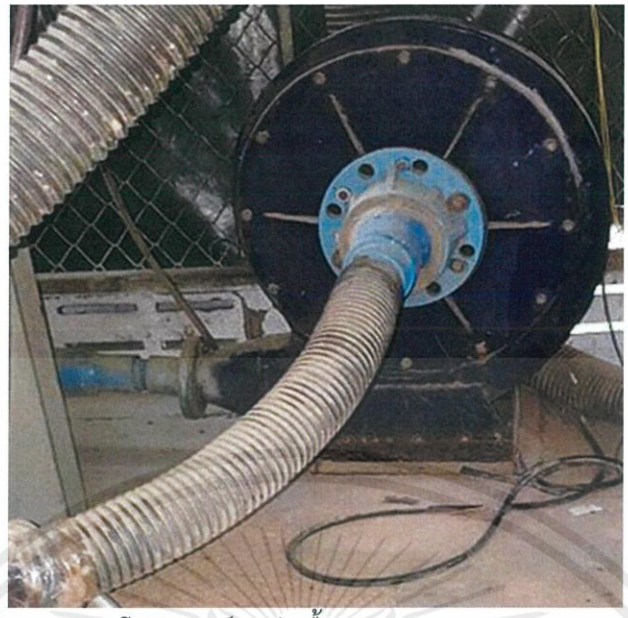


รูปที่ ข.3 แสดงสกรูฟีดสาหรับลาเลียงเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Screwfeed to Hammermill)



รูปที่ ข.4 แสดงลักษณะเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง (Hammer Mill)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 แสดงโบลวเวอร์ขนส่งเชื้อเพลิงผง (Blower Transport)

รูปที่ ข.6 แสดงลักษณะของไซโคลนโดยสัดส่วน Stairmand (Cyclone)

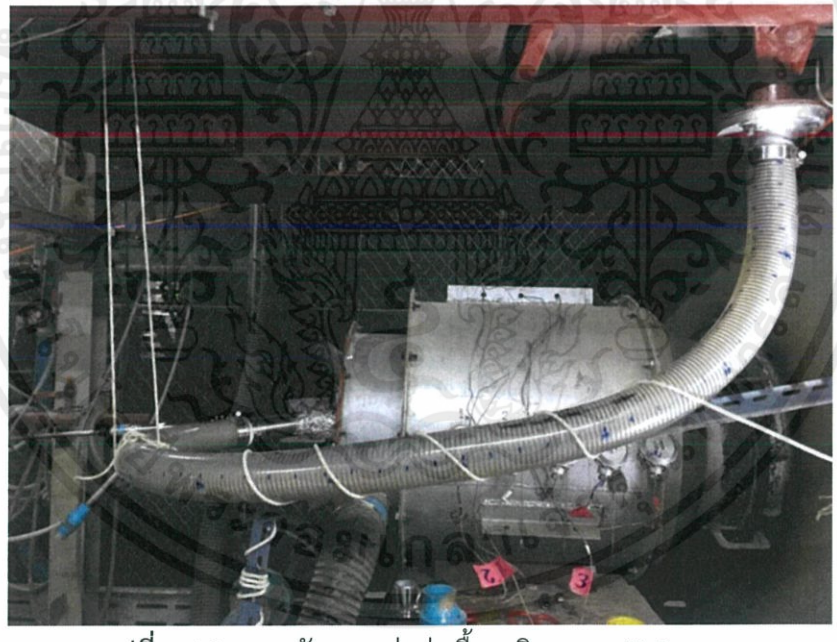
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.7 แสดงลักษณะไซโลเก็บเชื้อเพลิงผง

รูปที่ ข.8 แสดงลักษณะเครื่องดักฝุ่นแบบผ้ากรอง (Bag House)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.9 แสดงลักษณะสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผง (Screw feeder 2)



รูปที่ ข.10 แสดงลักษณะท่อส่งเชื้อเพลิงขนาด 63.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.11 แสดงลักษณะท่อส่งเชื้อเพลิงขนาด 80 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้