



การพัฒนากังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต  
Development of a small vertical axis wind turbines with  
composite material

นายวันชัย ฟุโน รหัส 51383652  
นายวุฒิไกร กำเขี้ยว รหัส 51383676  
นายอนนทรัฐวัฏ มาลา รหัส 51384758

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ 2555  
วันที่รับ.....  
เลขทะเบียน..... 16430254  
เลขเรียกหนังสือ..... ฟอ.  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล 2426 A

2555  
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ปีการศึกษา 2555



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ	การพัฒนากังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายวันชัย	ฟูโน	รหัสนีสิต 51383652
	นายวุฒิไกร	กำเขี้ยว	รหัสนีสิต 51383676
	นายอนนท์รัฐวิฎ	มาลา	รหัสนีสิต 51384758
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.ศลิษา	วีรพันธ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2555		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ดร. ศลิษา วีรพันธ์)

.....กรรมการ  
(รศ.ดร. มัทนี สงวนเสริมศรี)

.....กรรมการ  
(ดร. ภาณุ พุทธวงศ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	:การพัฒนาภัณฑ์ลมนแกนตั้งขนาดเล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต			
ผู้ดำเนินโครงการ	:นายวันชัย	ฟูโน	รหัสนิสิต	51383652
	:นายวุฒิไกร	กำเขี้ยว	รหัสนิสิต	51383676
	:นายอนนทรัฐวิฏ	มาลา	รหัสนิสิต	51384758
ที่ปรึกษาโครงการ	:ดร.ศลิษา	วีรพันธุ์		
สาขาวิชา	:วิศวกรรมเครื่องกล			
ภาควิชา	:วิศวกรรมเครื่องกล			
ปีการศึกษา	:2555			

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือ ศึกษาเทคนิคการขึ้นรูปและคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตแบบเรซินเสริมใยแก้ว ทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพและประสิทธิภาพเชิงกลของก้านลมนแกนตั้งขนาด 30 x 30 เซนติเมตร ในความเร็วลม 5.5 เมตรต่อวินาที โดยการทดสอบก้านลมน 2 แบบ คือ ก้านลมนแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้ง และก้านลมนแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบ โดยใบก้านทำมาจากวัสดุคอมโพสิตแบบเรซินเสริมใยแก้ว

ผลการทดสอบวัสดุคอมโพสิตแบบเรซินเสริมใยแก้วในอัตราส่วนที่ต่างกัน 9 แบบ ทำให้ได้ข้อสรุปว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ เรซิน 67.57 เปอร์เซ็นต์ โฟเบอร์ใยแก้ว 29.73 เปอร์เซ็นต์ Styrenmonomer (ตัวทำละลาย) 2.03 เปอร์เซ็นต์ MEKP (ตัวทำแข็ง) 0.68 เปอร์เซ็นต์ มีค่า Young's Modulus 7073.87 MPa ซึ่งสูงที่สุดใน 9 แบบ

ได้มีการนำเอาวัสดุคอมโพสิตแบบเรซินเสริมใยแก้วในอัตราส่วนที่ทำการทดสอบที่ดีที่สุดมาสร้างใบพัดของก้านลมนแกนตั้งแบบใบเรียบ 1 ชุดและแบบใบโค้ง 1 ชุดเพื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของก้านทั้ง 2 ชนิด

ผลจากการทดสอบพบว่าก้านลมนแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้งมีประสิทธิภาพ 59.2 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเชิงกล 22.23 เปอร์เซ็นต์ ก้านลมนแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบมีประสิทธิภาพ 56.25 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเชิงกล 9.82 เปอร์เซ็นต์ ข้อสังเกตค่าประสิทธิภาพของก้านลมนแกนตั้งตามงานวิจัยมีค่าสูงที่สุดที่เป็นไปได้เพียง 30 เปอร์เซ็นต์ แต่ผลจากการทดลองกลับได้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 59.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลกระทบจากการทดลองในอุโมงค์ลมขนาดเล็กทำให้ประสิทธิภาพของก้านสูงกว่าค่าทางทฤษฎี ตามงานวิจัยผลกระทบของอุโมงค์ลมขนาดเล็กที่มีต่อก้านแกนตั้ง และสมการที่ใช้ไม่ครอบคลุมตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

**Project title** :Development of a small vertical axis wind turbines with composite material  
**Name** :Wanchai Funoo code 51383652  
           :Woottikrai Kakeaw code 51383676  
           :Anontawat Mala code 51384758  
**Project advisor** :Dr.Salisa Verapun  
**Major** :Mechanical Engineering  
**Department** :Mechanical Engineering  
**Academic year** :2012

---

### Abstract

The purpose of this study is to investigate a hand-layup composite material forming technique to fabricate a flattened and a curved turbine blade and the properties of the composite sheet under tensile test were observed. Thereafter, a small 3-blade vertical wind turbines were built and tested for overall performance under the wind speed of 5.5 meter per second.

The material properties testing results that, among 9 formulas, one of which contains 67.57 percent resin, 29.73 percent glass fiber, 2.03 percent Monostyren Monomer and 0.68 percent MEKP provides the highest modulus of 7073.87 MPa. This is chosen to furnish the turbine blade.

Conclusion of the test wind turbine vertical axis type 3 blades an efficiency of the turbine 59.2 percent and the mechanical performance of the turbine 22.23 percent. Wind turbines vertical axis type 3 blades flat plate, efficient turbines 56.25 percent and the mechanical performance of the turbine 9.82 percent. Observed the performance of wind turbines, vertical axis according to research with the highest possible is 30 percent, but the results of experiments on the efficiency of up to 59.2 percent as a result of experiments in the wind tunnel, a small performance of higher than the turbine theory. According to research the effects of small wind tunnel with a vertical axis turbine. And equations used do not cover all the relevant variables.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร.ศลิษา วีรพันธุ์ เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและช่วยแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำโครงการนี้ และขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำหรือให้ข้อมูลเป็นที่ปรึกษาการทำโครงการจนเสร็จสมบูรณ์ตลอดจนให้การดูแลและให้ความเข้าใจ ข้าพเจ้าขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณพ่อแม่สำหรับกำลังทรัพย์และกำลังใจที่สำคัญยิ่งและท่านอื่นๆ ที่ข้าพเจ้าไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ได้ให้ความเมตตาและให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำโครงการในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนโครงการสถานที่และค่าใช้จ่ายบางส่วนของการทำโครงการนี้ และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาทุกท่านที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำโครงการ

คณะผู้ดำเนินโครงการ

นายวันชัย พุโน

นายวุฒิไกร กำเชียว

นายอนนทรัฐวิฎ มาลา

มีนาคม 2556

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
Abstrac.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขต.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 สถานที่ปฏิบัติงาน.....	2
1.6 อุปกรณ์ที่ใช้.....	2
1.7 งบประมาณที่ใช้.....	2
1.8 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลังงานลม.....	4
2.2 การใช้พลังงานลมในประเทศไทย.....	4
2.3 ชนิดของกังหันลมแบบแกนตั้ง.....	5
2.4 ประสิทธิภาพของกังหันลม.....	7
2.5 วัสดุคอมโพสิต.....	11
2.6 คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่พอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก(FRP).....	13
2.7 การรับแรงของวัสดุคอมโพสิต.....	13
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด(Stress-Strain Relationship).....	14
2.9 การทดสอบแรงดึงของพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638 TYPE I.....	15
2.10 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ.....	17
2.11 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วัสดุคอมโพสิต.....	19
3.1 วัตถุประสงค์ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต.....	19
3.2 ส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิต.....	20
3.3 สูตรการผสม.....	23
3.4 การขึ้นรูปวัสดุทดสอบเป็นแผ่นแบบ 1 ชั้น และนำมาตัดเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638 TYPE I.....	24
3.5 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบด้วยแรงดึง.....	27
3.6 วิธีการทดสอบ.....	27
3.7 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึงวัสดุ.....	28
3.8 ผลการทดสอบ.....	33
3.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	34
3.10 สรุปผลการทดสอบ.....	35
บทที่ 4 วิธีการสร้างกัณฑ์ลมนแกนตั้ง.....	36
4.1 รูปแบบของกัณฑ์ลมนแกนตั้ง.....	36
4.2 วัสดุและอุปกรณ์.....	37
4.3 วิธีการสร้างกัณฑ์.....	38
บทที่ 5 การทดสอบหาประสิทธิภาพของกัณฑ์ลมนแกนตั้ง.....	49
5.1 การทดสอบหาประสิทธิภาพกัณฑ์ลมนแกนตั้งที่ความเร็วลมประมาณ 5.5 เมตรต่อวินาที...49	49
5.2 ผลการทดสอบกัณฑ์ลมนแกนตั้งในอุโมงค์ลม กัณฑ์ลมนแกนตั้งชนิด 3 ใบพัด.....	55
5.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพกัณฑ์ลมนแกนตั้ง.....	58
5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบกัณฑ์ลมนแกนตั้งในอุโมงค์ลม.....	58
5.5 สรุปผลการทดสอบกัณฑ์ลมนแกนตั้งในอุโมงค์ลม.....	59
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก ก การทดสอบแรงดึงของวัสดุเรซินเสริมใยแก้ว.....	63
ภาคผนวก ข การทดลองกัณฑ์ลมนแกนตั้งในอุโมงค์ลม.....	115
ภาคผนวก ค การคำนวณ.....	132
ภาคผนวก ง แบบร่างกัณฑ์ลมนแกนตั้ง.....	136

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กังหันลมแกนตั้งความเร็วต่ำ.....	4
รูปที่ 2.2 แบบกังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงจุด ชนิดกังหันลมซาโวเนียส.....	5
รูปที่ 2.3 แบบกังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงยก ชนิดกังหันลมแดร์เรียส.....	6
รูปที่ 2.4 แบบกังหันลมต่างๆ.....	6
รูปที่ 2.5 กระบวนการทำงานของกังหันลม.....	7
รูปที่ 2.6 Control Volume กังหันลม.....	8
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนรูปพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 2.8 วัสดุคอมโพสิต.....	11
รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในของวัสดุคอมโพสิต.....	12
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะแรงดึงที่กระทำต่อคอมโพสิต.....	13
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะคอมโพสิตที่ได้รับแรงกดอัด.....	13
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะแรงเฉือนที่กระทำต่อคอมโพสิต.....	14
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะแรงดัดที่กระทำต่อคอมโพสิต.....	14
รูปที่ 2.14 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve).....	15
รูปที่ 2.15 มาตรฐานวัสดุทดสอบ ASTM D638 TYPE I.....	15
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดสอบมาตรฐานวัสดุทดสอบ ASTM D638 TYPE I.....	16
รูปที่ 2.17 กังหันลมใบเรียบต้นแบบ.....	17
รูปที่ 2.18 กังหันลมใบโค้งต้นแบบ.....	18
รูปที่ 3.1 ขัดผิวแม่แบบ.....	24
รูปที่ 3.2 การผสมสารเคมี.....	25
รูปที่ 3.3 ทารชิ้นที่ผสมแล้วลงในแม่แบบ.....	25
รูปที่ 3.4 การวางใยแก้ว.....	25
รูปที่ 3.5 การประกบแม่แบบ.....	26
รูปที่ 3.6 การตัดแบบโดยตัดตามแนวเส้นใย.....	26
รูปที่ 3.7 นำชิ้นงานทดสอบไปขัดด้วยกระดาษทราย.....	27
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานคอมโพสิตที่ตัดตามมาตรฐาน ASTM D638 TYPE I.....	27
รูปที่ 3.9 เปิดเครื่องตั้งวัสดุ.....	28
รูปที่ 3.10 เปิดโปรแกรมเครื่องตั้ง.....	28
รูปที่ 3.11 หน้าจอเครื่องตั้ง.....	28
รูปที่ 3.12 ตั้งค่าเริ่มต้น.....	29
รูปที่ 3.13 ติดตั้งชิ้นงานในเครื่องตั้งเพื่อทำการทดสอบ.....	29



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 กดปุ่ม New ก่อนจะทดสอบชิ้นงาน.....	30
รูปที่ 3.15 กดปุ่ม Start เพื่อทำการทดสอบการดึง.....	30
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงผลข้อมูลค่าต่างๆ.....	30
รูปที่ 3.17 ปุ่ม Stop การใช้งาน.....	31
รูปที่ 3.18 ตารางผลการทดสอบ.....	31
รูปที่ 3.19 ทำการปิดโปรแกรม.....	31
รูปที่ 3.20 บันทึกข้อมูล.....	32
รูปที่ 3.21 ชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ.....	34
รูปที่ 3.22 ชิ้นงานหลังทำการทดสอบ.....	34
รูปที่ 4.1 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบ.....	36
รูปที่ 4.2 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้ง.....	36
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของอะคริลิค.....	38
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของการตัดเส้นใยแก้ว.....	38
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเตรียมน้ำยาเรซิน.....	39
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะแสดงการทำหีบของน้ำยาเรซิน.....	39
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะแกะแบบออก.....	40
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการตัดของแบบใบเรียบ.....	40
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการผ่าครึ่งของท่อพีวีซีใช้ทำแม่พิมพ์.....	41
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะขัดมันด้วยเทียน.....	41
รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการวางทับกันของแผ่นพีวีซี 2 แผ่น.....	42
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการตัดที่ได้ขนาดของใบโค้ง.....	42
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะลักษณะตุ๊กตาครอบตลับลูกปืน.....	43
รูปที่ 4.14 แสดงแกนเพลลาของกังหัน.....	43
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการเชื่อมติดกันของตัววัดแรงบิด.....	44
รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะการเจาะแผ่นอะคริลิค.....	45
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะการตัดแผ่นสังกะสีที่ได้.....	45
รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะการพับและการเจาะฉากจับยึด.....	46
รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งการวางตุ๊กตากับอะคริลิค.....	46
รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะการวางทำมุมกันของกังหันลมแบบใบเรียบ.....	47
รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะการวางทำมุมกันของกังหันลมแบบใบโค้ง.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะการติดฉากจับยึดแบบทแยงกัน.....	47
รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะการการสวมสอดกับตัวฉากจับยึด.....	48
รูปที่ 5.1 อุโมงค์ลม.....	49
รูปที่ 5.2 เครื่องวัดความเร็วลมชนิด testo 511.....	49
รูปที่ 5.3 เครื่องวัดความเร็วรอบ MULTIFUNCTIONAL ENGINE TACHOMETER 950-1495.....	50
รูปที่ 5.4 ตาซึ่งสปริง.....	50
รูปที่ 5.5 ชุดประกอบใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้ง.....	50
รูปที่ 5.6 ชุดประกอบกังหันลมแนวแกนตั้งกับอุโมงค์ลม.....	51
รูปที่ 5.7 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลมโดยมองจากด้านจากด้านหน้าของอุโมงค์ลม.....	52
รูปที่ 5.8 แสดงตำแหน่งการวางกังหันลม และตำแหน่งการวัดความเร็วลมหน้า – หลังกังหันลม ใน อุโมงค์ลมโดยมองจากด้านบนของอุโมงค์ลม.....	52
รูปที่ 5.9 การประกอบกังหันลมเข้ากับอุโมงค์ลม.....	53
รูปที่ 5.10 แสดงการหมุนของกังหันลมก่อนทำการทดสอบ.....	53
รูปที่ 5.11 แสดงการวัดความเร็วลม.....	54
รูปที่ 5.12 แสดงการติดกระดาษเรืองแสงลงบนแผ่นอะคริลิกเพื่อที่จะวัดความเร็วรอบ.....	54
รูปที่ 5.13 แสดงการวัดทอร์ก (T).....	54
รูปที่ 5.14 แสดง contour plot ของความเร็วหน้าและหลังกังหันลมแบบใบเรียบ.....	55
รูปที่ 5.15 แสดง contour plot ของความเร็วหน้าและหลังกังหันลมแบบใบโค้ง.....	57

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 งบประมาณที่ใช้.....	2
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบ ข้อดี - ข้อเสีย ของกังหันลมแกนตั้ง.....	7
ตารางที่ 3.1 วัสดุในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต.....	20
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต.....	21
ตารางที่ 3.3 ปริมาณส่วนผสมทั้ง 9 สูตร.....	23
ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบที่ได้ในสูตร A - D สูตรละ 5 ชิ้น.....	33
ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้ในการทดสอบทั้ง 9 สูตร.....	35
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบความเร็วลมหน้าและหลังของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ในอุโมงค์ลม.....	55
ตารางที่ 5.2 ผลการวัดความเร็วรอบและแรงบิดของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ.....	56
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบความเร็วลมหน้าและหลังของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ในอุโมงค์ลม.....	56
ตารางที่ 5.4 ผลการวัดความเร็วรอบและแรงบิดของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง.....	57
ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของกังหันลม.....	58
ตารางที่ 5.6 ผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม.....	58

## สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่รับลม (ตารางเมตร)
$A_0$	พื้นที่หน้าตัดที่รับแรง (ตารางเมตร)
$C_p$	สัมประสิทธิ์กำลังงาน (Power Coefficient)
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)
E	Modulus of elasticity (นิวตันต่อตารางเมตร)
H	ความสูง (เมตร)
I	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (แอมแปร์)
$l_0$	ความยาวเริ่มต้น (มิลลิเมตร)
$\Delta l$	ความยาวที่ยืดออก (มิลลิเมตร)
MEKP	Methy Ethyl Ketone Peroxide Butanox M-60
m	มวลอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
N	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
$\eta$	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
P	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
$P_a$	กำลังลม (วัตต์)
$P_w$	กำลังลมที่กังหันลมดึงออกมาได้ (วัตต์)
$\rho$	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
T	แรงบิด (นิวตันต่อเมตร)
V	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
V	ความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า (โวลต์)
$\omega$	ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
$\sigma$	ความเค้น (นิวตันต่อตารางเมตร)
$\epsilon$	ความเครียด

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พลังงานลมเป็นพลังงานตามธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความกดดันของบรรยากาศและแรงจากการหมุนของโลก สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเร็วลมและกำลังลม เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าลมเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่มีอยู่ในตัวเอง ในปัจจุบันมนุษย์จึงได้ให้ความสำคัญและนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่โดยทั่วไป ไม่ต้องซื้อหา เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จักหมดสิ้น ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเอาพลังงานลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น แต่ในประเทศไทยบางพื้นที่ยังมีปัญหาในการวิจัยพัฒนานำเอาพลังงานลมมาใช้งานเนื่องจากปริมาณของลมไม่สม่ำเสมอตลอดปี แต่ก็ยังคงมีพื้นที่บางพื้นที่ที่สามารถนำเอาพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ เช่น พื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลเป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ช่วยในการเปลี่ยนจากพลังงานลมออกมาเป็นพลังงานในรูปอื่น ๆ เช่น พลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานกล เป็นต้น ได้แก่ กังหันลม ซึ่งนำไปสู่โครงการนี้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติและเทคนิคการขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตแบบเรซินเสริมใยแก้ว
- 1.2.2 ศึกษาการนำวัสดุคอมโพสิตไปใช้ทำใบพัดกังหันลมขนาดเล็กแบบแกนตั้ง
- 1.2.3 ทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบใบเรียบ 3 ใบ และใบโค้ง 3 ใบ

#### 1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 ทดสอบวัสดุคอมโพสิตเรซินเสริมใยแก้วแบบทอจากการขึ้นรูปด้วยมือ
- 1.3.2 สร้างกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็ก แบบใบโค้ง 3 ใบ และแบบใบเรียบ 3 ใบโดยใช้วัสดุคอมโพสิตแบบเรซินเสริมใยแก้ว
- 1.3.3 ทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลมทั้ง 2 แบบภายใต้ความเร็วลมประมาณ 5.5 m/s

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 ได้เรียนรู้เทคนิคการขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตแบบเรซินเสริมใยแก้ว
- 4.2 ได้เรียนรู้วิธีการสร้างใบพัดของกังหันโดยใช้วัสดุคอมโพสิตแบบเรซินเสริมใยแก้ว
- 4.3 สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลมทั้ง 2 แบบที่นำมาทดสอบได้

#### 1.5 สถานที่ปฏิบัติงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

#### 1.6 อุปกรณ์ที่ใช้

- 1.6.1 อุโมงค์ลม
- 1.6.2 กังหันลมแกนตั้งแบบใบโค้ง 3 ใบ และแบบใบเรียบ 3 ใบ
- 1.6.3 เครื่องวัดความเร็วลม
- 1.6.4 เครื่องวัดความเร็วรอบ
- 1.6.5 ตาชั่งสปริงขนาด 5 kg

#### 1.7 งบประมาณที่ใช้

ตารางที่ 1.1 งบประมาณที่ใช้

ลำดับ	รายการ	ราคา	หน่วย
1	ค่ากังหันลม	1000	บาท
2	ค่าอุปกรณ์ทำฐานและตัวยึดกังหันลม	1000	บาท
3	ค่าใช้จ่ายการทำรูปเล่มรายงาน	500	บาท
4	อื่นๆ	500	บาท

### 1.8 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	พ.ศ.2554										พ.ศ.2555										พ.ศ.2556							
	Pre - Project										Project																	
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ธ.พ.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ย.	พ.ค.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ธ.พ.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ย.	พ.ค.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ธ.พ.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ย.	
1.หาข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่ลุ่ม แบบ แผนภูมิแนบวงรี																												
2.เลือกแบบกึ่งพื้นที่ลุ่ม																												
3.เขียนแบบเสนอวิศวกรรม																												
4.ทำการขอแบบกึ่งพื้นที่ลุ่มและ เขียนแบบ (Drawing)																												
5.ทดสอบวัสดุที่จัดทำพื้นที่ลุ่ม																												
6.สร้างกึ่งพื้นที่ลุ่ม																												
7.ขอแบบการทดสอบกึ่งพื้นที่ลุ่ม																												
8.ทำการทดสอบประสิทธิภาพ ของกึ่งพื้นที่ลุ่ม																												
9.สรุปผลการทดสอบ																												
10.เขียนเล่มรายงานและสอบ วิศวกรรม																												

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลังงานลม

การเคลื่อนที่ของลมเกิดจากการที่มีอุณหภูมิในแต่ละสถานที่ต่างๆ แตกต่างกันโดยอากาศร้อนจะวิ่งเข้ามาแทนที่อากาศเย็นรวมทั้งการหมุนของโลกจึงทำให้มีการหมุนเวียนของลมเกิดขึ้นตลอดเวลา ลมเป็นพลังงานทดแทนที่ไม่มีวันหมดไปจากโลกใบนี้ ถ้าโลกยังคงหมุนอยู่และยังคงมีแสงอาทิตย์

การนำพลังงานลมมาใช้จำเป็นต้องทำการแปลงรูปพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศหรือที่เรียกว่า พลังงานจลน์ของลมเปลี่ยนมาเป็นพลังงานกล ในการเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ที่ได้จากลมมาเป็นกำลังงานทางกลนั้น จะต้องมีอุปกรณ์ทางกลหรือกลไกที่จะต้องสร้างขึ้นมาเพื่อเปลี่ยนรูปของพลังงานโดยแบ่งออกได้หลายชนิดและหลายวิธี แต่ที่ได้รับความนิยมและถือว่าเป็นเครื่องกลไกที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปในขณะนี้ มีชื่อเรียกว่า กังหันลม

#### 2.2 การใช้พลังงานลมในประเทศไทย

จากการศึกษาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย[1] โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า ความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทยอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ มีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 4 เมตร/วินาทีโดยแหล่งศักยภาพพลังงานลมที่ดีที่สุดของประเทศไทยมีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 6.4 เมตร/วินาทีขึ้นไปที่สูง 50 เมตร โดยจะอยู่ในแถบเทือกเขาและบริเวณชายทะเล

เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานลมที่ต่ำ การติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่จึงมักเกิดปัญหาเพราะว่า กำลังลมไม่เพียงพอต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมขนาดใหญ่ ซึ่งต้องการอยู่ประมาณ 12-15 เมตร/วินาที ทางเลือกที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลมของประเทศไทยจึงควรเป็นกังหันแบบขนาดเล็กในช่วงกำลังลมที่เหมาะสม โดยในส่วนของกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าความเร็วต่ำได้มีการออกแบบให้สามารถทำงานได้ที่ความเร็วลมต่ำดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กังหันลมแกนตั้งความเร็วต่ำ[2]



## 2.3 ชนิดของกังหันลมแบบแกนตั้ง

กังหันลมแบบแกนตั้ง (Vertical Axis Turbine (VAWT)) กังหันลมแนวแกนตั้ง เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง เช่น กังหันลมแดร์เรียส (Darrieus) และกังหันลมซาโวเนียส (Savonius) โดยกังหันลมแบบแกนตั้งมีกังหันลมแนวคิดใหม่ที่สร้างใบพัดให้รับลมในแนวแกนตั้งซึ่งเหมาะกับการใช้งานในพื้นที่ที่มีลมแรงมากๆ เช่น บริเวณชายทะเล เป็นต้น เนื่องจากการรับลมในแนวแกนตั้งจึงทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องระวังเรื่องของการเสียหายมากนัก และยังไม่ต้องการการดูแลบำรุงรักษามากอีกด้วย เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยใช้รอบการทำงานประมาณ 100 - 300 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลม การพัฒนาจึงอยู่ในวงจำกัดและมีความไม่ต่อเนื่องในการพัฒนา ซึ่งกังหันลมแบบแกนตั้งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

### 2.3.1 กังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดูด

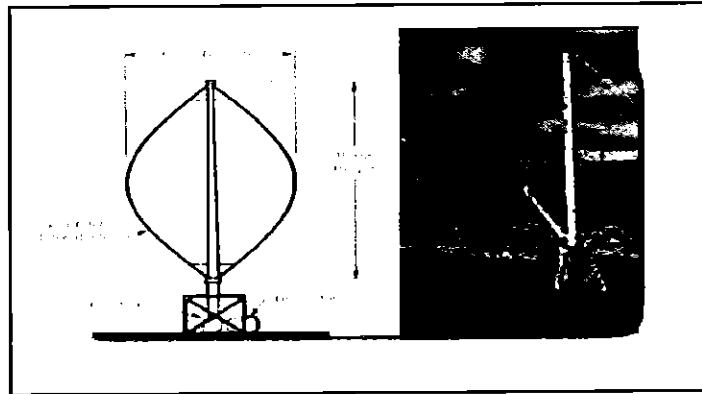
เป็นแรงที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในอากาศมีทิศทางขนานกับวัตถุที่เคลื่อนที่นี้ก็คือ แรงเสียดทานของอากาศที่ผ่านส่วนต่างๆ ของกังหันลม กังหันลมจะหันหน้าใบพัดเข้าสู่กระแสของไหล กังหันลมประเภทนี้มีแรงบิดสูงแต่ความเร็วรอบต่ำเช่น แบบซาโวเนียสและแบบรูปถ้วย ที่รู้จักกันมาก คือ แบบซาโวเนียส เป็นกังหันแบบใช้แรงดูด



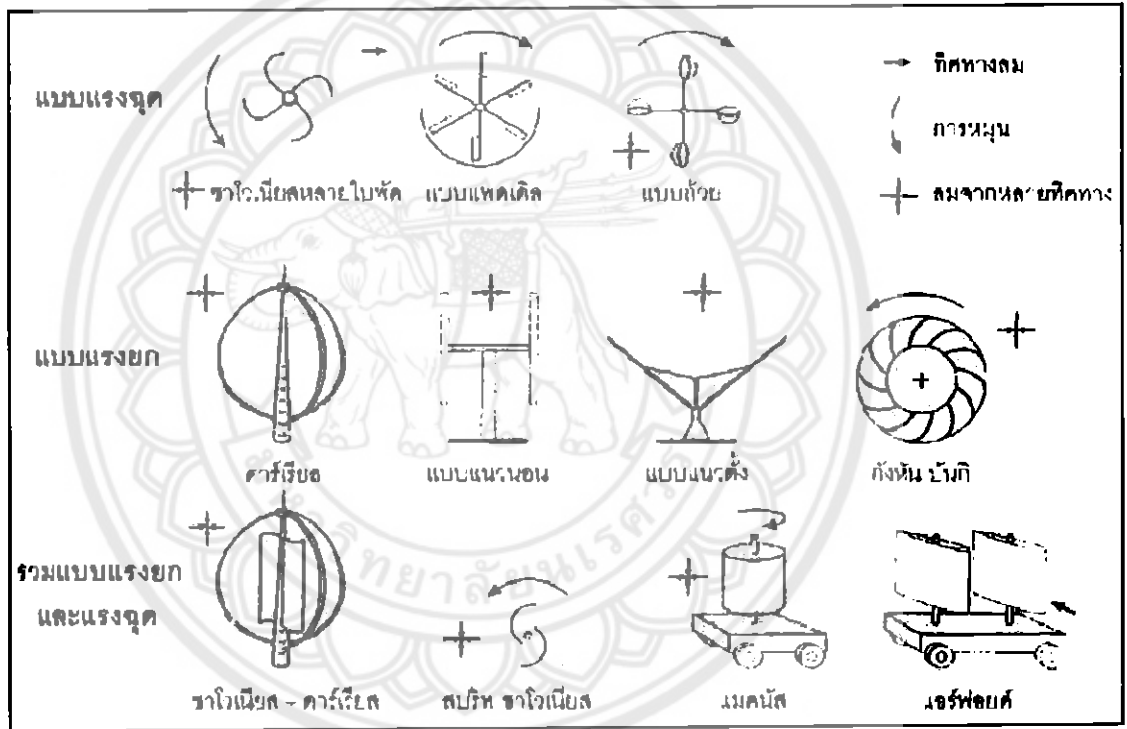
รูปที่ 2.2 แบบกังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดูด ชนิดกังหันลมซาโวเนียส

### 2.3.2 กังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงยก

เกิดขึ้นโดยความกดอากาศต่ำที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวทั้ง 2 ด้านของใบพัดไม่เท่ากันด้านที่มีระยะทางมากกว่าอากาศจะไหลผ่านเร็วกว่าจึงทำให้เกิดความกดอากาศต่ำตามหลักของ เบร์นูลลี ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงยก กังหันลมแกนตั้งที่ขับเคลื่อนด้วยแรงยก จะหันข้างเข้าหากระแสการไหลทำให้เกิดแรงในแนวตั้งฉาก ซึ่งกังหันลมแบบนี้จะให้ความเร็วรอบสูง เหมาะแก่การผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 แบบกังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงยก ชนิดกังหันลมแดร์เรียด [3]

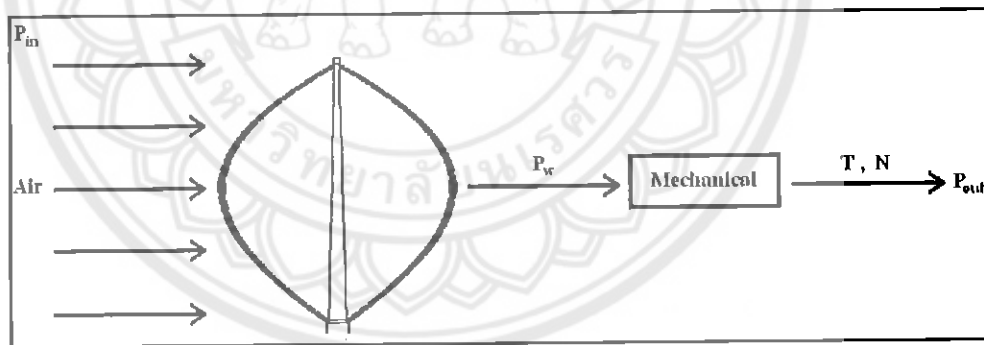


รูปที่ 2.4 แบบกังหันลมต่างๆ

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบ ข้อดี – ข้อเสีย ของกังหันลมแกนตั้ง

ข้อดี	ข้อเสีย
- สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง	- กังหันลมแบบแกนตั้งมีข้อเสียตรงที่ เวลาลมพัดมาจะมีใบเพียงหนึ่งใบเท่านั้นที่จะรับลมเต็มที่ร้อยเปอร์เซ็นต์ เช่น ถ้ามีสองใบที่ติดตั้งห่างกัน ๑๘๐ องศา ก็จะมีหนึ่งใบรับลม อีกหนึ่งใบไม่รับลม นอกจากนั้นใบที่ไม่ได้รับลม ยังมีแรงลมตีด้านหลังใบ ทำให้มีแรงต้านเกิดขึ้นอีกด้วย ดังนั้นถ้าสังเกตตอนที่กังหันลมแบบนี้ตอนจะเริ่มหมุน มักจะออกตัวเริ่มต้นหมุนลำบาก
- ไม่ต้องมีหางใบบังคับให้ตัวกังหันหมุนเข้ารับลม	
- ออกแบบใบและสร้างได้ง่ายและประหยัด	
- สร้างเสาของกังหันลมได้ง่ายและประหยัด	
- ต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆในระบบได้ง่าย	
- การควบคุมและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ต่างๆ ทำได้ง่ายเพราะสามารถติดตั้งกับพื้นดินได้	

#### 2.4 ประสิทธิภาพของกังหันลม



รูปที่ 2.5 กระบวนการทำงานของกังหันลม

ประสิทธิภาพของกังหันลมวัดได้จากพลังงานกลที่ได้ออกมา ( $P_{out}$ ) หารด้วยพลังงานลมที่ป้อนเข้า ( $P_{in}$ )

$$\eta_{tot} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

### 2.4.1 กำลังลม (Wind Power $P_a = P_{in}$ )

ปริมาณของพลังงานลมในหนึ่งหน่วยเวลา (กำลังลม) คำนวณได้จากสมการพื้นฐาน พลังงาน  
จลน์

$$P_{in} = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 \quad (2)$$

$$\dot{m} = \rho AV \quad (3)$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (4)$$

(ในกรณีที่อากาศเป็นการไหลแบบ incompressible ,  $\rho =$  คงที่)

$P_{in}$  = กำลังลม (วัตต์)

$\dot{m}$  = มวลอากาศที่ตกกระทบตั้งฉากกับทิศทางการไหล (กิโลกรัมต่อวินาที)

$V$  = ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

$\rho$  = ความหนาแน่นมวลอากาศ 1.23 (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$A$  = พื้นที่รับลมของกังหันโดยที่  $A = DH$  (ตารางเมตร)

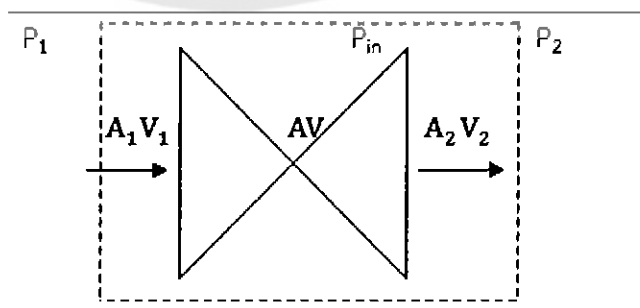
$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)

$H$  = ความสูงของใบพัดกังหัน

### 2.4.2 กำลังที่กังหันลมสามารถดึงออกมาได้ ( $P_w$ )

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of Energy) พลังงานไม่มีการ  
สูญหายหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ แต่เปลี่ยนรูปจากพลังงานแบบหนึ่งไปเป็นอีกแบบหนึ่งเท่านั้น เมื่อ  
พิจารณาที่ตัวกังหันลมจากรูปที่ 1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง (Continuity  
Equations) ได้ดังนี้

$$A_1 V_1 = AV = A_2 V_2 \quad (5)$$



รูปที่ 2.6 Control Volume กังหันลม

เราพบว่ากำลังที่กังหันลมสามารถดึงออกมาได้นั้นดูจากความเร็วลม  $V_1$  ที่มาปะทะกับกังหันลม และความเร็วลม  $V_2$  หลังกังหันลม

$$\text{จะได้ว่า} \quad V = (V_1 - V_2) \quad (6)$$

ดังนั้นกำลังที่กังหันลมสามารถดึงพลังงานลมออกมาได้โดยไม่คำนึงถึงการสูญเสีย

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A (v_1^3 - v_2^3) \quad (7)$$

กฎการอนุรักษ์อัตราการไหลเชิงมวล(สมการความต่อเนื่อง)จะได้ดังนี้

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (8)$$

ดังนั้น

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_1 V_1 (V_1^2 - V_2^2) \quad (9)$$

หรือ

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) \quad (10)$$

จารกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยอากาศออกแรงบนกังหันลมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$F = \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) \quad (11)$$

ตามกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน(แรงกริยาเท่ากับแรงปฏิกิริยา) แรงผลักรต้องถูกหักล้างกับแรงจากอากาศที่ไหลผ่านกังหันด้วยความเร็ว  $\dot{V}$  กำลังที่ต้องการคือ

$$P = F\dot{V} = \dot{m} (V_1 - V_2) \dot{V} \quad (12)$$

ดังนั้นกำลังกลได้รับแรงอากาศที่ไหลสามารถส่งพลังงานหรือกำลังก่อนและหลังกังหันลมที่ต้องรับภาระจากแรงผลักรและความเร็วการไหล สมการแสดงความสัมพันธ์ความเร็วการไหล  $\dot{V}$  ดังนี้

$$\frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) = \dot{m} (V_1 - V_2) \dot{V} \quad (13)$$

$$\dot{V} = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (14)$$

ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลจะได้ดังนี้

$$\dot{m} = \frac{1}{4} \rho A V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (15)$$

กำลังที่ได้จากกังหันสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (16)$$

#### 2.4.3 ประสิทธิภาพของกังหันลม ( Wind turbine Efficiency - $\eta_T$ )

ประสิทธิภาพของกังหันลม ( Wind turbine Efficiency -  $\eta_T$  ) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังที่ได้รับจากกังหันลม (  $P_w$  ) กับกำลังลม (  $P_{in}$  )

$$\eta_T = \frac{P_w}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (17)$$

$\eta_T$  ประสิทธิภาพของกังหันลม ไม่ได้คำนึงถึงความสูญเสียจากพื้นผิวและกลไกที่ส่งกำลังแท้จริง

$P_w$  = กำลังลมที่กังหันสามารถดึงออกได้

$\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ

$A$  = พื้นที่รับลมของกังหันโดยที่  $A = DH$  (ตารางเมตร)

#### 2.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกำลัง ( $P_{out}$ )

$$P_{out} = T\omega = T \frac{2\pi N}{60} \quad (18)$$

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi N}{60}$  ( rad /s )

$N$  = ความเร็วรอบของเพลลา (rpm)

$T$  = โมเมนต์หรือแรงบิดที่เกิดขึ้น (N/m)

#### 2.4.5 ประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม ( Mechanical Efficiency - $\eta_M$ )

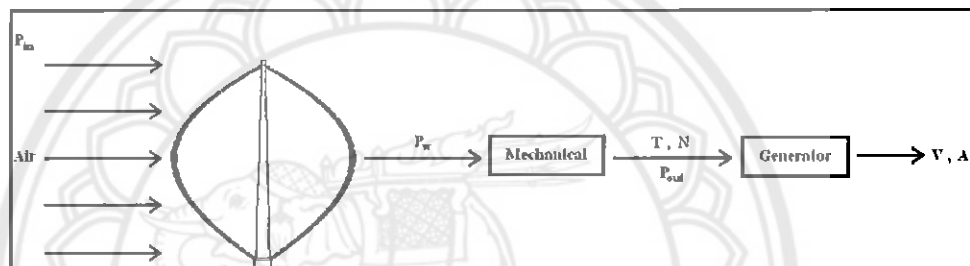
ประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม ( Mechanical Efficiency -  $\eta_M$  ) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังงานที่ได้รับจากกังหันลม (  $P_{out}$  ) กับกำลังลม (  $P_{in}$  )

$$\eta_M = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (19)$$

$$\eta_M = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (20)$$

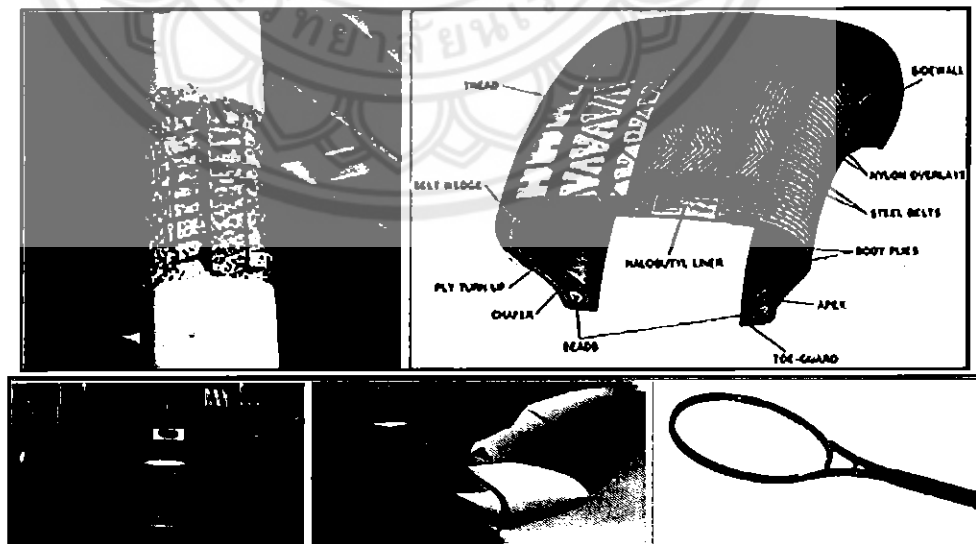
#### 2.4.6 การเปลี่ยนรูปพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

พลังงานลมซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่มีความเร็วค่าหนึ่ง (พลังงานจลน์) เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานทางกลด้วยแรงบิดและความเร็วรอบของแกนหมุนกังหัน พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกเชื่อมต่อกับแกนหมุนของกังหันลมในรูปของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนรูปพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า

#### 2.5 วัสดุคอมโพสิต (Composites Materials)

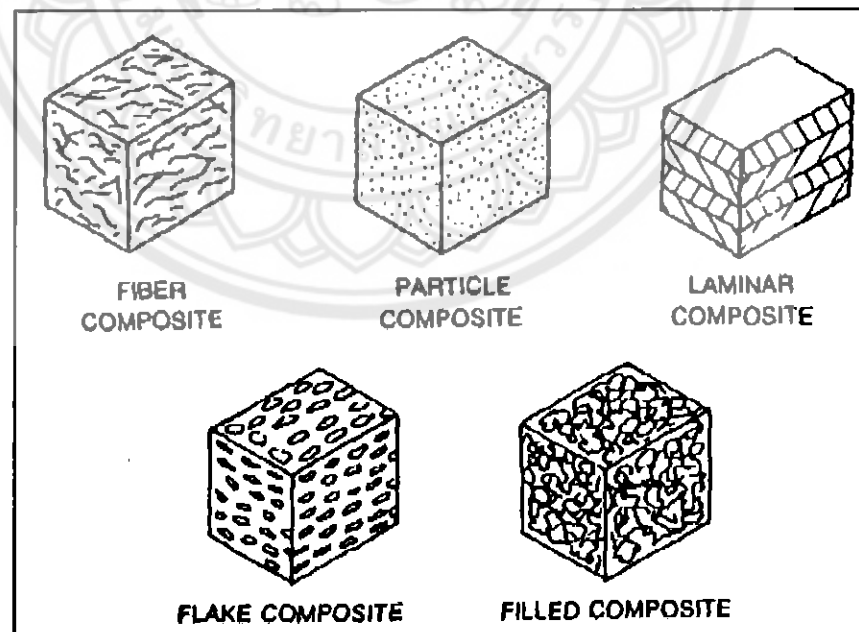


รูปที่ 2.8 วัสดุคอมโพสิต (Composites Materials) [4]

วัสดุคอมโพสิต (Composite) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปวัสดุคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก จะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่ม หรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลัก ให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (base materials) อย่างโลหะ เซรามิกส์ หรือพอลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรง โดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับ ความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทโดยลำพัง

ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ กลุ่มที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (fiber-reinforced polymers, FRP) กลุ่มที่มีเซรามิกเป็นส่วนผสมหลัก (ceramic-matrix composite, CMC) และกลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (metal-matrix composite, MMC) นอกจากนี้ วัสดุคอมโพสิตแบ่งได้ตามลักษณะของตัวเสริมแรง ได้แก่

- 2.5.1 ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous Composites)
- 2.5.2 ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นแบบสุ่ม (Random/Short Fiber)
- 2.5.3 ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใยยาว/เส้นใยต่อเนื่อง (Continuous/Long Fiber)
- 2.5.4 ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate Composites)
- 2.5.5 ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ (Flake Composites)
- 2.5.6 ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นสารตัวเติม (Filled Composites)
- 2.5.7 ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นชั้นหรือซ้อนแผ่น (Laminar or Layered Composites)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในของวัสดุคอมโพสิต (Composites Materials)



## 2.6 คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก(FRP)

### 2.6.1 สมบัติของเส้นใยเสริมแรง

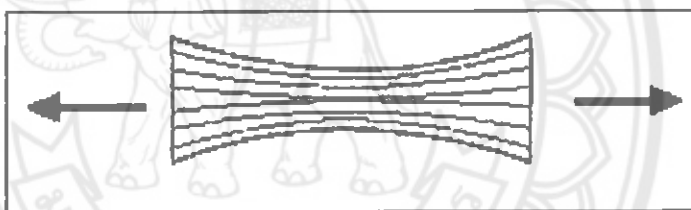
### 2.6.2 สมบัติของพอลิเมอร์(เรซิน)

### 2.6.3 สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง

โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิต เช่น เรือไฟเบอร์กลาสจะนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีที่เรียกว่า แอนด์เลย์อัฟ (hand lay-up) ซึ่งจะมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณ 30-40% แตกต่างจากชิ้นงานคอมโพสิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบิน และอวกาศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงจะมีสัดส่วนของเส้นใยประมาณ 70% การจัดเรียงตัว (orientation) ของเส้นใยในคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้ว สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่แสดงออกมามีค่าแตกต่างกัน ตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือ การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

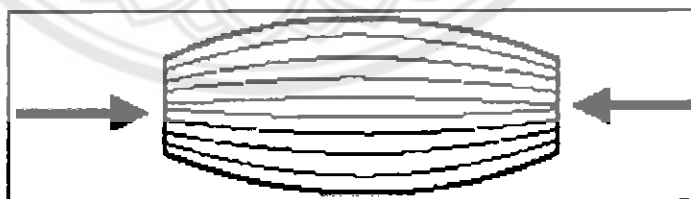
## 2.7 การรับแรงของวัสดุคอมโพสิต

การรับแรงของวัสดุ โดยทั่วไปแรงที่กระทำต่อวัสดุมีด้วยกัน 4 ประเภท คือ



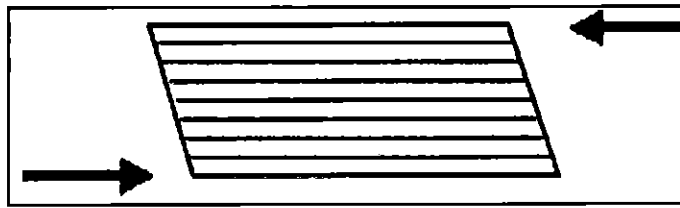
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุคอมโพสิต

แรงดึง (Tension) รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุคอมโพสิต การตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุขึ้นอยู่กับแรงดึง และความแข็งแรงเชิงกลของเส้นใยเสริมแรงที่ใช้



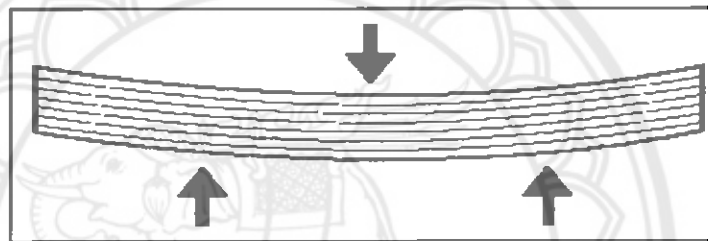
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะคอมโพสิตที่ได้รับแรงกดอัด

แรงกดอัด (Compression) รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะคอมโพสิตที่ได้รับแรงกดอัด ในสภาพนี้ความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นกับสมบัติความแข็งแรงดึง และการยึดติด (adhesion) ของเนื้อพอลิเมอร์เป็นหลัก เนื่องจากพอลิเมอร์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงให้อยู่ในลักษณะเส้นตรง และป้องกันไม่ให้เส้นใยโค้งงอ



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะแรงเฉือนที่กระทำต่อวัสดุคอมโพสิต

แรงเฉือน (Shear) ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุคอมโพสิตมีทิศทางตรงข้ามกัน และแนวแรงอยู่ต่างระดับกัน ดังรูปที่ 2.12 ภายใต้สภาวะแบบนี้โพลิเมอร์จะมีบทบาทอย่างมากในเรื่องการยึดติดกับเส้นใยเสริมแรงไม่ใช่ในเรื่องสมบัติความแข็งแรงเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงเส้นใยเสริมแรงเป็นชั้นๆ



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะแรงดัดที่กระทำต่อวัสดุคอมโพสิต

แรงดัด (Flexure) ลักษณะของแรงที่กระทำกับวัสดุมีลักษณะผสมของแรงดึง แรงเฉือน และแรงกดอัด 3 แรงเข้าด้วยกัน รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะแรงดัดที่กระทำต่อคอมโพสิต เห็นได้ว่ากึ่งกลางของด้านบนของวัตถุถูกแรงกดอัดกระทำ ขณะที่ใต้วัตถุจะถูกแรงยืดและแรงเฉือนจากการยึดตัวของวัตถุ

## 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างความเค้น และความเครียดในโลหะ ความสัมพันธ์นี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำจนความเค้นเพิ่มขึ้น ความเครียดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย หรือความเครียดเพิ่มขึ้นความเค้นก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดจะเป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้นถึงค่าหนึ่งจากนั้นก็จะเป็นเชิงเส้น วัสดุจะเริ่มเข้าสู่การเสียรูปจากรูปร่างเดิม จนเกิดความเสียหาย โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่านี้ไม่เท่ากัน

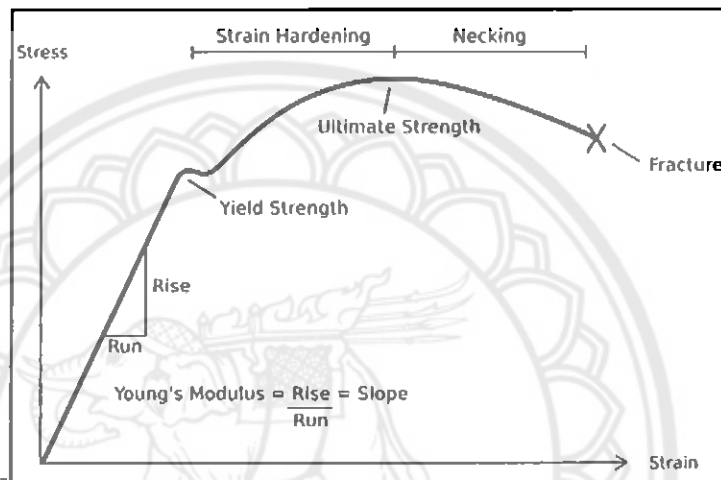
อัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดของวัสดุเราเรียกว่า โมดูลัสความยืดหยุ่น หรือค่ายัง โมดูลัส (Modulus of elasticity or Yong's Modulus : E) หน่วยที่ได้เหมือนกับความเค้น ( $N/m^2$ ) ส่วนสมการที่ใช้คำนวณความเค้นต่อความเครียด เป็นดังนี้

$$E = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{ความเครียด } (\epsilon)} \quad (12)$$

$$\text{ความเค้น } (\sigma) = \frac{\text{แรง (F)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด (A)}} \tag{13}$$

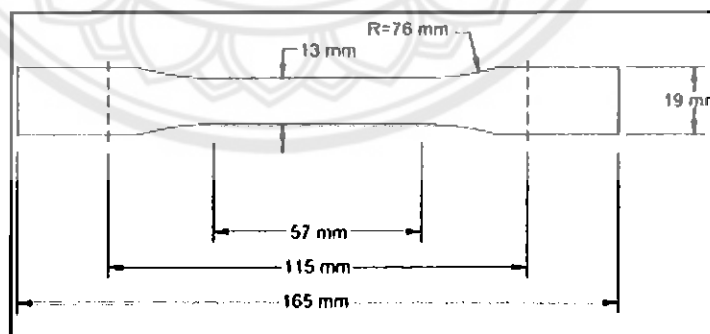
$$\text{ความเครียด } (\epsilon) = \frac{\text{ความยาวเดิม } (l_0)}{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป } (\Delta l)} \tag{14}$$

ข้อดีของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในทางวิศวกรรม เมื่อวัสดุมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมาก วัสดุก็สามารถทนทานต่อแรงกระทำได้มาก และเสียรูปร่างเดิมได้ยากกว่าวัสดุที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นน้อย และยังสามารถทำนายการเสียรูปของวัสดุเมื่อถูกแรงชนิดต่าง ๆ กระทำได้



รูปที่ 2.14 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)

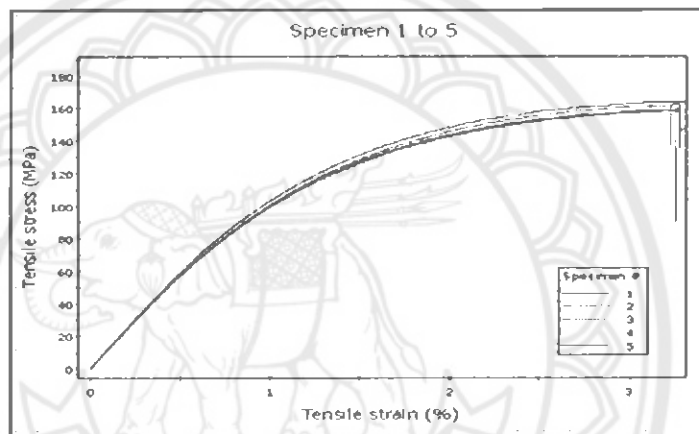
## 2.9 การทดสอบแรงดึงของพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638 TYPE I



รูปที่ 2.15 มาตรฐานวัสดุทดสอบ ASTM D638 TYPE I [5]

ส่วนนี้ของมาตรฐาน ASTM D638 ระบุสภาวะสำหรับการหาสมบัติแรงดึงของพลาสติกและพลาสติกเสริมแรง โดยใช้ชิ้นงานรูปทรงดัมเบลล์ (Types I - V), แท่ง หรือท่อทรงกระบอก สมบัติแรงดึงเหล่านี้ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเครียดที่จุดแตกหัก โมดูลัสของยัง และสมบัติทางกลของพลาสติกสามารถเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารตัวเติมบางประเภทเข้าไปในพลาสติก เช่น ความแข็งแรง การยึดตัวและความเหนียว เช่นเดียวกับวัสดุหลายประเภท จะต้องมีการ

ใช้ extensometer ในการวัดค่าความเครียดได้อย่างถูกต้อง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกมักจะประกอบด้วยส่วนของอีลาสติกแบบเชิงเส้นและส่วนของพลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น บริเวณส่วนของเชิงเส้นนั้นจะเกิดขึ้นที่ค่าความเครียดต่ำมากและเนื่องจากค่ามอดูลัสจะตรวจวัดที่ในบริเวณนี้ การใช้ extensometer ที่มีความละเอียดสูงจึงมีความจำเป็น โดยส่วนใหญ่แล้ว extensometer นี้จะมีระยะการวัดที่จำกัดและต้องมีการถอดออกจากชิ้นงานในระหว่างการทดสอบ แต่ extensometer แบบไร้สัมผัส เช่น Advanced Video Extensometer (AVE) หรือ Standard Video Extensometer (SVE) จะมีความละเอียดและความยืดหยุ่นในการตรวจวัดค่ามอดูลัสของแข็งและความเครียดที่จุดแตกหักสำหรับพลาสติกเกือบทุกประเภท นอกจากนี้ แนะนำให้ใช้ mechanical wedge grips หรือ pneumatic side-acting grips สำหรับการจับยึดชิ้นงานในการทดสอบนี้

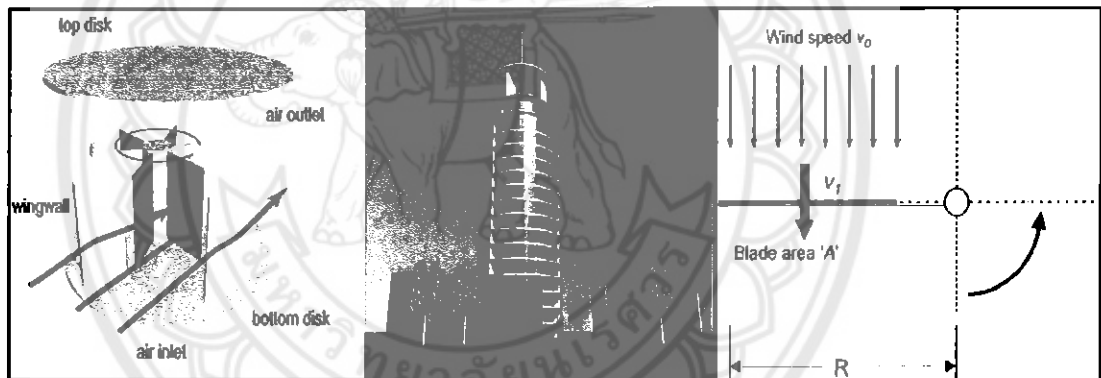


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดสอบมาตรฐานวัสดุทดสอบ ASTM D638 TYPE I

จากตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งแกน y เป็นความเค้นดึงและแกน x เป็นความเครียดดึง

## 2.10 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ

การสร้างกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ได้นำรูปแบบของกังหันลมมาจาก Renewable Energy[6] ซึ่งในบทความได้กล่าวถึง กังหันลมแกนตั้งแบบใบเรียบที่ได้พัฒนามาจาก กังหันลมแกนตั้งสมัยโบราณ มาเป็นกังหันแกนตั้งสมัยใหม่ที่สามารถติดตั้งไว้บนอาคารสูง มีลักษณะ เป็นแบบแพดเดิล มีใบพัด 4 ใบ มีแผ่นเพลทลักษณะเป็นวงกลมติดตั้งอยู่เหนือใบพัด และได้ใบพัดทั้ง 4 ใบ ซึ่งในการสร้างกังหันลมได้นำแบบของกังหันลมในบทความมาประยุกต์ใช้ในการสร้าง โดยการ สร้างได้ทำการสร้างกังหันลมให้มีขนาดเล็กขนาด 30x30 เซนติเมตร จากใบพัดกังหันลมในบทความที่มี 4 ใบ ลดเหลือ 3 ใบ เพราะจำนวนใบยิ่งน้อยลง ความเร็วรอบจะสูงแต่แรงบิดต่ำ เหมาะสำหรับผลิต กระแสไฟฟ้า ถ้าวัดตั้งแต่ 4 ใบขึ้นไป ความเร็วรอบจะต่ำแต่แรงบิดสูงเหมาะสำหรับสูบน้ำ เช่นต่อปั้มน้ำ เข้ากับเพลลาของกังหันลมเพื่อใช้สูบน้ำ โดยใบพัดกังหันลมทั้ง 3 ใบ ทำมุมกัน 120 องศา ส่วนแผ่นเพลท กลมบนใบพัดกังหันลม และได้ใบพัด ใช้แผ่นอะคริลิกแทนในการจับยึดตลับลูกปืน และเป็นพื้นที่ที่ใช้ ตั้งใบพัดโดยมีแผ่นฉากสังกะสีเป็นตัวจับยึดแผ่นอะคริลิกกับใบพัดอีกทีหนึ่ง



รูปที่ 2.17 กังหันลมใบเรียบต้นแบบ

## 2.11 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง

การสร้างกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ได้นำรูปแบบของกังหันลมมาจาก Investigation into the relationship of the overlap ratio and shift angle of double stage three bladed vertical axis wind turbine(VAWT)[7] ซึ่งในบทความได้กล่าวถึง กังหันลมแกนตั้งแบบใบโค้งที่เป็นที่นิยมพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีต มีลักษณะเป็นแบบซาโวเนียส มีใบพัด 3 ใบ มีแผ่นเพลทลักษณะเป็นวงกลมติดตั้งอยู่เหนือใบพัด และใต้ใบพัดทั้ง 3 ใบ มีจุดเด่น คือ ใช้ความเร็วลมที่ทำให้เริ่มหมุนต่ำ มีกลไกการสร้างที่ไม่ซับซ้อน ทำการติดตั้งง่าย ในการสร้างกังหันลมได้นำแบบของกังหันลมในบทความมาประยุกต์ใช้ในการสร้าง โดยการสร้างได้ทำการสร้างกังหันลมให้มีขนาดเล็กขนาด 30x30 เซนติเมตร ทำเป็นใบพัด 3 ใบเหมือนบทความซึ่งความเร็วรอบที่ได้สูงแต่แรงบิดต่ำเหมาะสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ถ้าตั้งแต่ 4 ใบขึ้นไป ความเร็วรอบจะต่ำแต่แรงบิดสูง โดยใบพัดกังหันลมทั้ง 3 ใบ ทำมุมกัน 120 องศา ส่วนแผ่นเพลทกลมบนใบพัดกังหันลม และใต้ใบพัด ใช้แผ่นอะคริลิคแทนในการจับยึดติดลูกปืน และเป็นพื้นที่ที่ใช้ตั้งใบพัดโดยมีแผ่นฉากสังกะสีเป็นตัวจับยึดแผ่นอะคริลิกกับใบพัดอีกทีคล้ายกับกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ



รูปที่ 2.18 กังหันลมใบโค้งต้นแบบ

## บทที่ 3

### วัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต (Composite) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก จะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่ม หรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลัก ให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (base materials) อย่างโลหะ เซรามิกส์ หรือโพลีเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง โดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับ ความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทโดยลำพัง

ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต โดยสร้างใบกั้นชั้นลามเนตตั้งจากเรซินเสริมใยแก้วเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหนียว ยืดหยุ่น ไม่แตกหักง่าย จากการทำสร้างใบของกั้นชั้นลามเนตตั้ง ใช้เทคนิคการขึ้นรูปใบพัดให้เป็นแผ่นแบบ 1 ชั้น (laminar composite) ซึ่งกั้นชั้นลามเนตตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบใช้แม่พิมพ์เป็นแผ่นอะคริลิก 2 แผ่น ประกบกัน ส่วนกั้นชั้นลามเนตตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้งใช้แม่พิมพ์เป็นท่อ PVC ผ่าครึ่งเป็นสองส่วน ครึ่งหนึ่งใช้ตรงส่วนโค้งด้านนอก อีกครึ่งหนึ่งใช้ส่วนโค้งด้านในของท่อ PVC หลังจากนั้นนำมาประกบกัน เมื่อทำการหล่อเรซินเสริมใยแก้วเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทิ้งไว้ให้แห้งแล้วแกะออกจากแม่พิมพ์ก็ได้ใบกั้นชั้นลามของแต่ละแบบ ตามที่ต้องการ

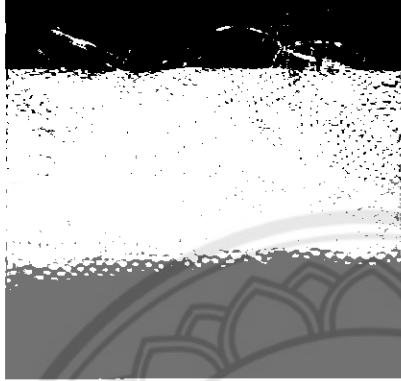

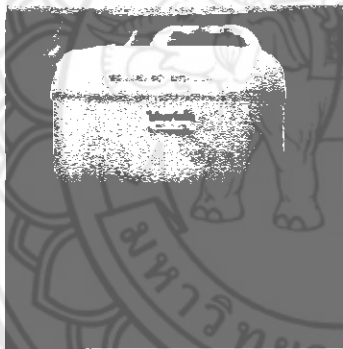

#### 3.1 วัตถุประสงค์ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต

3.1.1 เพื่อหาส่วนผสมของวัสดุคอมโพสิตที่เหมาะสมในการขึ้นรูปใบพัดกั้นชั้นลาม

3.1.2 พัฒนาเทคนิคการขึ้นรูปใบพัดกั้นชั้นลามแบบแผ่น 1 ชั้น ให้มีความสม่ำเสมอและมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกใบ


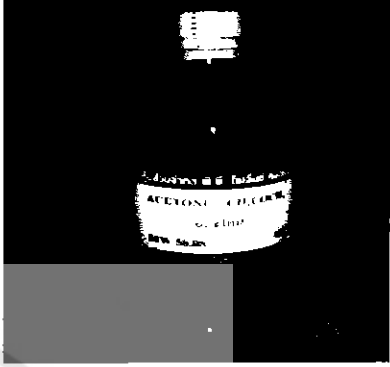



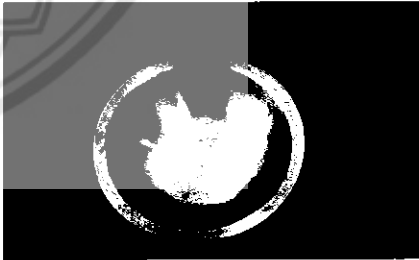
### 3.2 ส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิต

ตารางที่ 3.1 วัสดุในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต

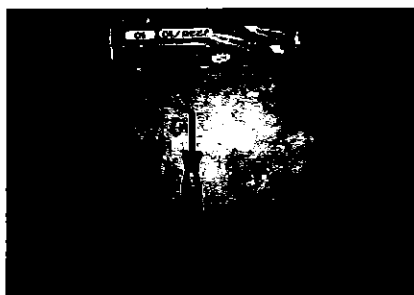
วัสดุ	
	
<p>ใยแก้วแบบใยสาน (Woven Fabrics)</p>	<p>MEKP (ตัวทำแข็ง)</p>
	
<p>โพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester Resin)</p>	<p>styren Monomer (ตัวทำละลาย, <math>C_8H_8</math>)</p>



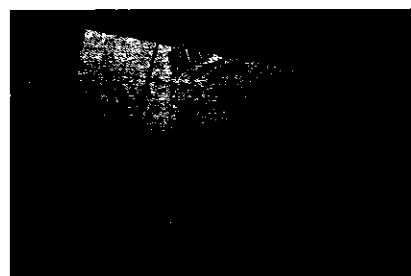
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต

อุปกรณ์	
 <p>ขี้ผึ้งขัดผิว (Rubbing Compound)</p>	 <p>น้ำยาล้างแปรง อะซิโตน (Acetone, <math>C_3H_6O</math>)</p>
 <p>กระดาษทรายเบอร์ 320</p>	 <p>แปรงสำหรับทาเรซิน</p>
 <p>เครื่องชั่งดิจิตอล</p>	 <p>ภาชนะบรรจุสำหรับเทแยก, ผสมเรซิน</p>

## อุปกรณ์ (ต่อ)



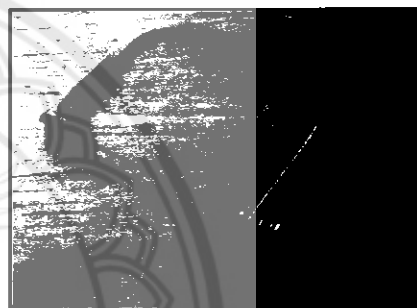
ลูกกิ้ง สำหรับไล์ฟองอากาศ



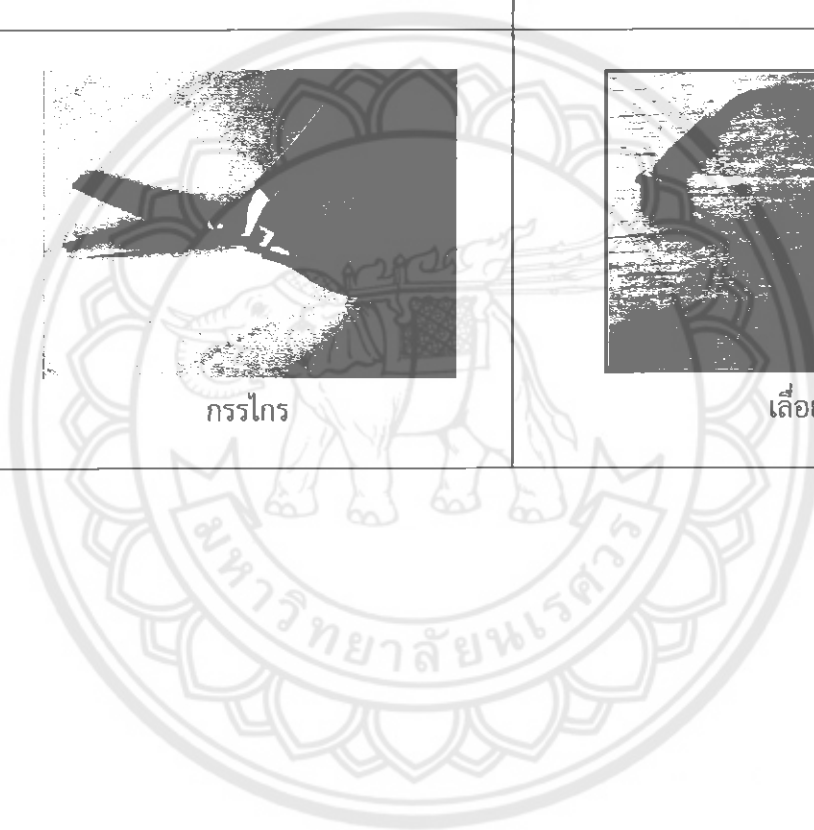
แผ่นอะคริลิกใช้เป็นแม่แบบ



กรรไกร



เลื่อยฉลุ



### 3.3 สูตรการผสม

เนื่องจากวัสดุที่นำมาทำใบกั้นลมต้องมีคุณสมบัติความเหนียวและแข็งแรง ซึ่งคุณสมบัติที่ได้จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบหลักคือ เรซินกับใยแก้วแบบใยสาน และตัวแปร คือ styren Monomer (ตัวทำละลาย) และ MEKP (ตัวทำแข็ง) โดยแต่ละสูตรมีส่วนผสมดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณส่วนผสมทั้ง 9 สูตร

สูตร	ส่วนผสม	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น (%)
A	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	2	1.37
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	0.5	0.34
	เรซิน	100	68.26
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	30.03
B	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	3	2.03
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	0.5	0.34
	เรซิน	100	67.80
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	29.83
C	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	4	2.70
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	0.5	0.34
	เรซิน	100	67.34
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	29.63
D	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	2	1.36
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	1	0.68
	เรซิน	100	68.03
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	29.93
E	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	3	2.03
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	1	0.68
	เรซิน	100	67.57
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	29.73
F	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	4	2.68
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	1	0.67
	เรซิน	100	67.11
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	29.53

สูตร	ส่วนผสม	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น (%)
G	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	2	1.35
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	2	1.35
	เรซิน	100	67.57
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	29.73
H	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	3	2.01
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	2	1.34
	เรซิน	100	67.11
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	29.53
I	styren Monomer (ตัวทำละลาย)	4	2.67
	MEKP (ตัวทำแข็ง)	2	1.33
	เรซิน	100	66.67
	ใยแก้วแบบใยสาน	44	29.33

ในการขึ้นรูปใบพัดกังหันลม กลุ่มการพัฒนากังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต ทำการทดสอบ 4 สูตร (สูตร A – D) และกลุ่มการพัฒนากังหันลมแกนนอนขนาดเล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต ทำการทดสอบ 5 สูตร (สูตร E – I) ซึ่งมีปริมาณส่วนผสมของทั้ง 9 สูตร ดังตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบการขึ้นรูปใบพัดของแต่ละสูตรที่แบ่งกันทำ จะนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาสูตรที่มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะขึ้นรูปใบพัดกังหันลม

### 3.4 การขึ้นรูปวัสดุทดสอบเป็นแผ่นแบบ 1 ชั้น และนำมาตัดเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638 TYPE I

#### 3.4.1 ทำความสะอาดแม่แบบด้วยน้ำเช็ดให้แห้ง



รูปที่ 3.1 ชัดผิวแม่แบบ

3.4.2 ขัดผิวแม่แบบดังรูปที่ 3.1 ให้เรียบมันด้วยขี้ผึ้งขัดผิวหรือเทียน ให้ผิวเป็นมันเงา เพื่อป้องกันการติดกันระหว่างแม่แบบกับเรซินเมื่อแข็งตัว

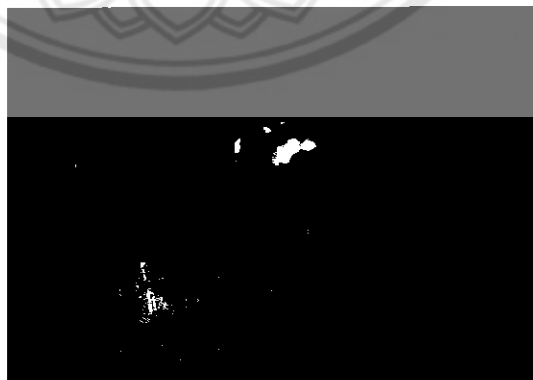


รูปที่ 3.2 การผสมสารเคมี

3.4.3 ทำการผสม MEKP (ตัวทำแข็ง) + เรซิน + styren Monomer (ตัวทำละลาย) ตามแต่ละสูตรทดสอบ ดังรูปที่ 3.2 เพื่อนำไปหล่อขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 3.3 ทาเรซินที่ผสมแล้วลงในแม่แบบ



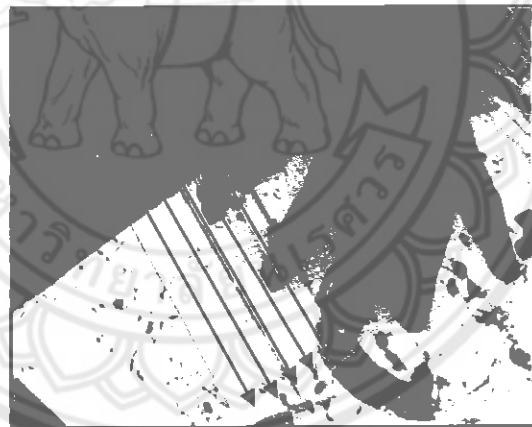
รูปที่ 3.4 การวางใยแก้ว

3.4.4 วางใยแก้วดังรูปที่ 3.4 ที่ตัดไว้ ลงตามขอบหรือมุมที่คิดว่าจะวางยากก่อน แล้วค่อยได้วางลงในส่วนที่เหลือให้ทั่ว แล้วใช้แปรงจุ่มโพลีเอสเตอร์เรซินที่ผสมแล้วทาบนใยแก้วที่วางบนแม่แบบแล้วดังรูปที่ 3.3



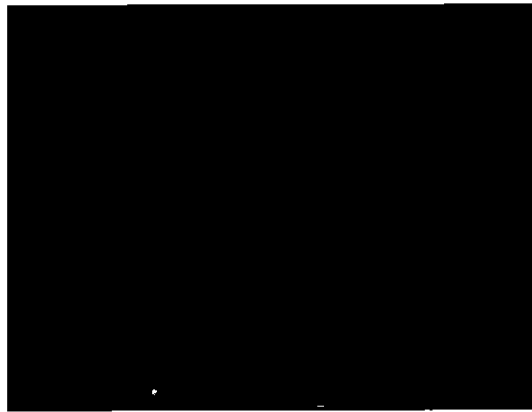
รูปที่ 3.5 การประกบแม่แบบ

3.4.5 ใช้แผ่นแม่แบบมาประกบให้ได้ความหนาประมาณ 1 มม. ดังรูปที่ 3.5 จากนั้นใช้ลูกกลิ้งไล่ฟองอากาศให้ทั่ว ทั้งไว้ประมาณ 3-5 ซม. หลังจากนั้นทำการแกะแม่แบบออกมาแม่แบบออก



รูปที่ 3.6 การตัดแบบโดยตัดตามแนวเส้นใย

3.4.6 ทำการตัดแบบโดยใช้เลื่อยฉลุตัดตามแนวเส้นใยดังรูปที่ 3.6 แนวไหนแนวนั้น จะแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้เนื่องจากใยทอมีการทอแบบตั้งฉากกัน



รูปที่ 3.7 นำชิ้นงานทดสอบไปขัดด้วยกระดาษทราย

3.4.7 หลังจากตัดเสร็จแล้วนำมา ขัดด้วยกระดาษทรายดังรูปที่ 3.7 เพื่อให้ผิวขอบเรียบยิ่งขึ้น จะได้ ชิ้นงานคอมโพสิตตามมาตรฐาน ASTM D638 TYPE I ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานคอมโพสิตที่ตัดตามมาตรฐาน ASTM D638 TYPE I

### 3.5 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบด้วยแรงดึง

- 3.5.1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงสูตรละ 5 ชิ้น
- 3.5.2 เวอร์เนียคาลิเปอร์
- 3.5.3 เครื่องมือทดสอบ Universal testing machine
- 3.5.4 คอมพิวเตอร์

### 3.6 วิธีการทดสอบ

- 3.6.1 วัดขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต บันทึกลงตาราง
- 3.6.2 นำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึงจนขาดโดยใช้เครื่องมือทดสอบ Universal testing machine (UTM) ให้บันทึกข้อมูล Load และ Extension เพื่อนำไปแสดงผลในรูปของ Stress-strain curve
- 3.6.3 คำนวณหาค่า Young's modulus, Load at Maximum load, Stress at Maximum load, Strain at Maximum load, Tensile Strength
- 3.6.4 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

### 3.7 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึงวัสดุ



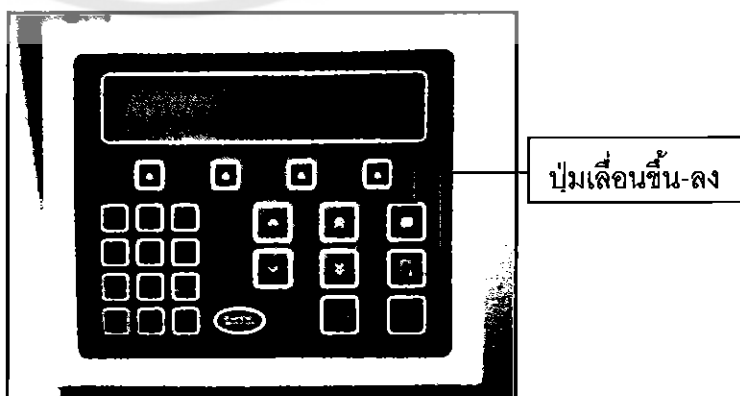
รูปที่ 3.9 เปิดเครื่องดึงวัสดุ

1. เริ่มจากเปิดเครื่องดึงวัสดุดังรูปที่ 3.9 ก่อนเพื่อเตรียมพร้อม



รูปที่ 3.10 เปิดโปรแกรมเครื่องดึง

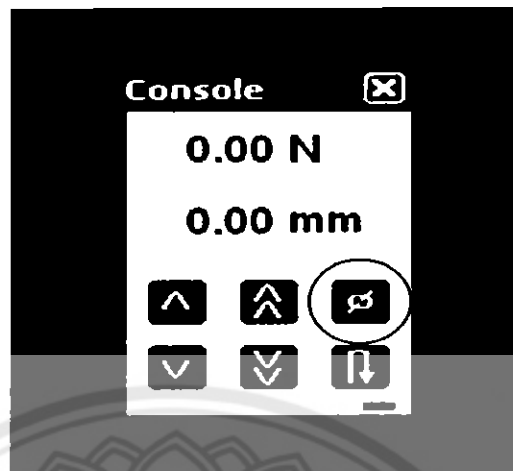
2. ดับเบิ้ลคลิกที่โปรแกรมเครื่องดึงดังรูปที่ 3.10 โปรแกรมจะเริ่มเข้าสู่การทำงานหน้าหลักของโปรแกรม



รูปที่ 3.11 หน้าจอเครื่องดึง

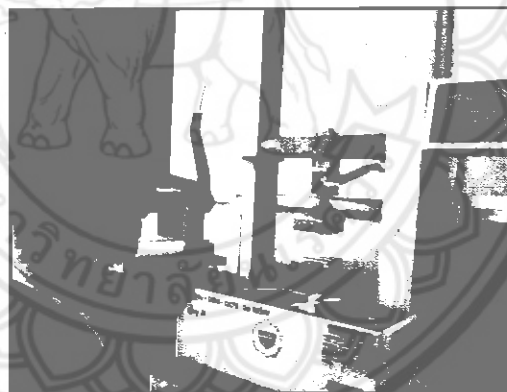


3. ทดสอบเครื่องดึงว่าพร้อมต่อการใช้งานหรือไม่ โดยกดปุ่มเลื่อนขึ้น เลื่อนลงดังรูปที่ 3.11



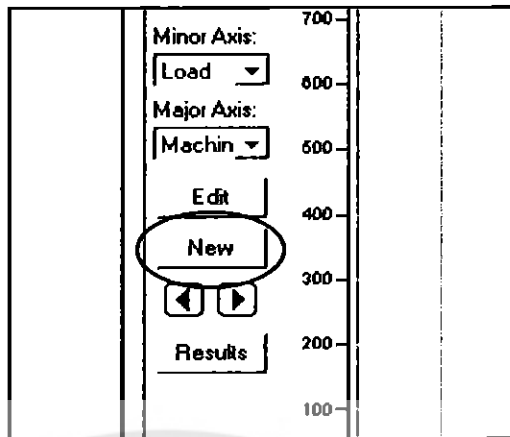
รูปที่ 3.12 ตั้งค่าเริ่มต้น

4. ทำการตั้งค่าเริ่มต้นให้เป็นศูนย์ดังรูป 3.12 โดยส่งจากโปรแกรมที่มุมขวาหน้าจอคอมพิวเตอร์



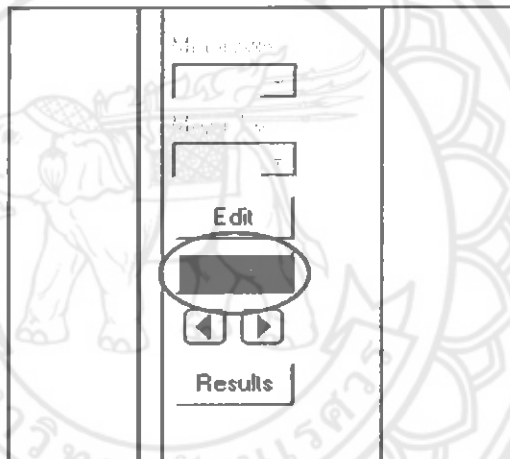
รูปที่ 3.13 ติดตั้งชิ้นงานในเครื่องดึงเพื่อทำการทดสอบ

5. ทำการติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการดึง และใส่ชิ้นงานที่ต้องการทดสอบให้พร้อมทดสอบดังรูปที่ 3.13



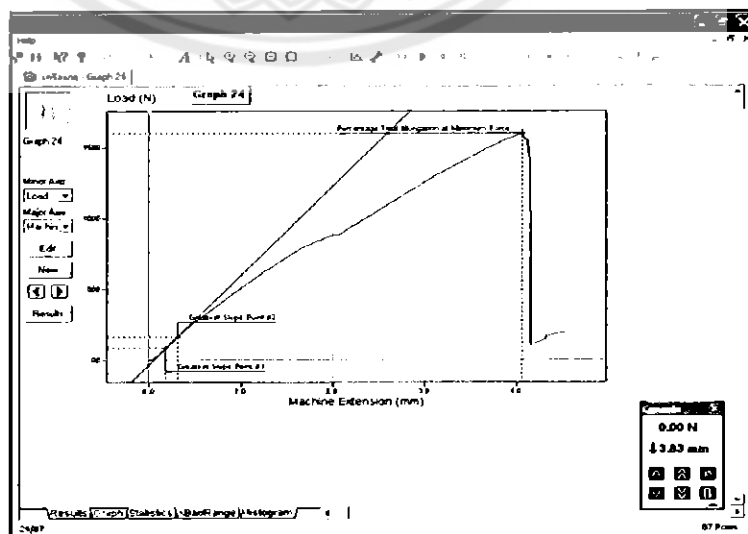
รูปที่ 3.14 กดปุ่ม New ก่อนจะทดสอบชิ้นงาน

6. เมื่อพร้อมที่จะทำการทดสอบแล้ว กด New ดังรูปที่ 3.14 เพื่อจะเริ่มต้นการทดสอบชิ้นแรกและชิ้นต่อไป



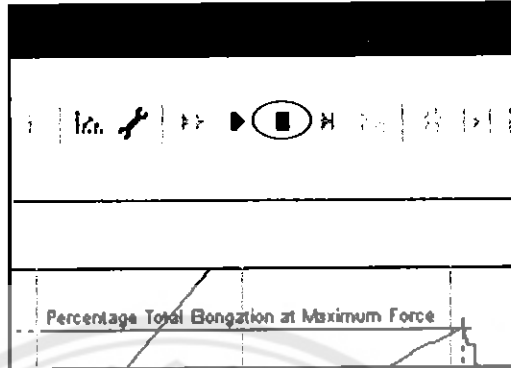
รูปที่ 3.15 กดปุ่ม Start เพื่อทำการทดสอบการดึง

7. กด Start ดังรูปที่ 3.15 เพื่อให้เครื่องทำการดึงวัสดุที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงผลข้อมูลค่าต่างๆ

8. ในระหว่างการดึง โปรแกรมจะทำการแสดงผลข้อมูลค่าต่างๆ ที่ตั้งไว้ดังรูปที่ 3.16 โดยแสดงเป็นกราฟ



รูปที่ 3.17 ปุ่ม Stop การใช้งาน

9. เมื่อชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกันแล้วให้กดที่ปุ่ม Stop ดังรูปที่ 3.17

name	Direction	Speed	Gauge Length	Width	Thickness	Area	Timestamp	Percentage To
13 A1	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.7 mm	9 4900	20/7/2555	5 418
16 A2	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.7 mm	9 3600	20/7/2555	4 770
18 B1	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 1100	27/7/2555	4 674
19 B2	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 1100	27/7/2555	6 397
24 B3	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 1100	27/7/2555	7 062
25 B4	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 1100	27/7/2555	7 348
26 B5	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 1100	27/7/2555	6 377
28 B6	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 1100	27/7/2555	6 879
29 B7	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 1100	27/7/2555	4 686
30 A3	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.6 mm	8 0600	27/7/2555	4 196
31 A4	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.6 mm	8 0600	27/7/2555	4 742
32 A5	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.6 mm	8 0600	27/7/2555	6 099
35 A6	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.6 mm	8 0600	27/7/2555	4 124
36 A7	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.6 mm	8 0600	27/7/2555	3 068
37 A8	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.6 mm	8 0600	27/7/2555	4 306
38 A9	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.6 mm	8 0600	27/7/2555	5 970
39 A10	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.6 mm	8 0600	27/7/2555	4 744
41 C1	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	7 1500	27/7/2555	5 941
43 D1	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 7600	27/7/2555	4 918
44 D2	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 7600	27/7/2555	
45 D3	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 7600	27/7/2555	
46 D4	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 7600	27/7/2555	
47 D5	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 7600	27/7/2555	
48 D6	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 7600	27/7/2555	
50 D7	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 7600	27/7/2555	
51 E8	Tension	10.0 m	57 000 mm	13.0 mm	0.5 mm	6 7600	27/7/2555	

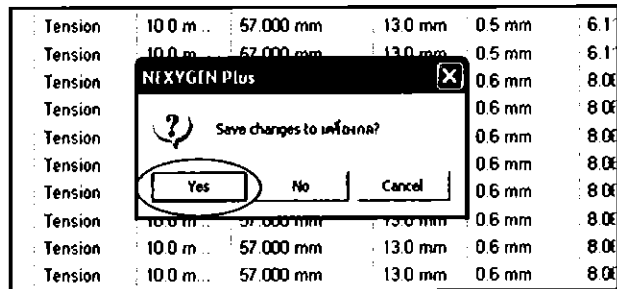
รูปที่ 3.18 ตารางผลการทดสอบ

10. เมื่อชิ้นงานทดสอบเสร็จ ค่าต่างๆ ที่เราได้ตั้งไว้ก็จะแสดงผลตามตาราง ดังรูปที่ 3.18

Area	Timestamp	Percentage To
9 4900 ...	20/7/2555 ...	5 418
9 3600 ...	20/7/2555 ...	4 770
6 1100 ...	27/7/2555 ...	4 674

รูปที่ 3.19 ทำการปิดโปรแกรม

11. เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานครบตามที่ต้องการแล้ว ให้ทำการปิดโปรแกรมดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.20 บันทึกข้อมูล

12. เมื่อกดปุ่มปิดโปรแกรม โปรแกรมจะถามว่าต้องการบันทึกข้อมูลหรือไม่ ก็ให้กด ใช่ ดังรูปที่ 3.20 เพื่อบันทึกข้อมูล



### 3.8 ผลการทดสอบ

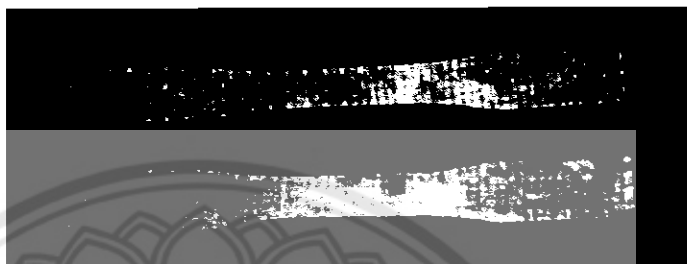
ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบที่ได้ในสูตร A – D สูตรละ 5 ชิ้นงาน

สูตร	ชิ้นงาน	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	ความยาวเดิม (mm)	แรงที่วัสดุขาด (N)	ระยะยืดรวม (mm)	ความเค้น (MPa)	ความเครียด	Young' Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)
A	1	0.72	9.36	57	1277.37	2.72	136.51	0.05	6284.65	136.51
	2	0.62	8.06	57	1018.85	2.31	126.41	0.06	5559.65	126.41
	3	0.62	8.06	57	1018.16	2.70	134.14	0.06	4268.61	134.14
	4	0.62	8.06	57	1060.96	2.35	131.63	0.04	4895.93	131.63
	5	0.62	8.06	57	959.26	2.45	119.01	0.04	5280.17	119.01
	เฉลี่ย	0.62	8.06	57	1066.92	2.51	129.54	0.05	5257.80	129.54
B	1	0.47	6.11	57	1401.36	3.65	229.36	0.05	6437.10	229.36
	2	0.47	6.11	57	1595.56	4.06	261.14	0.07	5845.28	261.14
	3	0.47	6.11	57	1180.40	4.19	193.19	0.07	6517.56	193.19
	4	0.47	6.11	57	1427.98	3.64	233.68	0.06	6349.93	233.68
	5	0.47	6.11	57	1206.25	3.92	197.42	0.07	6818.57	197.42
	เฉลี่ย	0.47	6.11	57	1362.31	3.89	222.96	0.06	6393.69	222.96
C	1	0.55	7.15	57	1338.99	3.26	187.27	0.06	6948.86	187.27
	2	0.55	7.15	57	740.15	1.48	103.52	0.03	5992.15	103.52
	3	0.55	7.15	57	1740.93	4.28	243.49	0.08	7241.41	243.49
	4	0.55	7.15	57	1548.76	3.34	216.61	0.06	7162.66	216.61
	5	0.55	7.15	57	1649.35	3.97	230.68	0.07	6998.93	230.68
	เฉลี่ย	0.55	7.15	57	1396.75	3.27	196.31	0.06	6868.80	196.31
D	1	0.52	6.76	57	957.76	2.62	144.34	0.05	6034.62	144.34
	2	0.52	6.76	57	1027.53	2.47	152.00	0.04	6331.91	152.00
	3	0.52	6.76	57	1024.64	3.19	151.57	0.06	5860.45	151.57
	4	0.52	6.76	57	1126.01	3.15	166.57	0.06	5822.70	166.57
	5	0.52	6.76	57	1201.03	2.59	177.67	0.05	6293.96	177.67
	เฉลี่ย	0.52	6.76	57	1067.39	2.80	158.43	0.05	6068.73	158.43

จากตารางที่ 3.4 เป็นการแสดงค่าต่างๆ ในโปรแกรมเครื่องดึงวัสดุ Universal testing machine (UTM) หลังจากทำการดึงวัสดุ ตั้งแต่สูตร A – D สูตรละ 5 ชิ้น เสร็จสิ้น

### 3.8.1 ลักษณะชิ้นงานที่ทำการทดสอบ

-ชิ้นงานก่อนทดสอบที่ตัดตามมาตรฐาน ASTM D638 TYPE I มีลักษณะดังรูปที่ 3



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ

-ชิ้นงานหลังทดสอบเสร็จแล้ว มีลักษณะขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานหลังทำการทดสอบ

### 3.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่าเมื่อทำการเพิ่มส่วนผสม Styren Monomer (ตัวทำละลาย) มีแนวโน้มที่ค่า Young' Modulus จะเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อเพิ่มส่วนผสม MEKP (ตัวทำแข็ง) จาก 0.5 กรัม เป็น 1 กรัม ค่า Young' Modulus มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจนถึง 2 กรัม กลับพบว่าค่า Young' Modulus มีค่าลดลง และการเพิ่ม MEKP ทำให้ค่า Tensile Strength มีค่าลดลงตามไปด้วย

ดังนั้น สรุปได้ว่า สูตร E ที่มีอัตราส่วนผสมของ Styren Monomer กับ MEKP เป็น 3 กรัม ต่อ 1 กรัม ซึ่งมีค่า Young' Modulus และค่า Tensile Strength สูงที่สุด จึงเหมาะสมที่จะนำมาขึ้นรูปไบพดกึ่งहनลมนมากที่สุด

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้ในการทดสอบทั้ง 9 สูตร

สูตร	ค่าเฉลี่ย								
	ความหนา (mm)	พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ ( $m^2$ )	ความยาวเดิม (mm)	แรงที่วัสดุขาด (N)	ระยะยืดรวม (mm)	ความเค้น (MPa)	ความเครียด	Young' Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)
A	0.62	8.06	57	1066.92	2.51	129.54	0.05	5257.80	129.54
B	0.47	6.11	57	1362.31	3.89	222.96	0.06	6393.69	222.96
C	0.55	7.15	57	1545.68	3.63	216.18	0.06	6868.80	196.31
D	0.52	6.76	57	1067.39	2.80	158.43	0.05	6068.73	158.43
E	0.55	7.15	57	1621.46	4.16	226.78	0.07	7073.87	226.78
F	0.52	6.76	57	1119.98	2.82	165.68	0.05	6460.89	165.68
G	0.57	7.41	57	1105.45	2.52	136.80	0.04	6133.10	136.80
H	0.45	5.85	57	868.74	2.48	148.51	0.04	6825.56	148.51
I	0.82	10.66	57	1067.06	2.50	100.10	0.04	5806.38	100.10

จากตารางที่ 3.5 เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยต่างๆ ทั้ง 5 ชิ้นงาน ที่ทำการทดสอบและนำมาเปรียบเทียบกันของแต่ละสูตร ตั้งแต่สูตร A - I

### 3.10 สรุปผลการทดสอบ

จากตารางที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุทดสอบด้วยแรงดึงแตกต่างกันไปตามแต่ละสูตรการหล่อวัสดุ โดยชิ้นงานบางชุดมีความแข็งแต่เปราะง่าย, มีความแข็งและเหนียวและบางชุดมีความเหนียวแต่ไม่แข็งแรง ทั้งนี้เพราะส่วนผสมมีผลต่อความเค้นและความเครียดของวัสดุ ในผลการทดสอบทั้ง 9 สูตรการหล่อ มี 2 สูตรการหล่อที่ให้ค่าความเค้นและความเครียดสูง คือ สูตร C (MEKP (ตัวทำแข็ง) 0.5 กรัม, Styren Monomer (ตัวทำละลาย) 3 กรัม) มีค่าความเค้นเท่ากับ 6868.80 MPa และมีค่า Tensile Strength 196.31 MPa และสูตร E (MEKP (ตัวทำแข็ง) 1 กรัม, Styren Monomer (ตัวทำละลาย) 3 กรัม) มีค่าความเค้นเท่ากับ 7073.87 MPa และมีค่า Tensile Strength 226.78 MPa ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าเลือกใช้สูตร E ในการขึ้นรูปไบพัตกัณฑ์ เนื่องจากมีค่า Young' Modulus และค่า Tensile Strength สูงกว่าสูตร C

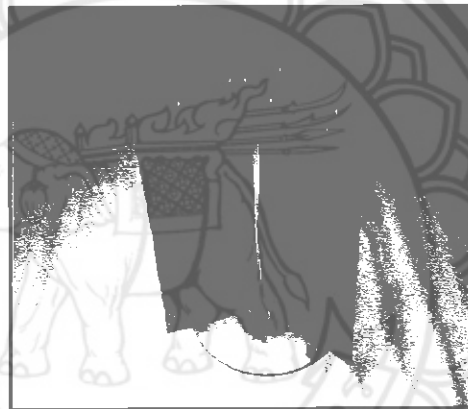
## บทที่ 4

### วิธีการสร้างกังหันลมแกนตั้ง

จากการทดสอบวัสดุคอมโพลีตในบทที่ผ่านมาทำให้ได้ส่วนผสมที่มีความยืดหยุ่นสูงสุดที่เหมาะสมกับการนำมาสร้างใบพัดของกังหัน คือสูตร E มีส่วนผสม MEKP (ตัวทำแข็ง) 1 กรัม, Styren Monomer (ตัวทำละลาย) 3 กรัม ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำเอาวัสดุคอมโพลีตมาสร้างใบพัดและส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันลมแกนตั้ง

#### 4.1 รูปแบบของกังหันที่จะสร้าง

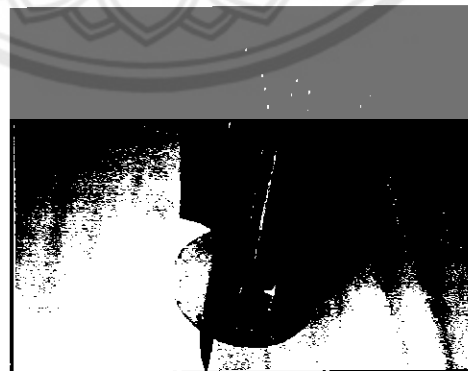
##### 4.1.1 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบขนาด 30x30 cm



รูปที่ 4.1 กังหันลมแกนตั้ง

ชนิด 3 ใบแบบใบเรียบ

##### 4.1.2 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้งขนาด 30x30 cm



รูปที่ 4.2 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้ง



## 4.2 วัสดุและอุปกรณ์

### 4.2.1 วัสดุ

- ใยแก้วแบบใยสาน (Woven Fabrics)
- MEKP (ตัวทำแข็ง)
- โพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester Resin)
- Styren Monomer (ตัวทำละลาย)
- ตลับลูกปืนตุ๊กตา NSK 628D
- แกนเพลลา
- อะคริลิก หนา 2 mm
- แผ่นสังกะสี
- นี้อต 3 mm
- นี้อต 8 mm

### 4.2.2 อุปกรณ์

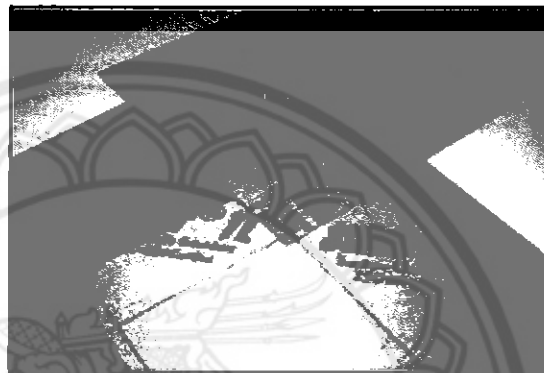
- น้ำยาล้างแปรง อะซิโตน (Acetone,  $C_3H_6O$ )
- กระดาษทรายเบอร์ 320
- หลอดหยดสาร
- แปรงสำหรับทาเรซิน
- เครื่องชั่งดิจิตอล
- ภาชนะบรรจุสำหรับเทแยก,ผสมเรซิน
- บีกเกอร์
- ลูกกลิ้ง สำหรับไล่ฟองอากาศ
- แผ่นอะคริลิกใช้เป็นแม่แบบ
- กรรไกร
- เลื่อยฉลุ

### 4.3 วิธีการสร้างก้างหัน

#### 4.3.1 การขึ้นรูปใบแบ่งเป็นการขึ้นรูปแบบใบเรียบ และการขึ้นรูปแบบใบโค้ง

##### 4.3.1.1 การขึ้นรูปแบบใบเรียบ

1. นำแผ่นอะคริลิกมาเป็นแบบ โดยใช้ขนาด 30 x 30 cm. หนาประมาณ 2-3 mm. มา 2 แผ่น และขีดผิวด้วยเทียนหรือสารหล่อลื่นให้ลื่นเพื่อช่วยในการแกะแบบให้ง่ายขึ้น (ขีด 1 แผ่นต่อ 1 ด้าน)



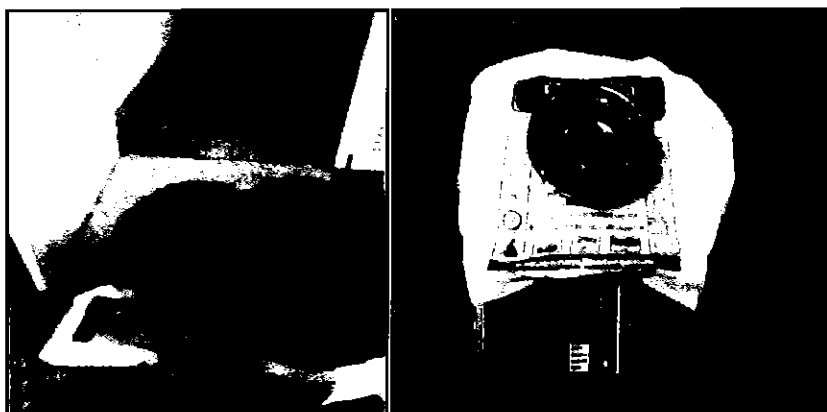
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของอะคริลิก

2. ตัดเส้นใยแก้วให้ได้ขนาดเท่ากับอะคริลิก ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของการตัดเส้นใยแก้ว

3. ทำการผสมน้ำยาเรซิน, Styren Monomer (ตัวทำละลาย) และ MEKP (ตัวทำแข็ง) ตามอัตราส่วนผสมที่เลือกไว้



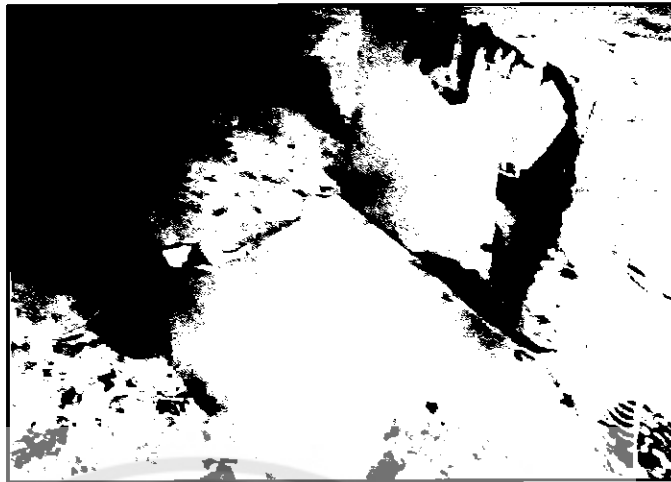
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเตรียมน้ำยาเรซิน

4. เมื่อทำการเตรียมน้ำยาเรซิน ดังรูปที่ 4.5 และเตรียมเส้นใยให้เรียบร้อย แล้วก็ทำน้ำยาเรซินประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำยาเรซิน ลงที่แผ่นอะคริลิคบางๆ และวางเส้นใยลงไปทับแล้วก็ทำน้ำยาไปอีกรอบ ดังรูปที่ 4.6 จึงใช้อะคริลิคทับลงไป เพื่อรอให้เซตตัว



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะแสดงการทำทับของน้ำยาเรซิน

5. เมื่อเรซินเซตตัวก็แกะแบบออก ดังรูปที่ 4.7 และนำไปฝังลมให้แห้งสนิท และทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 5



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะแกะแบบออก

6. นำแผ่นเรซินเสริมใยแก้วที่แห้งแล้วไปตัดให้ได้ขนาดกว้าง 12 cm. ยาว 29 cm.

ตั้งรูปที่ 4.8 ตัดให้ได้จำนวน 3 ใบ และขีดให้บางเท่าๆ กันทุกใบ



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการตัดของแบบใบเรียบ

#### 4.3.1.2 การขึ้นรูปใบโค้ง

1. นำท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm. ไปเสียดผ้าครึ่งออกเป็น 2 แผ่น ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการผ่าครึ่งของท่อพีวีซีใช้ทำแม่พิมพ์

2. นำท่อพีวีซีที่เตรียมไว้ไปขัดมันด้วยเทียนหรือน้ำมันหล่อลื่น โดยที่พีวีซีแผ่นแรกขัดด้านในและแผ่นที่ 2 ขัดด้านนอก ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะขัดมันด้วยเทียน

3. นำเส้นใยแก้วมาตัดให้ได้ขนาดเท่ากับแผ่นพีวีซีแผ่นแรก

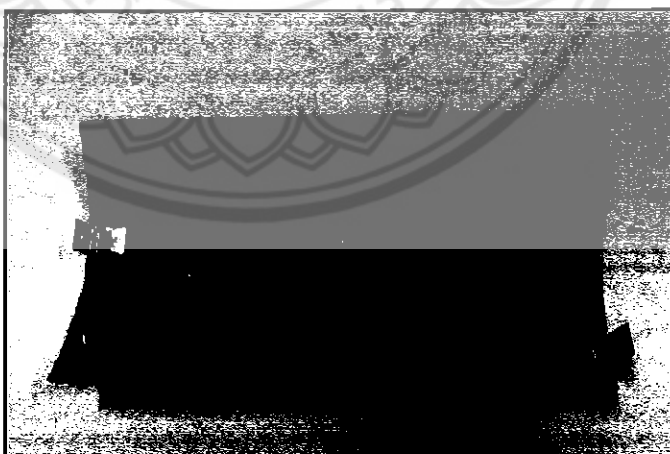
4. ผสมเรซินตามอัตราส่วนเท่าเดิม เหมือนการหล่อใบเรียบ แล้วทาน้ำยาเรซินลงบนพีวีซีบางๆ ของแผ่นแรกที่ด้านใน และใช้เส้นใยวางทับไป แล้วก็ทาน้ำยาเรซินทับอีกรอบ แล้วจึงนำพีวีซีแผ่นที่ 2 วางทับไปเพื่อรอให้เซตตัว ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการวางทับกันของแผ่นพีวีซี 2 แผ่น

5. เมื่อเรซินเริ่มเซตตัวก็ค่อยๆ แกะแบบออก แล้วนำไปฝังลมให้แห้งสนิท และทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 5

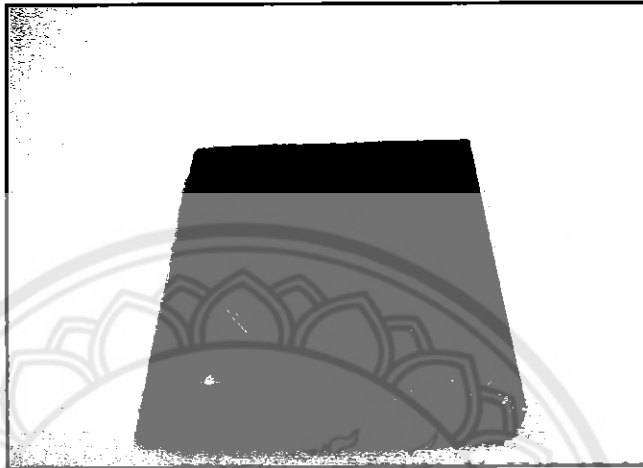
6. นำไปตัดให้ได้ขนาดกว้าง 12 cm. ยาว 29 cm. ดังรูปที่ 4.12 ตัดเป็นจำนวน 3 ใบและขีดให้บางเท่ากันทั้งหมด



รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการตัดที่ได้ขนาดของใบโค้ง

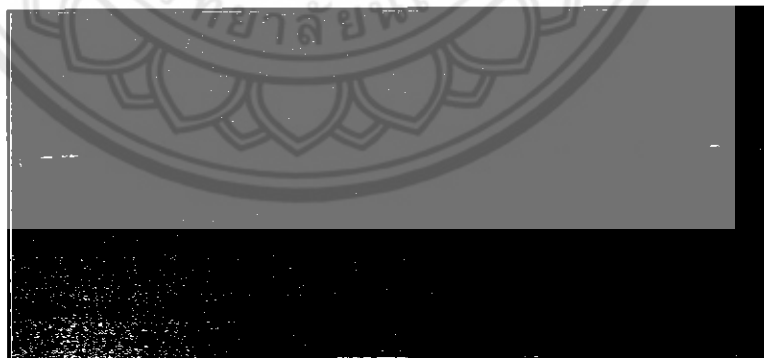
#### 4.3.2 การทำตุ๊กตา แกนเพลลาและตัววัดแรงบิด

4.3.2.1 การทำตุ๊กตา นำเหล็กขนาดความกว้างและยาว 22 mm. หนา 10 mm. กลึงให้ขนาดครอบตลับลูกปืน ดังรูปที่ 4.13 ความหนาของเหล็กครอบตลับลูกปืนประมาณ 2 mm (ขนาดตลับลูกปืนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 14 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm.)



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะลักษณะตุ๊กตาครอบตลับลูกปืน

4.3.2.2 การทำแกนเพลลา นำเหล็กแท่งกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm. ยาวประมาณ 33 cm กลึงเป็นบ่าไว้ทั้งสองข้างเพื่อสวมตลับลูกปืน กลึงให้มีขนาดเล็กลง 2 mm. โดยกลึงปลายด้านแรกเข้ามา 1.8 cm. และด้านที่ 2 กลึงเข้ามา 2.8 cm. ทำเกลียวของด้านแรกจากปลายเข้ามา 1 cm. และทำเกลียวด้านที่ 2 จากปลายเข้ามา 2 cm. จะได้แกนเพลลาของกังหัน ดังรูปที่ 4.14



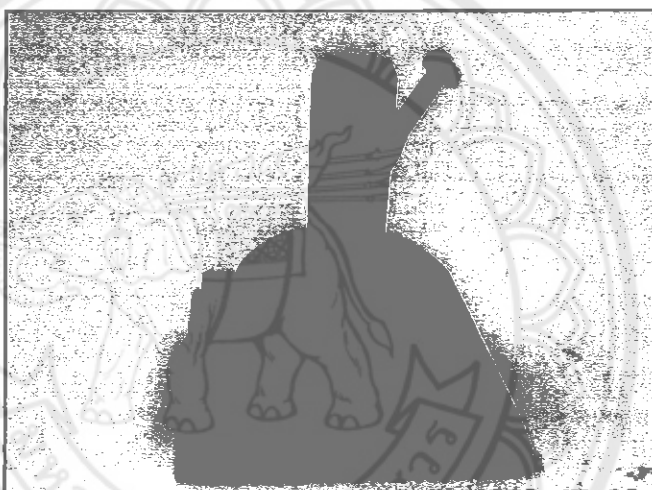
รูปที่ 4.14 แสดงแกนเพลลาของกังหัน

#### 4.3.2.3 ทำตัววัดแรงบิด

1. ใช้เหล็กหนา 2 mm. ความกว้างและยาว 22 mm. มาเจาะตรงกลางออกเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm. (ให้ขนาดใหญ่กว่าส่วนที่นูนออกมาของตุ๊กตาเล็กน้อย เพื่อให้ครอบกันได้)

2. ใช้เหล็กแท่งกลมยาว 10 mm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 mm. มากึงเนื้อเหล็กข้างในออกให้เหลือ 2 mm.

3. ใช้เหล็กทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm. ยาว 2.5 cm. แล้วนำมาเชื่อมติดกัน ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการเชื่อมติดกันของตัววัดแรงบิด

#### 4.3.3 การตัดและเจาะแผ่นอะคริลิก

4.3.3.1 นำแผ่นอะคริลิกหนา 2 mm. มาวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm. วัดไว้จำนวน 4 แผ่น

4.3.3.2 นำอะคริลิกที่วัดไว้มาตัดตามขนาดและเจาะรูตรงกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm. ดังรูปที่ 4.16





รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะการเจาะแผ่นอะคริลิก

#### 4.3.4 การทำแผ่นฉากจับยึดใบกัณฑ์กับแผ่นอะคริลิก

##### 4.3.4.1 ตัดแผ่นสังกะสีขนาดกว้าง 1.5 cm. ยาว 4 cm. ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะการตัดแผ่นสังกะสีที่ได้

##### 4.3.4.2 ทำการพับด้านยาวของแผ่นสังกะสีให้ได้ฉากและนำไปเจาะรู ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะการพับและการเจาะฉากจับยึด

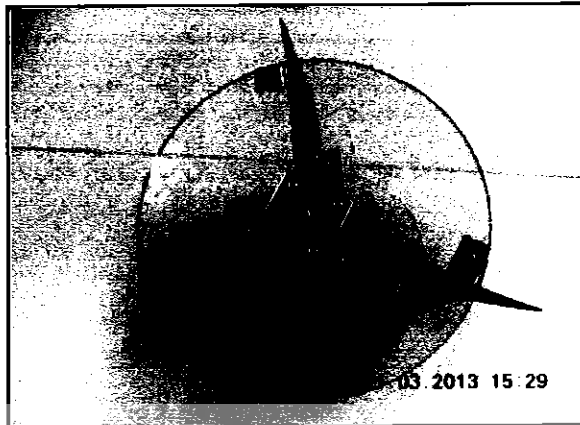
#### 4.3.5 ขั้นตอนการประกอบก้างหันลม

4.3.5.1 นำแกนเพลามา แล้วใช้แผ่นอะคริลิกที่ตัดไว้เป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm. นำมาสวมเข้าไปที่แกนเพลลา และนำตุ๊กตาที่เตรียมไว้มาวัดให้อยู่ตรงกึ่งกลางของอะคริลิก ดังรูปที่ 4.19

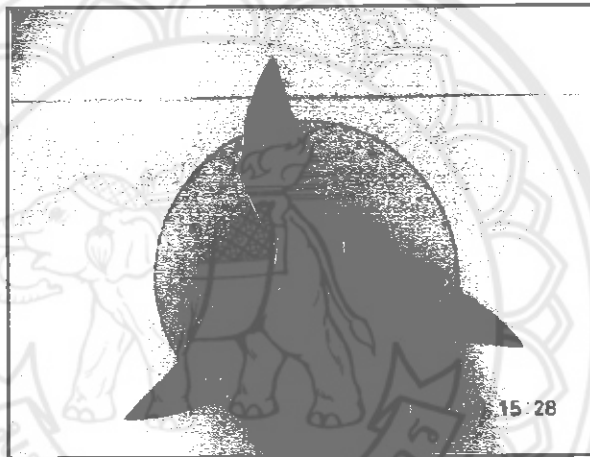


รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งการวางตุ๊กตากับอะคริลิก

4.3.5.2 นำแผ่นเรซินเสริมใยแก้วแบบแผ่นเรียบมาประกอบโดยใช้ฉากจับยึด โดยรัศมีของทั้ง 3 ใบ ทำมุมกัน 120 องศา ส่วนแผ่นโค้งก็ทำเหมือนกับแผ่นเรียบ ซึ่งแบบใบโค้งและแบบใบเรียบระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแกนเพลลาเท่ากับ 2 cm. ดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21

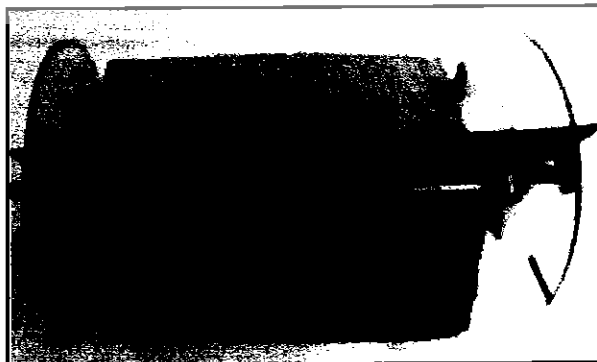


รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะการวางท่ามุมกันของก้นห้นลมแบบใบเรียบ



รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะการวางท่ามุมกันของก้นห้นลมแบบใบโค้ง

4.3.5.3 วัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว เจาะรูเพื่อที่มุมของด้านในของใบเรียบและใบโค้ง โดย ฉากจับยึดที่ยึดด้านนอกห่างจากฉากจับยึดด้านในประมาณ 8 cm. ซึ่งลักษณะการติดจะใส่ 4 อันต่อ 1 ใบ ติดแบบทแยงกัน ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะการติดฉากจับยึดแบบทแยงกัน

4.3.5.4 นำน็อตมาสวมและขันให้แน่นเพื่อไม่ให้ใบกังหันลมหลุดออกหรือขยับเขยื้อนออกจากกัน ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะการการสวมน็อตกับตัวฉากจับยึด



## บทที่ 5

### การทดสอบหาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้ง

ในส่วนของบทนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งภายในอุโมงค์ลมภายใต้ความเร็วลม 5.5 เมตรต่อวินาที

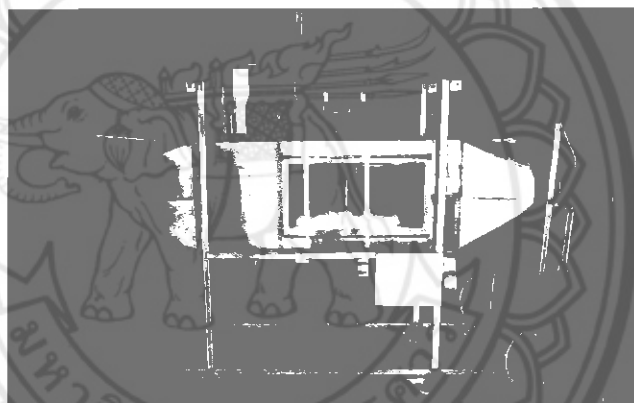
#### 5.1 การทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมแกนตั้งที่ความเร็วลม 5.5 เมตรต่อวินาที

##### 5.1.1 วัตถุประสงค์

หาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบพัด แบบใบเรียบ และแบบใบโค้ง

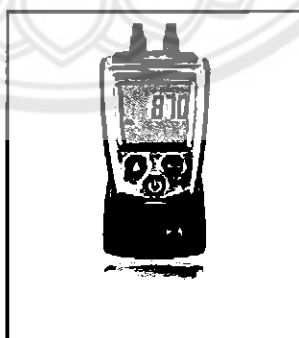
##### 5.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

###### 5.1.2.1 อุโมงค์ลม[9]



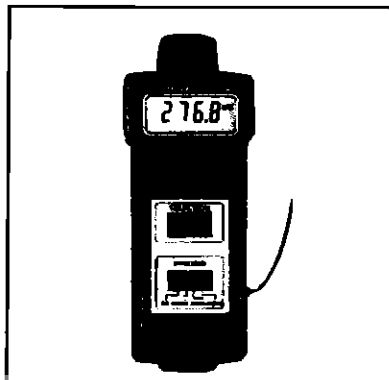
รูปที่ 5.1 อุโมงค์ลม

###### 5.1.2.2 เครื่องวัดความเร็วลม



รูปที่ 5.2 เครื่องวัดความเร็วลม testo 511

### 5.1.2.3 เครื่องวัดความเร็วรอบ



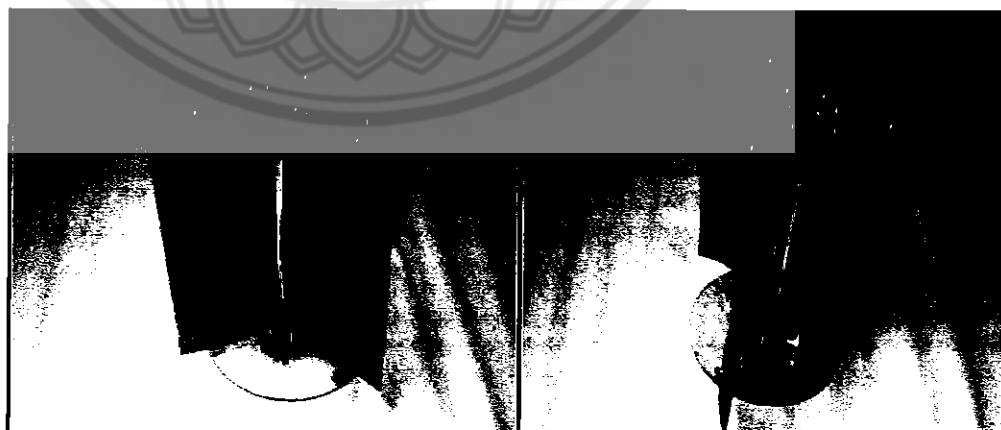
รูปที่ 5.3 เครื่องวัดความเร็วรอบ MULTIFUNCTIONAL ENGINE TACHOMETER 950-1495

### 5.1.2.4 ตาชั่งสปริง



รูปที่ 5.4 ตาชั่งสปริง

### 5.1.2.5 ชุดประกอบใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้ง



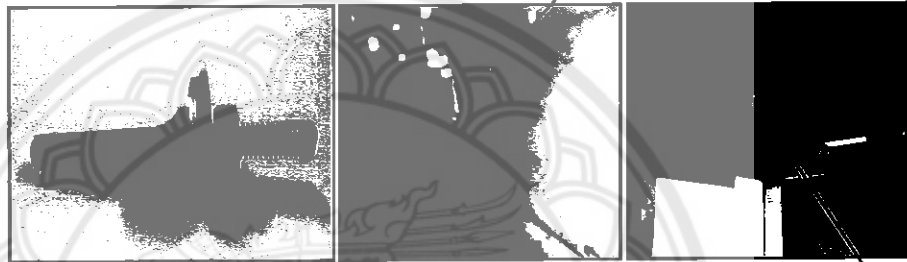
รูปที่ 5.5 ชุดประกอบใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้ง

### 5.1.3 ขั้นตอนการสอบ

5.1.3.1 การติดตั้งชุดประกอบกังหันลมแนวแกนตั้งกับอุโมงค์ลมและตำแหน่งการวัดความเร็วลมหน้า และหลังกังหันลมก่อนทำการทดลอง

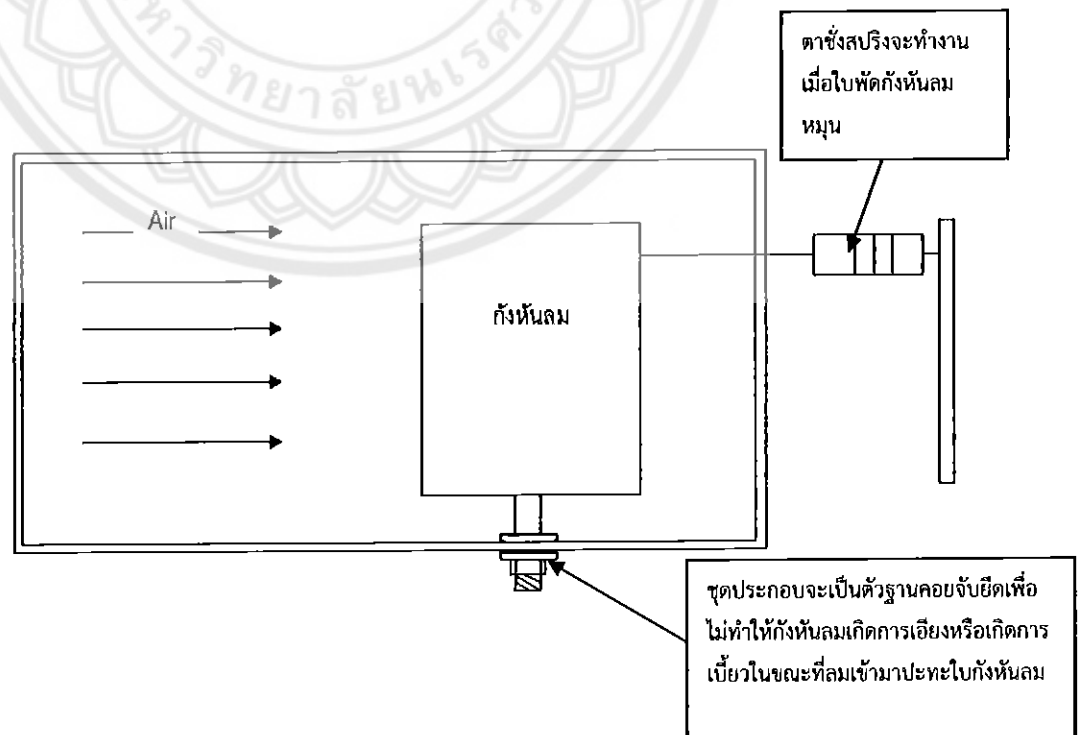
- ในชุดประกอบกังหันลมแนวแกนตั้งประกอบด้วยแกนฐานกังหันลมที่เป็นนอตตัวผู้, นอตตัวเมีย และวงแหวนรองนอต 2 วง เพื่อตัวหนึ่งไว้รองด้านบนพื้นอุโมงค์ลมเวลาประกอบนอตตัวผู้เข้ากับอุโมงค์ลม วงแหวนอีกตัวหนึ่งไว้รองใต้พื้นอุโมงค์ลมรับนอตตัวผู้และหมุนนอตตัวเมียเข้าประกอบเพื่อความแน่นหนา ป้องกันไม่ให้งังหันลมขยับเขยื้อนขณะทำการทดสอบ ดังรูปที่ 5.6

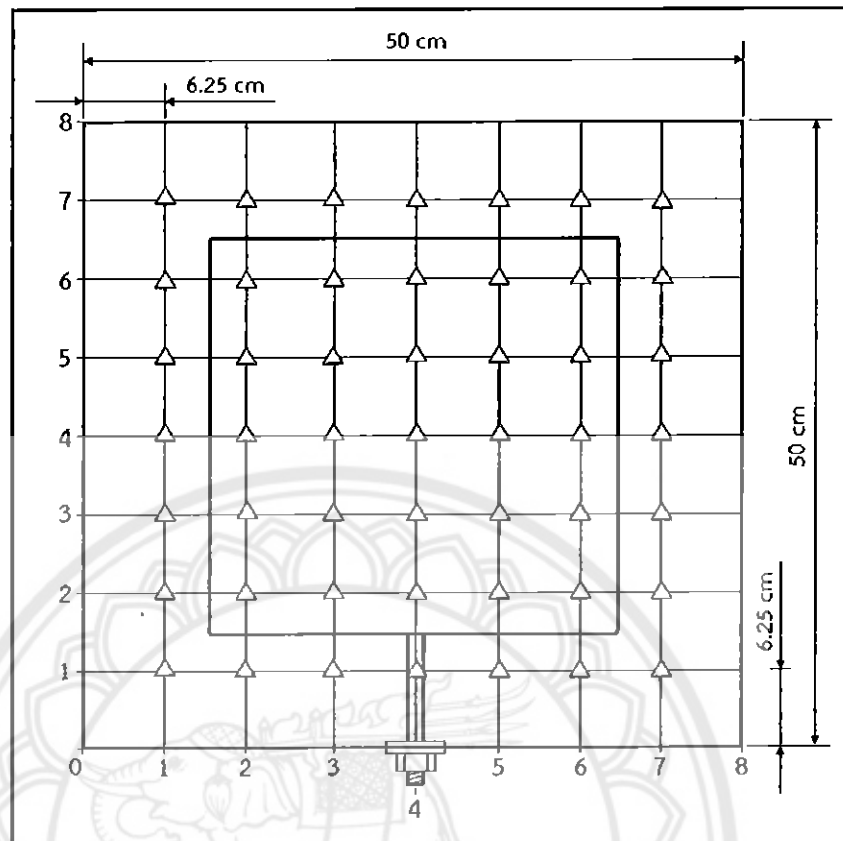
การประกอบกังหันลมเข้ากับฐานกังหันลม  
ที่ทำการประกอบเข้ากับพื้นอุโมงค์ลมแล้ว



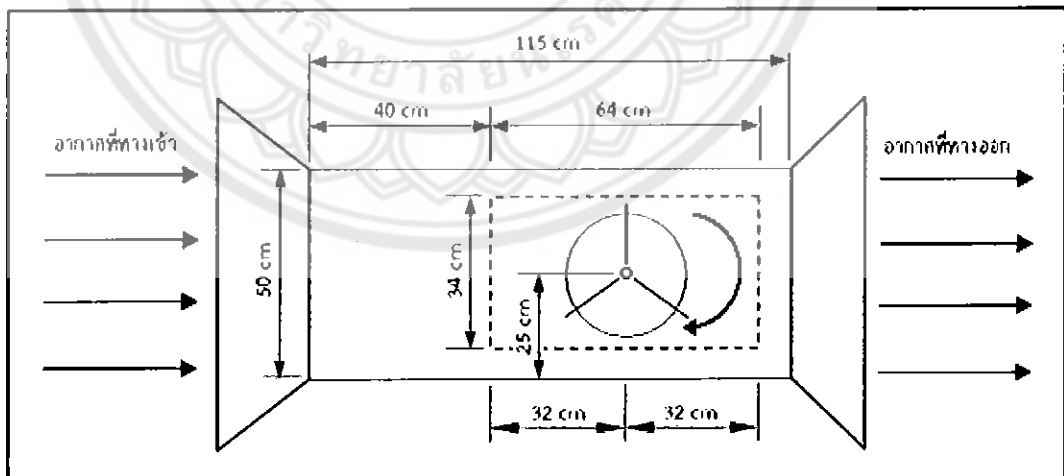
รูปที่ 5.6 ชุดประกอบกังหันลมแนวแกนตั้งกับอุโมงค์ลม

การประกอบวงแหวนและนอตตัวเมีย  
เข้ากับฐานนอตตัวผู้ใต้พื้นอุโมงค์ลม





รูปที่ 5.7 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลมของกังหันลมโดยมองจากด้านหน้าของอุโมงค์ลม  
จากรูปที่ 5.7 จุดสามเหลี่ยม แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลมของกังหันลมในอุโมงค์ลม



รูปที่ 5.8 แสดงตำแหน่งการวางกังหันลม และตำแหน่งการวัดความเร็วลมหน้า - หลังกังหันลม ในอุโมงค์ลมโดยมองจากด้านบนของอุโมงค์ลม

- ในการวัดความเร็วลมที่ด้านหน้าของกังหันลมวัดจากจุดคอคอดที่ทางเข้าของอากาศเป็นระยะ 40 เซนติเมตร และวัดเร็วลมที่ด้านหลังจากจุดคอคอดที่ทางเข้าของอากาศเป็นระยะ 104 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 5.8



5.1.3.2 ตรวจสอบความแน่นหนาหลังจากประกอบกังหันลมเข้ากับอุโมงค์ลม ดังรูปที่ 5.9 ให้เรียบร้อยก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 5.9 การประกอบกังหันลมเข้ากับอุโมงค์ลม

5.1.3.2 เมื่อทำการประกอบกังหันลมเข้ากับอุโมงค์ลมเรียบร้อยแล้ว ปิดฝาอุโมงค์ลม แล้วเสียบปลั๊กเปิดพัดลมจนกังหันลมหมุนคงที่ดังรูปที่ 5.10 พร้อมทั้งจะทำการทดสอบ



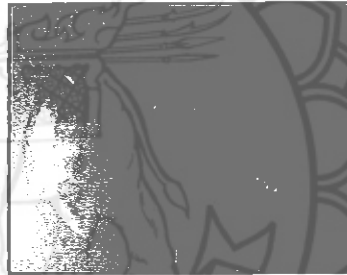
รูปที่ 5.10 แสดงการหมุนของกังหันลมก่อนทำการทดสอบ

5.1.3.3 ใส่ท่อวัดความเร็วลมที่ต่อกับเครื่องวัดความเร็วลมเข้าไปในช่องระยะที่ต้องการ วัดในอุโมงค์ลม แล้ววัดค่าความเร็วลมทั้งหน้ากังหันลมและหลังกังหันลมดังรูปที่ 5.11 บันทึกผลลงในตารางบันทึกผลให้ครบทุกช่อง



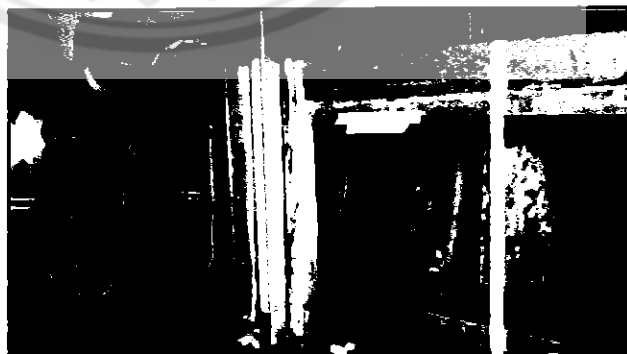
รูปที่ 5.11 แสดงการวัดความเร็วลม

5.1.3.4 เมื่อวัดความเร็วลมเรียบร้อยแล้ว ถอดอุปกรณ์วัดความเร็วลมออกจากอุโมงค์ลม ให้เรียบร้อยแล้วทำการวัดความเร็วรอบ โดยถอดปลั๊กพัดลมให้กังหันลมหยุดหมุนก่อน แล้วติดกระดาษเรืองแสงที่จะทำการวัดความเร็วรอบลงบนแผ่นอะคริลิกส่วนบนของกังหันลมดังรูปที่ 5.12 เมื่อติดเสร็จเปิดพัดลมให้กังหันลมหมุนคงที่ แล้วทำการวัดความเร็วรอบโดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบยิงแสงเลเซอร์ไปที่กระดาษเรืองแสงที่ติดไว้โดยยิงในแนวตั้งฉากกับกระดาษเรืองแสง แล้วบันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล



รูปที่ 5.12 แสดงการติดกระดาษเรืองแสงลงบนแผ่นอะคริลิกเพื่อที่จะวัดความเร็วรอบ

5.1.3.5 เมื่อวัดความเร็วรอบเรียบร้อยแล้ว ถอดปลั๊กพัดลมออกแล้วทำการติดตั้งชุดวัดทอร์ก (T) โดยประกอบตาชั่งสปริงเข้ากับตัวกังหันที่ประกอบในอุโมงค์ลมให้เสร็จเรียบร้อยแล้ว แล้วเปิดพัดลมทำการวัดทอร์ก (T) ดังรูปที่ 5.13 บันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล



รูปที่ 5.13 แสดงการวัดทอร์ก (T)

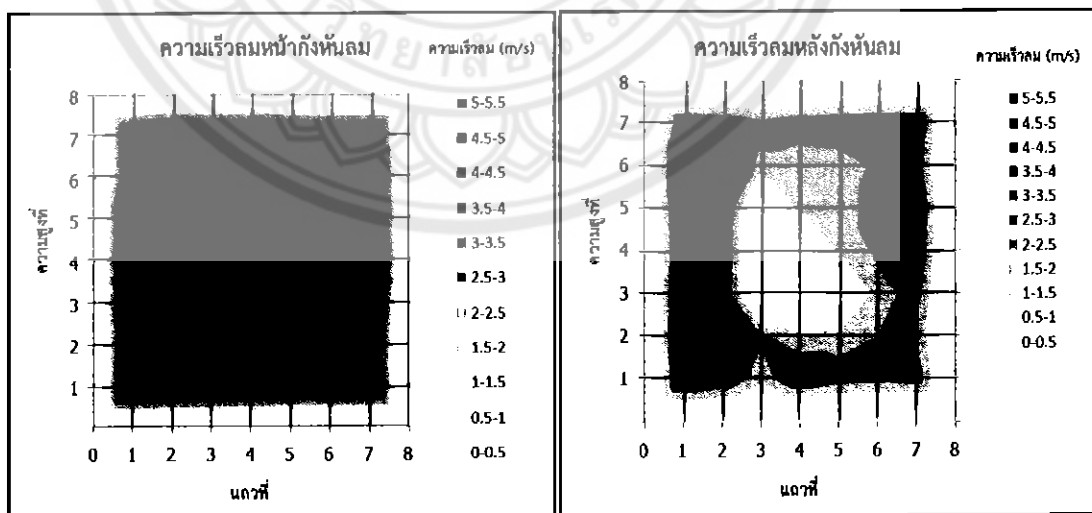
5.1.3.6 เมื่อวัดค่าต่างๆ ตามที่ต้องการและบันทึกผลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการปิดพัดลม เก็บอุปกรณ์ต่างๆ ให้เรียบร้อย

## 5.2 ผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบพัด

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบความเร็วลมหน้าและหลังของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ในอุโมงค์ลม

ความสูง ที่ แถวที่	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.7	4.4	4.2	4.1	3.9	4	4	2.9	2.6	1.7	2.6	2.3	2.2	2.3
2	4.3	3.4	3.7	3.6	3.8	4.1	3.7	3.2	2.6	2.1	1.6	1.7	2	2
3	4.8	4.1	3.8	4.3	4	4.4	4.3	3.1	2.6	0	0	0	1.8	2.2
4	4.8	4.2	4.1	3.7	4.3	3.6	4.8	2.9	2.7	0	0	1.6	2.1	2.6
5	4.7	4.4	4.2	4.5	4.4	3.7	4.8	3.1	2.8	0	1.6	1.9	2.1	2.7
6	3.7	4.2	4	3.8	3.7	3.5	4.6	3.4	3	1.8	1.6	1.7	2.1	2.3
7	3.8	4.4	4.2	4.3	4.1	3.9	4	2.6	2.5	2.2	2.4	2.5	2.6	2.6
ค่าเฉลี่ย	4.12							2.06						

จากตารางที่ 5.1 เป็นการแสดงผลการวัดความเร็วลมหน้าและหลังของกังหันลมแบบใบเรียบ ซึ่งวัดทั้งหมด 49 จุด แบ่งวัดตามระนาบความกว้างในอุโมงค์ลม 7 จุด โดยที่ 7 จุดนั้นอยู่ในแนวพื้นที่ความกว้างของกังหันลม และวัดตามระนาบความสูงในอุโมงค์ลม 7 จุด โดยที่ 7 จุดนั้นอยู่ในแนวพื้นที่ความสูงของกังหันลมเช่นกัน โดยกังหันลมมีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.14 แสดง contour plot ของความเร็วหน้าและหลังกังหันลมแบบใบเรียบ

จากรูปที่ 5.14 เป็นการแสดง contour plot ของความเร็วหน้าและหลังกังหันลมแบบใบเรียบ ซึ่งแต่ละสีบอกถึงความเร็วในช่วงต่างๆ และการกระจายความเร็วลมที่ผ่านกังหันลม

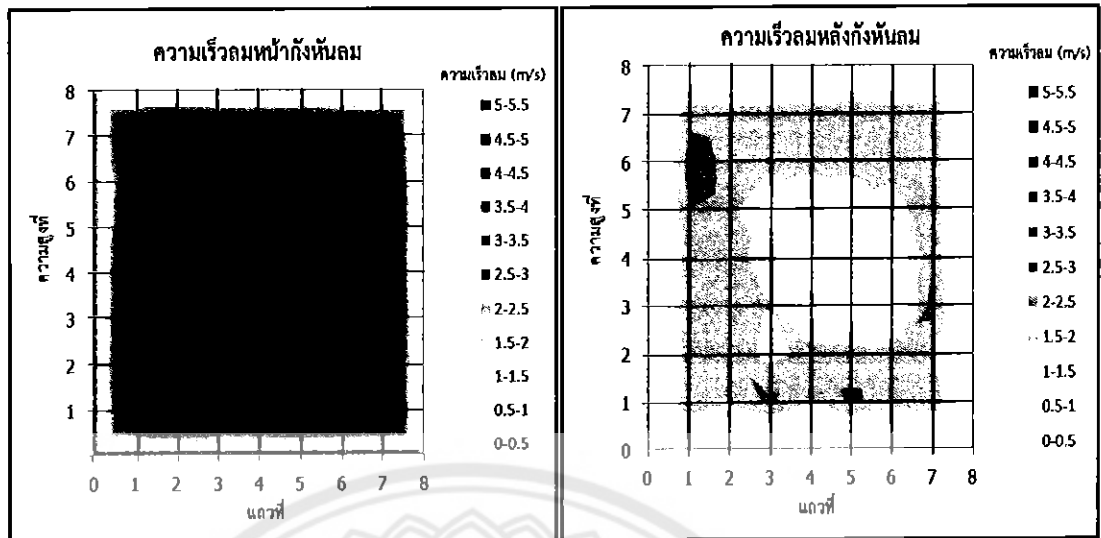
ตารางที่ 5.2 ผลการวัดความเร็วรอบและแรงบิดของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรง (N)
1	451	1.8
2	421	1.7
3	423	1.6
ค่าเฉลี่ย	431.67	1.7

จากตารางที่ 5.2 เป็นการวัดความเร็วรอบและแรงบิดของกังหันลมแบบใบเรียบ โดยทำการวัด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย  
 ตารางที่ 5.3 ผลผลการทดสอบความเร็วลมหน้าและหลังของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ในอุโมงค์ลม

ความสูง ที่ แถวที่	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.7	5.4	4.9	5.2	5.4	5.2	5.2	2	1.6	2.1	1.5	2.1	1.8	2
2	5.2	5.1	4	5.1	4.9	5.3	4.7	1.8	1.9	1.3	1.7	1.7	1.7	1.6
3	4.9	5.4	5.3	5.2	5	5.2	5.3	2.	1.5	1.5	0.7	0	0	2.2
4	4.9	5.1	4.3	4.5	5.2	5.1	4.9	1.8	1.8	1.2	0	0	0.4	1.9
5	4.2	4.9	4.3	5.1	5.2	5.1	5.1	2	1.9	0	0.8	0.4	1.2	1.9
6	3.7	5	4.7	5.1	5.2	5.3	4.9	2.2	1.9	2	1.8	2	1.8	1.9
7	4.9	5.4	5	4.9	5	4.4	4.5	1.9	1.8	1.8	1.9	2	1.8	2
ค่าเฉลี่ย	4.95							1.53						

จากตารางที่ 5.3 เป็นการแสดงผลการวัดความเร็วลมหน้าและหลังของกังหันลมแบบใบโค้ง ซึ่งวัดทั้งหมด 49 จุด แบ่งวัดตามระนาบความกว้างในอุโมงค์ลม 7 จุด โดยที่ 7 จุดนั้นอยู่ในแนวพื้นที่ความกว้างของกังหันลม และวัดตามระนาบความสูงในอุโมงค์ลม 7 จุด โดยที่ 7 จุดนั้นอยู่ในแนวพื้นที่ความสูงของกังหันลมเช่นกัน โดยกังหันลมมีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.15 แสดง contour plot ความเร็วลมหน้าและหลังกังหันลมแบบใบโค้ง

จากรูปที่ 5.15 เป็นการแสดง contour plot ของความเร็วหน้าและหลังกังหันลมแบบใบโค้ง ซึ่งแต่ละสีบอกถึงความเร็วในช่วงต่างๆ และการกระจายความเร็วลมที่ผ่านกังหันลม

ตารางที่ 5.4 ผลการวัดความเร็วรอบและแรงบิดของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรง (N)
1	453	6.3
2	456	6.2
3	458	6.2
ค่าเฉลี่ย	455.67	6.23

จากตารางที่ 5.4 เป็นการวัดความเร็วรอบและแรงบิดของกังหันลมแบบใบโค้ง โดยทำการวัด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

### 5.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพกังหันลม

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของกังหันลม

ชนิดกังหันลม	ความเร็วเฉลี่ย (m/s)		Pa (W)	Pw (W)	$\eta_T$ (%)
	หน้ากังหันลม	หลังกังหันลม			
แบบใบเรียบ	4.12	2.06	3.87	2.177	56.52
แบบใบโค้ง	4.95	1.53	6.71	3.974	59.20

\*หมายเหตุ ค่าประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งสูงที่สุดมี 30% [9]

ตารางที่ 5.6 ผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม

ชนิดกังหันลม	ความเร็วลมเฉลี่ยหน้ากังหันลม (m/s)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	แรง (N)	$\omega$ (rad/s)	T (N·m)	Pa	P <sub>out</sub> (W)	$\eta_M$ (%)
แบบใบเรียบ	4.12	431.67	1.70	45.2	0.0085	3.87	0.38	9.82
แบบใบโค้ง	4.95	455.67	6.23	47.72	0.0312	6.71	1.49	22.23

### 5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบกังหันลมแกนตั้งในอุโมงค์ลม

จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบและกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้งในอุโมงค์ลมภายใต้ความเร็วลม 5.5 เมตรต่อวินาที ผลการทดสอบพบว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบมีประสิทธิภาพของกังหัน 56.25 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเชิงกลของกังหัน 9.82 เปอร์เซ็นต์ กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้งมีประสิทธิภาพของกังหัน 59.2 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเชิงกลของกังหัน 22.23 เปอร์เซ็นต์

ข้อสังเกตค่าประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งตามงานวิจัย[9] มีค่าสูงที่สุดที่เป็นไปได้เพียง 30 เปอร์เซ็นต์ แต่ผลจากการทดลองกลับได้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 59.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลกระทบจากการทดลองในอุโมงค์ลมขนาดเล็กทำให้ประสิทธิภาพของกังหันสูงกว่าค่าทางทฤษฎี ตามงานวิจัยผลกระทบของอุโมงค์ลมขนาดเล็กที่มีต่อกังหันแกนตั้ง[9]

เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลมแกนตั้งทั้ง 2 แบบแล้วพบว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้งมีประสิทธิภาพเชิงกลมากกว่า 12.41 เปอร์เซ็นต์

## 5.5 สรุปผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม

จากการทดสอบกังหันลมเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง และ กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบได้ผลออกมาตามนี้

5.5.1 ในด้านการทดสอบความเร็วลมหน้าและหลังของกังหันลม

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ได้ความเร็วลมหน้ากังหันลมเฉลี่ย 4.12 เมตรต่อวินาที และความเร็วลมหลังกังหันลมเฉลี่ย 2.06 เมตรต่อวินาที

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ได้ความเร็วลมหน้ากังหันลมเฉลี่ย 4.95 เมตรต่อวินาที และความเร็วลมหลังกังหันลมเฉลี่ย 1.53 เมตรต่อวินาที

5.5.2 การทดสอบหาแรงและความเร็วรอบของกังหันลม

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบแบบเรียบ ได้แรง 1.7 นิวตัน และความเร็วรอบ 431.67 รอบ/นาที

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ได้แรง 6.23 นิวตัน และความเร็วรอบ 455.67 รอบ/นาที

5.5.3 กำลังงานที่ได้รับจากกังหันลม ( $P_{out}$ )

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบแบบเรียบ ได้กำลังงานที่ได้รับจากกังหันลม ( $P_{out}$ ) = 0.38 W

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ได้กำลังงานที่ได้รับจากกังหันลม ( $P_{out}$ ) = 1.49 W

5.5.4 ผลการทดสอบนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลม

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบแบบเรียบ ประสิทธิภาพของกังหันลมเท่ากับ 56.25 เปอร์เซ็นต์

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ประสิทธิภาพของกังหันลมเท่ากับ 59.2 เปอร์เซ็นต์

5.5.5 ผลการทดสอบนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลมเท่ากับ 9.82 เปอร์เซ็นต์

- กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลมเท่ากับ 22.23 เปอร์เซ็นต์

**ข้อเสนอแนะ**

- ควรศึกษาผลกระทบของอุโมงค์ลมขนาดเล็กที่มีต่อกังหันลมแนวแกนตั้งก่อนทำการทดสอบ
- เนื่องจากกังหันแนวแกนตั้งเมื่อนำมาทดสอบในอุโมงค์ลมขนาดเล็กแล้วทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการบังทิศทางการไหลของอากาศ จึงควรใช้สมการที่สามารถอธิบายลักษณะการไหลของอากาศรอบๆกังหันแนวแกนตั้งได้





## บทที่ 6

### สรุปผลการทดสอบกังหันลมแกนตั้ง

จากการศึกษาทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพและประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้งและกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบ ได้กำหนดขอบเขตของการทดสอบภายใต้ช่วงความเร็วลม 5.5 เมตรต่อวินาที เพื่อดูคุณสมบัติของกังหันลม พบว่า

การสร้างใบพัดกังหันลมจากวัสดุคอมโพสิตแบบไฟเบอร์เรซิน 30×30 เซนติเมตร เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลมและประสิทธิภาพเชิงกลทั้ง 2 แบบ ระหว่างกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง กับกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ จากผลการทดสอบพบว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้งมีประสิทธิภาพของกังหัน 59.2 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเชิงกลของกังหัน 22.23 เปอร์เซ็นต์ กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบมีประสิทธิภาพของกังหัน 56.25 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเชิงกลของกังหัน 9.82 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการทดลองในอุโมงค์ลมขนาดเล็กทำให้ค่าประสิทธิภาพของกังหันได้มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าประสิทธิภาพสูงสุดทางทฤษฎี[9] จึงทำการเปรียบเทียบเฉพาะค่าประสิทธิภาพเชิงกลเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกังหันลมทั้ง 2 แบบแล้วกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ มีประสิทธิภาพเชิงกล 12.41 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจากการทดสอบและเปรียบเทียบกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้งและกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบ ประสิทธิภาพเชิงกลและประสิทธิภาพของกังหันที่สูงที่สุดคือกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่รับลมของใบพัดกังหันลมมีผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลมและประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม

#### ข้อเสนอแนะ

- เพื่อให้สามารถปรับค่าความเร็วลมได้ตามที่ต้องการ ควรต่ออุโมงค์ลมกับอินเวอร์เตอร์ (Inverter)
- เมื่อทำการทดสอบกังหันลมแกนตั้งควรทดสอบในอุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่กว่าตัวกังหัน เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง
- จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอน[10] พบว่าประสิทธิภาพของกังหันลมของแกนนอนมีค่าสูงกว่ากังหันลมแกนตั้ง เนื่องจากกังหันลมแกนนอนมีน้ำหนักที่เบากว่าทำให้เกิดความคล่องตัวในการหมุนมากกว่า จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของกังหันลมแกนนอนมีค่าที่สูง ดังนั้นในการพัฒนากังหันลมขนาดเล็กครั้งต่อไปควรทำการลดน้ำหนักวัสดุที่ใช้ในการสร้างให้มีน้ำหนักเบาากกว่านี้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

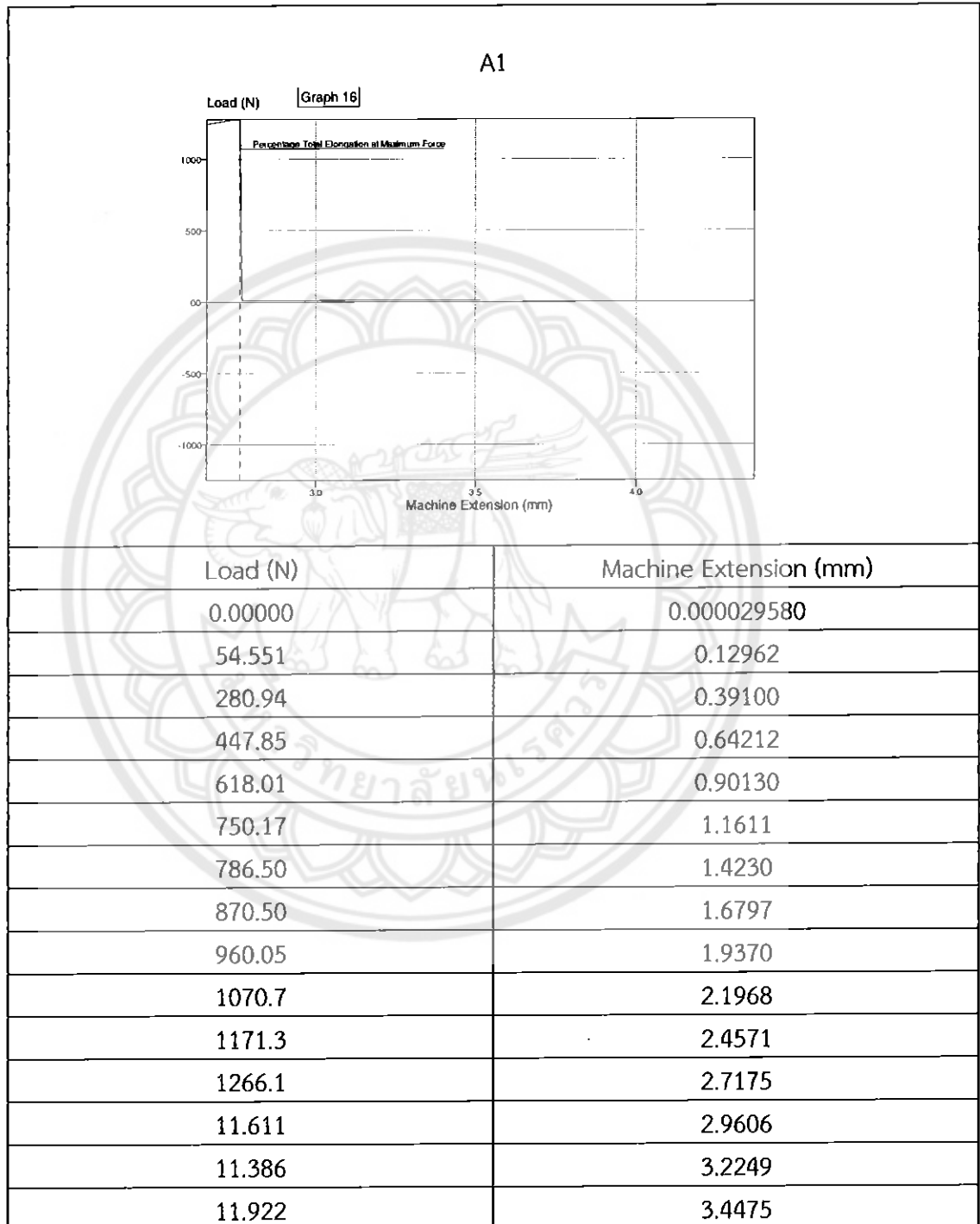
## บรรณานุกรม

- [1] ธเนศ ปวนคำมา, พงศกร อนุวัฒน์, สะท้านภพ ขวัญแก้ว. *ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กังหันลมขนาดเล็กแบบพกพาได้*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2553.
- [2] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ฝ่ายพัฒนาและแผนงานโรงไฟฟ้า, กองพัฒนาพลังงานทดแทน. *พลังงานลม*. จาก [http://www2.egat.co.th/re/egat\\_wind/egat/wind.htm](http://www2.egat.co.th/re/egat_wind/egat/wind.htm). (1 มกราคม 2555).
- [3] ศรีเดช ปัญจพันธ์, *สร้างกังหันลมแกนตั้ง*. จาก <http://www.bigtui.exteen.com/20090609/entry>. (11 ธันวาคม 2554).
- [4] บริษัทเดนโก้ อินดัสทรี จำกัด. *การออกแบบและทดสอบกังหันลมแกนตั้ง*. จาก <http://www.denco.co.th/denco%20test%20vertical%20axis%20wind%20turbine%20part1.htm>. (5 ธันวาคม 2554).
- [5] รศ. แม้น อมรสิทธิ์. *วัสดุวิศวกรรม*. จาก [http://www.coe.or.th/\\_coe/\\_download/training/p\\_materials.pdf](http://www.coe.or.th/_coe/_download/training/p_materials.pdf). (7 เมษายน 2555).
- [6] Gerald Muller, Mark F. Jentsch ; Euan stoddart. *Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings*. Renewable Energy. 2551 : 1407 – 1412.
- [7] J. Kumber nuss, J. Chen, H.X. Yang, L. Lu. *In vestigation into the relationship of the overlap ratio and shift angle of double stage three bladed vertical axis wind turbine(VAWT)*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics : 2555 : 57 – 75.
- [8] วันชัย อุ่นเพชร, สุพิศ แพงสี, สิริวัฒน์ เสาร์แดน. *การพัฒนาชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยนเรศวร. 2554.
- [9] Iron Ross, Aaron Altman *Wind tunnel blockage corrections: Review and application to Savonius vertical-axis wind turbines*. Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics : 2011 : 523-528.
- [10] อีรพล อินธิยศ, บัญชา ใจสุข, วสันต์ แสนภาพ. *การพัฒนากังหันลมแกนนอนขนาดเล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2555.

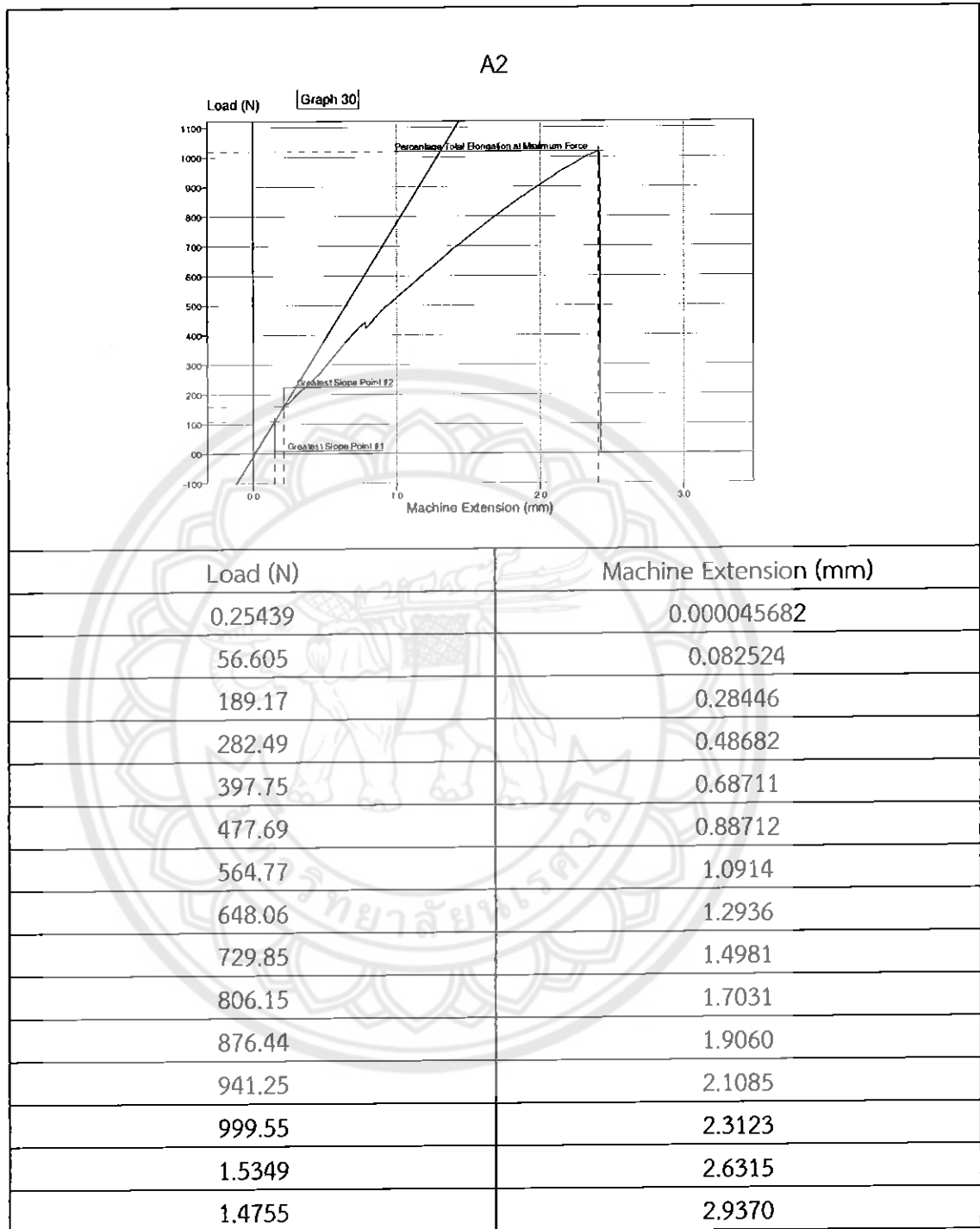


### ผลการทดสอบแรงดึง

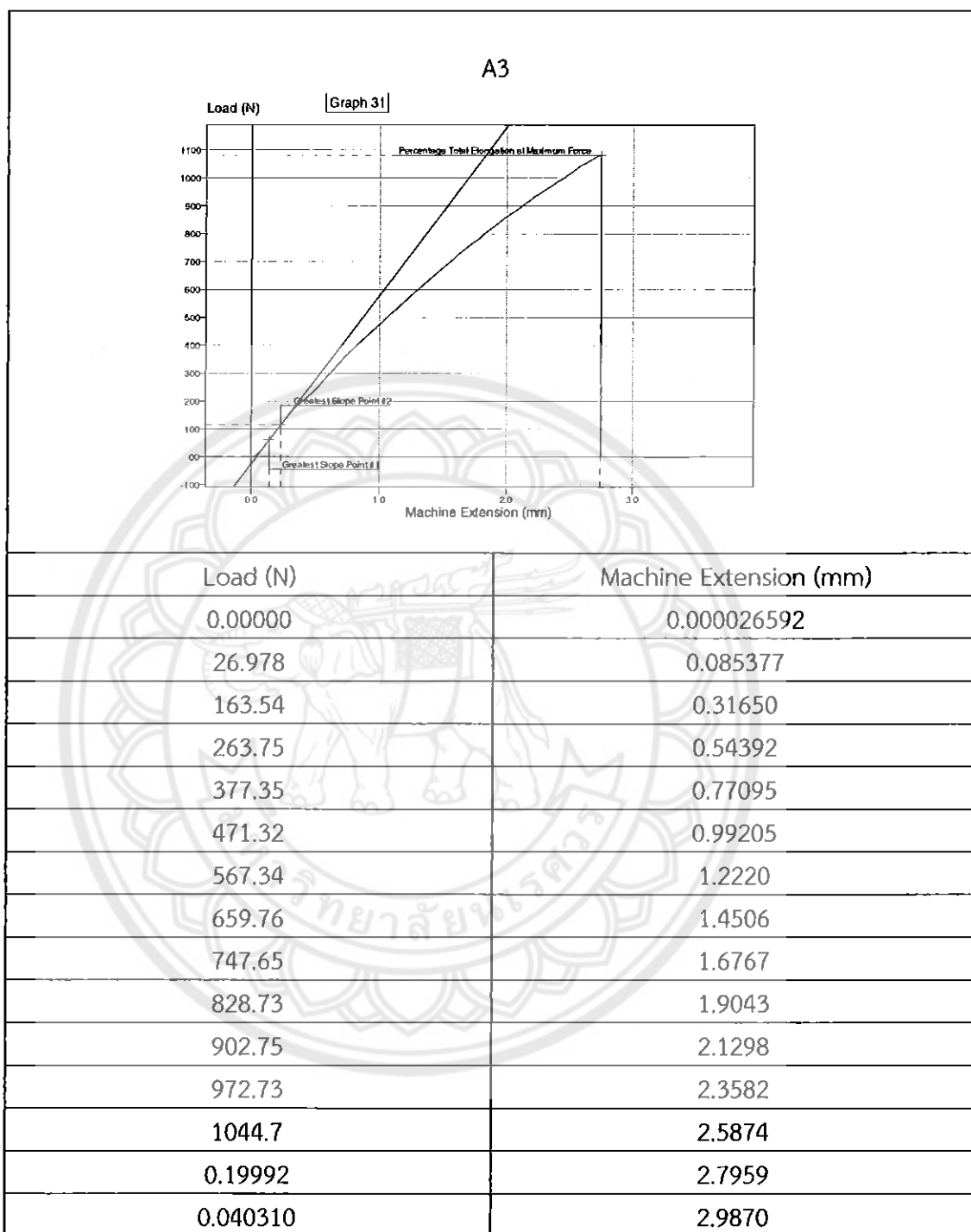
ผลการทดสอบแรงดึงวัสดุเรซินเสริมใยแก้วของเครื่องดึงวัสดุ Universal testing machine (UTM) ที่แสดงเป็นกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ ระยะยืด



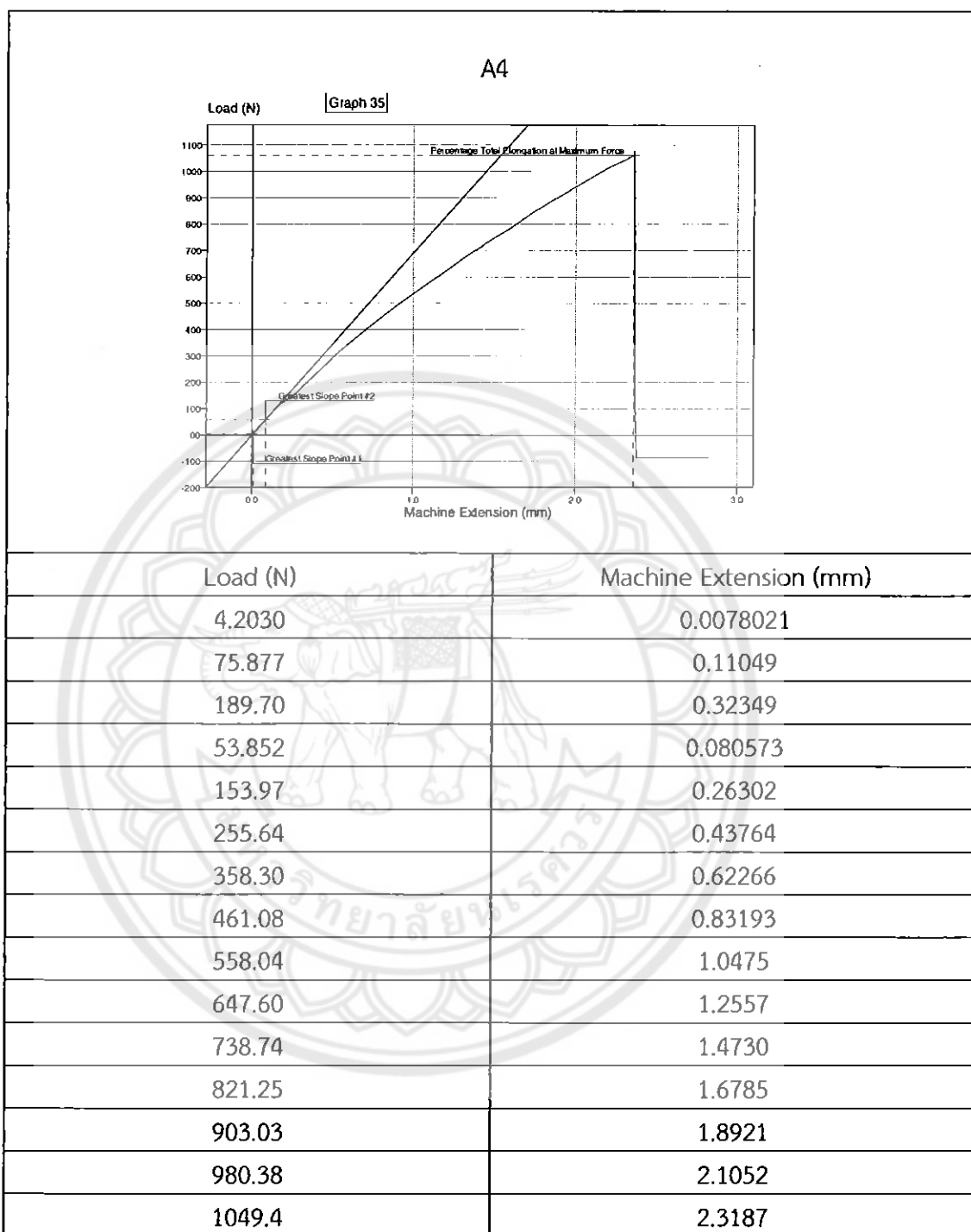
รูปที่ ก1 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร A (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 1



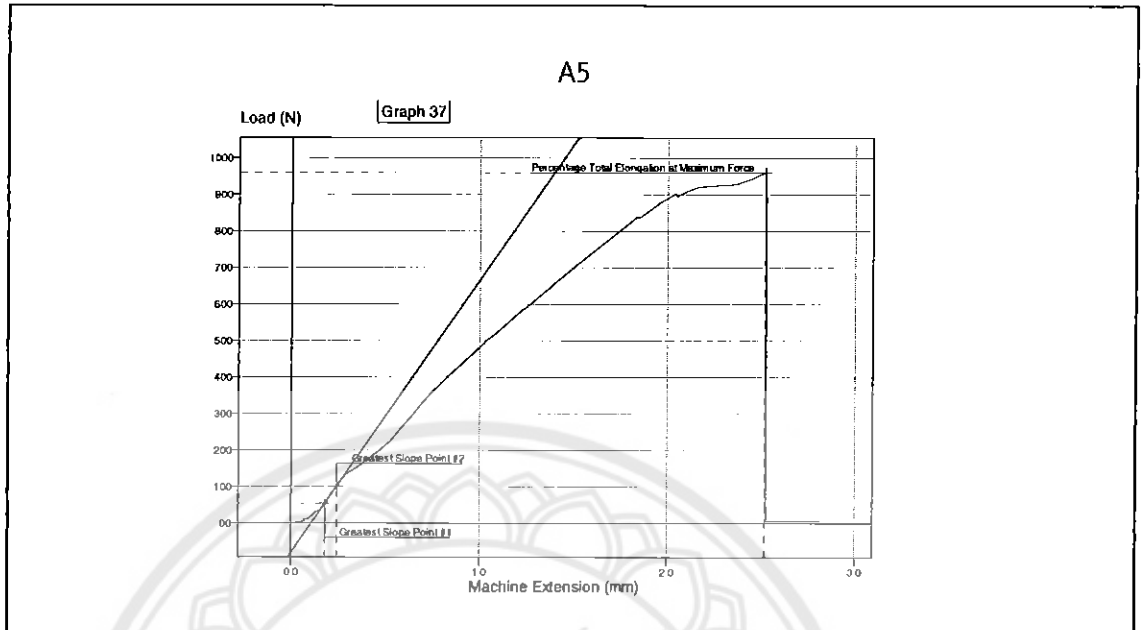
รูปที่ ก2 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร A (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 2



รูปที่ 33 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร A (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 3



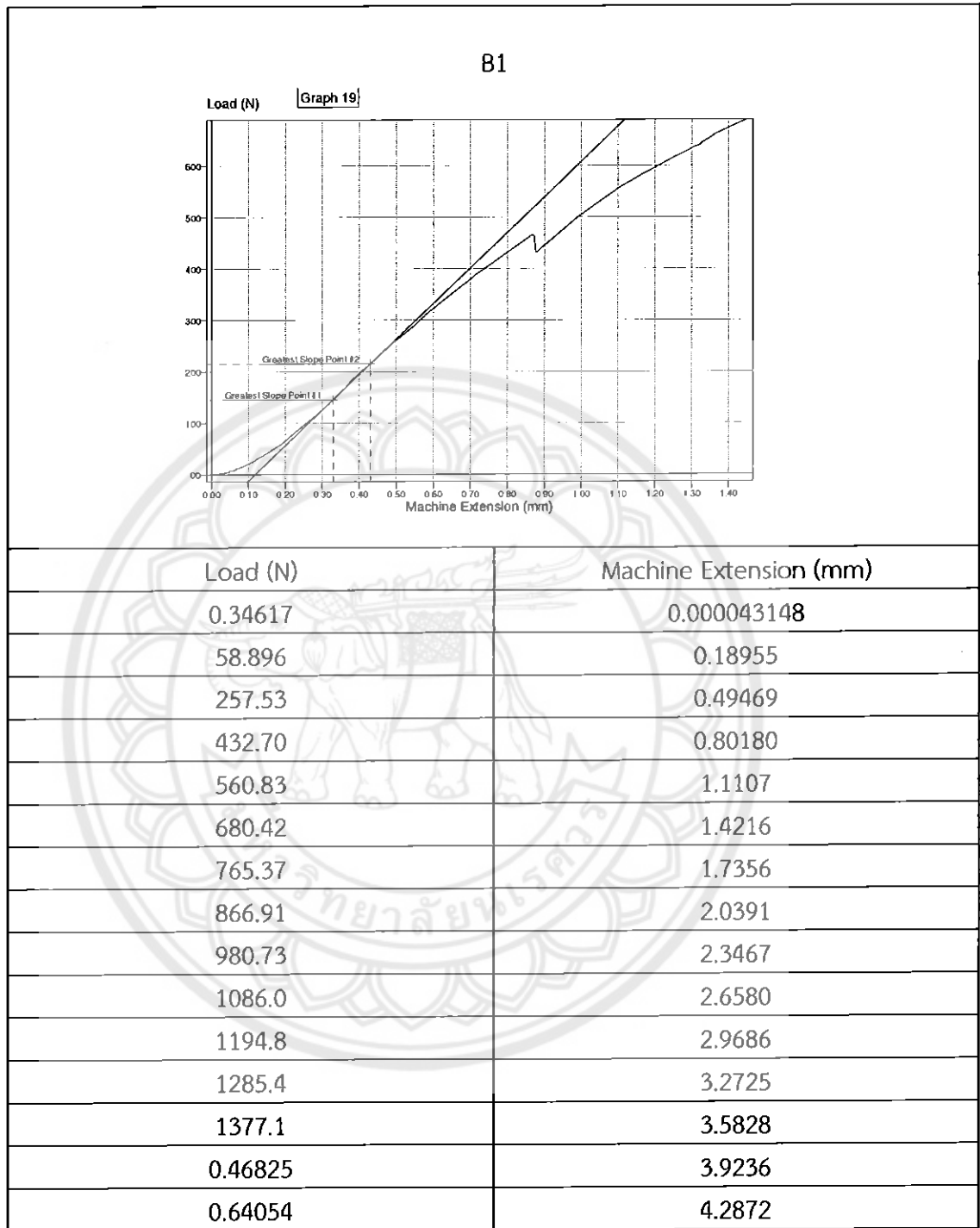
รูปที่ ก4 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร A (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 4



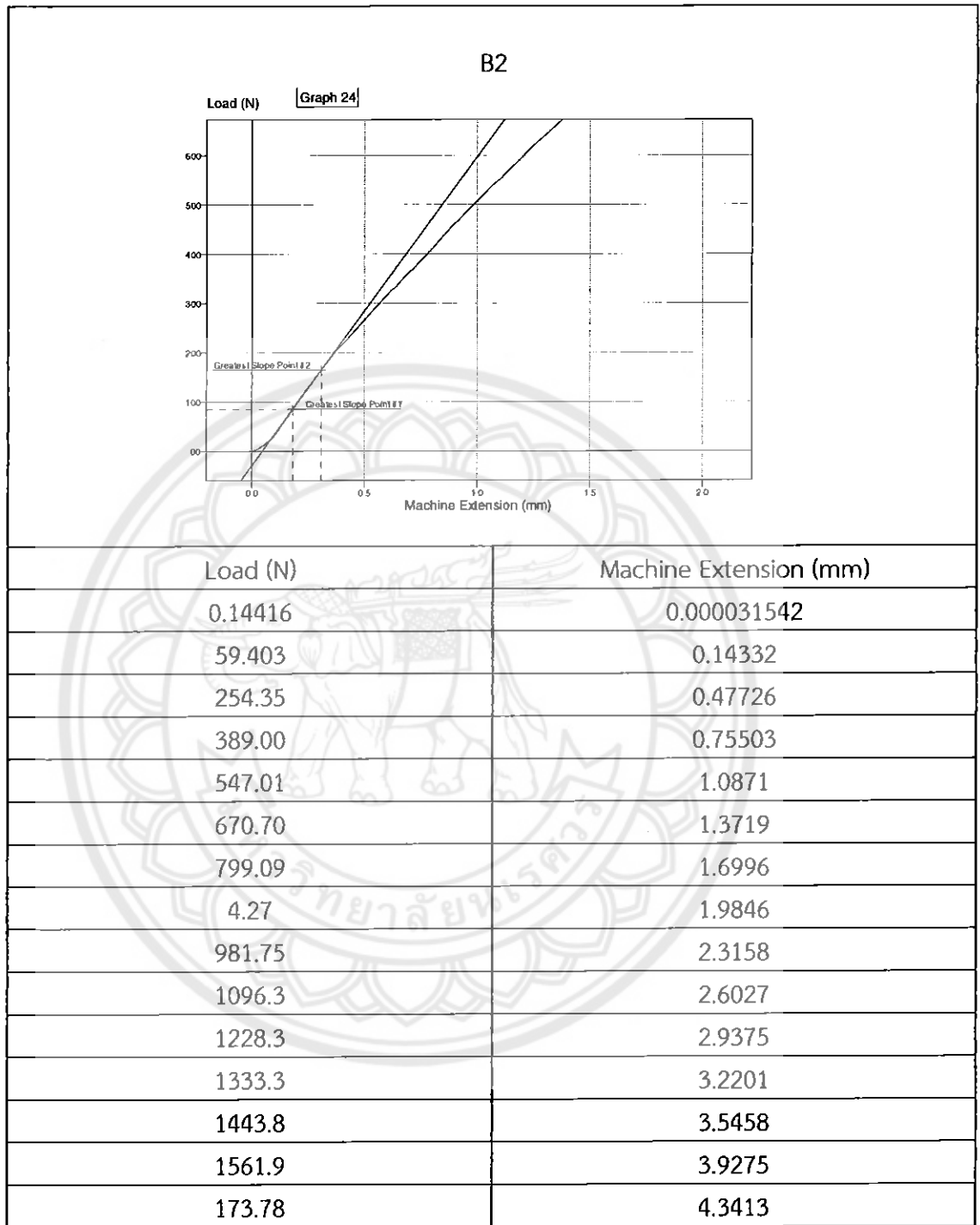
Load (N)	Machine Extension (mm)
0.14042	0.000023614
11.633	0.088939
114.75	0.26004
199.41	0.47013
301.78	0.65263
415.77	0.86139
502.55	1.0408
590.34	1.2445
669.01	1.4247
757.41	1.6358
831.12	1.8162
898.69	2.0268
924.32	2.2069
943.83	2.4494
5.4744	2.7061

รูปที่ ก5 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร A (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 5

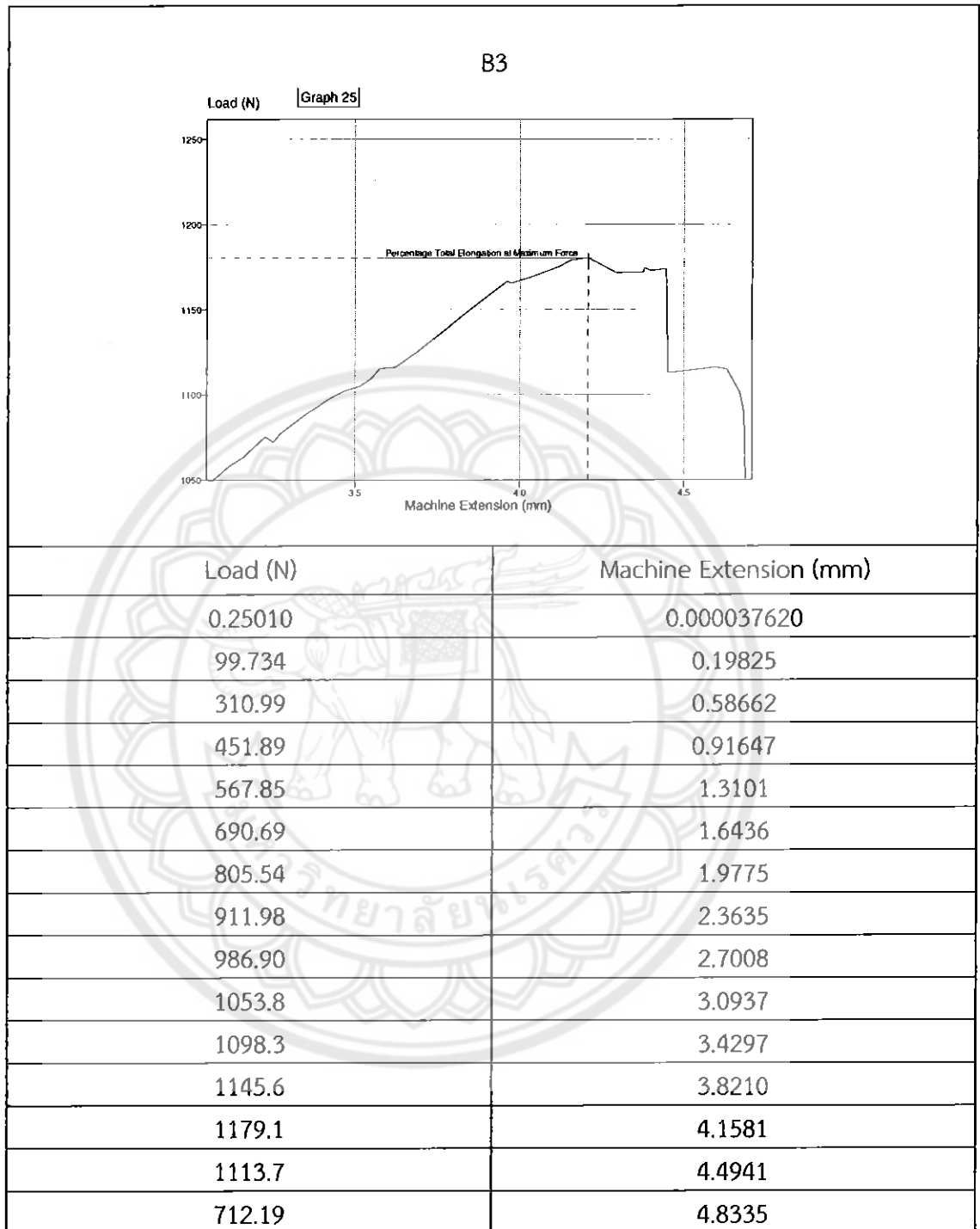




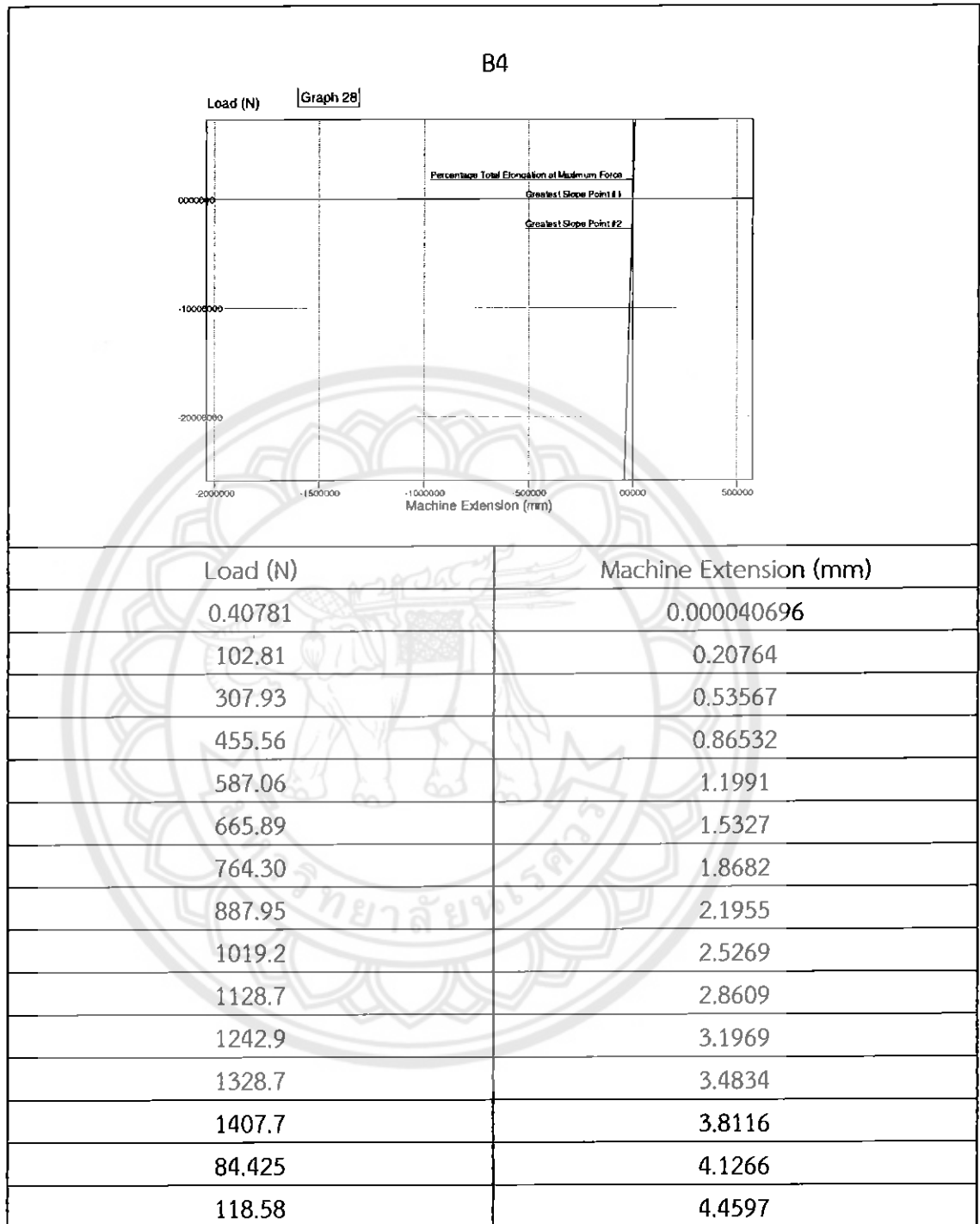
รูปที่ ก6 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร B (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 1



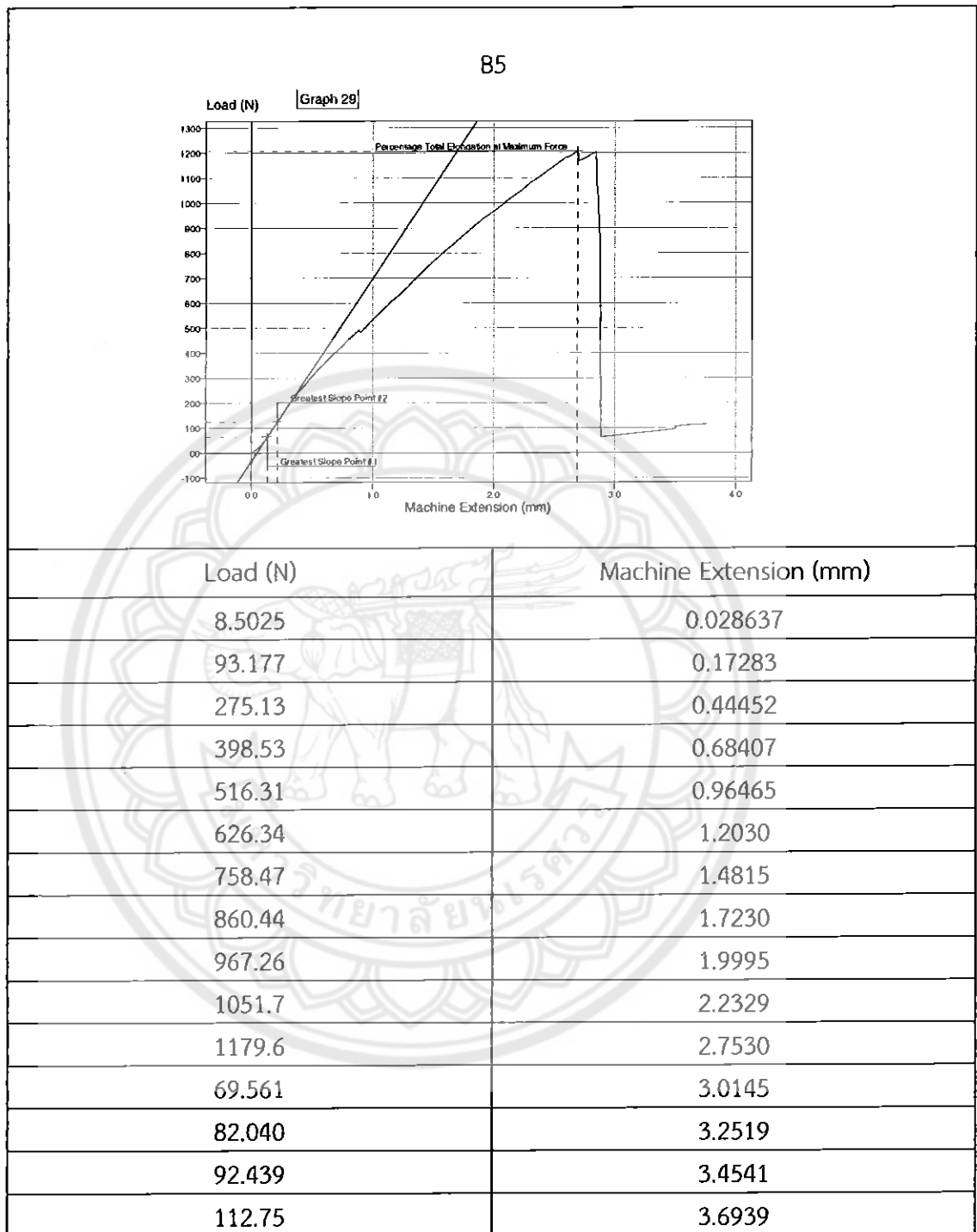
รูปที่ ก7 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร B (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 2



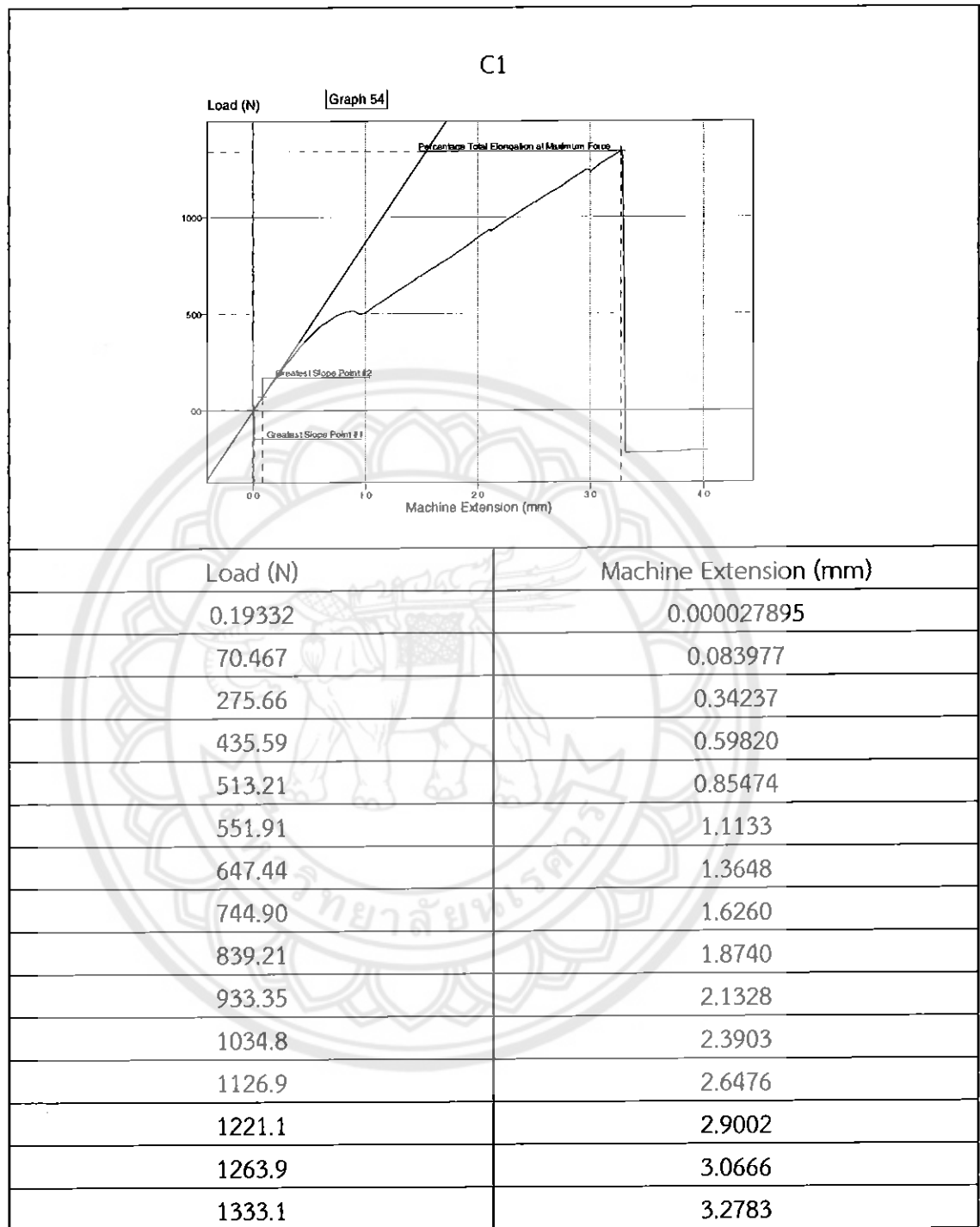
รูปที่ ๓8 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร B (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 3



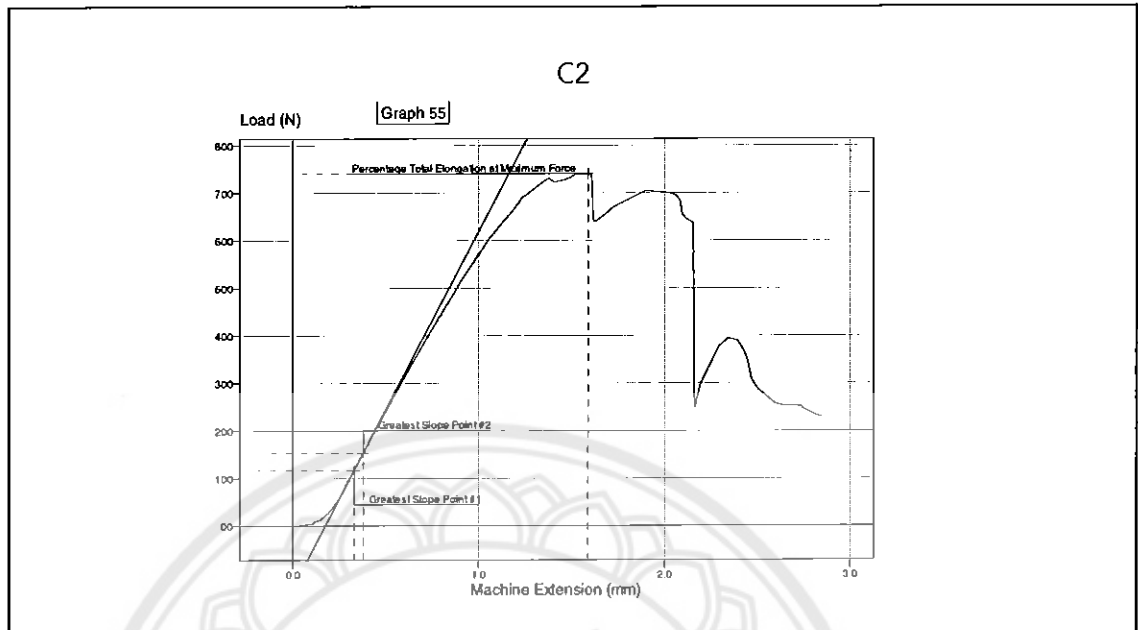
รูปที่ ก9 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร B (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 4



รูปที่ ก10 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร B (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 5

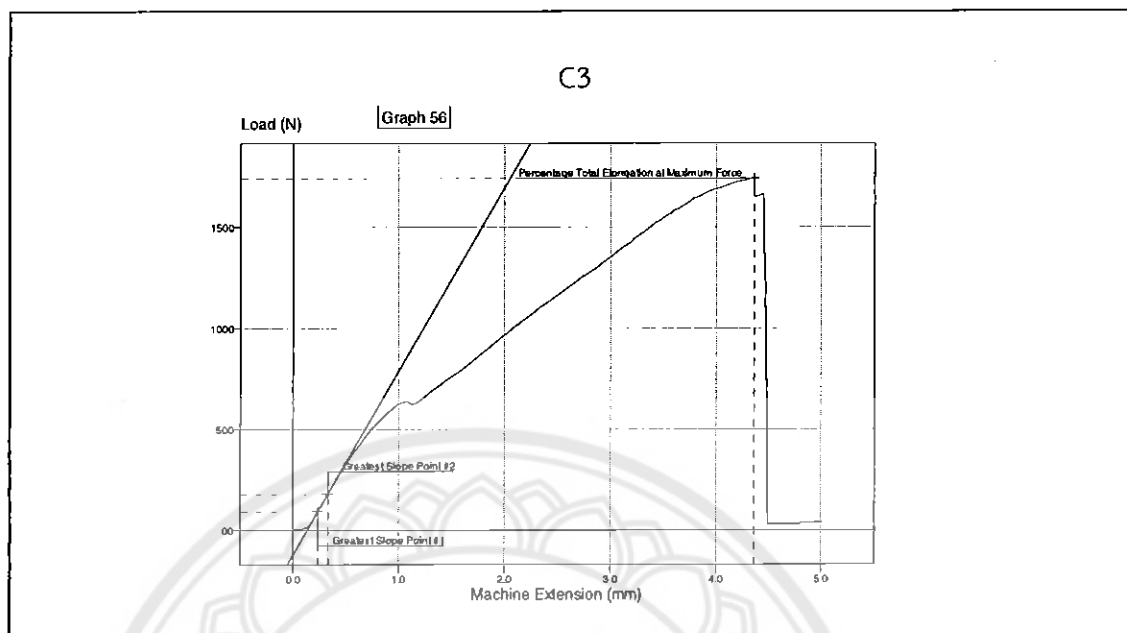


รูปที่ ก11 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร C (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 1



Load (N)	Machine Extension (mm)
0.12766	0.000021289
10.997	0.14054
101.95	0.31056
255.66	0.52090
402.11	0.73187
531.24	0.93296
644.62	1.1428
725.74	1.3546
740.06	1.5628
681.53	1.7791
701.05	1.9549
272.52	2.1771
392.49	2.3635
263.86	2.5761
238.96	2.7859

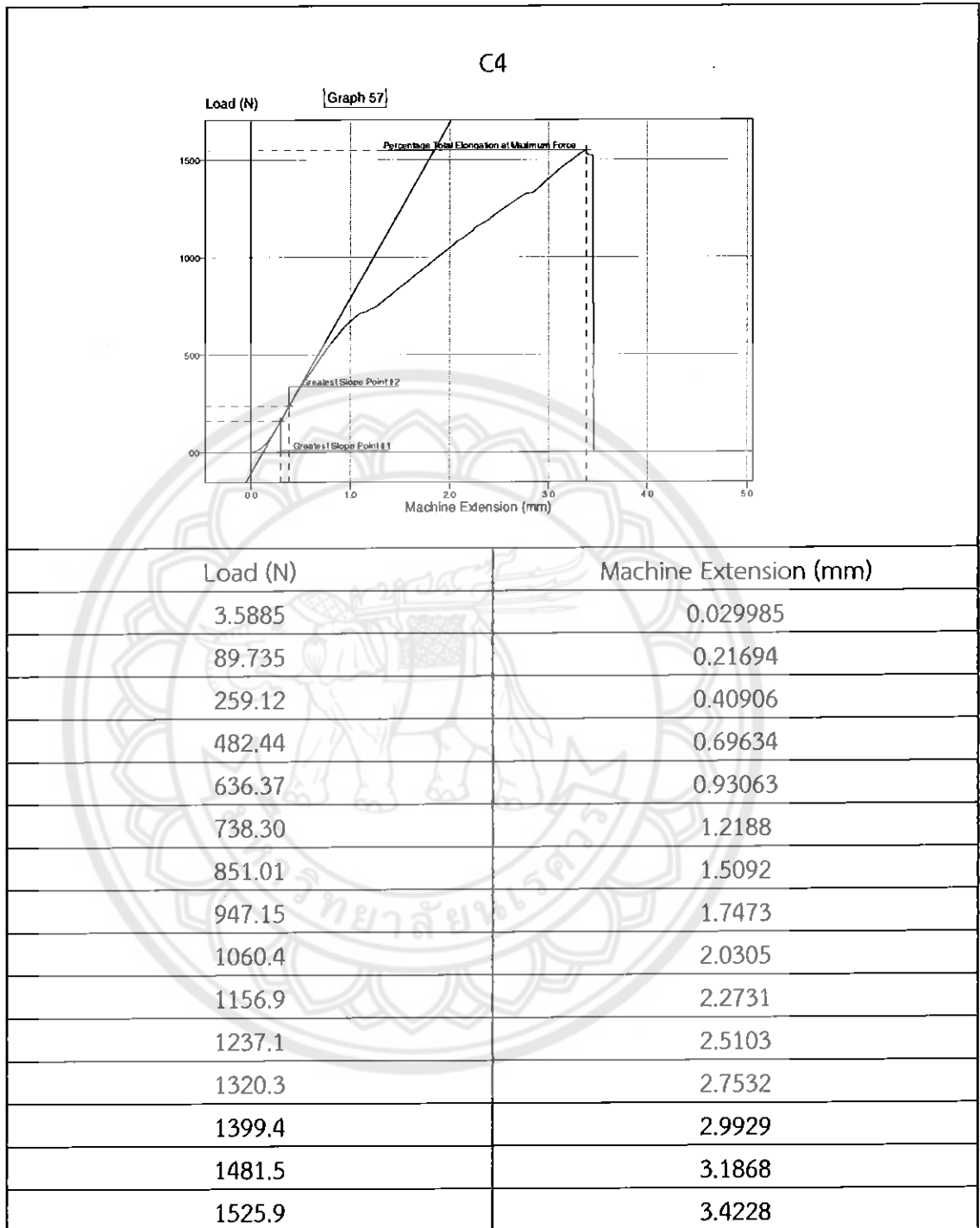
รูปที่ ก12 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร C (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 2



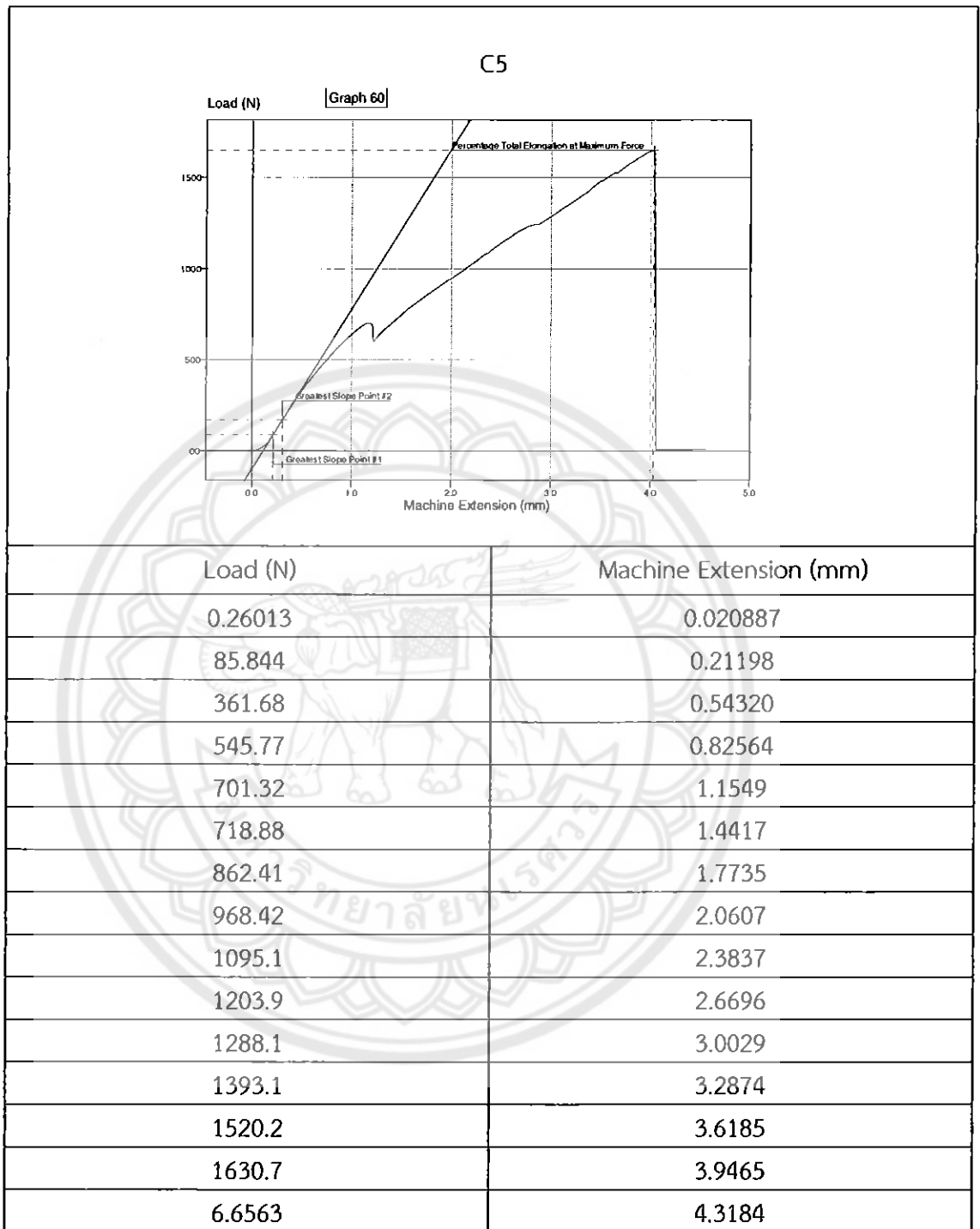
Load (N)	Machine Extension (mm)
0.012399	0.000037877
70.850	0.21319
342.40	0.52388
549.62	0.83375
625.32	1.1413
743.43	1.4509
865.54	1.7646
998.77	2.0759
1120.8	2.3846
1239.5	2.6932
1355.4	3.0050
1478.6	3.3184
1589.5	3.6279
1714.9	4.1424
30.008	4.8056

รูปที่ ก13 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร C (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 3

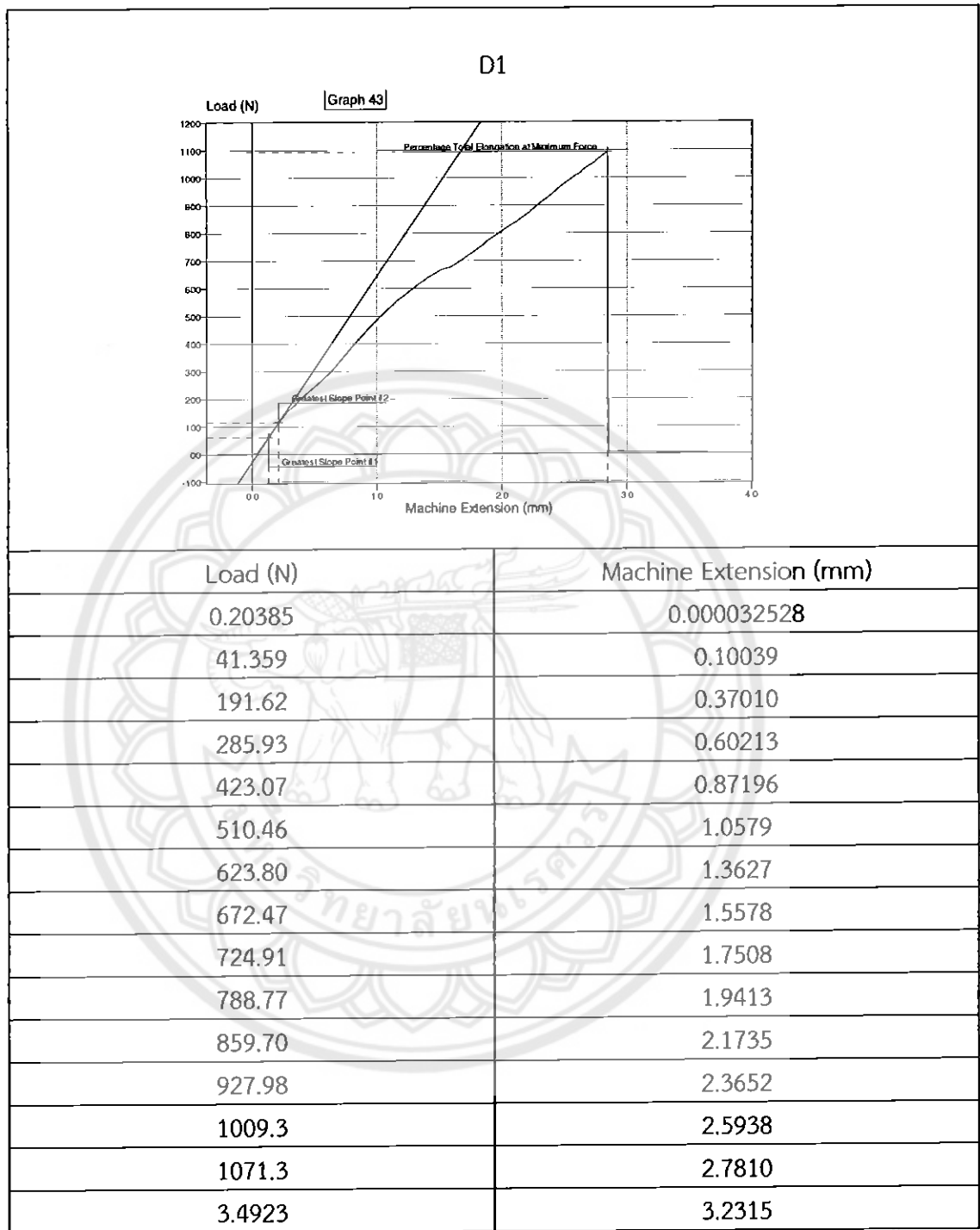




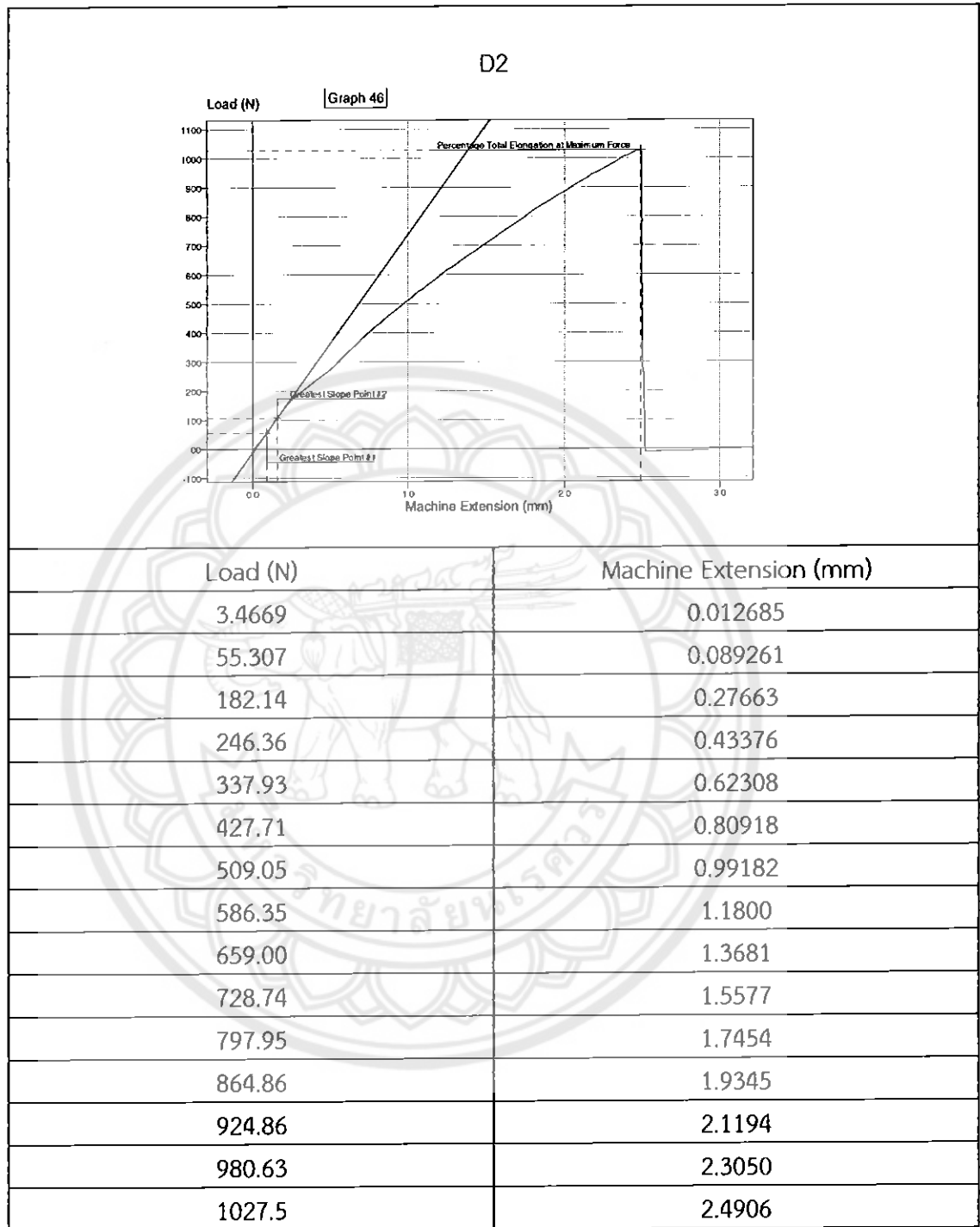
รูปที่ ก14 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร C (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 4



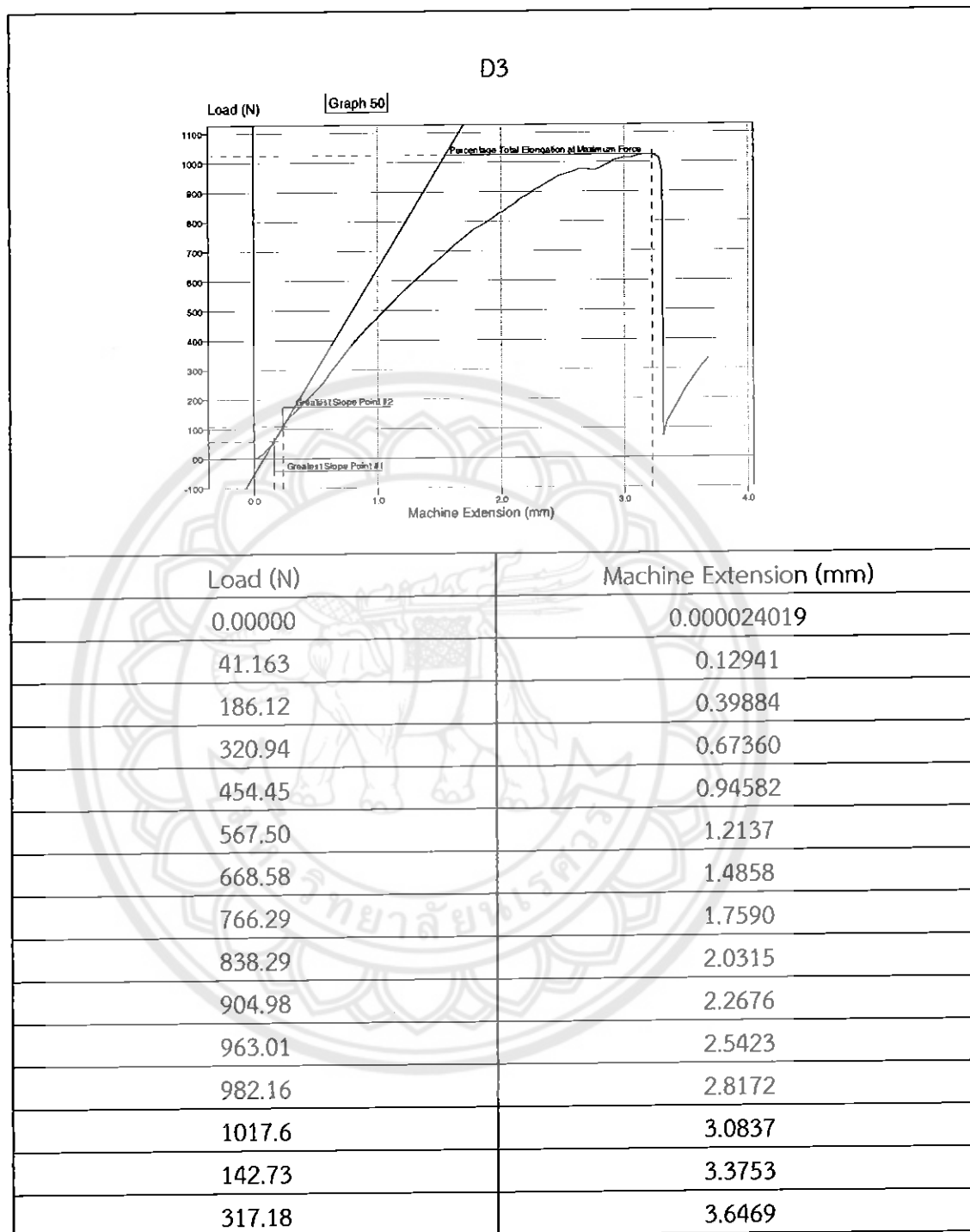
รูปที่ ก15 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร C (ตัวทำแข็ง 0.5 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 5



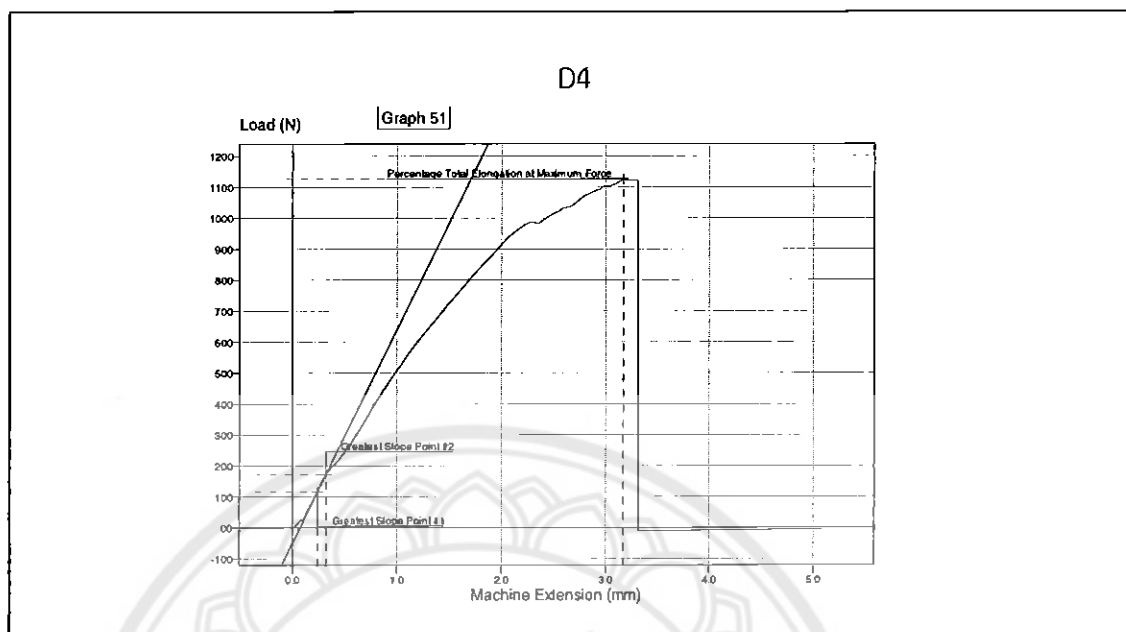
รูปที่ ก16 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร D (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 1



รูปที่ ก17 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร D (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 2

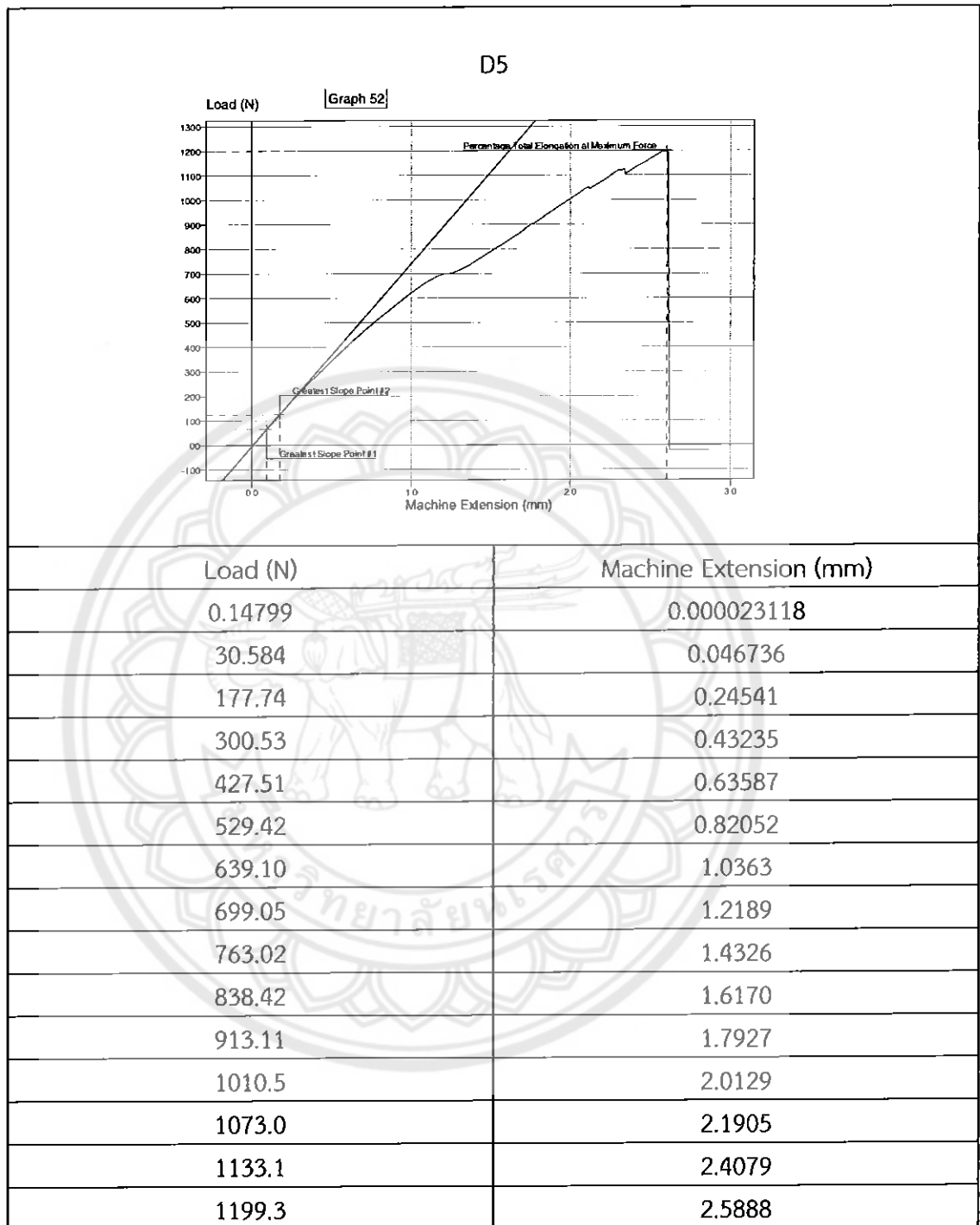


รูปที่ ก18 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร D (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 3

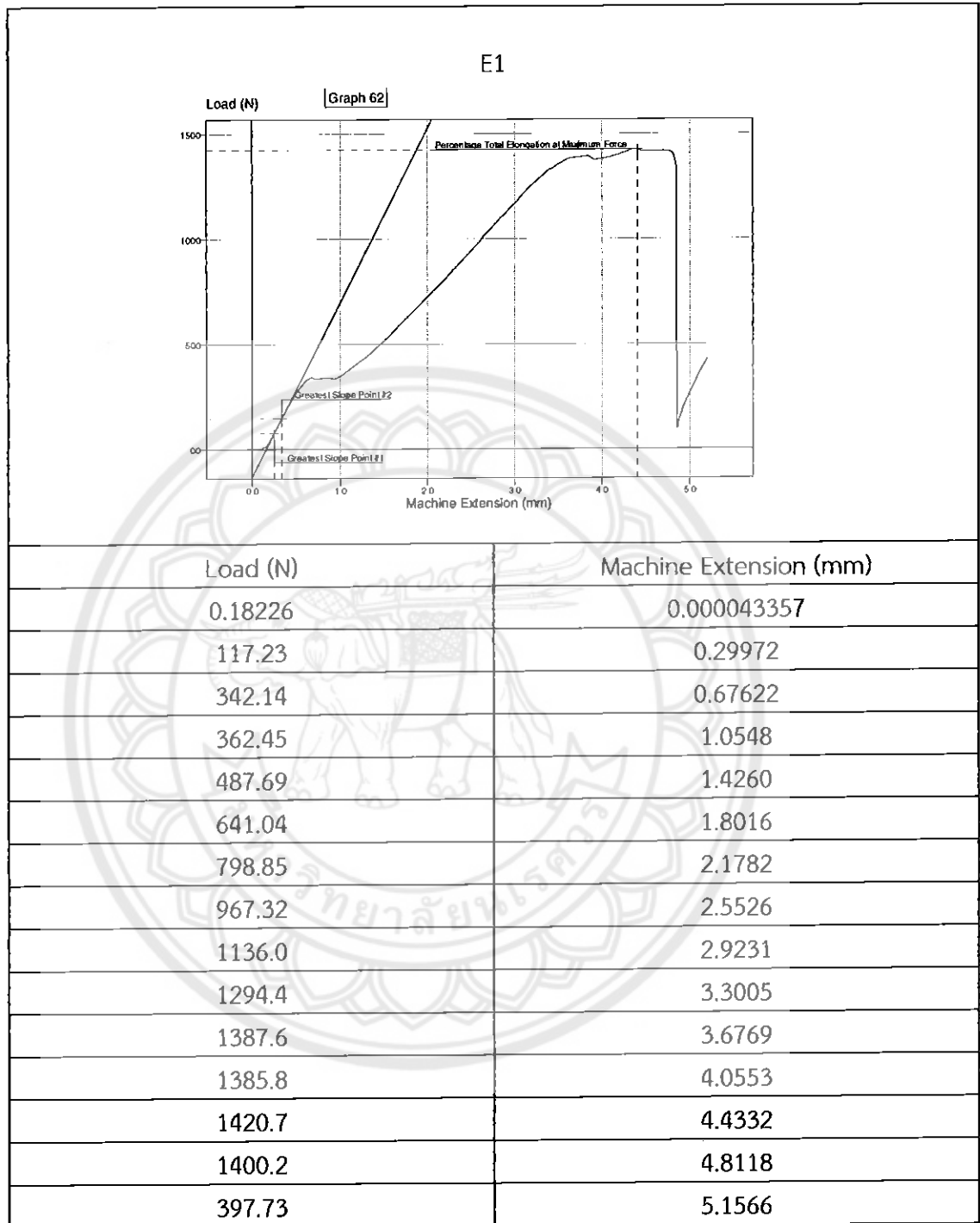


Load (N)	Machine Extension (mm)
6.2052	0.030491
85.536	0.19499
224.36	0.45907
362.38	0.72405
503.29	0.98948
622.00	1.2485
729.82	1.5100
834.85	1.7791
931.61	2.0429
983.79	2.2554
1008.3	2.4664
1042.4	2.6809
1086.9	2.8894
1122.5	3.1566
956.40	3.3121

รูปที่ ก19 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร D (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 4

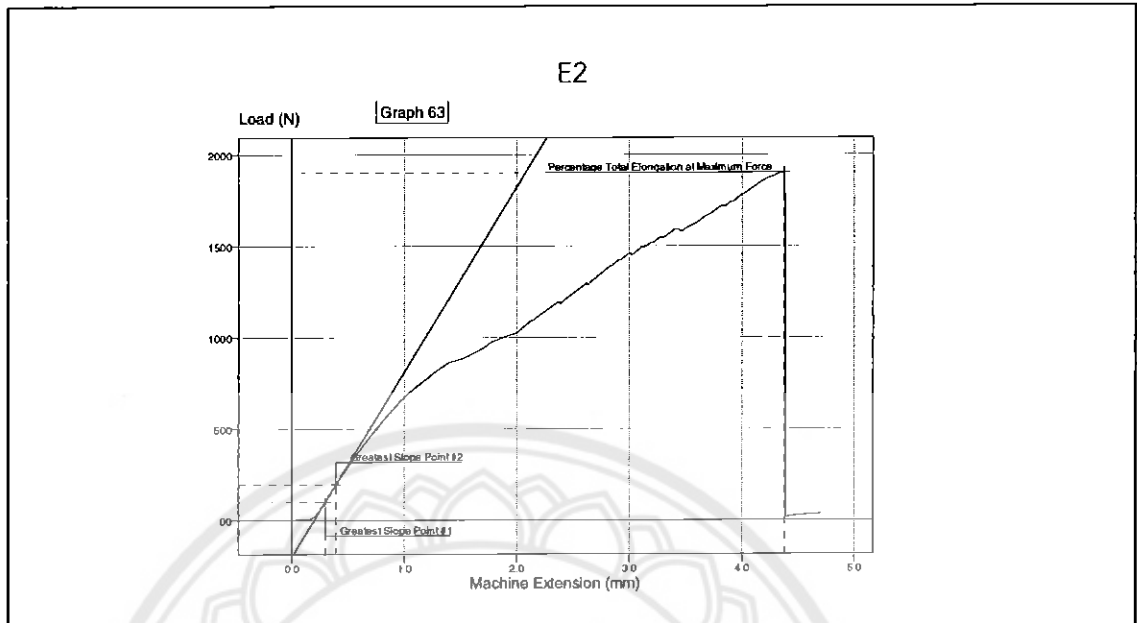


รูปที่ ก20 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร D (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 5



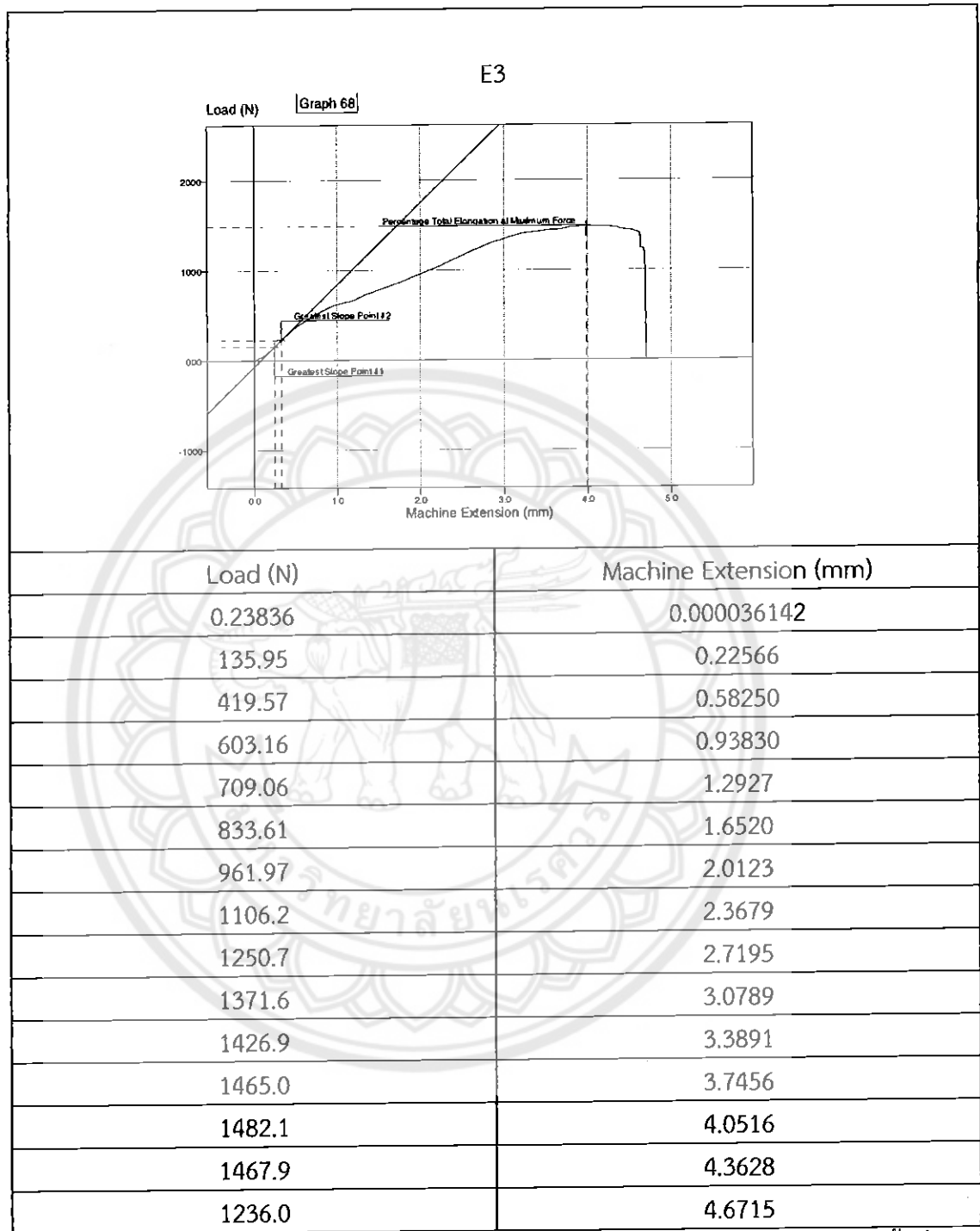
รูปที่ ก21 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร E (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 1



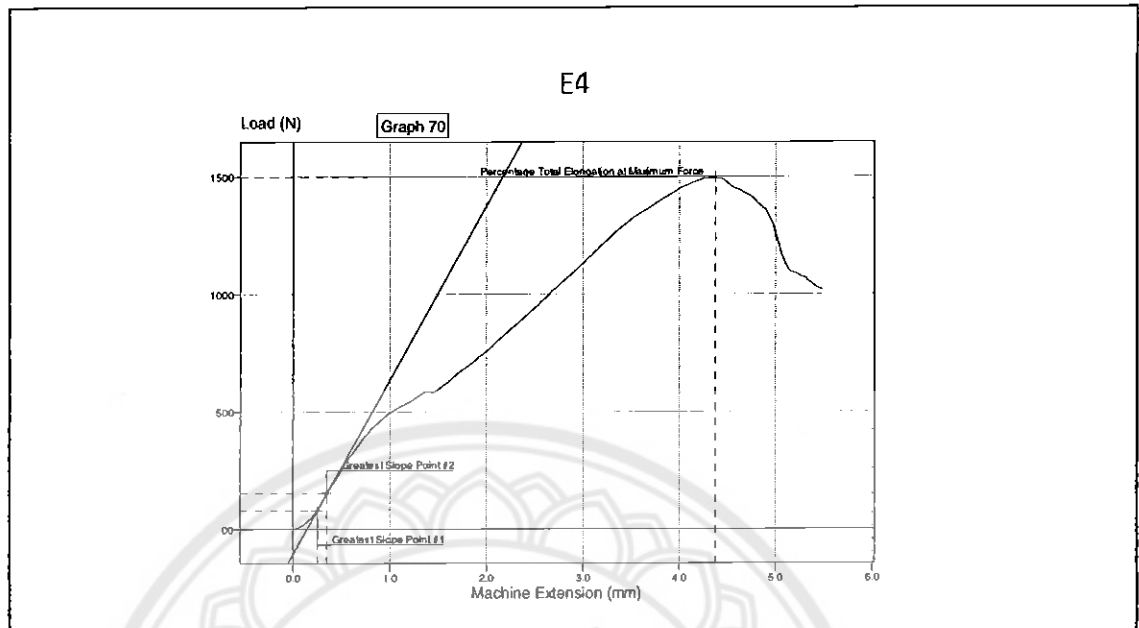


Load (N)	Machine Extension (mm)
0.22197	0.000036921
12.238	0.18060
310.74	0.51601
544.05	0.80829
747.59	1.1417
870.26	1.4321
972.92	1.7704
1056.5	2.0573
1190.6	2.3973
1344.6	2.7386
1476.0	3.0724
1594.6	3.4109
1692.7	3.7528
1818.0	4.0921
29.352	4.5721

รูปที่ ก22 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร E (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 2

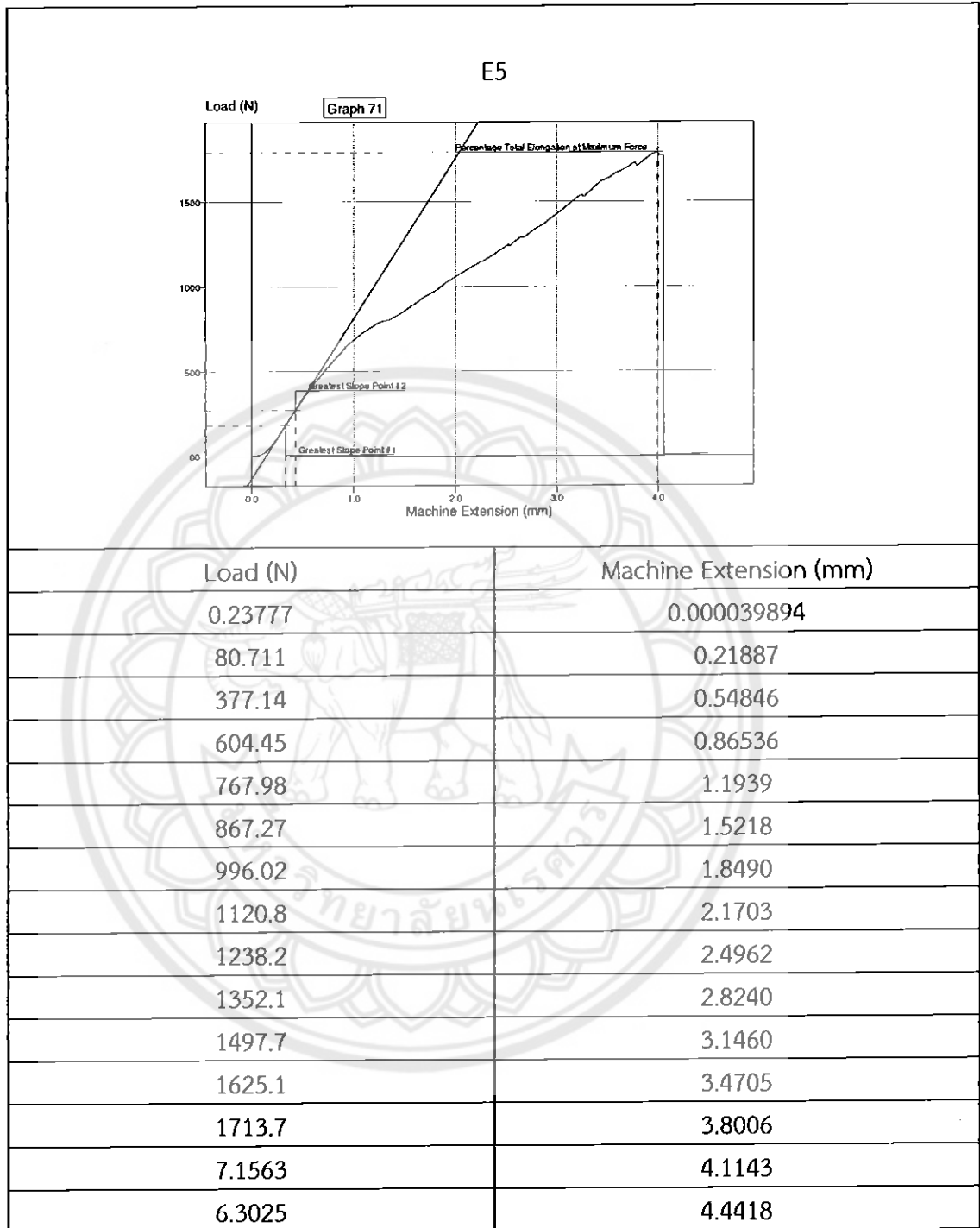


รูปที่ ก23 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร E (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 3

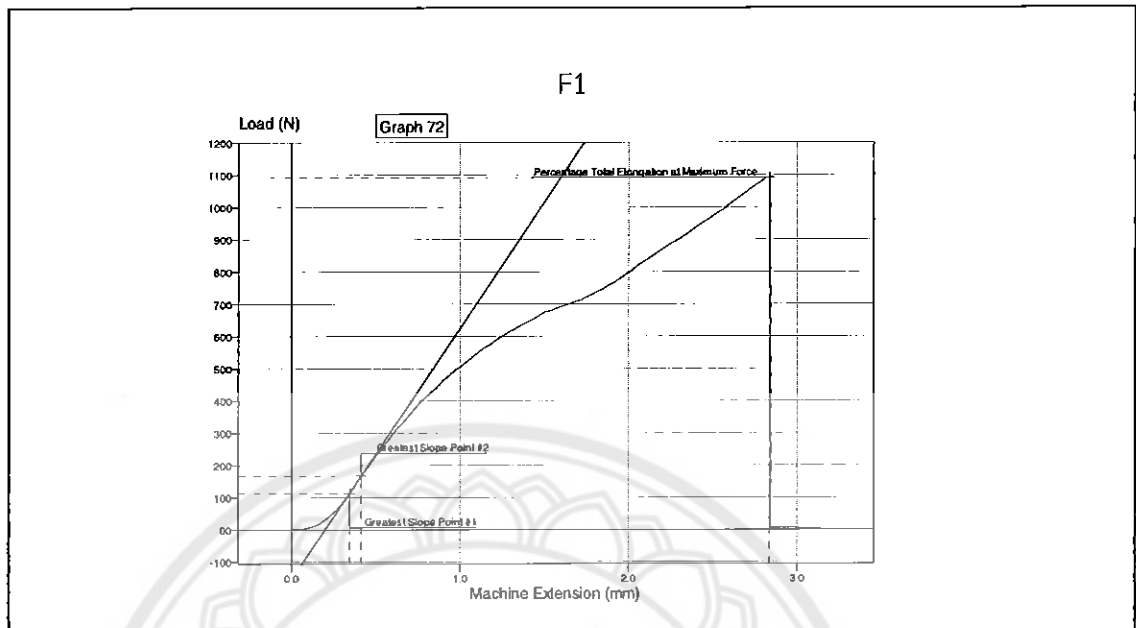


Load (N)	Machine Extension (mm)
0.34919	0.000044337
107.52	0.28919
367.99	0.69013
518.20	1.0885
589.76	1.4824
717.20	1.8820
862.98	2.2845
1016.8	2.6840
1162.0	3.0793
1311.2	3.4759
1416.7	3.8752
1494.3	4.2741
1432.8	4.6736
1232.0	5.0208
1029.8	5.4285

รูปที่ ก24 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร E (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 4

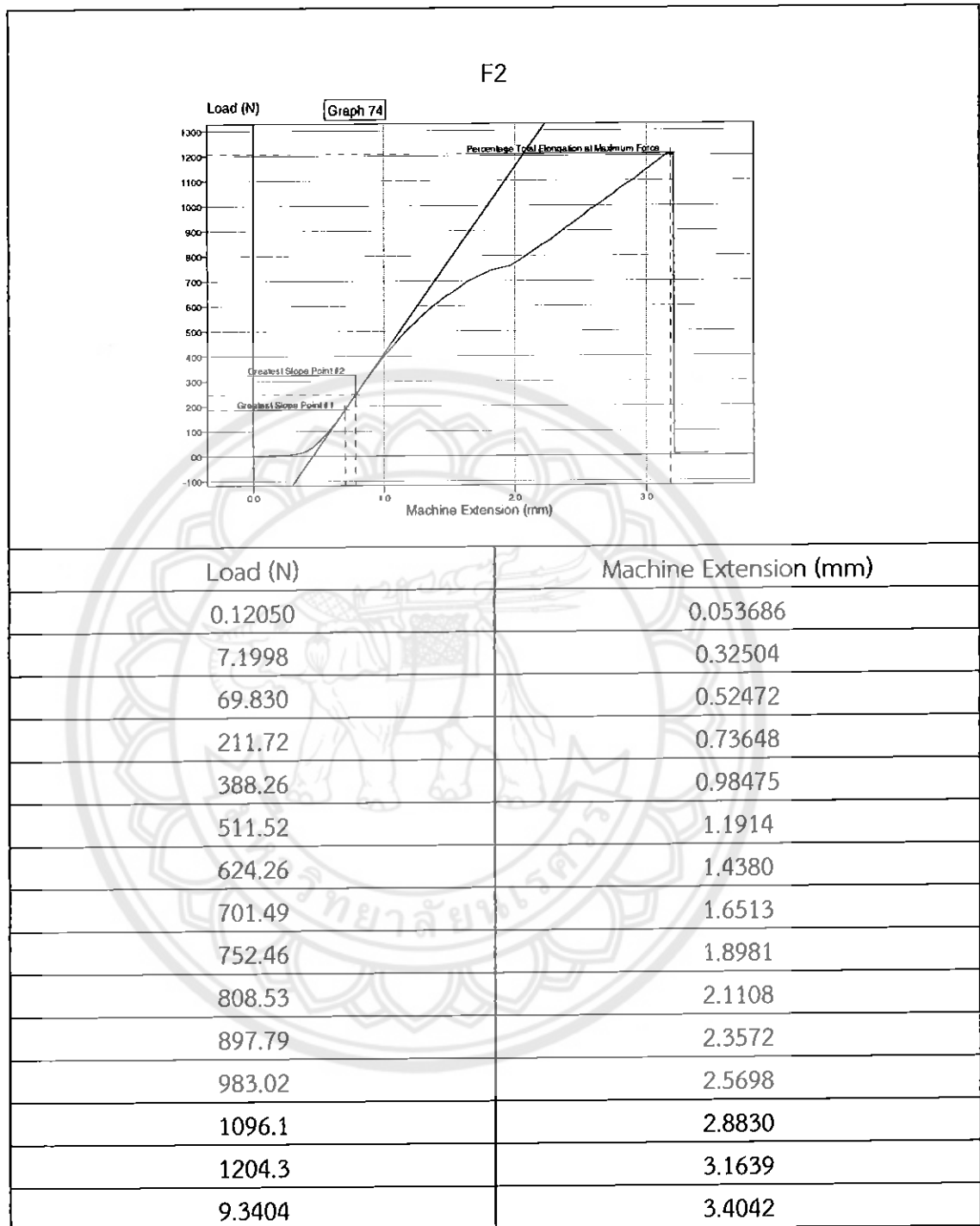


รูปที่ ก25 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร E (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 5

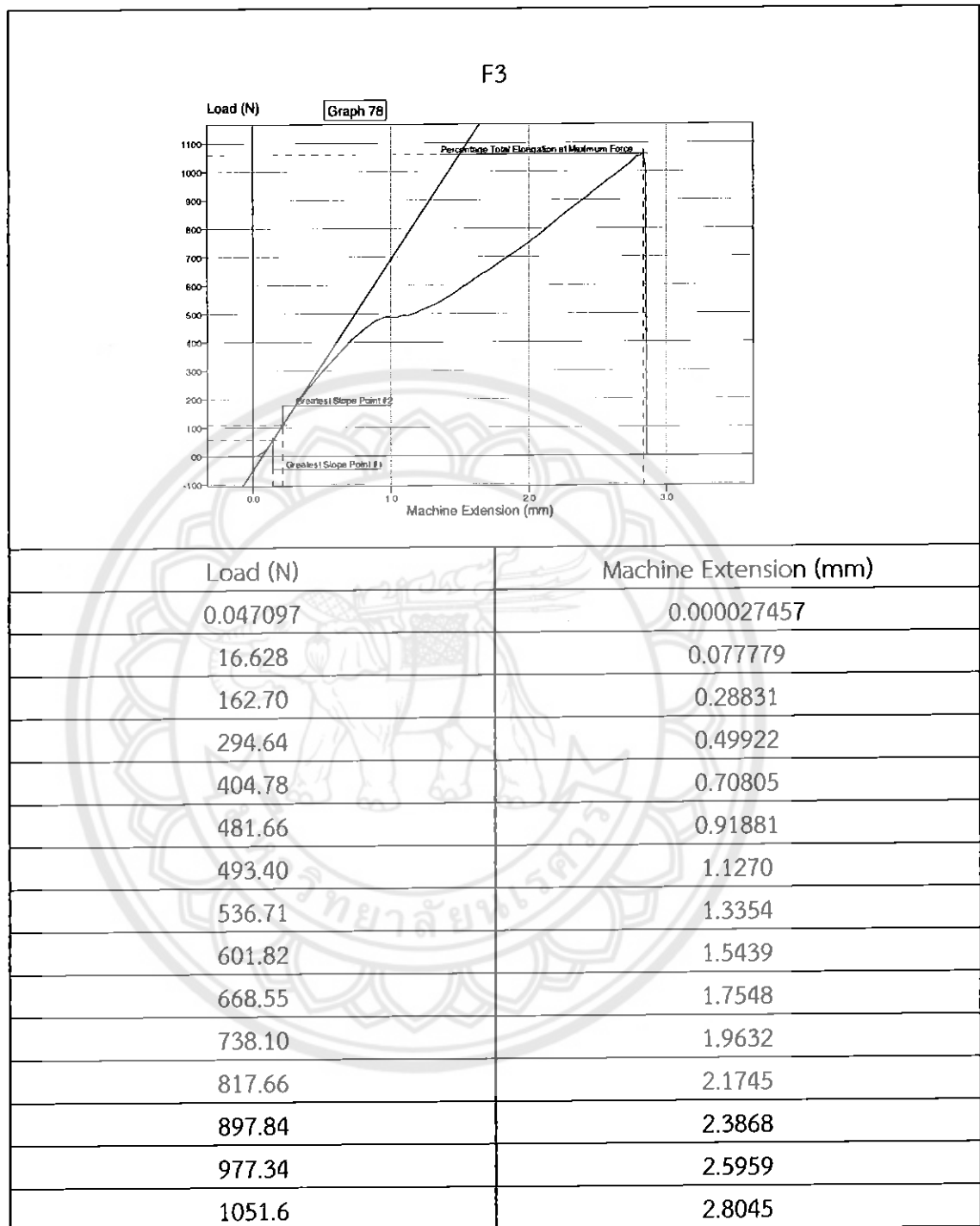


Load (N)	Machine Extension (mm)
0.38147	0.000029183
8.4950	0.11695
114.51	0.34601
282.71	0.57847
418.42	0.81054
520.20	1.0355
604.88	1.2658
675.96	1.5002
714.95	1.7307
784.70	1.9639
868.38	2.1969
958.90	2.4624
1058.0	2.7269
5.3016	2.9093
4.6880	3.1124

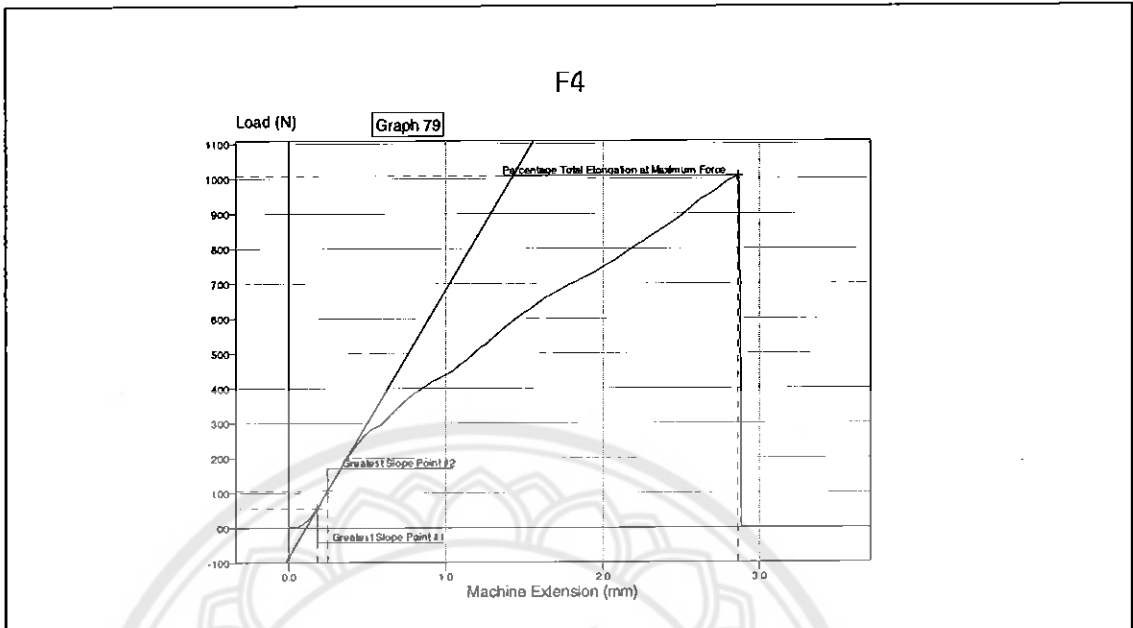
รูปที่ ก26 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร F (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 1



รูปที่ ก27 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร F (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 2



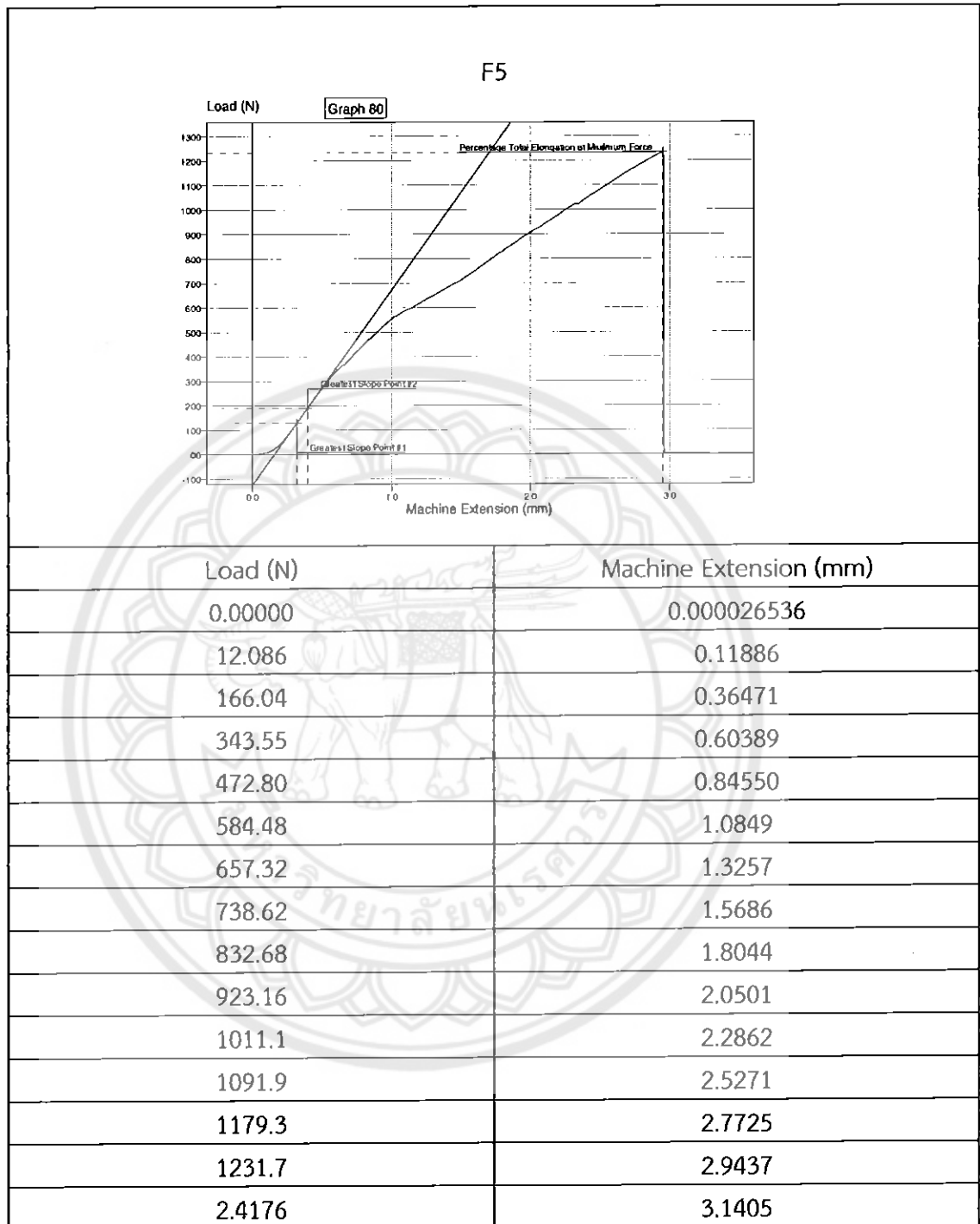
รูปที่ ก28 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร F (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 3



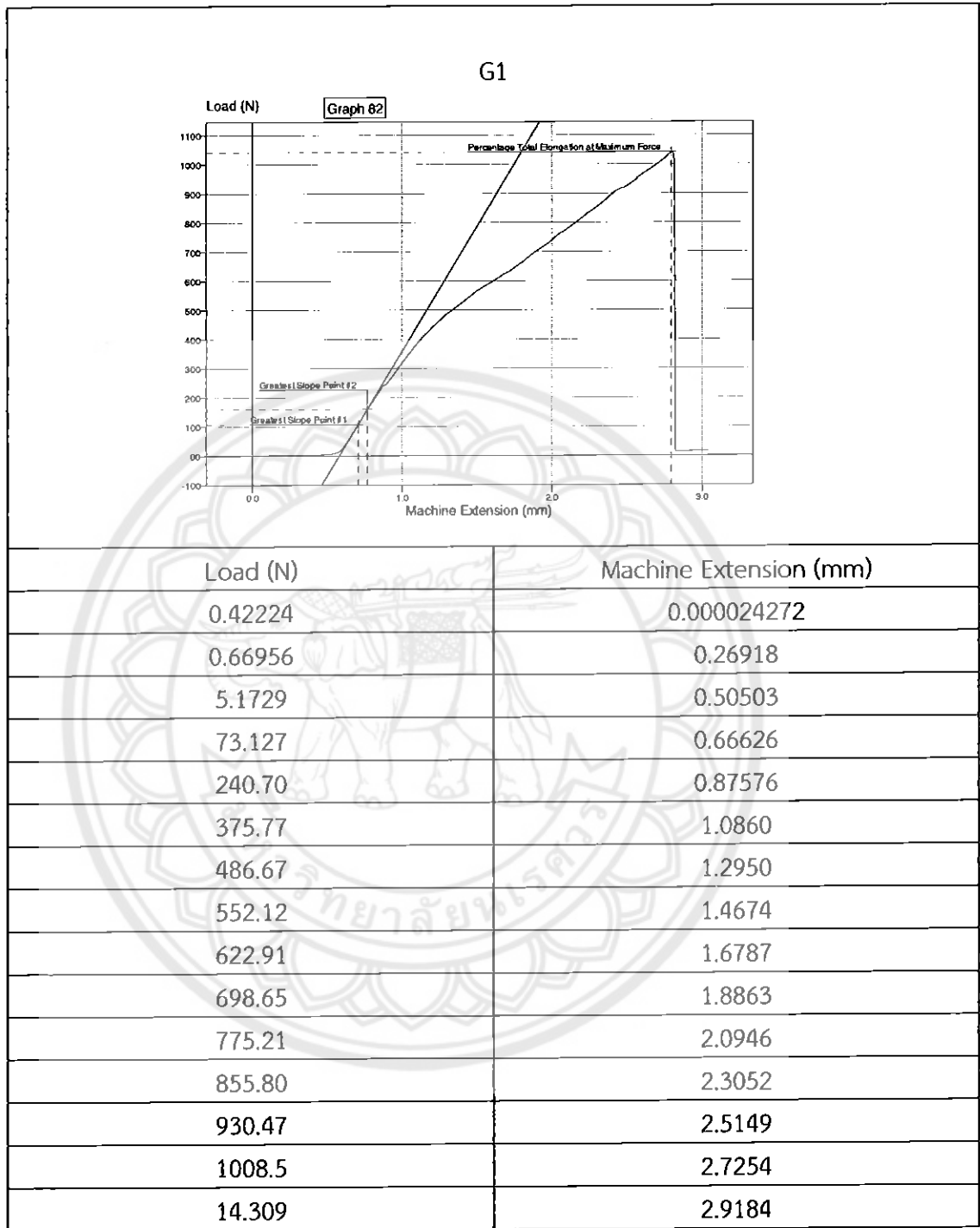
Load (N)	Machine Extension (mm)
2.2484	0.040803
60.269	0.19025
240.66	0.43916
342.75	0.69201
425.04	0.93991
504.46	1.1913
595.42	1.4344
671.16	1.6837
729.23	1.9343
800.60	2.1841
862.72	2.3994
945.84	2.6500
1006.8	2.8665
0.93609	3.1297
1.8285	3.3471

รูปที่ ก29 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร F (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 4

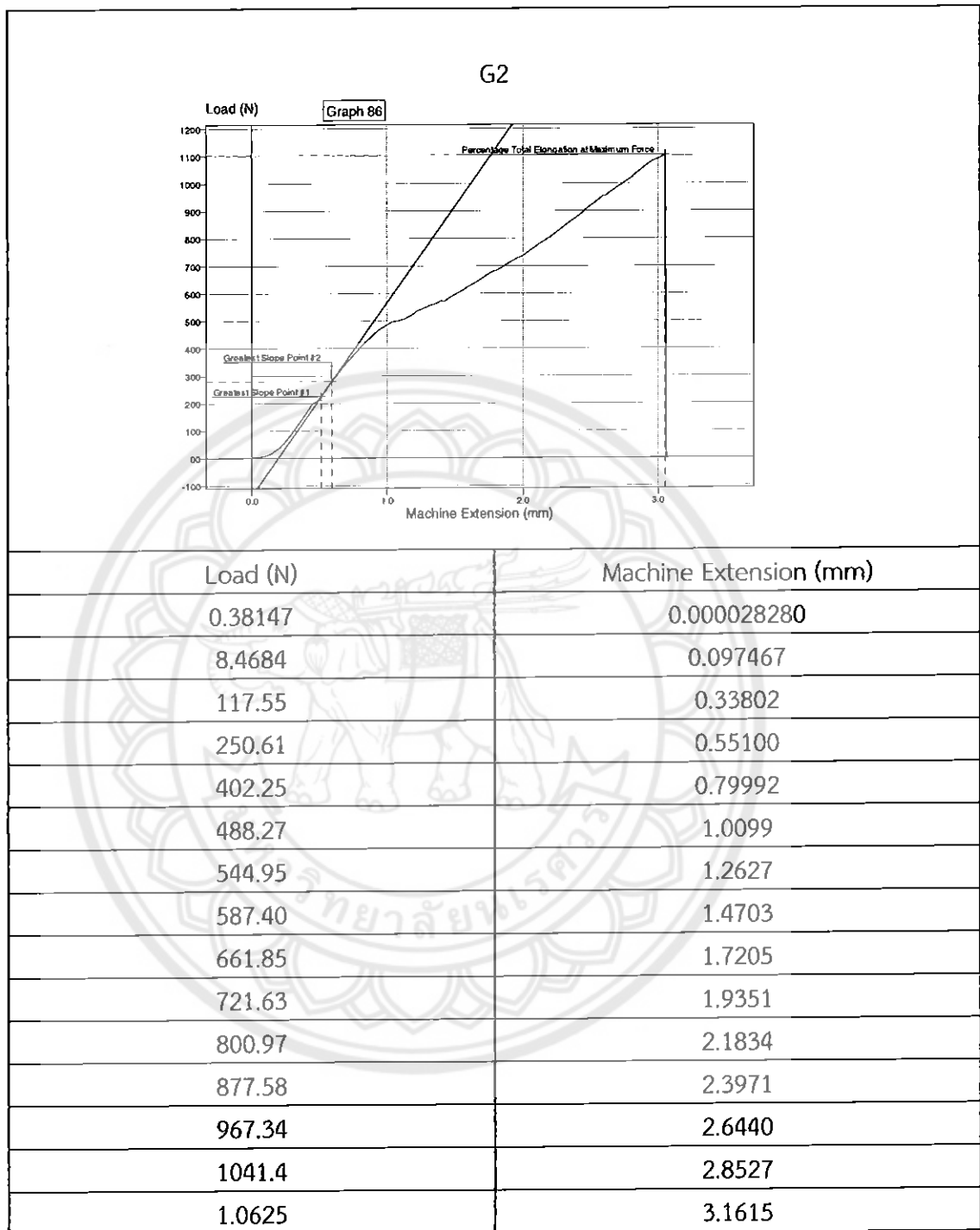




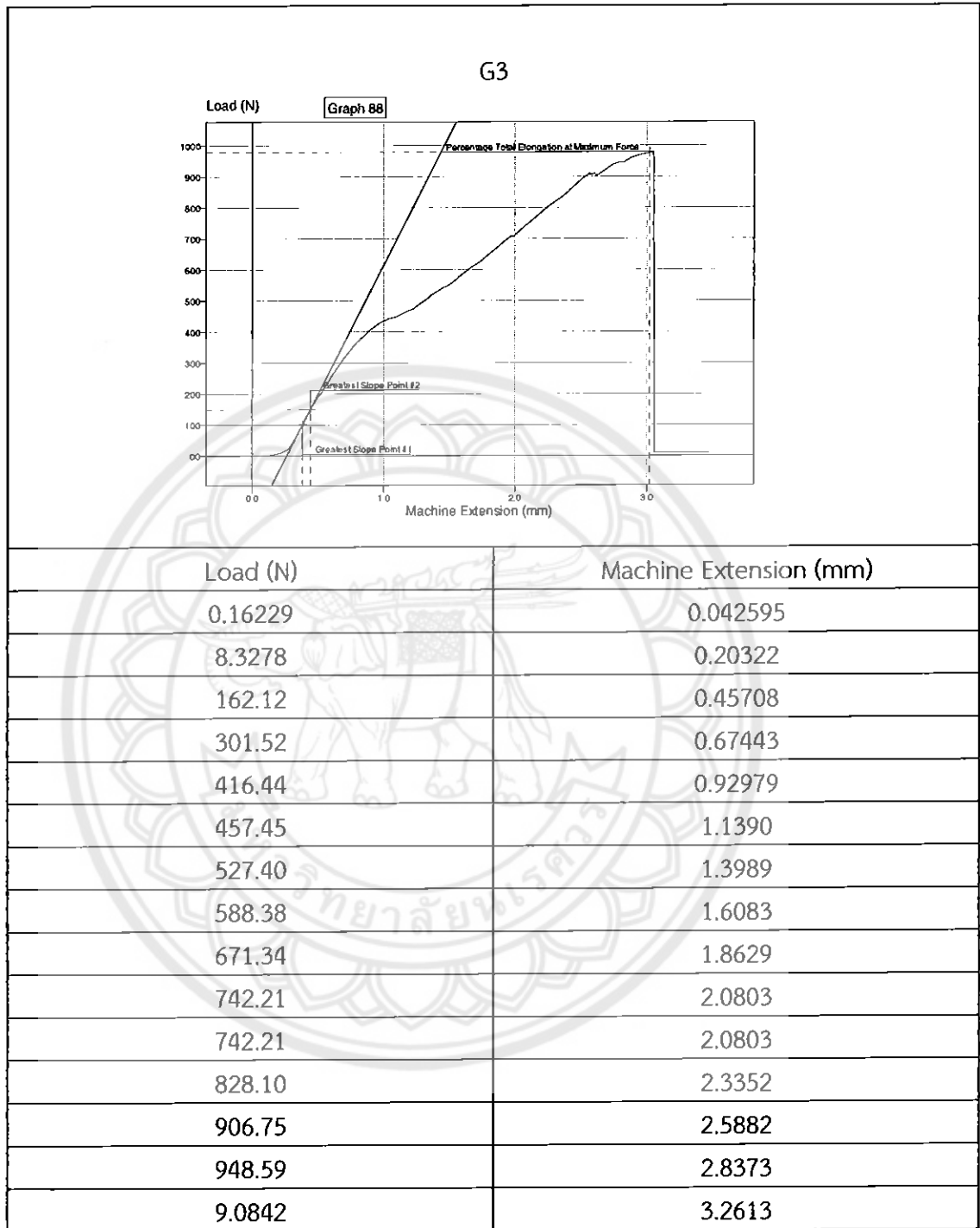
รูปที่ ก30 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร F (ตัวทำแข็ง 1 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 5



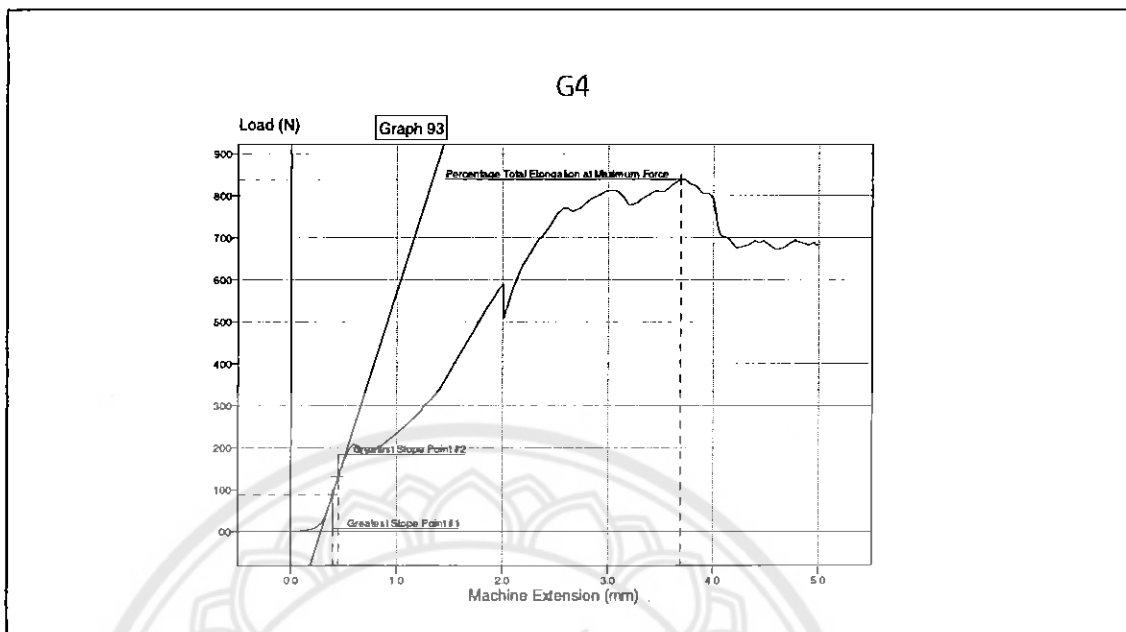
รูปที่ ก31 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร G (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 1



รูปที่ ก32 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร G (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 2

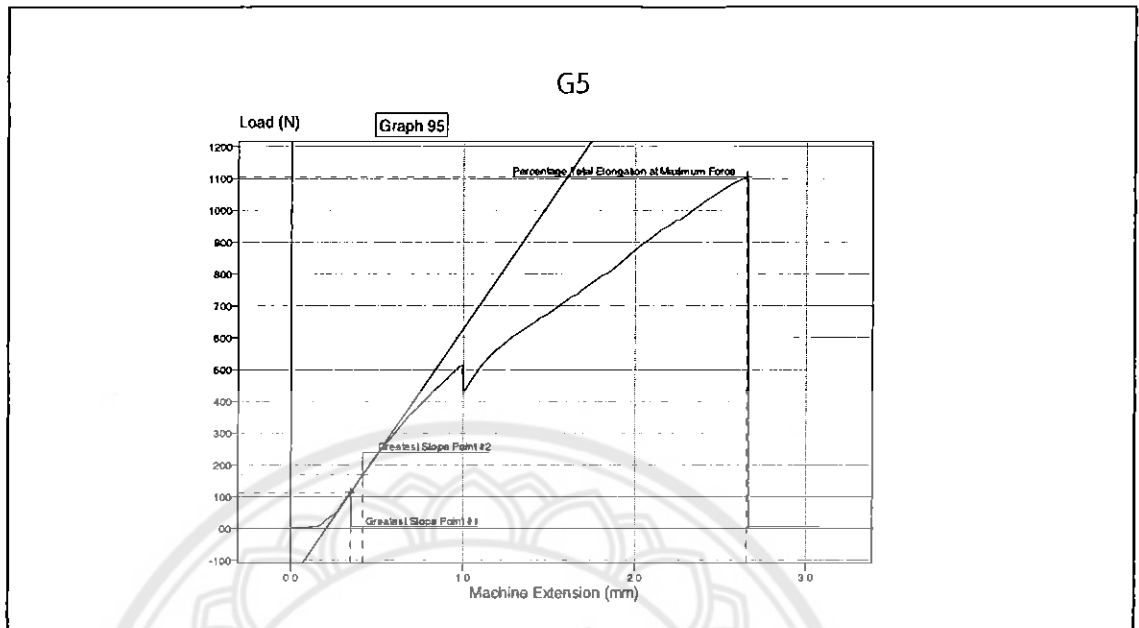


รูปที่ ก33 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร G (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 3



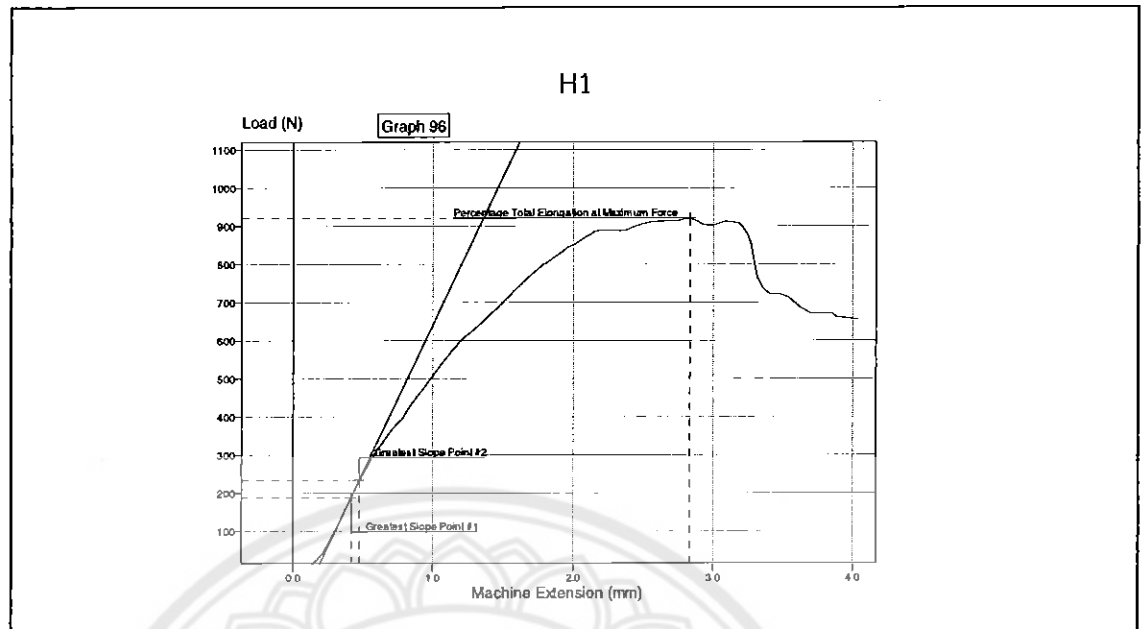
Load (N)	Machine Extension (mm)
0.54858	0.000040326
33.276	0.32186
185.04	0.68178
243.45	1.0422
339.84	1.4042
496.84	1.7657
594.62	2.1199
742.74	2.4797
793.04	2.8392
778.64	3.2016
817.14	3.5660
805.58	3.9248
679.87	4.2876
672.37	4.5981
684.97	4.9670

รูปที่ ก34 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร G (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 4



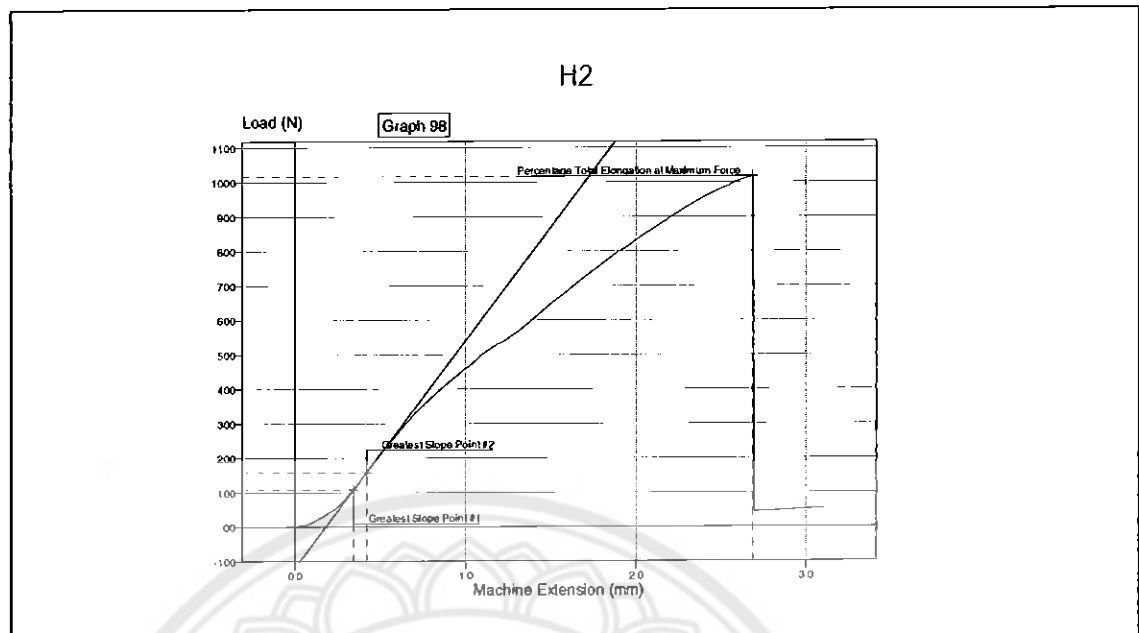
Load (N)	Machine Extension (mm)
0.11444	0.000024721
5.7575	0.14670
96.987	0.32873
247.92	0.52296
387.35	0.74664
492.56	0.94415
547.76	1.1625
629.89	1.3585
712.41	1.5856
786.06	1.7816
880.75	2.0085
954.27	2.2030
1034.1	2.4237
1094.8	2.6153
7.6069	2.9047

รูปที่ ก35 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร G (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 2 กรัม) ชั้นที่ 5



Load (N)	Machine Extension (mm)
3.4964	0.082362
81.193	0.27427
293.62	0.56964
442.35	0.86583
580.10	1.1538
682.25	1.4496
786.88	1.7464
859.41	2.0365
887.54	2.3374
915.35	2.6323
913.08	2.8862
911.97	3.1409
720.74	3.4371
672.50	3.6956
657.83	3.9882

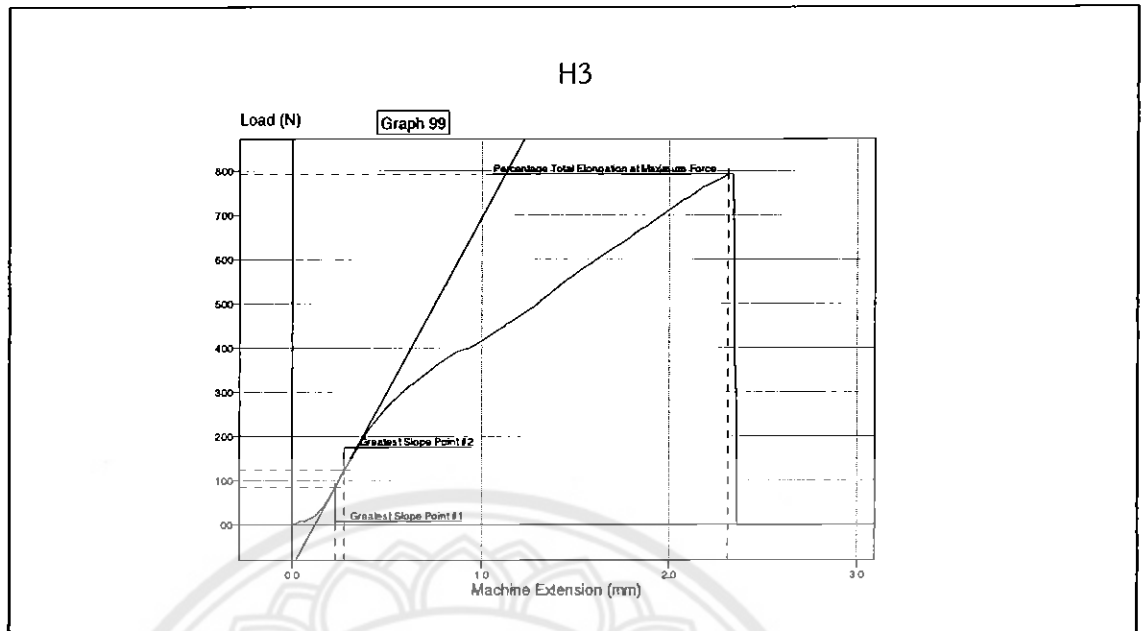
รูปที่ ก36 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร H (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 1



Load (N)	Machine Extension (mm)
1.7733	0.033108
22.031	0.13741
123.60	0.37016
251.43	0.56645
373.14	0.79615
455.88	0.99015
536.96	1.2166
609.93	1.4119
690.27	1.6106
766.41	1.8093
846.20	2.0386
907.88	2.2366
971.89	2.4661
1013.0	2.6654
48.904	2.9130

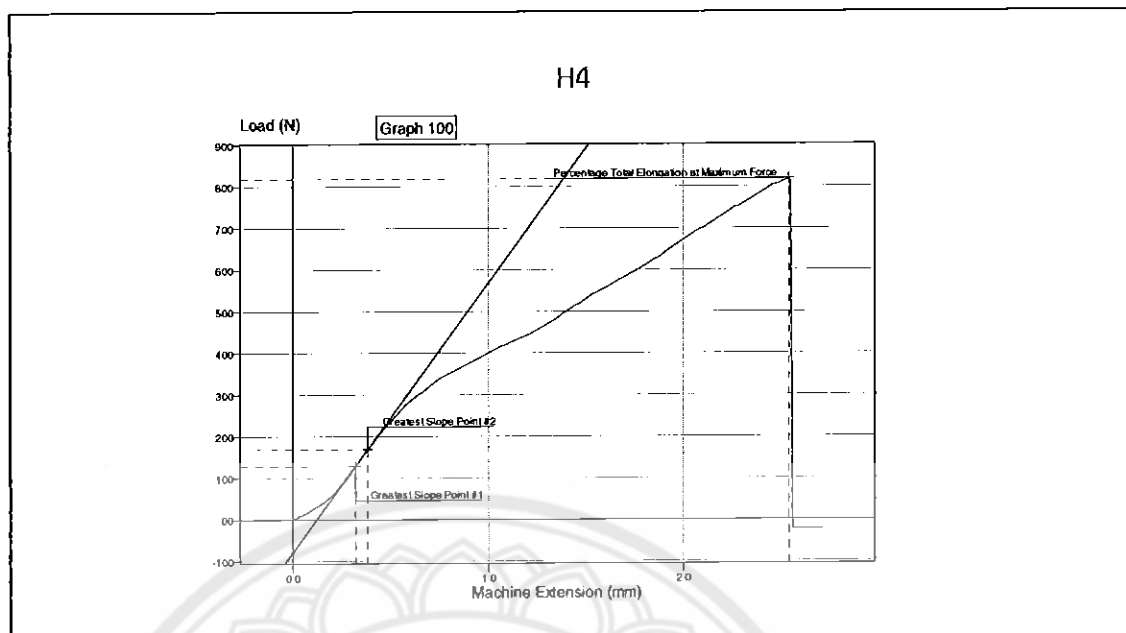
รูปที่ ก37 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร H (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 2





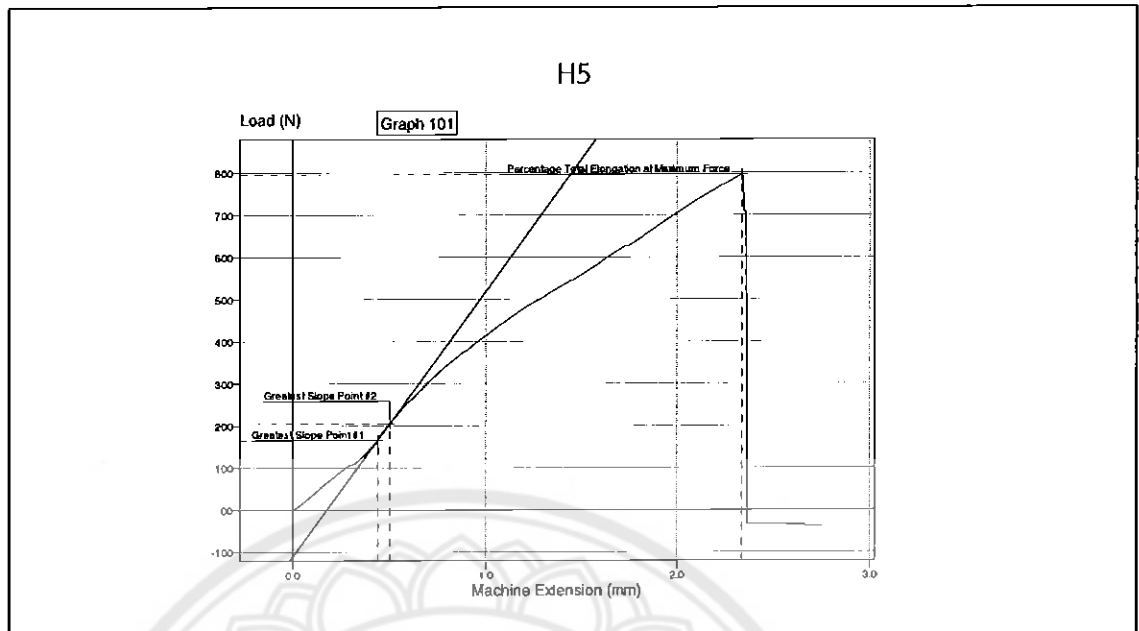
Load (N)	Machine Extension (mm)
0.20210	0.000023352
7.9086	0.058021
83.564	0.22704
213.43	0.40254
300.32	0.58402
361.22	0.76442
401.90	0.94536
452.11	1.1262
503.55	1.3068
563.88	1.4867
616.66	1.6671
667.89	1.8448
718.80	2.0234
767.46	2.2033
338.50	2.3558

รูปที่ ก38 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร H (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 3



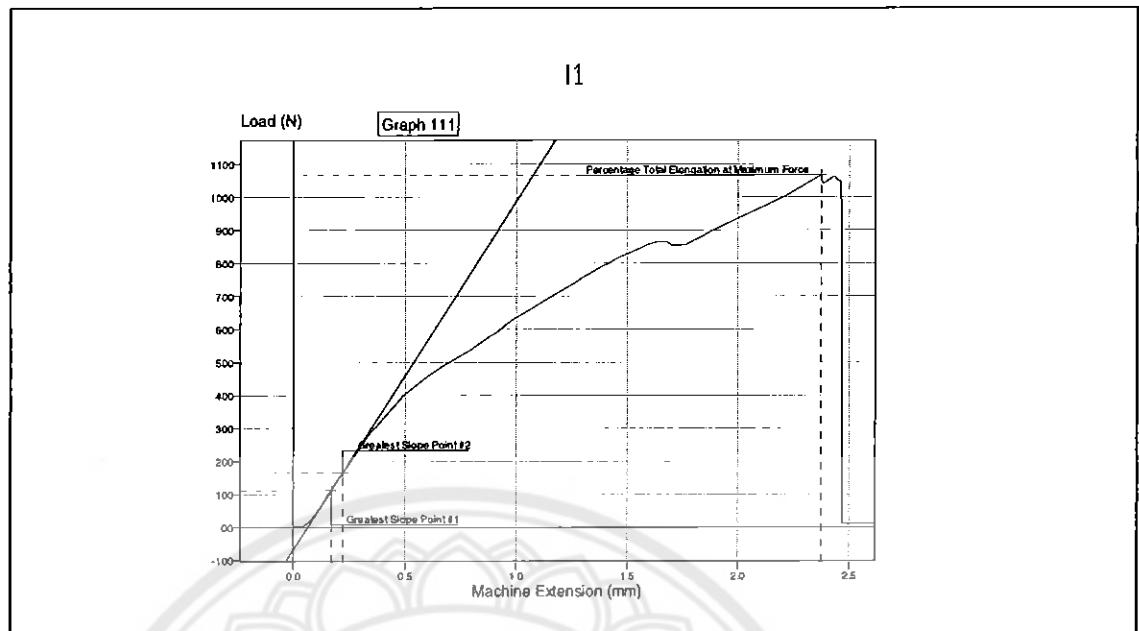
Load (N)	Machine Extension (mm)
0.00000	0.000023062
13.760	0.059502
63.192	0.21095
168.52	0.38192
265.93	0.55684
332.50	0.73017
377.19	0.90549
414.00	1.0524
449.44	1.2267
500.56	1.4002
548.84	1.5672
596.58	1.7518
705.91	2.1207
763.41	2.3242
808.51	2.4988

รูปที่ ก39 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร H (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 4



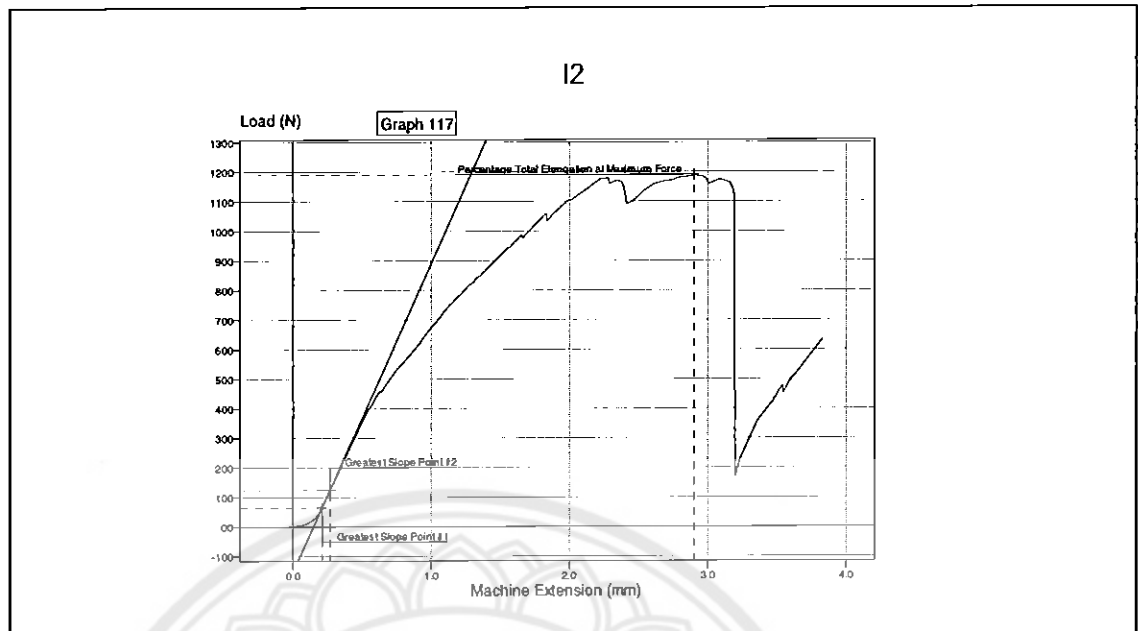
Load (N)	Machine Extension (mm)
3.0529	0.014714
28.914	0.086758
95.743	0.26288
166.87	0.44208
265.06	0.62039
341.64	0.79367
404.55	0.97178
463.44	1.1492
504.07	1.2956
550.05	1.4689
602.55	1.6426
649.26	1.8206
703.21	1.9949
754.05	2.1721
708.46	2.3522

รูปที่ ก40 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร H (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 3 กรัม) ชั้นที่ 5



Load (N)	Machine Extension (mm)
0.38147	0.000020504
11.448	0.063059
210.29	0.26575
382.63	0.47071
493.09	0.67932
581.04	0.88556
660.27	1.0611
741.32	1.2633
820.80	1.4714
866.15	1.6780
899.80	1.8860
965.24	2.0942
1038.1	2.3011
10.538	2.5266
12.319	2.7362

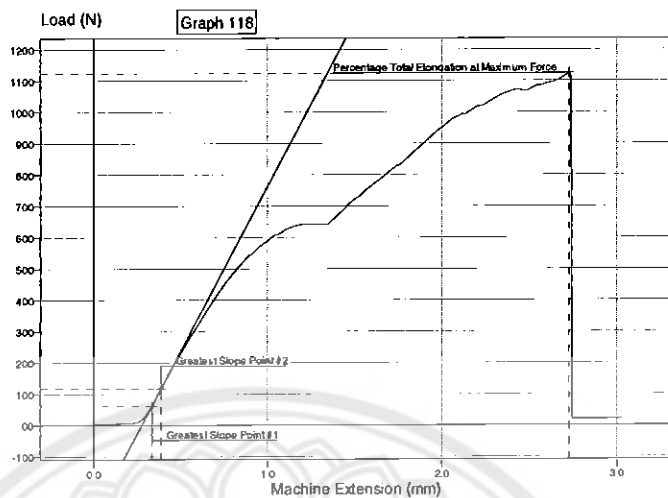
รูปที่ ก41 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร I (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 1



Load (N)	Machine Extension (mm)
6.4696	0.069835
61.330	0.20530
341.31	0.48392
538.38	0.76391
694.17	1.0392
835.74	1.3219
961.09	1.6025
1056.1	1.8806
1154.3	2.1600
1097.8	2.4462
1171.0	2.7315
1161.1	3.0161
268.73	3.2732
458.05	3.5524
611.35	3.7923

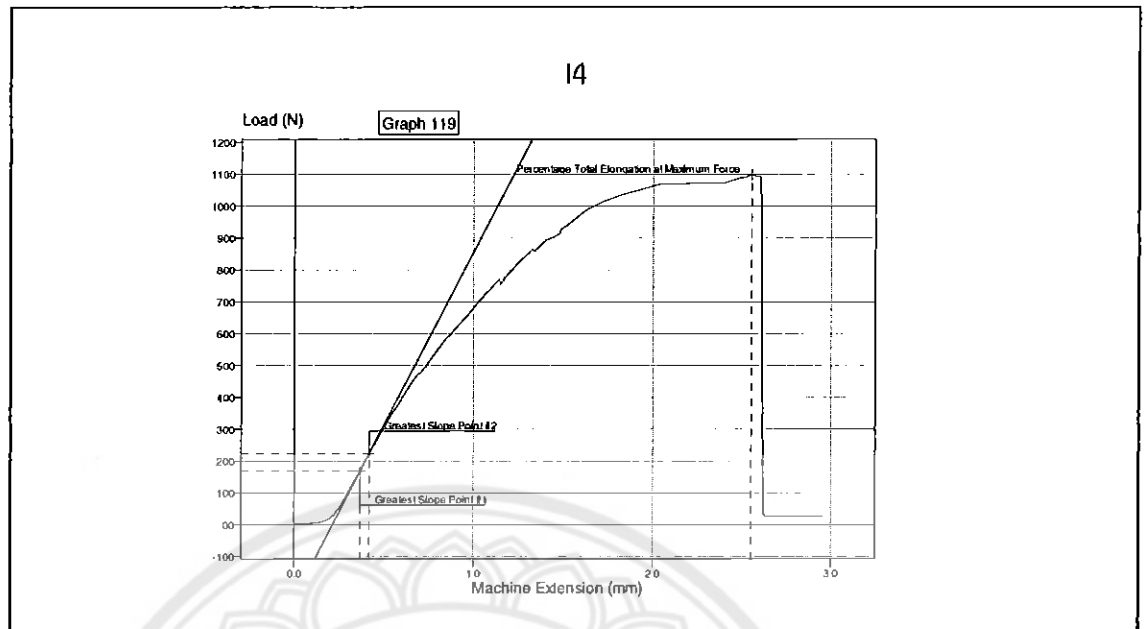
รูปที่ ก42 กราฟกราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร 1 (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 2

13



Load (N)	Machine Extension (mm)
0.00000	0.000025162
5.7156	0.18961
41.624	0.31292
229.14	0.49829
398.80	0.68937
531.29	0.87519
609.05	1.0573
641.43	1.2495
778.64	1.6270
859.56	1.8147
953.04	2.0049
1014.1	2.1910
1069.8	2.4121
1100.5	2.6551
19.497	2.8767

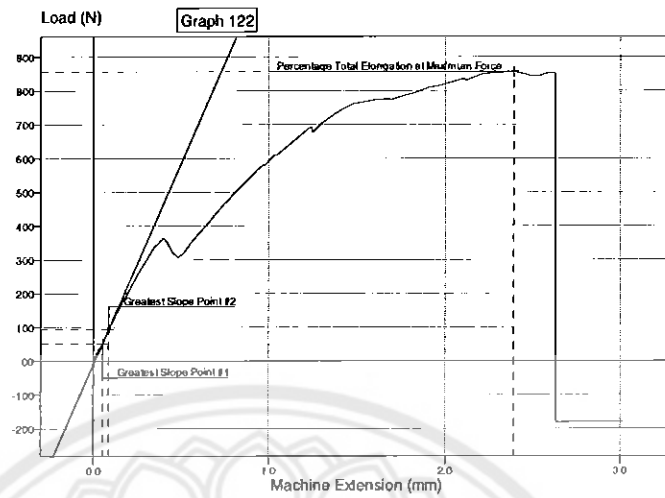
รูปที่ ก43 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร I (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 3



Load (N)	Machine Extension (mm)
0.00000	0.000021470
5.4764	0.11362
59.580	0.26016
251.57	0.44666
426.67	0.63303
563.92	0.81935
683.46	1.0031
784.16	1.1866
879.43	1.3742
959.37	1.5612
1021.0	1.7480
1053.1	1.9358
1070.5	2.1231
1085.1	2.4671
25.887	2.7678

รูปที่ ก44 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร I (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 4

15



Load (N)	Machine Extension (mm)
0.014306	0.00024337
77.986	0.075085
267.41	0.26582
320.33	0.45530
403.19	0.64652
514.15	0.83804
609.64	1.0318
688.24	1.2272
746.01	1.4197
774.81	1.6140
791.21	1.8067
820.64	2.0027
845.89	2.1950
855.92	2.3889
851.91	2.5840

รูปที่ ก45 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานสูตร 1 (ตัวทำแข็ง 2 กรัม ตัวทำละลาย 4 กรัม) ชั้นที่ 5



**ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยความเค้นและความเครียด**

สมการความเค้น (Stress) = แรงที่กระทำ (F) / พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงนั้น ( $A_0$ ) หน่วยความเค้นอาจเป็น  $N/mm^2$  หรือ MPa

สมการความเครียด (Strain) = ความยาวที่ยืดออก ( $\Delta l$ ) / ความยาวเริ่มต้น ( $l_0$ )

ตาราง ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณ

ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ (V)	10 mm/min
พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงของเรซินเสริมใยแก้ว ( $A_0$ )	0.0000208 $m^2$
ความยาวเริ่มต้น ( $l_0$ )	57 mm

ตาราง ค่าเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบเรซินเสริมใยแก้ว และกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดของชิ้นงานทดสอบเรซินเสริมใยแก้วในแต่ละสูตร

ชิ้นงาน A ที่ส่วนผสม โมโนสไตรรีน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.72	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ ( $m^2$ )	9.36	8.06	8.06	8.06	8.06	8.06
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	1277.37	1018.85	1018.16	1060.96	959.26	1066.92
ระยะยืดรวม (mm)	2.72	2.31	2.70	2.35	2.45	2.51
ความเค้น (MPa)	136.51	126.41	134.14	131.63	119.01	129.54
ความเครียด	0.05	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05
Young' Modulus (MPa)	6284.65	5559.65	4268.61	4895.93	5280.17	5257.80
Tensile Strength (MPa)	136.51	126.41	134.14	131.63	119.01	129.54

ชิ้นงาน B ที่ส่วนผสม โมโนสไตรรีน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	1401.36	1595.56	1180.40	1427.98	1206.25	1362.31
ระยะยืดรวม (mm)	3.65	4.06	4.19	3.64	3.92	3.89
ความเค้น (MPa)	229.36	261.14	193.19	243.50	233.68	232.17
ความเครียด	0.05	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06
Young' Modulus (MPa)	6437.10	5845.28	6517.56	6349.93	6818.57	6393.69
Tensile Strength (MPa)	229.36	261.14	193.19	233.68	197.42	222.96

ชิ้นงาน C ที่ส่วนผสม โมโนสไตรรีน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	1338.99	740.15	1740.93	1548.76	1649.35	1396.75
ระยะยืดรวม (mm)	3.26	1.48	4.28	3.34	3.97	3.27
ความเค้น (MPa)	187.27	103.52	243.49	216.61	230.68	196.31
ความเครียด	0.06	0.03	0.08	0.06	0.07	0.06
Young' Modulus (MPa)	6948.86	5992.15	7241.41	7162.66	6998.93	6868.80
Tensile Strength (MPa)	187.27	103.52	243.49	216.61	230.68	196.31

ชิ้นงาน D ที่ส่วนผสม โมโนสไตรรีน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	957.76	1027.53	1024.64	1126.01	1201.03	1067.39
ระยะยืดรวม (mm)	2.62	2.47	3.19	3.15	2.59	2.80
ความเค้น (MPa)	144.34	152.00	151.57	166.57	177.67	158.43
ความเครียด	0.05	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05
Young' Modulus (MPa)	6034.62	6331.91	5860.45	5822.70	6293.96	6068.73
Tensile Strength (MPa)	144.34	152.00	151.57	166.57	177.67	158.43

ชิ้นงาน E ที่ส่วนผสม โมโนสไตรรีน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	1425.05	1902.95	1491.22	1498.22	1789.85	1621.46
ระยะยืดรวม (mm)	4.29	4.23	3.96	4.33	3.97	4.16
ความเค้น (MPa)	199.31	266.15	208.56	209.54	250.33	226.78
ความเครียด	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07
Young' Modulus (MPa)	6614.18	8051.90	7260.82	5898.52	7543.94	7073.87
Tensile Strength (MPa)	199.31	266.15	208.56	209.54	250.33	226.78

ชิ้นงาน F ที่ส่วนผสม โมโนสไตรรีน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	1091.69	1207.21	1059.74	1008.05	1233.23	1119.98
ระยะยืดรวม (mm)	2.76	2.89	2.79	2.80	2.86	2.82
ความเค้น (MPa)	161.49	178.58	156.77	149.12	182.43	165.68
ความเครียด	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Young' Modulus (MPa)	6574.26	6305.16	6249.18	6451.27	6724.59	6460.89
Tensile Strength (MPa)	161.49	178.58	156.77	149.12	182.43	165.68

ชิ้นงาน G ที่ส่วนผสม โมโนสไตรรีน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	7.41	7.41	7.41	7.41	7.41	7.41
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	1041.42	1104.17	978.70	838.63	1105.45	1105.45
ระยะยืดรวม (mm)	2.30	2.98	2.88	3.50	2.52	2.52
ความเค้น (MPa)	140.54	149.01	132.08	113.18	149.18	136.80
ความเครียด	0.04	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04
Young' Modulus (MPa)	6587.34	5417.54	6405.65	6162.22	6092.76	6133.10
Tensile Strength (MPa)	140.54	149.01	132.08	113.18	149.18	136.80

ชิ้นงาน H ที่ส่วนผสม โมนาไฮดรเรซิน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	920.81	1016.35	792.27	818.28	796.01	868.74
ระยะยืดรวม (mm)	2.72	2.62	2.27	2.51	2.31	2.48
ความเค้น (MPa)	157.40	173.73	135.43	139.88	136.09	148.51
ความเครียด	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
Young' Modulus (MPa)	7558.53	6421.95	7700.43	6307.59	6139.32	6825.56
Tensile Strength (MPa)	157.40	173.73	135.43	139.88	136.09	148.51

ชิ้นงาน I ที่ส่วนผสม โมนาไฮดรเรซิน 2 กรัม, ตัวทำแข็ง (Hardener) 0.5 กรัม

ชิ้นงาน	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ความหนา (mm)	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
พื้นที่หน้าตัด $\times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )	10.66	10.66	10.66	10.66	10.66	10.66
ความยาวเดิม (mm)	57	57	57	57	57	57
แรงที่วัสดุขาด (N)	1066.08	1190.13	1123.45	1099.42	856.23	1067.06
ระยะยืดรวม (mm)	2.33	2.83	2.54	2.44	2.38	2.50
ความเค้น (MPa)	100.01	111.64	105.39	103.14	80.33	100.10
ความเครียด	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
Young' Modulus (MPa)	5650.29	5579.18	5633.36	5823.15	6345.93	5806.38
Tensile Strength (MPa)	100.01	111.64	105.39	103.14	80.33	100.10

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเรซินเสริมใยแก้วสูตรละ 5 ชั้น ด้วยเครื่องดึงวัสดุ Universal testing machine (UTM) เพื่อหาค่า Modulus of elasticity (E) หรือค่า Young's Modulus ของแต่ละชิ้นงาน จากกราฟแต่ละสูตรการผสมเรซินเสริมใยแก้ว 9 สูตร จะเห็นได้ว่า มี 2 สูตรการหล่อที่ให้ค่าความเค้นและความเครียดสูง คือ สูตร C (MEKP (ตัวทำแข็ง) 0.5 กรัม, Styren Monomer (ตัวทำละลาย) 3 กรัม) มีค่าความเค้นเท่ากับ 6868.80 MPa และมีค่า Tensile Strength 196.31 MPa และสูตร E (MEKP (ตัวทำแข็ง) 1 กรัม, Styren Monomer (ตัวทำละลาย) 3 กรัม) มีค่าความเค้นเท่ากับ 7073.87 MPa และมีค่า Tensile Strength 226.78 MPa ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าเลือกใช้สูตร E ในการขึ้นรูปไบพดกัณฑ์ เนื่องจากมีค่า Young' Modulus และค่า Tensile Strength สูงกว่าสูตร C





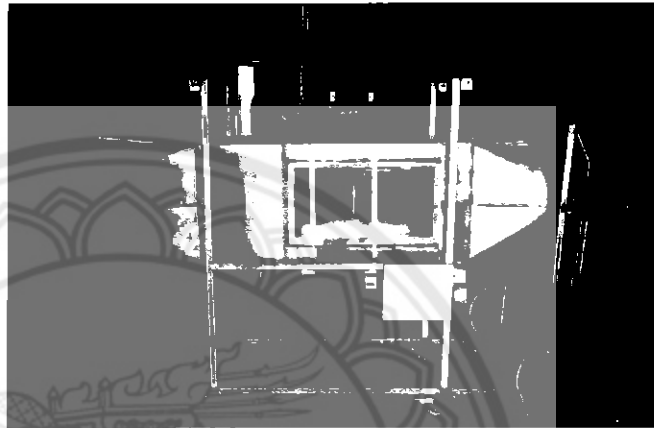
## การทดสอบกักันลมแกนตั้งในอุโมงค์ลม

### วัตถุประสงค์การทดสอบ

หาประสิทธิภาพของกักันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบพัด แบบใบเรียบ และแบบใบโค้ง

### วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. อุโมงค์ลม



รูปที่ ข1 อุโมงค์ลม

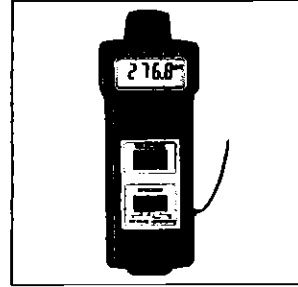
2. เครื่องวัดความเร็วลม



รูปที่ ข2 เครื่องวัดความเร็วลมชนิด testo 511



### 3. เครื่องวัดความเร็วรอบ



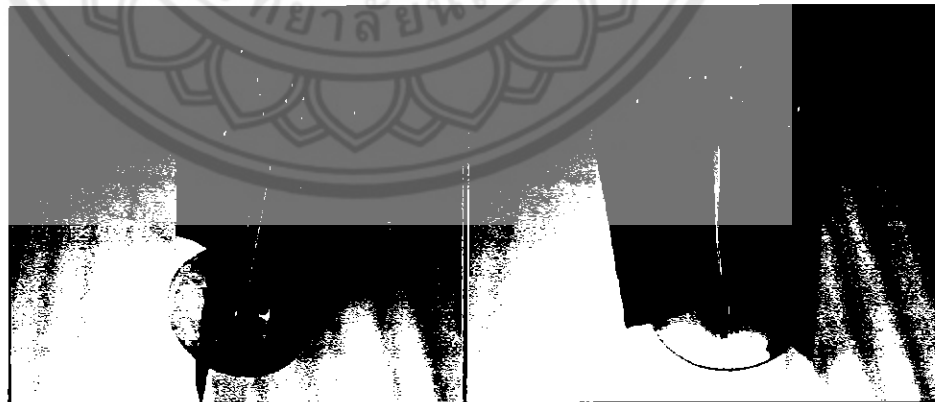
รูปที่ ข3 เครื่องวัดความเร็วรอบ MULTIFUNCTIONAL ENGINE TACHOMETER  
950-1495

### 4. ตาชั่งสปริง



รูปที่ ข4 ตาชั่งสปริง

### 5. ชุดประกอบใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้ง

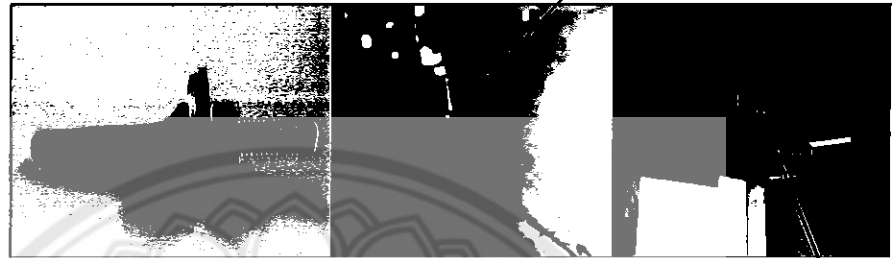


รูปที่ ข5 ชุดประกอบใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้ง

### 6. ชุดประกอบกึ่งหันลมแนวแกนตั้งกับอุโมงค์ลม

- ในชุดประกอบกึ่งหันลมแนวแกนตั้งประกอบด้วยแกนฐานกึ่งหันลมที่เป็นนอตตัวผู้, นอตตัวเมีย และวงแหวนรองนอต 2 วง เพื่อตัวหนึ่งไว้รองด้านบนพื้นอุโมงค์ลมเวลาประกอบนอตตัวผู้เข้ากับอุโมงค์ลม วงแหวนอีกตัวหนึ่งไว้รองใต้พื้นอุโมงค์ลมรับนอตตัวผู้และหมุนนอตตัวเมียเข้าประกอบ เพื่อความแน่นหนา ป้องกันไม่ให้กึ่งหันลมขยับเขยื้อนขณะทำการทดสอบ

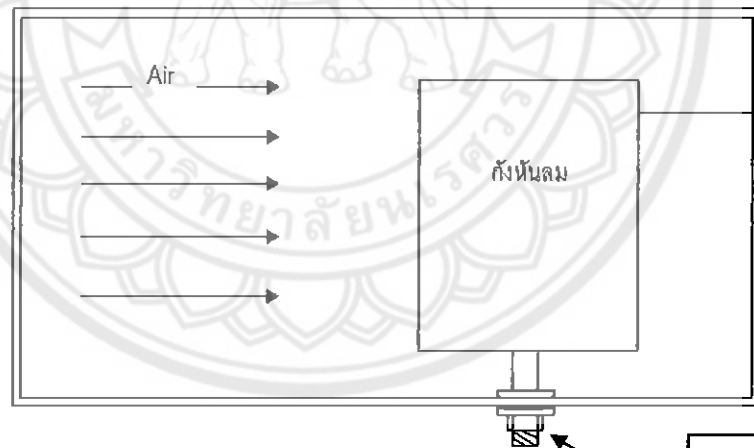
การประกอบกึ่งหันลมเข้ากับฐานกึ่งหันลม  
ที่ทำการประกอบเข้ากับพื้นอุโมงค์ลมแล้ว



รูปที่ ข6 ชุดประกอบกึ่งหันลมแนวแกนตั้งกับอุโมงค์ลม

การประกอบแหวนและนอตตัวเมีย  
เข้ากับฐานนอตตัวผู้ใต้พื้นอุโมงค์ลม

#### ขั้นตอนการทดสอบ



ตาชั่งสปริงจะทำงาน  
เมื่อใบพัดกึ่งหันลม  
หมุน

ชุดประกอบจะเป็นตัวฐานคอยจับยึดเพื่อ  
ไม่ทำให้กึ่งหันลมเกิดการเอียงหรือเกิดการ  
เบี้ยวในขณะที่ลมเข้ามาปะทะใบกึ่งหันลม

1. ประกอบกังหันลมเข้ากับอุโมงค์ลมโดยใช้ชุดประกอบกังหันลมแกนตั้งเข้ากับอุโมงค์ลมให้เรียบร้อย



รูปที่ ข7 การประกอบกังหันลมเข้ากับอุโมงค์ลม

2. เมื่อทำการประกอบกังหันลมเสร็จพร้อมการทดสอบแล้ว ปิดฝาอุโมงค์ลม แล้วเสียบปลั๊กเปิดพัดลมจนกังหันลมหมุนคงที่พร้อมที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ ข8 แสดงการหมุนของกังหันลมก่อนทำการทดสอบ

3. ใส่ท่อวัดความเร็วลมที่ต่อกับเครื่องวัดความเร็วลมเข้าไปในช่องระยะที่ต้องการวัดในอุโมงค์ลม แล้ววัดค่าความเร็วลมทั้งหน้ากังหันลมและหลังกังหันลม บันทึกผลลงในตารางบันทึกผลให้ครบทุกช่อง



รูปที่ ข9 แสดงการวัดความเร็วลม

4. เมื่อวัดความเร็วลมเสร็จ ถอดอุปกรณ์วัดความเร็วลมออกจากอุโมงค์ลมให้เรียบร้อย แล้วทำการวัดความเร็วรอบ โดยถอดปลั๊กพัดลมให้กังหันลมหยุดหมุนก่อน แล้วติดกระดาษเรืองแสงที่จะทำการวัดความเร็วรอบลงบนแผ่นอะคริลิคส่วนบนของกังหันลม เมื่อติดเสร็จเปิดพัดลมให้กังหันลมหมุนคงที่ แล้วทำการวัดความเร็วรอบโดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบยิงแสงเลเซอร์ไปที่กระดาษเรืองแสงที่ติดไว้โดยยิงในแนวตั้งฉากกับกระดาษเรืองแสง แล้วบันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล



รูปที่ ข10 แสดงการติดกระดาษเรืองแสงลงบนแผ่นอะคริลิคเพื่อที่จะวัดความเร็วรอบ

5. เมื่อวัดความเร็วรอบเสร็จแล้ว ถอดปลั๊กพัดลมออกแล้วทำการติดตั้งชุดวัดทอร์ก (T) โดยประกอบตาชั่งสปริงเข้ากับตัวกังหันที่ประกอบในอุโมงค์ลมให้เสร็จเรียบร้อย แล้วเปิดพัดลมทำการวัดทอร์ก (T) บันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล



รูปที่ ข11 แสดงการวัดทอร์ก (T)

6. เมื่อวัดค่าต่างๆ ตามที่ต้องการและบันทึกผลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการปิดพัคลม เก็บอุปกรณ์ต่างๆ ให้เรียบร้อย



ผลการทดสอบเพื่อหาความเร็วเฉลี่ยหน้าใบพัดกังหัน-หลังใบ ความเร็วรอบ และแรงบิด  
ตารางผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ครั้งที่ 1

ความสูง ที่ แถว	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.5	4.1	4.2	3.7	3.2	3.4	3.3	2.6	1.6	2.3	2	2.2	2.2	2.1
2	4.2	3.6	3.9	3.6	3.4	3.3	3.4	3.2	2.1	1.8	1.7	1.5	2.4	2
3	4	4.3	4	3.8	3.3	3.8	4.1	3	2.4	0	0	0	2.3	2.1
4	5.5	4.5	4.1	4	3.7	3.5	5	2.5	2.7	0	0	1.1	1.8	2.8
5	5.4	4.2	3.9	4.2	5.1	3.2	5.3	3.1	2.2	0	1.3	2.2	2.4	2.6
6	3.5	3.3	3.4	4.4	3.6	3.4	4.5	2.9	2.7	1.4	1.2	2.1	2.5	2.2
7	4	4.2	3.8	3.7	3.5	4.1	3.7	2.7	2.9	2.6	2.7	2.4	2.2	2.7
ค่าเฉลี่ย	3.95							1.99						

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N)
1	451	1.7
2	421	1.7
3	423	1.6
ค่าเฉลี่ย	431.67	1.67

ตารางผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ครั้งที่ 2

ความสูง ที่ แถว	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.9	4.6	4.4	4.2	4.4	4.2	4.5	3.1	3.5	1.4	2.9	1.9	2.2	2.4
2	4.6	3.3	3.7	3.3	3.6	4.5	3.5	3.3	2.9	2.3	1.2	1.3	1.8	2
3	5.2	5.1	4.3	4.4	3.9	4.2	3.7	3.1	3	0	0	0	1.1	2.3
4	5.5	4.5	4.8	3.5	4.2	3.9	4.3	3.2	3.3	0	0	1.5	2.4	2.5
5	5.4	5	5.1	4.7	3.8	4.2	3.6	3.3	3	0	2.2	1.4	2	2.9
6	3.8	5.3	5	3.8	4	3.9	4.1	3.4	3.1	2	1.9	1.7	1.5	2.6
7	3.5	4.2	4.3	4.2	3.5	3.3	3.2	2.6	2.2	2.4	2.2	2.4	2.7	2.2
ค่าเฉลี่ย	4.23							2.09						

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N)
1	450	1.7
2	419	1.8
3	414	1.7
ค่าเฉลี่ย	427.67	1.73

ตารางผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบครั้งที่ 3

ความสูง ที่ แถว	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.6	4.5	4.1	4.4	4.2	4.5	4.1	2.9	2.7	1.5	2.8	2.9	2.2	2.3
2	4	3.3	3.4	3.9	4.5	4.4	4.3	3	2.8	2.2	2	2.4	1.7	2
3	5.1	3	3	4.6	4.9	5.2	5.2	3.2	2.5	0	0	0	2	2.3
4	3.5	3.5	3.3	3.5	5.1	3.5	5	3.1	3	0	0	2.1	2.2	2.4
5	3.2	4	3.5	4.7	4.4	3.6	5.6	2.8	2.6	0	1.4	2	1.9	2.6
6	3.7	4.1	3.7	3.2	3.4	3.3	5.3	3.9	3.2	1.9	1.7	1.4	2.2	2
7	3.9	4.8	4.5	4.9	4.6	4.4	5.1	2.4	2.5	1.6	2.2	2.8	2.9	2.8
ค่าเฉลี่ย	4.17							2.10						

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N)
1	457	1.6
2	401	1.8
3	433	1.7
ค่าเฉลี่ย	430.33	1.70



ตารางผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้งครั้งที่ 1

ความสูง ที่ แถว	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.7	5.2	4.9	5	5.5	5.1	5.4	2.2	2.3	2.1	2	2.3	2.2	2.1
2	5.2	5	3.5	5.3	5	5.3	4.9	2.3	1.9	1.6	1.8	1.5	1.9	1.4
3	4.9	5.3	5.2	5	4.9	5.1	5.3	2.6	1.7	1.5	0	0	0	2.2
4	5	5.1	3.9	4.7	5.6	5.2	5.1	2	1.8	1.7	0	0	0	2
5	3.9	4.7	3.8	4.9	5.8	4.9	4.8	2.2	2	0	1.2	0	1	1.7
6	3.6	4.9	4.7	5.1	5.2	5.5	4.9	2.7	2.6	2.3	1.8	2.1	1.9	2
7	4.5	5.5	5	4.8	4.7	3.9	3.8	2.1	2	1.9	2	2.1	1.7	2.1
ค่าเฉลี่ย	4.88							1.64						

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N)
1	445	6.3
2	454	6.2
3	456	6.3
ค่าเฉลี่ย	451.67	6.27

ตารางผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ครั้งที่ 2

ความสูง ร.ล. แถว	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.6	5.3	5.1	5.2	5.7	5	5.4	1.8	1.5	2.1	1.5	2.3	1.7	2
2	5.3	5.1	3.6	5	4.7	5.5	4.8	1.7	2	1.2	1.4	2.4	1.9	1.3
3	4.8	5.4	5.4	5.1	4.9	5.1	5.3	1.8	1.8	1.3	2.1	0	0	2.2
4	4.9	5	4.1	5.2	5	4.9	4.7	1.3	1.4	1.9	0	0	0	1.5
5	4	4.9	3.9	5	4.8	5.7	5.4	1.6	2	0	1.3	0	1.1	2.1
6	3.5	4.8	4.6	5.2	5.1	5.4	4.7	1.9	2	1.9	2.2	2	1.9	1.8
7	4.6	5.6	5.2	4.9	4.6	4.2	3.9	1.5	1.7	1.9	1.7	1.6	2.4	1.9
ค่าเฉลี่ย	4.90							1.52						

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N)
1	458	6.3
2	459	6.3
3	458	6.2
ค่าเฉลี่ย	458.33	6.27

ตารางผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ครั้งที่ 3

ความสูง ที่ แถว	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.9	5.7	4.8	5.3	5.1	5.5	4.7	2	1	2.1	1	1.7	1.4	1.9
2	5.1	5.3	5	5.1	5	5.1	4.5	1.5	1.9	1.1	2	1.1	1.3	2
3	5	5.5	5.2	5.5	5.3	5.5	5.3	1.7	1.1	1.8	0	0	0	2.2
4	4.9	5.2	5	3.7	5	5.1	4.8	2	2.1	0	0	0	1.1	2.3
5	4.7	5.1	5.2	5.5	4.9	4.8	5.2	2.2	1.8	0	0	1.1	1.6	1.9
6	3.9	5.4	4.9	5	5.3	5.1	4.5	1.9	1.2	1.7	1.4	2	1.5	1.8
7	5.5	5	4.7	4.9	5.6	5	5.7	2	1.8	1.5	1.9	2.4	1.3	2
ค่าเฉลี่ย	5.06							1.41						

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N)
1	457	6.3
2	455	6.3
3	459	6.2
ค่าเฉลี่ย	457	6.27

ตารางสรุปความเร็วลมหน้าใบพัดกังหัน-หลังใบพัด ความเร็วรอบและแรงบิดที่ได้จากการทดสอบ  
ของกังหันลมแกนตั้งทั้ง 2 แบบ

สรุป ผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ

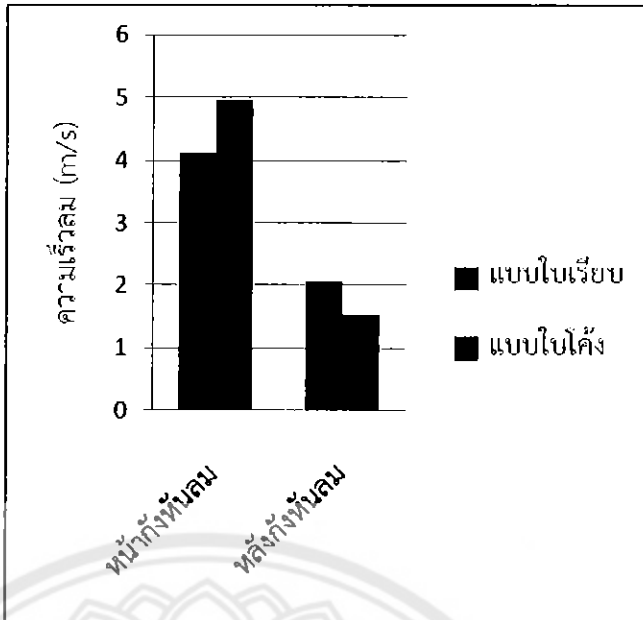
ความสูง ที่ แถว	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.7	4.4	4.2	4.1	3.9	4	4	2.9	2.6	1.7	2.6	2.3	2.2	2.3
2	4.3	3.4	3.7	3.6	3.8	4.1	3.7	3.2	2.6	2.1	1.6	1.7	2	2
3	4.8	4.1	3.8	4.3	4	4.4	4.3	3.1	2.6	0	0	0	1.8	2.2
4	4.8	4.2	4.1	3.7	4.3	3.6	4.8	2.9	2.7	0	0	1.6	2.1	2.6
5	4.7	4.4	4.2	4.5	4.4	3.7	4.8	3.1	2.8	0	1.6	1.9	2.1	2.7
6	3.7	4.2	4	3.8	3.7	3.5	4.6	3.4	3	1.8	1.6	1.7	2.1	2.3
7	3.8	4.4	4.2	4.3	4.1	3.9	4	2.6	2.5	2.2	2.4	2.5	2.6	2.6
ค่าเฉลี่ย	4.12							2.06						

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N)
1	453	6.3
2	456	6.2
3	458	6.2
ค่าเฉลี่ย	455.67	6.23

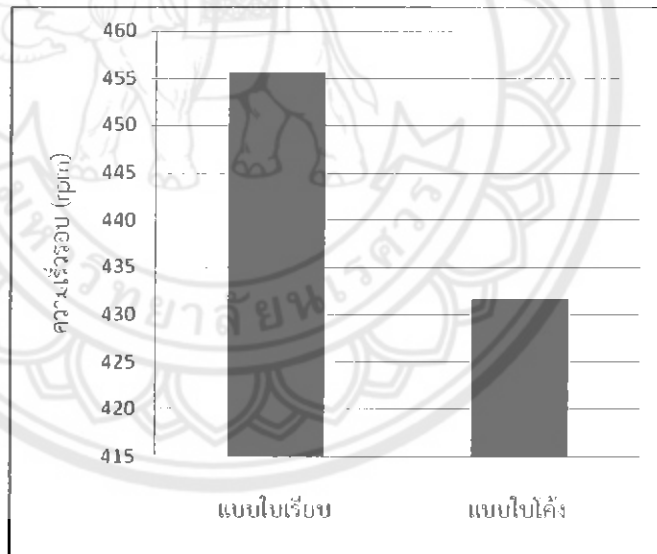
## สรุป ผลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง

ความสูง ที่ แถว	ความเร็วลมหน้ากังหันลม (m/s)							ความเร็วลมหลังกังหันลม (m/s)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	4.7	5.4	4.9	5.2	5.4	5.2	5.2	2	1.6	2.1	1.5	2.1	1.8	2
2	5.2	5.1	4	5.1	4.9	5.3	4.7	1.8	1.9	1.3	1.7	1.7	1.7	1.6
3	4.9	5.4	5.3	5.2	5	5.2	5.3	2	1.5	1.5	0.7	0	0	2.2
4	4.9	5.1	4.3	4.5	5.2	5.1	4.9	1.8	1.8	1.2	0	0	0.4	1.9
5	4.2	4.9	4.3	5.1	5.2	5.1	5.1	2	1.9	0	0.8	0.4	1.2	1.9
6	3.7	5	4.7	5.1	5.2	5.3	4.9	2.2	1.9	2	1.8	2	1.8	1.9
7	4.9	5.4	5	4.9	5	4.4	4.5	1.9	1.8	1.8	1.9	2	1.8	2
ค่าเฉลี่ย	4.95							1.53						

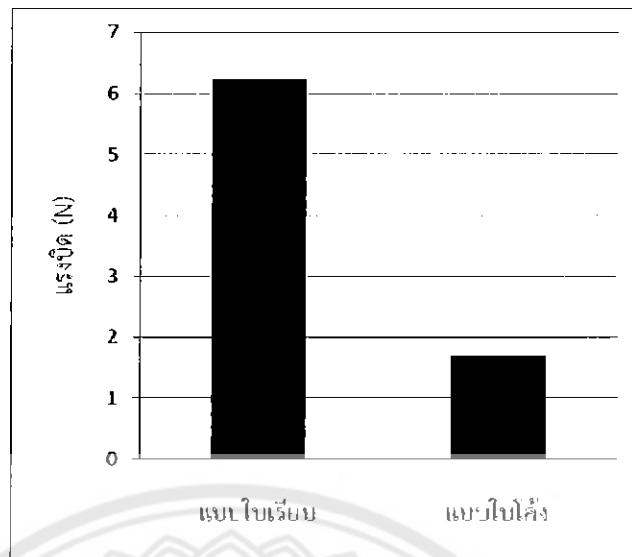
ครั้งที่	ความเร็วรอบ (rpm)	แรงบิด (N)
1	451	1.8
2	421	1.7
3	423	1.6
ค่าเฉลี่ย	431.67	1.7



รูปที่ ข12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วลมหน้ากังหันลมและความเร็วลมหลังกังหันลมของ กังหันลมแกนตั้งทั้ง 2 แบบ



รูปที่ ข13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วรอบของกังหันลมแกนตั้งทั้ง 2 แบบ



รูปที่ ข14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงบิดของกังหันลมแกนตั้งทั้ง 2 แบบ

#### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองหาความเร็วลม ความเร็วรอบ และแรงบิด สรุปผลในการทดลองกังหันลม 2 แบบ ทั้ง 3 ครั้งได้ความเร็วลมเฉลี่ยหน้ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ 4.12 เมตรต่อวินาที ความเร็วลมเฉลี่ยหลังกังหันลม 2.06 เมตรต่อวินาที กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ความเร็วลมเฉลี่ยหน้ากังหันลม 4.95 เมตรต่อวินาที ความเร็วลมเฉลี่ยหลังกังหันลม 1.53 เมตรต่อวินาที ได้ความเร็วรอบเฉลี่ยของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ 455.67 rpm ความเร็วรอบเฉลี่ยของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง 431.67 rpm และได้แรงบิดเฉลี่ยของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ 6.23 N แรงบิดเฉลี่ยของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง 1.7 N เมื่อเปรียบเทียบกัน ความเร็วลมหน้ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้งจะมากกว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ความเร็วลมหลังกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบจะมากกว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง ความเร็วรอบของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบจะมากกว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง และแรงบิดของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้งจะมากกว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ซึ่งผลที่มาก น้อยกว่ากันทั้ง 2 แบบนี้ อาจเพราะเกิดจากลักษณะใบพัดของกังหันลมทั้ง 2 แบบ ที่แตกต่างกัน การรับพลังงาน การดูดซับพลังงานที่ต่างกัน ทำให้ค่าที่วัดได้ออกมาต่างกัน แต่เมื่อดูในภาพรวมแล้ว กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้งจะให้ประสิทธิภาพมากกว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ เนื่องจากมีการหมุนเริ่มต้นที่ราบรื่นกว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบ มีทิศทางของลมเข้าที่แน่นอนกว่าเพราะใบมีลักษณะโค้ง ลมจะเข้าแล้วส่วนเป็นร่องความโค้งของใบแล้วหมุนไปในทิศทางเดียวได้อย่างราบรื่น ส่วนกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ ใบและมุมมีสัดส่วนที่เท่ากันหมด เมื่อมีลมเข้ามาปะทะทำให้การเริ่มหมุนลำบาก อาจมีการส่ายของใบสัักพักก่อนที่จะหมุนไปในทิศทางเดียวได้อย่างราบรื่น ดังนั้นหากเทียบกันโดยรวมแล้วทั้งการหมุน การดูดซับพลังงาน เมื่อนำไปคำนวณแล้วกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้งจะให้ประสิทธิภาพมากกว่ากังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ





### 1. การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของกังหันลม ( $\eta_T$ ) ของกังหันลมทั้ง 2 แบบ

จากค่าประสิทธิภาพของกังหัน ( $\eta_T$ ) เท่ากับอัตราส่วนของกำลังลมที่กังหันลมสามารถดึงออกมาได้ ( $P_w$ ) กับกำลังลมที่กังหันลมได้รับ ( $P_a$ )

$$\eta_T = \frac{P_w}{P_a}$$

จาก

$$\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

เมื่อ ความหนาแน่นของอากาศ  $\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$

ตารางความเร็วลมที่วัดได้จากหน้ากังหันลมและหลังกังหันลม

ชนิดกังหันลม	ความเร็วลมเฉลี่ย (m/s)	
	หน้ากังหันลม	หลังกังหันลม
ใบเรียบ	4.12	2.06
ใบโค้ง	4.95	1.53

#### 1.1 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบ

พื้นที่รับลมของกังหันลม

$$A = DH = 0.30 \times 0.30 = 0.09 \text{ m}^2$$

$$\text{เมื่อ } P_a = \frac{1}{2} (1.23)(0.09)(4.12)^3 = 3.87 \text{ W}$$

$$P_w = \frac{1}{2} (1.23)(0.09)(4.12^2 - 2.06^2)(4.12 + 2.06) = 2.177 \text{ W}$$

ดังนั้นจะได้

$$\eta_T = \frac{P_w}{P_a} = \frac{2.177}{3.87} = 0.5625 = 56.25 \%$$

#### 1.2 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้ง

พื้นที่รับลมของกังหันลม

$$A = DH = 0.30 \times 0.30 = 0.09 \text{ m}^2$$

$$\text{เมื่อ } P_a = \frac{1}{2} (1.23)(0.09)(4.95)^3 = 6.71 \text{ W}$$

$$P_w = \frac{1}{2} (1.23)(0.09)(4.95^2 - 1.53^2) = 3.974 \text{ W}$$

ดังนั้นจะได้

$$\eta_T = \frac{P_w}{P_a} = \frac{3.974}{6.71} = 0.59201 = 59.20 \%$$

## 2. การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลมทั้ง 2 แบบ

จากค่าประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม ( $\eta_M$ ) เท่ากับอัตราส่วนของกำลังที่กังหันลมผลิตได้ ( $P_{out}$ ) กับกำลังที่กังหันลมได้รับ ( $P_a$ )

$$\eta_M = \frac{P_{out}}{P_a}$$

จาก  $P_a = \frac{1}{2} \rho A V_1^3$

$$P_{out} = T \cdot \omega$$

เมื่อ  $T = F \cdot r$  ; แกนเพลลาของกังหันลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

และ ความหนาแน่นของอากาศ  $\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$

ตารางความเร็วลมเฉลี่ยหน้ากังหันลม ความเร็วรอบและแรงที่กังหันทำได้

ชนิดกังหันลม	ความเร็วลมเฉลี่ยหน้ากังหันลม (m/s)	ความเร็วรอบเฉลี่ย (rpm)	แรง (N)
ใบเรียบ	4.12	431.67	1.70
ใบโค้ง	4.95	455.67	6.23

### 2.1 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบเรียบ

พื้นที่รับลมของกังหันลม

$$A = DH = 0.30 \times 0.30 = 0.09 \text{ m}^2$$

เมื่อ  $P_a = \frac{1}{2} (1.23)(0.09)(4.12)^3 = 3.87 \text{ W}$

และ  $T = 1.70(0.005) = 0.0085 \text{ N} \cdot \text{m}$

$$\omega = \frac{2\pi(431.67)}{60} = 45.20 \text{ rad/s}$$

จะได้ว่า  $P_{out} = (0.0085)(45.20) = 0.38 \text{ W}$

ดังนั้นจะได้

$$\eta_M = \frac{0.38}{3.87} = 0.0982 = 9.82 \%$$

## 2.2 กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบแบบใบโค้ง

พื้นที่รับลมของกังหันลม

$$A = DH = 0.30 \times 0.30 = 0.09 \text{ m}^2$$

เมื่อ  $P_a = \frac{1}{2} (1.23)(0.09)(4.95)^3 = 6.71 \text{ W}$

และ  $T = 6.23(0.005) = 0.0312 \text{ N.m}$

$$\omega = \frac{2\pi(455.67)}{60} = 47.72 \text{ rad/s}$$

จะได้ว่า  $P_{out} = (0.0312)(47.72) = 1.49 \text{ W}$

ดังนั้นจะได้

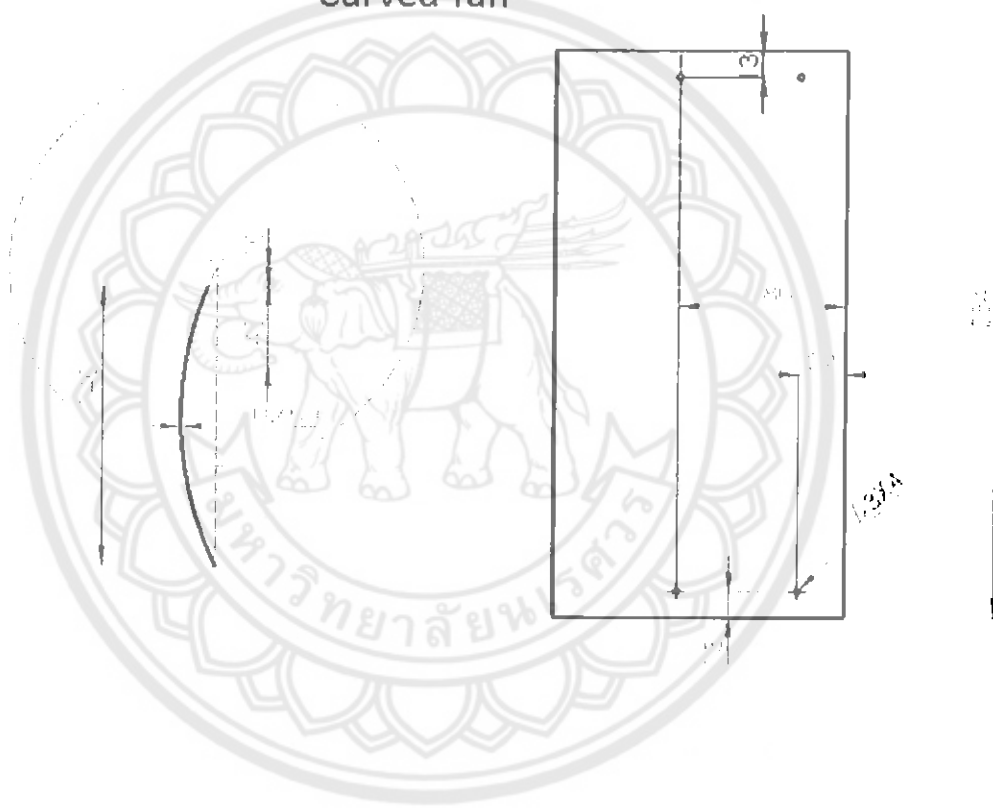
$$\eta_M = \frac{1.49}{6.71} = 0.2223 = 22.23 \%$$

### สรุปผลการเปรียบเทียบ

จากการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ และประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง และกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบ พบว่าการทดสอบภายใต้ช่วงความเร็วลม 3-5 เมตรต่อวินาที กังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้ง มีประสิทธิภาพของกังหันลม 59.2 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม 22.23 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกังหันลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบเรียบมีประสิทธิภาพของกังหันลม 56.25% และมีประสิทธิภาพเชิงกลของกังหันลม 9.82 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการทดลองในอุโมงค์ลมขนาดเล็กทำให้ค่าประสิทธิภาพของกังหันคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง จึงทำการเปรียบเทียบเฉพาะค่าประสิทธิภาพเชิงกลเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกังหันลมทั้ง 2 แบบแล้ว ลมแกนตั้งชนิด 3 ใบ แบบใบโค้งมีประสิทธิภาพเชิงกลมากกว่า 12.41 เปอร์เซ็นต์

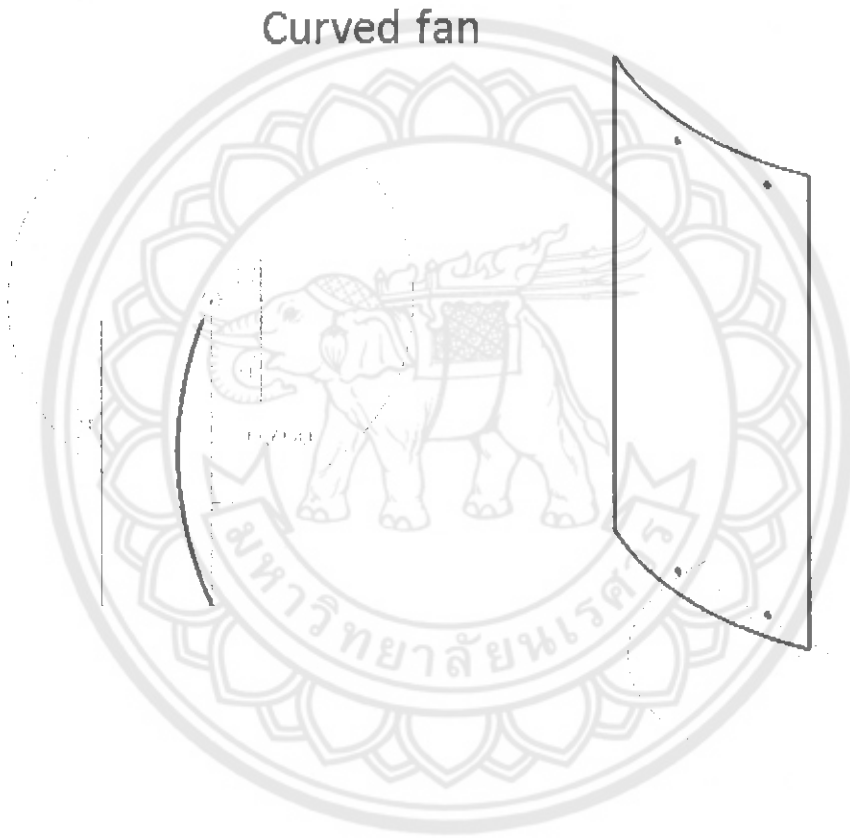


Curved fan



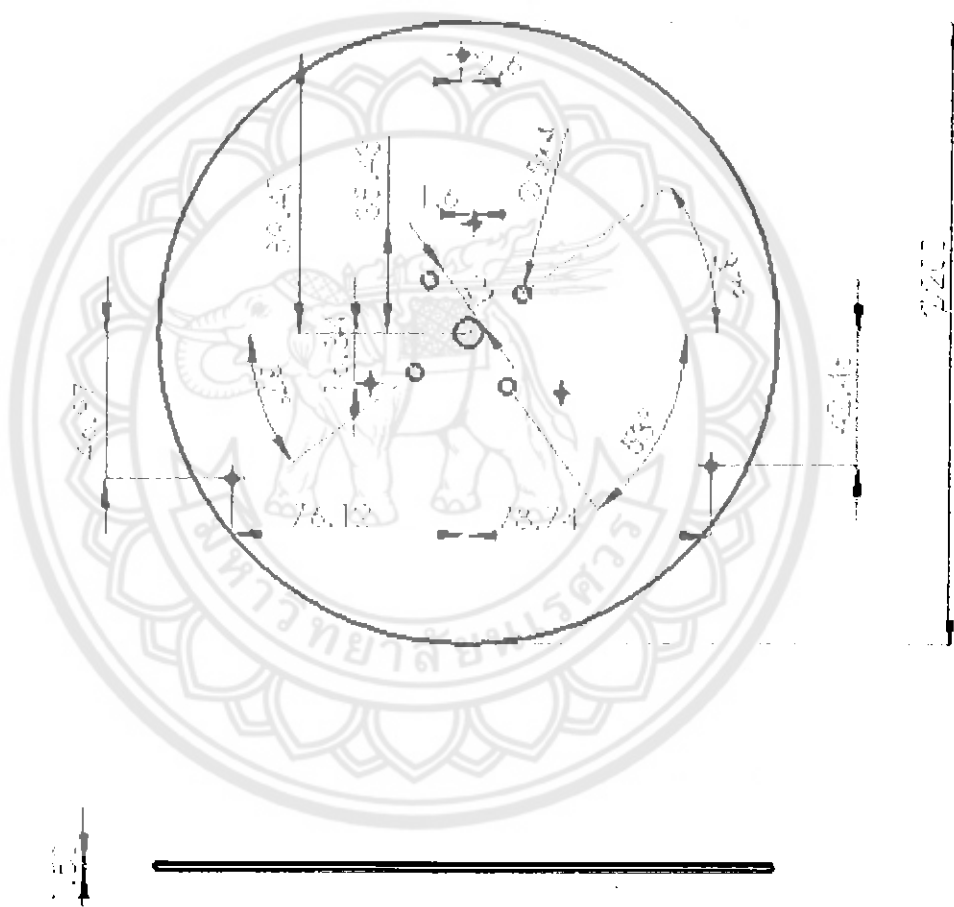
FACUTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Curved fan	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Projet

### Curved fan



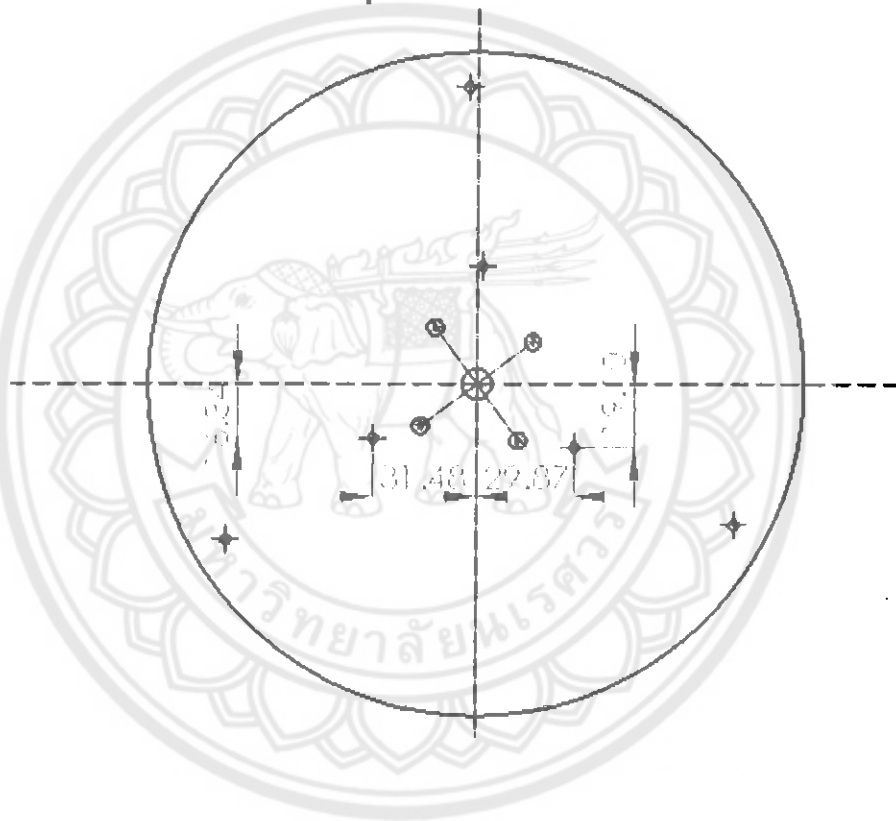
FACUTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Curved fan	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Proje

# Circle plate Curved fan



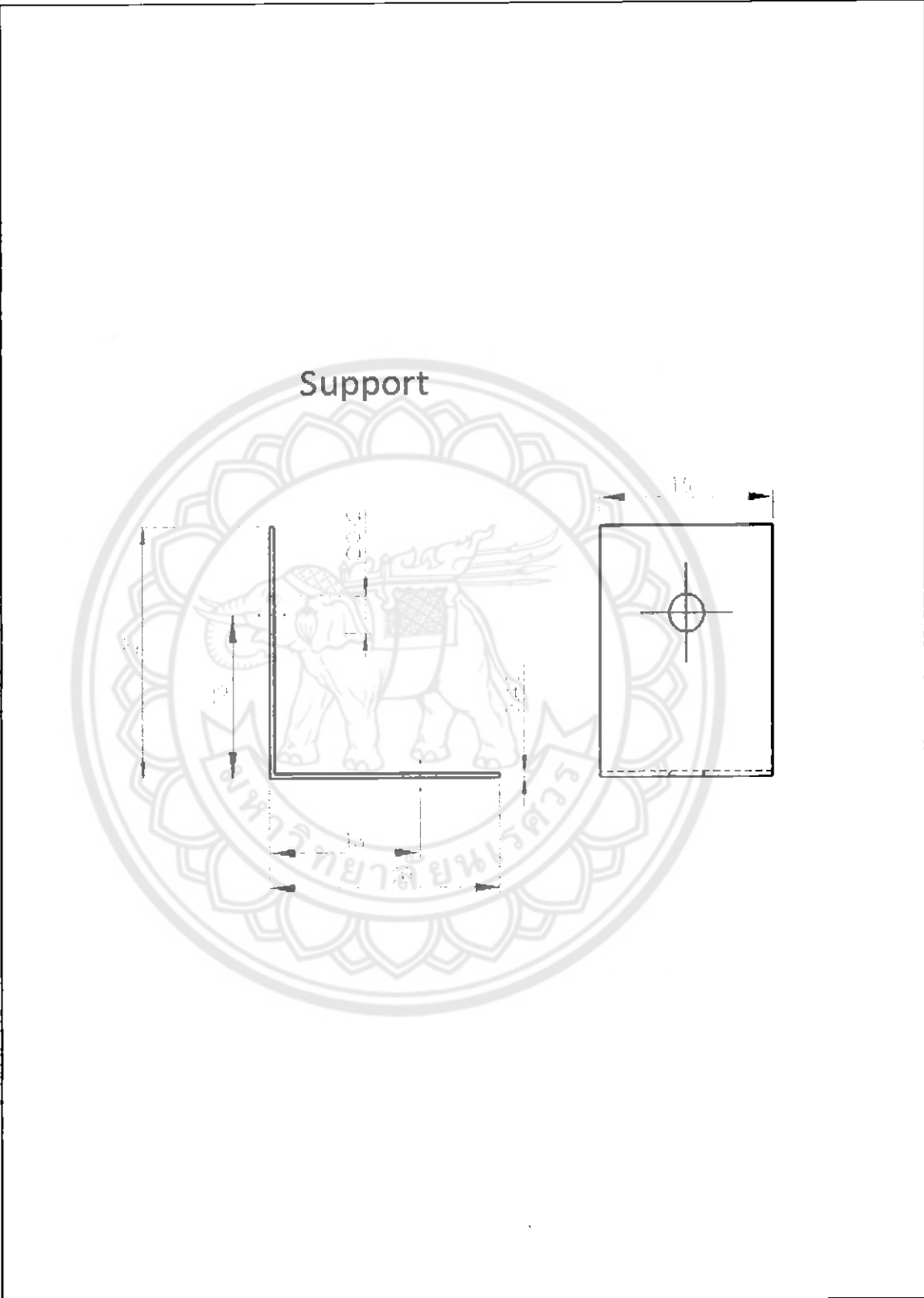
FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Circle plate Curved fan	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Projct

### Circle plate Curved fan

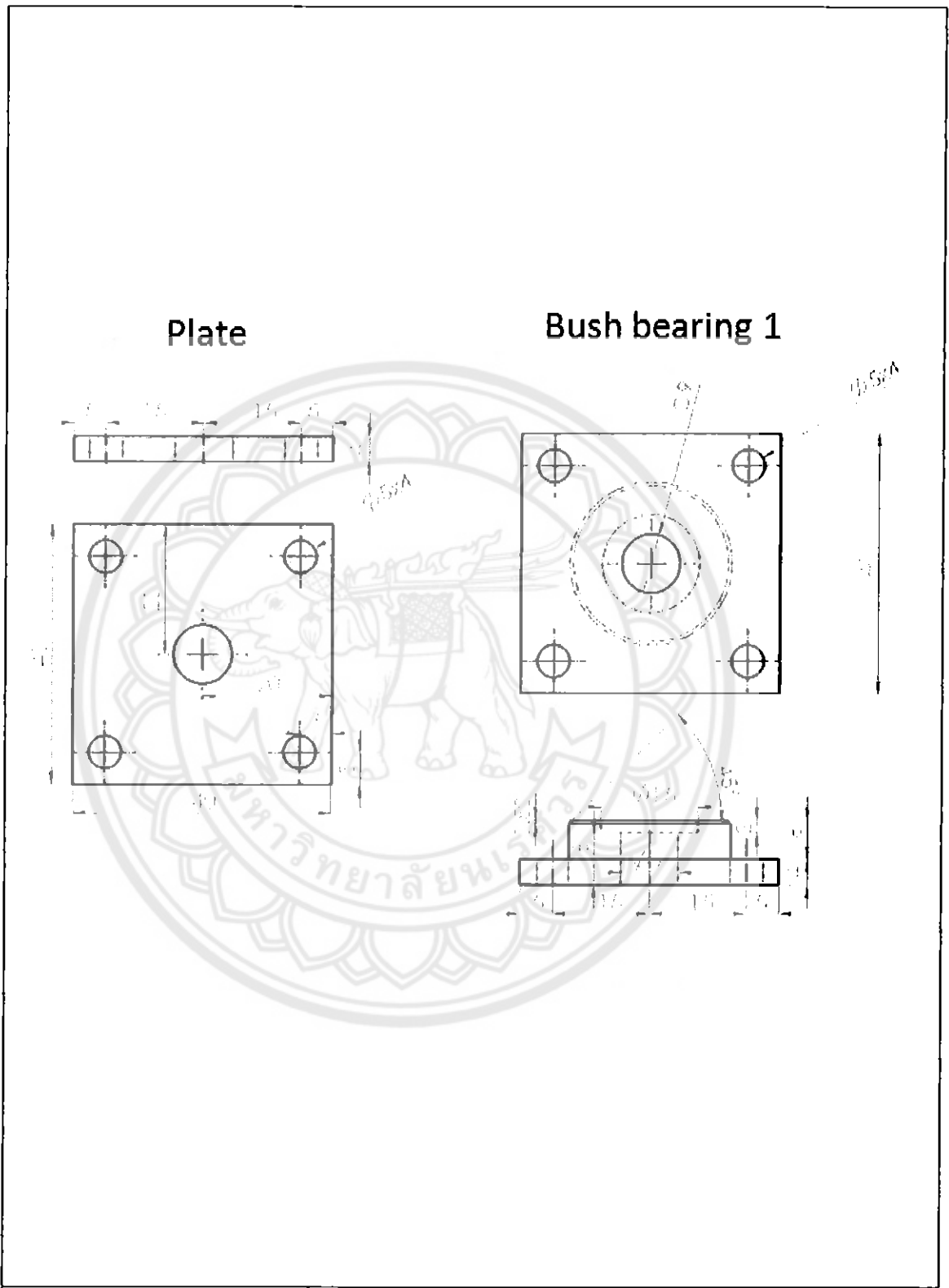


FACUTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Circle plate Curved fan	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Projct

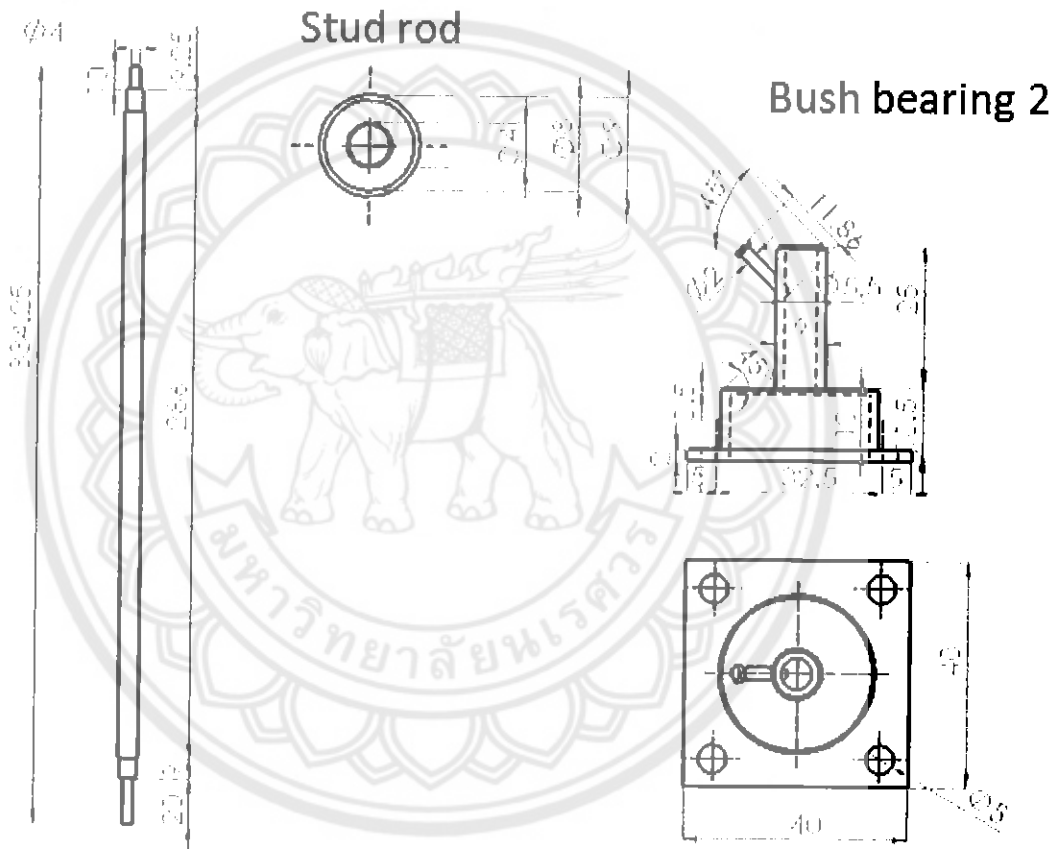




FACUTY ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Support	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Projct

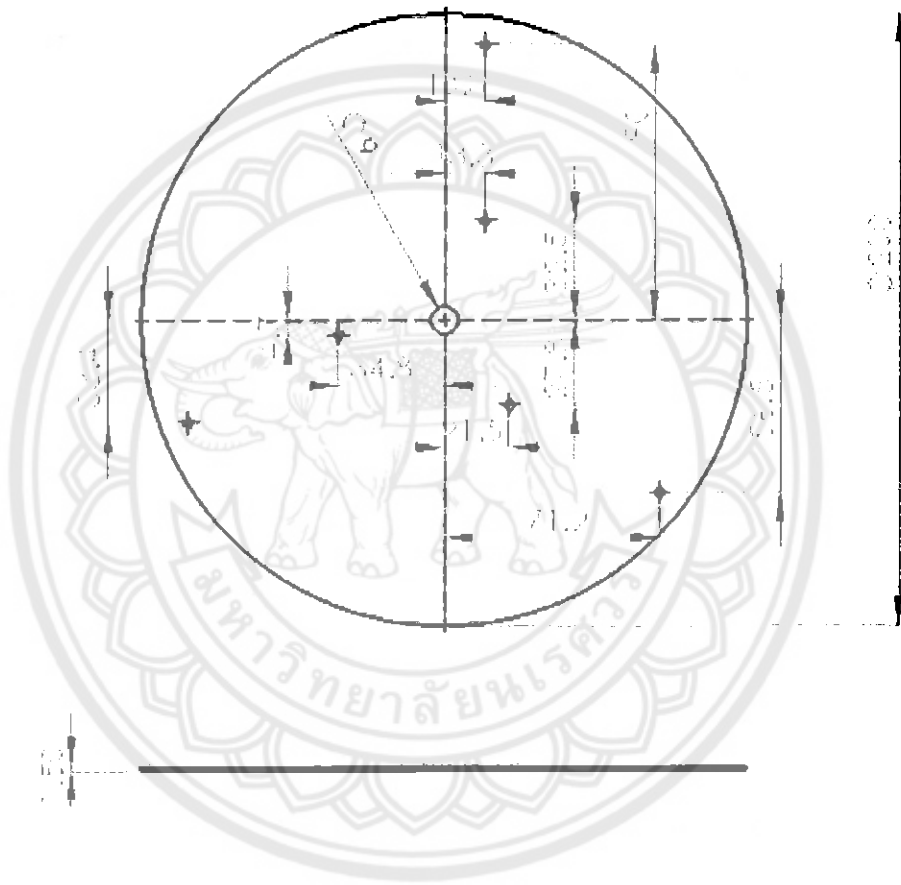


FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Plate and Bush bearing 1	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Project



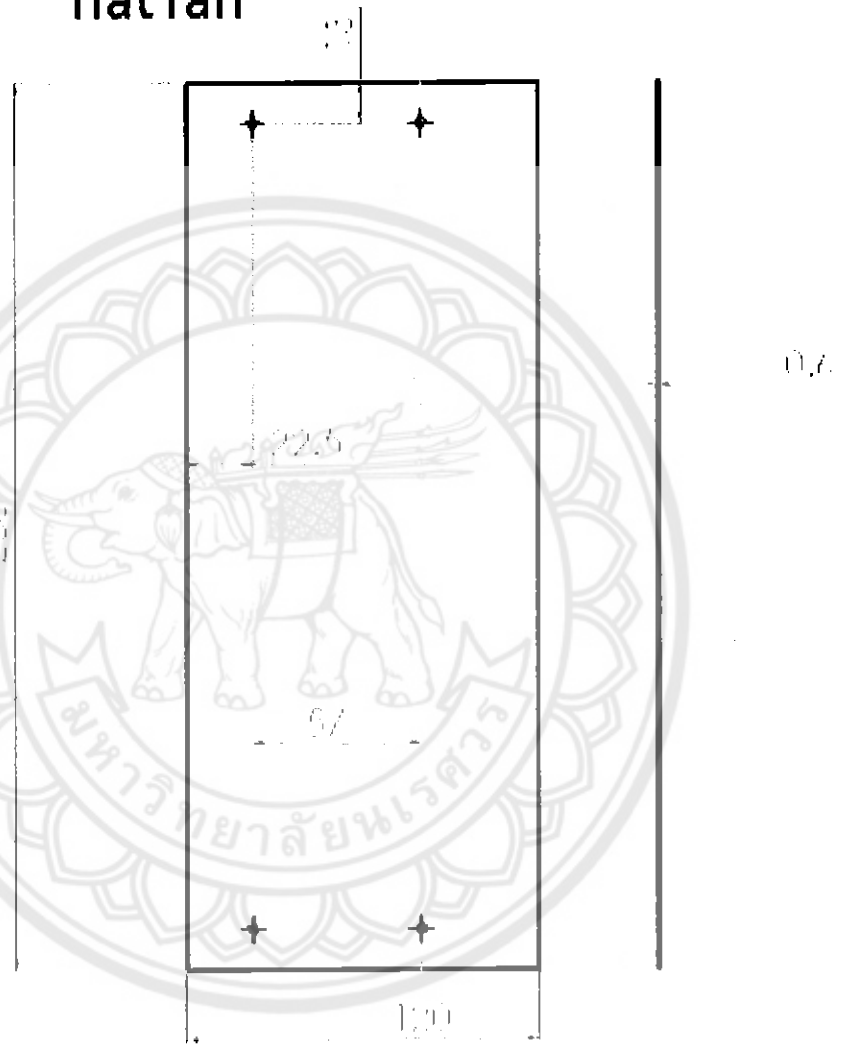
FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Stud rod and Bush bearing 2	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Projet

### Plate flat fan



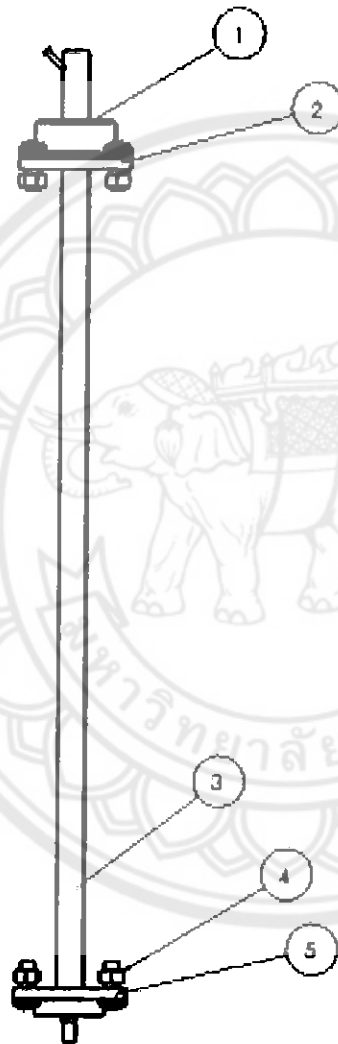
FACUTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Plae flat fan	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Projet

# flat fan



FACUTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Flat fan	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Proje

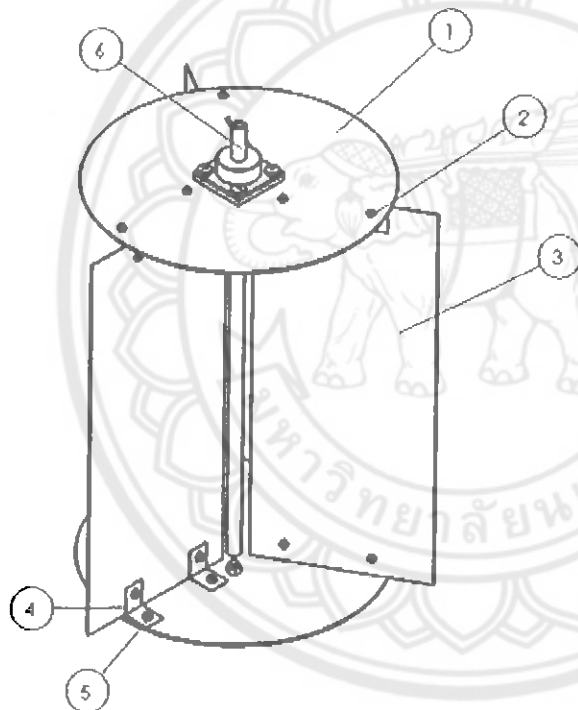
## Stud rod set



1	Bush bearing 2
2	Plate
3	Stud
4	Bolt & Nutt M5
5	Bush bearing 1

FACUTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY	Stud rod set	PROJECT	SCALE: 1:2
		DATE : 28/03/2556	DNBY : Mechanical Projct

## Assembly flat fan



1	Plate flat fan.
2	Bolt & Nutt M3
3	flat fan
4	Support
5	Bolt & Nutt M3
6	Stud rod set

FACUTYOFENGINEERING  
NARESUANUNIVERSITY

Assembly flat fan

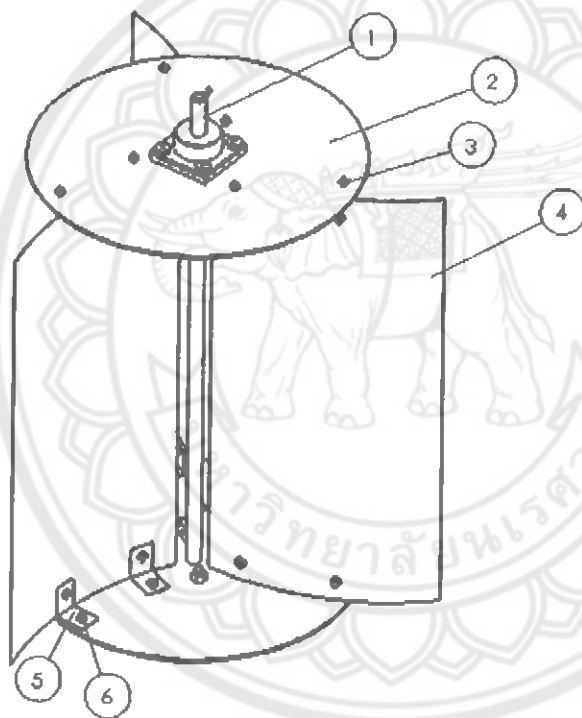
PROJECT

SCALE: 1:2

DATE : 28/03/2556

DNBY : Mechanical Projet

### Assembly curved fan



1	Stud rod set
2	plate Curved fan
3	Bolt & Nutt M3
4	Curved fan
5	Support
6	Bolt & Nutt M3

FACUTY OF ENGINEERING  
NARESUAN UNIVERSITY

Assembly curved fan

PROJECT

SCALE: 1:2

DATE : 28/03/2556

DNBY : Mechanical Projct