

ต้นแบบเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้
A Prototype of Wood Dust Solid Fuel Press



วริยะ ดวงสุวรรณ
Wiriya Duangsuwan

๑

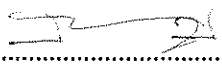
เลขที่	TJ 1460 364 2544 ค.2
lib Key	211908
	11.0.ค. 2544

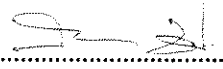
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
Master of Engineering Thesis in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University
2544


ชื่อวิทยานิพนธ์ ต้นแบบเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้
ผู้เขียน นายวิริยะ ดวงสุวรรณ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

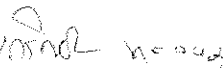
คณะกรรมการที่ปรึกษา


คณะกรรมการสอบ


 ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมาน เสนงาม)

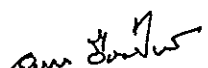
 ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมาน เสนงาม)


 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)


 กรรมการ
(ดร.วรวิฑูร วิสุทธิ์เมธางกูร)

 กรรมการ
(ดร.วรวิฑูร วิสุทธิ์เมธางกูร)

 กรรมการ
(ดร.อุดมผล พิชนันท์ไพบูลย์)

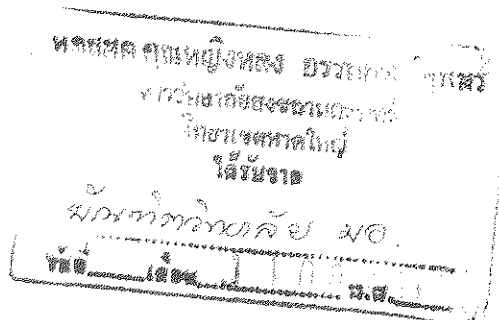
 กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วิทยา จงเจริญ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติ ทฤษฏีคุณ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ ต้นแบบเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้
ผู้เขียน นายวิริยะ ดวงสุวรรณ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ



ฝุ่น ไม้ที่เกิดจากกระบวนการตัดผิวในโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพาราเป็นเศษวัสดุที่ต้องการกำจัดทิ้ง การแปรสภาพฝุ่น ไม้ให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งนับเป็นทางออกทางหนึ่งที่น่าสนใจ เป็นการแก้ปัญหาการกำจัดฝุ่น ไม้และได้เชื้อเพลิงเพิ่มอีกอย่างหนึ่ง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาข้อมูลพื้นฐานก่อนออกแบบเครื่องจักรพบว่าฝุ่น ไม้อัดแท่งที่ความหนาแน่น $1,000 \text{ kg/m}^3$ ต้องใช้พลังงานในการอัดเฉลี่ยประมาณ 45 kJ/kg ในขณะที่ค่าความร้อนของฝุ่น ไม้อัดแท่งมีค่าประมาณ 17 MJ/kg และจากการทดสอบความทนต่อการชนย้ายและเก็บรักษาพบว่าแท่งฝุ่น ไม้ที่ความหนาแน่นนี้เป็นแท่งเชื้อเพลิงที่ได้คุณภาพ เครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่น ไม้ที่สร้างขึ้นเป็นแบบการอัดด้วยลูกสูบโดยใช้ระบบไฮดรอลิก ผลิตแท่งเชื้อเพลิงฝุ่น ไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm ความยาว $35 - 90 \text{ mm}$ ใช้กำลังขับ 7.5 kW หากนำไปพัฒนาให้ควบคุมการทำงานด้วย PLC ให้เครื่องจักรทำงานแบบต่อเนื่องอัตโนมัติได้ สามารถคำนวณกำลังการผลิตได้ 50 kg/h

Thesis Title	A Prototype of Wood Dust Solid Fuel Press
Author	Mr.Wiriya Duangsuwan
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2000

Abstract

Wood dust from a sanding process in rubber wood industries is a one source of by product waste. Converting wood dust into a solid fuel briquettes not only solves the waste problem, but also provides extra fuel. This research was started from basic experiments to find optimum data for machine design conditions. It was found that the appropriate wood dust briquettes should be pressed to the density of $1,000 \text{ kg/m}^3$. The required energy for pressing process is 45 kJ/kg of wood dust, while the heating value of the briquettes is 17 MJ/kg. The briquettes were tested for handling, humidity resistance and fuel characteristics with good results.

The wood dust solid fuel press is of hydraulic piston type with manual control. It can produce briquettes of size 51 mm in diameter and 35 to 90 mm in length. The rated power consumption is 7.5 kW. It could be further developed by using PLC control, the press capacity in automatic continuous production would be 50 kg/h.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบพระคุณ ผศ. สมาน เสนงาม ประธานกรรมการที่ปรึกษาและคณะกรรมการที่ปรึกษาทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ด้วยดี ขอขอบคุณและช่าง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรต้นแบบ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

วิริยะ ดวงสุวรรณ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์นี้

วิริยะ ดวงสุวรรณ, สมาน เสนงาม, วรวิศ วิศวสิทธิ์เมธางกูร และ เกริกชัย ทองหนู. 2543.
“ต้นแบบเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้”, การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14. 2-3 พฤศจิกายน 2543. หน้า
593 – 597. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(11)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(13)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 อุตสาหกรรมไม้ยางพารา.	3
1.3 เทคโนโลยีที่ใช้ในการอัดเศษวัสดุเป็นเชื้อเพลิงแข็ง	9
1.4 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง	18
1.5 วัตถุประสงค์	26
1.6 ขอบเขตการวิจัย	26
1.7 สรุป	26
2 การทดสอบคุณลักษณะพื้นฐานที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	28
2.1 บทนำ	28
2.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
2.3 การทดลองเบื้องต้น	32
2.4 ตัวอย่างการคำนวณ	48
2.5 การทดสอบแท่งเชื้อเพลิงฝุ่นไม้	60
2.6 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้แท่งฝุ่นเป็นเชื้อเพลิง	67
2.7 สรุป	68
	(7)

3 การสร้างต้นแบบ	70
3.1 บทนำ	70
3.2 เส้นใยและแนวคิด	70
3.3 ผลการออกแบบ	71
3.4 การทดสอบ	89
3.5 การปรับปรุงแก้ไข	91
3.6 การทดสอบเครื่องต้นแบบที่ได้รับการปรับปรุงแก้ไขแล้ว	93
3.7 การทดสอบการเผาไหม้	95
3.8 ราคาต่อก่อสร้างเครื่องต้นแบบ	96
3.9 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็งใน โรงงานที่มีฝุ่นไม้เป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งและนำเชื้อเพลิงแข็งกลับไป ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงาน	98
3.10 สรุป	101
4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	103
4.1 บทสรุป	103
4.2 ข้อเสนอแนะ	104
บรรณานุกรม	106
ภาคผนวกที่	
1 แนวทางการบำรุงรักษาเครื่องจักร	109
2 แบบจิ้นส่วนเครื่องจักรต้นแบบ	115
ประวัติผู้เขียน	145

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ความต้องการใช้พลังงานของประเทศไทยในปี 2540	1
1.2 จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพาราในภาคใต้ปี 2536	4
1.3 เปรียบเทียบระหว่างเครื่องอัดแบบสกรูและเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกล	17
1.4 เปรียบเทียบระหว่างเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกลและเครื่องอัดลูกสูบแบบไฮดรอลิก	17
1.5 ค่าความร้อนและเปอร์เซ็นต์ซี้เถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลต่าง ๆ	23
2.1 ผลการอัดฟ่อนไม้โดยใช้กระบอกลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm ยาว 250 mm	35
2.2 ผลการอัดฟ่อนไม้โดยใช้กระบอกลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 31.65 mm ยาว 250 mm	36
2.3 ผลการอัดฟ่อนไม้โดยใช้กระบอกลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 250 mm	37
2.4 ผลการอัดฟ่อนไม้โดยใช้กระบอกลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ยาว 109 mm	38
2.5 งานในการอัดในแต่ละช่วง กรณีใช้กระบอกลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm	55
2.6 งานในการอัดในแต่ละช่วง กรณีใช้กระบอกลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm	55
2.7 งานในการอัดในแต่ละช่วง กรณีใช้กระบอกลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm	56
2.8 งานในการอัดที่ได้จากการคำนวณพื้นที่ได้กราฟรูปที่ 2.5 -- 2.7	56
2.9 พลังงานในการอัดฟ่อนไม้	59
2.10 แท่งฟ่อนที่ใช้ทดสอบการคีดไฟ	62
2.11 ผลการปล่อยแท่งฟ่อนตกจากที่สูงกระทบพื้นคอนกรีต	66
2.12 เปอร์เซนต์การพองตัวของแท่งฟ่อนเมื่อทิ้งไว้ในที่ร่ม 21 วัน	67
3.1 ลักษณะของกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกทั้งสามกระบอกลูก	89

3.2 ผลการอัดฝุ่นไม้ด้วยเครื่องอัดที่คัดแปลงแล้ว	94
3.3 ผลการทดลองเผาแท่งฝุ่น	95
3.4 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องจักร	97
3.5 ลักษณะแท่งฝุ่นที่ผลิต	98
3.6 กำลังการผลิตของเครื่องจักรต้นแบบ 1 เครื่อง	98
3.7 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนโดยประมาณ (ของการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้ เพื่อใช้ในโรงงาน)	99
3.8 ค่าใช้จ่ายโดยตรง (ของการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้เพื่อใช้ในโรงงาน)	100
3.9 ค่าใช้จ่ายในการผลิต 1 ปี (120 คัน) (ของการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้ เพื่อใช้ในโรงงาน)	100

รายการภาพประกอบ

รูป	หน้า
1.1 แผนผังแสดงวิวัฒนาการการใช้ประโยชน์จากไม้ยางพารา	5
1.2 หลักการอัดแห้งแบบลูกสูบ	11
1.3 หลักการอัดแห้งแบบใช้ สกรูทรงกรวย	12
1.4 หลักการอัดแห้งแบบใช้ สกรูทรงกระบอกแบบมีการให้ความร้อนที่แม่พิมพ์	13
1.5 หลักการของเครื่องอัดเม็ดแบบจานแบน	14
1.6 หลักการของเครื่องอัดเม็ดแบบวงแหวน	15
2.1 ตัวอย่างฟ่อนไม้	30
2.2 ชุดทดสอบสำหรับอัดฟ่อนไม้	31
2.3 ครอบอัดและแท่งอัดที่ใช้ทดสอบอัดฟ่อนไม้	31
2.4 วาล์วปรับความดันและเกจวัดความดันของชุดทดสอบ	33
2.5 การอัดฟ่อนและถอดแท่งฟ่อนออกจากครอบอัด	34
2.6 ความหนาแน่นของฟ่อนไม้ที่ความดันอัดค่าต่าง ๆ	40
2.7 แนวโน้มความหนาแน่นของฟ่อนไม้เมื่อถูกอัดด้วยความดัน	41
2.8 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของงานที่ใช้อัดฟ่อนไม้ที่ความหนาแน่นต่าง ๆ	42
2.9 ความหนาแน่นของแท่งฟ่อนเปรียบเทียบกับงานที่ใช้อัด	44
2.10 เปรียบเทียบพลังงานต่าง ๆ ในการอัดฟ่อนไม้	45
2.11 อัตราส่วนการยุบตัวของฟ่อนไม้เปรียบเทียบกับความดันที่กระทำ	47
2.12 แรงอัดและระยะยุบตัวของฟ่อนไม้ในครอบอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm	52
2.13 แรงอัดและระยะยุบตัวของฟ่อนไม้ในครอบอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm	53
2.14 แรงอัดและระยะยุบตัวของฟ่อนไม้ในครอบอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm	54
2.15 ลักษณะการคิดไฟของฟ่อนไม้	64
2.16 ลักษณะการคิดไฟของแท่งฟ่อนไม้ที่มีความหนาแน่นประมาณ $1,000 \text{ kg/m}^3$	64
3.1 ลักษณะเครื่องอัดฟ่อนไม้ที่ออกแบบครั้งแรก	73
3.2 รูปถ่ายเครื่องอัดฟ่อนไม้ที่ออกแบบครั้งแรก	73

3.3 ชุดต้นกำลังระบบไฮดรอลิก	74
3.4 manifold block และ โซลินอยด์วาล์ว	74
3.5 รางรับและป้อนฝุ่น	75
3.6 แท่งป้อนฝุ่น	75
3.7 ครอบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่ง	76
3.8 ครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง	76
3.9 การติดตั้งครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สองเข้ากับช่องอัด	77
3.10 ครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สาม	77
3.11 coupling และแท่งอัด ของครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สาม	78
3.12 ลักษณะของช่องอัดฝุ่นไม้ที่ออกแบบ	78
3.13 แม่พิมพ์	79
3.14 แผนภูมิเวลาการทำงานของเครื่องอัดฝุ่นไม้	80
3.15 ความยาวเครื่องอัดฝุ่นไม้เมื่อใช้ครอบอกไฮดรอลิกเพียงตัวเดียว	82
3.16 ลักษณะของเครื่องอัดที่ใช้ครอบอกไฮดรอลิกสองตัว	82
3.17 โซลินอยด์วาล์วและสวิตช์ควบคุมด้วยมือ	90
3.18 ลักษณะของแท่งฝุ่นที่อัดได้และมีการให้ความร้อนที่แม่พิมพ์	91
3.19 ส่วนของเครื่องอัดที่ดัดแปลงแก้ไข	92
3.20 แผนภูมิเวลาของเครื่องอัดฝุ่นไม้ที่ปรับปรุงแล้ว	93
3.21 ตัวอย่างแท่งฝุ่นที่อัดได้จากเครื่องที่แก้ไขแล้ว	94
3.22 การทดสอบการติดไฟ	96

ตัวย่อและสัญลักษณ์

A	= เเปอร์เซ็นต์เถ้า (Ash Content, %)
A_c	= เงินที่ต้องจ่ายคืนธนาคารต่อปี (บาท)
A_1	= พื้นที่หน้าตัดลูกสูบของกระบอกไฮดรอลิก (m^2)
A_2	= พื้นที่หน้าตัดของฟ่อนไม้ที่รับแรงอัดในกระบอกอัด หรือช่องอัด (m^2)
CRF i, n	= แฟคเตอร์การจ่ายคืนเงินลงทุนที่กู้มา โดยคิดที่อัตราดอกเบี้ย $i\%$ มีระยะเวลาการจ่ายคืน n ปี
d	= เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบของกระบอกไฮดรอลิก (mm)
F	= แรงอัดที่ก้านสูบไฮดรอลิก หรือแรงอัดที่แท่งอัด (N)
HCV	= ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)
HP _{IN}	= กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบไฮดรอลิก (hp)
HP _{OUT}	= กำลังงานกลที่ได้จากตัวทำงานของระบบไฮดรอลิก (hp)
I	= ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใส่ให้ระบบไฮดรอลิก (เทียบกับมวลฟ่อนไม้, kJ/kg)
i	= อัตราดอกเบี้ย (%)
L	= ความยาวของแท่งฟ่อน (mm)
LCV	= ค่าความร้อนต่ำ (MJ/kg)
l	= ความยาวของรางรับฟ่อน (m)
M	= ความชื้น (Moisture Content, %)
m	= มวลของฟ่อนไม้ หรือมวลของแท่งฟ่อน (kg)
n	= ระยะเวลาการจ่ายคืน (Finance Period) (ปี)
P_c	= เงินต้นที่กู้มาจากธนาคาร (บาท)
P_1	= ความดันน้ำมันไฮดรอลิก (Pa)
P_2	= ความดันปรากฏในฟ่อนไม้ที่อยู่ในกระบอกอัดหรือช่องอัด (Pa)
Q	= พลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า (kJ/kg)
V	= ปริมาตรของฟ่อนไม้หรือปริมาตรของแท่งฟ่อนไม้ (m^3)
W	= งานที่ใช้อัดฟ่อนไม้กระทำโดยแท่งอัด (kJ/kg)

$\eta_{\text{(system)}}$ = ประสิทธิภาพ โดยรวมของระบบไฮดรอลิก (%)

\varnothing = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งฝุ่น (mm)

ρ = ความหนาแน่นของฝุ่นไม้ หรือความหนาแน่นของแท่งฝุ่น (kg/m^3)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำสั้นเรื่อง

จากการสำรวจของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมในปี 2540 รายงานว่าประเทศไทยมีการจัดหาพลังงานทั้งสิ้น เทียบเท่าน้ำมันดิบ 81.8 ล้านตัน โดยจัดหาจากแหล่งพลังงานภายในประเทศร้อยละ 55.6 และนำเข้าจากต่างประเทศร้อยละ 43.4 ในส่วนของพลังงานหมุนเวียน (พื้น แกลบ และ กากอ้อย) ไทยผลิตได้เองรวมทั้งสิ้นเทียบเท่าน้ำมันดิบ 0.01 ล้านตัน คิดเป็นสัดส่วนต่ำกว่าร้อยละ 0.1 ของพลังงานที่นำเข้าทั้งหมด โดยคิดเป็นมูลค่าทั้งสิ้น 33.7 ล้านบาท นอกจากการจัดหาพลังงานแล้ว ยังรายงานถึงความต้องการใช้พลังงานของประเทศไทยด้วย โดยพบว่าในปี 2540 ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานจำนวนรวมทั้งสิ้นเทียบเท่าน้ำมันดิบ 53.1 ล้านตัน ดังได้แสดงไว้ในตาราง 1.1

ตาราง 1.1 ความต้องการใช้พลังงานของประเทศไทยในปี 2540 (DEDP, 1997)

ประเภทพลังงาน	ความต้องการใช้รวมทั้งสิ้น เทียบเท่าน้ำมันดิบ (ล้านตัน)	คิดเป็นสัดส่วนของความ ต้องการใช้พลังงานรวม (ร้อยละ)
น้ำมันสำเร็จรูป	29	54.7
ก๊าซธรรมชาติ	1	1.8
ถ่านหินและลิกไนต์	4	7.5
ไฟฟ้า	7	13.2
พลังงานหมุนเวียน	12.1	22.8
รวม	53.1	100

จะเห็นว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานหมุนเวียนในปริมาณสูง พลังงานหมุนเวียนที่กล่าวข้างต้นนี้หมายถึงเฉพาะ พิน แกลบ กากอ้อย และถ่านเท่านั้น ประเทศไทยยังมีเศษวัสดุเหลือทิ้งอีกมากมายที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษวัสดุที่เหลือจากการเกษตรและจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตทางการเกษตร และเนื่องด้วยพื้นที่ป่าของประเทศไทยลดลง มีการขาดแคลนเชื้อเพลิงประเภท ไม้ฟืน และถ่าน ดังนั้นแนวทางในการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแนวทางหนึ่งคือการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง

สำหรับในภาคใต้ของประเทศไทยมีเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับยางพาราอยู่เป็นจำนวนมาก ยางพาราและกิจกรรมเกี่ยวข้องกับยางพารามีส่วนสำคัญต่อสังคมและเศรษฐกิจของภาคใต้เป็นอย่างมาก กิจกรรมเกี่ยวกับยางพาราแบ่งออกได้เป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือ เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม ในส่วนเกษตรกรรมนั้นเป็นการปลูกและเก็บเกี่ยววัตถุดิบคือน้ำยาง ส่วนอุตสาหกรรมยางพาราอาจแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ อุตสาหกรรมน้ำยางพารา และอุตสาหกรรมไม้ยางพารา อุตสาหกรรมน้ำยางพาราเป็นการแปรรูปน้ำยางเป็นยางแผ่นเพื่อผลิตยางแผ่นรมควันและผลิตน้ำยางข้นเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง สำหรับอุตสาหกรรมไม้ยางพาราจะใช้ไม้ยางพาราที่ครบอายุการตัดโค่นมาใช้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์และไม้แผ่น เช่น ไม้ปาร์ติเกิลบอร์ด (particle board) ไม้เอ็มดีเอฟ (MDF-medium density fiber board) เป็นต้น ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมไม้ยางพารานั้นมีส่วนที่เป็นเศษวัสดุเกิดขึ้นจากการผลิตแบ่งตามขนาดจากขนาดใหญ่ไปเล็กได้ดังนี้คือ

1. ปีกไม้
2. เปลือกไม้
3. เศษไม้
4. ชีบกบ
5. ชี้อ้อย
6. ผุ่นไม้

ผุ่นไม้เป็นขยะที่โรงงานต้องการกำจัดทิ้ง ขณะที่เศษวัสดุอย่างอื่นสามารถนำหมุนเวียนไปใช้ในกระบวนการผลิตบางอย่างได้ รวมทั้งการนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้พลัง

งานความร้อน การจัดการฝุ่นไม้ในปัจจุบันนอกจากการนำไปใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนเป็นปริมาณน้อยแล้ว ส่วนใหญ่ต้องเททิ้งหรือเผาทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมค่อนข้างสูง โดยเฉพาะการเผาทิ้งจะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดเป็นควัน เนื่องจากยังไม่มีการใช้เตาเผาฝุ่นไม้โดยเฉพาะ การนำฝุ่นไม้มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งจะสามารถแก้ปัญหาการกำจัดฝุ่นไม้ได้ และยังได้แหล่งเชื้อเพลิงเพิ่มอีกอย่างหนึ่ง

1.2 อุตสาหกรรมไม้ยางพารา

1.2.1 อุตสาหกรรมไม้ยางพาราในภาคใต้ของไทย

จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพาราในภาคใต้จากการสำรวจเมื่อสิ้นปี 2536 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 273 โรงงาน โดยแยกเป็นประเภทของแต่ละจังหวัด แสดงไว้ในตาราง 1.2

ตามปกติเนื้อที่สวนยาง 1 ไร่ จะได้ไม้เฉลี่ย 40 m^3 ในอดีตสามารถนำไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์ดังนี้ (สถาบันวิจัยยาง, 2535)

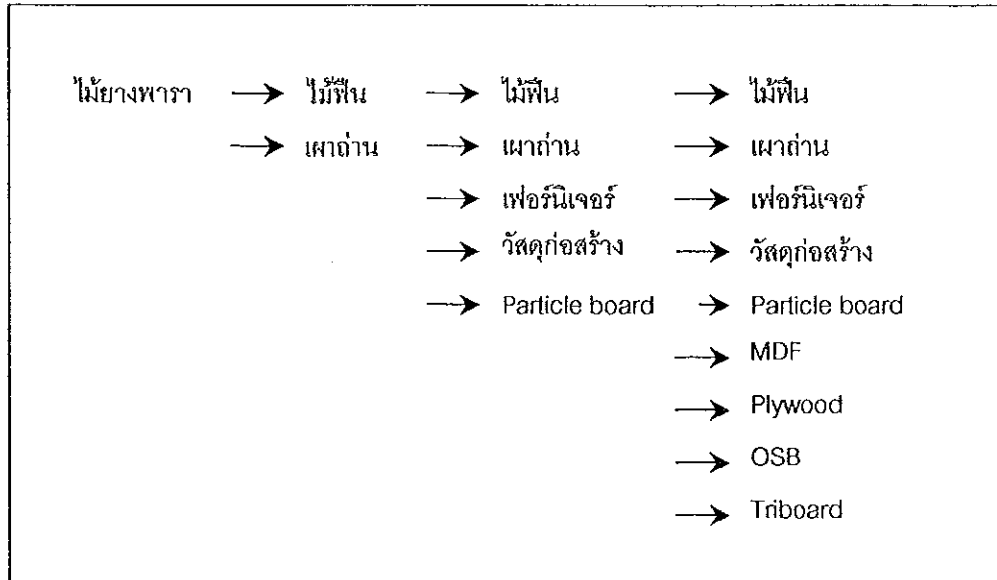
ทำเฟอร์นิเจอร์	ร้อยละ 27
เผาถ่านทิ้งเพื่อการหุงต้มและส่งออก	ร้อยละ 19
ทำพื้นในโรงงานปลาป่น	ร้อยละ 19
ทำพื้นในโรงงานเผาอิฐ, กระเบื้อง	ร้อยละ 13
ทำลังสินค้า	ร้อยละ 12
ทำพื้นรมควันยางแผ่น	ร้อยละ 8
ทำพื้นในโรงงานทำปูนขาว	ร้อยละ 2

จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมไม้ยางพารา ทำให้ไม้ยางพารามีความสำคัญทางเศรษฐกิจมากยิ่งขึ้น มีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้ในการเปลี่ยนไม้ยางพาราเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย การใช้ประโยชน์จากไม้ยางพาราจึงได้พัฒนามาเป็นลำดับ ดังแสดงในรูป 1.1 (สุพจน์พงษ์, 2538)

ตาราง 1.2 จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพาราในภาคใต้ปี 2536 (ศูนย์เศรษฐกิจ
อุตสาหกรรมภาคใต้, 2537)

จังหวัด	ประเภทอุตสาหกรรม							รวม
	1	2	3	4	5	6	7	
ชุมพร	4	-	-	-	-	-	-	4
สุราษฎร์ธานี	19	1	1	1	1	-	1	24
นครศรีธรรม- ราช	15	1	-	1	-	-	-	17
กระบี่	6	-	1	-	-	-	-	7
พังงา	2	-	-	-	1	-	-	3
ตรัง	9	3	1	-	-	-	1	14
พัทลุง	1	-	-	-	-	-	-	1
สงขลา	49	12	2	7	1	2	2	75
สตูล	2	-	-	-	-	-	-	2
ยะลา	56	11	1	1	2	-	-	71
ปัตตานี	21	4	-	-	-	-	-	25
นราธิวาส	15	15	-	-	-	-	-	30
รวม	199	47	6	10	5	2	4	273

ประเภทอุตสาหกรรม 1: แปรรูป-อบน้ำยาไม้, 2: เฟอร์นิเจอร์และชิ้นส่วนเฟอร์นิเจอร์, 3: เครื่องเรือน, 4: ปาร์เกต์ ไม้อัดประสาน โมเสก ปาร์ติเกิลบอร์ด, 5: ไม้วีเนียร์, 6: ลูกปัด, 7: ของเด็กเล่น



รูป 1.1 แผนผังแสดงวิวัฒนาการการใช้ประโยชน์จากไม้ยางพารา

ในแต่ละประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพารา ถึงแม้จะมีวัตถุดิบคือ ไม้ยางพาราเหมือนกันแต่จะมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้มีปริมาณเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตต่างกัน อุตสาหกรรมไม้ยางพาราในภาคใต้มีหลายประเภทดังนี้

ก. อุตสาหกรรมแปรรูปอัด-อบน้ำยาไม้ยางพารา

ผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราแปรรูปอัด-อบน้ำยาไม้ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอาต้นยางพาราที่มีอายุมากและให้น้ำยางน้อยมาแปรรูปแล้วอัดอบน้ำยา ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเฟอร์นิเจอร์และชิ้นส่วน นอกจากนี้ยังสามารถส่งออกในรูปแบบของวัตถุดิบคือไม้แปรรูปได้อีกด้วย

ข. อุตสาหกรรมผลิตของเด็กเล่นจากไม้ยางพารา

ผลิตของเด็กเล่นและสื่อการเรียนการสอน

ค. อุตสาหกรรมผลิตเฟอร์นิเจอร์และชิ้นส่วนจากไม้ยางพารา

วัตถุดิบที่สำคัญคือไม้ยางพาราที่ผ่านการแปรรูปอัด-อบน้ำยาแล้ว นำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์และชิ้นส่วนซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นชนิดถอดได้ มีทั้งการใช้เครื่องจักรและการ

ใช้แรงงานที่มีฝีมือ ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิตแต่ละขั้นตอน ผลิตภัณฑ์ที่ได้เพื่อการส่งออก นอกจากนี้ยังผลิตเฟอร์นิเจอร์สำเร็จรูปจากไม้อัดปาร์ติเกิลบอร์ด ได้แก่เฟอร์นิเจอร์เฟอร์นิเจอร์ชุดครัว ชุดรับแขก เก้าอี้ และฉากกั้น เป็นต้น

ง. อุตสาหกรรมผลิตไม้ประสานและปาร์เก้ตจากไม้ยางพารา

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมนี้จัดเป็นผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพาราอีกชนิดหนึ่งที่ตลาดมีความต้องการทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากมีตลาดสวยงามและราคาถูกกว่าไม้ปาร์เก้ตที่ทำจากไม้แดง ไม้ประดู่ ไม้มะค่า วัตถุดิบที่สำคัญคือไม้ยางพาราแปรรูปที่อัด-อบน้ำยาแล้ว กรรมวิธีการผลิตไม้ประสานและปาร์เก้ตจากไม้ยางพารามีสองแบบคือแบบปาร์เก้ตโมเสก กับแบบปาร์เก้ตลิ้นร่อง

จ. อุตสาหกรรมไม้วีเนียร์

เป็นอุตสาหกรรมที่นำเอาไม้ซุงยางพารามาแปรรูปเป็นแผ่น ไม้บาง (veneer) โดยการปอกไม้ซุงด้วยเครื่องจักรให้มีความหนาประมาณ 0.2-3.0 mm เพื่อนำมาใช้ทำส่วนประกอบของ เฟอร์นิเจอร์ประตู หน้าต่าง นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับงานตกแต่ง ปะเป็นแผ่นหน้าหรือติดเป็น ไม้บอร์ด

ฉ. อุตสาหกรรมไม้อัดสลักชั้น

เป็นอุตสาหกรรมที่นำเอาไม้บาง หลายแผ่นมาประกอบอัดยึดด้วยกาวหรือตัวประสานอินทรีย์ (organic binder) โดยมีลักษณะสำคัญคือ ประกอบด้วยไม้บางตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป และชั้นที่ติดกันต้องมีแนวเส้นขวางตั้งฉากกันเพื่อเพิ่มสมบัติของความแข็งแรงและลดการขยายตัวหรือหดตัวในแนวระนาบของแผ่นให้น้อยที่สุดเมื่อมีปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลง และการเพิ่มจำนวนชั้นจะเพิ่มเป็นจำนวนคู่เสมอ

ช. อุตสาหกรรมแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง

เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้เส้นใยของไม้ยางพารามาอัดร้อน โดยใช้กาวหรือตัวประสานอินทรีย์เป็นส่วนประกอบเพื่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 500-800 kg/m³ ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มีความเหมาะสมนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างแทนไม้อัดและทำเฟอร์นิเจอร์ แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) จึงเป็นวัสดุแผ่นเรียบที่จะแสดงบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ วัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิต ได้แก่เศษไม้ยางพาราและไม้ท่อนยางพาราขนาดเล็ก

ข. อุตสาหกรรมแผ่นจีน ไม้อัด (particle board industry)

เป็นอุตสาหกรรมที่นำเอาเศษไม้ ปีกไม้ หรือ ไม้ท่อนขนาดเล็ก (ไม้สด) มาเข้าเครื่องย่อย แล้วนำไปเข้าเตาอบให้แห้งและคัดขนาดจีนไม้เพื่อนำไปผสมกาวและน้ำยารักษาเนื้อไม้ ต่อจากนั้นนำเข้าเครื่องอัดรีดแล้วรีดให้เป็นแผ่นตามความหนาและตัดตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งมีทั้งชนิดเปลือย (plainboard) และชนิดปิดผิวด้วยกระดาษเคลือบกาวเมลามีน (melamine board) ซึ่งมีลายไม้และสีอื่นต่างๆ เพื่อให้เหมือนไม้จากธรรมชาติ

ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมไม้อย่างพาราแต่ละประเภทที่กล่าวข้างต้น (ยกเว้นอุตสาหกรรมแปรรูปอัด-อบน้ำยา) ต้องผ่านการขัดผิว สิ่งที่เหลือทิ้งจากการขัดผิวก็คือฝุ่น ไม้ นั้นเอง

1.2.2 ปริมาณฝุ่นไม้จากอุตสาหกรรมไม้อย่างพาราในปัจจุบันและอนาคต

ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกไม้อย่างพารา 12.25 ล้านไร่ (สำรวจเมื่อปี 1998) คิดเป็นร้อยละ 21 ของพื้นที่เพาะปลูกไม้อย่างพาราทั้งหมดในโลก (58.5 ล้านไร่) โดยเกือบร้อยละ 90 (10.45 ล้านไร่) ของพื้นที่เพาะปลูกไม้อย่างพาราทั้งหมดในประเทศอยู่ทางภาคใต้ของประเทศ ในขณะที่พื้นที่เพาะปลูกไม้อย่างพาราในภาคตะวันออกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีประมาณ 1.508 และ 0.284 ล้านไร่ตามลำดับ (Rubber Research Institute, 1998) พื้นที่เพาะปลูก 10.45 ล้านไร่ มีปริมาณท่อนซุงที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมคิดเป็นพื้นที่ 350,000 ไร่ต่อปี เมื่อมีการโค่นไม้อย่างที่มีอายุ 25-30 ปี และคิดปริมาณท่อนซุงโดยเฉลี่ยสูงสุด 45 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ดังนั้นในเวลา 1 ปี ทางภาคใต้ของไทยจะมีไม้ยางเพื่อการอุตสาหกรรมประมาณ $15.75 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Prasertsan and Vanapruk, 1997)

แต่ปริมาณไม้อย่างที่มีการตัด โค่นและนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมไม้อย่างพาราจริง ๆ ยังมีน้อย จากตัวอย่างในปี 2536 สรุปรวมปริมาณไม้อย่างพาราที่นำมาเป็นวัตถุดิบในโรงงานอุตสาหกรรมใน 5 จังหวัดชายแดนภาคใต้ดังตาราง 1.2 อุตสาหกรรมดังกล่าวประกอบด้วย อุตสาหกรรมแปรรูปอัด-อบน้ำยาไม้, เฟอร์นิเจอร์และชิ้นส่วน, ปาร์เกต์และไม้ประสาน, ไม้อัดและปาร์ติเกิลบอร์ด, ไม้วีเนียร์, ลูกบิด และของตกแต่ง

ในการแปรรูปไม้โดยทั่วไปจะได้ไม้แปรรูปประมาณร้อยละ 45-55 หรือสูญเสียเนื้อไม้เป็นเศษ ไม้ต่าง ๆ ประมาณร้อยละ 45-55 ของปริมาตร ไม้ซุงที่นำเข้าเลื่อย และในการ

ปกอกไม้ท่อนและฝานไม้เลี้ยวเพื่อทำไม้อัดนั้นก็ต้องสูญเสียเนื้อไม้เป็นเศษไม้ไปประมาณร้อยละ 50-55 ใกล้เคียงกัน ปริมาณเศษไม้ที่สูญเสียไปในอุตสาหกรรมไม้ยางพาราได้แก่ ปีกไม้, ริมไม้, ปลายไม้, ไม้เสียคลองและไม้คัดทิ้ง, ไม้ที่เหลือจากการปกอกไม้บาง, ไม้เลี้ยวที่เหลือจากการฝานไม้บาง, ขี้เลื่อย, เศษไม้มีตำหนิจากการอบ ร่มหรือหนึ่ง, จี๊บกบที่ได้จากการไสไม้, และฝุ่นไม้จากการขัดผิว ถึงแม้ว่าเรายังไม่ทราบปริมาณอันแท้จริงของเศษไม้ยางพารา เพราะยังไม่มีการสำรวจกันมาก่อน ก็เชื่อได้ว่าในปีหนึ่ง ๆ มีเศษไม้ต่าง ๆ เป็นจำนวนมากมายซึ่งจำแนกเป็นสัดส่วนได้ดังนี้คือ เป็นเศษไม้จากโรงเลื่อยประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณเศษไม้ยางพาราทั้งหมด และเป็นเศษไม้จากโรงงานไม้ยาง ไม้อัด ประมาณร้อยละ 5 ส่วนอีกประมาณร้อยละ 15 เป็นเศษไม้จากแหล่งกำเนิดอื่นรวมกัน (สุพจน์พงษ์, 2538)

ในการคำนวณอย่างคร่าว ๆ จากปริมาณไม้ทั้งหมดจำนวน 4,226,737 m³ ที่ป้อนโรงงานอุตสาหกรรมใน 5 จังหวัดชายแดนภาคใต้ในปี 2536 หากนำไม้ทั้งหมดเข้าโรงเลื่อย, โรงงานแปรรูปอัด-อบน้ำยา, โรงงานผลิตไม้วีเนียร์ และโรงงานผลิตไม้อัดสลับชั้น เมื่อแปรรูปจะสูญเสียเนื้อไม้เป็นเศษไม้ประมาณ 2,324,705 m³ และถ้าหากนำเศษไม้ทั้งหมดไปเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องคือ อุตสาหกรรมผลิตแผ่นขึ้น ไม้อัดและปาร์ติเกิลบอร์ด, อุตสาหกรรมผลิตเอ็มดีเอฟ จะสูญเสียเนื้อไม้เป็นเศษไม้อีกประมาณ 1,278,588 m³ เมื่อเทียบกับเศษไม้ขนาดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น จะเห็นว่าฝุ่นไม้มีอยู่ในสัดส่วนที่น้อยมาก แต่เนื่องจากฝุ่นไม้ไม่สามารถถูกนำไปใช้หมุนเวียนในกระบวนการผลิตได้จึงเกิดการสะสมจนมีปริมาณมากได้ จนต้องมีการกำจัดทิ้งโดยการเทหรือเผา

การหาปริมาณเศษไม้ทั้งหมดจากโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพารามีความยากพอสมควรเพราะวัตถุดิบที่ใช้ป้อนโรงงานแต่ละประเภทนั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันจนสามารถเรียกได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมครบวงจร การหาปริมาณฝุ่นไม้ที่ถูกต้องที่สุดคือต้องสำรวจปริมาณฝุ่นไม้ต่อวัน (หรือต่อเดือน) ของแต่ละโรงงานซึ่งมีวัตถุดิบป้อน, ปริมาณ, กระบวนการผลิต และกำลังการผลิตที่แตกต่างกัน

เนื่องจากยังมีวัตถุดิบคือ ไม้ยางพาราอยู่มากมายในพื้นที่ภาคใต้ ดังนั้นคาดว่าอุตสาหกรรมไม้ยางพาราจะยังคงมีอยู่และขยายตัวเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าจะต้องมีเศษไม้เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเป็นอันมากรวมถึงฝุ่นไม้ด้วย

1.3 เทคโนโลยีที่ใช้ในการอัดเศษวัสดุเป็นเชื้อเพลิงแข็ง

กระบวนการอัดแน่นชีวมวลซึ่งรู้จักกันในเรื่องการนำขี้เลื่อยหรือเศษวัสดุทางการเกษตรอื่น ๆ มาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งนั้นได้มีการทำกันมานานแล้วในหลาย ๆ ประเทศ ย้อนหลังไปในศตวรรษที่ 19 ในปี ค.ศ. 1865 มีรายงานเกี่ยวกับการสร้างเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากผงถ่านหินพีท (peat), ปี 1945 ที่ประเทศญี่ปุ่นมีการประดิษฐ์คิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีการอัดแท่งโดยใช้สกรูอัดขึ้น และเมื่อถึงปี 1969 พบว่าประเทศญี่ปุ่นมีโรงงานถึง 638 โรงที่ถือว่าจ้างให้ผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากขี้เลื่อยโดยใช้เทคโนโลยีนี้ เชื้อเพลิงแข็งจากขี้เลื่อยดังกล่าวรู้จักกันในชื่อ 'Ogalite' เทคโนโลยีแบบญี่ปุ่นได้แพร่หลายไปยังประเทศไต้หวันและแพร่จากไต้หวันไปยังประเทศอื่น ๆ เช่น ประเทศไทย เทคโนโลยีนี้เป็นพื้นฐานในการเริ่มใช้เครื่องอัดแบบสกรูซึ่งถูกนำไปใช้ในเอเชีย ยุโรป รวมทั้งสหรัฐอเมริกา แต่แพร่หลายในเอเชียมากกว่า เพราะในช่วงเวลาเดียวกับที่ญี่ปุ่นกำลังพัฒนาเครื่องอัดแบบสกรูนั้น ทางยุโรปเองก็มีการพัฒนาเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกลสมัยใหม่ด้วยเช่นกัน เนื่องจากในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองมีการขาดแคลนเชื้อเพลิงจึงมีการใช้เชื้อเพลิงแข็งจากขี้เลื่อยและวัสดุอื่น ๆ อย่างแพร่หลายในหลายประเทศแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกา เทคโนโลยีแบบญี่ปุ่นมีความแตกต่างกับกระบวนการผลิตของสหรัฐอเมริกาโดยใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า 'Pres-to-log', กระบวนการผลิตของสวิสเซอร์แลนด์โดยใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า 'Glomera' และกระบวนการผลิตของเยอรมันตะวันตกโดยใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า 'Compress' ในปัจจุบันเทคโนโลยีหลักที่ใช้ความดันอัดสูงได้แก่เทคโนโลยีแบบลูกสูบ (ram or piston press) และแบบสกรู (screw press or screw extrusion) ได้รับความนิยมมากในการทำเชื้อเพลิงแข็ง แท่งเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตโดยเครื่องอัดแบบลูกสูบลักษณะเป็นแท่งตัน ในขณะที่แท่งเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตโดยเครื่องอัดแบบสกรูสามารถทำให้มีรูกลวงตรงกลางได้ เป็นการเพิ่มพื้นที่เผาไหม้ทำให้ติดไฟดีกว่า นอกจากนี้แท่งเชื้อเพลิงจากเครื่องอัดแบบสกรูยังถูกอัดออกมาแบบต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวติดต่อกัน มีความแข็งแรงมากไม่แตกหักง่าย มีอัตราการเผาไหม้สูง ใช้ทดแทนถ่านหินได้ดี โดยปกติแล้วเชื้อเพลิงแข็งจะถูกอัดให้มีความหนาแน่น $1,200 \text{ kg/m}^3$ วัสดุ

คิบที่นำมาอัดแท่งมีความหนาแน่นบัลค์ (bulk density) อยู่ในช่วง 100 - 200 kg/m³ (Grover and Mishra, 1996)

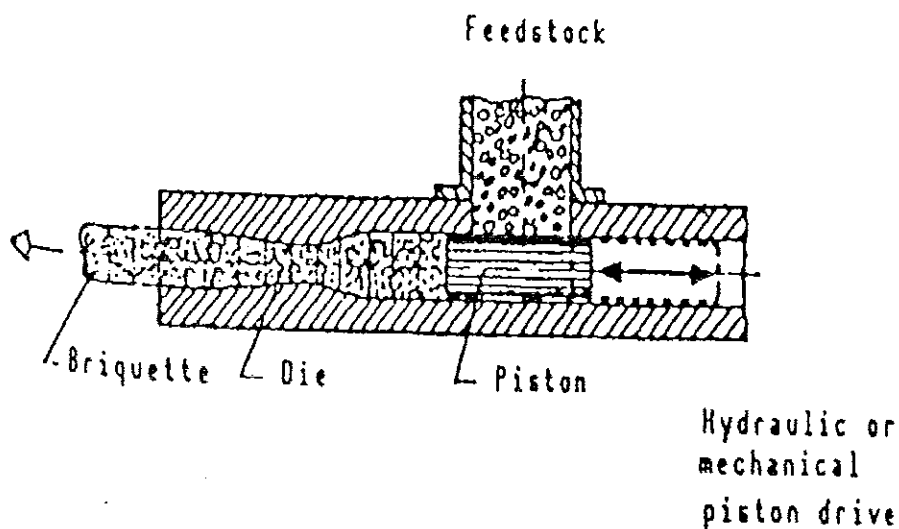
1.3.1 เทคโนโลยีที่ใช้

โดยปกติแล้วการนำชีวมวลมาอัดแน่น (densification) สามารถทำได้หลายวิธีดังจะอธิบายในลำดับต่อไป ก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจคำว่า อัดแน่น (densification) เสียก่อน การอัดแน่นเกี่ยวข้องกับความมุ่งหมายสองอย่างคือ การอัดวัสดุรวนหุยภายใต้ความดันเพื่อลดปริมาตรลง และการให้อุณหภูมิของวัสดุเหล่านั้นเกาะรวมกันเป็นก้อน ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในสภาพที่เป็นก้อนแข็งเนื่องจากการอัดที่ความดันสูง โดยปกติมักจะอัดเป็นรูปทรงกระบอก โดยที่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 30 mm จะเรียกว่าเชื้อเพลิงแท่ง (briquette) และถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 30 mm จะเรียกว่าเชื้อเพลิงเม็ด (pellet) เทคโนโลยีที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังนี้

ก. การอัด โดยใช้ลูกสูบ (piston presses)

การอัดโดยใช้ลูกสูบเป็นการอัดแบบไม่ต่อเนื่อง โดยวัสดุคิบถูกป้อนลงในกระบอกอัดจากนั้นถูกอัดด้วยลูกสูบให้เข้าไปในแม่พิมพ์ (slightly-tapering die) เมื่อวัสดุคิบเสียดสีกับผนังแม่พิมพ์จะเกิดความร้อนขึ้นทำให้ลิกนินในเนื้อวัสดุคิบละลายออกมาช่วยเป็นตัวประสานอนุภาควัสดุคิบให้ยึดติดกันและเมื่อออกมาจากแม่พิมพ์จะเกาะกันเป็นแท่งแข็งรูปทรงกระบอกและจะถูกตัดเป็นท่อน ๆ ยาวท่อนละ 10-30 cm ลักษณะของการอัดโดยใช้ลูกสูบแสดงไว้ในรูป 1.2 สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิงจะมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกำลังการผลิตของเครื่องจักร โดยเครื่องจักรที่มีกำลังการผลิต 1 ton/h จะมีแม่พิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8-10 cm ความสัมพันธ์นี้ค่อนข้างไม่ยืดหยุ่นแท่งเชื้อเพลิงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตมาก ๆ อาจผลิตออกมาน้อยก็ได้ถ้าตลาดมีความต้องการน้อย เพราะแท่งเชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะเผาไหม้ในเตาเผาไม่สะดวก เครื่องอัดแบบลูกสูบแบ่งเป็นแบบเชิงกล (mechanical piston press) และแบบไฮดรอลิก (hydraulic piston press) หลักการทำงานของเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกจะเหมือนกันกับแบบเชิงกล ต่างกันเพียงกลไกที่ใช้ส่งแรงไปดันลูกสูบ โดยพลังงานที่ส่งไปยังลูกสูบอัดนั้นถูกส่งจากมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านระบบน้ำมัน ไฮดรอลิกความดันสูง กระบอกไฮดรอลิก

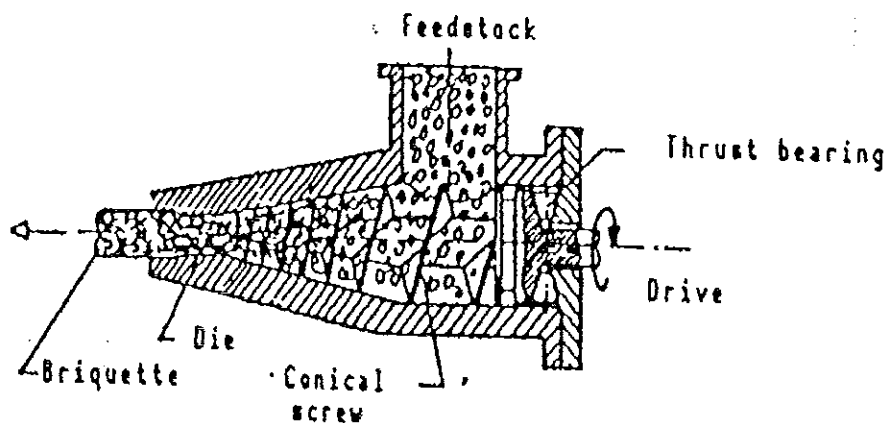
เป็นตัวออกแรงกระทำ ไม่ต้องส่งผ่านแรงผ่านข้อเหวี่ยงและข้อต่อเชื่อมต่าง ๆ ดังนั้นโดยวิธีการดังกล่าวจึงสามารถสร้างเครื่องจักรที่มีน้ำหนักเบาและกะทัดรัดได้ สำหรับเครื่องอัดแบบเชิงกลจะมีขนาดใหญ่กว่าและมีกำลังการผลิตมากกว่าแบบไฮดรอลิก โดยแบบเชิงกลมีกำลังการผลิตในช่วง 0.3-0.45 ton/h ส่วนแบบไฮดรอลิกมีกำลังการผลิตสูงสุดเพียง 0.25 ton/h แต่เครื่องจักรบางรุ่นอาจมีขนาดใหญ่กว่านี้ได้ ความดันขณะอัด (briquetting pressure) ของเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกจะน้อยกว่าแบบเชิงกลเนื่องจากขีดจำกัดของความดันของระบบไฮดรอลิกนั่นเอง ปกติแล้วไม่เกิน 30 MPa และในการอัดแท่งที่ความดันต่ำของแบบเครื่องไฮดรอลิกทำให้สามารถอัดวัตถุดิบได้ในช่วงความชื้นที่สูงขึ้นได้คือความชื้นของวัตถุดิบอาจสูงถึง 15-35% ในขณะที่ในกรณีของแบบเชิงกลความชื้นของวัตถุดิบไม่ควรเกิน 15% หากผลิตภัณฑ์ที่ออกมาที่มีความชื้นสูงก็ต้องมีการลดความชื้นลงเพื่อจะได้เก็บได้นาน



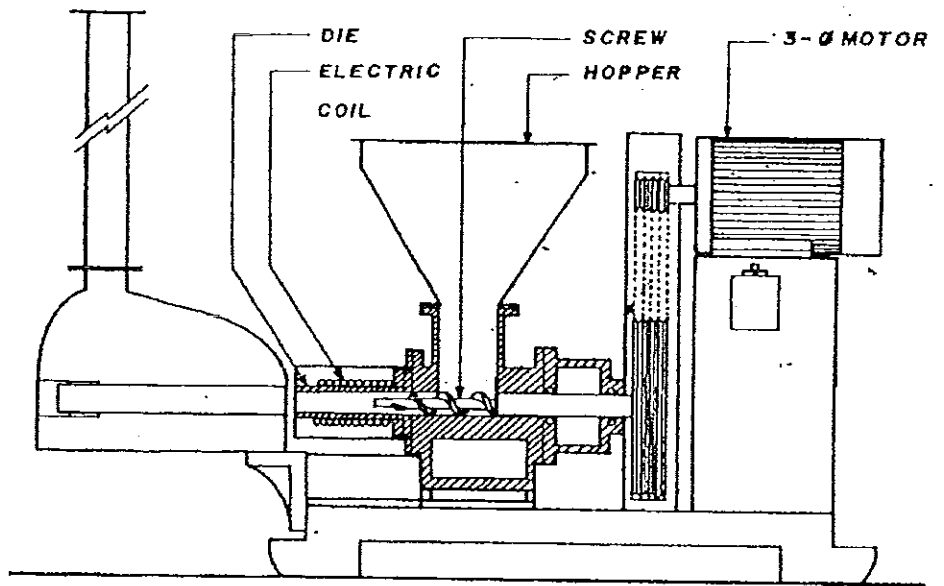
รูป 1.2 หลักการอัดแท่งแบบลูกสูบ (Eriksson and Prior, 1990)

ข. การอัดโดยใช้สกรูอัด (screw extruders)

กรณีนี้ความดันถูกส่งผ่านอย่างต่อเนื่องกระทำกับวัสดุป้อนโดยผ่านสกรู สกรูจะอัดวัสดุป้อนผ่านแม่พิมพ์ออกไป ลักษณะของสกรูมีสองแบบ คือแบบสกรูทรงกระบอก (cylindrical screw) และแบบสกรูทรงกรวย (conical screw) ส่วนแม่พิมพ์นั้นก็มีสองแบบเช่นกัน คือแบบที่มีการให้ความร้อนจากภายนอกและแบบที่ไม่มีการให้ความร้อน ลักษณะของการอัดโดยใช้สกรูแสดงไว้ในรูป 1.3 และ 1.4 เครื่องอัดแบบสกรูที่นิยมใช้กันมากคือเครื่องอัดแบบสกรูทรงกรวยที่มีการให้ความร้อนที่แม่พิมพ์ (cylindrical screw press with heated die)



รูป 1.3 หลักการอัดแท่งแบบใช้ conical screw (Eriksson and Prior, 1990)

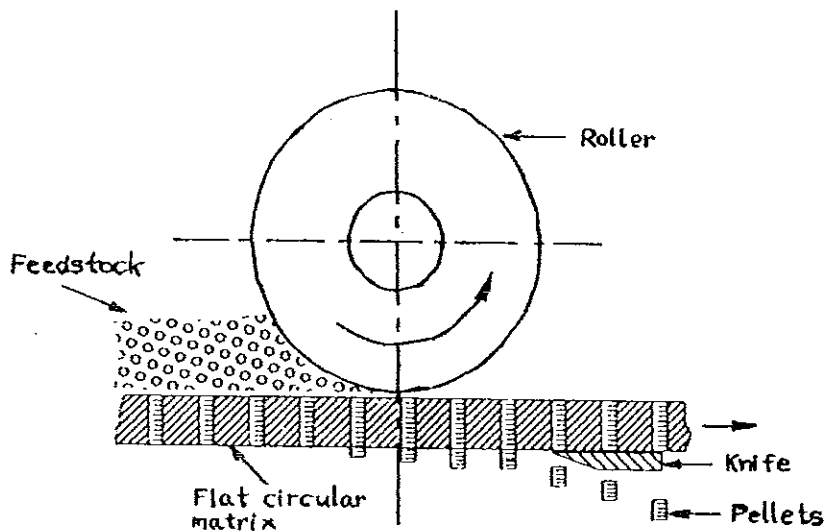


รูป 1.4 หลักการอัดแท่งแบบใช้ cylindrical screw with heated die (Eriksson and Prior, 1990)

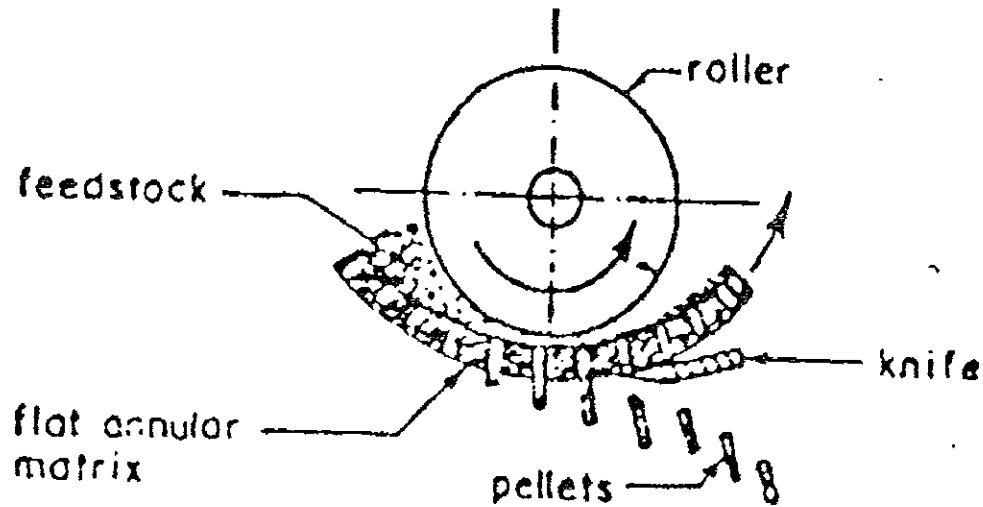
ค. การอัดเม็ด (pellet press)

เม็ดเชื้อเพลิงเป็นผลจากกระบวนการซึ่งมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกระบวนการอัดแท่งดังที่อธิบายก่อนหน้านี้ ความแตกต่างหลักอยู่ที่ขนาดของแม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า (ปกติไม่เกิน 30 mm) และเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะมีแม่พิมพ์จำนวนมาก มีลักษณะเป็นรูที่เจาะไว้อย่างเป็นระเบียบบนแผ่นหรือวงแหวนเหล็กหนา วัสดุดิบจะถูกบีบอัดผ่านแม่พิมพ์ขนาดเล็กเหล่านี้ด้วยลูกกลิ้ง (roller) ซึ่งปกติจะใช้ 2-3 ตัว โดยลูกกลิ้งจะเคลื่อนที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นเหล็กที่มีวัสดุดิบวางกระจายอยู่ เมื่อลูกกลิ้งเคลื่อนที่ตั้งฉากกับแนวศูนย์กลางของแม่พิมพ์จะบีบชั้นวัสดุดิบลงในแม่พิมพ์ เกิดความดันและความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุดิบ ความเร็วในการอัดช้ากว่าการอัดแบบลูกสูบทำให้อากาศในช่องว่างระหว่างอนุภาควัสดุดิบหนีออกได้ทัน ความยาวของแม่พิมพ์จะยาวพอดีสำหรับช่วงเวลาในการบีบเนื้อวัสดุดิบภายใต้ความดันเท่านั้น เม็ดเชื้อเพลิงเมื่อออกจากแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิสูงและถูกตัดออกด้วยใบมีดให้มีความยาวประมาณ 1-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ จากนั้นจะถูกลดอุณหภูมิลงด้วยระบบทำความเย็น

(cooling system) เครื่องอัดเม็ดมีสองแบบหลัก ๆ ดังแสดงไว้ในรูป 1.5 และ 1.6 คือแบบที่แม่พิมพ์จะอยู่บนจานแบน (flat type) และแบบที่แม่พิมพ์จะอยู่บนวงแหวน (ring type) เครื่องอัดเม็ดแบบที่แม่พิมพ์จะอยู่บนจานแบนประกอบด้วยแผ่นจานรูปวงกลมที่มีลูกกลิ้ง 2 ตัว หรือมากกว่าหมุนอยู่ด้านบนด้วยความเร็ว 2-3 m/s ทำให้รูปของแต่ละแม่พิมพ์มีลูกกลิ้งวิ่งผ่านหลายครั้งใน 1 วินาที เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานอยู่ในช่วง 300-1,500 mm ความหนาของลูกกลิ้งอยู่ในช่วง 75-200 mm ทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสกับแผ่นจานภายใต้ลูกกลิ้งประมาณ 500-7,500 cm² สำหรับเครื่องอัดเม็ดแบบที่แม่พิมพ์จะอยู่บนวงแหวนจะมีลูกกลิ้ง 2-3 ตัว วิ่งอยู่ที่ผิวด้านในของวงแหวน เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของวงแหวนอยู่ระหว่าง 250-1,000 mm มีพื้นที่สัมผัสภายใต้ลูกกลิ้ง 500 - 6,000 cm² เรียกเครื่องจักรที่ทำเชื้อเพลิงอัดเม็ดนี้ว่า "Pelletizer" ซึ่งมีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 200 kg/h ถึง 8 ton/h และพลังงานที่ใช้จะอยู่ในช่วง 15 - 40 kWh/ton



รูป 1.5 หลักการของเครื่องอัดเม็ดแบบจานแบน (Bhattacharya and Sharma, 1997)



รูป 1.6 หลักการของเครื่องอัดเม็ดแบบวงแหวน (Eriksson and Prior, 1990)

ง. การอัดโดยใช้แรงคน (manual press)

ในกรณีนี้อุปกรณ์ที่ใช้อัดก้อนเชื้อเพลิงถูกสร้างขึ้นให้สามารถอัดโดยใช้มือ โยก หรือใช้แรงงานสัตว์ได้ มีใช้งานในระดับหมู่บ้าน กำลังการผลิตน้อยกว่า 100 kg/h เชื้อเพลิงที่อัดได้เรียกว่าเชื้อเพลิงเขียว (green fuel) วัตถุดิบส่วนใหญ่คือเศษพืชที่เหลือทิ้งจากการเกษตร มีการผสมตัวประสานลงไป เช่น ปูนขาว การอัดจะอัดแบบเปียกแล้วนำมาทิ้งแดดให้แห้ง ความดันในการอัดแบบนี้มีค่าไม่สูงพอที่จะทำให้ผนังเซลล์ของวัตถุดิบถูกบีบจนติดกัน และมีการยุบตัวเพียงเล็กน้อย

1.3.2 การพิจารณาแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีในการอัดฟืนไม้

ในการอัดก้อนชีวมวลนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องทราบคือคุณลักษณะของชีวมวลที่จะนำมาอัด เช่น ขนาดของอนุภาค องค์ประกอบความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น เพราะเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้เทคโนโลยีการอัดที่เหมาะสม

การอัดโดยใช้แรงคนไม่เหมาะสำหรับการใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมเพราะจุดประสงค์คือต้องการเครื่องจักรที่ทำงานอัตโนมัติและมีความสามารถสูง ส่วนการอัด

เมื่อนั้นเศษวัสดุที่นำมาอัดส่วนใหญ่ได้แก่สะเก็ดไม้ ชีบ เศษไม้ โดยนำมาย่อยก่อนแล้วผสมกับซีเมนต์ จากนั้นทำให้แห้งแล้วนำมาอัดเป็นเม็ด ในที่นี้ยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการนำเศษวัสดุที่มีความละเอียดมากหรือมีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร เช่นฝุ่นไม้มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด นอกจากนี้ยังกำหนดความชื้นของวัตถุดิบไว้ต่ำมากคือ 5-10% และเปอร์เซ็นต์ฝุ่นผงโดยน้ำหนัก (fines content, % by weight) กำหนดไว้ที่ต่ำกว่า 0.5 (PFI, 1995) เนื่องจากผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ผลิตมาใช้กับเตาที่ออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับใช้ในอาคารบ้านเรือน ส่วนการอัดโดยใช้สกรูอัดนั้นไม่เหมาะสมเพราะอนุภาคของเศษวัสดุที่เหมาะสมกับสกรูอัดจะอยู่ในช่วง 6-8 mm โดยมีฝุ่นผงปนอยู่ประมาณ 10-20% (Grover and Mishra, 1996) แต่ถ้าหากต้องการใช้สกรูในการอัดฝุ่นไม้จริง ๆ ก็ต้องมีการปรับปรุงลักษณะของวัตถุดิบเสียก่อน เช่น อาจนำฝุ่นไม้มาผสมกับซีเมนต์หรือวัสดุอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถทำให้เกิดการไหลในสกรูได้โดยสะดวก การเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างการอัดโดยใช้สกรูและการอัดแบบเชิงกลได้แสดงไว้ในตาราง 1.3 และกรณีสุดท้ายคือการอัดโดยใช้ลูกสูบ กรณีนี้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบไม่ควรเกิน 50 mm ในทางอุดมคติแล้วสำหรับวัตถุดิบใด ๆ ควรมีอนุภาคที่สั้นและยาวปะปนกัน ในที่นี้ยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการนำวัตถุดิบที่มีความละเอียดมากหรือมีขนาดเล็กกว่า 1 mm เช่นฝุ่นไม้มาอัด โดยใช้เครื่องอัดชนิดลูกสูบ การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอัดชนิดลูกสูบแบบเชิงกล และเครื่องอัดชนิดลูกสูบแบบไฮดรอลิกได้แสดงไว้ในตาราง 1.4

ตาราง 1.3 เปรียบเทียบระหว่างเครื่องอัดแบบสกรูและเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกล
(Grover and Mishra, 1996)

Item	Mechanical piston press	Screw press
Optimum moisture content of raw material	10-15%	8-9%
Wear of contact parts	Low in case of ram and die	high in case of screw
Output from the machine	In strokes	continuous
Power consumption	50 kWh/ton	60 kWh/ton
Density of briquette	1,000-1,200 kg/m ³	1,000-1,400 kg/m ³
Maintenance	High	low
Combustion performance of briquettes	Not so good	Very good
Carbonisation of charcoal	Not possible	Makes good charcoal
Suitability in gasifiers	Not suitable	Suitable
Homogeneity of briquettes	Non-homogeneous	homogeneous

ตาราง 1.4 เปรียบเทียบระหว่างเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกลและเครื่องอัดลูกสูบแบบไฮดรอลิก
(Kaminski, 1988)

Item	Mechanical piston press	Hydraulic piston press
Briquette diameter (mm)	45-125	48-100
Briquette density (kg/m ³)	920-1,200	700-1,010
Average output (kg/hr)	112.5-6,000	30-1,125
Max. nominal power demand (kW/hr)	11.7-132	3.4-80
Average power consumption (W/kg)	15.4-86.3	23.3-128.3
Specific investment (\$/kg)	28.5-123.5	55.1-292.5
Hardness	Hard	soft

1.4 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง

การทำเชื้อเพลิงแข็งไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงแท่งหรือเชื้อเพลิงเม็ด ต้องการให้มีคุณลักษณะเด่นสองประการคือ ยังคงรูปร่างเป็นของแข็งจนกระทั่งถูกใช้งานและเป็นเชื้อเพลิงที่ดี คุณลักษณะประการแรกนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะต้องไม่ร่วนหรือหลุดเป็นผงขณะมีการเคลื่อนย้าย ขนส่งและจัดเก็บ ถือเป็นหน้าที่หลักที่กระบวนการอัดแน่นวัสดุนั้นต้องทำให้ได้ คุณลักษณะประการที่สองเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเศษวัสดุที่เป็นวัตถุดิบ, ขนาด, รูปร่าง และความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละอัน เรียกคุณลักษณะสองประการนี้ว่า การคงสภาพ (briquette handling characteristics) และ การเป็นเชื้อเพลิง (fuel characteristics) ตามลำดับ คุณลักษณะทั้งสองนี้บางครั้งก็ขัดแย้งกันเอง ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงคุณลักษณะการคงสภาพ (handling characteristics) โดยการทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น บ่อยครั้งที่พบว่าการทำเช่นนี้มีผลทำให้แท่งเชื้อเพลิงเผาไหม้ยากขึ้น (Grover and Mishra, 1996)

ในหลักการของการวางแผนโครงการผลิต มีความเป็นไปได้ที่ต้องพิจารณาถึงความต้องการอันหลากหลายในเรื่อง การขนส่ง การขนถ่าย การจัดเก็บ การเผาไหม้ จากนั้นจึงเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมกับวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ แต่ถ้าหากผลิตและใช้ภายในสถานที่เดียวกันไม่ได้ขนส่งไปไหนไกลๆหรือเก็บไว้นานๆ ก็ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องอัดให้แน่นมากเพราะจริงๆแล้วสิ่งที่สำคัญที่สุดคือคุณสมบัติการเผาไหม้ที่ดี ดังนั้นควรมีการประเมินประนอมหาจุดที่ลงตัวในเรื่อง วัตถุดิบ กระบวนการ จุดประสงค์ และคุณสมบัติผลิตภัณฑ์

1.4.1 คุณสมบัติการขนย้าย (Handling Characteristics)

ก. ความหนาแน่น (density)

กระบวนการส่วนใหญ่สามารถผลิตแท่งเชื้อเพลิงให้มีความหนาแน่นสูงกว่า $1,000 \text{ kg/m}^3$ (ทดสอบง่ายๆคือก้อนเชื้อเพลิงจะจมน้ำ) ขีดจำกัดของความหนาแน่นสูงสุดที่ทำได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเชิงกายภาพของเศษวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งสำหรับเศษพืชส่วนใหญ่จะเท่ากับ $1,500 \text{ kg/m}^3$ ความหนาแน่นของแต่ละแท่งเรียกว่าความหนาแน่นปรากฏ

(apparent density) กระบวนการความดันสูงเช่นเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกล, เครื่องอัดแบบสกรู และเครื่องอัดเม็ด บางแบบสามารถผลิตเชื้อเพลิงแข็งให้มีความหนาแน่นสูงถึง $1,000-1,400 \text{ kg/m}^3$ ส่วนเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกสร้าง ความหนาแน่นได้ต่ำกว่าและบางครั้งยังต่ำกว่า $1,000 \text{ kg/m}^3$

คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของเชื้อเพลิงแข็งคือความหนาแน่นบัลค์ (bulk density) ซึ่งเป็นการนำแท่งเชื้อเพลิงทุก ๆ แท่งมารวมกันเป็นกองหรือในภาชนะแล้วจึงหาความหนาแน่น เชื้อเพลิงแข็งที่ความหนาแน่นบัลค์มีค่าสูงจะเผาไหม้ได้ยากเพราะมีช่องว่างในกองแท่งเชื้อเพลิงน้อย อากาศจะไหลผ่านได้น้อยทำให้ติดไฟยาก ดังนั้นการทำเชื้อเพลิงแข็งที่แน่นกว่าไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นปรากฏหรือความหนาแน่นบัลค์ยังถือว่ามีความสำคัญน้อยกว่าคุณสมบัติการเผาไหม้ที่ดี สำหรับความหนาแน่นบัลค์เป็นฟังก์ชันของทั้งความหนาแน่นเรขาคณิตของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง เชื้อเพลิงแท่งขนาดใหญ่ ขนาดเล็ก และเม็ดเชื้อเพลิง จะมีความหนาแน่นบัลค์ที่ต่างกัน แต่สำหรับการคำนวณอย่างคร่าว ๆ ความหนาแน่นปรากฏมีค่าประมาณสองเท่าของความหนาแน่นบัลค์ ตัวอย่างเช่น แท่งเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $1,200-1,400 \text{ kg/m}^3$ จะมีความหนาแน่นบัลค์อยู่ในช่วง $600-700 \text{ kg/m}^3$ เศษวัสดุบางชนิดเช่นชานอ้อย อาจมีความหนาแน่นบัลค์ต่ำถึง 40 kg/m^3 และสำหรับเศษวัสดุทางการเกษตรหรือเศษวัสดุจำพวกไม้ (เช่นจี้เลื่อย) อาจมีความหนาแน่นบัลค์สูงถึง $150-200 \text{ kg/m}^3$

ความชื้นที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงแข็ง เริ่มตั้งแต่หากเศษวัสดุที่นำมาอัดนั้นมีความชื้นสูง น้ำที่อยู่ในเศษวัสดุจะเป็นตัวป้องกันการอัดตัวเป็นก้อน นอกจากนี้ไอน้ำที่เกิดที่อุณหภูมิสูงในกระบวนการอัดบางแบบก่อให้เกิดช่องว่างในแท่งเชื้อเพลิง และถ้าหากวางแท่งเชื้อเพลิงทิ้งไว้ให้โดนความชื้นในอากาศเป็นเวลานานจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงพองโตขึ้น ทั้งหมดนี้ทำให้ความหนาแน่นปรากฏลดลงและนำไปสู่การหลุดร่วงไม่เกาะกันเป็นก้อนได้

ข. ความร่วน (friability)

หรือความร่วน กรอบ หลุดเป็นผง เป็นตัววัดการต้านทานแรงกระทำเชิงกลเช่น การกระแทกขณะขนย้าย หยิบจับ หรือขนส่งเป็นคัน เราสามารถทดสอบคุณสมบัตินี้ได้โดยการใส่แท่งเชื้อเพลิงในกระบอกหมุน (rotating drum) หรือทดลองปล่อยที่ความสูงที่

ต้องการทดสอบ ด้วยวิธีการทั้งสองหลังจากนั้นนำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 มิลลิเมตร ส่วนที่เหลืออยู่จะนำมาใช้เป็นครรชนีบอกถึงความร้อน เป็นการยากที่จะบอก ว่าดัชนีความร้อนค่าไหนที่ยอมรับได้เพราะไม่เคยมีการหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพ ความเป็นจริงกับผลการทดสอบ ค่าที่แปลผลได้ทันทีเช่นหากได้ครรชนีเป็น 0 หมายถึง แท่งเชื้อเพลิงมีการแตกกระจายทั้งหมดในเวลาที่แน่นอนซึ่งแสดงให้เห็นว่าแท่งเชื้อเพลิง มีคุณภาพไม่ดีพอ แต่เมื่อผลการทดสอบมีค่าสูงขึ้นระหว่าง 0.5–1.0 จะแปลความหมาย ของผลที่ได้ยากขึ้น ผลดังกล่าวยังนำมาใช้เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดแข็งจากกระบวนการผลิตหลาย ๆ กระบวนการเพื่อหาค่าครรชนีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเศษวัสดุแต่ละ ชนิด (CRA, 1987)

ค. ความต้านทานความชื้น (resistance to humidity)

ตัวประสานที่มีโดยธรรมชาติเช่นลิกนิน (lignin) และตัวประสานภายนอกที่ใส่เพิ่ม เข้าไปในการผลิตเชื้อเพลิงแข็งส่วนใหญ่สามารถละลายน้ำได้ ผลดังกล่าวนี้เป็นจุดอ่อน แอที่สุดของคุณภาพของเชื้อเพลิงแข็งซึ่งต้องไม่ให้โคนน้ำหรือความชื้นเป็นอันตราย นั่นคือต้องเก็บในภาชนะที่กันความชื้นได้ เชื้อเพลิงแท่งและเชื้อเพลิงเม็ดจะมีช่วงอายุจำกัด ภายใต้ภาวะแวดล้อมที่ชื้น แต่ก็ยังถือว่าเป็นปัญหาที่เล็กน้อยแม้จะอยู่ในประเทศเขตร้อน เชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตโดยเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกลและเครื่องอัดแบบสกรูที่มีการให้ความร้อนที่แม่พิมพ์มีความแน่นและผิวแข็งมาก มีความทนทานต่อความชื้นเพียงพอใน ฤดูฝนใน อินเดีย, ไทย และบราซิล แต่ก็ต้องมีการห่อหุ้มด้วยเช่นกัน

เคยมีการทดสอบความต้านทานความชื้นโดยการจุ่มแท่งเชื้อเพลิงลงในน้ำแล้ว บันทึกระยะเวลาที่ยึดหรือฟองตัวของแท่งเชื้อเพลิง หรือบางครั้งจุ่มแล้วจับเวลาคอยจนกระทั่ง แท่งเชื้อเพลิงหลุดลอย โดยสมบูรณ์ก็เป็นการวัดคุณภาพได้อย่างหนึ่งเช่นกัน เวลาที่วัดได้ แปรผันตั้งแต่สองสามนาทีไปจนถึงหลายชั่วโมง และในทำนองเดียวกันสำหรับพารามิเตอร์นี้ไม่สามารถกำหนดเวลาที่แน่นอนลงไปได้ว่าเท่าใดจึงจะยอมรับได้ โดยทั่วไป พบว่าอัตราการยึดตัวเป็นพารามิเตอร์ที่เที่ยงตรงกว่า โดยค่าการยึดตัวที่น้อยกว่า 50% ต่อ นาทีเป็นตัวชี้ว่าแท่งเชื้อเพลิงนั้นได้คุณภาพ นอกจากนี้ในการทดสอบโดยวิธีการอื่นจะ ทิ้งแท่งเชื้อเพลิงไว้ในอากาศชื้นเป็นระยะเวลาอันแล้ววัดการฟองตัว พบว่าหลังจากทิ้ง

ไว้ 21 วันในสภาพบรรยากาศปกติที่มีอุณหภูมิ 20 ° C ความชื้น 95 % การยืดตัวที่ยอมรับได้ต้องน้อยกว่า 30% และถ้าน้อยกว่า 20% ถือเป็นอุคมคติ (Eriksson and Prior, 1990)

1.4.2 คุณสมบัติการเผาไหม้ (Combustion characteristics)

ก. ค่าความร้อน (Calorific Value)

ค่าความร้อนเป็นคุณลักษณะที่สำคัญมากอันหนึ่งของเชื้อเพลิงซึ่งหมายถึงพลังงานทั้งหมดต่อกิโลกรัมที่เชื้อเพลิงปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงแข็งส่วนใหญ่ แม้ว่าจะถูกกำหนดราคาโดยน้ำหนักหรือปริมาตร แต่ท้ายที่สุดแล้วแรงซื้อขายจากตลาดก็เป็นตัวกำหนดราคาของเชื้อเพลิงแข็งแต่ละชนิด โดยยึดความสามารถในการให้ความร้อนเป็นหลัก (Grover and Mishra, 1996) อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในการผลิต (production cost) ของเชื้อเพลิงแข็ง และค่าขนส่ง (transportation cost) และค่าขนถ่าย (handling cost) จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความร้อน ค่าความร้อนสามารถนำมาใช้คำนวณสถานะการแข่งกันของเชื้อเพลิงต่าง ๆ ในท้องตลาดได้ ถึงแม้จะมีปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายปัจจัย เช่น ลักษณะการคงสภาพ และการเผาไหม้ ซึ่งมีอำนาจชักจูงราคาได้ แต่ค่าความร้อนน่าจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการอ้างอิงแบบรวดเร็ว ค่าความร้อนสูงของเศษวัสดุจำพวกไม้และเศษวัสดุจากการเกษตรสามารถหาได้โดยใช้สูตรต่อไปนี้ (Grover and Mishra, 1996)

$$\text{Gross. (or higher) calorific value (HCV)} = 20 \times (1-A-M) \text{ MJ/kg} \quad (1.1)$$

โดย A คือ เปรอร์เซ็นต์เถ้า (ash content) และ M คือ เปรอร์เซ็นต์ความชื้น (moisture content)

สำหรับค่าความร้อนต่ำ (lower (or net) calorific value) ซึ่งไม่ได้รวมเอาพลังงานจากไอน้ำที่ระเหยมาจากก้อนเชื้อเพลิง และจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่ปนอยู่ในเชื้อเพลิง บางครั้งถูกใช้สำหรับการอ้างอิงเฉพาะอย่างในการใช้งานทาง

อุตสาหกรรม ในกรณีของเศษวัสดุจากไม้และการเกษตรส่วนมากพบว่าไฮโดรเจนปนอยู่ 6% (โดยน้ำหนักฐานแห้งและไม่คิดเถ้า) ซึ่งทำให้สูตรข้างบนเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$\text{Lower calorific value(LCV)} = 18.7 \times (1 - A - M) - 2.5 \times M \text{ MJ/kg} \quad (1.2)$$

ตัวอย่างเช่น แกลบข้าวที่มีความชื้น 15% และมีเถ้า 20% จะมีค่าความร้อนตามสูตรข้างบนดังนี้

$$\text{HCV} = 20.0 \times (1 - 0.2 - 0.15) = 13.0 \text{ MJ/kg} \quad (1.3)$$

$$\text{LCV} = 18.7 \times (1 - 0.2 - 0.15) - 2.5 \times 0.15 = 11.8 \text{ MJ/kg} \quad (1.4)$$

สำหรับวัสดุที่มีเปอร์เซ็นต์เถ้าต่ำ และมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่าง 10–15% ซึ่งเป็นลักษณะของเชื้อเพลิงแข็งส่วนใหญ่ที่ทำมาจากเศษวัสดุจำพวกไม้และการเกษตร ผลการคำนวณความร้อนสูงอยู่ในช่วง 17–18 MJ/kg (LCV : 15.4–16.5 MJ/kg) ค่าความร้อนสูงและเปอร์เซ็นต์เถ้าของชีวมวลประเภทต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตาราง 1.5 (Eriksson and Prior, 1990) และจากตาราง 1.5 พบว่ามีความไม่ตรงกันอยู่สำหรับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงบางชนิดซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากแหล่งข้อมูลที่ต่างกัน และน่าจะเนื่องมาจากกระบวนการทดสอบที่ไม่เที่ยงตรง

ตาราง 1.5 ค่าความร้อนและเปอร์เซ็นต์ขี้เถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลต่าง ๆ (Eriksson and Prior, 1990)

Material	Ash content %	HCV MJ/kg (oven dry)	Material	Ash content %	HCV MJ/kg (oven dry)
Alfalfa straw	6.0	18.4	Olive pits	3.2	21.4
Almond shell	4.8	19.4	Pigeon pea stalks	2.0	18.6
Cassava stem	-	18.3	Rice straw	-	15.2
Coconut shell	0.8	20.1	Rice straw	19.2	15.0
Coconut husk	6.0	18.1	Rice husks	-	15.3
Cotton stalks	17.2	15.8	Rice husks	16.5	15.5
Cotton stalks	3.3	17.4	Rice husks	14.9	16.8
Groundnut shell	-	19.7	Soybean stalks	-	19.4
Groundnut shell	4.4	20.0	Soybean stalks	-	19.4
Maize stalks	6.4	18.2	Sunflower straw	-	21.0
Maize stalks	3.4	16.7	Walnut shells	1.1	21.1
Maize cobs	1.5	18.9	Wheat straw	-	18.9
Maize cobs	1.8	17.4	Wheat straw	8.5	17.2

ข. การเผาไหม้ในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม (combustion in industrial boilers)

หม้อไอน้ำอุตสาหกรรมที่สามารถนำเชื้อเพลิงอัดแท่งมาใช้ประโยชน์ได้ส่วนใหญ่จะเป็นหม้อไอน้ำที่ถูกออกแบบมาสำหรับใช้กับเชื้อเพลิงแข็งเช่น ไม้ฟืนหรือถ่านหิน ส่วนหม้อไอน้ำที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงสามารถดัดแปลงมาใช้เชื้อเพลิงแข็งได้แต่ค่อนข้างเสียค่าใช้จ่ายสูง ปัญหาหลักสองอย่างที่พบในการเผาไหม้เศษวัสดุที่ไม่ได้อัดแท่งคือ ความยากลำบากในการป้อนวัสดุเข้าไปยังห้องเผาไหม้และการที่วัสดุหลุดร่วงแล้วปลิวกระจายอยู่ในห้องเผาไหม้ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เชื้อเพลิงอัดแท่งมีข้อได้เปรียบเหนือกว่าเศษวัสดุที่ไม่ได้อัดแท่งตรงที่การขนถ่ายไปยังอุปกรณ์เผาไหม้สามารถทำได้ง่ายกว่าจึงสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้

มีข้อมูลไม่มากนักเกี่ยวกับการสูญเสียประสิทธิภาพการเผาไหม้ในการเผาเศษวัสดุ ตัวอย่างในประเทศอินเดียอ้างว่าแกลบข้าวจะมีประสิทธิภาพเผาไหม้ต่ำกว่าแกลบอัดแห้งถึง 20%

ปกติแล้วเชื้อเพลิงอัดแห้งจะป้อนเข้าห้องเผาไหม้ได้ง่ายกว่าเศษวัสดุที่ไม่ได้อัดแห้ง อย่างไรก็ตามในบางกรณีมีการใช้ระบบลมหรือสกรูขนถ่ายเข้ามาช่วยในการขนถ่ายและป้อนเชื้อเพลิงเช่นแกลบและฟืนปอกระเจา ซึ่งเป็นระบบที่มีประโยชน์แม้จะราคาแพง ตัวอย่างในประเทศบราซิลมีโรงงานจำนวนมากที่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวในการเผาไหม้ชานอ้อยซึ่งมีปริมาณมากและหาได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องอัดเป็นแท่งก่อนป้อนเข้าเตาเผาเพราะชานอ้อยที่ออกมาจะอยู่ใกล้ ๆ กัน หรือตัวอย่างในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มบางโรงทางภาคใต้ของประเทศไทยจะใช้สกรูขนถ่ายสำหรับนำกากผลปาล์มและทะลายปาล์มกลับมายังเตาเผาไหม้ของหม้อน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีข้อมูลในการลงความเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมในการเลือกระหว่างการเปลี่ยนเศษวัสดุให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการใช้กับการเปลี่ยนอุปกรณ์การเผาไหม้ให้สามารถเผาเศษวัสดุได้โดยตรง และมีข้อคิดเห็นว่าโรงงานที่ใหญ่กว่าน่าจะเปลี่ยนไปใช้วิธีปรับปรุงอุปกรณ์เผาไหม้จะประหยัดกว่าการแปรสภาพเชื้อเพลิง

ค. การเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ในครัวเรือน (combustion in household stoves)

ในปัจจุบันมีการใช้เชื้อเพลิงอัดแห้งสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามพบว่าในประเทศที่ขาดแคลนฟืนหรือป่าไม้น้อยหรือถูกทำลายไปมาก ก็มีการใช้เชื้อเพลิงอัดแห้งในบ้านเรือนด้วย หัวข้อนี้จะกล่าวถึงเชื้อเพลิงอัดแห้งที่เหมาะสมสำหรับใช้ตามบ้าน แต่ข้อมูลที่มีอยู่ค่อนข้างน้อย

มีรายงานผลการทดลองจากห้องทดลองในประเทศเนเธอร์แลนด์บอกว่าเชื้อเพลิงอัดแห้งมีพฤติกรรมการเผาไหม้ในเตาหุงต้มในครัวเรือนค่อนข้างดีโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแห้ง 6 ชนิดแตกต่างกันในเตา 5 เตา พบว่าเตาอั้งโล่ของไทยสามารถใช้ได้ดีเป็นพิเศษ โดยมีประสิทธิภาพความร้อนระหว่าง 33-46% นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแห้งเปรียบได้กับการใช้ไม้ฟืนมากกว่าการใช้ถ่าน โดยมีเปลวไฟที่มากกว่าและมีควันมากกว่าถ่านเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังชี้ว่าเชื้อเพลิงอัดแห้งจาก

แกลบและเศษพืชจำพวกจามจุรีสามารถใช้ทดแทนถ่านได้ถ้าอัดเป็นก้อนเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ

จากผลการทดลองของ CRA ที่ Gembloux (Eriksson and Prior, 1990) ได้มีการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งมาทดสอบโดยวัดอัตราการยึดตัวและวัดน้ำหนักที่สูญเสียไป และจับเวลาของการเผาไหม้ตั้งแต่เริ่มมีควัน, เกิดเปลวไฟ, จนกระทั่งकुแดงเต็มที่ ผลสรุปของการทดลองดังกล่าวมีดังนี้คือ เชื้อเพลิงอัดแท่งที่แข็งและแน่นขณะเผาไหม้จะพองตัวออกน้อยมากและมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักช้า (คิดไฟนาน) และเผาไหม้โดยไม่มีเปลวไฟเป็นเวลานานคล้ายกันกับลักษณะการเผาไหม้ของถ่าน แต่สำหรับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ไม่แข็งนักจะเกิดผลตรงข้าม เช่นเกิดการพองตัวอย่างรวดเร็วและมีการแตกตัวออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เป็นการเพิ่มอัตราการสูญเสียน้ำหนักให้เร็วขึ้นและช่วงเวลาในการติดไฟจะน้อยมาก พฤติกรรมเช่นนี้เป็นคุณลักษณะของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก

ในประเทศไนเจอร์และซูดานมีการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งในครัวเรือนอยู่บ้าง โดยผลิตจากเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกลขนาดใหญ่ วัตถุดิบที่ใช้คือเปลือกถั่วลิสง การใช้งานใช้ร่วมกับไม้ฟืน พบว่าคุณสมบัติการเผาไหม้อยู่ในเกณฑ์ดีแม้จะต้องหักหรือทุบออกมาเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนก็ตาม ในซูดานถ่านอัดแท่งที่ทำจากต้นฝ้าย โดยมีโมลาสเป็นตัวประสานสามารถใช้ทดแทนถ่านได้ดีแต่ก็ยังมีปัญหาเรื่องกลิ่น

ในประเทศไทยมีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากแกลบและเศษวัสดุจำพวกไม้โดยใช้เครื่องอัดแบบสกรู โดยแกลบอัดแท่งมีปัญหาอยู่บ้างขณะเผาไหม้คือมีขี้เถ้าสูง ส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษวัสดุจำพวกไม้ไม่มีปัญหาอะไร ใช้งานได้ดี ปัญหาในการยอมรับถูกกำหนดโดยราคามากกว่าคุณภาพ นอกจากนี้ยังมีการผลิตถ่านอัดแท่ง เช่นถ่านแกลบอัดแท่ง ถ่านขี้เลื่อยอัดแท่ง เป็นต้น

ในอินเดียมีปัญหาในการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีโมลาสเป็นตัวประสาน คือมีกลิ่นเหม็นและติดไฟยากเมื่อเทียบกับถ่านอัดแท่งหรือถ่านหิน

มีเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม้ยางพาราซึ่งขณะเผาไหม้จะเกิดควันออกมามาก ซึ่งไม่เหมาะสำหรับเตาหุงต้มอาหาร

ข้อมูลดังกล่าวมาทั้งหมดข้างต้นสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เชื้อเพลิงอัดแท่งได้ แต่มิได้ครอบคลุมถึงปัจจัยทั้งหมดซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับได้ในทางปฏิบัติ

1.5 วัตถุประสงค์

- ก. เพื่อศึกษาวิจัยข้อมูลเบื้องต้น เกี่ยวกับแรงอัด รูปร่างและขนาด ความหนาแน่น พลังงานและต้นทุนการผลิตของเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตจากฟูนไม้
- ข. เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฟูนไม้

1.6 ขอบเขตการวิจัย

แบ่งออกได้เป็นสองส่วนด้วยกันคือ

- ก. ศึกษาวิจัยข้อมูลเบื้องต้น เกี่ยวกับแรงอัด รูปร่างและขนาด ความหนาแน่น พลังงานและต้นทุนการผลิต ของเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตจากฟูนไม้ โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- ข. ออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฟูนไม้ แล้วทดสอบสมรรถนะการทำงาน เพื่อหาอัตราการผลิต ต้นทุน และแนวทางการบำรุงรักษา

1.7 สรุป

การทำเชื้อเพลิงแข็งได้มีการทำมานานแล้วในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยซึ่งมีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอยู่มากก็ได้มีการผลิตเชื้อเพลิงแข็งด้วยเช่นกัน เทคโนโลยีที่นิยมกันมากคือเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งแบบสกรูที่มีการให้ความร้อนที่แม่พิมพ์ วัตถุดิบส่วนใหญ่คือแกลบ และขี้เลื่อย สำหรับฟูนไม้จากโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพาราในภาคใต้ของประเทศยังไม่มีเครื่องจักรที่เหมาะสม โดยเฉพาะสำหรับอัดเป็น

เชื้อเพลิงแข็ง จากความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง และเทคโนโลยีในการอัดเชื้อเพลิงแข็ง ทำให้ได้ข้อสรุปว่า การอัดฝุ่นไม้โดยใช้เครื่องอัดแบบลูกสูบและใช้ระบบไฮดรอลิกมีความเหมาะสมมากที่สุด

บทที่ 2

การทดสอบคุณลักษณะพื้นฐานที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้

2.1 บทนำ

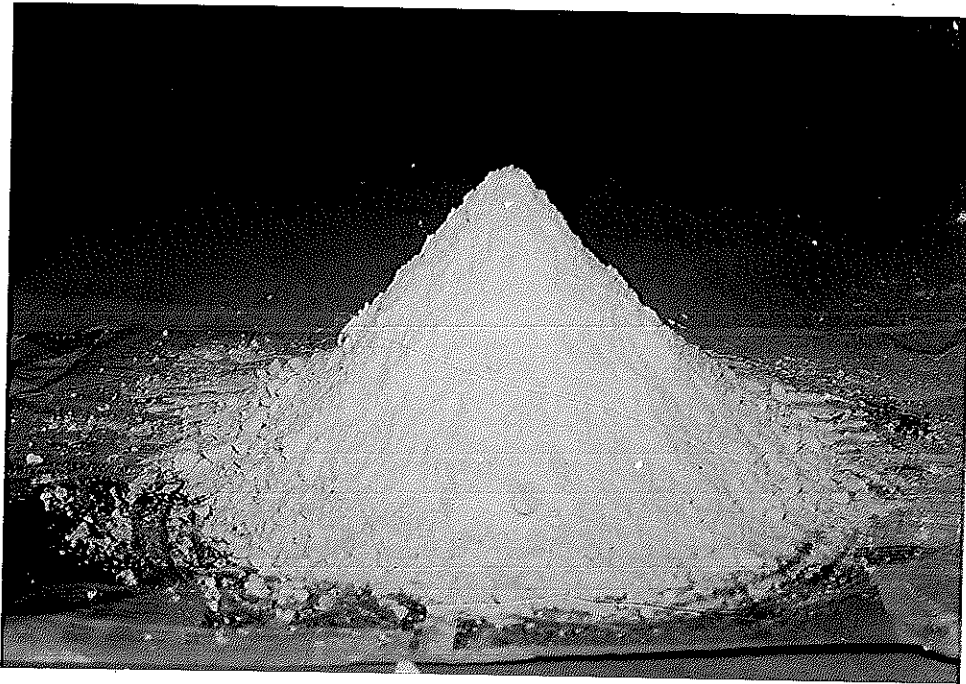
เชื้อเพลิงแข็งส่วนใหญ่ที่ผลิตในปัจจุบันทำมาจากวัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคโตกว่า 1 มิลลิเมตร เช่น ไม้เลื่อย ไม้คอก แกลบข้าว เปลือกถั่ว หนุ่ย ฟางข้าว เศษไม้และสะเก็ด ไม้ที่ย่อยขนาดแล้วเป็นต้น ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมีค่ามาตรฐานอยู่ที่ $1,000 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีทั้งแท่งเชื้อเพลิงที่อัด โดยมีการให้ความร้อนซึ่งทำให้ผิวนอกของแท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งทนต่อความชื้น และการอัดโดยไม่มีการให้ความร้อนให้เพียงความดันเป็นตัวบีบให้อนุภาคของวัตถุดิบยึดติดกันเท่านั้น นอกจากนี้เชื้อเพลิงอัดแท่งบางประเภท เช่น เชื้อเพลิงเขียวและถ่านอัดแท่ง ยังมีการผสมตัวประสานลงไปเพื่อช่วยในการจับยึดของอนุภาคของวัตถุดิบ บางครั้งผสมวัสดุบางอย่างเพื่อช่วยในการติดไฟและลดควัน เชื้อเพลิงแข็งบางแบบเช่นเชื้อเพลิงอัดเม็ดซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีความสะอาด เหมาะกับการใช้ในบ้านเรือนแต่ต้องมีเตาเผาที่ผลิตเพื่อใช้กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยเฉพาะ สำหรับวัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคเล็กละเอียดมากเช่นฝุ่นไม้ การจะทำฝุ่นไม้เป็นเชื้อเพลิงแข็งสามารถทำได้ เพราะฝุ่นไม้มีส่วนประกอบทางเคมีเช่นเดียวกับไม้ยางพารา ยังไม่มีการลงทุนอัดฝุ่นไม้เพียงอย่างเดียวเป็นเชื้อเพลิงแข็งเพราะทำได้ยาก ปัจจุบันมีเพียงการอัดไม้เลื่อยเท่านั้นที่พบว่ามีความหนาแน่นอนุภาคเล็กที่สุด ดังนั้นการลงทุนอัดฝุ่นไม้ล้วน ๆ เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งจำเป็นจะต้องหาข้อมูลเบื้องต้นในเรื่องขนาดแรงอัด รูปร่างที่เหมาะสม และความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงเพื่อให้ตรงตามคุณลักษณะที่ดีของเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยทั่วไป รายละเอียดในบทนี้จึงเป็นการทดลองหาคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ทดลองคือฟ่อนไม้จากการขัดผิวในกระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์ของโรงงานอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ไม้บางพารา ในที่นี่ได้จากโรงงาน เอ พี วัสดุ จำกัด อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ตัวอย่างฟ่อนไม้แสดงในรูป 2.1 จากการทดสอบพบว่าฟ่อนไม้มีความหนาแน่นบัลค์ (bulk density) ประมาณ 200 kg/m^3 มีเปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) 9.35% และมีค่าความร้อนสูง 16.8 MJ/kg โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- ก. ความหนาแน่นบัลค์ (bulk density) : การทดสอบนี้ต้องการทราบถึงมวลหรือน้ำหนักของฟ่อนไม้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งมีความสำคัญในการคำนวณหาปริมาณฟ่อนที่จะขนส่ง (หากจำเป็นต้องมีการขนส่ง) และหาปริมาณฟ่อนก่อนเข้าเครื่องอัดในการคำนวณออกแบบ การทดสอบจะยึดตามมาตรฐานของการหาความหนาแน่นบัลค์ของผงถ่านละเอียด (FAO, 1985) ซึ่งสามารถนำมาใช้หาความหนาแน่นบัลค์ของฟ่อนไม้ได้ ทดสอบโดยใส่ฟ่อนไม้ลงในกระบอกตวงให้ได้ 100 ml ในการใส่ฟ่อนลงในกระบอกตวงแต่ละครั้งต้องเคาะกระบอกตวงลงบนแผ่นไม้สังเกตุจนฟ่อนมีปริมาตรคงที่ เติมฟ่อนและเคาะซ้ำเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ฟ่อนไม้ที่ระดับ 100 ml จากนั้นชั่งฟ่อนแล้วคำนวณหาความหนาแน่น
- ข. เปอร์เซ็นต์ความชื้น (moisture content) : ยึดวิธีการเดียวกับการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของถ่านและไม้ ตามมาตรฐาน ASTM D 2016-74 หาโดยชั่งฟ่อนจำนวน 10 กรัม แล้วอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิคงที่ 105°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นอบต่อแล้วชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมงจนกระทั่งน้ำหนักที่หายไปในแต่ละชั่วโมงมีค่าไม่เกิน 0.25% น้ำหนักที่หายไปตลอดการอบจะถูกนำไปคำนวณหาความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเปียกเริ่มต้น
- ค. ค่าความร้อน (heating value) ค่านี้แสดงถึงปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของฟ่อนไม้ การทดสอบอ้างตามมาตรฐานเดียวกับการหาค่าความร้อนของถ่าน, ผงถ่าน, ถ่านอัดแท่ง, และเชื้อเพลิงแก๊สทั่วไป คือ ASTM D 2677, D3172-73 โดยใช้ oxygen calorimetric bomb



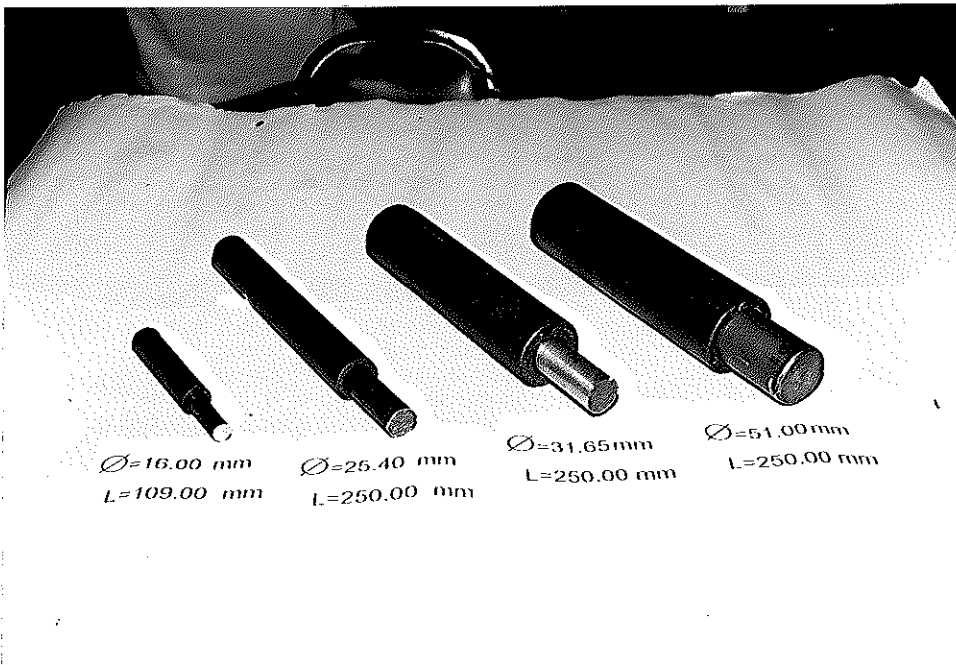
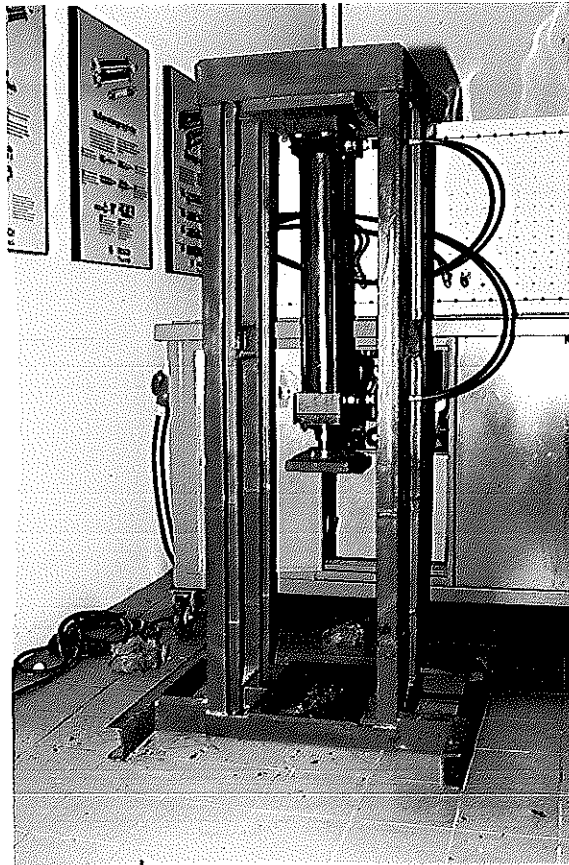
รูป 2.1 ตัวอย่างฝุ่นไม้

2.2.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์การทดลองมีดังนี้

1. ชุดต้นกำลังระบบไฮดรอลิก (power unit) 1 ชุด โดยปั้มน้ำมันไฮดรอลิกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 hp ระบบมีความดันน้ำมันสูงสุด 1,500 psi มีตัวทำงาน (actuator) เป็นกระบอกไฮดรอลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 80 mm ความยาวช่วงชัก 500 mm ระบบท่อทางใช้วาล์วควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมันแบบมือโยกและสปริงคืนกลับตำแหน่งกลางชนิด 4 ทาง 3 ตำแหน่ง
 2. กระบอกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16.00 mm ยาว 109.00 mm
 3. กระบอกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25.40 mm ยาว 250.00 mm
 4. กระบอกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 31.65 mm ยาว 250.00 mm
 5. กระบอกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 51.00 mm ยาว 250.00 mm
- สำหรับชุดต้นกำลังระบบไฮดรอลิกแสดงไว้ในรูป 2.2 ส่วนกระบอกอัดและแท่งอัดแสดงไว้ในรูป 2.3

รูป 2.2 ชุดทดสอบสำหรับอัดฝุ่นไม้



รูป 2.3 ครอบอัดและแท่งอัดที่ใช้ทดสอบอัดฝุ่นไม้

2.3 การทดลองเบื้องต้น

การทดลองนี้จะยึดค่าความหนาแน่นบัลค์เท่ากับ 200 kg/m^3 ที่ได้หาไว้ก่อนหน้า เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณหามวลของฝุ่นไม้สำหรับอัดในกระบอกอัดแต่ละขนาด โดยให้ฝุ่นไม้มีปริมาตรเริ่มต้นเท่ากับปริมาตรของกระบอกอัด ดังนั้นความยาวเริ่มต้นของฝุ่นไม้ในกระบอกจะเท่ากับความยาวของกระบอกอัด ค่าความยาวเริ่มต้นนี้มีความสำคัญในการใช้คำนวณหาระยะยุบตัวของฝุ่นไม้ในกระบอก ระยะยุบตัวจะถูกนำไปใช้หางานที่ใช้ในการอัดต่อไป จากข้อกำหนดเริ่มต้นดังกล่าวทำให้ทราบว่าต้องใช้ฝุ่นไม้จำนวน 102.14, 39.34, 25.33 และ 4.38 กรัม สำหรับกระบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51, 31.65, 25.4 และ 16 มิลลิเมตร ตามลำดับ

2.3.1 วิธีการทดลอง

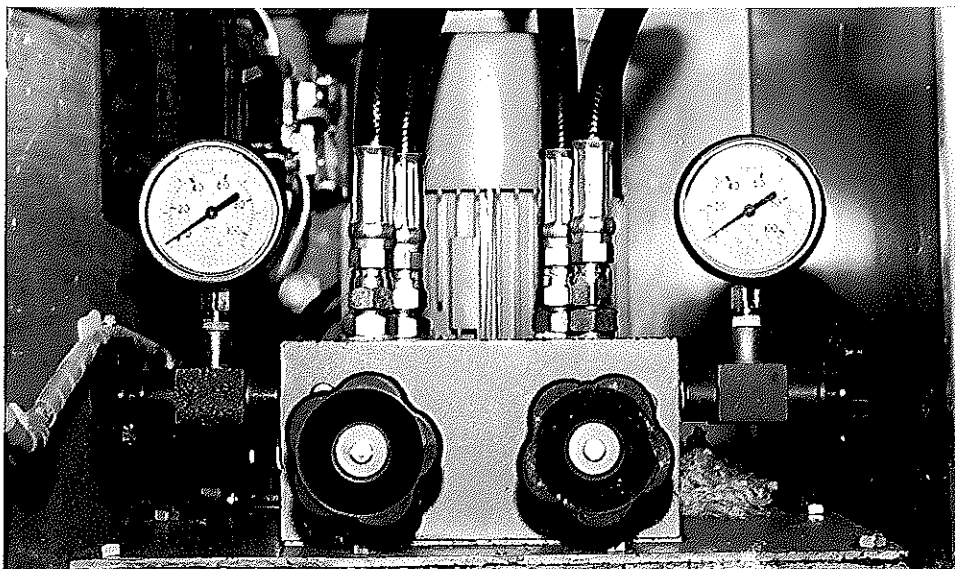
ทำการทดลอง 4 ชุด แต่ละชุดใช้กระบอกอัด 1 ขนาดแตกต่างกัน ชุดไฮดรอลิกที่ใช้ทดลองสามารถปรับความดันน้ำมันไฮดรอลิกได้ถึง 1,500 psi โดยใช้วาล์วปรับความดันและอ่านค่าความดันจากเกจวัดความดัน (ดูรูป 2.4) การทดลองชุดแรกใช้กระบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm ใช้ความดันน้ำมัน 15 ค่า เริ่มที่ 100 psi และเพิ่มความดันครั้งละ 100 psi จนถึงระดับความดัน 1,500 psi การทดลองชุดที่สองและสามใช้กระบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 31.65 และ 25.40 mm ตามลำดับ ใช้ความดันน้ำมัน 14 ค่า เริ่มที่ 200 psi และเพิ่มความดันครั้งละ 100 psi จนถึงระดับความดัน 1,500 psi การทดลองชุดที่สี่ใช้กระบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ใช้ความดันน้ำมัน 13 ค่า เริ่มที่ 200 psi และเพิ่มความดันครั้งละ 100 psi จนถึงระดับความดัน 1,400 psi ตามลำดับ ถือว่าไม่มีมวลฝุ่นสูญหายหรือหลุดร่วงขณะกรอกฝุ่นลงในกระบอกอัดและขณะอัด วิธีการทดลองแต่ละชุดมีดังนี้

1. ตั้งกระบอกอัดในแนวตั้งรองรับด้วยแผ่นเหล็กจากนั้นกรอกฝุ่นไม้ลงในกระบอกอัดตามปริมาณที่กำหนดแล้วจึงนำแท่งอัดสวมลงในกระบอกอัด จัดวางกระบอกอัดให้ตรงกับกระบอกไฮดรอลิก

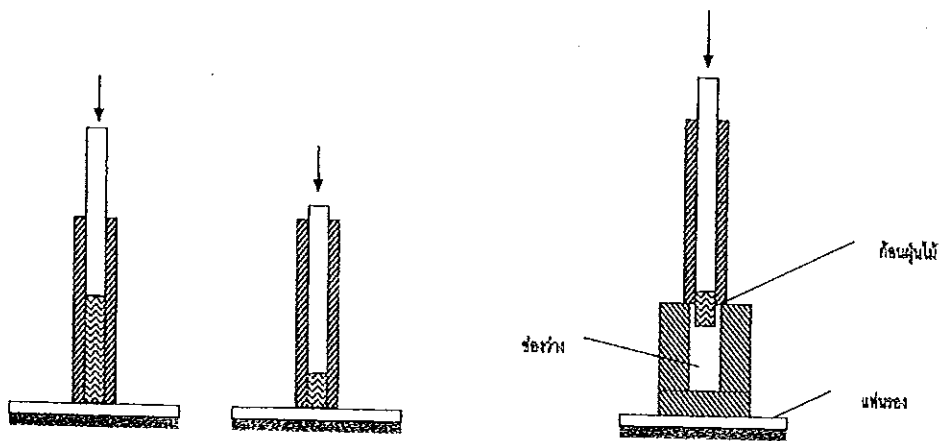
2. ใช้กระบอกไฮดรอลิกดันแท่งอัดในแนวตั้งเดียวกันกับกระบอกอัดที่ตั้งไว้ อัดจนสุดตามค่าความดันน้ำมันที่ตั้งไว้ (รูป 2.5 (ก))
5. วัดความยาวของแท่งอัดส่วนที่โผล่พ้นปากกระบอกอัดด้านบนเพื่อนำไปใช้ระยะยุบตัวของฟู่ไม้ขณะที่ยังอยู่ในกระบอกอัด
6. ถอนกระบอกไฮดรอลิกขึ้น (หุดก้านสูบ) แล้วรองกระบอกเหล็กด้วยตัวรองรับที่มีช่องว่างตรงกลาง จากนั้นดันแท่งฟู่ไม้ในกระบอกอัดออกทางด้านล่างโดยใช้กระบอกไฮดรอลิกตัวเดิม (รูป 2.5 (ข))
7. บันทึกขนาดแท่งฟู่ไม้
8. ปรับความดันน้ำมันค่าต่อไป แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-8

หมายเหตุการทดลอง:

- (1) ถือว่ามวลฟู่ไม้เริ่มต้นก่อนอัดและมวลแท่งฟู่ไม้หลังอัดมีค่าเท่ากัน ไม่มีมวลหลุดร่วงหายไปในการบวนการอัด
- (2) การวัดระยะยุบตัวของฟู่ไม้ในกระบอกอัดทำได้โดยการวัดระยะปลายแท่งอัดที่โผล่พ้นปากกระบอกอัดนำค่าที่ได้มารวมกับความยาวของกระบอกอัดนั้นแล้วลบด้วยความยาวทั้งหมดของแท่งอัด



รูป 2.4 วาล์วปรับความดันและเกจวัดความดันของชุดทดสอบ



(ก) การอัดฝุ่นในกระบอกอัด

(ข) การถอดแท่งฝุ่นออกจากกระบอกอัด

รูป 2.5 การอัดฝุ่นและถอดแท่งฝุ่นออกจากกระบอกอัด

2.3.2 ผลการทดลองและอภิปราย

เนื่องจากระบบไฮดรอลิกของชุดทดลองสามารถสร้างความดันน้ำมันสูงสุดได้เพียง 1,500 psi และหากในการทดลองอัดฝุ่นไม้ใช้กระบอกอัดเพียงขนาดเดียวจะทำให้ทราบความหนาแน่นของฝุ่นไม้และค่าความดันที่เกิดขึ้นในกระบอกอัดเพียงช่วงเดียวซึ่งอาจจะเป็นช่วงค่าต่ำ ๆ ถ้าใช้กระบอกอัดขนาดโต และอาจเป็นค่าสูงขึ้นมาหากใช้กระบอกอัดขนาดเล็ก การทดลองต้องการทราบพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของฝุ่นไม้เมื่อความดันในการอัดค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับใกล้เคียงขีดจำกัดความหนาแน่นสูงสุดของฝุ่นไม้ที่จะทำการอัดได้ ดังนั้นเพื่อให้ผลการทดลองครอบคลุมความต้องการดังกล่าวจึงต้องใช้กระบอกอัดหลายขนาด ผลการทดลองแสดงดังตาราง 2.1-2.4

ตาราง 2.1 ผลการอัดฝุ่นไม้โดยใช้กระบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm ยาว 250 mm

มวลฝุ่น (g)	ความดันน้ำมัน- ไฮดรอลิก		ความยาวฝุ่น ในกระบอก เมื่อถูกอัด (mm)	ปริมาตรฝุ่นใน กระบอกเมื่อถูก อัด (mm)	ความหนา แน่นฝุ่นใน กระบอก (kg/m ³)	ขนาดแท่งฝุ่น นอกกระบอก ($\varnothing \times L$, mm \times mm)	ความหนาแน่น แท่งฝุ่นนอก กระบอก (kg/m ³)	แรงอัดใน กระบอกอัด (N)	ความดันใน กระบอกอัด (MPa)	ระยะขยุบตัว ของฝุ่นใน กระบอก (mm)
	(psi)	(MPa)								
102.14	100	0.6895	108.5	221,646.0	460	52 \times 133	361	3,465.8	1.70	141.5
102.14	200	1.3790	90	183,853.8	555	52 \times 112	429	6,931.6	3.39	160
102.14	300	2.0684	80	163,425.6	624	52 \times 101	475	10,396.9	5.09	170
102.14	400	2.7579	75	153,211.5	666	52 \times 93	516	13,862.7	6.79	175
102.14	500	3.4474	71	145,040.2	703	52 \times 87	552	17,328.5	8.48	179
102.14	600	4.1368	67	136,868.9	745	52 \times 82	586	20,793.8	10.18	183
102.14	700	4.8263	65	132,783.3	768	52 \times 78	616	24,259.6	11.88	185
102.14	800	5.5158	63	128,697.7	793	52 \times 75	640	27,725.4	13.57	187
102.14	900	6.2053	61	124,612.0	818	52 \times 73	658	31,191.2	15.27	189
102.14	1,000	6.8948	60	122,569.2	832	52 \times 72	667	34,657.0	16.96	190
102.14	1,100	7.5842	59	120,526.4	846	52 \times 70.5	681	38,122.3	18.66	191
102.14	1,200	8.2737	57	116,440.7	876	52 \times 67	717	41,588.1	20.36	193
102.14	1,300	8.9632	56	114,397.9	892	52 \times 66	728	45,054.0	22.05	194
102.14	1,400	9.6527	54	110,312.3	925	52 \times 64	750	48,519.8	23.75	196
102.14	1,500	10.3421	53	108,269.5	942	52 \times 62	775	51,985.1	25.45	197

ตาราง 2.2 ผลการอัดฝุ่นไม้โดยใช้กระบอกลูกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 31.65 mm ยาว 250 mm

มวลฝุ่น (g)	ความดันน้ำมัน- ไฮดรอลิก		ความยาวฝุ่น ในกระบอกลูก เมื่อถูกอัด (mm)	ปริมาตรฝุ่นใน กระบอกลูกเมื่อถูก อัด (mm ³)	ความหนาแน่น ฝุ่นในกระบอกลูก (kg/m ³)	ขนาดแท่งฝุ่น นอกกระบอกลูก ($\varnothing \times L$, mm \times mm)	ความหนาแน่น แท่งฝุ่นนอก กระบอกลูก (kg/m ³)	แรงอัดใน กระบอกลูก (N)	ความดันใน กระบอกลูก (MPa)	ระยะชุกตัว ของฝุ่นใน กระบอกลูก (mm)
	(psi)	(MPa)								
39.34	200	1.3790	79	62,153.2	633	32 \times 105	466	6,931.6	8.81	171
39.34	300	2.0684	60.5	47,598.4	826	32 \times 76	644	10,396.9	13.21	189.5
39.34	400	2.7579	56	44,058.0	893	32 \times 69	709	13,862.7	17.62	194
39.34	500	3.4474	53	41,697.7	943	32 \times 65	752	17,328.5	22.02	197
39.34	600	4.1368	51	40,124.2	980	32 \times 62	789	20,793.8	26.43	199
39.34	700	4.8263	50	39,337.5	1,000	32 \times 59.5	822	24,259.6	30.83	200
39.34	800	5.5158	49	38,550.7	1,020	32 \times 59	829	27,725.4	35.24	201
39.34	900	6.2053	48.5	38,157.4	1,031	32 \times 58	843	31,191.2	39.65	201.5
39.34	1,000	6.8948	48	37,764.0	1,042	32 \times 57.5	851	34,657.0	44.05	202
39.34	1,100	7.5842	47.5	37,370.6	1,053	32 \times 57	858	38,122.3	48.45	202.5
39.34	1,200	8.2737	46	36,190.5	1,087	32 \times 54.5	897	41,588.1	52.86	204
39.34	1,300	8.9632	44.5	35,010.4	1,124	32 \times 53	923	45,054.0	57.27	205.5
39.34	1,400	9.6527	43.5	34,223.6	1,149	32 \times 52.5	932	48,519.8	61.67	206.5
39.34	1,500	10.3421	43	33,830.2	1,163	32 \times 52	941	51,985.1	66.08	207

ตาราง 2.3 ผลการอัดฝุ่นไม้โดยใช้กระบอกลัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ยาว 250 mm

มวลฝุ่น (g)	ความดันน้ำมัน- ไฮดรอลิก		ความยาวฝุ่นใน กระบอกลัด อัด (mm)	ปริมาตรฝุ่นใน กระบอกลัด อัด (mm ³)	ความหนาแน่น ฝุ่นในกระบอกลัด (kg/m ³)	ขนาดแท่งฝุ่น นอกกระบอกลัด ($\varnothing \times L$, mm \times mm)	ความหนาแน่น แท่งฝุ่นนอก กระบอกลัด (kg/m ³)	แรงอัดใน กระบอกลัด (N)	ความดันใน กระบอกลัด (MPa)	ระยะยุบตัว ของฝุ่นใน กระบอกลัด (mm)
	(psi)	(MPa)								
25.33	200	1.3790	67.5	34,202.9	740	26 \times 79.5	600	6,931.6	13.68	182.5
25.33	300	2.0684	58	29,389.2	862	26 \times 73.5	649	10,396.9	20.52	192
25.33	400	2.7579	53.5	27,109.0	934	26 \times 66	723	13,862.7	27.36	196.5
25.33	500	3.4474	49.5	25,082.1	1,010	26 \times 59.5	802	17,328.5	34.20	200.5
25.33	600	4.1368	48	24,322.1	1,041	26 \times 58	823	20,793.8	41.04	202
25.33	700	4.8263	46.5	23,562.1	1,075	26 \times 54.5	875	24,259.6	47.88	203.5
25.33	800	5.5158	45	22,802.0	1,111	26 \times 51.5	926	27,725.4	54.72	205
25.33	900	6.2053	44	22,295.2	1,136	26 \times 50.5	945	31,191.2	61.56	206
25.33	1,000	6.8948	41.5	21,028.5	1,205	26 \times 48.5	984	34,657.0	68.40	208.5
25.33	1,100	7.5842	40.5	20,521.7	1,234	26 \times 47.5	1,004	38,122.3	75.23	209.5
25.33	1,200	8.2737	40	20,268.4	1,250	26 \times 46	1,037	41,588.1	82.07	210
25.33	1,300	8.9632	39.5	20,015.0	1,266	26 \times 45.5	1,048	45,054.0	88.91	210.5
25.33	1,400	9.6527	38	19,255.0	1,315	26 \times 44	1,084	48,519.8	95.75	212
25.33	1,500	10.3421	37.5	19,001.6	1,333	26 \times 43.5	1,097	51,985.1	102.59	212.5

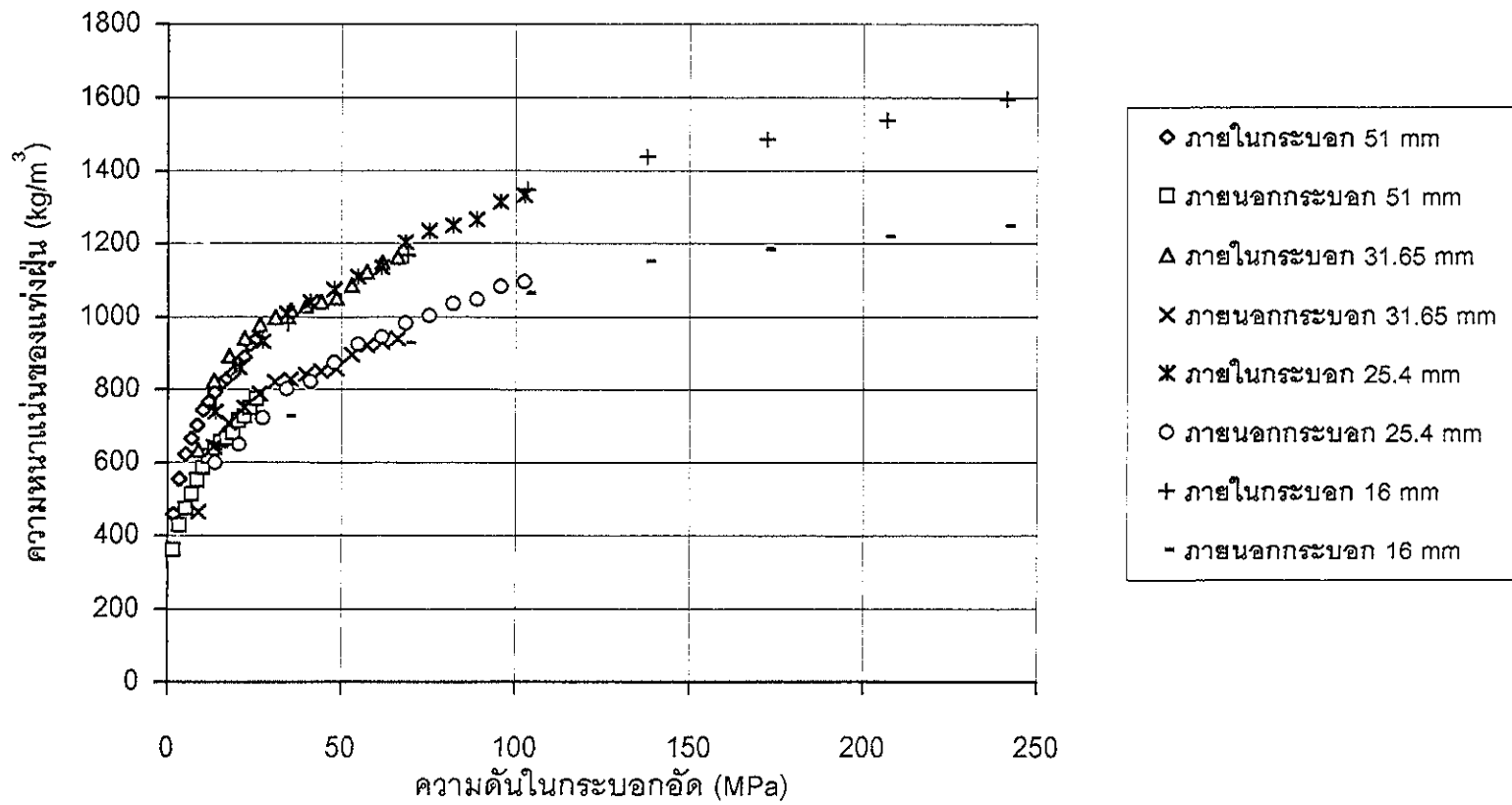
ตาราง 2.4 ผลการอัดฝุ่นไม้โดยใช้กระบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ยาว 109 mm

มวลฝุ่น (g)	ความดันน้ำมัน- ไฮดรอลิก		ความยาวฝุ่น ในกระบอก เมื่อถูกอัด (mm)	ปริมาตรฝุ่น ในกระบอก เมื่อถูกอัด (mm ³)	ความหนาแน่น ฝุ่นในกระบอก (kg/m ³)	ขนาดแท่งฝุ่น นอกกระบอก ($\varnothing \times L$, mm \times mm)	ความหนาแน่น แท่งฝุ่นนอก กระบอก (kg/m ³)	แรงอัดใน กระบอกอัด (N)	ความดันใน กระบอกอัด (MPa)	ระยะขยุบตัว ของฝุ่นใน กระบอก (mm)
	(psi)	(MPa)								
4.38	200	1.3790	22.15	4,453.48	983	17 \times 26.5	728	6,931.6	34.47	86.85
4.38	300	2.0684	20.65	4,151.89	1,055	16.6 \times 24	843	10,396.9	51.71	88.35
4.38	400	2.7579	18.65	3,749.77	1,168	16.7 \times 21.5	930	13,862.7	68.95	90.35
4.38	500	3.4474	17.65	3,548.71	1,234	16.6 \times 20.4	992	17,328.5	86.19	91.35
4.38	600	4.1368	16.15	3,247.12	1,349	16.6 \times 19	1,065	20,793.8	103.42	92.85
4.38	700	4.8263	15.65	3,146.59	1,392	16.4 \times 18.3	1,133	24,259.6	120.66	93.35
4.38	800	5.5158	15.65	3,146.59	1,392	16.4 \times 18	1,152	27,725.4	137.90	93.35
4.38	900	6.2053	15.45	3,106.38	1,410	16.4 \times 17.6	1,178	31,191.2	155.13	93.55
4.38	1,000	6.8948	15.15	3,046.10	1,438	16.4 \times 17.5	1,185	34,657.0	172.37	93.85
4.38	1,100	7.5842	14.15	2,845.00	1,540	16.4 \times 17	1,220	38,122.3	189.61	94.85
4.38	1,200	8.2737	14.15	2,845.00	1,540	16.4 \times 17	1,220	41,588.1	206.84	94.85
4.38	1,300	8.9632	13.85	2,784.68	1,573	16.4 \times 16.6	1,249	45,054.0	224.08	95.15
4.38	1,400	9.6527	13.65	2,744.47	1,596	16.4 \times 16.4	1,264	48,519.8	241.32	95.35

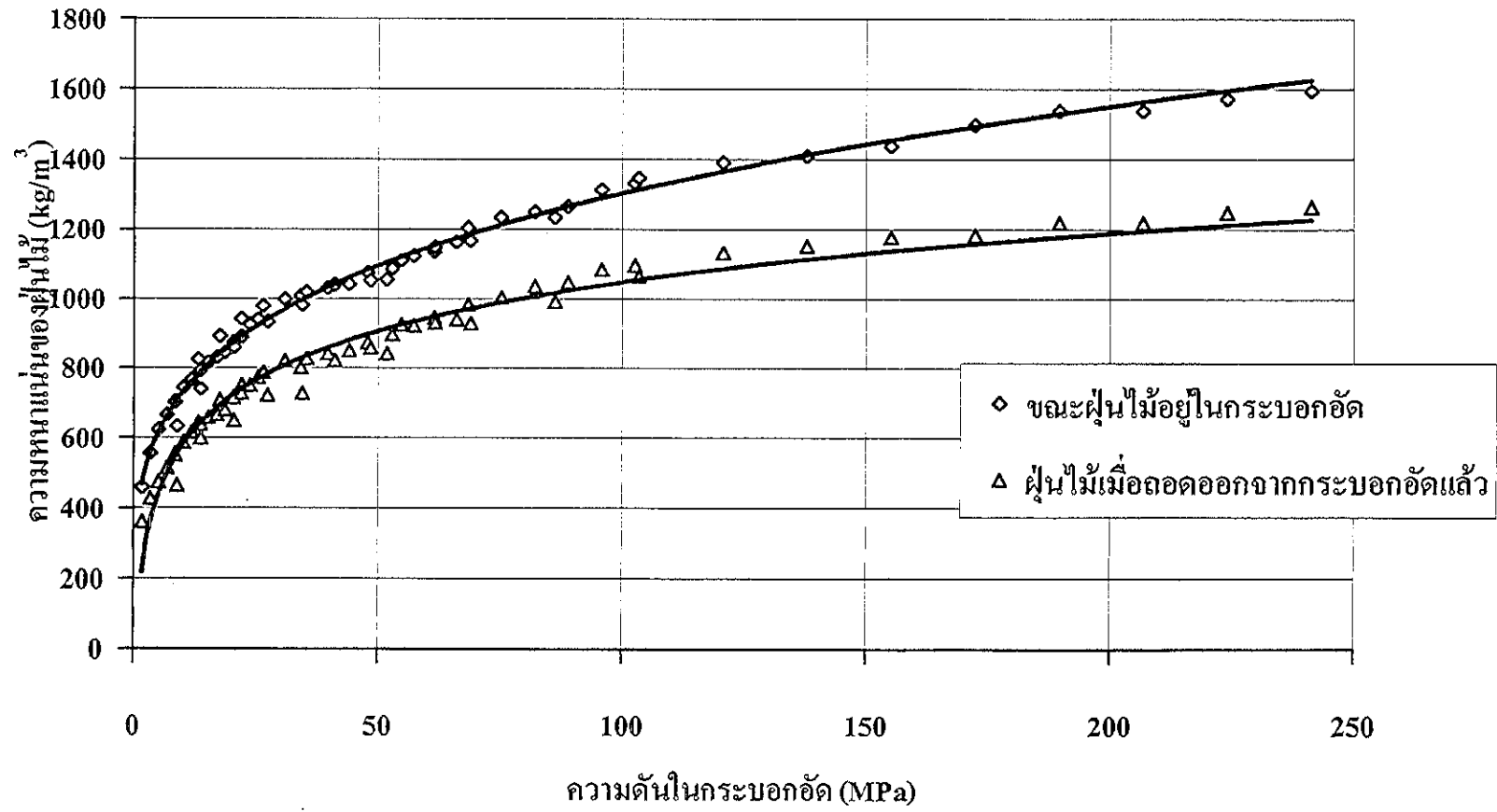
ข้อมูลผลการทดลองจากตาราง 2.1-2.4 เป็นผลจากการใช้กระบอกอัดที่มีขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด เมื่อนำค่าความดันและความหนาแน่นของทุกตารางมาเขียนในกราฟเดียวกันจะได้ดังรูป 2.6

รูป 2.6 แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าแรงอัดเท่ากันกระบอกอัดที่มีขนาดเล็กกว่าจะสร้างความดันอัดในกระบอกอัดได้สูงกว่าทำให้ฝุ่นไม้มีความหนาแน่นมากกว่า และพบว่าข้อมูลจากทุกกระบอกอัดมีความต่อเนื่องสอดคล้องกัน ทำให้สามารถหาค่าพหุคูณของฝุ่นไม้เมื่อถูกอัดด้วยความดันค่าต่าง ๆ ได้ รูป 2.6 สามารถเขียนเส้นกราฟได้ดังรูป 2.7

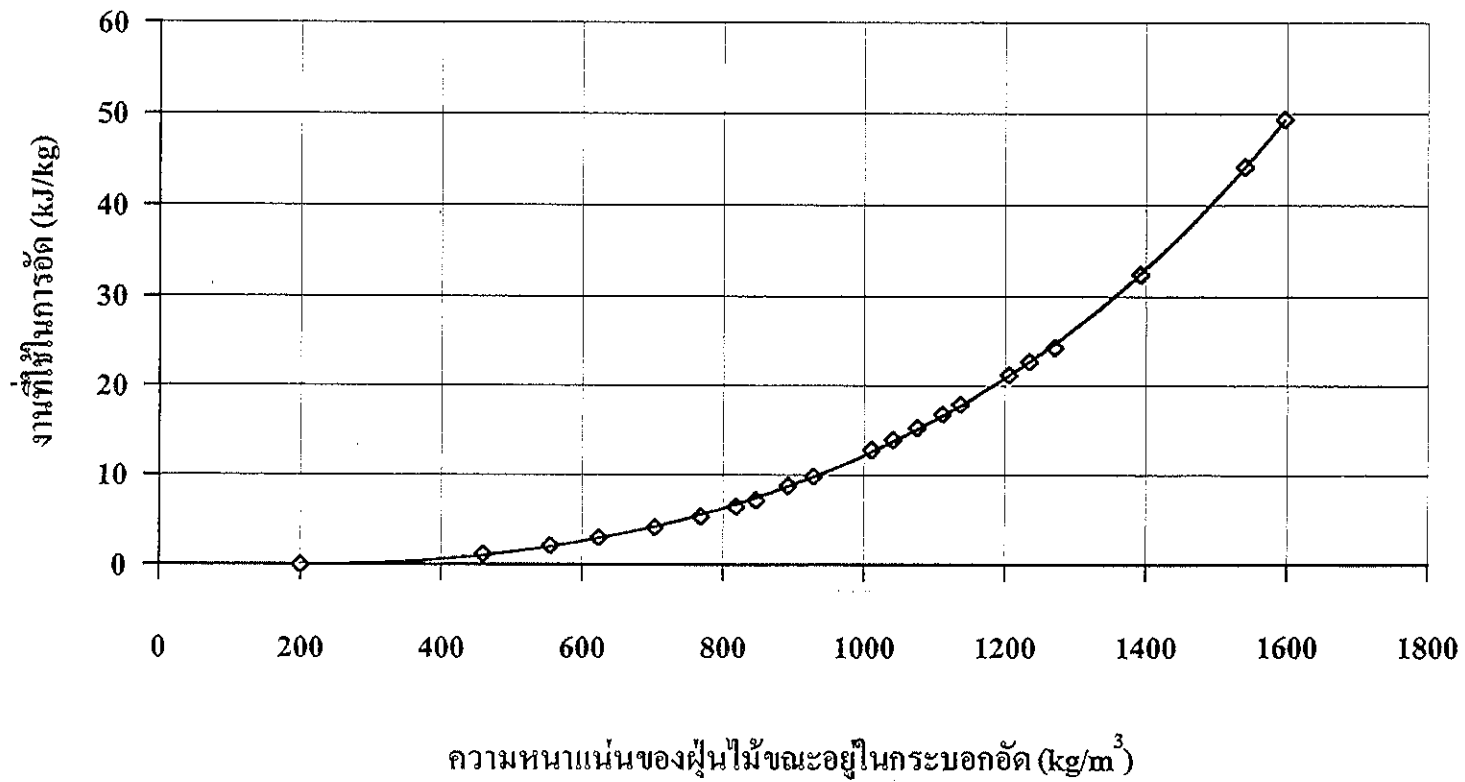
จากรูป 2.7 จะเห็นว่ามีเส้นกราฟ 2 เส้น กราฟเส้นบนแสดงความหนาแน่นของฝุ่นไม้ขณะถูกอัดอยู่ในกระบอกอัดที่ความดันใด ๆ ส่วนกราฟเส้นล่างเป็นความหนาแน่นของฝุ่นไม้แห้งเดิมที่ความดันนั้น ๆ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อถูกถอดออกจากกระบอกอัดแล้ว กราฟทั้งสองมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน ความดันที่เพิ่มเพียงเล็กน้อยในช่วงแรกจนถึงค่าประมาณ 100 MPa สามารถเพิ่มความหนาแน่นของฝุ่นไม้ได้มากสังเกตจากเส้นกราฟมีความชันมาก และหลังจากความดันประมาณ 100 MPa เป็นต้นไปความดันที่เพิ่มขึ้นอย่างมากแต่สามารถเพิ่มความหนาแน่นของฝุ่นไม้ได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ช่วงนี้เส้นกราฟมีความชันน้อยลงกว่าช่วงแรกมาก ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างเส้นกราฟทั้งสองสามารถเห็นได้ชัดเจน แสดงว่าฝุ่นไม้มีการขยายตัวเพิ่มปริมาตรหลังจากหลุดออกมาจากกระบอกอัด ดังนั้นการหาค่าความดันที่กระทำเพื่อให้ได้ฝุ่นไม้ที่มีความหนาแน่นใช้งานจริงจึงต้องดูที่กราฟเส้นล่าง แต่มีข้อสังเกตว่าในการคำนวณหางานที่ใช้ในการอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นตามกราฟเส้นล่างนั้นต้องดูที่กราฟเส้นบนซึ่งเป็นความหนาแน่นในกระบอกอัด ทั้งนี้เพราะฝุ่นถูกแรงกระทำและเกิดการยุบตัวลดปริมาตรขณะอยู่ในกระบอกอัดนั่นเอง ในการทดลองนี้ที่ความหนาแน่นค่าต่าง ๆ ได้บันทึกค่าแรงอัดที่กระทำและระยะยุบตัวของฝุ่นไม้ในกระบอกอัดไว้แล้ว จากค่าแรงอัดและระยะยุบตัวนี้เองทำให้สามารถคำนวณหางานที่ความหนาแน่นของแห้งฝุ่นค่านั้น ๆ ได้ (วิธีการคำนวณและผลการคำนวณได้จากหัวข้อ 2.4.4 และตาราง 2.8 ตามลำดับ) ผลการคำนวณนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่เกิดขึ้นกับงานที่ใช้อัดต่อหน่วยมวลของฝุ่นไม้ แสดงไว้ในรูป 2.8



รูป 2.6 ความหนาแน่นของฟืนไม้ที่ความดันอัดค่าต่าง ๆ



รูป 2.7 แนวโน้มความหนาแน่นของฟืนไม้เมื่อถูกอัดด้วยความดัน

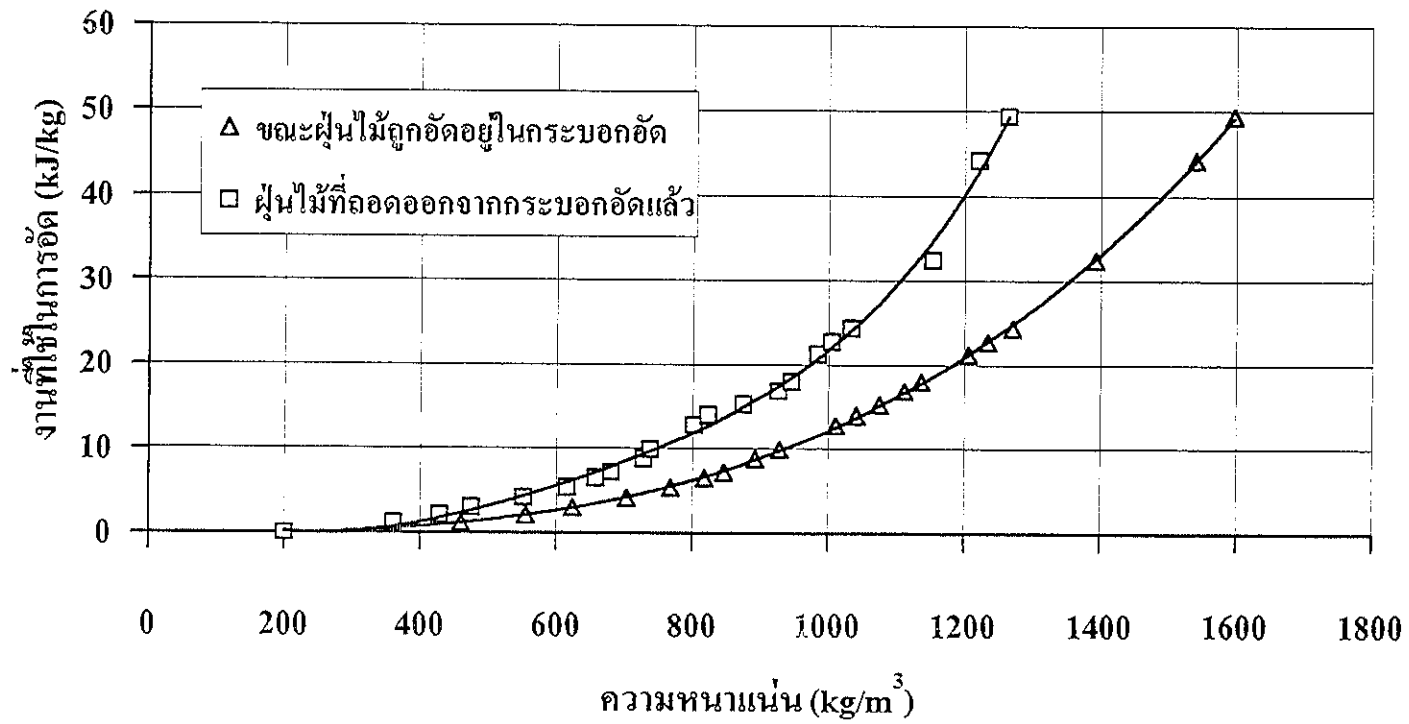


รูป 2.8 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของงานที่ใช้อัดฟืนไม้ที่ความหนาแน่นต่าง ๆ

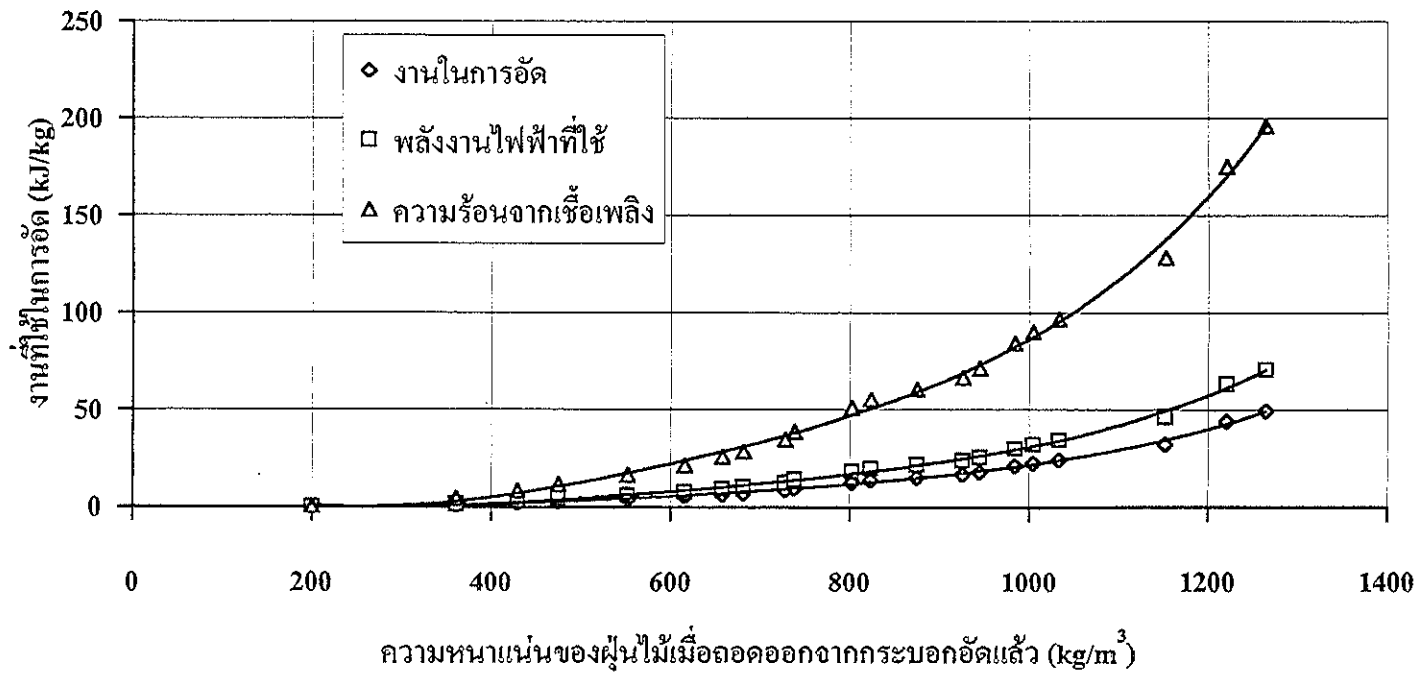
จากรูป 2.8 พบว่าจากความหนาแน่นเริ่มต้นก่อนการอัดซึ่งเป็นความหนาแน่นบัลค์ (bulk density) ซึ่งมีค่าประมาณ 200 kg/m^3 จนถึงความหนาแน่นเมื่อถูกอัด $1,200 \text{ kg/m}^3$ งานที่ใช้อัดเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึง 20 kJ/kg นั่นคือในการเพิ่มความหนาแน่นของฟ่อนไม้ 1 kg ขึ้นอีก $1,000 \text{ kg/m}^3$ ใช้งานเพียง 20 kJ และตั้งแต่ความหนาแน่น $1,200 \text{ kg/m}^3$ ไปจนถึงความหนาแน่นประมาณ $1,600 \text{ kg/m}^3$ งานที่ใช้อัดเพิ่มจาก 20 kJ/kg เป็นประมาณ 50 kJ/kg นั่นคือในการเพิ่มความหนาแน่นของฟ่อนไม้ 1 kg ขึ้นอีกเพียง 400 kg/m^3 ต้องใช้ งานถึง 30 kJ เส้นกราฟเริ่มชันขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ความหนาแน่น $1,200 \text{ kg/m}^3$ เป็นต้น ไป แสดงว่าต้องใช้งานในการอัดมากเพื่อเพิ่มความหนาแน่นขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย

ที่ผ่านมากล่าวถึงงานที่ใช้อัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นของฟ่อน ไม้ขณะอยู่ใน ครอบอัด แต่จากข้อเท็จจริงพบว่าฟ่อน ไม้มีการขยายตัวหลังจากถอดออกจาก ครอบอัดแล้วซึ่งความหนาแน่นจะลดลง ความหนาแน่นของแท่งฟ่อนหลังจากถอดออก จากครอบอัดนี้คือความหนาแน่นที่จะนำไปใช้งานจริง แต่ค่างานที่ใช้อัดคืองานเดียวกับที่ความหนาแน่นขณะอยู่ในครอบอัดนั่นเอง นั่นคือสามารถอธิบายได้อีกทางหนึ่ง ว่าต้องใช้งานมากกว่าเดิม (มากกว่าขณะอยู่ในครอบอัด) ในการอัดฟ่อน ไม้ให้ได้ความ หนาแน่นเพื่อนำไปใช้งาน จากคำอธิบายนี้สามารถทำความเข้าใจได้เมื่อดูรูป 2.9

เนื่องจากงานที่ใช้อัดฟ่อน ไม้มาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใส่ให้กับระบบไฮดรอลิก และ พลังงานไฟฟ้าได้จากความร้อนในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้น จากค่าพลังงานในการอัดที่ได้สามารถคำนวณย้อนกลับไปหาพลังงานไฟฟ้าและพลัง งานความร้อนเริ่มต้นจริงจากเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ (วิธีการคำนวณและผล การคำนวณดูได้จากหัวข้อ 2.4.4 และตาราง 2.9 ตามลำดับ) ผลการคำนวณนำมาเขียน กราฟได้ดังรูป 2.10



รูป 2.9 ความหนาแน่นของแท่งฝุ่นเปรียบเทียบกับงานที่ใช้อัด

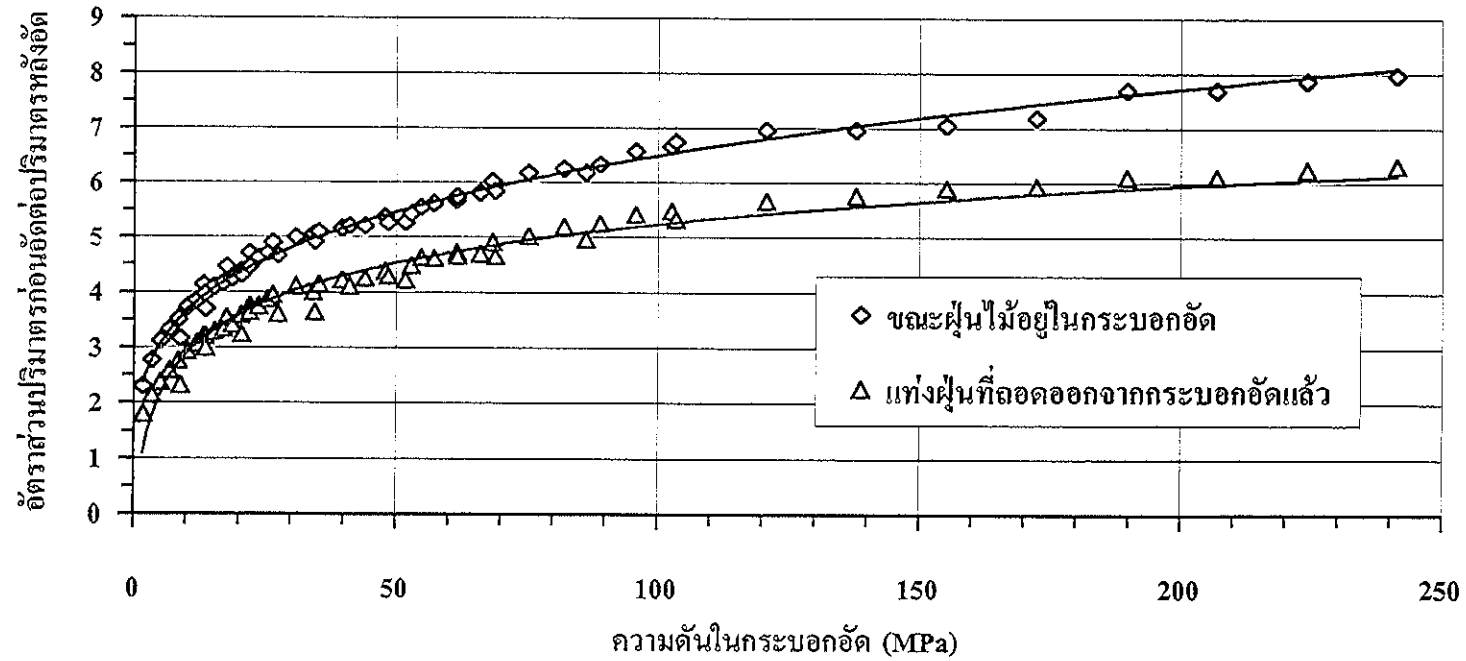


รูป 2.10 เปรียบเทียบพลังงานต่าง ๆ ในการอัดฟ่อนไม้

จากรูป 2.10 ทำให้ทราบว่าค่าพลังงานที่ใช้จริงในการอัดฝุ่นคือค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงนั่นเอง ฝุ่นไม้ที่มีความหนาแน่น $1,000 \text{ kg/m}^3$ ต้องใช้ความร้อนจากเชื้อเพลิงประมาณ 87 kJ/kg หรือ 0.087 MJ/kg เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าแล้วนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้กับเครื่องอัดฝุ่น ในขณะที่ค่าความร้อนสูงของฝุ่นไม้มีค่า 16.8 MJ/kg ซึ่งมากกว่าค่าความร้อนที่ใช้อัดถึง 193 เท่า ผลที่ได้นี้เป็นตัวชี้ได้อย่างหนึ่งว่าการอัดฝุ่นไม้มีความคุ้มค่าที่จะทำ

สำหรับการพิจารณาในแง่การยุบตัวของปริมาตรฝุ่นไม้ภายใต้ความดันอัด อาศัยข้อมูลผลการทดลองจากตาราง 2.1-2.4 คือค่าปริมาตรเริ่มต้น, ปริมาตรขณะถูกอัดอยู่ในกระบอกอัด, และปริมาตรเมื่อถอดออกจากกระบอกอัดแล้วมาหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรฝุ่นไม้ก่อนอัดต่อปริมาตรฝุ่นไม้ขณะถูกอัดและหลังอัด นำผลที่ได้มาเขียนกราฟได้ดังในรูป 2.11

จากรูป 2.11 กราฟเส้นบนเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรฝุ่นไม้ก่อนอัดกับปริมาตรฝุ่นไม้ที่ถูกอัดอยู่ในกระบอกอัด ซึ่งการทดลองนี้สามารถลดปริมาตรฝุ่นไม้ลงได้สูงสุดเหลือ 1 ใน 8 ของปริมาตรเริ่มต้น โดยใช้ความดันประมาณ 240 MPa แต่เมื่อถอดออกจากกระบอกอัดแล้วปริมาตรที่ลดลงจริงจะเหลือเพียง 1 ใน 6 ของปริมาตรเริ่มต้นโดยดูได้จากกราฟเส้นล่าง ซึ่งแสดงถึงปริมาตรที่ลดได้จริงหลังจากถอดแท่งฝุ่นออกจากกระบอกอัดแล้วซึ่งแท่งฝุ่นจะขยายตัว ปริมาตรจึงมากกว่าขณะอยู่ในกระบอกอัด ดังนั้นอัตราส่วนปริมาตรที่ได้จึงน้อยกว่าขณะอยู่ในกระบอกอัด เฉลี่ยแล้วจะน้อยกว่าประมาณ 20%



รูป 2.11 อัตราส่วนการยุบตัวของฝุ่นไม้เปรียบเทียบกับความดันที่กระทำ

2.4 ตัวอย่างการคำนวณ

2.4.1 การคำนวณหามวลของฝุ่นไม้เพื่อใช้ทดลองอัดสำหรับกระบอกอัดแต่ละขนาด
มวลของฝุ่นไม้หาได้จากสมการ

$$m = \rho \times V \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นบัลค์ของฝุ่นไม้หรือความหนาแน่นของแท่งฝุ่น, (kg/m^3)

m = มวลของฝุ่นไม้ในกระบอกอัดหรือมวลของแท่งฝุ่น, (kg)

V = ปริมาตรของฝุ่นไม้หรือปริมาตรของแท่งฝุ่นไม้, (m^3)

ตัวอย่าง กรณีกระบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 51 mm ยาว 250 mm หา
ปริมาตรภายในได้เท่ากับ $510,705.16 \text{ mm}^3$ กำหนดให้ใส่ฝุ่นไม้เต็มกระบอกจะได้
ปริมาตรของฝุ่นไม้เท่ากับปริมาตรของกระบอกอัด ฝุ่นไม้มีความหนาแน่นบัลค์
 $200 \text{ kg}/\text{m}^3$ ใช้สมการ 2.1 หามวลของฝุ่นไม้ได้ดังนี้

$$m = 200 \times 510,705.16 \times 10^{-9} = 0.10214 \text{ kg} = 102.14 \text{ g}$$

2.4.2 การคำนวณหาแรงอัดที่กระทำกับฝุ่นไม้ในกระบอกอัด

แรงอัดที่กระทำเกิดจากการกระทำของกระบอกไฮดรอลิกสามารถหาได้จากสมการ

$$F = P_1 \times A_1 \quad (2.2)$$

โดยที่ P_1 = ความดันน้ำมันในระบบไฮดรอลิก, (Pa)

A_1 = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก, (m^2)

F = แรงอัดที่ก้านสูบ (rod) กระทำต่อฝุ่นไม้ในกระบอกอัด, (N)

ตัวอย่าง ครอบอกไฮดรอลิกที่ใช้ทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 mm น้ำมันไฮดรอลิกมีความดัน 100 psi จะได้

$$P_1 = 100 \text{ psi} = 0.6895 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4}(0.08)^2 = 5.0265 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

ดังนั้นจากสมการ 2.2 จะได้

$$F = 0.6895 \times 10^6 \times 5.0265 \times 10^{-3} = 3,465.8 \text{ N}$$

2.4.3 การคำนวณหาความดันปรากฏในฟืนไม้ในครอบอกอัด

ความดันปรากฏในฟืนไม้ที่อยู่ในครอบอกอัดหาได้จากสมการ

$$P_2 = \frac{F}{A_2} \quad (2.3)$$

โดยที่ P_2 = ความดันปรากฏในฟืนไม้ในครอบอกอัด, (Pa)

A_2 = ขนาดพื้นที่หน้าตัดภายในของครอบอกอัด, (m^2)

F = แรงอัดที่ก้านสูบ (rod) กระทำต่อฟืนไม้ในครอบอกอัด, (N)

ตัวอย่าง สำหรับฟืนไม้ในครอบอกอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm รับแรงอัดขนาด 3,465.8 N จะได้

$$A_2 = \frac{\pi}{4}(51 \times 10^{-3})^2 = 2.04282 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$F = 3,465.8 \text{ N}$$

ดังนั้นจากสมการ 2.3 จะได้

$$P_2 = \frac{3,465.8}{2.04282 \times 10^{-3}} = 1.70 \times 10^6 \text{ Pa}$$

2.4.4 การคำนวณหาความหนาแน่นของแท่งฝุ่น

ตัวอย่าง กรณีกระบอกอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm ใช้ฝุ่น 102.14 g อัดด้วยความดัน 1.70 MPa ทำให้ฝุ่นไม้ในกระบอกอัดยุบตัวเหลือปริมาตรเพียง 221,646 mm³ จะได้

$$m = 102.14 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$V = 221,646 \times 10^{-9} \text{ m}^3$$

ดังนั้นจากสมการ 2.1 จะได้

$$\rho = \frac{102.14 \times 10^{-3}}{221,646 \times 10^{-9}} = 460 \text{ kg/m}^3$$

2.4.5 การคำนวณหาพลังงานที่ใช้อัด

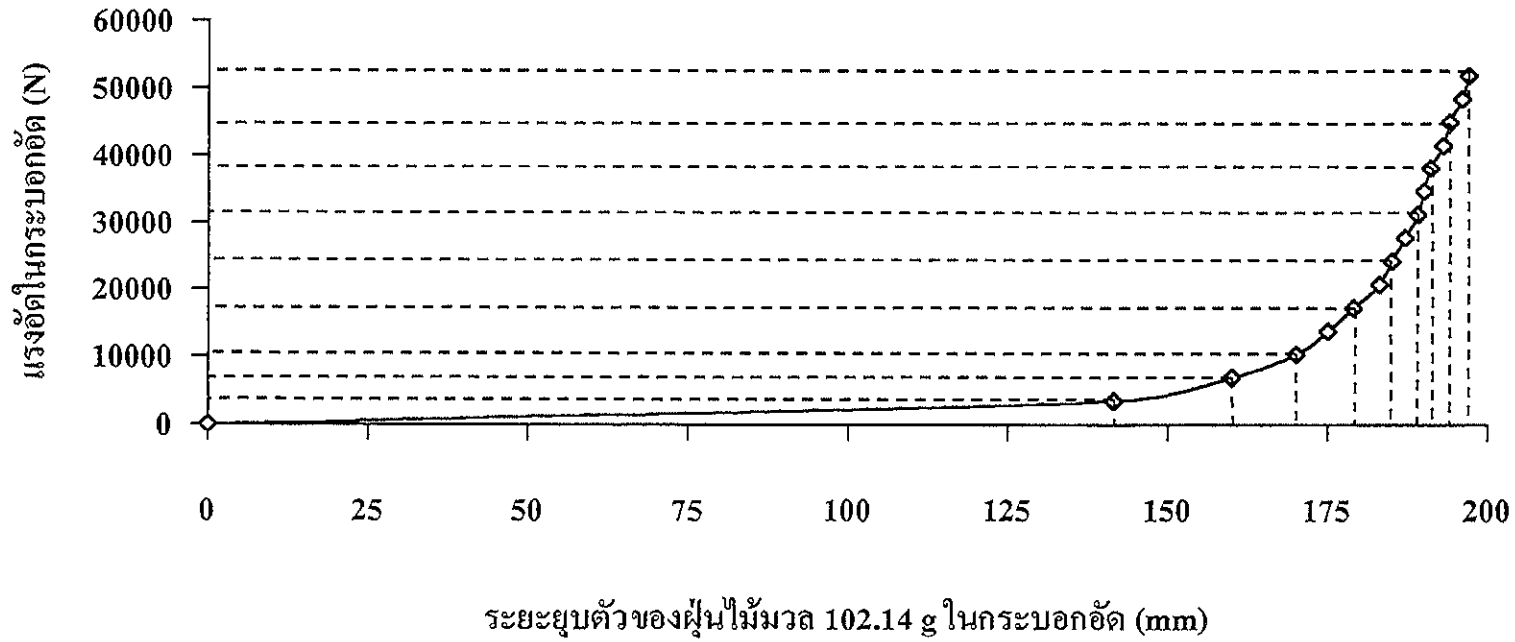
พลังงานรวมที่ใช้ในการอัดมาจาก 3 สาเหตุรวมกันคือ

1. พลังงานที่สูญเสียในระบบเครื่องจักรเช่น ชิ้นส่วนที่เคลื่อน ไหว และระบบส่งถ่ายกำลัง
2. พลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานระหว่างอนุภาคของวัสดุคิบนขณะถูกอัด
3. พลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานระหว่างวัสดุคิบบกับผนังของกระบอกอัดและแม่พิมพ์

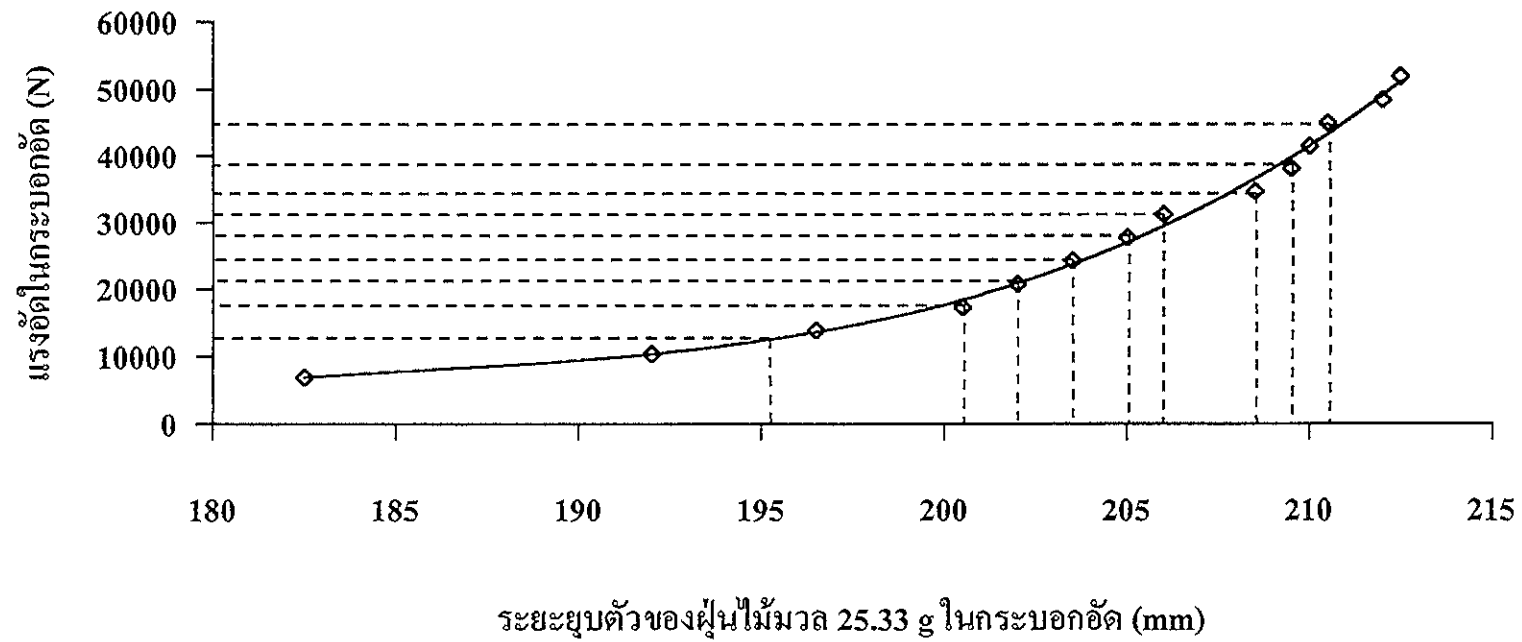
พลังงานสูญเสียในระบบเครื่องจักรขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องจักร การหล่อลื่น โครงสร้าง และประสิทธิภาพในการส่งถ่ายกำลัง ในขณะที่พลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานระหว่างอนุภาคของวัสดุคิบบด้วยกันเองขณะอัดตัวถือว่ามีค่าคงที่ถ้าหากเป็นวัสดุชนิดเดียวกันและความหนาแน่นสุดท้ายของการอัดมีค่าเท่ากัน และถือว่าไม่แตกต่างกันมากนักแม้จะเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ส่วนพลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานระหว่างวัสดุคิบบกับผนังกระบอกอัดและผนังแม่พิมพ์นั้นถือว่าการสูญเสียหลักกระบอกอัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าจะสูญเสียพลังงานต่อหน่วยน้อยกว่าทั้งนี้เพราะพื้นผิวสัมผัสภายในของกระบอกอัดเพิ่มในอัตราที่น้อยกว่าการเพิ่มของปริมาตรกระบอกอัดนั่นเอง (Eriksson and Prior, 1990)

ในการทดลองนี้ไม่คิดแรงเสียดทานเนื่องจากการส่งถ่ายกำลังระหว่างก้านสูบไฮดรอลิกกับแท่งอัดฝุ่นเพราะถือว่าการส่งถ่ายกำลังกันโดยตรง ดังนั้นแรงอัดจากกระบอกไฮดรอลิกที่กระทำต่อฝุ่นไม้ในกระบอกอัดต้องเอาชนะแรงสองอย่างคือแรงเสียดทานระหว่างฝุ่นไม้กับผนังกระบอกอัดและแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของฝุ่นไม้ด้วยกันเอง งานที่ก้านสูบไฮดรอลิกกระทำก็คืองานที่สูญเสียไปเนื่องจากความเสียดทานระหว่างฝุ่นไม้กับผนังกระบอกอัดและงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความเสียดทานระหว่างอนุภาควัตถุคิด้วยกันเองนั่นเอง

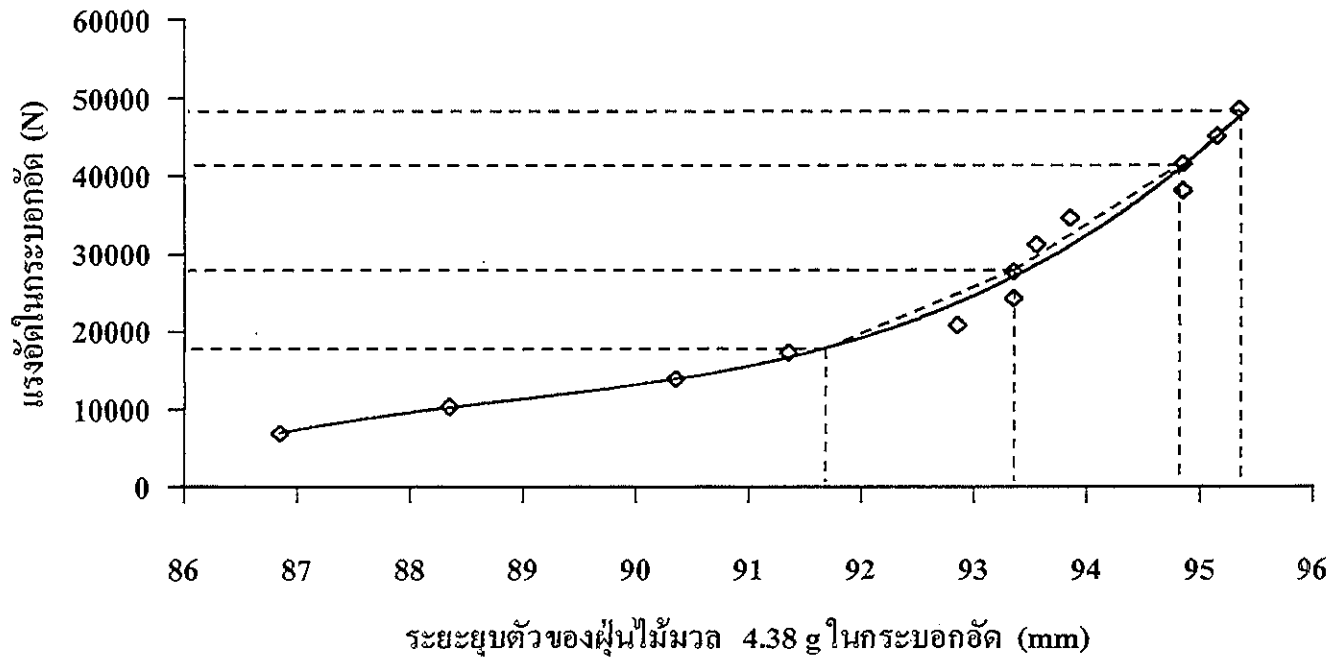
ในการคำนวณหางานที่ใช้อัดฝุ่นที่ความหนาแน่นต่าง ๆ จะใช้ค่าแรงอัดและระยะยวบตัวของฝุ่นไม้ในกระบอกอัดจากผลการทดลองทั้ง 4 ชุดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะยวบตัว พื้นที่ใต้กราฟก็คืองาน แต่เนื่องจากการทดลองนี้ใช้กระบอกอัดถึง 4 ขนาดเพื่อให้ได้ฝุ่นไม้ที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กันตั้งแต่ความหนาแน่นน้อยไปจนถึงความหนาแน่นมาก แต่ละกระบอกอัดจะใช้ฝุ่นมวลไม่เท่ากัน จึงต้องแยกเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวออกเป็น 4 กรณีสตามขนาดของกระบอกอัด แล้วหาค่างานต่อหน่วยมวลของแต่ละกรณีโดยแบ่งเป็นช่วงความหนาแน่นตามความเหมาะสมเมื่อต้องการหางานที่ความหนาแน่นใด ๆ ก็นำค่างานตั้งแต่ต้นมารวมกับงานช่วงที่ติดกันไปเรื่อย ๆ จนถึงความหนาแน่นนั้นก็จะได้งานทั้งหมดที่ใช้อัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นดังกล่าวออกมา จากรูป 2.6 จะเห็นว่ากระบอกอัดแต่ละขนาดมีส่วนของความหนาแน่นที่ซ้อนทับกันอยู่ ในการประมาณงานในที่นี้จะใช้ข้อมูลจากกระบอกอัดขนาด 51 mm ในช่วงความหนาแน่นตั้งแต่เริ่มต้น 200 kg/m³ จนถึงความหนาแน่น 928 kg/m³ จากนั้นใช้ข้อมูลจากกระบอกอัดขนาด 25.4 mm ตั้งแต่ความหนาแน่น 928 kg/m³ จนถึงความหนาแน่น 1,270 kg/m³ และสุดท้ายต่อด้วยข้อมูลจากกระบอกอัดขนาด 16 mm ตั้งแต่ช่วงความหนาแน่น 1,270 kg/m³ จนถึงความหนาแน่น 1,596 kg/m³ ความหนาแน่นที่กล่าวถึงนี้เป็นความหนาแน่นในกระบอกอัด กราฟที่ได้และการแบ่งช่วงเพื่อคำนวณหางานแสดงในรูป 2.12-2.14 ซึ่งจากกราฟรูป 2.12, 2.13 และ 2.14 สามารถหางานแต่ละช่วงได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ผลการคำนวณของแต่ละกราฟแสดงในตาราง 2.5, 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ และจากตาราง 2.5-2.7 สามารถหางานที่ความหนาแน่นต่าง ๆ ได้ ดังแสดงในตาราง 2.8



รูป 2.12 แรงอัดและระยะยวบตัวของฝู้นไม้ในกระบอกอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm



รูป 2.13 แรงอัดและระยะยุบตัวของฟ่อนไม้ในกระบอกอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm



รูป 2.14 แรงอัดและระยะขยุบตัวของฟ่อนไม้ในกระบอกลัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm

ตาราง 2.5 งานในการอัดในแต่ละช่วง กรณีใช้กระบอกอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm

ช่วงความหนาแน่นใน กระบอกอัด (kg/m ³)	งานแต่ละช่วง (J/มวล 102.14 g)	งานต่อหน่วยมวล (kJ/kg)
0-460	122.57	1.20
460-555	96.17	0.94
555-624	86.64	0.85
624-703	124.76	1.22
703-768	124.76	1.22
768-818	110.90	1.09
818-846	69.31	0.68
846-892	124.76	1.22
892-928	145.56	1.43

ตาราง 2.6 งานในการอัดในแต่ละช่วง กรณีใช้กระบอกอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm

ช่วงความหนาแน่นใน กระบอกอัด (kg/m ³)	งานแต่ละช่วง (J/มวล 25.33 g)	งานต่อหน่วยมวล (kJ/kg)
928-1,010	75.56	2.98
1,010-1,041	28.59	1.13
1,041-1,075	33.79	1.33
1,075-1,111	38.99	1.54
1,111-1,136	29.46	1.16
1,136-1,205	82.31	3.25
1,205-1,234	36.39	1.44
1,234-1,270	41.59	1.64

ตาราง 2.7 งานในการอัดในแต่ละช่วง กรณีใช้กระบอกอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm

ช่วงความหนาแน่นกระบอกอัด (kg/m ³)	งานแต่ละช่วง (J/มวล 25.33 g)	งานต่อหน่วยมวล (kJ/kg)
1,270-1,392	35.34	8.07
1,392-1,540	51.99	11.87
1,540-1,596	22.53	5.14

ตาราง 2.8 งานในการอัดที่ได้จากการคำนวณพื้นที่ได้กราฟรูป 2.5-2.7

ความหนาแน่นในกระบอกอัด (kg/m ³)	งาน (kJ/kg)
200	0
460	1.20
555	2.14
624	2.99
703	4.21
768	5.43
818	6.52
846	7.20
892	8.42
928	9.85
1,010	12.83
1,041	13.96
1,075	15.29
1,111	16.83
1,136	17.99
1,205	21.24
1,234	22.68
1,270	24.32
1,392	32.39
1,540	44.26
1,596	49.40

ระบบไฮดรอลิกมีประสิทธิภาพโดยรวมทั้งระบบ (overall efficiency of hydraulic system, $\eta_{o(\text{system})}$) ประมาณ 70 % (Norvelle, 1995) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta_{o(\text{system})} = \text{HP}_{\text{OUT}}/\text{HP}_{\text{IN}} \quad (2.4)$$

โดยที่ HP_{OUT} = กำลังงานกลที่ได้จากตัวทำงาน (actuators) เช่น กระบอกไฮดรอลิก หรือ มอเตอร์ไฮดรอลิก

HP_{IN} = กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบไฮดรอลิก

สมการ 2.4 สามารถใช้คำนวณย้อนกลับหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อัดฝุ่นไม่ได้ดังนี้

$$\eta_{o(\text{system})} = W/I \quad (2.5)$$

$$I = W/\eta_{o(\text{system})} \quad (2.6)$$

โดยที่ I = กำลังงานหรือพลังงานไฟฟ้าที่ใส่ให้ระบบไฮดรอลิก

W = กำลังงานหรืองานที่ใช้อัดฝุ่นไม้โดยคำนวณจากพื้นที่ได้กราฟและแสดงผลอยู่ในตาราง 2.8 (ให้การส่งถ่ายกำลังระหว่างก้านสูบไฮดรอลิกกับแท่งอัดฝุ่นมีประสิทธิภาพ 100%)

จากสมการ 2.6 จะได้

$$I = W/0.7 = 1.429W \quad (2.7)$$

โรงจักรผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพประมาณ 40% (Weisman and Eckart, 1985) ระบบสายส่งมีประสิทธิภาพประมาณ 90% ดังนั้นประสิทธิภาพโดยรวมในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและส่งไปตามสายส่งจะมีค่าประมาณ 36% ค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงหาจากสมการ

$$\eta_i = I/Q \quad (2.8)$$

โดยที่ η_i = ประสิทธิภาพโดยรวมในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของโรงจักรผลิตไฟฟ้าและส่งพลังงานไฟฟ้าไปตามสายส่ง

I = พลังงานไฟฟ้าที่ได้ให้ระบบไฮดรอลิก

Q = พลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า

จากสมการ 2.7 และ 2.8 จะได้

$$Q = I/\eta_i \quad (2.9)$$

$$Q = I/0.36 = (W/0.7)/0.36 = 3.968W \quad (2.10)$$

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนระบบไฮดรอลิกที่คำนวณได้จากสมการ 2.7 และค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการ 2.10 แสดงไว้ในตาราง 2.9

ตาราง 2.9 พลังงานในการอัดฝุ่นไม้

ในกระบอกอัด	ความหนาแน่นของแท่งฝุ่น (kg/m ³)		งานกระทำโดย แท่งอัด (kJ/kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kJ/kg)	ความร้อนจากเชื้อ เพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้า (kJ/kg)
	ถอดออกจาก กระบอกอัดแล้ว				
200	200		0	0	0
460	361		1.20	1.71	4.76
555	429		2.14	3.06	8.49
624	475		2.99	4.27	11.86
703	552		4.21	6.02	16.70
768	616		5.43	7.76	21.55
818	658		6.52	9.32	25.87
846	681		7.20	10.29	28.57
892	728		8.42	12.60	35.00
928	738		9.85	14.07	39.08
1,010	802		12.83	18.33	50.91
1,041	823		13.96	19.95	55.39
1,075	875		15.29	21.85	60.67
1,111	926		16.83	24.05	66.78
1,136	945		17.99	25.71	71.38
1,205	984		21.24	30.35	84.28
1,234	1004		22.68	32.41	89.99
1,270	1033		24.32	34.75	96.50
1,392	1152		32.39	46.29	128.52
1,540	1220		44.26	63.25	175.62
1,596	1264		49.40	70.59	196.02

2.5 การทดสอบแท่งเชื้อเพลิงฟืนไม้

คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงแข็งที่ต้องการเป็นอันดับแรกคือการติดไฟดีหรือมีคุณสมบัติในการเผาไหม้ที่ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาว่าช่วงความหนาแน่นโคของเชื้อเพลิงแข็งจากฟืนไม้ที่ติดไฟดี และช่วงความหนาแน่นดังกล่าวจะคงรูปร่างเป็นของแข็งได้นานหรือไม่ ซึ่งหมายถึงเชื้อเพลิงแข็งต้องมีความแน่นพอ, ทนการกระแทก และทนต่อความชื้นได้ดีในระดับหนึ่งนั่นเอง

2.5.1 การทดสอบคุณสมบัติการเผาไหม้

โดยทั่วไปแล้วชีวมวลเกือบทุกชนิดสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำได้ ถ้ามีการกำจัดความชื้นออกไปและใช้เผาในเตาที่ออกแบบเหมาะสม ชีวมวลดังกล่าวเช่น แกลบข้าว, เปลือกถั่ว, เม็คนุ่น, เศษไม้, ชีบกบ, ชี้อ้อย, ขยะ ฯลฯ จุดมุ่งหมายหลักของการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้คือการกำจัดของเหลือทิ้งซึ่งส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตทางการเกษตร ส่วนพลังงานความร้อนที่ได้ถือเป็นจุดมุ่งหมายรองลงมา การใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อเชื้อเพลิงคุณภาพดี เช่น น้ำมัน อีกด้วย สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้คือค่าขนส่ง ดังนั้นควรจะใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวกับเตาหม้อไอน้ำที่อยู่ในแหล่งของเชื้อเพลิงเหล่านี้เท่านั้น แนวคิดนี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการนำแท่งเชื้อเพลิงฟืนไม้ที่อัดได้กลับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำในโรงงานเดิมได้ จากการค้นคว้าพบว่ามีข้อมูลไม่มากนักเกี่ยวกับคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม หรือในเตาเผาชนิดต่าง ๆ แต่โดยทั่วไปพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถใช้แทนไม้ฟืนได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ทำจากเศษวัสดุจากพวกไม้ แต่สำหรับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีเปอร์เซ็นต์เถ้าสูง เช่น แกลบอัดแท่ง จะใช้แทนฟืนได้ไม่ดีนัก

ปกติแล้วหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่ใช้เชื้อเพลิงแข็งสามารถเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งได้โดยสะดวก ข้อดีที่เห็นเด่นชัดคือสามารถป้อนเชื้อเพลิงอัดแท่งเข้าสู่อุปกรณ์เผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งส่วนใหญ่ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะดีขึ้นกว่าการใช้ชีวมวล

ที่ไม่ได้อัดแท่ง วิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจำพวก เศษไม้, เปลือกไม้ และขี้กบ ในหม้อไอน้ำจะเผาบนตะแกรงที่อยู่กับที่, ตะแกรงเขย่า หรือ บนตะแกรงเอียง ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงอัดแท่งเช่นเดียวกัน

ที่กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อนี้ชี้ให้เห็นว่า ชีวมวลส่วนใหญ่ที่เผาไหม้ยากและเผาไหม้ไม่สะดวกนักในสภาพบรรยากาศปกติจะสามารถเผาไหม้ได้ดีขึ้นในเตาเผาที่ออกแบบให้มีอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง, ห้องเผาไหม้และสภาวะในห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดนั้น ๆ แต่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิงด้วย คุณสมบัติที่สำคัญในการเผาไหม้ เช่น ความหนาแน่นบัลค์, ความชื้น, ค่าความร้อน, องค์กรประกอบเถ้า และส่วนประกอบทางเคมีในเชื้อเพลิงเช่น คาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน, กำมะถัน และคลอรีน เป็นต้น ซึ่งจากการที่ฟืนไม้มีค่าความหนาแน่นบัลค์ประมาณ 200 kg/m^3 ค่าความร้อนประมาณ 17 MJ/kg ความชื้นต่ำกว่า 10% องค์กรประกอบเถ้าและส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เหมือนกับของไม้ยางพารา แต่เมื่อนำมาจุดไฟในสภาพบรรยากาศปกติแล้วเกิดเป็นควันโดยไม่ถูกคิดเป็นเปลวไฟ การวิจัยในครั้งนี้เน้นการแปรสภาพเชื้อเพลิงจากฟืนไม้ให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแข็ง เพื่อประโยชน์ส่วนหนึ่งคือการนำกลับมาเป็นเชื้อเพลิงได้อีกโดยไม่ต้องดัดแปลงอุปกรณ์เผาไหม้ที่มีอยู่เดิมเพื่อเผาฟืน โดยตรง ดังนั้นเมื่อมองในแง่การเผาไหม้ในสภาพบรรยากาศปกติ การเผาไหม้ของฟืนไม้จะยากกว่าการเผาไหม้ของแท่งฟืนไม้ ดังนั้นเมื่อนำฟืนไม้มาอัดเป็นแท่งจึงจำเป็นต้องหาช่วงความหนาแน่นที่ติดไฟดีในสภาพบรรยากาศปกติ หากช่วงความหนาแน่นที่ได้แท่งฟืนติดไฟดีจริง ก็เป็นเครื่องยืนยันว่าเชื้อเพลิงแข็งจากฟืนไม้สามารถติดไฟได้ดีในเตาเผาของหม้อไอน้ำซึ่งมีอุปกรณ์ช่วยปรับสภาวะการติดไฟที่ดีกว่าอย่างแน่นอน

ได้ทดลองเผาฟืนและเผาแท่งฟืนในสภาพบรรยากาศปกติ โดยจากการสังเกตเบื้องต้นเพื่อเลือกความหนาแน่นของแท่งฟืนที่จะใช้ทดลองเผา พบว่าแท่งฟืนที่ถูกถอดออกมาภายนอกกระบอกอัดแล้วยังจับตัวเป็นก้อน ไม่แตกหักและหลุดร่วงชัดเจนจนเกินไปเมื่อถูกหยิบจับนั้น มีความหนาแน่นเริ่มที่ช่วง $400\text{-}500 \text{ kg/m}^3$ เป็นต้นไป สำหรับที่ความหนาแน่น 360 kg/m^3 ซึ่งเป็นความหนาแน่นต่ำสุดที่อัดได้จากการทดลองนี้ แท่งฟืนถูกถอดออกมาเป็นรูปร่างทรงกระบอกได้แต่หลุดร่วงง่ายมากเมื่อหยิบจับ แสดงว่าที่ความ

หนาแน่นนี้แห้งฝุ่นไม่สามารถทนต่อการกระแทกหรือหีบจับได้ ดังนั้นในการทดลองเผาได้เลือกแห้งฝุ่นความหนาแน่น 500,650,850,950, และ 1,100 ตามลำดับ ลักษณะของแห้งฝุ่นที่ใช้เผาได้ในตาราง 2.10 ส่วนลักษณะการติดไฟของฝุ่นไม้และแห้งฝุ่นไม้ดูจากรูป 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ

ตาราง 2.10 แห้งฝุ่นที่ใช้ทดสอบการติดไฟ

ความหนาแน่น เฉลี่ย (kg/m ³)	ขนาดเฉลี่ยของแห้งฝุ่นแต่ละแห้ง		มวลเฉลี่ย ต่อแห้ง (g)	จำนวนที่เผา รวมกัน (แห้ง)
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (mm)		
500	53.0	100	100	10
650	52.0	73.0	100	10
850	32.0	57.0	39	10
950	26.0	48.0	25	10
1,100	16.5	18.0	4.5	10

สำหรับวิธีการเผา ได้ทดลองเผาแห้งฝุ่นทั้งที่วางบนพื้นและในเตาอั้งโล่ วิธีการติดไฟจะเอาเศษขี้เถ้าจางจำนวนเล็กน้อยวางบนพื้นแล้วใช้ไม้ขีดไฟจุดไฟที่เศษขี้เถ้าข้างนั้น เมื่อเศษขี้เถ้าติดไฟดีแล้วนำแห้งฝุ่นวางสุบบนเศษขี้เถ้าข้างนั้น โดยในเริ่มต้นจะวางเพียง 3-4 แห้ง เมื่อเศษขี้เถ้าโดนไฟเผาจนใกล้หมดแห้งฝุ่นจะเริ่มติดไฟ จากนั้นจึงนำแห้งฝุ่นที่เหลือทั้งหมดมาสุบลงไปบนกองแห้งฝุ่นเดิมที่ติดไฟแล้ว สำหรับการเผาฝุ่นไม้ในสภาพธรรมชาติก็ใช้เศษขี้เถ้าช่วยในการติดไฟเช่นเดียวกันผลการทดลองพบว่าฝุ่นไม้ในสภาพธรรมชาติเผาแล้วไม่มีการลุกเป็นเปลวแต่จะเกิดควันแบบจุดรูป เช่นเดียวกับการเผาแห้งฝุ่นไม้ที่มีความหนาแน่น 500 kg/m³ ที่ไม่ลุกเป็นเปลวไฟเช่นกัน ติดไฟยาก เกิดควันและดับง่าย ต้องใช้ลมช่วยจึงจะติดได้ แห้งฝุ่นที่มีความหนาแน่น 650 kg/m³ ติดไฟยากเช่นกัน ต้องใช้พัดลมเป่าเพื่อเพิ่มอากาศจึงจะติดไฟและลุกเป็นเปลวได้ทั้งกองเมื่อหยุดเป่าด้วยพัดลมกองไฟจะมีเปลวเพียงเล็กน้อยและมีควันมาก ควันมีสีขาว ลักษณะสีแห้งฝุ่นขณะติดไฟจะเป็นสีดำ จากนั้นเปลวไฟจะค่อย ๆ ดับ มีบางส่วนในแห้งฝุ่นแห้งเดียวกันที่

เผาไหม้ไม่หมดและไม่ติดไฟ ส่วนที่โคนไฟเผาจะหลุดออกเป็นแวน ๆ ตามแนวขวาง และมีสีดำ ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเดียวกับการเผาแท่งฝุ่นความหนาแน่น 850 kg/m^3 ซึ่งที่ความหนาแน่นนี้จะติดไฟง่ายขึ้น มีเปลวไฟเห็นได้มากขึ้น ควันน้อยลงแต่ถือว่ายังมีควันมาก เมื่อนำแท่งฝุ่นที่ติดไฟดีแล้วมาวางแยกเป็นแท่งเดี่ยวเปลวไฟจะดับเกือบทันที เคาจะหลุดออกเป็นแวนกลมสีดำ สำหรับที่ความหนาแน่น 950 kg/m^3 นั้นติดไฟดีหมดทุกก้อน เปลวไฟสีแดง แท่งฝุ่นมีสีแดงคุ โชนเพราะไฟติดถึงเนื้อใน มีควันน้อยมาก ขึ้นถ้ามีสีขาวแท่งฝุ่นที่มีความหนาแน่น 950 kg/m^3 ปรากฏออกในแนวขวาง เมื่อแยกออกมาเป็นก้อนเดี่ยวจะติดไฟนาน เคาจะแตกออกเป็นแวนมีสีดำตรงกลางแวนและมีสีแดงที่ขอบ ทั้งไว้สักครู่จะดับ สำหรับแท่งฝุ่นที่มีความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ติดไฟดีมาก ไหม้ไฟหมดทั้งก้อนถึงเนื้อใน ถ่านมีสีแดง เหลือขึ้นถ้ามีน้อย ขึ้นถ้าสีขาว เมื่อเป็นถ่านแล้วสังเกตควันแทบไม่มี ขณะเป็นถ่านแดงจะปรือออกเป็นชั้นเล็ก ๆ ทั้งแนวยาวและแนวขวาง เคาจะหลุดออกเป็นก้อนรูปร่างไม่คงที่และมีสีแดง ติดไฟหมดจนเหลือเพียงขึ้นถ้า ไม่เหลือเป็นชั้นสีดำ จากการทดลองนี้สรุปว่าแท่งฝุ่นไม้ที่ความหนาแน่นอยู่ 850 kg/m^3 เริ่มติดลุกเป็นเปลวไฟได้ดี ส่วนที่ความหนาแน่น 950 และ $1,100 \text{ kg/m}^3$ ติดไฟดี แสดงว่าที่ความหนาแน่นประมาณ 900 kg/m^3 ขึ้นไปถึงความหนาแน่นมากกว่า $1,100 \text{ kg/m}^3$ เล็กน้อย แท่งฝุ่นติดไฟดี สำหรับที่ความหนาแน่นสูงกวานี้ไม่สามารถบอกได้ว่าแท่งฝุ่นติดไฟดีหรือไม่เพราะยังไม่ได้ทดลองเผา และเหตุผลอีกอย่างหนึ่งคือ ไม่มีความจำเป็นต้องใช้แท่งฝุ่นที่มีความหนาแน่นสูงกวานี้เพราะสิ้นเปลืองพลังงานในการอัดมากเกินไป

2.5.2 การทดสอบคุณสมบัติความทนต่อการขนย้าย

ก. ความหนาแน่น

จากผลการอัดฟ่อนไม้ในหัวข้อ 2.3 พบว่าที่ความหนาแน่นประมาณ $1,004 \text{ kg/m}^3$ ใช้พลังงานอัด, พลังงานไฟฟ้า, และค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ผลิตกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 22.68, 32.41, และ 89.99 kJ/kg ของฟ่อนไม้ตามลำดับ ในการอัดจริงพลังงานที่ใช้คือพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับค่าความร้อนของฟ่อนไม้ที่มีค่า 16.8 MJ/kg พบว่าพลังงานไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าค่าความร้อนของฟ่อนไม้ประมาณ 518 เท่า แสดงว่าที่ความหนาแน่นต่ำกว่านี้ค่าพลังงานที่ใช้อัดยังมีค่าน้อย ความหนาแน่นที่อัดได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นที่ทำได้โดยเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปที่มีค่าอยู่ระหว่าง $900 - 1,400 \text{ kg/m}^3$ และจากที่เคยกล่าวไว้ว่าการอัดให้แห้งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นมากไม่ได้เป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด เพราะสิ่งสำคัญที่สุดคือคุณสมบัติในการเผาไหม้ที่ดี เชื้อเพลิงที่แน่นมากอาจติดไฟยาก และจากการทดสอบการเผาไหม้ที่ผ่านมาที่ความหนาแน่นประมาณ $1,000 \text{ kg/m}^3$ พบว่าติดไฟได้ดี ดังนั้นฟ่อนไม้ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียง $1,000 \text{ kg/m}^3$ มีความเหมาะสมในการนำมาเป็นเชื้อเพลิงแข็งเพราะมีการเผาไหม้ดี และพลังงานที่ใช้ในการอัดยังถือว่าคุ้มค่างกับความร้อนที่ได้จากแห้งเชื้อเพลิง

ข. ความร่วน

ได้ทดลองนำแห้งฟ่อนไม้ความหนาแน่น 950 kg/m^3 ลักษณะเดียวกับในตาราง 2.10 มาปล่อยตกจากที่สูงที่ระดับความสูง 25, 50, 100, 200 และ 400 เซนติเมตร โดยแต่ละระดับความสูงใช้แห้งฟ่อนตัวอย่างจำนวน 10 แห้งได้ผลการทดลองแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของมวลเฉลี่ยของเศษแห้งฟ่อนขนาดโตสุดที่เหลืออยู่หลังการตกดังตาราง 2.11

จากตาราง 2.11 พบว่าที่ระดับความสูง 25 และ 50 cm เปอร์เซ็นต์ของแห้งฟ่อนที่เหลือมีค่าประมาณ 99.8 % เท่ากัน ซึ่งแห้งฟ่อนไม้แทบไม่มีส่วนที่หลุดร่วงออกไป นั่นคือที่ระดับความสูง 50 cm แห้งฟ่อนยังไม่แตกหัก แห้งฟ่อนมีเนื้อหลุดหายไปประมาณ 16 % เมื่อปล่อยตกที่ระดับความสูง 100 และ 200 cm แสดงว่าในช่วงระดับความสูง 100 - 200 cm แห้งฟ่อนทนการกระแทกเท่ากัน และสำหรับที่ระดับความสูง 400 cm แห้งฟ่อนมีมวลหลุดหายไปประมาณ 37 % การที่ตัวเลขมวลที่หลุดหายไปมีค่าน้อยคือไม่ถึง 50% ถือว่าเป็นแห้งเชื้อเพลิงที่ดีพอที่จะทนต่อแรงกระแทกซ้ำ ๆ ได้

ตาราง 2.11 ผลการปล่อยแก๊สฝุ่นตอกจากที่สูงกระทบพื้นคอนกรีต

ระดับ ความสูง (cm)	ความหนา- แน่นเฉลี่ย (kg/m ³)	มวลเฉลี่ย เริ่มต้น ของแก๊สฝุ่น (g)	มวลเฉลี่ยของเศษแก๊สฝุ่นขนาด โตสุดที่เหลือหลังการปล่อยตก แต่ละครั้ง (g)	เปอร์เซ็นต์โดยมวล ของเศษแก๊สฝุ่นที่ เหลือหลังการตก (%)
25	950	19.92	19.89	99.84
50	950	19.57	19.53	99.81
100	950	19.29	16.30	84.52
200	950	20.24	16.84	83.19
400	950	19.67	12.54	62.81

ค. ความต้านทานความชื้น

ได้ทดสอบโดยการทิ้งแก๊สฝุ่นไว้ในสภาพบรรยากาศปกติเป็นเวลา 21 วันแล้ววัดการพองตัวพบว่าการพองตัวในแนวรัศมี, ในแนวยาว, และเชิงปริมาตรได้ผลตามตาราง 2.12 (ตามมาตรฐานแล้วต้องทิ้งไว้ 21 วันในสภาพบรรยากาศอุณหภูมิ 20°C ความชื้น 95% และการพองตัวต้องน้อยกว่า 30% จึงจะยอมรับได้) ซึ่งจากตาราง 2.12 จะเห็นว่าแก๊สฝุ่นที่มีความหนาแน่นน้อยพองตัวมากกว่าแก๊สฝุ่นที่มีความหนาแน่นมาก โดยพองตัวตามแนวยาวมากกว่าตามแนวรัศมี และที่ความหนาแน่น 616 kg/m³ ซึ่งถือว่าแก๊สฝุ่นทนการกระแทกได้น้อยพบว่าแก๊สฝุ่นมีการพองตัวทางด้านปริมาตรเพียง 13.9 % ในขณะที่ที่ความหนาแน่นสูงขึ้นค่าการพองตัวจะยิ่งน้อยลง ดังนั้นถือว่าแก๊สฝุ่นมีการพองตัวที่ต่ำแม้ความหนาแน่นจะต่างกันมาก

นอกจากนี้ได้ทดสอบโดยการนำแก๊สฝุ่นที่มีความหนาแน่นระหว่าง 900-1,000 kg/m³ แช่ในกะละมังที่ใส่น้ำไว้เต็มทิ้งไว้ 1 คืน (12 ชั่วโมง) พบว่าแก๊สฝุ่นทั้งหมดพองตัวและหลุดลွ่ยโดยสมบูรณ์

ตารางที่ 2.12 เปอร์เซ็นต์การพองตัวของแท่งฟุ้งเมื่อทิ้งไว้ในที่ร่ม 21 วัน

ความหนาแน่นของ แท่งฟุ้งหลังจากถอด ออกจากกระบอกอัด (kg/m ³)	การพองตัว (%) ทางด้านต่าง ๆ หลังจากทิ้งไว้ 21 วัน		
	รัศมี	ตามยาว	ปริมาตร
616	1.35	10.90	13.90
709	1.87	7.61	11.68
822	1.72	6.81	10.51
923	1.41	6.41	9.43
1410	0.90	3.69	5.60
1573	0.61	3.61	4.88

% การพองตัว = (การเปลี่ยนแปลงจากขนาดที่เริ่มต้น)/ขนาดที่เริ่มต้น * 100

2.6 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้แท่งฟุ้งเป็นเชื้อเพลิง

แท่งเชื้อเพลิงแข็งจากฟุ้งไม้ผลิตจากฟุ้งไม้ที่ได้จาก โรงงานอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราซึ่งใช้ไม้ยางพาราแปรรูปที่ผ่านการอัดน้ำยาแล้วเป็นวัตถุดิบ น้ำยาที่ใช้ในการอัดน้ำยาไม้เป็นสารเคมีที่ใช้ป้องกันเชื้อราและแมลงทำลายเนื้อไม้ ที่นิยมใช้คือ boron compound ซึ่งเป็นส่วนผสมของกรดบอริกและสารบอแรกซ์ คัดในเนื้อไม้ ในรูปของเกลือแห้ง เป็นสารเคมีละลายน้ำออกฤทธิ์ทำลายแมลงและเชื้อรา ไม่ติดไฟ มีความปลอดภัย ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี ไม่มีอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ ขี้เลื่อยและขี้กบที่ได้สามารถนำมาเผาโดยไม่เกิดอันตราย แต่ไม่ควรใช้ปิ้งหรือย่างอาหาร ในการอัดน้ำยาด้วยวิธีสุญญากาศกำหนดให้น้ำยาปนอยู่ในเนื้อไม้ยางพาราประมาณ 2.56 kg/m³ ไม้ยางที่ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์มีความหนาแน่นประมาณ 640 kg/m³ และฟุ้งไม้มีความหนาแน่นประมาณ 200 kg/m³ ดังนั้นประมาณได้ว่าในฟุ้งไม้ 1 m³ จะมีน้ำยาปนอยู่ประมาณ 0.8 kg นอกจากนี้ชิ้นส่วนเฟอร์นิเจอร์ต้องผ่านกระบวนการขัดผิวด้วยกระดาษทราย ซึ่งอาจมีเศษชิ้นส่วนของกระดาษทรายหลุดปะปนอยู่ได้เช่นกัน กระดาษทรายประกอบด้วยสารขัดถู สารยึดติด และวัสดุพื้น สารขัดถูสำหรับกระดาษทรายที่ใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์ไม้ทำ

จากแร่คาร์เนต ซึ่งเป็นแร่ที่มีซิลิเกต (silicate) เป็นส่วนประกอบหลัก จุดหลอมเหลวของแร่ชนิดนี้ประมาณ $1,300^{\circ}\text{C}$ จากการทดลองหาค่าความร้อนของฝุ่นไม้โดยใช้ oxygen calorimetric bomb สังเกตไม่พบสารตกค้างใด ๆ ซึ่งเป็นเครื่องชี้ได้ส่วนหนึ่งว่ามีสารจัดถูกลุดออกมาปะปนกับฝุ่นไม้น้อยมาก ส่วนสารยึดติดเป็นกาวที่ใช้ยึดสารจัดถูให้ติดอยู่กับวัสดุพื้น กาวที่ใช้เป็นกาวที่ได้จากสัตว์, กาวที่ได้จากพืชและเรซินธรรมชาติ, และกาวสังเคราะห์ กาวที่ใช้ยึดคาร์เนตเป็นกาวที่ได้จากสัตว์ ส่วนวัสดุพื้นนิยมใช้กระดาษมากที่สุด รองลงมาคือผ้าและยาง

ทั้งนี้การรักษาเนื้อไม้ และเศษกระดาษทรายที่ปะปนอยู่ในฝุ่นไม้ เมื่อนำฝุ่นมาทำเป็นเชื้อเพลิงแข็งคาดว่าสามารถเผาแท่งฝุ่นได้โดยไม่มีอันตรายจากสารปะปนดังกล่าว อีกทั้งการเผาแท่งฝุ่นเป็นการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ดีกว่าการเผาฝุ่นโดยตรงที่เกิดควันจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แต่ทั้งนี้ไม่ควรใช้แท่งฝุ่นเป็นเชื้อเพลิงในการปิ้งหรือย่างอาหาร หรือประกอบอาหารที่ไม่มีฝาปิดภาชนะ

2.7 สรุป

การทดลองในบทนี้เป็นการอัดฝุ่นไม้ภายใต้ความดันเพียงอย่างเดียว ไม่มีการผสมตัวประสานใด ๆ ลงไปในฝุ่นไม้เพื่อช่วยในการจับยึดของอนุภาคฝุ่น จากผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า การอัดฝุ่นไม้ให้มีความหนาแน่นตามมาตรฐานของเชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็ง โดยทั่วไปนั้น ใช้พลังงานในการอัดไม่มากนัก สามารถทำได้แม้ความหนาแน่นจะสูงกว่า $1,100 \text{ kg/m}^3$ แต่สิ่งที่ใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกความหนาแน่นที่เหมาะสมคือคุณสมบัติการติดไฟ และพบว่าเพียงความหนาแน่น 900 kg/m^3 ขึ้นไปแท่งฝุ่นก็สามารถติดไฟได้ดี และเมื่อนำแท่งฝุ่นที่ความหนาแน่นดังกล่าวไปทดสอบการทนการกระแทกขณะขนย้ายและการทนต่อความชื้นพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ การทดลองดังกล่าวมีข้อจำกัดอยู่ที่ชิ้นทดสอบไม่ได้มีขนาดภายนอกเท่ากันซึ่งอาจมีผลต่อการเผาไหม้เพราะแท่งฝุ่นขนาดเล็กย่อมเผาไหม้ได้ง่ายกว่าแท่งขนาดใหญ่ การทดสอบความทนต่อการขนย้ายไม่ได้แสดงผลของทุกความหนาแน่น แสดงไว้แต่เพียงความหนาแน่นที่ต้องการเท่านั้น สำหรับความต้านทานความชื้นได้แสดงข้อ

มูลค่าที่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างที่ความหนาแน่นต่าง ๆ ได้ชัดเจน ในการทดลองอัดฝุ่นไม่มีข้อสังเกตที่ต้องกล่าวถึงคือ ในการทดลองอัดปกติแล้วที่ขนาดกระบอกอัดใด ๆ ควรจะปรับค่าแรงอัดได้ไม่จำกัดซึ่งจะทำให้สามารถอัดได้ตั้งแต่ความดันต่ำจนถึงความดันสูงสุดที่ฝุ่นไม้เริ่มมีความหนาแน่นคงที่ หากการใช้กระบอกอัดขนาดใด ๆ ก็ตามสามารถสร้างความหนาแน่นได้ตั้งแต่ต่ำสุดจนถึงจุดสูงสุดแล้ว เมื่อนำงานที่กระทำในกระบอกอัดใด ๆ เพื่อให้ได้ความหนาแน่นเท่ากันมาเปรียบเทียบดูอาจจะได้ค่าที่ไม่เท่ากัน เพราะในการหางานต่อหน่วยมวลที่ความหนาแน่นใด ๆ การคิดงานจากกระบอกอัดขนาดเล็ก ๆ คาดว่าน่าจะได้ค่าตัวเลขออกมาสูงกว่าการคิดงานจากกระบอกอัดใด ๆ ทั้งนี้เพราะกระบอกอัดที่เล็กกว่าจะมีแรงเสียดทานมากกว่าเนื่องจากมีอัตราส่วนพื้นผิวสัมผัสต่อปริมาตรของกระบอกมากกว่ากระบอกโตนั่นเอง ดังนั้นในการทดลองนี้มีข้อจำกัดตรงที่ไม่สามารถสร้างแรงอัดสูง ๆ ได้จึงจำเป็นต้องใช้กระบอกอัดหลายขนาดเพื่อให้ครอบคลุมค่าความดันและความหนาแน่นให้กว้างที่สุด เมื่อนำผลการทดลองทุกกระบอกมาผสมกันเพื่อวิเคราะห์ความดัน ความหนาแน่น และงาน อาจให้ค่าผิดเพี้ยนจากความเป็นจริงไปบ้างแต่คิดว่าคงไม่มากนัก และสามารถใช้ดูเป็นแนวโน้มที่ใกล้เคียงความจริงได้ในระดับหนึ่ง

บทที่ 3

การสร้างต้นแบบ

3.1 บทนำ

ได้รวบรวมและศึกษาข้อมูลที่จำเป็นในการทำเชื้อเพลิงแข็ง รวมถึงการทดลองหาคุณสมบัติและคุณภาพของแท่งฟืนไม้ที่เหมาะสมในการทำเป็นเชื้อเพลิงแข็ง พบว่าวิธีการอัดแท่งแบบลูกสูบโดยใช้ระบบไฮดรอลิกมีความเหมาะสมในการอัดฟืนไม้มากกว่าวิธีการอื่น ๆ ด้วยเหตุผลเพราะความยืดหยุ่นในการใช้ไม้ได้กับวัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ละเอียดจนถึงหยาบ, เป็นการอัดที่ใช้เพียงความดันในการบีบอนุภาคให้ติดกันโดยไม่ต้องใช้ความร้อนช่วย, ใช้ไม้กับวัตถุดิบที่มีการไหลได้ยากและมีความยุบตัวสูง, และความสะดวกในการทำเป็นชุดต้นแบบสำเร็จรูปที่มีขนาดกะทัดรัด และเคลื่อนย้ายง่าย การออกแบบเบื้องต้นมีการคำนวณแรงอัด, การกำหนดขนาดของแท่งฟืน, กำลังการผลิต, ระบบป้อนฟืน, ช่องอัดฟืนและแม่พิมพ์ การผลิตชิ้นส่วนและประกอบเป็นเครื่องต้นแบบ มีการทดสอบ และการปรับปรุงแก้ไขต้นแบบ ตามลำดับ

3.2 เงื่อนไขและแนวคิด

3.2.1 เงื่อนไขในการออกแบบ

ขอบเขตของการออกแบบที่ได้กำหนดในการออกแบบขั้นต้นมีดังนี้

1. เป็นการออกแบบเครื่องจักรสำหรับอัดฟืนไม้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง
2. ชุดต้นกำลังทั้งหมดได้จากระบบไฮดรอลิก
3. แท่งฟืนไม้ที่อัดได้ต้องมีรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เช่นอาจเป็นรูป

ทรง กลม, ทรงเหลี่ยม, ทรงรี หรือทรงกระบอก เป็นต้น

4. สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย, พื้นที่ติดตั้งน้อย, ใช้งานง่าย และการบำรุงรักษาน้อย

3.2.2 แนวคิดในการออกแบบ

มีแนวคิดให้เครื่องจักรนี้เป็นเพียงเครื่องอัดที่รับฝุ่นไม้มาจากภายนอกแล้วอัดออกมาเป็นแท่งเท่านั้น ลักษณะของแท่งฝุ่นกำหนดให้เป็นรูปทรงกระบอกตันเพราะสามารถสร้างแม่พิมพ์เป็นรูปทรงกระบอกได้ง่าย ไม่ได้กำหนดความยาวของแท่งฝุ่น นอกจากนี้ในการป้อนฝุ่นต้องการให้มีการอัดล่วงหน้าก่อนการอัดจริงเพื่อลดปริมาตรของฝุ่นไม้เป็นขั้น ๆ เพราะฝุ่นไม้สามารถมีปริมาตรลดลงกว่าเดิมถึง 8 เท่า ซึ่งหากป้อนฝุ่นปริมาณมากเพียงครั้งเดียวเข้าสู่ช่องอัดขนาดคงที่ที่เล็กกว่าทำให้ต้องใช้ช่องป้อนที่ยาว และใช้กระบอกไฮดรอลิกยาว ทำให้เครื่องจักรใช้เนื้อที่มากโดยไม่จำเป็น

3.3 ผลการออกแบบ

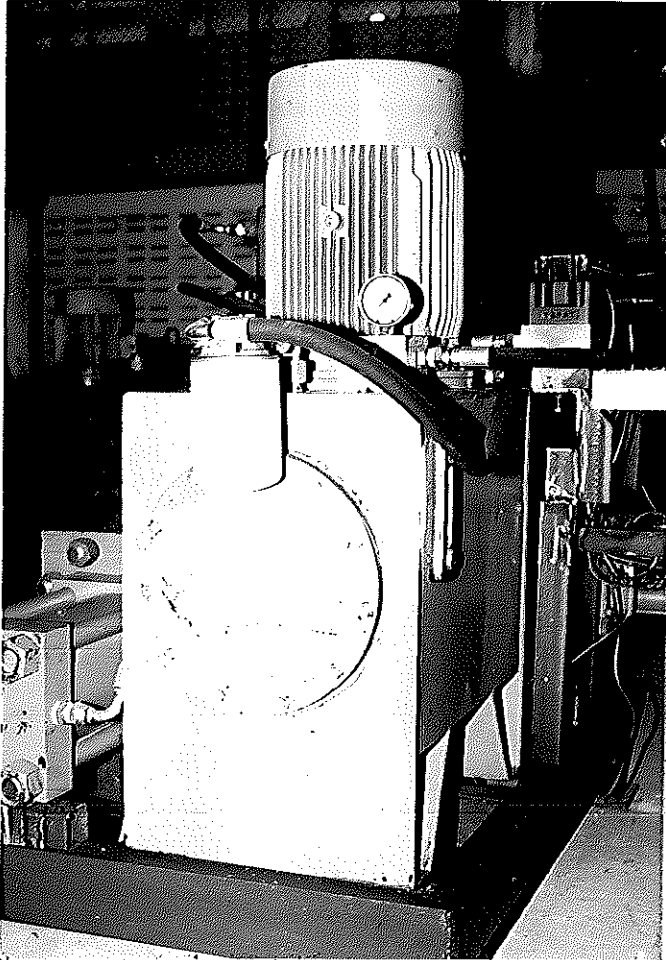
3.3.1 ลักษณะและหลักการทำงาน

เครื่องอัดฝุ่นไม้ที่ออกแบบมีลักษณะดังแสดงในรูป 3.1 และ 3.2 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 6 ส่วน คือ

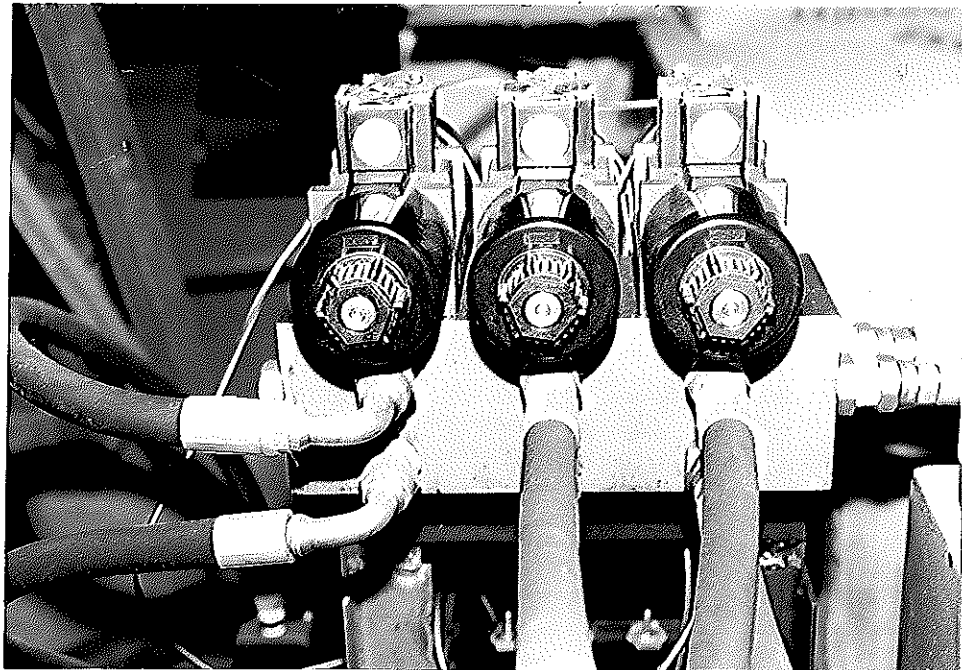
1. ชุดต้นกำลังซึ่งใช้ระบบไฮดรอลิกใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 7.5 kW หรือ 10 แรงม้า ระบบสามารถสร้างความดันของน้ำมันไฮดรอลิกได้สูงสุดถึง 3,000 psi (20.6 MPa) ใช้เรือนแยกน้ำมัน (manifold block) เป็นตัวรับน้ำมันจากปั๊มไฮดรอลิกของระบบต้นกำลังและจ่ายน้ำมันไปยังกระบอกไฮดรอลิกทั้งสาม โดยมีโซลินอยด์วาล์วเป็นตัวบังคับและควบคุมทิศทางการไหล ชุดต้นกำลังแสดงไว้ในรูป 3.3 ส่วน manifold block และ โซลินอยด์วาล์วแสดงไว้ในรูป 3.4
2. รางรับและป้อนฝุ่นเข้าสู่ช่องอัดในแนวนอน, แท่งป้อนฝุ่น และ กระบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ 40 mm ความยาวช่วงชัก 250 mm สำหรับป้อนฝุ่นและอัดล่วงหน้าครั้งแรกซึ่งสามารถลดปริมาตรของฝุ่นไม้ในขั้นแรกลงเหลือหนึ่งในสาม ได้แสดงไว้ในรูป 3.5, 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

3. ครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ 100 mm ความยาวช่วงชัก 80 mm สำหรับอัดลว่งน้ำครั้งที่สองในแนวตั้ง แสดงไว้ในรูป 3.8 สำหรับลักษณะการติดตั้งดูได้จากรูป 3.9
4. ครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ 160 mm ความยาวช่วงชัก 200 mm ซึ่งเป็นตัวหลักสำหรับอัดฝุ่นผ่านช่องอัดและแม่พิมพ์ในแนวนอน แสดงไว้ในรูป 3.10 สำหรับแท่งอัดฝุ่นที่ต่อจากแกนครอบอกไฮดรอลิกได้แสดงไว้ในรูป 3.11
5. ช่องอัดสำหรับรับฝุ่นและเป็นที่ยึดของครอบอกไฮดรอลิกทั้งสามครอบอก ทำด้วยเหล็กกล้ามีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมตรงกลางถูกเจาะเป็นรูกลมทะลุตามแนวยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 51 mm ด้านข้างเจาะเป็นรูขนาด 100 mm จำนวน 1 ด้านทะลุถึงรูกลาง เป็นด้านที่ต่อกับรางป้อนฝุ่น ส่วนด้านบนเจาะเป็นรูรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 50 mm ยาว 100 mm จำนวน 1 ด้าน ทะลุถึงรูกลางเช่นเดียวกัน เป็นด้านที่ต่อกับครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง ลักษณะช่องอัดแสดงไว้ในรูป 3.12
6. แม่พิมพ์รูปทรงครอบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 51 mm ถูกผ่าครึ่งตามแนวยาว โดยให้มีช่องว่างระหว่างซีกทั้งสองแล้วใส่ตัวบีบให้สามารถปรับความเริ้วของแม่พิมพ์ได้ ลักษณะแม่พิมพ์แสดงไว้ในรูป 3.13

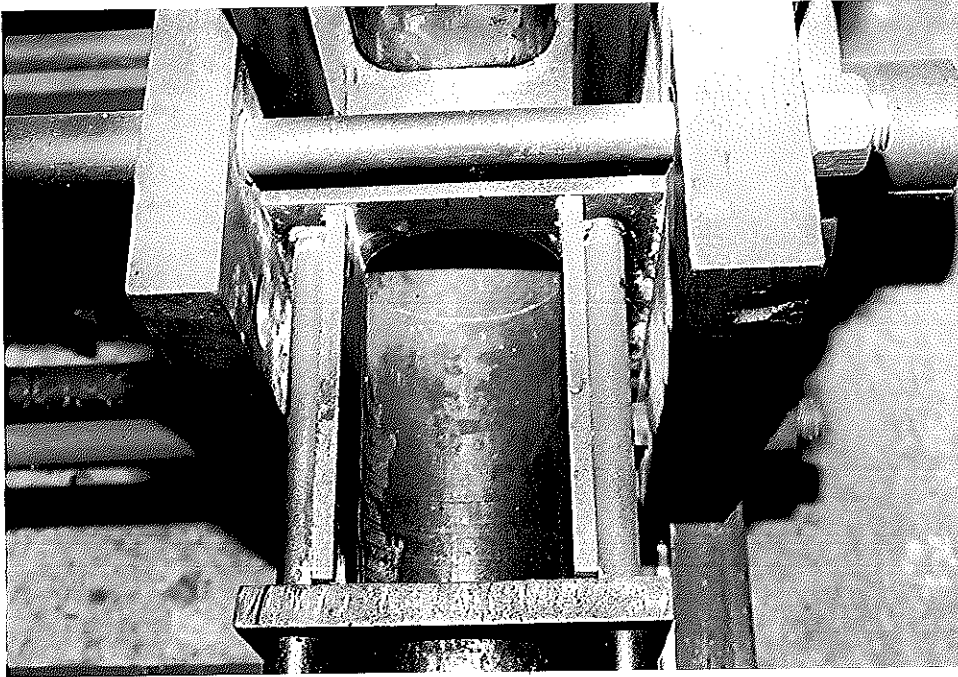
การประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกันอาศัยเหล็กกลมและน๊อตเป็นตัวยึด โดยช่องอัดจะตั้งอยู่บนขาของฝาประกบหน้าและหลัง จากนั้นทำการยึดครอบอกไฮดรอลิกตัวหลัก, ช่องอัด, ฝาประกบหน้า และฝาประกบหลัง โดยใช้เหล็กกลม ส่วนแม่พิมพ์จะยึดติดกับฝาประกบหน้าและอยู่ด้านหน้าสุด รางป้อนและครอบอกป้อนฝุ่นถูกยึดเข้ากับช่องอัดในแนวนอนด้านข้าง โดยใช้เหล็กกลมและฝาประกบขนาดเล็กกว่า สำหรับครอบอกไฮดรอลิกอัดลว่งน้ำตัวที่สองจะวางในแนวตั้งเหนือช่องอัดและถูกยึดด้วยเหล็กกลมเช่นเดียวกัน



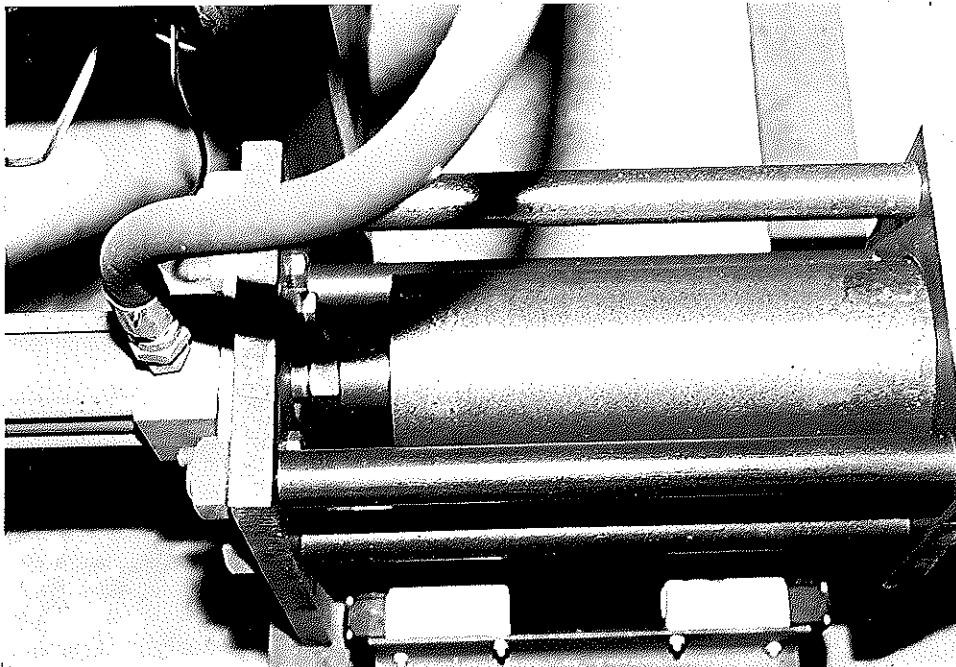
รูป 3.3 ชุดต้นกำลังระบบ-
ไฮดรอลิก



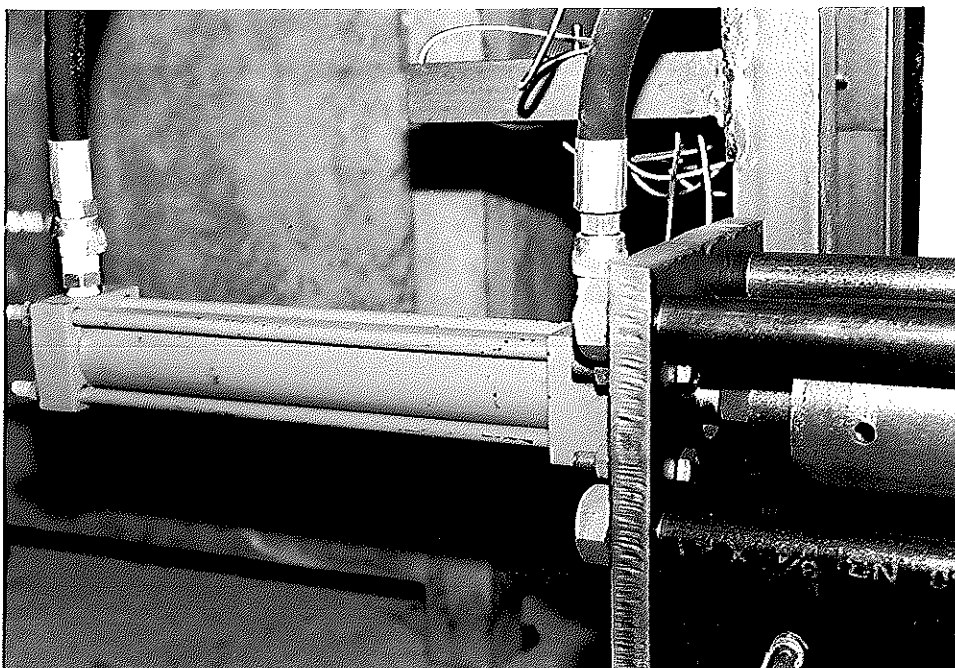
รูป 3.4 manifold block และ โซลินอยด์วาล์ว



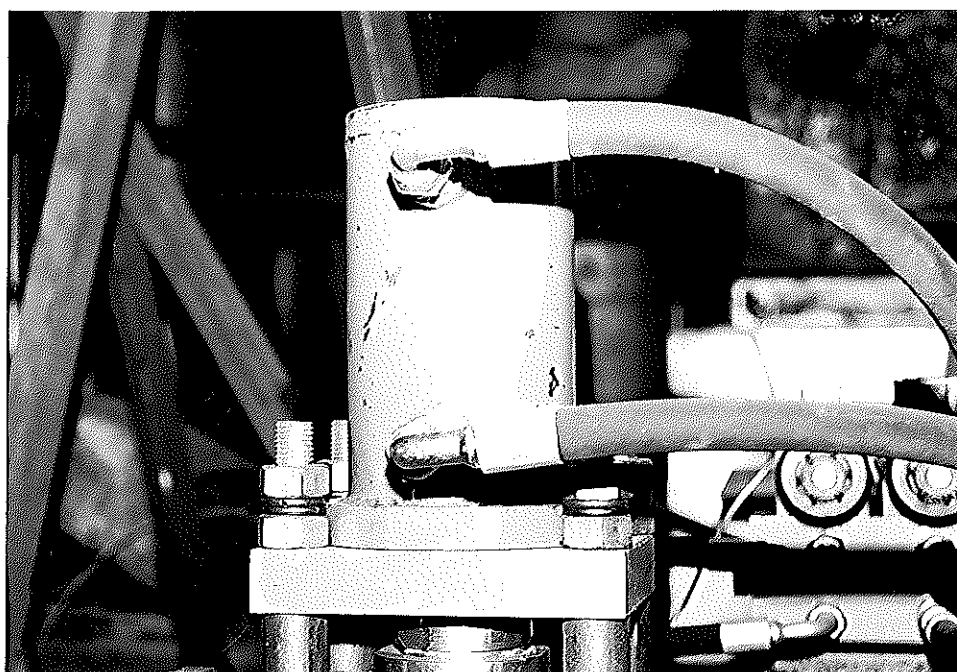
รูป 3.5 รางรับและป้อนฝุ่น



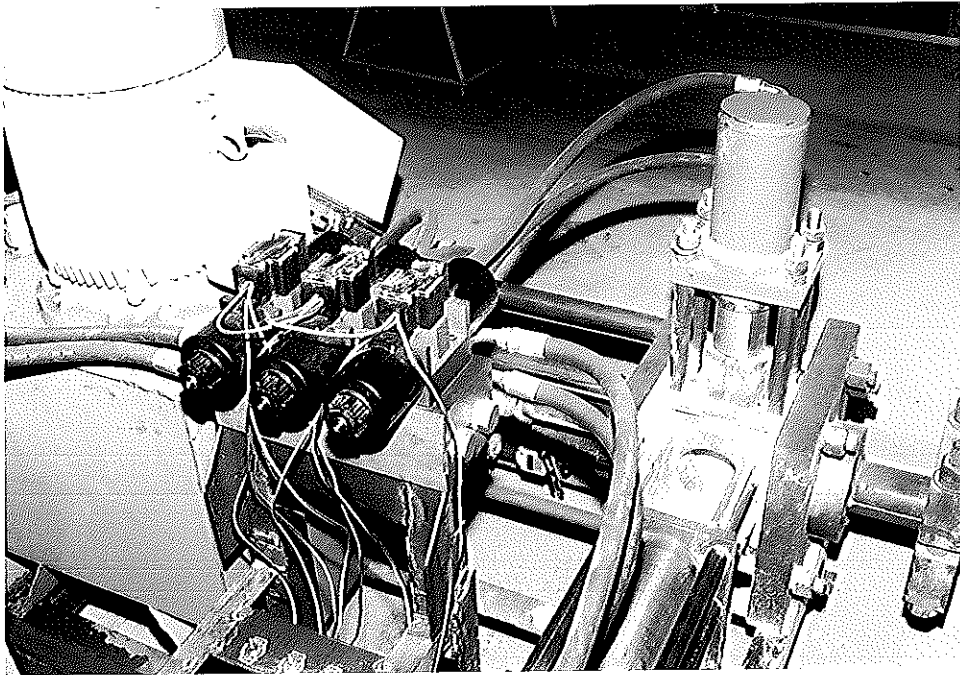
รูป 3.6 แท่งป้อนฝุ่น



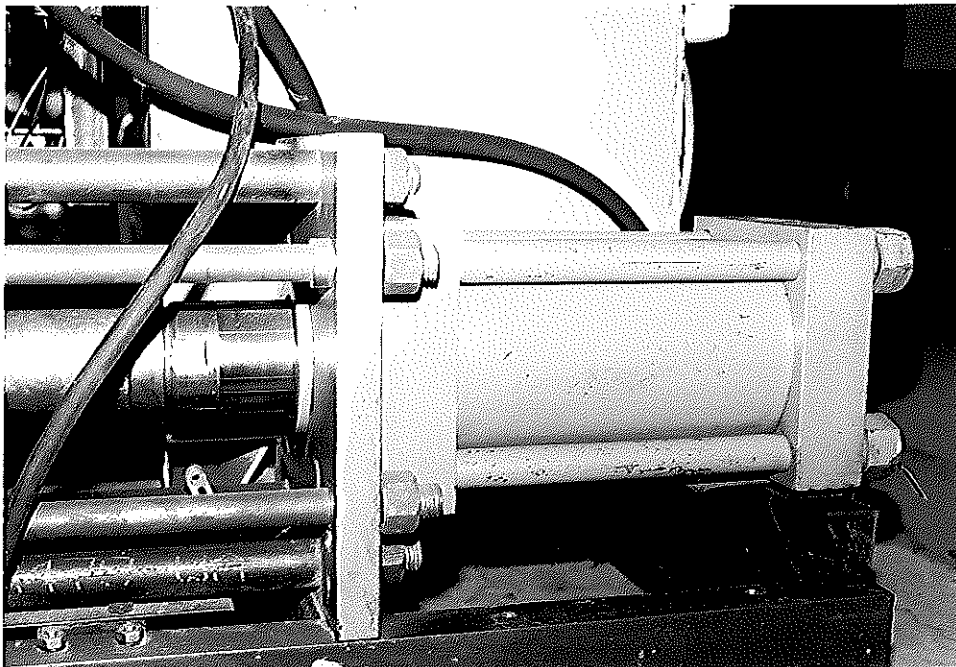
รูป 3.7 ครอบไฮดรอลิกตัวที่หนึ่ง



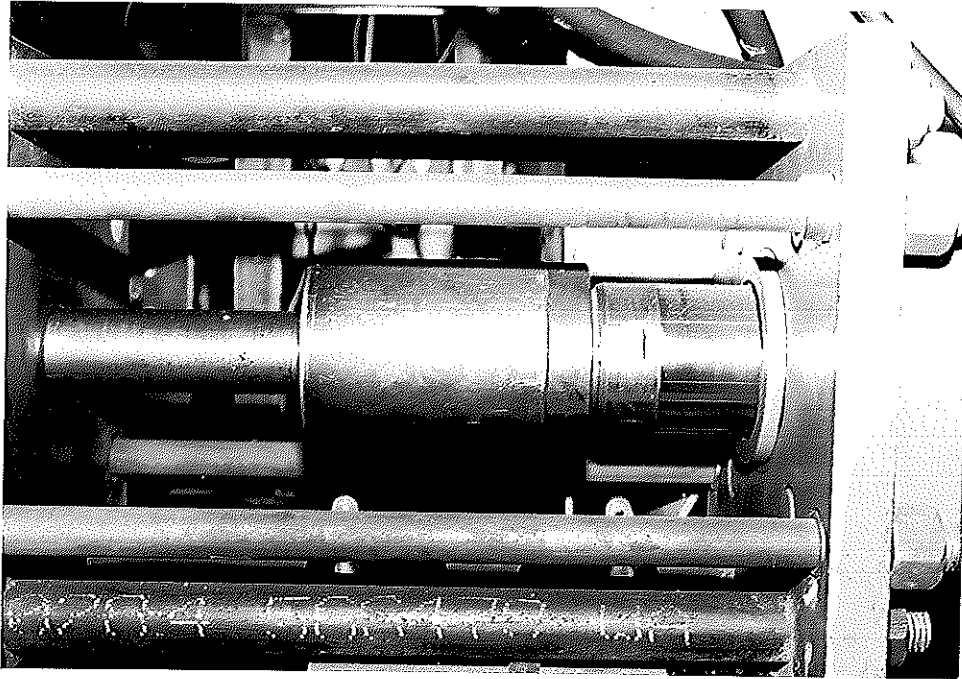
รูป 3.8 ครอบไฮดรอลิกตัวที่สอง



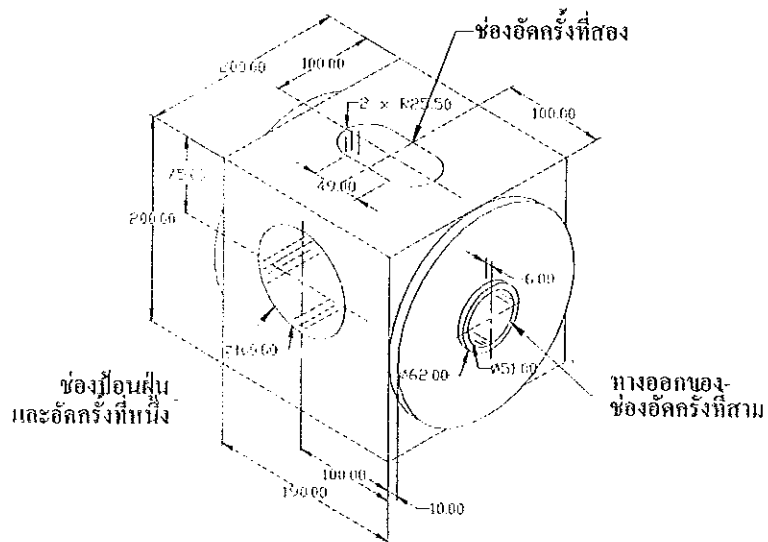
รูป 3.9 การติดตั้งกระบอกลไฮดรอลิกตัวที่สองกับช่องอัด



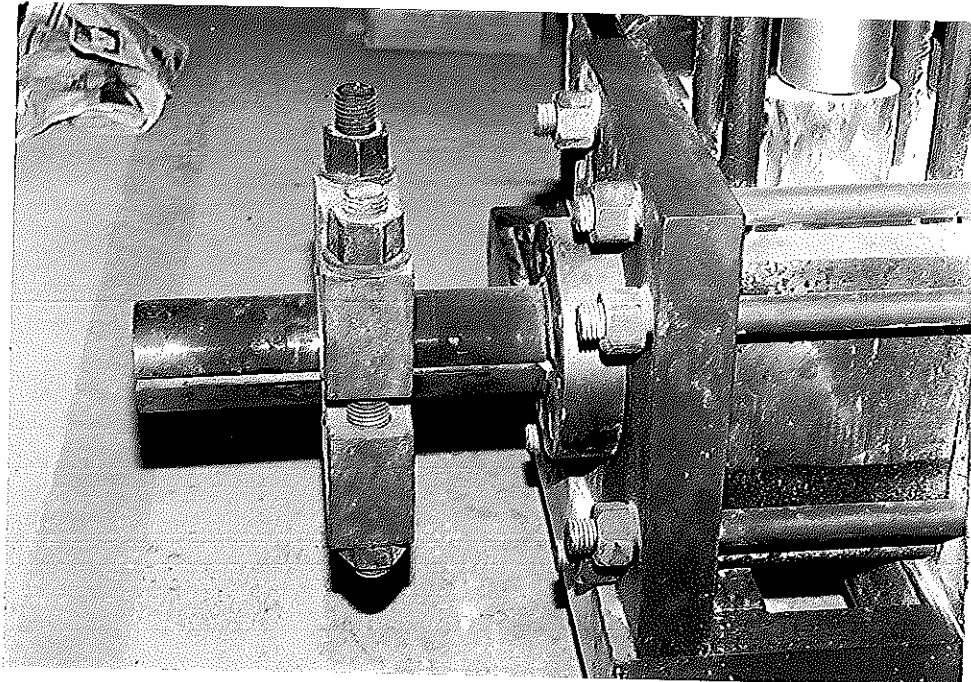
รูป 3.10 กระบอกลไฮดรอลิกตัวที่สาม



รูป 3.11 coupling และแท่งอัด ของระบบไฮดรอลิกตัวที่สาม



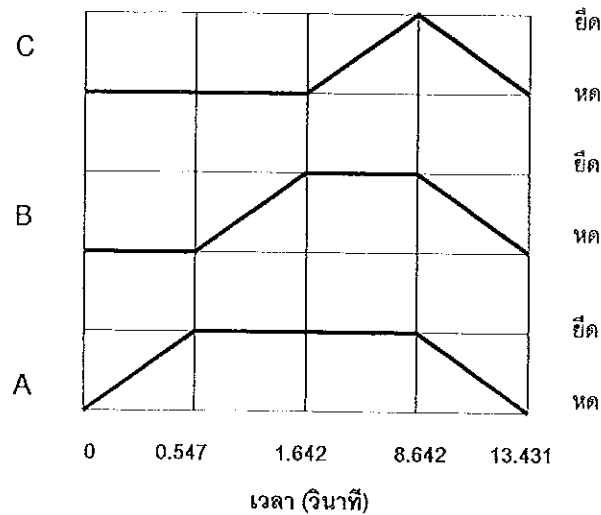
รูป 3.12 ลักษณะของช่องอัดฝุ่นไม้ที่ออกแบบ



รูป 3.13 แม่พิมพ์

หลักการการทำงานของเครื่องอาศัยการเคลื่อนที่ของกระบอกไฮดรอลิกทั้งสาม กระบอกในการดัน บีบ และอัด ฟันไม้ผ่านแม่พิมพ์ออกมา โดยกรรมวิธีในการอัดแสดง ด้วยแผนภูมิเวลาดังรูป 3.14 ซึ่งแบ่งจังหวะการทำงานในหนึ่งรอบการอัดได้ 4 จังหวะ เริ่มจากฟันไม้อยู่ในกรวยเก็บฟันที่ติดตั้งอยู่เหนือรางป้อนฟัน (รูป 3.1 และ 3.2 ไม่ได้ แสดงรูปกรวยเก็บฟัน) และกระบอกสูบป้อนอยู่ในตำแหน่งหดสุด ที่ตำแหน่งดังกล่าว ฟันไม้จะตกลงมาในรางที่ต่อตรงกับช่องป้อนฟันเข้าสู่ช่องอัด จังหวะแรกกระบอกสูบ ป้อนยืดอกดันฟันไม้ในรางผ่านช่องป้อนเข้าสู่ช่องอัดแล้วค้างไว้ที่ตำแหน่งยืดอก ฟัน ไม้ถูกอัดล่วงหน้ามีปริมาตรลดลงเหลือหนึ่งในสาม จังหวะที่สองกระบอกสูบตัวที่สอง ซึ่งอยู่ด้านบนช่องอัดจะอัดฟันไม้ให้แน่นขึ้นและบีบฟันให้อยู่ในรูกลางขนาด 51 mm และค้างไว้ที่ตำแหน่งยืดอก จังหวะนี้ฟันไม้มีปริมาตรลดลงไปอีกและมีความแน่นมาก ขึ้น จังหวะที่สามกระบอกสูบตัวที่สามจะอัดฟันไม้ในรูกลางของช่องอัดผ่านแม่พิมพ์ ออกมา จังหวะที่สี่กระบอกไฮดรอลิกทั้งสามกระบอกหดพร้อมกันจนกระทั่งทุก

กระบอกอยู่ในตำแหน่งหกดสุดเป็นการจบหนึ่งรอบการอัด จากนั้นจึงเริ่มอัดรอบต่อไป
แท่งฝุ่นไม่ถูกอัดออกมาเรื่อย ๆ ไม่สามารถปรับความยาวของแท่งฝุ่นไม้ได้



- A = กระบอกไฮดรอลิกอัดเริ่มแรก
B = กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง
C = กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สาม

รูป 3.14 แผนภูมิเวลาการทำงานของเครื่องอัดฝุ่นไม้

3.3.2 วิธีการคำนวณ

ในการออกแบบต้องการแท่งฝุ่นรูปทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm มีความยาวในการอัดผ่านแม่พิมพ์แต่ละครั้ง 90 mm ที่ความหนาแน่นสูงสุด $1,100 \text{ kg/m}^3$ คิดเป็นปริมาตรเมื่ออัดแล้ว $183,854 \text{ mm}^3$ มีมวลประมาณ 202 g จากข้อกำหนดนี้สามารถคำนวณย้อนกลับ ไปหาปริมาตรฝุ่นเริ่มต้นก่อนเข้าเครื่องอัดได้ที่มวลเท่าเดิม โดยใช้ความหนาแน่นบัลค์ที่ได้หาไว้คือ 200 kg/m^3 ได้ปริมาตรเริ่มต้นเท่ากับ $1,010,000 \text{ mm}^3$ แต่ในการสังเกตพฤติกรรมการไหลของฝุ่นไม้จริง ๆ พบว่าฝุ่นไม้ไหลได้ยากและมีความแน่นน้อยกว่าความหนาแน่นบัลค์ (ดูวิธีหาความหนาแน่นบัลค์ในหัวข้อ 2.2.1) เพราะไม้ได้เกาะภาชนะใส่ฝุ่น ฝุ่นจึงไม่แน่นขณะไหลลงสู่รางรับฝุ่น จึงได้ทำการหาความหนาแน่นของฝุ่นโดยไม่ต้องเกาะภาชนะใส่ฝุ่นพบว่ามีความหนาแน่น 140 kg/m^3

ใช้ค่าความหนาแน่นนี้แทนค่าความหนาแน่นบัลคในการหาปริมาตรฝุ่นเริ่มต้นได้เท่ากับ $1,412,587 \text{ mm}^3$ ค่าที่ได้ครั้งหลังนี้ถือว่าใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากกว่าจึงจะนำไปใช้ในการคำนวณหาขนาดกระบอกไฮดรอลิกต่อไป

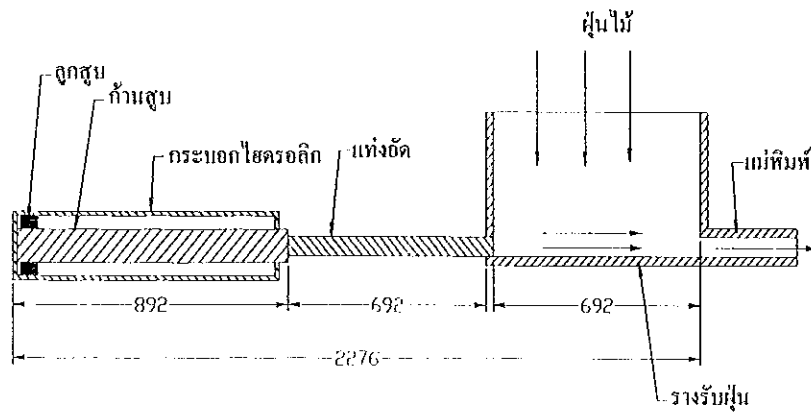
เหตุผลในการออกแบบให้เครื่องจักรใช้กระบอกไฮดรอลิกถึง 3 กระบอก โดยให้กระบอกแรกดันฝุ่นเข้าสู่ช่องอัด แทนที่จะปล่อยให้ฝุ่นตกลงสู่ช่องอัดตามแรงโน้มถ่วงแล้วใช้กระบอกไฮดรอลิกเพียงกระบอกเดียวดันฝุ่นผ่านแม่พิมพ์ดังตัวอย่างรูป 3.15 เพราะ

1. ถ้าให้ฝุ่นปริมาตรเริ่มต้น $1,412,587 \text{ mm}^3$ ไหลลงช่องอัดที่มีความกว้างเพียง 51 mm (เส้นผ่านศูนย์กลางช่องอัด) จะต้องใช้ช่องอัดที่มีความยาวถึง 691.5 mm ซึ่งจะส่งผลให้ต้องใช้กระบอกไฮดรอลิกที่มีช่วงชักอย่างน้อย 691.5 mm เช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อรวมความยาวของรางรับฝุ่นและของกระบอกไฮดรอลิกเข้าด้วยกันจะยาวถึง 2,276 mm เป็นอย่างน้อย (ยังไม่รวมความยาวของช่องอัดและแม่พิมพ์) จะเห็นได้ว่าเครื่องจักรต้องใช้เนื้อที่ตามแนวราบมาก
2. ฝุ่นไม้ไหลลงสู่รางรับฝุ่นได้ยากและใช้เวลานานเพราะความกว้างของรางแคบคือ กว้างเพียง 51 mm เท่านั้น หากทำรางรับฝุ่นให้กว้างเกินเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องอัดจะทำให้ความยาวของรางสั้นลงแต่จะดันฝุ่นเข้าช่องอัดไม่ได้เพราะขนาดของช่องไม่เท่ากัน และไม่สามารถทำท่อลดความเร็วจากรางเข้าสู่ช่องอัดได้ เพราะจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ฝุ่นจะไม่ไหลและจะติดอยู่ในท่อลดความเร็วเมื่อถูกอัดแม้ว่าจะใช้ท่อลดความเร็วที่มีความเร็วน้อยกว่ามุมไหลเทของฝุ่นไม้ก็ตาม

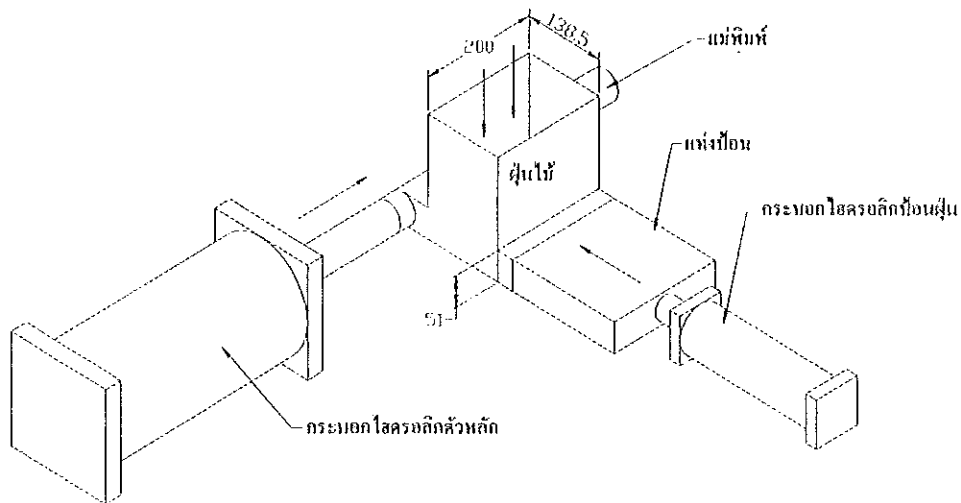
ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงรางรับฝุ่นให้กว้างกว่า 51 mm เพื่อให้ฝุ่นไหลลงมาได้ง่าย และผลที่ตามมาคือต้องใช้กระบอกไฮดรอลิกเพิ่มขึ้นเป็น 3 กระบอกเพื่อบังคับฝุ่นให้เข้าสู่ช่องอัดที่มีขนาดเล็กกว่านั่นเอง

สามารถออกแบบโดยใช้กระบอกไฮดรอลิกเพียงสองกระบอกได้ โดยให้ตัวแรกเป็นตัวดันฝุ่นเข้าช่องอัดในแนวราบและอีกตัวหนึ่งดันฝุ่นในช่องอัดเข้าสู่แม่พิมพ์ดังตัวอย่างรูป 3.16 กรณีนี้รางรับฝุ่นไม้จำเป็นต้องยาวมากเพราะฝุ่นถูกดันเข้าไป ไม่ได้ตกลงสู่รางรับโดยตรง ความยาวของรางรับฝุ่นมีผลต่อรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่เปิด

ให้ฝุ่นปริมาตร $1,412,587 \text{ mm}^3$ ตกลงมาอยู่ด้านหน้าของแท่งป้อน จากตัวอย่างในรูป 3.16 จะเห็นว่าแท่งป้อนและช่องทางการเคลื่อนที่ของแท่งป้อนมีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งผลิตยากกว่ารูปทรงกระบอก



รูป 3.15 ความยาวเครื่องอัดฝุ่นเมื่อใช้ครอบอกไฮดรอลิกเพียงครอบเดียว



รูป 3.16 ลักษณะของเครื่องอัดที่ใช้ครอบอกไฮดรอลิกสองตัว

3.3.2.1 ครอบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่ง(ป้อนฝุ่น)

ก. การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ

ฝุ่นไม้มีมวล 202 g มีปริมาตรเริ่มต้นก่อนป้อนเข้าช่องอัดประมาณ 1,412,587 mm³ ถูกดันเข้าช่องอัดจนเหลือปริมาตรประมาณ 400,553 mm³ คำนวณความหนาแน่นได้ประมาณ 504 kg/m³ เมื่อพิจารณาจากกราฟรูป 2.7 พบว่าที่ความหนาแน่นดังกล่าวต้องใช้ความดันอัดประมาณ 2.5 MPa หากกำหนดให้ช่องป้อนฝุ่นเข้าทางด้านข้างช่องอัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm จะสามารถหาแรงอัดที่ความดันดังกล่าวได้จากสมการ

$$F = P_2 A_2 \quad (3.1)$$

โดยที่ F = แรงอัดที่ก้านสูบไฮดรอลิกหรือแรงอัดที่แท่งอัด, N

P_2 = ความดันปรากฏในฝุ่นไม้ในช่องอัด, Pa

A_2 = พื้นที่หน้าตัดของช่องป้อนฝุ่น, m²

ในที่นี้ $P_2 = 2.5 \times 10^6$ Pa

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (100)^2 = 7,854 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

จะได้ $F = 2.5 \times 10^6 \times 7,854 \times 10^{-6} = 19,635$ N

จากแรงอัด 19,635 N ซึ่งเป็นแรงอัดสูงสุดที่ครอบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่งใช้ดันฝุ่นไม้ สามารถหาขนาดของครอบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่งได้จากพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ(หรือพื้นที่หน้าตัดของครอบอกสูบ) สำหรับพื้นที่หน้าตัดหาจากแรงอัดสูงสุดที่คำนวณได้และความดันสูงสุดน้ำมันไฮดรอลิกในระบบจากสมการ

$$A_1 = \frac{F}{P_1} \quad (3.2)$$

โดยที่ $F =$ แรงอัด, N

$P_1 =$ ความดันน้ำมันไฮดรอลิก, Pa

$A_1 =$ พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบไฮดรอลิก, m^2

ในที่นี้ $F = 19,635$ N

$P_1 = 3,000$ psi หรือ 20.6×10^6 Pa

$$\text{จะได้ } A_1 = \frac{19,635}{20.6 \times 10^6} = 9.53 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

ถ้าให้ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ จากพื้นที่หน้าตัดลูกสูบ สามารถคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ(หรือกระบอกสูบ) ได้ดังนี้

$$d = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 9.53 \times 10^{-4}}{\pi}} = 0.035 \text{ m} = 35 \text{ mm}$$

ดังนั้นเลือกให้กระบอกสูบตัวที่หนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ (piston diameter) เท่ากับ 40 mm

ข. การหาช่วงชัก (stroke)

ทำได้โดยคำนวณหาความยาวของรางรับฝุ่น โดยให้ฝุ่นไม้ทั้งหมดก่อนอัดจำนวน $1,412,587 \text{ mm}^3$ อยู่ในรางรับฝุ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm จะได้ความยาวของรางรับฝุ่นโดยประมาณจากสมการ

$$l = \frac{V}{A_2} \tag{3.3}$$

โดยที่ $l =$ ความยาวของรางรับฝุ่น, m

$V =$ ปริมาตรของฝุ่น ไม้ก่อนป้อนเข้าช่องอัด, m^3

$$A_2 = \text{พื้นที่หน้าตัดของรางรับฝุ่น, m}^2$$

$$\text{ในที่นี้ } V = 1,412,587 \text{ mm}^3$$

$$A_2 = 7,854 \text{ mm}^2$$

$$\text{จะได้ } l = \frac{1,412,587}{7,845} = 180 \text{ mm} = 0.18 \text{ m}$$

เมื่อออกแบบช่องอัดเรียบร้อยแล้ว และนำรางรับฝุ่นความยาว 180 mm ไปต่อที่ช่องป้อนฝุ่นในแนวนอน ระยะจากปากช่องป้อนฝุ่นถึงขอบรูกกลางของช่องอัดมีค่า 75 mm (รายละเอียดของช่องอัดดูรูป 3.12) นั่นคือความยาวทั้งหมดของช่วงชักของกระบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่งได้จากผลรวมของความยาวทั้งสอง ได้ผลรวมเท่ากับ 255 mm ดังนั้นเลือกความยาวช่วงชักเท่ากับ 250 mm

3.3.2.2 กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง

หลังจากกระบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่งป้อนฝุ่นไม่เข้าไปในช่องอัดแล้วหยุดนิ่ง ค้างไว้ที่ตำแหน่งยี่สิบสุด ฝุ่นไม่จะถูกขังอยู่ในช่องอัดตรงบริเวณรูกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm แต่เนื่องจากฝุ่นไม่ถูกป้อนเข้ามาทางรูกขนาด 100 mm ดังนั้นจากรูป 3.5 ฝุ่นไม่จะมีความสูงเกินรูกกลางขึ้นไปด้านบนอีก 50 mm จึงต้องมีตัวบีบฝุ่นไม่ลงมาให้ฝุ่นไม่ทั้งหมดอยู่ในรูกกลางของช่องอัดที่จะทะลุไปถึงแม่พิมพ์ ในการออกแบบมีแนวคิดว่าการดำเนินการผลิตที่มากขึ้น สามารถให้กระบอกไฮดรอลิกตัวแรกป้อนฝุ่นได้หลายครั้งเพื่อให้ได้ปริมาณฝุ่นที่ต้องการก่อนที่กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สองจะทำงานเป็นลำดับต่อไป ปริมาตรภายในช่องอัดได้เพื่อไว้สำหรับการป้อนฝุ่นโดยกระบอกไฮดรอลิกตัวแรกจำนวนหลายครั้งมีถึง $1,500,000 \text{ mm}^3$ (คิดปริมาตรรวมทั้งช่องอัด) การหาขนาดกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สองจะคิดที่การป้อนฝุ่นโดยกระบอกตัวแรก 3 ครั้งซึ่งจะได้ปริมาตรฝุ่นไม่ในช่องอัดหลังการป้อนประมาณ $1,201,599 \text{ mm}^3$ ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาตรที่เพื่อไว้ และถึงแม้จะป้อนฝุ่นผ่านช่องขนาด 100 mm ซึ่งปริมาตรช่องอัดที่หน้าตัดนี้มีสูงสุดเพียง $400,553 \text{ mm}^3$ ซึ่งไม่เพียงพอที่จะรองรับการป้อน 3 ครั้งแต่คาดว่าในการป้อน

แต่ครั้งจะมีฝุ่นจำนวนหนึ่งที่กระเด็นออกจากแนวป้อนเข้าไปอยู่ในช่องอัดส่วนที่ถูกบั้งอยู่ได้พอดี

ก. การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ

ในการอัดลงในแนวคิงของกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง กำหนดให้มีพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบอัดเท่ากับ $5,100 \text{ mm}^2$ (โดยเลือกความยาวเท่ากับ 100 mm เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของรูป้อน และเลือกความกว้างเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกลวงคือ 51 mm) สำหรับปริมาตรของฝุ่นไม้ก่อนการอัดสว่างหน้าครั้งที่สอง กำหนดให้เท่ากับ $400,553 \text{ mm}^3$ วางอยู่ในแนวเดียวกับรูป้อนขนาด 100 mm เพราะจากการสังเกตฝุ่นไม้ส่งแรงดันกระจายออกไปด้านข้างน้อย การรับแรงจะรับในแนวตรงมากกว่า ความหนาแน่นเริ่มต้นคือความหนาแน่นเดียวกันกับความหนาแน่นหลังจากอัดครั้งแรกคือ 504 kg/m^3 การอัดจะอัดลงให้ปริมาตรลดลงเท่ากับรูกลวง ดังนั้นปริมาตรสุดท้ายจะเท่ากับ $204,000 \text{ mm}^3$ (คิดที่รูกลวงยาว 100 mm เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของรูป้อน) ความหนาแน่นหลังอัดหาจากปริมาตรที่ลดลงแต่มวลเท่าเดิม

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{m/V_2}{m/V_1} \quad (3.4)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{m/204,000}{m/400,533} = 1.96 \quad (3.5)$$

จากสมการ 3.5 จะได้ $\rho_2 = 1.96 \times 504 = 987.84 \text{ kg/m}^3$

จากกราฟในรูป 2.7 ที่ความหนาแน่นในกระบอกอัด 987.84 kg/m^3 อ่านความดันในกระบอกอัดได้ประมาณ 32 MPa ดังนั้นสามารถหาแรงอัดได้จากสมการ 3.1 โดยที่

$F =$ แรงอัดของกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง, N

$$P_2 = \text{ความดันปรากฏในฝุ่นไม้ในกระบอกอัดซึ่งอัดโดยกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง, N/m}^2$$

$$A_2 = \text{พื้นที่หน้าตัดของช่องอัด, m}^2$$

$$\text{ในที่นี้ } P_2 = 32 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$A_2 = 5,000 \text{ mm}^2 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{จะได้ } F = 32 \times 10^6 \times 5 \times 10^{-3} = 160,000 \text{ N}$$

แรงอัด 160,000 N เกิดจากกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สองที่ความดันน้ำมันไฮดรอลิก 20.6 MPa ดังนั้นสามารถหาขนาดพื้นที่หน้าตัดลูกสูบได้จากสมการ 3.2 โดยที่ $F =$ แรงอัดของกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง, N

$$P_1 = \text{ความดันน้ำมันในกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง, Pa}$$

$$A_1 = \text{พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบของกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง, m}^2$$

$$\text{ในที่นี้ } P_1 = 20.6 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$F = 160,000 \text{ N}$$

$$\text{จะได้ } A_1 = \frac{160000}{206 \times 10^6} = 7.77 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

หรือ $d = 0.0994 \text{ m} = 99.4 \text{ mm}$ (เมื่อ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ)

ดังนั้น เลือกกระบอกไฮดรอลิกตัวที่สองให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

100 mm

ข. การหาช่วงชัก

สำหรับช่วงชักกำหนดให้มีความยาวเพิ่มจากระยะยุบตัวของฝุ่นไม้อีก 30 mm (ระยะยุบตัวลงมาจากด้านบนจนถึงขอบรูกลางเท่ากับ 50 mm) รวมเป็น 80 mm

3.3.2.3 ครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สามหรือครอบอกไฮดรอลิกตัวหลัก

ก. การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ

ครอบอกอัดหรือรูกกลางซึ่งต่อตรงกับแม่พิมพ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์คือ 51 mm คิดเป็นพื้นที่หน้าตัด $2,043 \text{ mm}^2$ จากกราฟรูป 2.7 ที่ความหนาแน่นหลังจากถอดก้อนฝุ่นออกจากครอบอกอัดแล้วเท่ากับ $1,100 \text{ kg/m}^3$ อ่านค่าความดันขณะอัดได้ 200 MPa สามารถคำนวณหาแรงอัดได้จากสมการ 3.1 โดยที่

$F =$ แรงอัดของครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สาม, N

$P_2 =$ ความดันในครอบอกอัดซึ่งอัด โดยครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สาม, Pa

$A_2 =$ พื้นที่หน้าตัดของช่องอัด(รูกกลาง), m^2

ในที่นี้ $P_2 = 200 \times 10^6 \text{ Pa}$

$$A_2 = 2,043 \text{ mm}^2 = 2.043 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

จะได้ $F = 200 \times 10^6 \times 2.043 \times 10^{-3} = 408,600 \text{ N}$

และเช่นเดียวกัน เมื่อทราบความดันของน้ำมันไฮดรอลิกคือ 20.6 MPa และแรงอัดคือ $408,600 \text{ N}$ สามารถหาพื้นที่หน้าตัดของครอบอกไฮดรอลิกตัวหลักโดยใช้สมการ 3.2 จะได้

$$A_1 = \frac{F}{P} = \frac{408,600}{20.6 \times 10^6} = 0.01983 \text{ m}^2$$

หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1589 m หรือ 158.9 mm ดังนั้นเลือกครอบอกไฮดรอลิกตัวที่สามให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 mm

ข. การหาช่วงชัก

สำหรับช่วงชักให้มีขนาดเท่ากับความยาวของรูกกลางของช่องอัดที่ออกแบบไว้คือ เท่ากับ 200 mm

3.3.2.4 กำลังการผลิต

กำลังการผลิตของเครื่องจักรเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก ซึ่งจะส่งผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกไฮดรอลิกทั้งสาม ลักษณะของกระบอกไฮดรอลิกทั้งสามขนาดได้แสดงไว้ในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ลักษณะของกระบอกไฮดรอลิกทั้งสามกระบอก

cylinder	stroke (mm)	piston dia. (mm)	rod dia. (mm)	oil flow		extension		retraction	
				(litre/min)	(gpm)	time (s)	vel. (cm/s)	time (s)	vel. (cm/s)
1 st cylinder	250	40	22	34.44	9.1	0.547	45.7	0.382	65.50
2 nd cylinder	80	100	70	34.44	9.1	1.095	7.31	0.558	14.33
3 rd cylinder	200	160	90	34.44	9.1	7	2.85	4.789	4.18

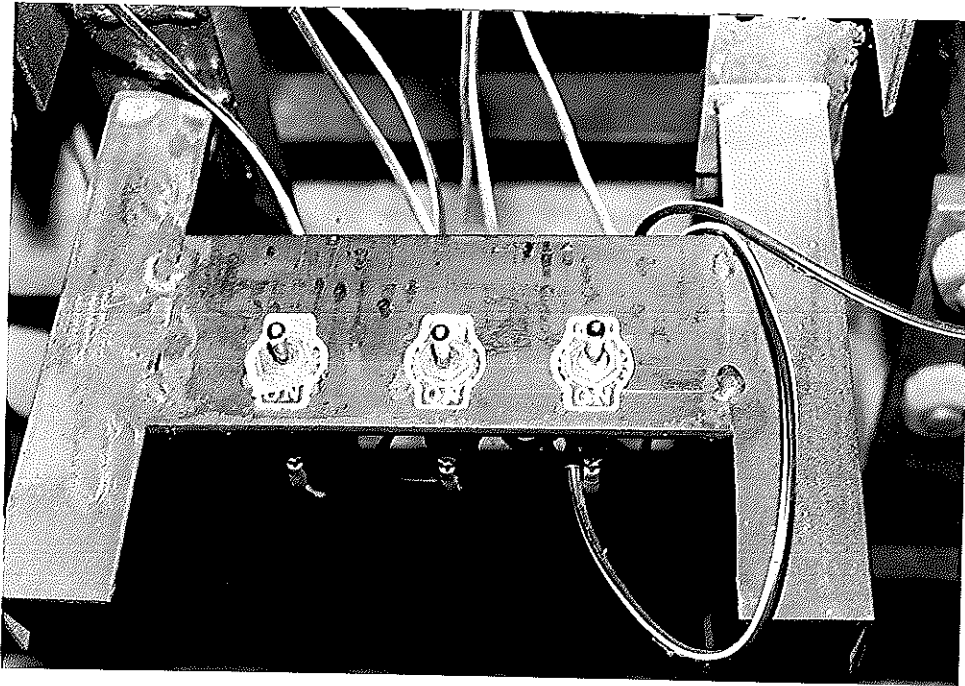
ก. กรณีกระบอกป้อนฝุ่นป้อน 1 ครั้ง มวลที่อัดได้ = 202 g/cycle, เวลา
รวมที่ใช้ = 13.431 s/cycle ได้กำลังการผลิต = 54.14 kg/h

ข. กรณีกระบอกป้อนฝุ่นป้อน 2 ครั้ง มวลที่อัดได้ = 404 g/cycle, เวลา
รวมที่ใช้ = 14.36 s/cycle ได้กำลังการผลิต = 101.28 kg/h

ค. กรณีกระบอกป้อนฝุ่นป้อน 3 ครั้ง มวลที่อัดได้ = 606 g/cycle, เวลา
รวมที่ใช้ = 15.289 s/cycle ได้กำลังการผลิต = 142.69 kg/h

3.4 การทดสอบ

ในการทดสอบเครื่องอัดฝุ่นไม่ใช้การควบคุมโซลินอยด์วาล์วของแต่ละกระบอกสูบ ด้วยสวิทช์เปิดปิดดังแสดงในรูป 3.17



รูป 3.17 สวิตช์ควบคุมด้วยมือ

3.4.1 วิธีการทดลองอัด

1. เปิดสวิตช์ชุดหน่วยกำลังให้น้ำมันไฮดรอลิกมีความดันสูงสุด 80 bars และแหล่งจ่ายไฟ 24 V ที่จ่ายให้โซลินอยด์วาล์ว
2. ตรวจสอบโดยเปิดสวิตช์ควบคุมให้กระบอกไฮดรอลิกทุกตัวอยู่ในตำแหน่งหยุด
3. เทฝุ่นไม้ลงในรางรับฝุ่นจนเต็ม
4. เปิดสวิตช์สั่งให้กระบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่งยัดดันฝุ่นไม้เข้าช่องอัดจนสุดแล้วค้างไว้ที่ตำแหน่งยัดสุด
5. เปิดสวิตช์สั่งให้กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สองยัดออกจนสุดแล้วค้างไว้
6. เปิดสวิตช์สั่งให้กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สามยัดจนสุดเพื่อออกดันฝุ่นไม้ผ่านแม่พิมพ์
7. เปิดสวิตช์สั่งให้กระบอกไฮดรอลิกทั้งสามถอยกลับให้อยู่ในตำแหน่งหยุดเพื่อเริ่มรอบการอัดใหม่

3.4.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองปรากฏว่าอัดไม่ออก มีความฝืดสูง มีเสียงดัง แท่งฝุ่นติดอยู่ในแม่พิมพ์แม้ว่าจะปรับความเร็วให้เป็นศูนย์และเพิ่มความดันน้ำมันแล้วก็ตาม ทั้งนี้เพราะแรงเสียดทานระหว่างแท่งฝุ่นกับผนังแม่พิมพ์มีมากเกินไป วิธีเฉพาะหน้าที่ทำให้แท่งฝุ่นหลุดออกจากแม่พิมพ์คือ ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โดยการเผาด้วยแก๊สอะเซทิลีนชั่วระยะเวลาหนึ่ง แล้วเปิด สวิตช์กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สามดันฝุ่นไม่อีกครั้งหนึ่งปรากฏว่าสามารถดันออกได้ง่าย ผิวสัมผัสระหว่างผนังแม่พิมพ์และแท่งฝุ่นมีความลื่นมาก แท่งฝุ่นที่ได้เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เย็นมีผิวแข็ง คำนวณความหนาแน่นได้ $1,021 \text{ kg/m}^3$ รูป 3.18 แสดงแท่งฝุ่นที่อัดได้

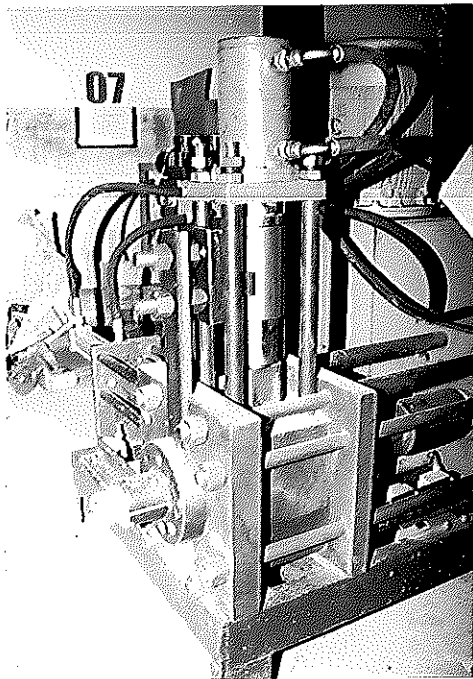


รูป 3.18 แท่งฝุ่นที่อัดได้และมีการให้ความร้อนที่แม่พิมพ์

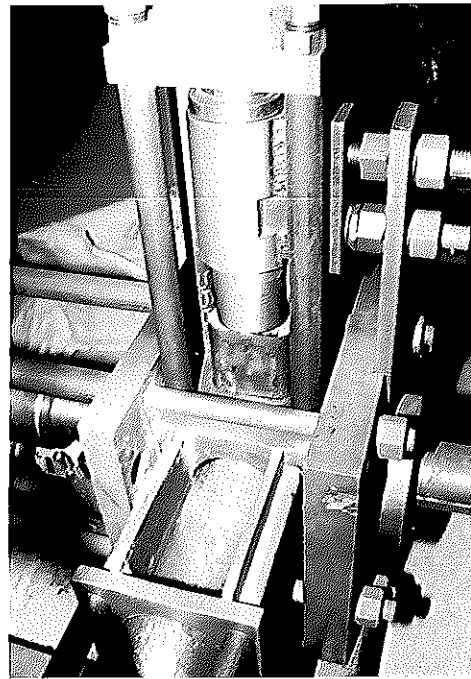
3.5 การปรับปรุงแก้ไข

เพื่อให้สามารถกำหนดความยาวของแท่งฝุ่นได้และเพื่อความสวยงามของแท่งฝุ่นที่อัดออกมา จึงทำการดัดแปลงวิธีการอัดจากวิธีเดิมที่อัดผ่านแม่พิมพ์ มาอัดในเตาแม่พิมพ์

รูป 3.19 แสดงส่วนของเครื่องอัดที่ดัดแปลง ลักษณะการทำงานเริ่มจากทุกกระบอกอยู่ในตำแหน่งหดสุดจากนั้นกระบอกที่หนึ่งยืดออกดันฝุ่นเข้าในช่องอัดแล้วยืดค้างไว้ กระบอกที่สองยืดสุดบีบฝุ่นให้อยู่ในแนวกลางพร้อมทั้งปิดช่องทางออก จากนั้นกระบอกที่สามยืดออกดันฝุ่นในช่องอัดจนได้ความดันสูงสุด กระบอกที่สามถอยกลับเล็กน้อย เพื่อให้กระบอกที่สองหดขึ้นด้านบนได้ง่ายและเปิดช่องทางออก จากนั้นกระบอกที่สามจึงยืดจนสุดดันแท่งฝุ่นออกมา สุดท้ายทั้งสามกระบอกหดสุดพร้อมทำงานในรอบต่อไป กรรมวิธีการอัดแสดงด้วยแผนภูมิเวลาดังรูป 3.20

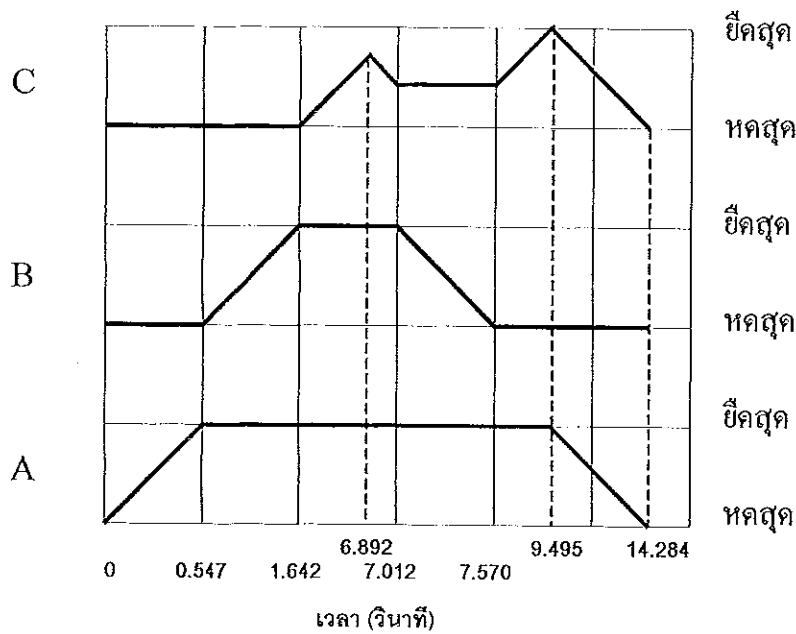


(ก)



(ข)

รูป 3.19 ส่วนของเครื่องอัดที่ดัดแปลงแก้ไข



- A = กระบอกไฮดรอลิกอัดเริ่มแรก
 B = กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง
 C = กระบอกไฮดรอลิกตัวที่สาม

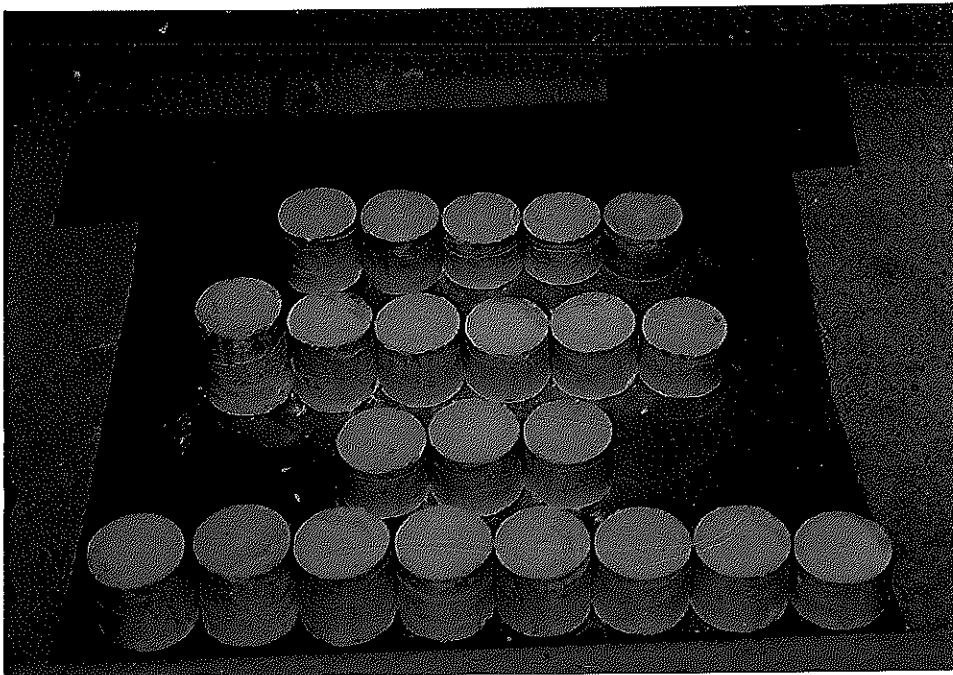
รูป 3.20 แผนภูมิเวลาการทำงานของเครื่องอัดฝุ่นไม้ที่ปรับปรุงแล้ว

3.6 การทดสอบเครื่องต้นแบบที่ได้รับการปรับปรุงแก้ไขแล้ว

จากการทดลองอัดพบว่าระยะเวลาในแต่ละรอบการอัดไม่แตกต่างกันของเครื่องก่อนการแก้ไขมากนัก ได้ทดลองอัดที่ความดันน้ำมัน 60, 80, 100 และ 120 bar ตามลำดับ โดยกำหนดให้กระบอกป้อนฝุ่นป้อนเพียงครั้งเดียวในหนึ่งรอบการอัด ได้ผลดังตาราง 3.2 สำหรับลักษณะของแท่งฝุ่นแสดงไว้ในรูป 3.21

ตาราง 3.2 ผลการอัดฝุ่นไม้ด้วยเครื่องอัดที่ตัดแปลงแล้ว

ความดันน้ำมัน (bar)	ความดันในช่องอัด		ขนาดของแท่งฝุ่น			ความหนาแน่น (kg/m ³)
	(bar)	(MPa)	∅ (mm)	L (mm)	m (g)	
60	590	59	52	54	111.1	968
80	787	78.7	51.7	39	86.18	1,060
100	984	98.4	51.5	40	90.74	1,089
120	1,180	118	51.5	36.8	88.45	1,145



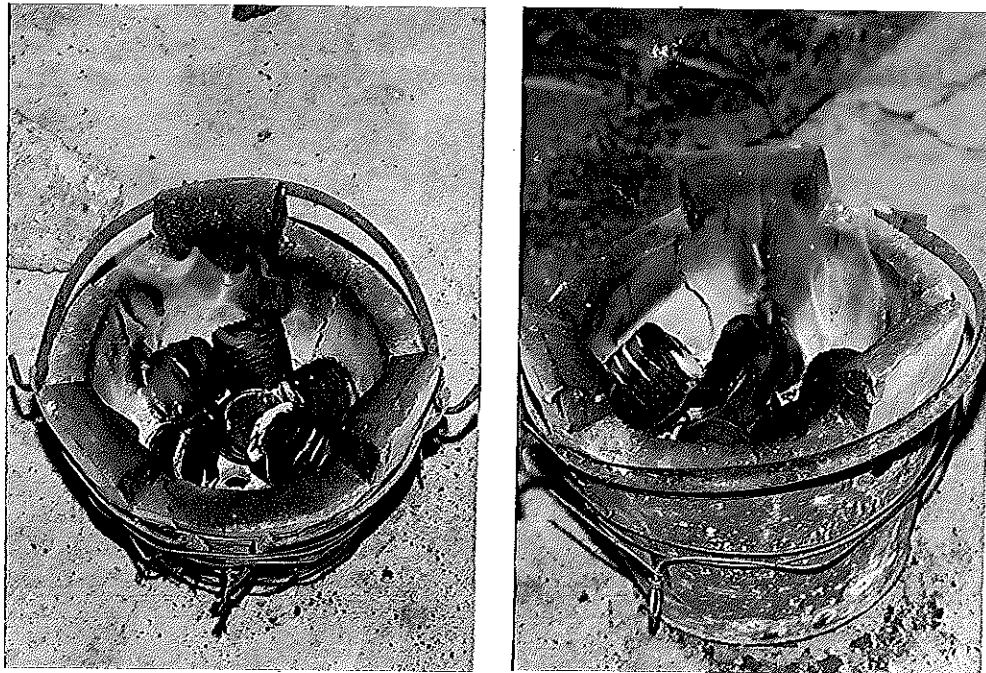
รูป 3.21 ตัวอย่างแท่งฝุ่นที่อัดได้จากเครื่องที่แก้ไขแล้ว

3.7 การทดสอบการเผาไหม้

ได้ทดสอบการเผาไหม้ดังแสดงในรูป 3.22 โดยใช้แท่งฟืนไม้ที่มีความหนาแน่นตามตาราง 3.2 ได้ผลดังตาราง 3.3

ตาราง 3.3 ผลการทดลองเผาแท่งฟืน

ความหนาแน่น (kg/m ³)	จำนวนที่เผา (แท่ง)	ลักษณะการติดไฟ
968	14	เมื่อแท่งฟืนติดไฟแล้วเตาจะแตกออกเป็นแว่น ๆ หนาประมาณ 5 mm มีสีน้ำตาลตรงกลางแผ่น สีแดงที่ขอบ และเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชม. จะเหลือแว่นขนาด 1-2 cm และบางกว่าเดิม มีควัน และมีสีน้ำตาลตรงกลางแผ่น
1,060	14	ติดไฟดี มีควันไม่มากนัก มีการปริแตกในแนวขวางหนาประมาณ 2 cm บางชิ้นแตกในแนวยาวขนาดเฉลี่ยยาวชิ้นละ 4 cm กว้าง 2.5-3 cm และเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชม. แต่ละแท่งมีขนาดเล็กลง และยังเห็นเป็นถ่านแดงเป็นส่วนใหญ่ มีควันเล็กน้อย
1,089	14	เหมือนความหนาแน่น 1,060 kg/m ³
1,145	14	เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชม. ติดไฟหมดถึงเนื้อใน เป็นถ่านแดงคูโซน มีการปริร้าวทั้งแท่ง และแตกออกเป็นก้อนเล็ก ๆ รูปร่างไม่คงที่ แต่โดยทั่วไปจะแตกออกทั้งแนวยาวและแนวขวาง รูปร่างคล้ายทรงกระบอกครึ่งซีก ยาวเฉลี่ยประมาณ 4-5 cm หนา 2-3 cm เริ่มเป็นขี้เถ้าชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชม. และเศษถ่านที่แตกออกนั้นมีขนาดเฉลี่ยเล็กลงเหลือ 1-2 cm แต่ยังเป็นถ่านแดงอยู่



(ก)

(ข)

รูป 3.22 การทดสอบการติดไฟ

3.8 ราคาค่าก่อสร้างเครื่องต้นแบบ

ในการก่อสร้างเครื่องจักรต้นแบบ ชิ้นส่วนบางชิ้นได้ซื้อวัสดุมาผลิตเอง บางชิ้นสั่งทำจากโรงกลึงซึ่งมีทั้งซื้อวัสดุไปให้และให้ทางโรงกลึงหาวัสดุเอง นอกจากนี้ได้มีการกำหนดแบบและสั่งทำเป็นกรณีพิเศษสำหรับหาอุปกรณ์ประกอบหลัก ๆ เช่น กระจบอกไฮดรอลิก, โซลินอยด์วาล์ว, สวิตช์ตำแหน่ง, สายไฮดรอลิกและข้อต่อ เป็นต้น สำหรับชุดหน่วยกำลังของระบบไฮดรอลิกได้นำของที่มีอยู่แล้วที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลมาใช้ แต่ในการประเมินราคาการก่อสร้างจะถือว่าวัสดุและอุปกรณ์ทุกชิ้นต้องมีการจัดหาทั้งหมดและได้รวมเอาราคาของชุดควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ (PLC) ไว้ด้วยเพื่อใช้ประกอบเป็นแนวทางในการปรับปรุงเครื่องต้นแบบให้เป็นระบบอัตโนมัติต่อไป รายละเอียดราคาค่าก่อสร้างได้แสดงไว้ในตาราง 3.4

ตาราง 3.4 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องจักร

ชิ้นส่วน	จำนวน	รวมราคา (บาท)
1. ระบบไฮดรอลิก		
กระบอกที่หนึ่ง (bore 40 mm, stroke 250 mm)	1 กระบอก	2,600
กระบอกที่สอง (bore 100 mm, stroke 80 mm)	1 กระบอก	8,000
กระบอกที่สาม (bore 160 mm, stroke 200 mm)	1 กระบอก	17,200
manifold block (DSG-03-3STATION)	1 ชุด	2,500
solenoid valve (DSG-03-3C-24V DC)	3 ชุด	12,840
สายไฮดรอลิกและข้อต่อ 1/2" × 115 cm	8 เส้น	4,140
ข้อต่อทองเหลือง 1/2"	16 อัน	560
ชุดหน่วยกำลัง (power unit) ขนาด 10 แรงม้า, ปริมาตรถังพัก 21 แกลลอน, อัตราการไหล 7.6 gpm, ความดันน้ำมันสูงสุด 200 บาร์	1 ชุด	50,000
2. ระบบควบคุม		
PLC รุ่น S7 Micro ของ Siemens	1 ชุด	8,000
เบรกเกอร์	1 ชุด	1300
สวิตช์ตำแหน่ง	6 อัน	500
ตู้ควบคุม	1 ตู้	800
สวิตช์ปิด/เปิด (ON/OFF)	1 อัน	200
3. ชิ้นส่วนอื่น ๆ		
แท่นเครื่อง	1 ชุด	500
ตัวเครื่อง (ช่องอัด, ฝาประกบ, แม่พิมพ์, แท่งอัด, เหล็กยึด, ปลอดภัย)	1 ชุด	20,000
เบ็ดเตล็ด (เช่น น็อต, แหวนสปริง, ลวดเชื่อม)	-	2,000
	รวมราคา	133,640

3.9 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็งในโรงงานที่มีฝุ่น ไม้เป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งและนำเชื้อเพลิงแข็งกลับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงาน

กำหนดให้ใช้เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นทำการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้ ลักษณะ
ของแท่งฝุ่นที่ผลิตได้แสดงในตาราง 3.5

ตาราง 3.5 ลักษณะของแท่งฝุ่นที่ผลิต

รายละเอียด	ความหนา แน่นเฉลี่ย	ความ ยาว	มวล	เส้นผ่านศูนย์กลาง		รูปร่าง
				ภายใน	ภายนอก	
แท่งฝุ่นไม้	1,000 kg/m ³	90 mm	202 g	0 mm	51 mm	ทรงกระบอกตัน

กำลังการผลิตของเครื่องต้นแบบแสดงในตาราง 3.6

ตาราง 3.6 กำลังการผลิตของเครื่องจักรต้นแบบ 1 เครื่อง

เวลาในการผลิต 1 แท่ง	13.431 วินาที
มวลของแต่ละแท่ง	202 กรัม
อัตราการผลิตของเครื่องจักร	15 กรัมต่อวินาที
กำลังการผลิตต่อนาที	902.4 กรัม
กำลังการผลิตต่อชั่วโมง	54.14 กิโลกรัม
กำลังการผลิตต่อวัน (8 ชั่วโมง)	433.12 กิโลกรัม
กำลังการผลิตต่อเดือน (25 วัน)	10.83 ตัน
กำลังการผลิตต่อปี (300 วัน)	129.94 ตัน

ก. ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Initial Investment)

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนแสดงไว้ในตาราง 3.7

ตาราง 3.7 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนโดยประมาณ

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
เครื่องจักร	133,640
ที่ดินและอาคาร	-
ลงทุนในงานด้านต่อไปนี้ :	
ค่าแรงงานติดตั้ง	15,000,
การจัดหาและจัดเก็บวัสดุดิบแรกเริ่ม	-
ค่าใช้จ่ายทั่วไป	1,000
รวมราคาการลงทุน	158,640
ค่าการลงทุนรายปี ^(ก)	41,849

(ก) ค่าการลงทุนรายปีคือเงินที่ต้องจ่ายคืนธนาคารต่อปี คิดที่อัตราดอกเบี้ย 10 %
ระยะเวลา การจ่ายคืนเงินลงทุน 5 ปี หาโดยใช้สมการ

$$A = P \times (\text{CRF } i, n) \quad (3.6)$$

- โดยที่ A = เงินที่ต้องจ่ายคืนธนาคารต่อปี (annualized cost)
P = เงินต้นที่กู้มาจากธนาคารซึ่งก็คือเงินลงทุนนั่นเอง
(CRF i, n) = Capital recovery factor of i% interest and n years.
= $[i(1+i)^n] / [(1+i)^n - 1]$
i = อัตราดอกเบี้ย (interest rate)
n = ระยะเวลาการจ่ายคืน (finance period)

ข. ค่าใช้จ่ายโดยตรง (Direct Cost)

กำหนดค่าใช้จ่ายโดยตรง แสดงในตาราง 3.8

ตาราง 3.8 ค่าใช้จ่ายโดยตรง

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าซื้อวัตถุดิบ(ฝุ่นไม้)	-
ค่าจ้างคนงาน ^(ก) เทียบกับการผลิต 1 ตัน	500
ค่าบรรจุภัณฑ์	-
ค่าขนส่ง	-
ค่าบำรุงรักษา ^(ข) เทียบกับการผลิต 1 ตัน	56
ค่าไฟฟ้า ^(ค) เทียบกับการผลิต 1 ตัน	365

(ก) ค่าแรงคนงานวันละ 200 บาท ผลิตได้ 400 กิโลกรัม/วัน คิดเป็น 500 บาท/ตัน

(ข) กำหนดให้ต้องจ่ายค่าบำรุงรักษาปีละ 6,700 บาท (5% ของราคาเครื่องจักร) คิดเป็น 56 บาท/ตัน

(ค) ค่ากระแสไฟฟ้าคิดที่ความต้องการพลังงาน 7.5 kW ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง ปีละ 300 วัน คิดเป็นปีละ 2,400 ชั่วโมง ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปีเท่ากับ $7.5 \text{ kW} \times 2,400 \text{ h} = 18,000 \text{ kWh}$ คิดค่าไฟฟ้าที่ 2.43 บาท/kWh ได้ค่าไฟทั้งหมดเท่ากับ 43,740 บาทต่อผลิตภัณฑ์ 120 ตัน (1ปี) หรือคิดเป็น 365 บาท/ตัน

ค. ค่าใช้จ่ายในการผลิต (Production Cost)

ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตแสดงในตาราง 3.9

ตาราง 3.9 ค่าใช้จ่ายในการผลิต 1 ปี (120 ตัน)

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าแรง	60,000
พลังงาน (ค่าไฟฟ้า)	43,800
ค่าบำรุงรักษา	6,700
รวมค่าใช้จ่ายในการผลิต	110,500

ง. ค่าใช้จ่ายโดยรวม

ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่อปีเป็นผลรวมของค่าการลงทุนรายปีและค่าการผลิตรายปี ซึ่งได้เท่ากับ $41,849 + 110,500 = 152,349$ บาท ต่อการผลิต 1 ปี (120 ต้น) หรือคิดเป็น 1.27 บาท/กิโลกรัม

3.10 สรุป

จากผลการทดสอบมีข้อสังเกตหลักสองประการ ประการแรกพบว่าความดันปรากฏในฝุ่นไม้ในช่องอัดของเครื่องจักรต้นแบบที่ความดันใด ๆ (ตาราง 3.2) นั้นมีค่าต่ำกว่าความดันที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย (ตาราง 2.1 – 2.4) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแม่พิมพ์ของเครื่องต้นแบบมีขนาดโตกว่าระบอบอัดของชุดทดสอบมาก ทำให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของแท่งฝุ่นในเครื่องต้นแบบต่ำกว่าของชุดทดสอบทำให้แรงเสียดทานลดลง แรงอัดส่วนใหญ่จึงนำไปใช้บีบอนุภาคฝุ่นไม้ให้ติดกัน ประการที่สองในการทดสอบเครื่องต้นแบบให้ป้อนฝุ่นครั้งเดียวต่อรอบได้มวลแท่งฝุ่นเฉลี่ยประมาณ 80-100 g ในขณะที่การคำนวณ ได้มวลประมาณแท่งละ 200 g ทั้งนี้เป็นเพราะในการอัดจริงมีการสูญเสียฝุ่นไม้ไปในหลายลักษณะเช่นกระเด็นออกขณะกระบอกสูบที่หนึ่งดันฝุ่นเข้าช่องอัด เป็นเพราะฝุ่นกระเด็นหลุดออกทางด้านหน้าของทางออกก่อนที่ฝาปิดช่องอัดจะปิดเป็นต้น ดังนั้นกำลังการผลิตต่ำสุดที่ทำได้คือประมาณ 25 kg/h คิดเป็น 50% ของกำลังการผลิตตามทฤษฎี สำหรับกำลังการผลิตสูงสุดที่คาดหวังไว้จากการป้อนฝุ่น 3 ครั้งก่อนอัดจริงซึ่งเท่ากับ 143 kg/h หากคิดการสูญเสียฝุ่นไม้ขณะอัดประมาณ 50% เช่นเดียวกับการอัดครั้งแรกจะได้กำลังการผลิตสูงสุดประมาณ 70 kg/h

ในการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการทำเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานเดิมตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า วัตถุดิบมีอย่างเพียงพอและไม่ต้องซื้อ, ไม่ต้องลงทุนเรื่องที่ดินและอาคาร รวมทั้งไม่ต้องใช้บรรจุภัณฑ์และขนส่ง จากการคำนวณค่าใช้จ่ายรายปีได้ค่าใช้จ่ายรายปีเทียบกับปริมาณการผลิตเท่ากับ 1.27 บาท/กิโลกรัม ในขณะที่ราคารับซื้อไม้ฟืนโดยโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยังพาราเฉลี่ยอยู่

ที่ 50 สตางค์/กิโลกรัม จะเห็นว่าค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตแพงกว่าราคาไม้พินเมื่อเทียบกับกิโลกรัม ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับปรุงเครื่องจักรให้มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 100 กิโลกรัม/ชั่วโมง ได้โดยการปรับปรุงระบบช่องอัดและรับฝุ่นให้มีขนาดโตขึ้น ที่กำลังการผลิตดังกล่าวจะได้ค่าใช้จ่ายในการผลิตประมาณ 60 สตางค์ต่อกิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับราคาไม้พิน

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

ฝุ่นไม้ที่เกิดจากกระบวนการขัดผิวในโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพาราเป็นขยะที่ต้องการกำจัดทิ้ง การกำจัดฝุ่นไม้ในปัจจุบันกระทำโดยการเทหรือเผาทิ้ง การเททิ้งต้องใช้พื้นที่มากและมีการฟุ้งกระจายในอากาศ เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ เช่นเดียวกับการเผาทิ้งที่เกิดควันเพราะเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ปัจจุบันโรงงานกำจัดฝุ่นไม้ไม่ทัน เกิดการสะสมอยู่ในบริเวณ โรงงานและพื้นที่ใกล้เคียง การศึกษาวิจัยในโครงการนี้จึงเน้นการศึกษาคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงแข็งของฝุ่นไม้ และการออกแบบและสร้างเครื่องจักรต้นแบบสำหรับอัดฝุ่นไม้เป็นเชื้อเพลิงแข็งให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ จากการวิจัยพบว่าฝุ่นไม้มีความหนาแน่นบัลค์ (bulk density) โดยประมาณเท่ากับ 200 kg/m^3 และความหนาแน่นที่เหมาะสมในการทำเป็นเชื้อเพลิงแข็งอยู่ที่ 900 kg/m^3 ขึ้นไป ซึ่งที่ความหนาแน่นดังกล่าวสามารถลดปริมาตรของฝุ่นไม้ลงได้เหลือประมาณ 1 ใน 7 จากปริมาตรเริ่มต้นก่อนทำการอัดแห้ง ขนาดของแท่งฝุ่นไม้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 mm ความยาว 3 - 9 เซนติเมตร น้ำหนักเฉลี่ยก้อนละ 200 กรัม ทนการกระแทก และทนความชื้นได้ดี การเผาไหม้ดี ติดไฟง่าย มีควันน้อย ติดไฟนานประมาณ 3 ชั่วโมง แท่งเชื้อเพลิงจากฝุ่นไม้ผลิตจากเครื่องจักรต้นแบบที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

สำหรับเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้ที่ได้สร้างขึ้นเป็นเครื่องจักรที่ใช้ระบบไฮดรอลิก (oil-hydraulic-type briquetter) ถ้าหากปรับปรุงเป็นระบบอัด โนมัติจะมีกำลังการผลิตประมาณ 50 kg/hr ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด 7.5 kW ลักษณะการอัดจะมีการป้อนฝุ่นไม้เข้าช่องอัดโดยใช้กระบอกลูกสูบไฮดรอลิกตัวเล็ก จากนั้นฝุ่นไม้จะถูกบีบให้ได้เส้น

ผ่านศูนย์กลางที่ต้องการ ต่อมาถูกอัดด้วยกระบอกไฮดรอลิกตัวหลักและดันออกจากช่องอัด การอัดจะไม่มีทำให้ความร้อน

จากการนำฝุ่นไม้มาศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับรูปร่าง ความหนาแน่น แรงอัด เพื่อให้ได้แท่งเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน และสร้างเครื่องจักรต้นแบบสำหรับผลิตแท่งเชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้ขึ้นมา ทำให้มีแนวทางเพิ่มขึ้นในการแก้ปัญหาการกำจัดฝุ่นไม้ เป็นการนำชีวมวลกลับมาใช้ใหม่อย่างคุ้มค่า ไม่เหลือทิ้ง อีกทั้งมีความคุ้มค่าเมื่อมองในแง่ของสุขภาพ และสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น ของบุคคล โรงงาน และ พื้นที่ใกล้เคียง การวิจัยนี้เน้นการสร้างเครื่องจักรที่ใช้งานได้จริงเป็นหลัก เพื่อให้ได้นำผลงานที่ได้ไปใช้งานในโรงงานได้จริงทันทีหรืออาจมีการปรับปรุงแก้ไขในบางจุดเพื่อประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับแต่ละโรงงานต่อไป หรือเพื่อใช้งานในกรณีที่วัตถุดิบอื่นที่ไม่ใช่ฝุ่นไม้ได้ด้วย

4.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากฝุ่นไม้มีความหนาแน่นน้อย มีการยุบตัวสูง และมีการไหลได้น้อยเมื่อเทียบกับเศษวัสดุอย่างอื่นเช่น สะเก็ดไม้ หรือขี้เลื่อย การนำฝุ่นไม้เพียงอย่างเดียวมาอัดเป็นแท่งจะพบปัญหาใหญ่สองประการ ประการแรกคือปัญหาในการนำฝุ่นจากที่เก็บเข้าสู่เครื่องอัดซึ่งพบว่าฝุ่นไม้ไม่ไหลและค้างอยู่ในภาชนะด้านบน โดยเฉพาะผิวล่างจะโค้งคล้ายผืนผ้า การทำให้ภาชนะบรรจุฝุ่นต้นสะเก็ดเพื่อทำให้ฝุ่นไหลลงมากลับทำให้ฝุ่นที่ค้างอยู่แน่นมากยิ่งขึ้น การแก้ไขอาจใช้วิธีสูญญากาศดูดฝุ่นจากที่เก็บเข้าช่องอัดโดยตรง ปัญหาประการที่สองคือการฟุ้งกระจายของฝุ่นไม้ออกจากช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นส่วนของเครื่องจักรรอบ ๆ บริเวณที่ทำการอัด ทั้งนี้เกิดจากในระหว่างการบีบอัดนั้นอากาศภายในช่องอัดพยายามหนีออกมาและพาเอาฝุ่นออกมาด้วย การแก้ไขควรปรับปรุงช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสให้แคบลงกว่าเดิมและควรสร้างที่ครอบเครื่องจักรทั้งเครื่อง โดยการควบคุมเครื่องจะทำจากภายนอกที่ครอบ

วิธีการอื่นที่คิดว่าสามารถช่วยลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นไม้ขณะทำการอัดได้และทำให้ฝุ่นไม้ไหลได้ดีขึ้นคือการผสมฝุ่นไม้กับขี้เลื่อยในสัดส่วนที่พอเหมาะก่อนป้อนเข้า

เครื่องอัด ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการอัดล่วงหน้าลงได้รวมทั้งสามารถใช้เครื่องอัดชนิดอื่นได้เช่น เครื่องอัดแบบสกรูเป็นต้น ซึ่งควรมีการศึกษาวิจัยต่อไป

อนึ่งในการใช้วิธีอัดผ่านแม่พิมพ์ ควรมีระบบให้ความร้อนเสริมขณะอัดเพื่อให้อนุภาคฝุ่นจับยึดกันได้ดีขึ้น แท่งเชื้อเพลิงเคลื่อนที่ออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ซึ่งอาจจะใช้พลังงานกลในการอัดลดลงได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เห็นว่าเป็นระบบที่ซับซ้อนต่อการออกแบบจึงยังไม่ได้ศึกษาวิจัยในแง่นี้

บรรณานุกรม

- ขวัญชัย สีนทิพย์สมบูรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร. 2537. ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม.
กรุงเทพฯ : ซีเอ็ด.
- วิชัยยาง, สถาบัน. 2535. ข้อมูลยางพารา.
- ศูนย์เศรษฐกิจอุตสาหกรรมภาคใต้. 2537. “ภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมภาคใต้”, ข่าวเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. มกราคม-กันยายน 2537, 1-20.
- สุพจน์พงษ์ วิไลพันธ์. 2538. “การพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ยางพาราใน 5 จังหวัดชายแดนภาคใต้”, เอกสารวิจัยส่วนบุคคล ในลักษณะวิชาการเศรษฐกิจ วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร หลักสูตรการป้องกันราชอาณาจักรภาครัฐร่วมเอกชน. รุ่นที่ 7 ปีการศึกษา 2537-2538.
- เอสทีเอ กรุ๊ป (1993), บมจ. 2537. ข้อมูลเบื้องต้นกรรมวิธีการผลิตไม้อัดสลับชั้น แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง และแผ่นขึ้นไม้อัด.
- Bhattacharya, S.C. and Sharma, Mahen. 1997. “A Review of Biomass Densification Technology and Recent Advances”, Second ASEAN Renewable Energy Conference, 5-9(November 1997). Phuket, Thailand. 747-758.
- CRA (Centre de Rescherches Agronomiques de l’Etat Gembloux). 1987. La Densification de la Biomass. Commission des Communuates Europeennes.
- Department of Energy Development and Promotion (DEDP). Ministry of Science, Technology and Environment. 1997. Thailand Energy Situation 1997.
- Eriksson, S. and Prior, M. 1990. The Briquetting of Agricultural Wastes for Fuel. FAO Environment and Energy Paper, 11. Rome : FAO.
- Grover, P.D. and Mishra, S.K. 1996. Biomass Briquetting : Technology and Practice. Regional Wood Energy Development Programme in Asia, Field Document No. 46. Bangkok : FAO.

- Grover, P.D. and Mishra, S.K. 1996. Proceedings of The International Workshop on Biomass Briquetting, New Delhi, India, 3-6(April 1995). Regional Wood Energy Development Programme in Asia, Report No. 23. Bangkok : FAO.
- Hoi Why Kong. 1997. "Wood and Charcoal Making in Malaysia", International Symposium on Advances in Alternative & Renewable Energy, 22-24(July 1997). Universiti Teknologi Malaysia. 76-84.
- Kaminski, T. 1988. Biological Control of The Russian Wheat Aphid in Saskatchewan. Project number 88000178, November 1998. Agricultural Development Fund.
- Krist-Spit, C.E. and Wentink, G. 1985. The Applicability of Briquettes from Biomass Residues in Asian Domestic Cooking Stoves. TNO, Ref. 85-065. Apeldoorn.
- Mechanical Wood Products Branch, Forest Industries Division, FAO Forestry Department. 1985. Industrial Charcoal Making. FAO Forestry Paper, 63. Rome : FAO.
- Norvelle, F. Don. 1995. Fluid Power Technology. USA : West Publishing Company.
- Pellet Fuels Institute (PFI). 1995. Fuel Cost Comparison. <http://www.pelletheat.org/fuel/fuel.html>. (May, 5, 1999)
- Pellet Fuels Institute (PFI). 1995. Residential Pellet Fuel Standard. <http://www.pelletheat.org/fuel/StandardForResidentialFuel.shtml>. (May, 5, 1999)
- Prasertsan S. and Vanaprak P. 1998. "Rubber Plantation : An Overlooked Dendropower", Scientific Conference on Non-Conventional Energy Research, The 5th ASEAN Science and Technology Week, 12-14(October). Hanoi, Vietnam.

- Suteera Prasertsan. 1991. Feasibility Study on The Use of Non-Wood Wastes From Rubber Plantation for Energy Production. HatYai, Thailand : Prince of Songkla University.
- Weisman, Joel and Eckart, Roy. 1985. Modern Power Plant Engineering. Englewood Clifts, New Jersey : Prentice-Hall, Ince.
- World Bank. 1987. Sawmill Residues Utilisation in Ghana. ESMAP Report 074/87.

ภาคผนวกที่ 1
แนวทางการบำรุงรักษา

ตาราง A. 1 วิธีการบำรุงรักษาระบบไฮดรอลิก

สิ่งที่ควรตรวจสอบ	ช่วงเวลาที่ตรวจสอบ	วิธีการและจุดประสงค์ในการตรวจสอบ
ปั๊มมีเสียงดังผิดปกติ	1 ครั้ง/วัน	ตรวจสอบสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้โดยการฟังเสียง และตั้งเกดดู - ฟองอากาศปนในน้ำมัน - สเตรนเนอร์อุดตัน - การสึกหรอของอุปกรณ์ชิ้นใดชิ้นหนึ่งในปั๊ม
ระดับสูญญากาศในท่อดูดของปั๊ม	1 ครั้ง/3 เดือน	ตรวจสอบ โดยดูว่าความดัน สูญญากาศจากเกจวัดสูญญากาศที่ติด ใกล้กับท่อดูดของปั๊มเพื่อตรวจสอบดูการอุดตันที่สเตรนเนอร์
อุณหภูมิที่ตัวปั๊ม	1 ครั้ง/3 เดือน	ตรวจสอบเพื่อดูว่ามีการสึกหรอที่อุปกรณ์หรือเบริงหรือไม่
ความดันในการส่งน้ำมันของปั๊ม	1 ครั้ง/3 เดือน	ตรวจสอบเพื่อดูว่ามีการสึกหรอที่อุปกรณ์หรือไม่
เสียงผิดปกติที่คัปปลิ้งต่อเพลนอเตอร์ขับปั๊ม	1 ครั้ง/6 เดือน	ตรวจสอบโดยการฟังเสียงแล้วตรวจสอบการสึกหรอและดูศูนย์หรือแนวของเพลนขับปั๊มว่าผิดไปหรือไม่
คัปปลิ้งที่ใช้งานมานาน - ดูการชำรุด	1 ครั้ง/ปี	เปลี่ยนจาระบีสำหรับคัปปลิ้งแบบโซ่
สเตรนเนอร์ที่ท่อดูดและบริเวณปลายท่อดูดที่ใช้ต่อ	1 ครั้ง/3 เดือน	ทำความสะอาดสเตรนเนอร์ที่ท่อดูดด้วยน้ำยาแล้วเป่าโดยใช้ลมเป่าจากค่านในออกมา
มอเตอร์มีเสียงผิดปกติ	1 ครั้ง/ 3 เดือน	ตรวจสอบโดยการฟังเสียงเพื่อดูว่ามีการสึกหรอที่อุปกรณ์หรือไม่
เกจวัดความดันที่ติดตั้งในบริเวณต่าง ๆ ของวงจร	1 ครั้ง/6 เดือน	ตรวจสอบเพื่อดูการทำงานของวงจรว่าปกติหรือไม่และมีการสึกหรอที่อุปกรณ์ใด ๆ รวมทั้งตรวจสอบการทำงานและการสึกหรอของเกจ
ความเร็วของอุปกรณ์การทำงาน	1 ครั้ง/6 เดือน	ตรวจสอบเพื่อดูการทำงานผิดปกติหรือไม่และการรั่วซึมภายในเพิ่มขึ้นหรือไม่ อันเนื่องมาจากการสึกหรอของอุปกรณ์
จังหวะการทำงานของเครื่องจักรและระยะเวลาที่โหลดที่มี	1 ครั้ง/6 เดือน	ตรวจสอบเพื่อดูว่าอุปกรณ์ใดทำงานผิดปกติหรือไม่ และดูว่าการรั่วซึมเพิ่มขึ้นหรือไม่ อันเนื่องมาจากการสึกหรอของอุปกรณ์
ปะเก็นที่อุปกรณ์การทำงาน	1 ครั้ง/ปี	เปลี่ยนปะเก็นใหม่
อุณหภูมิที่เบริง	1 ครั้ง/6 เดือน	ตรวจสอบเพื่อดูการสึกหรอของเบริง

ตาราง A. 1 (ต่อ)

สิ่งที่ควรตรวจสอบ	ช่วงเวลาที่ตรวจสอบ	วิธีการและจุดประสงค์ในการตรวจสอบ
ความดันของแก๊สในถัง สะสมพลังงานเมื่อเริ่มทำงาน	1 ครั้ง/3 เดือน	ถ้าลดลงให้ตรวจดูการรั่วโดยใช้ฟองสบู่
เกจวัดความดัน เทอร์โมมิเตอร์ เวลาและ จังหวะในการทำงาน	1 ครั้ง/ปี	ตรวจสอบความถูกต้อง และปรับให้ได้ค่ามาตรฐาน ที่กำหนด
สายไฮดรอลิก	1 ครั้ง/6 เดือน	ตรวจสอบว่ามีรอยฉีกขาดเสียหายหรือไม่
ซีลในอุปกรณ์ต่าง ๆ และซีล ในอุปกรณ์ท่อทาง	1 ครั้ง/6 เดือน	ตรวจสอบสภาพซีล โดยดูว่ามีการรั่วซึมเกิดขึ้นหรือไม่
อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน	1 ครั้ง/6 เดือน	สำหรับอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนแบบใช้อากาศ ให้ทำ ความสะอาดอุปกรณ์ระบายความร้อน และสำหรับ อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่ใช้น้ำหล่อเย็น ให้ทำความ สะอาดภายในหม้อน้ำ
เกลียวข้อต่ออุปกรณ์และที่ยึด ท่อ	1 ครั้ง/6 เดือน	ในระบบที่มีการสั่นสะเทือนมาก ๆ ควรตรวจสอบให้อยู่ ในสภาพแข็งแรง ยึดแน่นเสมอ
ระบบไฮดรอลิกทั้งระบบ	1 ครั้ง/ปี	ถอดอุปกรณ์ออกตรวจสอบสภาพ และทำความสะอาดภายในท่อทาง
สภาพน้ำมันไฮดรอลิก	1 ครั้ง/3 เดือน	เปลี่ยนถ่ายน้ำมันถ้ามีสภาพไม่ได้มาตรฐาน
อุณหภูมิของน้ำมัน	1 ครั้ง/วัน	ถ้าอุณหภูมิผิดปกติ ให้ตรวจสอบหาสาเหตุและแก้ไข
ระดับน้ำมันในถังพัก	1 ครั้ง/เดือน	เติมน้ำมันเมื่อมีระดับลดลง และถ้าลดลงผิดปกติให้ ตรวจสอบหาจุดรอยรั่ว
น้ำมันที่น้ำปะปน	1 ครั้ง/3 เดือน	ถอดปลั๊กระบายของถังพัก
การป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่ว ในระบบ	1 ครั้ง/ปี	ถ้าหากไฟฟ้ารั่ว ให้ตรวจสอบมอเตอร์ สายลวด โซลีนอยด์วาล์ว สวิตช์จำกัด ฯลฯ เพื่อหาสาเหตุ
ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อน วงจร	1 ครั้ง/3 เดือน	ตรวจสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อป้องกันกระแสไฟสูงเกิน กำหนด

ตาราง A. 2 วิธีการบำรุงรักษาชิ้นส่วน โครงสร้างเครื่องจักร

สิ่งที่ควรตรวจสอบ	ช่วงเวลาที่ต้องตรวจสอบ	วิธีการและจุดประสงค์ในการตรวจสอบ
แท่นเครื่องและการยึดตัวเครื่องเข้ากับแท่นเครื่อง	1 ครั้ง/วัน	ตรวจสอบเพื่อดูว่าแท่นเครื่องมีรอยแตกร้าวตรงรอยเชื่อม และมีการโค้งงอหรือบิดตัวของแท่นเครื่องหรือไม่ และดูว่าขันน็อตที่ยึดตัวเครื่องกับแท่นเครื่องแน่นพอหรือไม่
ฝาประกบหน้า ฝาประกบหลัง ช่องอัด เบ้าแม่พิมพ์ เหล็กยึด และกระบอกไฮดรอลิกทั้งสามกระบอก	1 ครั้ง/วัน	ทำความสะอาด และตรวจสอบการขันน็อตทุกจุดว่ามีความแน่นพอหรือไม่ ฟังเสียงคังและการสั่นสะเทือนเนื่องจากจุดขันน็อตไม่แน่น หากจุดคังกล่าวและขันให้แน่น และดำเนินการหยุดใช้เครื่องเป็นเวลานานๆ ให้ทำความสะอาดโดยใช้ลมเป่าฝุ่นตามซอกมุม เช็คและชโลมน้ำมันหล่อลื่นชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กเพื่อกันสนิม และคลุมผ้าให้มิดชิด

ตาราง A. 3 วิธีการถอดประกอบเครื่องจักร

ชื่อชุดและชิ้นส่วน	วิธีการถอดแยก	วิธีการประกอบ
<p>1. ชุดป้อนฝุ่นและบีบฝุ่นช่วงที่หนึ่ง ประกอบด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> - กระบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่ง - แท่งอัด - รางรับและป้อนฝุ่น - ฝาประกบหน้า - ฝาประกบหลัง - เหล็กยึด - ปลอกเหล็ก - นัตตหกเหลี่ยม และ แทวนสปริง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. คลายเกลียวที่ยึดระหว่างแท่งอัดและปลายก้านสูบของกระบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่ง โดยการหมุนตัวแท่งอัดทวนเข็มนาฬิกา 2. ถอดน็อตที่ยึดระหว่างฝาประกบหลังและหน้าแปลนของกระบอกไฮดรอลิกตัวที่หนึ่งออก แล้วดึงกระบอกไฮดรอลิกออก 3. ถอดน็อตที่ยึดระหว่างเหล็กยึดและฝาประกบหลังออก จากนั้นดึงฝาประกบหลัง ปลอกเหล็ก แท่งอัด ฝาประกบหน้า และรางรับฝุ่น ออกตามลำดับ 4. ถอดเหล็กยึดทั้งสี่ชิ้นออกจากช่องอัด 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ขันเหล็กยึดทั้งสี่ชิ้นเข้ากับช่องอัด 2. นำรางรับฝุ่นประกบกับทางเข้าช่องอัด จากนั้นนำฝาประกบหน้าประกบกับด้านที่เหลือของรางรับฝุ่นโดยสวมเข้ากับเหล็กยึด 3. ใส่ปลอกเหล็กเข้ากับเหล็กยึด และใส่แท่งอัดให้ตรงช่องอัด จากนั้นนำฝาประกบหลังสวมเข้ากับเหล็กยึดแล้วขันน็อตยึดที่ปลายเหล็กยึดให้แน่น 4. ประกอบกระบอกไฮดรอลิกเข้ากับฝาประกบหลัง และขันแท่งอัดยึดติดกับปลายก้านสูบของกระบอกไฮดรอลิก

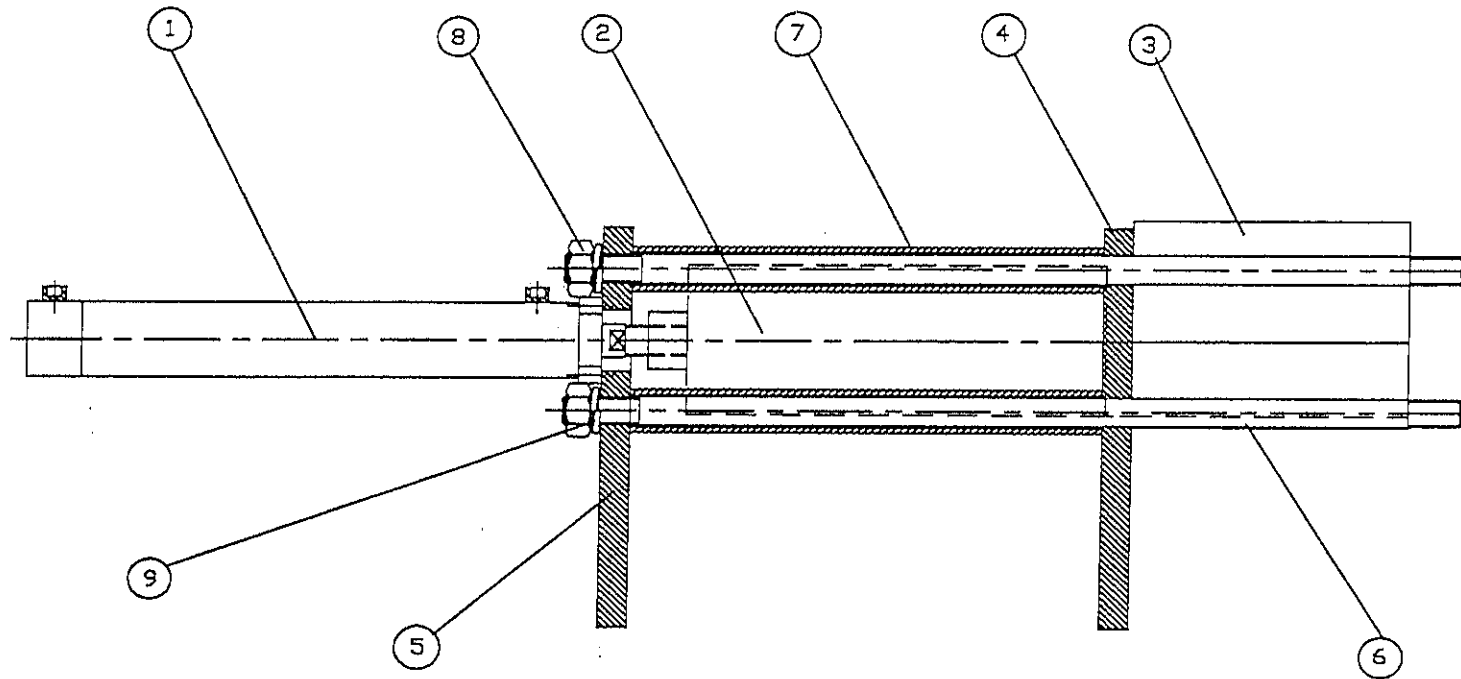
ตาราง A. 3 (ต่อ)

ชื่อชุดและชิ้นส่วน	วิธีการถอดแยก	วิธีการประกอบ
<p>2. ชุดบีบฝุ่นช่วงที่สอง ประกอบด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> - ครอบบอกไฮดรอลิกตัวที่สอง - คัปปลิ้ง - แท่งอัด - เหล็กยึด - ปลอกเหล็ก - นัทหกเหลี่ยม และ แหวนสปริง - ฝาปิดทางออก - เกลียวต่อ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ถอดน็อตที่ปลายเหล็กยึดทั้งสี่ 2. ใช้เครื่องมือขนาดเล็กดึงครอบบอกไฮดรอลิกตัวที่สองพร้อมทั้งคัปปลิ้ง แท่งอัด และฝาปิดช่องอัด ซึ่งขันติดเป็นชุดเดียวกัน ออกทางค้ำบน 3. ถอดปลอกเหล็กที่สวมเหล็กยึดออกพร้อมทั้งถอดเหล็กยึดออกจากช่องอัด 4. จากข้อ 2. สามารถถอดแยกชิ้นส่วนต่างๆ ออกจากการยึดอยู่กับครอบบอกไฮดรอลิกตัวที่สองได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้ากับครอบบอกไฮดรอลิกตัวที่สองก่อน โดยเริ่มจากขันคัปปลิ้งเข้ากับปลายค้ำบน จากนั้นขันแท่งอัด และฝาปิดช่องอัดเข้ากับคัปปลิ้ง ตามลำดับ 2. ขันเหล็กยึดเข้ากับช่องอัดพร้อมทั้งสวมปลอกเหล็กเข้ากับเหล็กยึด 3. ใช้เครื่องมือช่วยหย่อนชุดครอบบอกไฮดรอลิกที่ประกอบแล้วจากข้อ 1. ลงตามแนวค้ำ โดยให้หน้าแปลนของครอบบอกไฮดรอลิกสวมเข้ากับเหล็กยึดทั้งสี่ ปรับแท่งอัดให้หันไปในทิศทางที่ถูกต้องและสวมลงในรูช่องอัด ไล่พอดี 4. ขันน็อตยึดครอบบอกไฮดรอลิกกับเหล็กยึดให้แน่น
<p>3. ชุดบีบฝุ่นช่วงที่สาม ประกอบด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> - ครอบบอกไฮดรอลิกตัวที่สาม - คัปปลิ้ง - แท่งอัด - ช่องอัด - ฝาประกบหน้า - ฝาประกบหลัง - เหล็กยึด - ปลอกเหล็ก - ช่องทางออก - นัทหกเหลี่ยม แหวนสปริง และ เกลียวทรงกระบอกหัวฝัง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ถอดน็อตที่ยึดช่องทางออกกับฝาประกบหน้า แล้วยกช่องทางออก ออกมา 2. หาแท่งไม้อัด 1 นิ้ว ที่ทำยัดครอบบอกไฮดรอลิก โดยให้แท่งไม้แน่นพอดีให้ครอบบอกอยู่ในแนวระดับ 3. ถอดแท่งอัดออกจากคัปปลิ้งแล้วใช้มือค้ำแท่งอัดออกทางช่องทางออก จากนั้นถอดคัปปลิ้งออกจากปลายค้ำบน 5. ใช้เชือกหรือโซ่ที่แข็งแรงคล้องครบบริเวณช่องอัดแล้วใช้เครื่องมือเชือกหรือโซ่นั้น ใ้ให้ดึงพอดีในแนวค้ำ 6. ถอดน็อตทั้ง 14 ตัวออกจากปลายเหล็กยึด ทั้ง 7 เส้น 	<ol style="list-style-type: none"> 1. กรณีครอบบอกไฮดรอลิกวางอยู่ในแนวนอน ให้หาไม้มารองให้อยู่ในแนวระดับ จากนั้นประกอบแท่งอัดเข้ากับค้ำบน โดยใช้คัปปลิ้งเป็นตัวยึด 2. สวมฝาประกบหลังเข้ากับแท่งอัดพร้อมทั้งเหล็กยึดและปลอกเหล็ก 3. ใช้เครื่องมือยกช่องอัดสวมเข้ากับฝาประกบหลังจากนั้นนำฝาประกบหน้ามาประกบกับช่องอัด 4. ขันน็อต 14 ตัว ที่ปลายเหล็กยึดทั้ง 7 เส้นให้แน่น 5. ประกอบช่องทางออกเข้ากับฝาประกบหน้า

ตาราง A. 3 (ต่อ)

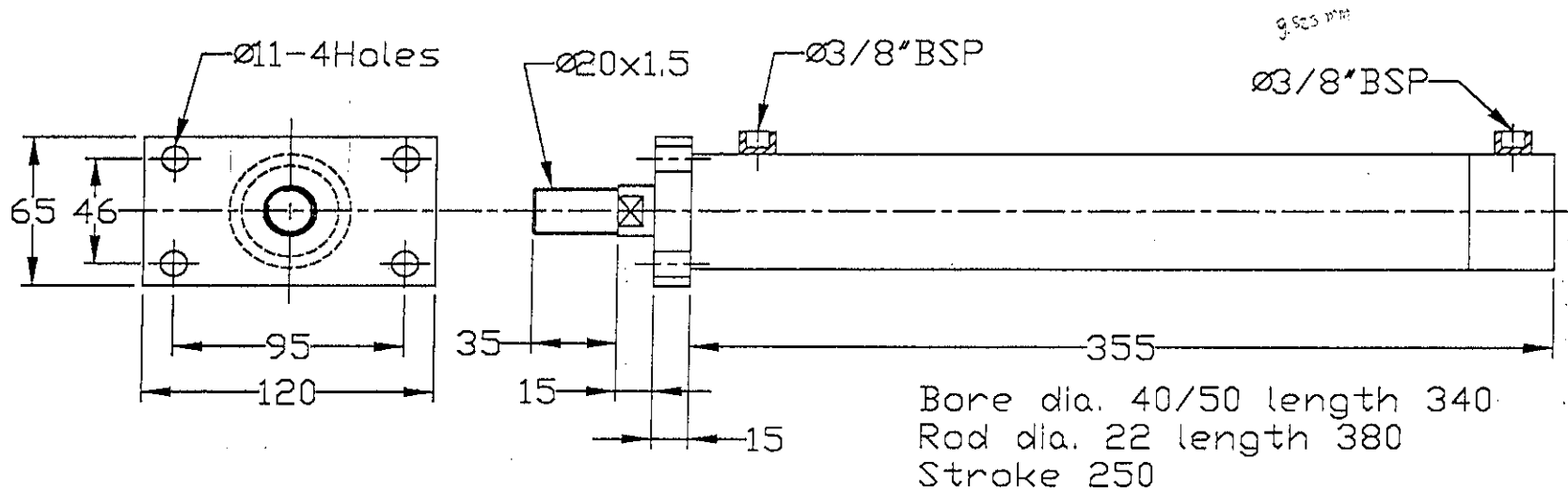
ชื่อชุดและชิ้นส่วน	วิธีการถอดแยก	วิธีการประกอบ
3. ชุดบีบฝุ่นช่วงที่สาม (ต่อ)	<p>7. ใช้ไม้ช่วยเคาะและดึงเหล็กยึดออกจากแนวนอน ปลอกเหล็กจะหลุดออกมาเช่นกัน</p> <p>8. ให้แน่ใจว่าช่องอัดถูกแขวนไว้อย่างมั่นคงแล้ว จากนั้นถอดฝาประกบหน้าและฝาประกบหลังออกจากช่องอัด ตามลำดับ</p> <p>9. ค่อย ๆ ใช้เกรนช่วยหย่อนช่องอัดลงจนแตะพื้น</p> <p>10. วิธีถอดแยกอีกวิธีหนึ่งคือเมื่อถอดชุดบีบฝุ่นช่วงที่หนึ่งและสองออกจากชุดบีบฝุ่นช่วงที่สามแล้ว และถอดน็อตที่ยึดชุดบีบฝุ่นช่วงที่สามกับแท่นเครื่องออกแล้ว ให้ใช้เกรนยกชุดบีบฝุ่นช่วงที่สามลงมาทั้งชุดแล้วตั้งในแนวค้ำ โดยให้ท้ายกระบอกลอยตัวอยู่ด้านล่างสุด จากนั้นทำการถอดช่องทางออก ฝาประกบหน้า ช่องอัด ฝาประกบหลัง เหล็กยึด ปลอกเหล็ก แท่งอัด และกัมป์ถึง ตามลำดับ</p>	<p>6. วิธีประกอบอีกวิธีหนึ่งคือตั้งกระบอกลอยตัวที่สามในแนวค้ำ โดยให้ท้ายกระบอกลอยตัวอยู่ด้านล่าง และให้ปลายก้านสูบชี้ขึ้น จากนั้นใส่เหล็กยึดและปลอกเหล็กเข้ากับหน้าแปลน วางฝาประกบหลังบนปลอกเหล็ก วางช่องอัดลงบนฝาประกบหลัง แล้ววางฝาประกบหน้าลงบนช่องอัด ตามลำดับ จากนั้นขันน็อตยึดที่ปลายช่องอัดให้แน่น แล้วจึงประกอบช่องทางออกเข้ากับฝาประกบหน้า สุดท้ายจึงใช้เกรนช่วยยกชุดที่ประกอบแล้วนี้วางลงในแนวนอน</p>

ภาคผนวกที่ 2
แบบขึ้นส่วนเครื่องจักรต้นแบบ



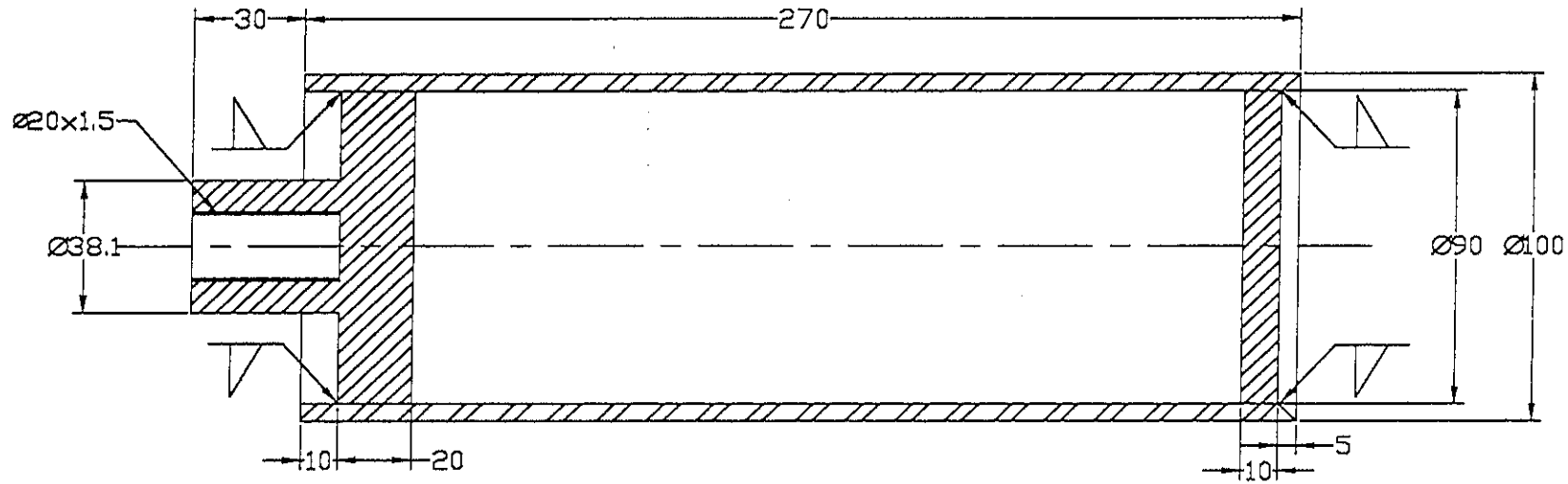
9	แหวนสปริง	3/4" UNC		WDSFP-01-08	4
8	น๊อตเหล็ก	3/4-10 UNC-2B-LH		WDSFP-01-08	4
7	ปลอกเหล็ก	∅ 30 x 304	St. 35	WDSFP-01-07	4
6	เหล็กมัต	∅ 19.06 x 500	St. 37	WDSFP-01-06	4
5	ฝาประกอบหลัง	□ 180 x 272.5 x 19	St. 37	WDSFP-01-05	1
4	ฝาประกอบหน้า	□ 180 x 272.5 x 19	St. 37	WDSFP-01-04	1
3	วางรับและป้อนฝุ่น		St. 37	WDSFP-01-03	1
2	แท่งยึด	∅ 100 x 270	St. 37	WDSFP-01-02	1
1	กระบอกไฮดรอลิกตัวที่ 1			WDSFP-01-01	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
	ผู้เขียน	วิริยะ ดวงสุวรรณ		โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
	ผู้ตรวจ				
	ผู้ปรับปรุง				
	ผู้ออกแบบ	วิริยะ ดวงสุวรรณ			
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน		ระบบ M	หมายเลขแบบ	
1:5	ชุดป้อนฝุ่นและป้อนฝุ่นช่วงที่หนึ่ง			WDSFP-01	

①



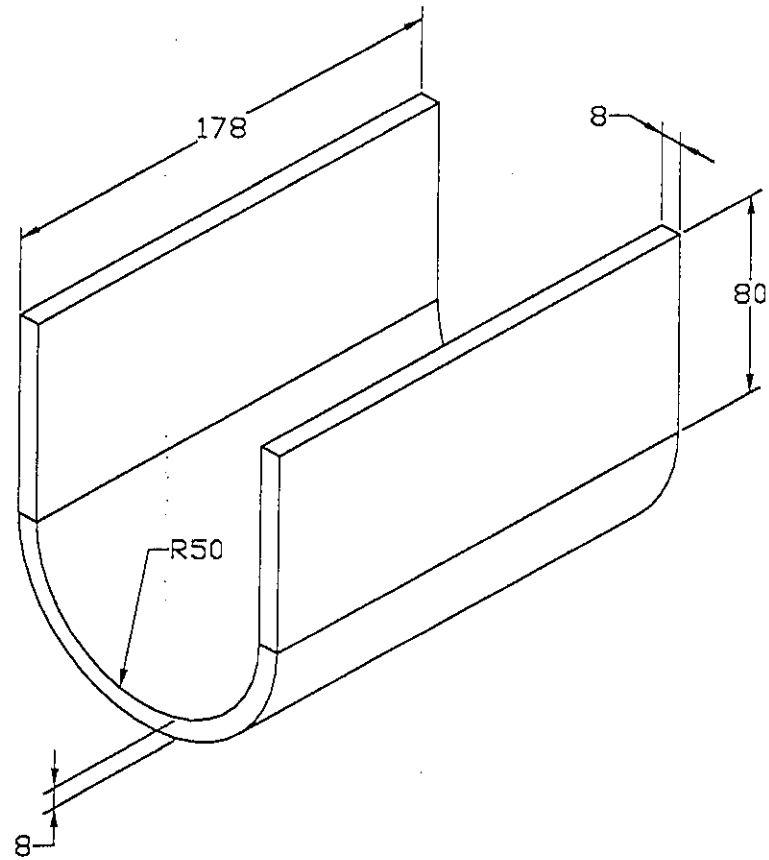
1	กระบอกไฮดรอลิกตัวที่ 1			WDSFP-01-01	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M	หมายเลขแบบ	WDSFP-01	
1:3	จุดบ่อน้ำมันและบัพรับน้ำหนักที่หนึ่ง				

2

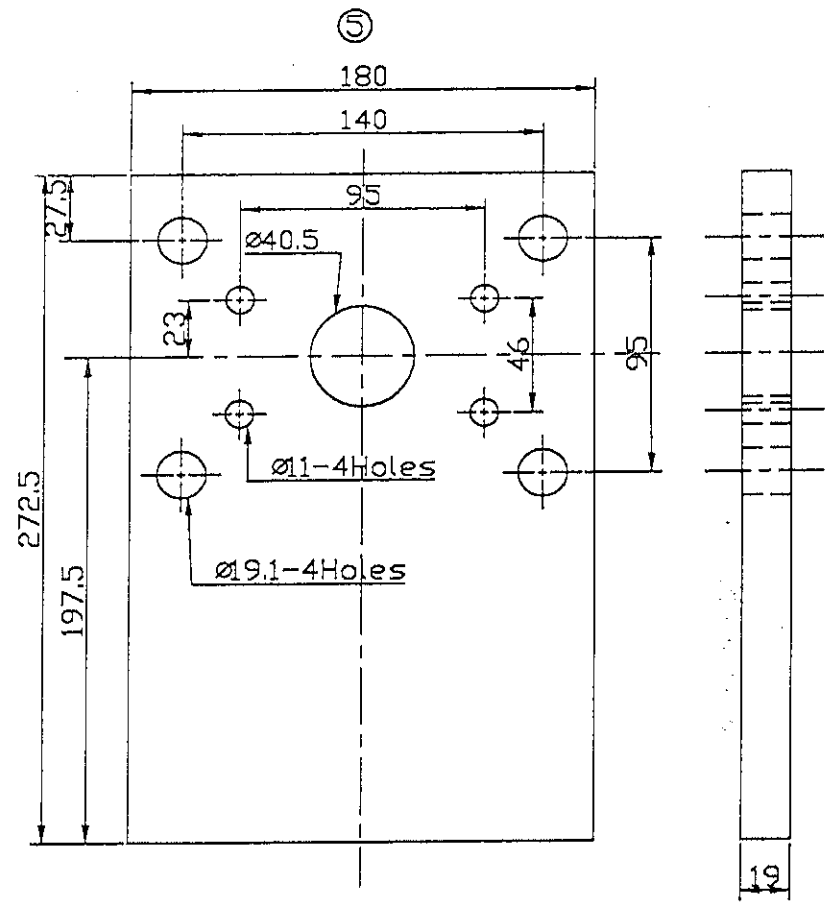
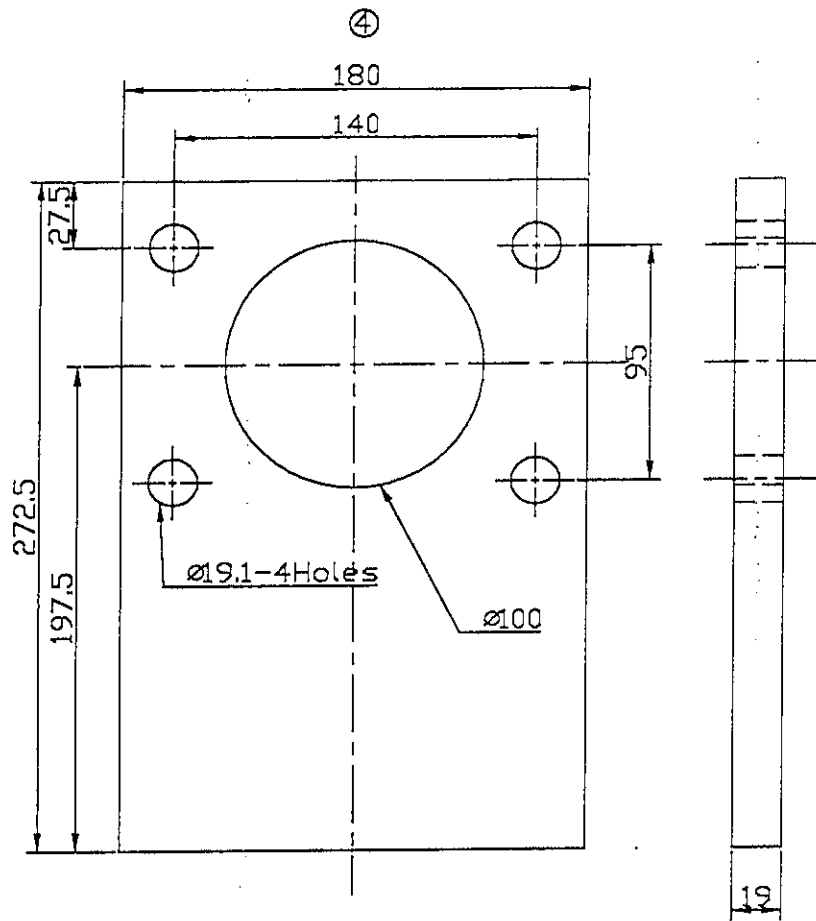


2	แท่งยึด	$\varnothing 100 \times 270$	St. 37	WDSFP-01-02	1
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเตี๋ยงยึด เชื้อเพลิงแข็งจากฟืนไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้รับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตราส่วน	วิธีใช้งาน		ระบบ M	หมายเลขแบบ	
1:2	จุดบ่อนุ่นและบ่อนุ่นข้างที่หนึ่ง			WDSFP-01	

③

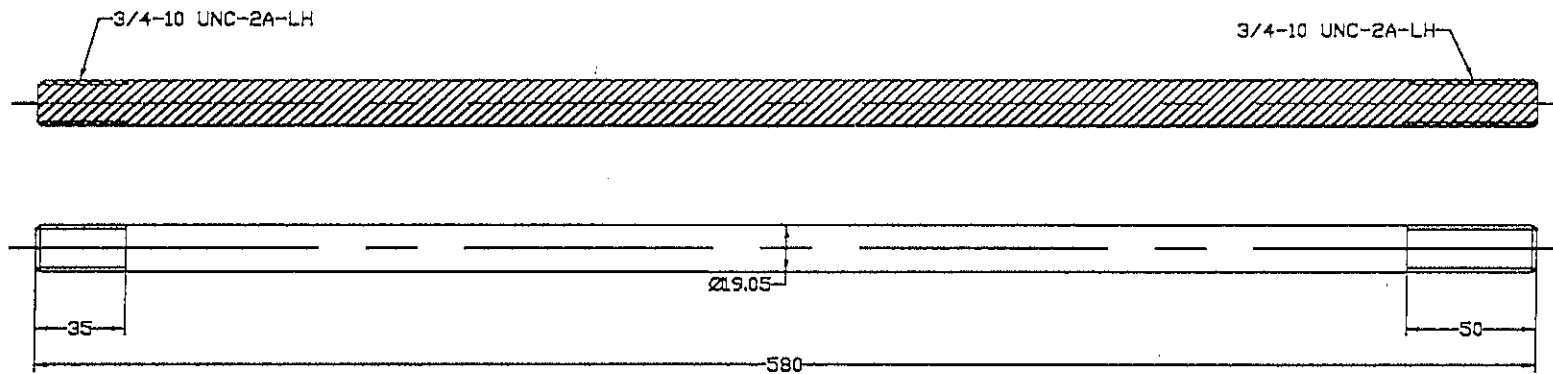


3	ทางรับและมือหมุน		St. 37	WDSFP-01-03	1
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฟืนไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
ภาคส่วน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M	หมายเลขแบบ		
1:3	ชุดมือหมุนและมือหมุนท่างที่หนึ่ง		WDSFP-01		



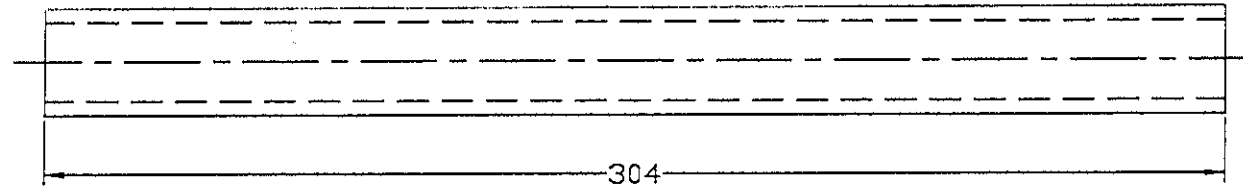
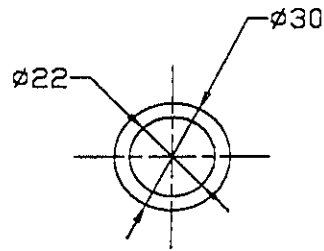
5	ฝาประกอบหลัง	180 x 272.5 x 19	St. 37	WDSFP-01-05	1
4	ฝาประกอบหน้า	180 x 272.5 x 19	St. 37	WDSFP-01-04	1
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ ดวงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้อนุมัติ					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ ดวงสุวรรณ				
ขนาดความ 1:3	ชื่อชิ้นงาน ชุดป้อนฝุ่นและป้อนฝุ่นวางที่หน้า	การบดเศษไม้ ขนาดเฉลี่ย 3 มม. ขนาดเฉลี่ย 1 มม. Unified inch standard		หมายเลขแบบ WDSFP-01	

⑥



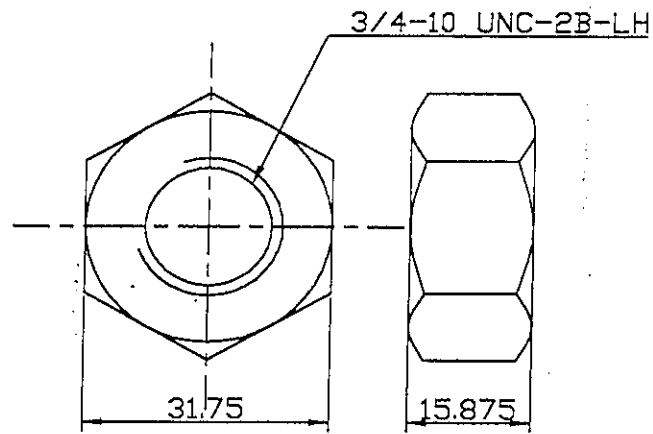
6	เหล็กยึด	∅19.05 x 580	St. 37	WDSFP-01-06	4
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการรถต้นแบบเครื่องอัดเชื้อเพลิงแข็งจากฟืนไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
ภาคส่วน	วิจัยและพัฒนา ชุดป้อนฟืนและป้อนฟืนช่วงที่หนึ่ง	การออกแบบและ พัฒนาผลิตภัณฑ์ จากเทคโนโลยี United Iron Standard	หมายเลขแบบ	WDSFP-01	
1:3					

7

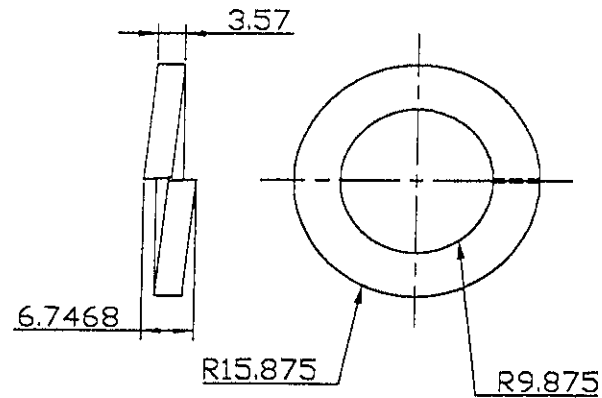


7	ปลอกเหล็ก	$\phi 30 \times 304$	St. 35	WDSFP-01-07	4
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องยึด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M	หมายเลขแบบ		
1:2	ชุดป้องกันและจับฝุ่นวงที่หนึ่ง		WDSFP-01		

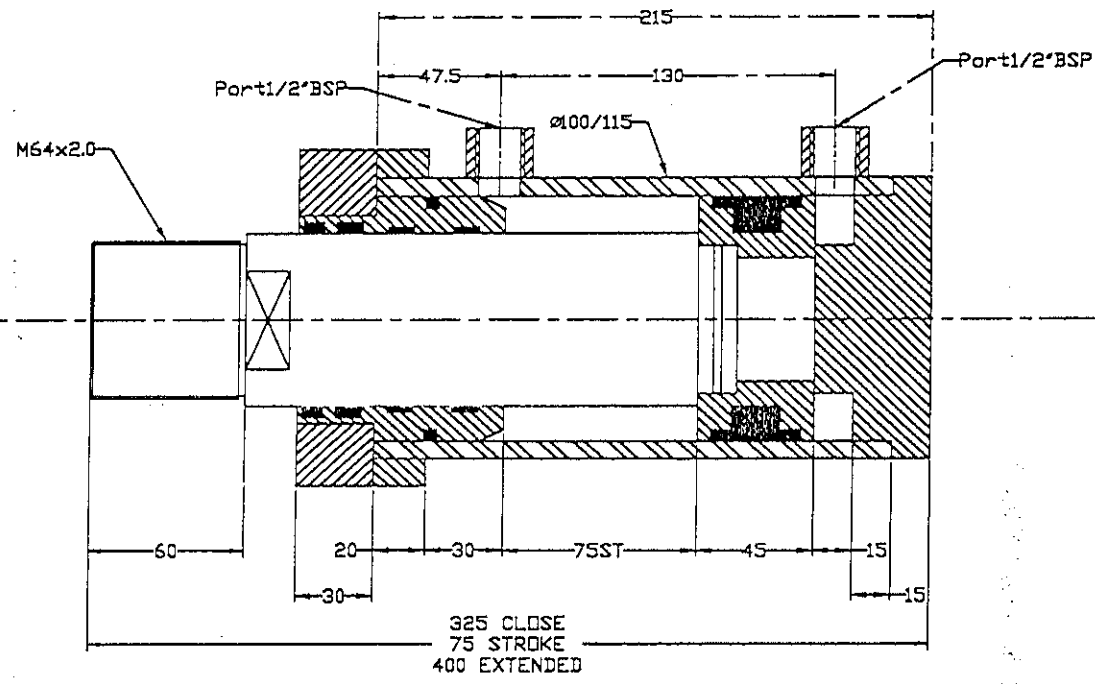
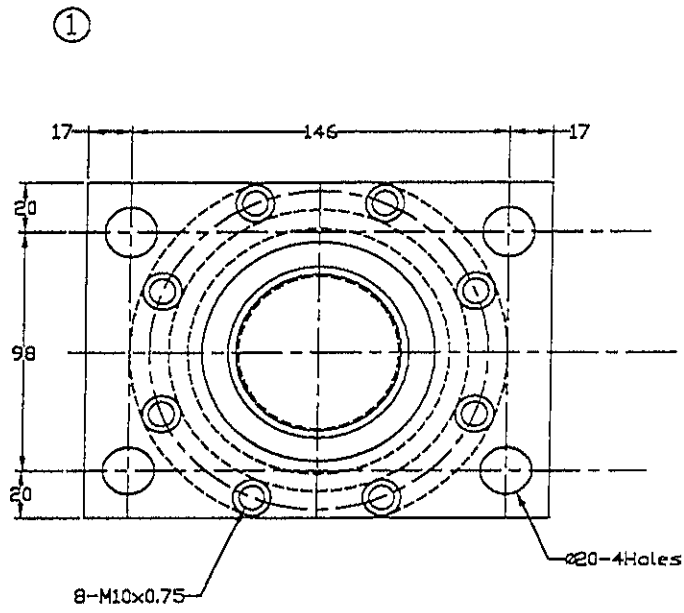
8



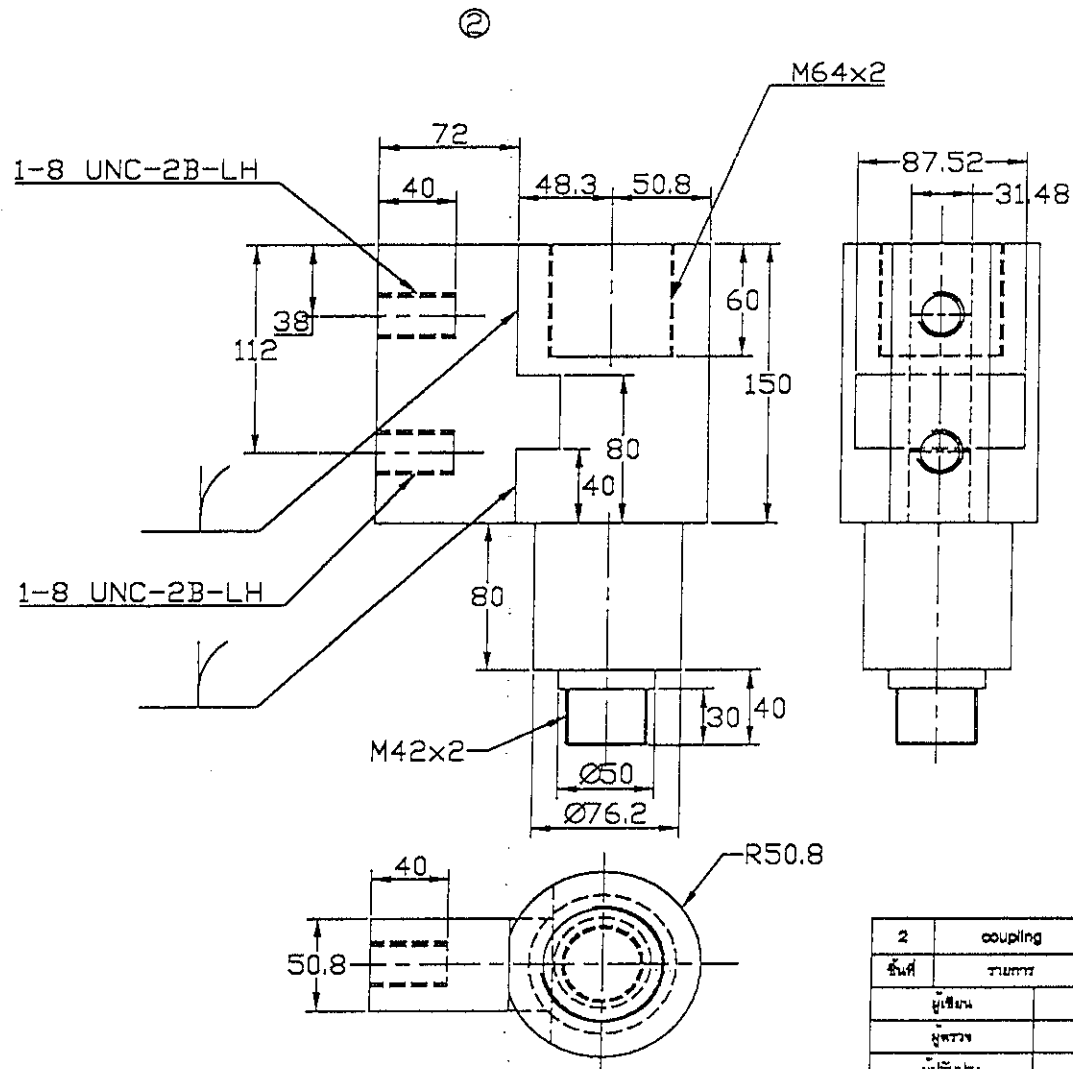
9



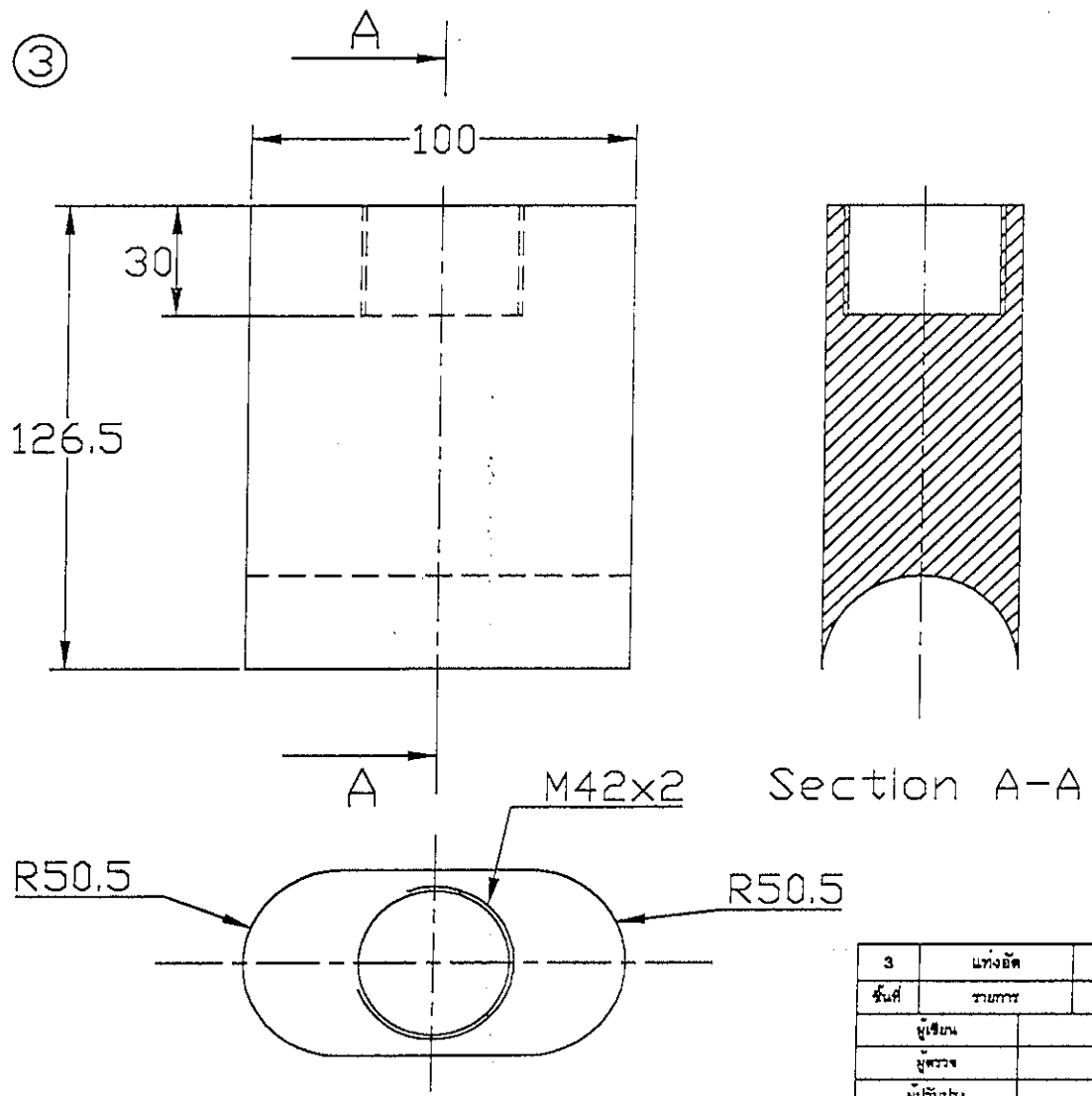
9	แหวนสกรู	3/4" UNC		WDSFP-01-09	4
8	น๊อตเหล็ก	3/4-10 UNC-2B-LH		WDSFP-01-08	4
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการค้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้รับปรุง					
ผู้สกรูแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตราส่วน	วิธีใช้งาน	โครงการแปรรูป ขยะเทศบาลเมือง โคราช	โครงการพัฒนา เทคโนโลยี โคราช	หมายเลขแบบ	
1:1	ชุดบ่อนฝุ่นและป้อนฝุ่นข้างที่หนึ่ง		United Inch Standard	WDSFP-01	



1	กระบอกลิโพรลิกตัวที่ 2			WDSFP-02-01	1
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้รับพิมพ์					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตรฐาน	วิธีใช้งาน		ระบบ M	หมายเลขแบบ	
1:3	ชุดปั๊มฝุ่นข้างที่สอง			WDSFP-02	

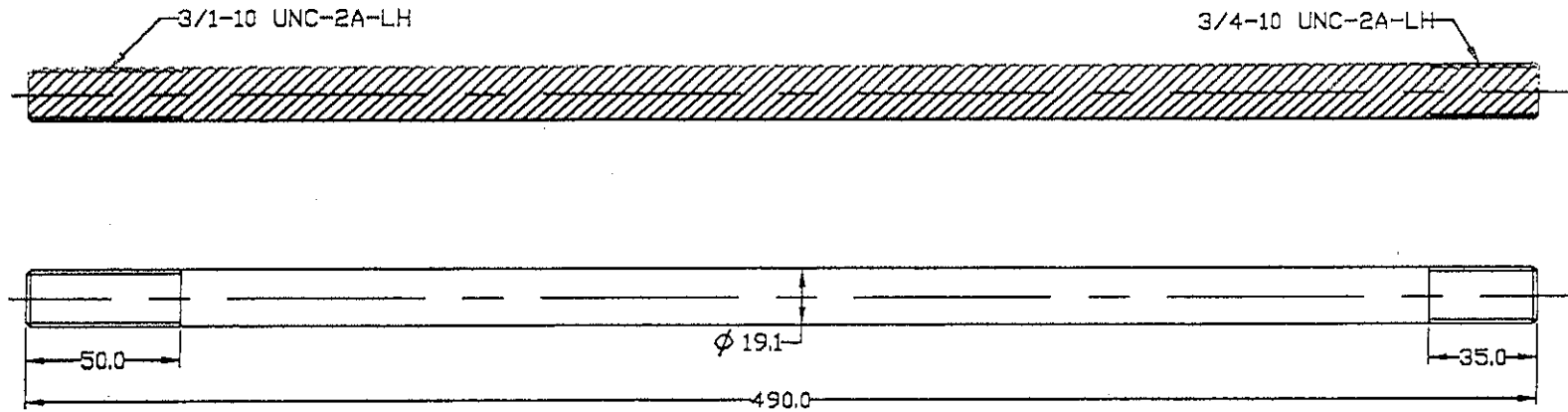


2	coupling		St 37	WDSFP-02-02	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการพัฒนแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากถ่านไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้อนุมัติ	วิริยะ คงสุวรรณ				
ภาคส่วน	ชื่อแผนงาน	โครงการพัฒนแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากถ่านไม้	โครงการพัฒนแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากถ่านไม้	หมายเลขแบบ	WDSFP-02
1:4	จุดมีหมื่นข้างที่สอง		โครงการพัฒนแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากถ่านไม้ มาตรฐาน United Inch Standard		



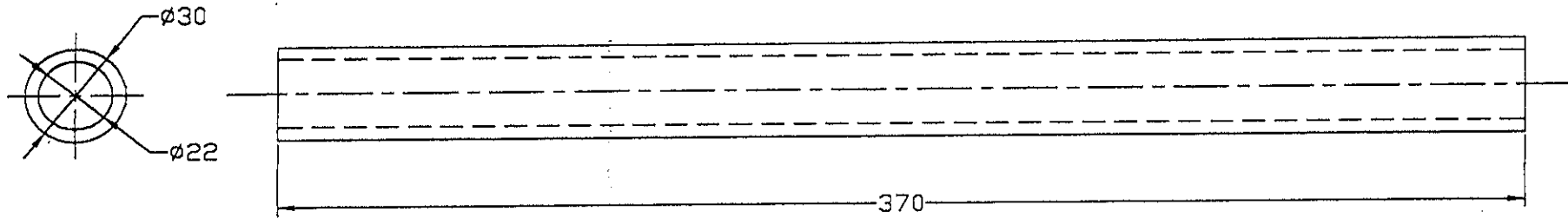
3	แท่งยึด	St. 37	WDSFF-02-03	1	
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิธีและ ตรวจสอบ			โครงการพัฒนแบบเครื่องยึด เชื่อมเหล็กแรงจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิธีและ ตรวจสอบ				
มาตราส่วน	วิธีเขียน	ระบบ M	หมายเลขแบบ		
1:2	จุดนิยมผู้ร่างที่สอง		WDSFF-02		

④



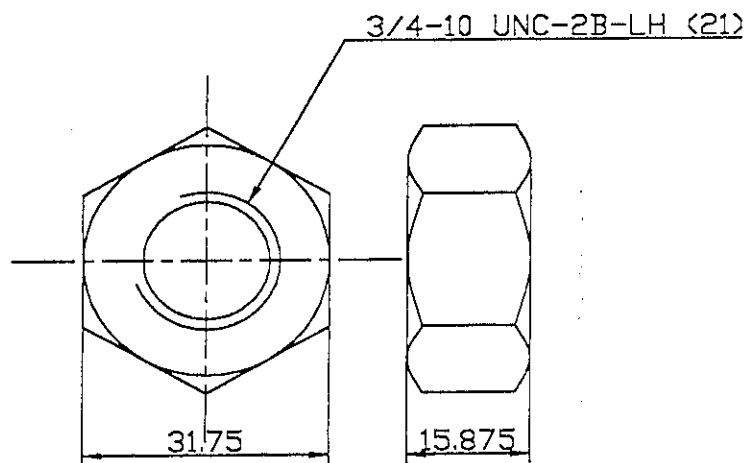
4	เหล็กปัด	φ 19.05 x 490	St. 37	WDSFP-02-04	4
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ ศวงสุวรรณ			โครงการพัฒนแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ ศวงสุวรรณ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	ภาพเอกสารที่ใช้ ออกแบบหลัก ตามเว็บไซต์ สมาคมเหล็กกล้า United Inch Standard	หมายเลขแบบ	WDSFP-02	
1:2.5	ชุดปั๊มฝุ่นรางที่สอง				

5

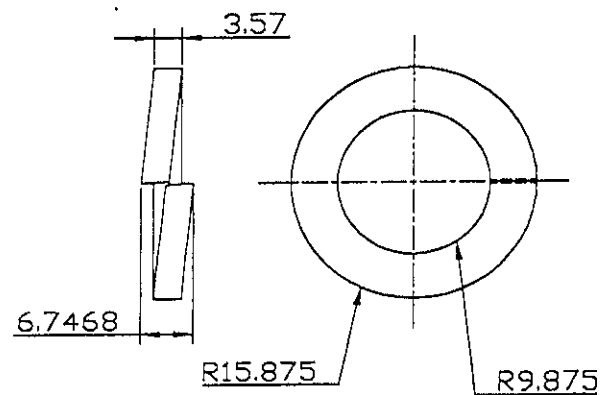


5	ปลอกเหล็ก	∅30 x 370	St. 36	WDSFP-02-05	4
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเหตุแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ พวงสุวรรณ			โครงการพัฒนแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากถ่านไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ พวงสุวรรณ				
มาตรฐาน	วิธีรับงาน	ระบบ M	หมายเหตุแบบ	WDSFP-02	
12	ชุดบีบฝุ่นวางที่สอง				

6

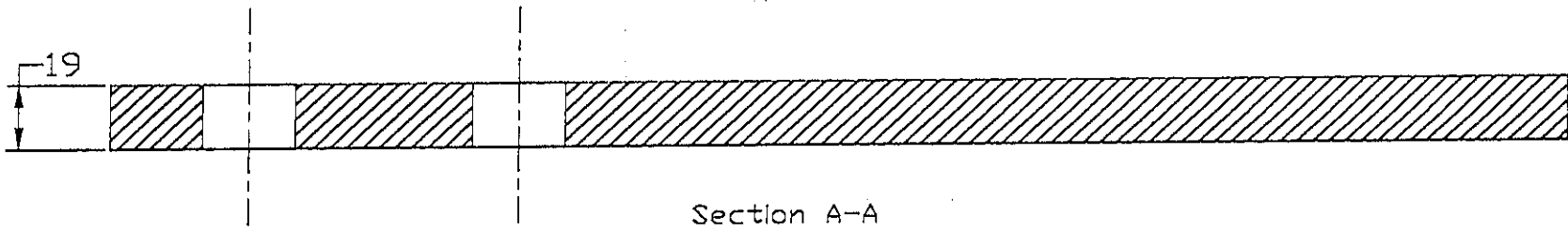


7

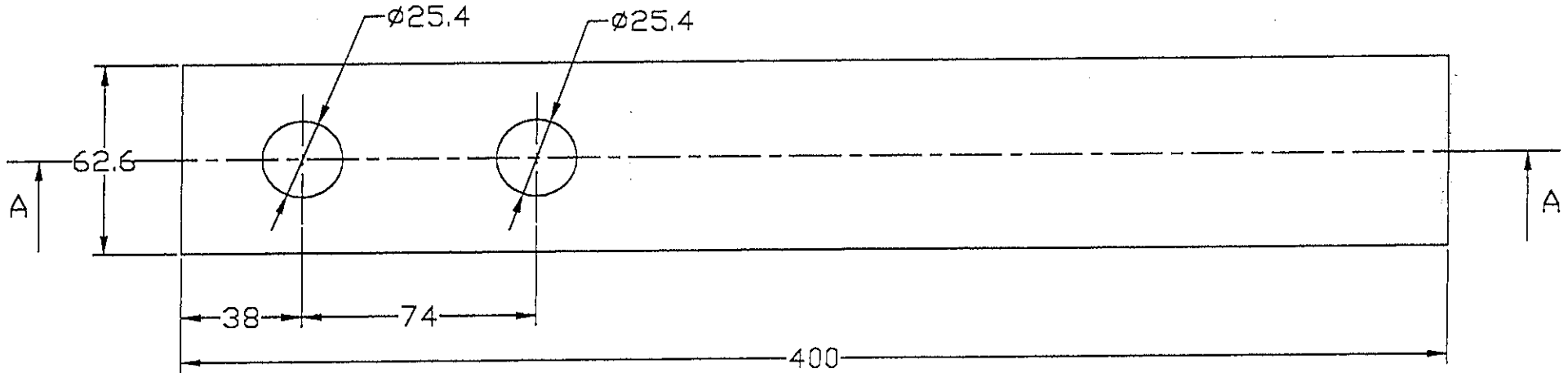


7	แหวนสปริง			WDSFP-02-07	4
6	น๊อตหกเหลี่ยม	3/4-10 UNC-2B-LH (21)		WDSFP-02-06	4
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฟืนไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้อนุมัติ					
ผู้ควบคุม	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	โครงการแม่เหล็ก ยกเว้นขนาดเกลียว โครงการ United Inch Standard		หมายเลขแบบ	WDSFP-02
1:1	ชุดพิมพ์หุ่นช่างที่สอง				

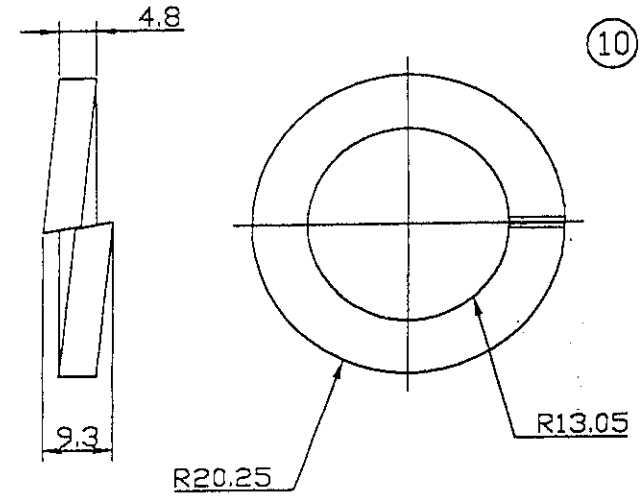
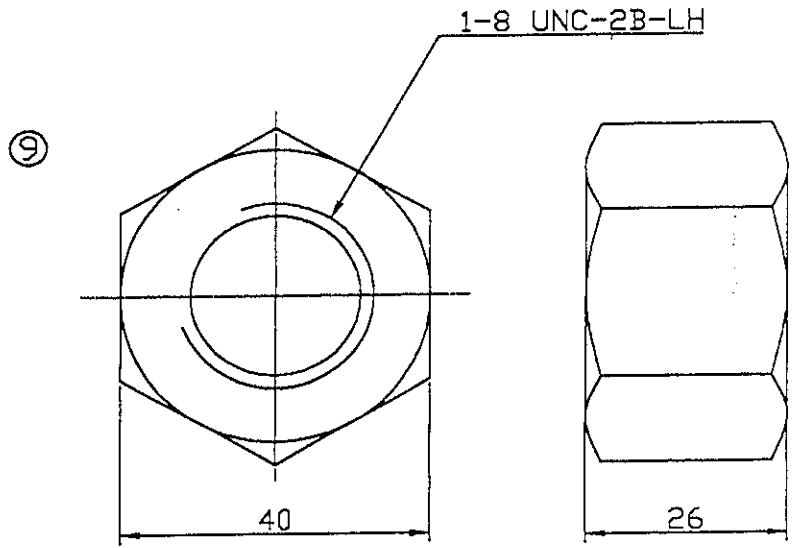
8



Section A-A

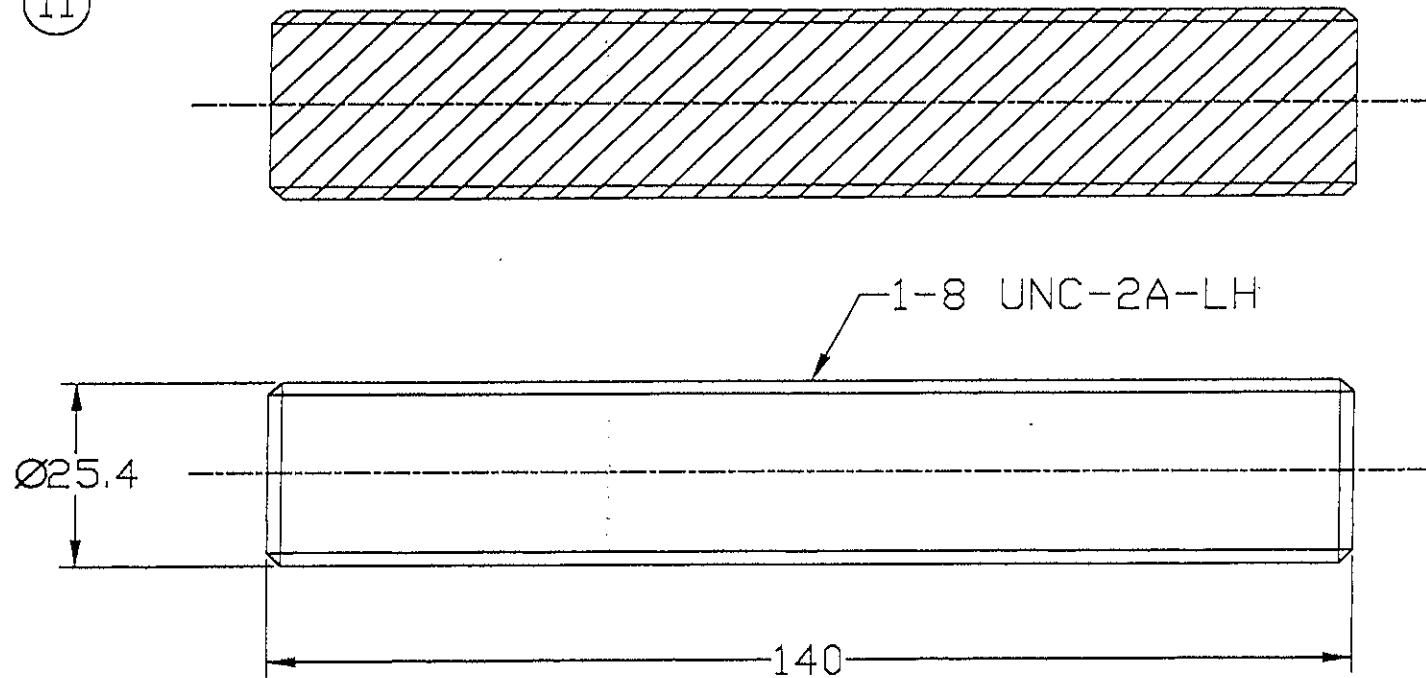


8	ฝาปิดทางออก	82.6 x 400 x 19	St. 37	WDSFP-02-08	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการพัฒนแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากมูลไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้นับปริมาณ					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M	หมายเลขแบบ		
12	จุดยึดฝุ่นข้างที่สอง		WDSFP-02		

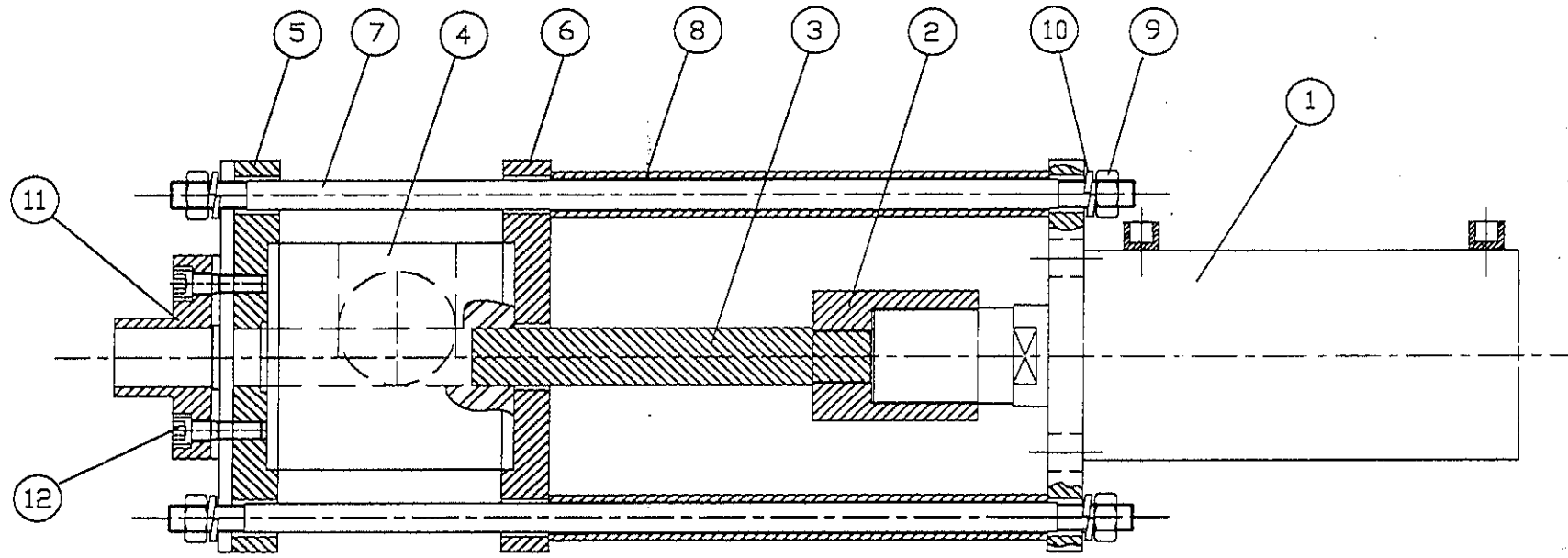


10	แหวนสลึง			WDSFP-02-07	2
9	นัตหกเหลี่ยม	1-8 UNC-2B-LH		WDSFP-02-08	4
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ ศพสุวรรณ์			โครงการพัฒนาแบบเครื่องยึด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ ศพสุวรรณ์				
ขนาดสวน 1:1	ชื่อชิ้นงาน ชุดบีบฝุ่นข้างที่สอง	ไซระบบเมตริก ยกเว้นขนาดเกลียว ไซระบบ United Inch Standard		หมายเลขแบบ WDSFP-02	

11

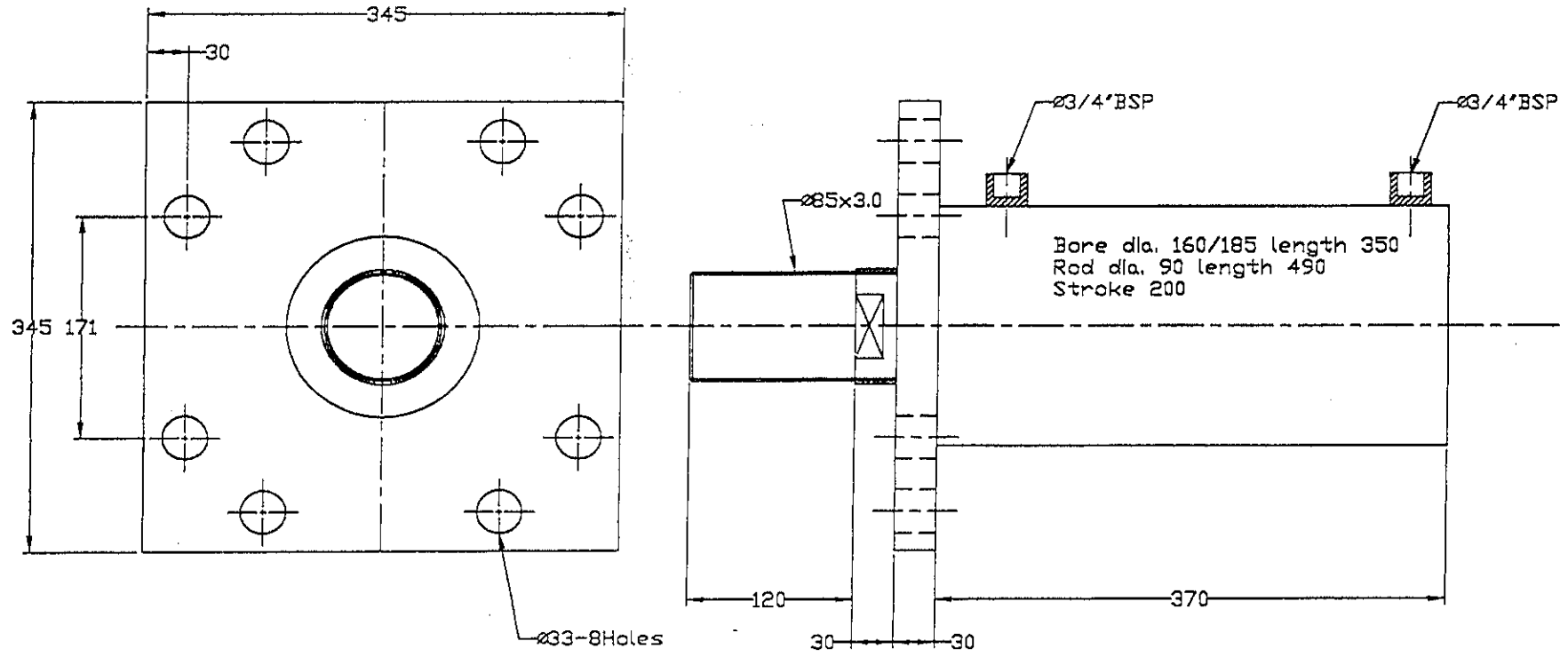


11	เก็ยวต๋อ	Ø 25.4 x 140	St. 37	WDSFP-02-11	2
ซันค้	วณกรร	นพทว้ตู่	ว้ตู่	นพทคณนบ	จ้งกรน
ผู้เขียน	วิระ ดวงสุวรรณ			โครงการค่นนบเครื่องอ้ต เช้อเพลิงซ้งจกฟ้่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้รับป้จ					
ผู้ออกนบ	วิระ ดวงสุวรรณ				
นพทคณน	ซ้จ้งกรน	ทคณนบฟ้่นว้งท้สอง	ระบบ M นพทคณนเก็ยว ว้ตู่ระบบ Unifed Inch Standard	นพทคณน	WDSFP-02
1:1					



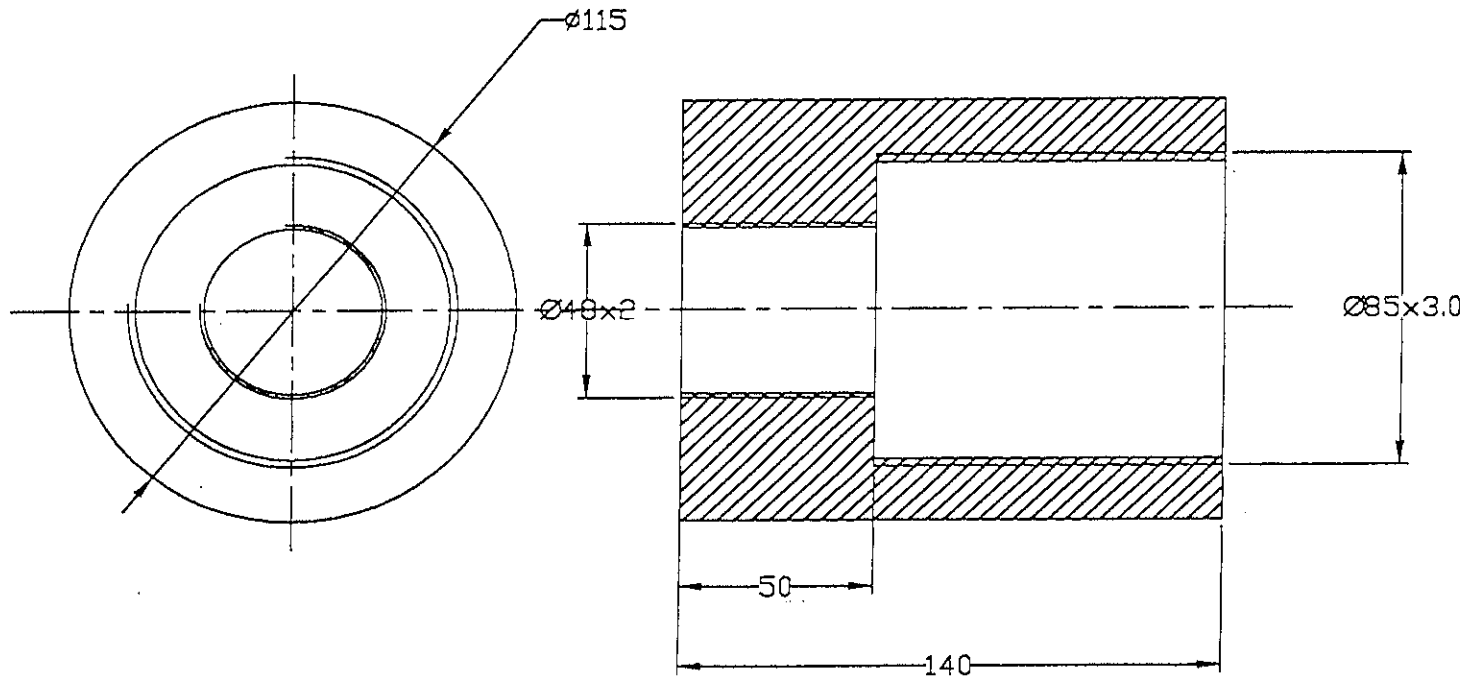
12	เกลียวทรงกระบอกหัวฝัง	5/8-11 UNC-2A-LH		WDSFP-03-12	8
11	ข่องทางออก		St. 37	WDSFP-03-11	1
10	แหวนสปริง	1" UNC		WDSFP-03-10	14
9	น๊อตเกลียว	1-8 UNC-2B-LH		WDSFP-03-09	14
8	ปลอกเหล็ก	∅ 40 x 424	St. 35	WDSFP-03-08	4
7	เหล็กยึด	∅ 25.4 x 820	St. 37	WDSFP-03-07	7
6	ฝาประกอบหลัง	□ 345 x 345 x 40	St. 37	WDSFP-03-06	1
5	ฝาประกอบหน้า	□ 345 x 345 x 50	St. 37	WDSFP-03-05	1
4	รองยึด	□ 200 x 200 x 190	St. 37	WDSFP-03-04	1
3	แหงยึด	∅ 51 x 340	St. 37	WDSFP-03-03	1
2	coupling	∅ 115 x 140	St. 37	WDSFP-03-02	1
1	กระบอกโศพลวงสี่ตัวที่ 3			WDSFP-03-01	1
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
	ผู้เขียน	วิธี: ตรวจสอบ		โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
	ผู้ตรวจ				
	ผู้รับผิดชอบ				
	ผู้ออกแบบ	วิธี: ตรวจสอบ			
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M	หมายเลขแบบ		
1:8	ชุดเป็นชุดในช่วงที่สาม		WDSFP-03		

1



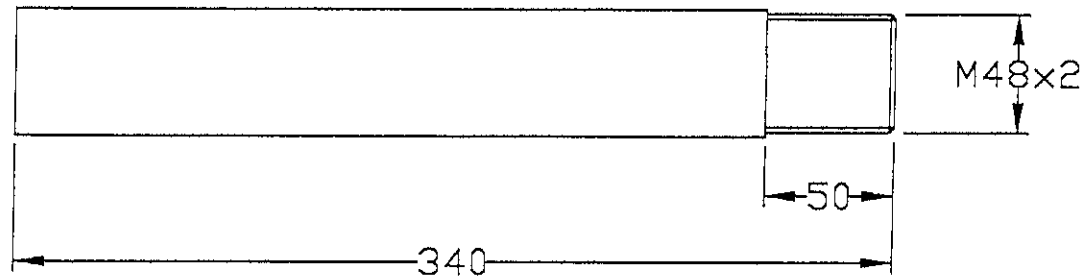
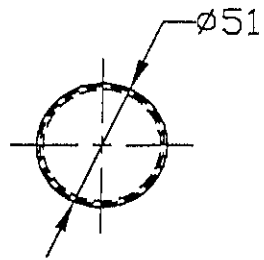
1	กระบอกลูกสูบ			WDSFP-03-01	1
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการพัฒนาระบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้เสนอแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M	หมายเลขแบบ	WDSFP-03	
1:5	ชุดมีบผู้ร่างที่สาม				

2



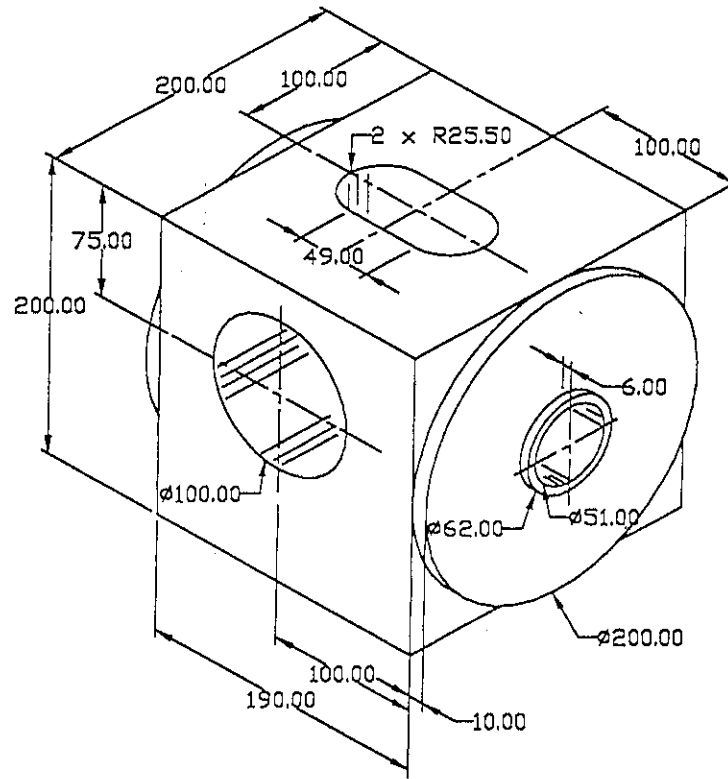
2	coupling	Ø115 x 140	St. 37	WDSFP-03-02	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเตาอัด เชื้อเพลิงแข็งจากมูลไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้บันทึก					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M	หมายเลขแบบ		
1:2	ชุดบีบฝุ่นช่วงที่สาม		WDSFP-03		

3



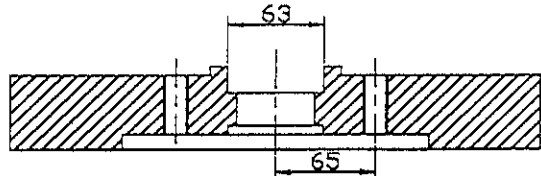
3	แก่งอึด	Ø51 x 340	St. 37	WDSFP-03-03	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฟืนไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน		ระบบ M	หมายเลขแบบ	
1:3	ชุดบีบฟืนวางที่สาม			WDSFP-03	

4

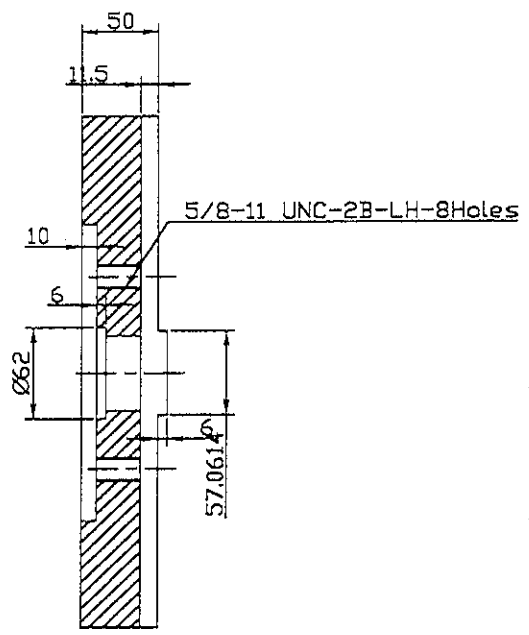
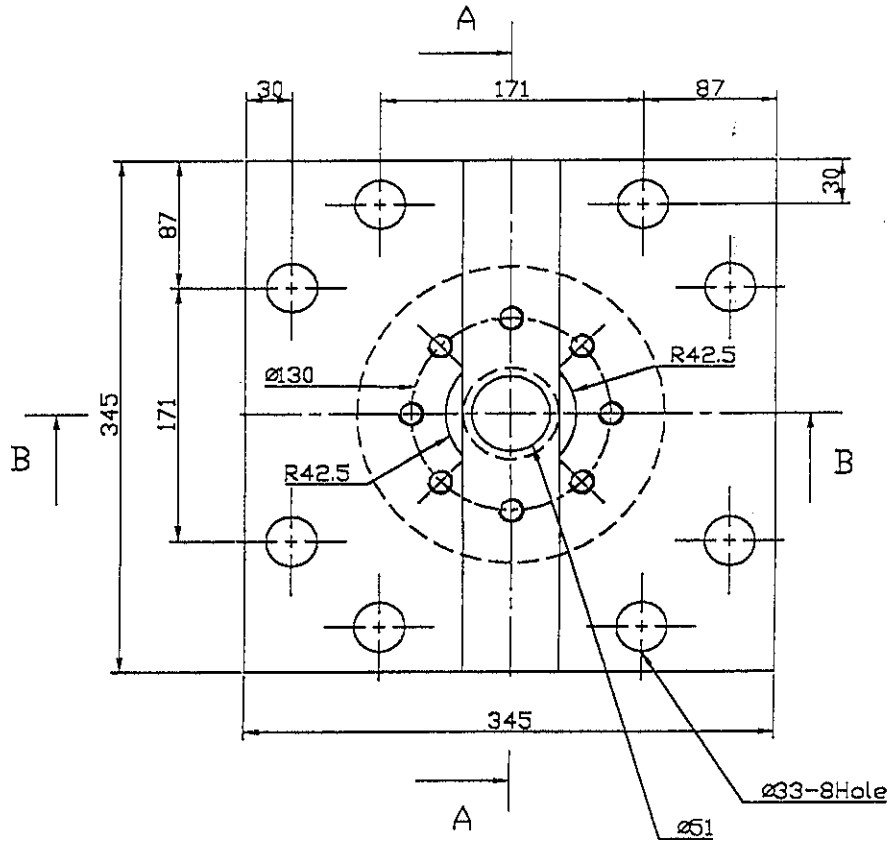


4	ช่องอีที	200 x 200 x 190	St. 37	WDSFP-03-04	1
ชนิด	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิเศษ คงสุวรรณ			โครงการพัฒนแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้อนุมัติ					
ผู้ออกแบบ	วิเศษ คงสุวรรณ				
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M	หมายเลขแบบ	WDSFP-03	
1:5	ชุดปั๊มฝุ่นช่วงที่สาม				

5



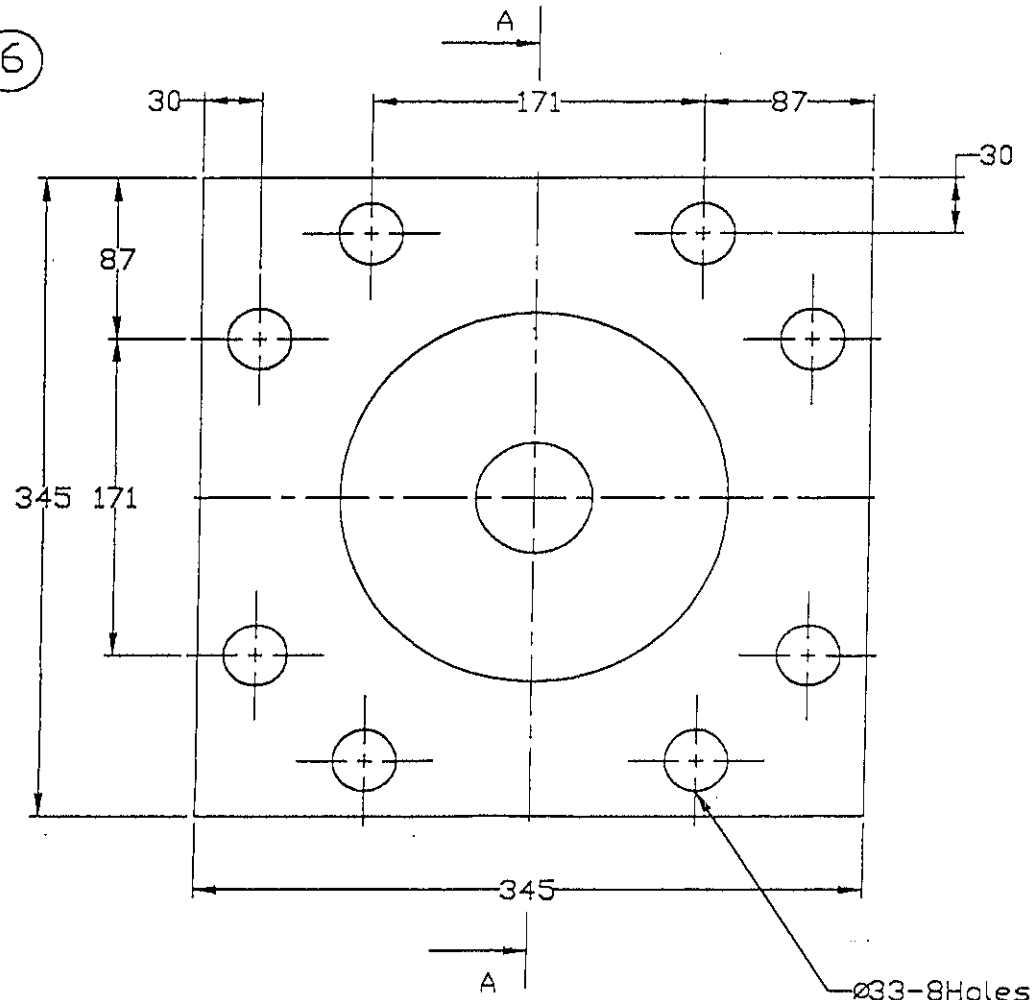
Section B-B



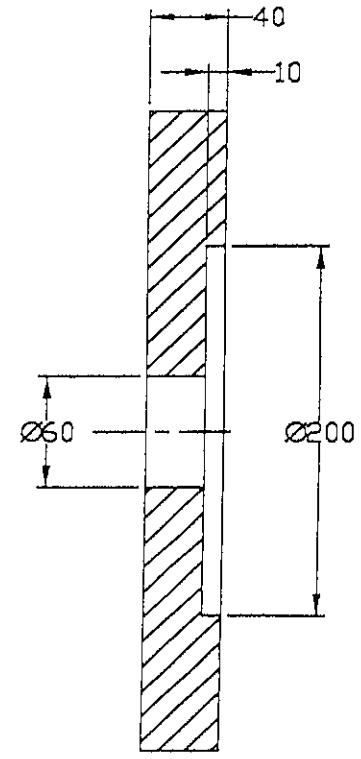
Section A-A

5	ฝาประกอบหน้า	345 x 345 x 50	St 37	WDSFP-03-05	1
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ ตวงสุวรรณ			โครงกาวคั่นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฟ่อนไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้อนุมัติ	วิริยะ ตวงสุวรรณ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	ระบบ M ยกเว้นขนาดเกลียว ใช้ระบบ Unified Inch Standard	หมายเลขแบบ	WDSFP-03	
1:5	ชุดมีบ่มฝุ่นช่างที่สาม				

6



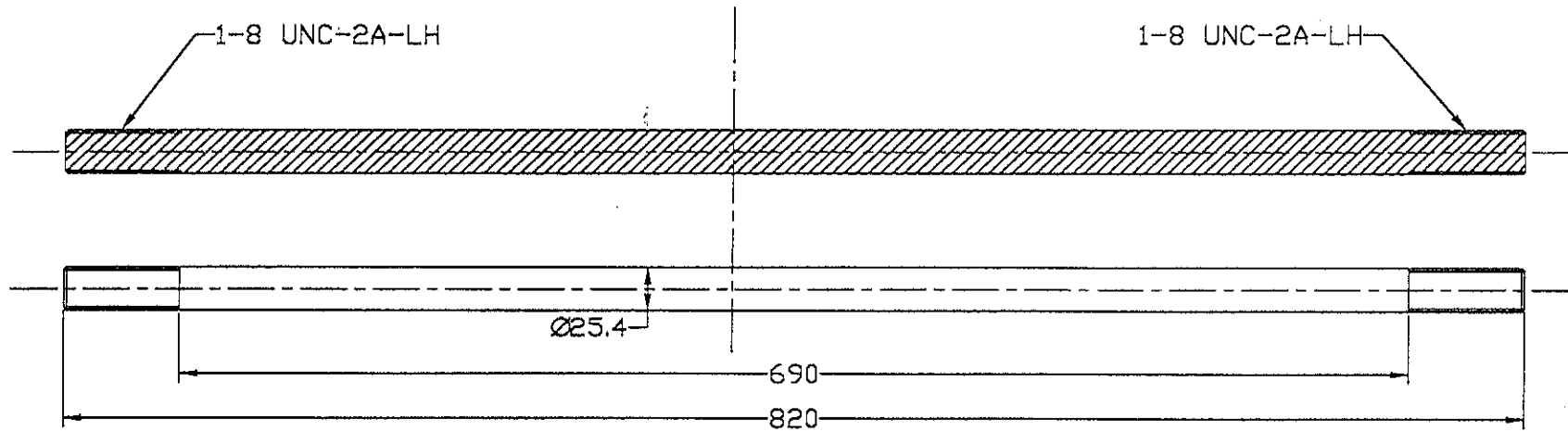
Ø33-8Holes



Section A-A

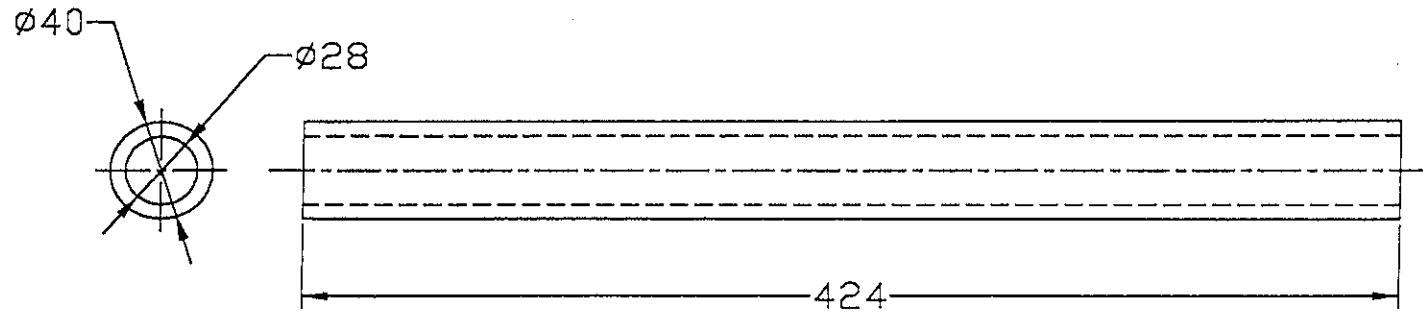
6	แผ่นระบอบหลัง	345 x 345 x 40	St. 37	WDSFP-03-06	1
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	พิกัดเสาเข็ม	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการคั่นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตราส่วน	ชื่อร้านงาน	ระบบ M	พิกัดเสาเข็ม	WDSFP-03	
1:4	ชุดแบบผู้ว่าจ้างที่สาม				

7

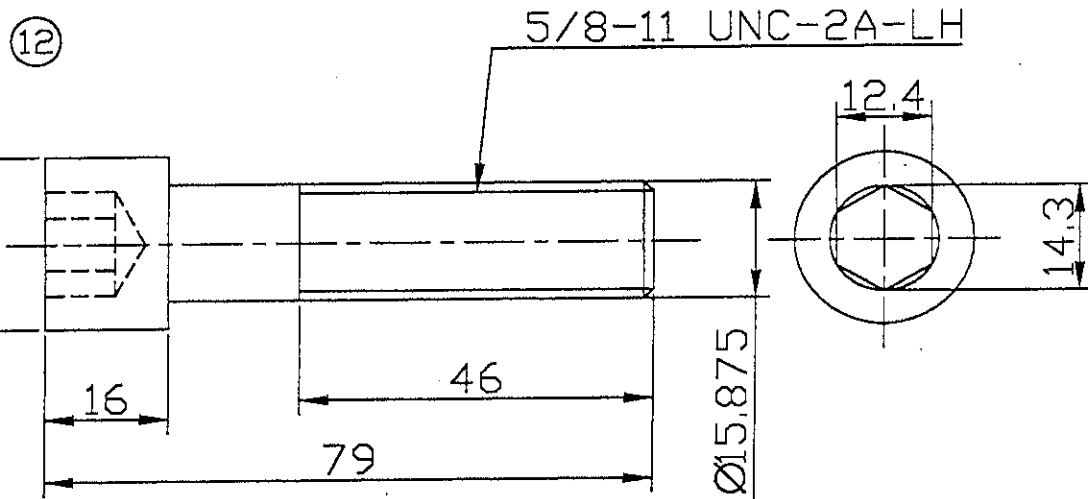
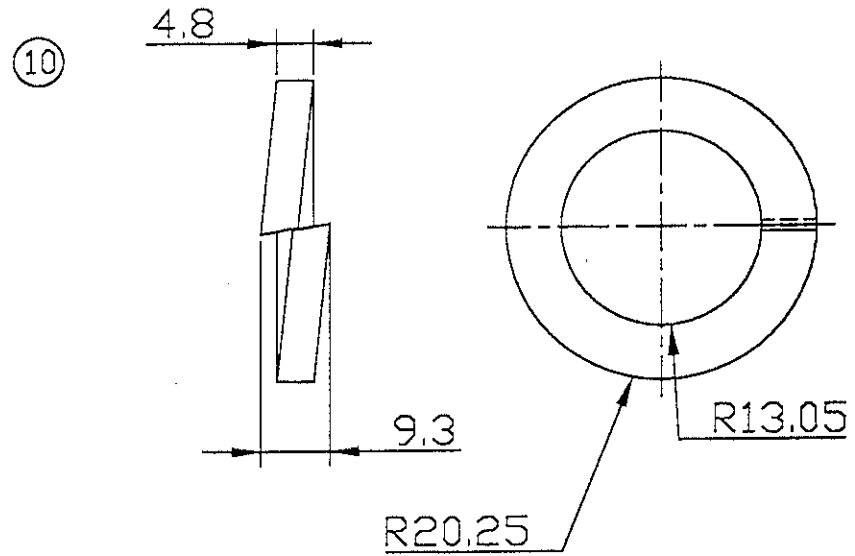
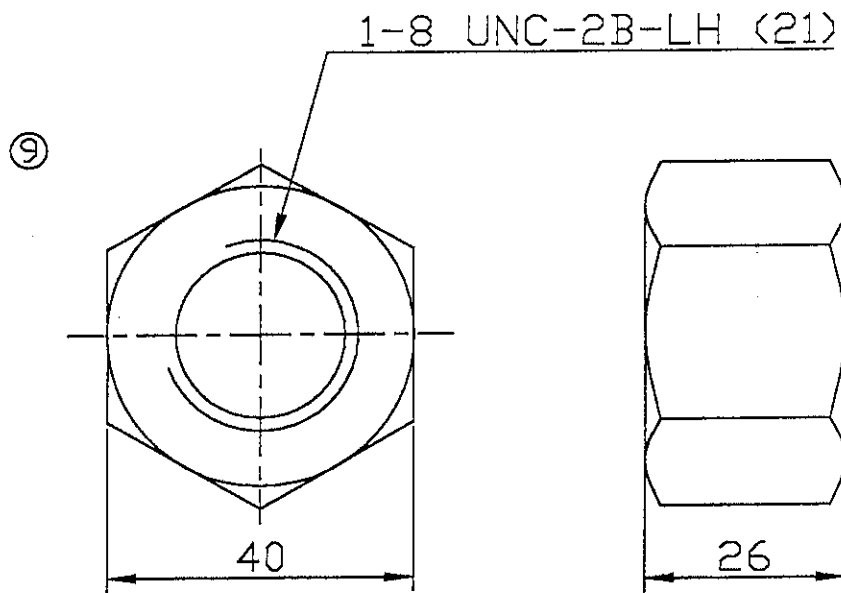


7	เหล็กยึด	$\varnothing 25.4 \times 820$	St. 37	WDSFP-03-07	7
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้อนุมัติ					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	ชื่อวัสดุ	ระบบ M มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี United Inch Standard	หมายเลขแบบ	WDSFP-03
1:4	ชุดปั๊มฝุ่นวงที่สาม				

⑧



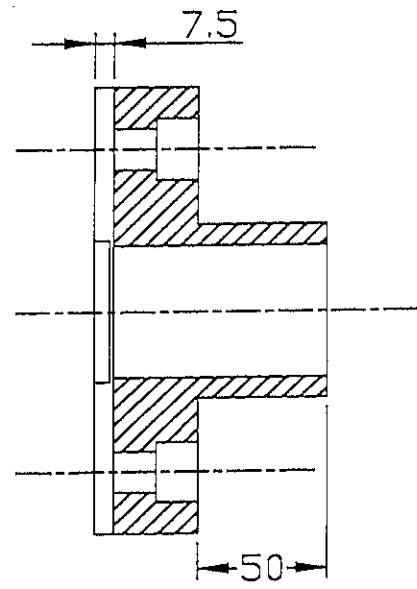
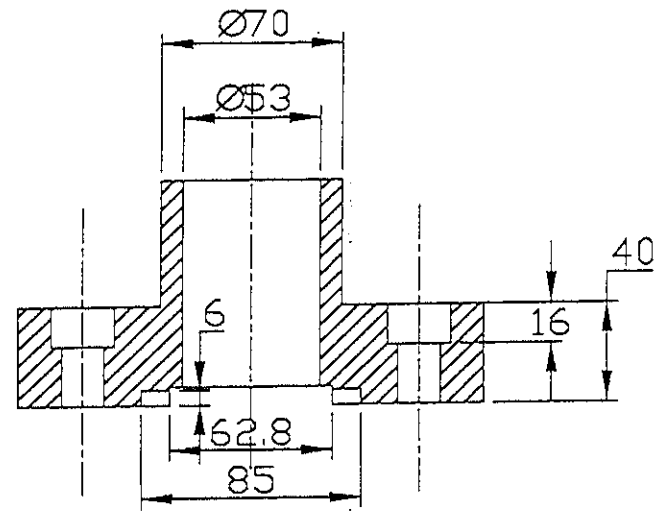
8	ปลอกเหล็ก	$\phi 40 \times 424$	St. 35	WDSFP-03-08	4
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้อนุมัติ	วิริยะ คงสุวรรณ				
มาตรฐาน	วิธีเขียน	ระบบ M	หมายเลขแบบ	WDSFP-03	
1:3	ชุดแบบหุ่นช่างที่สาม				



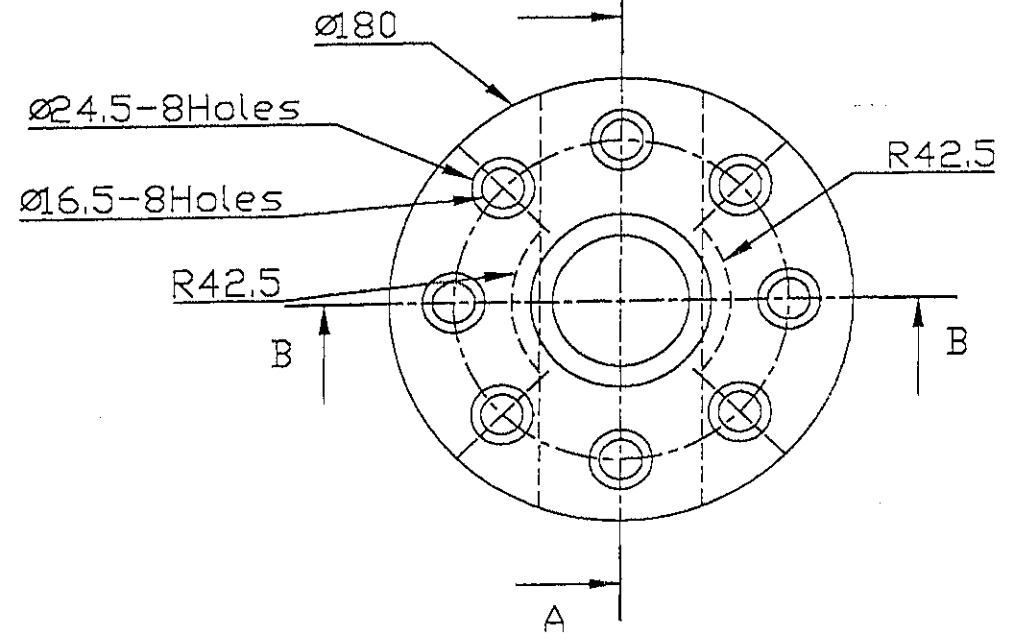
12	เกลียวทรงกระบอกหัวมึน	5/8-11 UNC-2A-LH		WDSFP-03-12	8
10	แหวนสปริง	1" UNC		WDSFP-03-10	14
9	น๊อตหกเหลี่ยม	1-8 UNC-2A-LH		WDSFP-03-09	14
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ ดวงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้ปรับปรุง					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ ดวงสุวรรณ				
ขนาดตัว	1:1	ชื่อชิ้นงาน ชุดปั๊มฝุ่นร่วงที่สาม	ระบบ M ยกเว้นขนาดเกลียว ใช้ระบบ Unified Inch Standard	หมายเลขแบบ WDSFP-03	

11

Section B-B



Section A-A



11	ช่องทางออก		St. 37	WQSFP-03-11	1
ชนิด	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	วิริยะ คงสุวรรณ			โครงการต้นแบบเครื่องอัด เชื้อเพลิงแข็งจากฝุ่นไม้	
ผู้ตรวจ					
ผู้อนุมัติ					
ผู้ออกแบบ	วิริยะ คงสุวรรณ				
ขนาดความ	ชิ้นงาน	ชุดชิ้นส่วนวงที่สาม	ระบบ M	หมายเลขแบบ	
1:3				WQSFP-03	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายวิริยะ ดวงสุวรรณ

วัน เดือน ปีเกิด 4 สิงหาคม 2514

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2537