

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงทดลองหัวฉีดแรงดันสูง

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HIGH PRESSURE NOZZLE



โดย

นาย ยุทธพงศ์ แสงรัตน์
นาย ตักดา ธารวภู
นาย อนุศักดิ์ สารสอน

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 55004

วันเดือนปี - 4 ๒๒ 2548

ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
๕
๕
๕

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองหัวฉีดแรงดันสูง
Experimental Investigation of High Pressure Nozzle



ผู้จัดทำ

นายยุทธพงศ์	แสงรัตน์ รหัสนักศึกษา	43010740
นายศักดิ์	ถาวรกุล รหัสนักศึกษา	43010777
นายอนุศักดิ์	สารสอน รหัสนักศึกษา	43010830

อาจารย์ที่ปรึกษา

๙๗

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองหัวฉีดแรงดันสูง

อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	
นักศึกษา	นายยุทธพงศ์	แสงรัตน์	43010740
	นายศักดิ์ดา	ถาวรกุล	43010777
	นายอนุศักดิ์	สารสอน	43010830

บทคัดย่อ

ในการศึกษาเชิงทดลองหัวฉีดแรงดันสูง เพื่อทำการศึกษาดำน้ำที่ใช้ในการตัดที่ความดันสูง โดยพิจารณาพฤติกรรมการไหลของน้ำ ที่ผ่านหัวฉีดที่ความดัน 60, 80, 100 และ 120 บาร์ ตามลำดับ จากผลการทดลองทำการวัดแรงปะทะ อัตราการไหล และขนาดของลำเจ็ต โดยเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ที่ 0.3, 0.5 และ 0.8 มม. ตามลำดับ ในการทดลองนี้จะพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด สำหรับการตัดที่ 0.3 มม. และอัตราการเข้าของน้ำ ที่ 3.75 จะเป็นค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากผลของการตัดโฟมที่มีความหนา 15, 35 และ 50 มม. ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experimental Investigation of High Pressure Nozzle

Advisor Assoc.Prof.Dr.Mongkol

Mongkolwongrojn

Yuttapong	Sangrat	43010740
Sakda	Thaworn-kool	43010777
Anusak	Sansorn	43010830

Abstract

This project deals with experimental of high pressure cutting jet. The fluid flow characteristics in nozzle were investigated at pressure 60 , 80 , 100 and 120 bar , respectively. The experimental results of obtained are impact force, flow rate and jet diameter at varying nozzle diameter 0.3 , 0.5 and 0.8 mm. , respectively. The optimum nozzle diameter for cutting jet in this experimental in 0.3 mm. and it shows very good cutting results for foam thickness up to 50 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการศึกษาเชิงทดลองหัวน็ดแรง
ตันสูง ตลอดจนได้ทำการตรวจสอบผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์โดย รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็น
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณอย่างสูง
ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอน และได้อุปการะ ให้กระผมได้มีโอกาสในการศึกษา
อย่างเต็มที่และดูแลเอาใจใส่เสมอมา จนข้าพเจ้ามีวันนี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือ
เครื่องมือที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ตลอดจนให้คำปรึกษาจนสำเร็จสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีบทการวิเคราะห์และการคำนวณ	3
2.1 การไหลของของเหลวภายในท่อ	3
2.1.1 การคำนวณหาการสูญเสียหลักเนื่องจากแรงเสียดทาน	3
2.1.2 การคำนวณหาการสูญเสียรอง	6
2.2 คาน	10
2.3 Strain Gauge	12
2.3.1 บทนำ	12
2.3.2 โครงสร้างโดยทั่วไปของ Strain gauge	12
2.3.3 หลักการทำงานของ Strain gauge	13
2.3.4 รูปแบบการติดตั้ง Strain gauge เข้ากับวัสดุ	15
2.3.5 Specification for the ideal strain gauge	16
2.3.6 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในเรื่อง Strain gauge	17
บทที่ 3 การสร้างชุดทดลอง	18
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	30
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุปผลการวิจัย	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงความขรุขระของท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	3
2.2 แสดง Moody diagram	5
2.3 แสดงการคำนวณหาค่า K จากการโค้งงอของท่อ	6
2.4 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหล	9
2.5 แสดงการโค้งงอของคานาที่เกิดจากแรงปะทะของลำ jet	10
2.6 แสดง Strain gauge ชนิด Flat grid type wire gauge (ภาพซ้าย) และ Strain gauge ชนิด Etched foil gauge (ภาพขวา)	13
2.7 แสดงการต่อ Strain gauge เข้ากับวงจรบริดจ์	13
2.8 แสดงการวัดค่าความเครียดของวัสดุโดยใช้ Strain gauge ต่อเข้ากับ Strain amplifier	14
2.9 แสดงการวัดแรงที่กระทำกับคานาโดยใช้ Strain gauge	15
3.1 แสดงหัวฉีด (ก) แนวนอน (ข) แนวตั้ง	20
3.2 แสดงหัวฉีด DI = 16 mm. DO = 0.3 mm.	21
3.3 แสดงหัวฉีด DI = 16 mm. DO = 0.5 mm.	22
3.4 แสดงหัวฉีด DI = 16 mm. DO = 0.8 mm.	23
3.5 แสดงปั๊มความดันสูง	24
3.6 แสดง Relief Valve	24
3.7 แสดงอุปกรณ์ใส่ทราย	25
3.8 แสดง Pressure gauge	25
3.9 แสดง Multi meter	26
3.10 แสดง Power Supply	26
3.11 แสดง Strain Gauge	27
3.12 แสดงการติด Strain Gauge บนคานา	27
3.13 แสดงการต่อ Strain Gauge แบบวงจรบริดจ์	28
3.14 แสดง Layout ของชุดอุปกรณ์ทดลอง	28
3.15 แสดง Restrictor Valve	29
3.16 แสดงชุดอุปกรณ์ทดลองจริง	29
4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 3.75	31
4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 3.75	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 3.75	32
4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 3.75	32
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 3.75	33
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 3.75	33
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 2.5	34
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 2.5	34
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 2.5	35
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 2.5	35
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 2.5	36
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 2.5	36
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 1.25	37
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 1.25	37
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 1.25	38
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 1.25	38
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 1.25	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 1.25	39
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 10 mm.	40
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 60 mm.	40
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 110 mm.	41
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 160 mm.	41
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 210 mm.	42
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ AR = 3.75	43
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ DO = 0.3 mm.	43
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ AR = 2.5	44
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ DO = 0.5 mm.	44
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ AR = 1.25	45
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ DO = 0.8 mm.	45
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำ jet กับความดัน	46
4.31 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงปะทะของน้ำระหว่างใส่ทรายกับไม่ใส่ทราย ที่ระยะ 60 mm. DO = 0.8 mm.	47
4.32 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงปะทะของน้ำระหว่างใส่ทรายกับไม่ใส่ทราย ที่ระยะ 210 mm. DO = 0.8 mm.	47
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับ Voltage ที่ใช้ในการ Calibrate	48
4.34 แสดงภาพถ่ายฝัวยรอยตัดของโฟมที่ DO = 0.8 mm.	49
4.35 แสดงภาพถ่ายฝัวยรอยตัดของโฟมที่มีความหนา 15 mm. และ AR = 3.75	50
4.36 แสดงภาพถ่ายฝัวยรอยตัดของโฟมที่มีความหนา 35 mm. และ AR = 3.75	51
4.35 แสดงภาพถ่ายฝัวยรอยตัดของโฟมที่มีความหนา 50 mm. และ AR = 3.75	52

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้งานอุตสาหกรรมหลายชนิดมักจะมีการตัดและเจาะ โดยได้มีการนำแรงดันน้ำมาใช้ประโยชน์ เพราะการใช้แรงดันน้ำสามารถทำให้เกิดแรงปะทะที่ดี ดังนั้นการทราบถึงพฤติกรรมในการไหลของน้ำแรงดันสูงผ่านหัวฉีด โดยมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญและสามารถที่จะประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลาย จากการศึกษาข้อมูลพบว่าการใช้แรงดันของน้ำในการตัดมีข้อดีมากมายดังต่อไปนี้

- สามารถปฏิบัติงานได้ที่ความดันสูง
- ในขณะที่ใช้งานจะมีความเงียบและไม่มีฝุ่นที่จะก่อให้เกิดมลภาวะ
- การตัดสามารถตัดได้ทุกรูปทรง
- เครื่องมือที่ใช้จะมีขนาดของ เส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก
- ในขณะที่ทำการตัดจะไม่เกิดความร้อนและ Tension
- อายุการใช้งานของเครื่องมือจะยาวนาน
- มีประสิทธิภาพของการทำงานสูง
- ขนถ่ายได้สะดวกและง่ายต่อการใช้
- สามารถใช้ตัดได้ทุกที่แม้กระทั่งใต้น้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของหัวฉีดแรงดันสูงเชิงทดลอง
- 1.2.2 ศึกษาวิธีการวัดแรงปะทะของน้ำจากหัวฉีดแรงดันสูง โดยใช้ Strain Gauge
- 1.2.3 พัฒนาหัวฉีดแรงดันสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สร้างหัวฉีดแรงดันสูงโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. , 0.5 mm. , 0.8 mm.
- 1.3.2 ติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบหาแรงปะทะของน้ำจากหัวฉีด โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ Pressure Control Valve จาก 60 bars , 80 bars , 100 bar และ 120 bar
- 1.3.3 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับคานรองรับที่ระยะ 10 mm., 60 mm., 110 mm., 160 mm., และ 210 mm.

- 1.3.4 ผสมทรายในน้ำแล้วทำการวัดค่าแรงปะทะจากนั้นนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับน้ำที่

ไม่ได้ผสมทราย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1.4.1 การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเรื่องต่างๆดังนี้

- หาข้อมูลหัวฉัดจากงานวิจัยทั้งภายในประเทศและต่างประเทศในรูปแบบต่างๆ ทั้งหนังสือและอินเทอร์เน็ต และทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหัวฉัด

- ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ Strain Gauge รวมทั้งการติดตั้งและการวัดผลของ Strain Gauge และการใช้งานวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้า

1.4.2 เตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- การติดตั้งหัวฉัดเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดลอง

- การติดตั้ง Strain Gauge เข้ากับคานและติดคานเข้ากับชุดทดลอง

- เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพและทำการถ่ายภาพ

1.4.3 ทำการทดลอง และเก็บข้อมูลจากการทดลองแล้วทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.4 การสรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีบทการวิเคราะห์และการคำนวณ

2.1 การไหลของของเหลวภายในท่อ

2.1.1 การคำนวณหาการสูญเสียหลักเนื่องจากแรงเสียดทาน

(Determination of head loss due to friction)

การคำนวณหาการสูญเสียหลักในการไหล สามารถคำนวณได้จากสมการของ Darcy คือ

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

เมื่อ

h_f = การสูญเสียหลักเนื่องจากแรงเสียดทาน

f = แฟกเตอร์ของความเสียดทาน

L = ความยาวท่อ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

v = ความเร็วของการไหล

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ถ้า

$R > 4000$ เป็นการไหลแบบปั่นป่วน

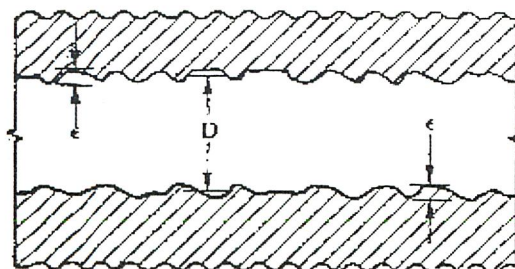
$2000 < R < 4000$ เป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition)

$R < 2000$ เป็นการไหลแบบราบเรียบ

ในกรณีของการไหลแบบราบเรียบ แฟกเตอร์ของความเสียดทานจะหาจาก Reynolds Number โดยตรง คือใช้สมการ

$$f = \frac{64}{R}$$

แต่ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน แฟกเตอร์ของความเสียดทานจะหาจาก Reynolds Number และค่าความขรุขระของท่อ (ϵ) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ดังรูป 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับที่ 2.1 แสดงค่าความขรุขระของท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความขรุขระของท่อจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาประกอบเป็นท่อ ค่าความขรุขระของวัสดุบางชนิดได้แสดงไว้ในตาราง 2.1

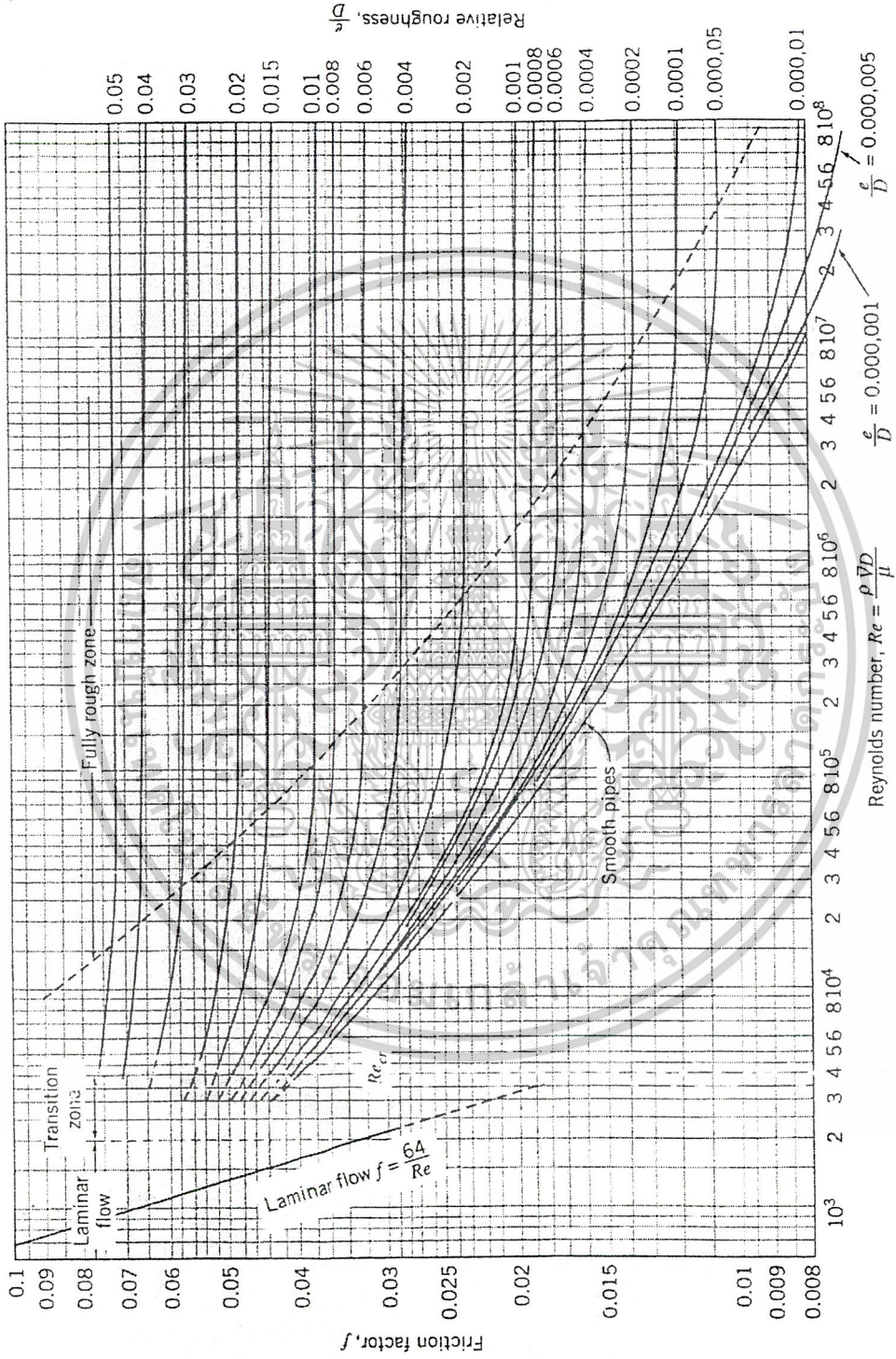
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความขรุขระของท่อที่ทำด้วยวัสดุชนิดต่างๆ

Material	Roughness	
	ft	m
Riveted steel	0.003-0.03	0.0009-0.009
Concrete	0.001-0.01	0.0003-0.003
Wood stave	0.0006-0.003	0.0002-0.0009
Cast iron	0.00085	0.00026
Galvanized iron	0.0005	0.00015
Asphalted cast iron	0.0004	0.0001
Commercial steel or wrought iron	0.00015	0.000046
Drawn brass or copper tubing	0.000005	0.0000015
Glass and plastic	'smooth'	'smooth'

เมื่อทราบ Reynolds Number และค่าความขรุขระแล้ว แฟกเตอร์ของความเสียดทานสามารถหาได้โดยใช้กราฟที่ 2.2 เรียกว่า Moody diagram โดยกราฟดังกล่าวถูกวาดขึ้นในปี ค.ศ.1944

ขั้นตอนการใช้ Moody diagram คือ เริ่มต้นจาก Reynolds Number ในแนวนอนแล้วลากเส้นตรงในแนวตั้งไปพบกับเส้นโค้งในรูปซึ่งแทนค่า ϵ/D หลังจากนั้นก็ลากเส้นในแนวนอน และอ่านค่าแฟกเตอร์ของความเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดง Moody Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

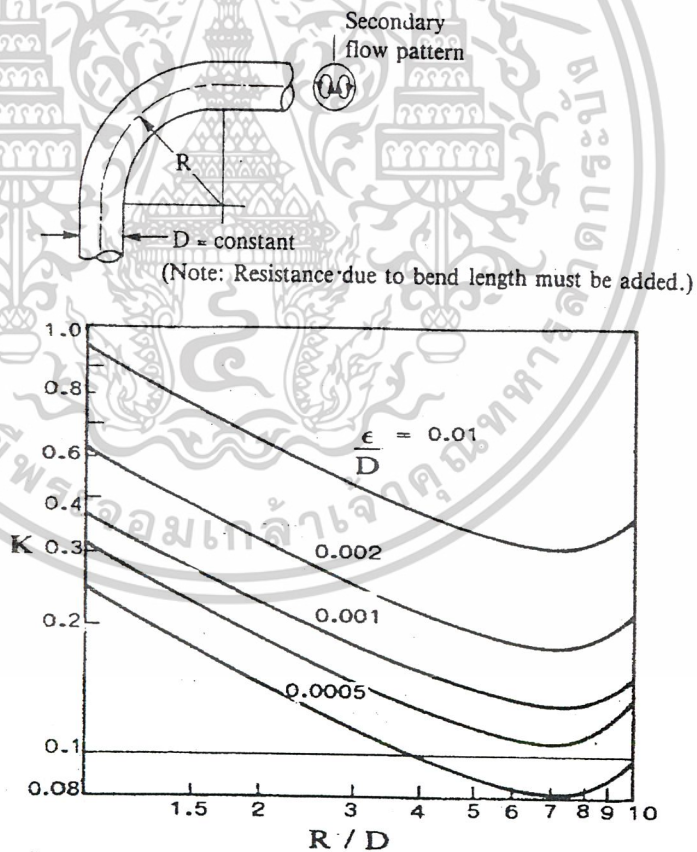
2.1.2 การคำนวณหาการสูญเสียรอง (Determination of minor head losses)

ในบางกรณีการสูญเสียรองจะมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะในกรณีที่การสูญเสียหลักมีค่าไม่มากนัก การสูญเสียรองนี้จะเกิดจากการโค้งงอของท่อ การเพิ่มหรือลดขนาดของท่อ รอยต่อของท่อ ที่ต่อจากถังน้ำ เป็นต้น สูตรในการคำนวณจะใช้สูตรต่างๆ ไป ดังนี้

$$h_m = K \frac{v^2}{2g}$$

- เมื่อ h_m = การสูญเสียรอง
 K = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียรอง
 v = ความเร็วของของไหลในท่อ
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ค่า K จะแปรเปลี่ยนตามลักษณะของท่อ เช่น การสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอของท่อ ค่า K จะหาได้จากกราฟรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการคำนวณหาค่า K จากการโค้งงอของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อต่อของท่อและวาล์ว ค่า K จะหาได้จากตารางที่ 2.2 และ 2.3 สำหรับวาล์วที่เปิดจนสุด และ วาล์วที่เปิดบางส่วนตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า K ของข้อต่อและวาล์ว

Normal diameter, in	Screwed				Flanged				
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20
Valve (fully open):									
Globe	14.00	8.20	6.90	5.70	13.00	8.50	6.00	5.80	5.50
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03
Swing check	5.10	2.90	2.10	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Angle	9.00	4.70	2.00	1.00	4.50	2.40	2.00	2.00	2.00
Elbows:									
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29					
45° long radius					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90° regular	2.00	1.50	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90° long radius	1.00	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180° regular	2.00	1.50	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180° long radius					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10
Tees:									
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07
Branch flow	2.40	1.80	1.40	1.10	1.00	0.80	0.64	0.58	0.41

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า K สำหรับวาล์วเปิดบางส่วนและเปิดจนสุด

Condition	Ratio K/Kopen	
	Gate valve	Globe valve
Open	1.0	1.0
Closed		
25%	3.0-5.0	1.5-2.0
50%	12-22	2.0-3.0
75%	70-120	6.0-8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแบร์นูลลี

สมการแบร์นูลลี (Bernoulli equation) คือพลังงานกลสำหรับการไหลไปตามเส้นกระแสซึ่งบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างเสดความดัน ($p/\rho g$) เสดความเร็ว ($V^2/2g$) เสดระดับความสูง (Z) ภายในสนามการไหล ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ไม่คำนึงถึงผลของความหนืด จึงไม่คิดผลของความเสียดทาน
2. เป็นการไหลในสภาวะคงตัว
3. เป็นการไหลแบบยุบตัวไม่ได้
4. พิจารณาปริมาตรควบคุมตามเส้นกระแส
5. ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหล

จะพิจารณาปริมาตรควบคุมย่อยขนานกับเส้นกระแส ความเร็วทุกๆตำแหน่งบนเส้นกระแสจะมีทิศทางอยู่ในแนวเส้นสัมผัส และจะไม่มีกรไหลขวางข้ามเส้นกระแสในสนามการไหล ซึ่งจะมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\int \frac{1}{\rho} dp + \frac{1}{2} V^2 + gz = C \quad (\text{บนเส้นกระแส})$$

โดยที่ C คือค่าคงตัวของการอินทิเกรตซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการอาศัยภาวะเงื่อนไขของจุดบนเส้นกระแสนั้น สำหรับของไหลยุบตัวไม่ได้ ($\rho =$ ค่าคงตัว) จะพบว่า

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{ค่าคงตัว}$$

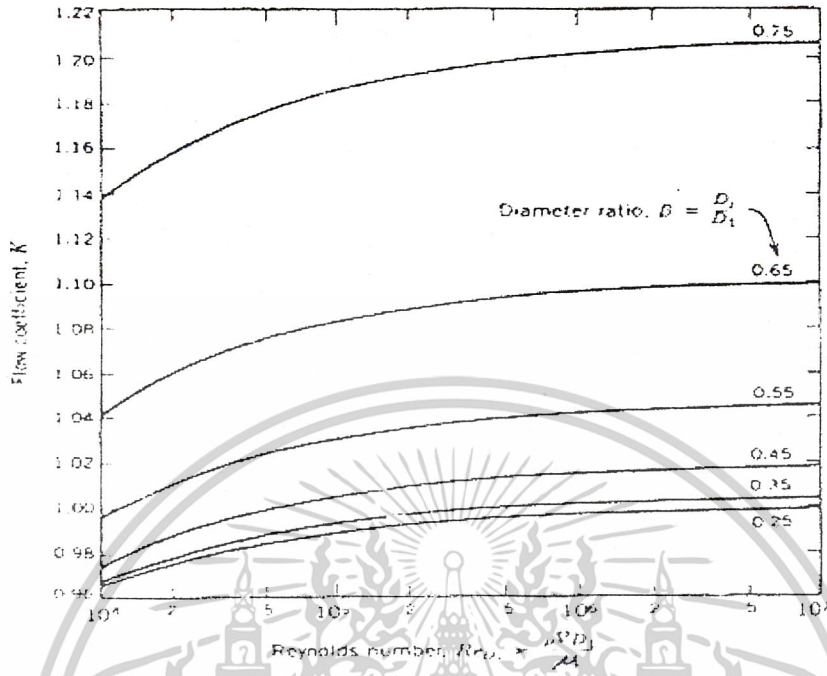
หรือ

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

สมการโมเมนตัม

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho V \cdot d\vec{A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหล

สมการอัตราการไหล

$$m = \frac{C_D A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$

สัมประสิทธิ์การไหล

$$K = \frac{C_D}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad \beta = \frac{D_2}{D_1}$$

เมื่อ

T = เวลา

ρ = Density ของน้ำ

v = Velocity

A_2 = พื้นที่ทางออก

A_1 = พื้นที่ทางเข้า

P_1 = Pressure Inlet

P_2 = Pressure Outlet

C_D = Discharge Coefficient

D_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า

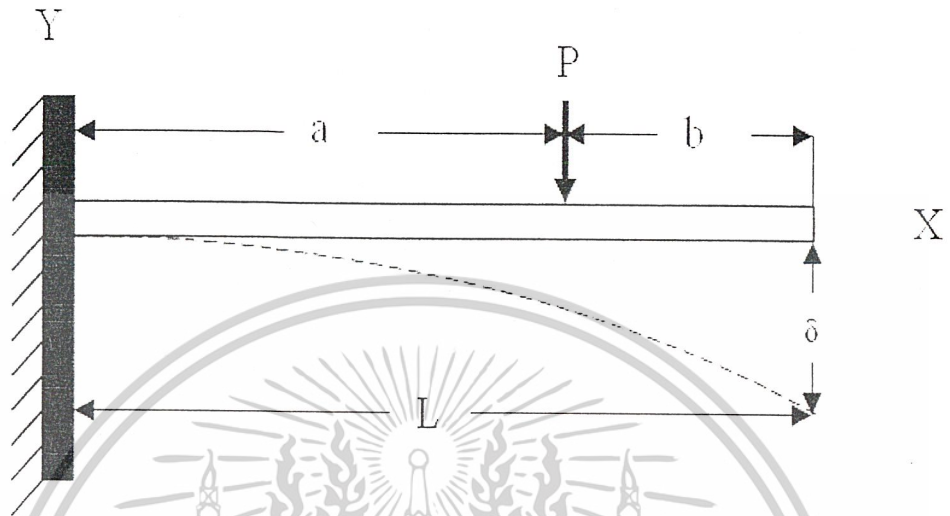
β = อัตราส่วน $\frac{D_2}{D_1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คาน (BEAM)

การคำนวณและออกแบบคาน



รูปที่ 2.5 แสดงการโก่งของคานที่เกิดจากแรงปะทะของลำ Jet

โมเมนต์สูงสุด

$$M = -Pa$$

สมการของระยะโก่งของคานจากรูปที่ 2.5

$$EI y = \frac{Px^2}{6} (3a - x) \text{ for } 0 < x < a$$

$$= \frac{Px^2}{6} (3x - a) \text{ for } a < x < L$$

โดยที่ค่า y จะมีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศพุ่งลง และมีค่าเป็นลบเมื่อมีทิศพุ่งขึ้น

ระยะโก่งสูงสุด

$$\delta = \frac{Pa^2}{6EI} (3L - a)$$

โดยที่

$$I = \frac{1}{12} bh^3$$

จากตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของ วัสดุวิศวกรรมจะได้ค่า $E = 138 \text{ GPa}$

ในการคำนวณเลือกใช้ Safety factor = 2

จะได้ค่า $E = 69 \text{ GPa}$

ต้องการให้ระยะโก่งตัวมากที่สุด มีค่า = 0.05 m

และออกแบบให้ $a = 0.09 \text{ m}$, $L = 0.15 \text{ m}$

แทนค่า $0.05 = \frac{12(0.09)^2}{6 \times 69 \times 10^9 \times I} [3(0.15) - 0.09]$ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่า

$$I = 1.69 \times 10^{-12}$$

จากสูตร

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = 1.69 \times 10^{-12}$$

เลือกคานที่มีความหนา $h = 0.07$ cm

จะได้ความกว้างของคาน $b = 6$ cm

ดังนั้นขนาดของคานที่เลือกใช้คือขนาด กว้าง 60 mm. ยาว 150 mm. หนา 0.7 mm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Strain Gauge

2.3.1 บทนำ

Strain Gauge เป็นตัวต้านทานไฟฟ้า (Resistor) ชนิดหนึ่ง ที่แปรค่าความต้านทานตามระยะการยืดหรือหดตัวของ Strain Gauge เนื่องจาก Strain Gauge เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก จึงสามารถใช้ติดตั้งบนวัสดุต่างๆ เพื่อวัดค่าความเครียด (Strain) ของวัสดุได้โดยสะดวก ค่าความเครียดที่วัดได้นี้ สามารถนำมาใช้คำนวณหาค่าต่างๆ เพื่อการออกแบบและบำรุงรักษา เครื่องจักรกลและโครงสร้างทางวิศวกรรม รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อีกมากมาย

เมื่อ Strain Gauge ที่ติดตั้งบนวัสดุถูกแรงดึงหรือกด ให้ยืดหรือหดตัว ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ Strain Gauge จะเปลี่ยนแปลงดังสมการ

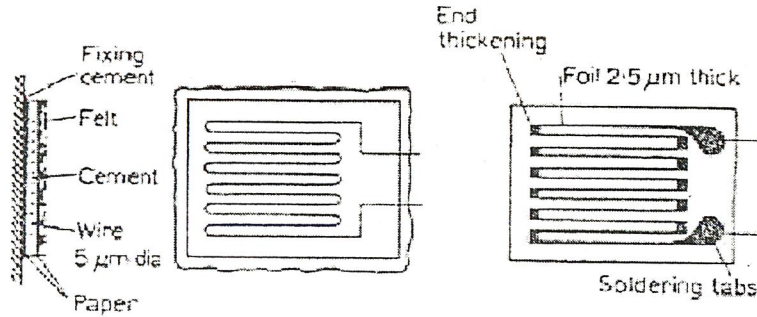
$$K_s = \frac{(\Delta R/R)}{(\Delta L/L)} = \frac{(\Delta R/R)}{\epsilon}$$

2.3.2 โครงสร้างโดยทั่วไปของ Strain Gauge

โครงสร้างโดยทั่วไปของ Strain Gauge จะประกอบด้วย เส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.0127 mm. ถึง 0.0254 mm. ส่วนความยาวนั้นมีหลายขนาด ขึ้นกับความต้องการใช้งาน เมื่อเราให้ความเครียดถูกจำกัดที่ค่าใดค่าหนึ่ง (ขึ้นกับชนิดของวัสดุ) ขณะเดียวกันจะมีแรงดึงขึ้นภายในเป็น T ซึ่งค่าแรงดึงนี้จะเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นลวด แต่มันจะมีค่าลดลงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ลักษณะของลวด Strain Gauge ที่ใช้กันทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Unbonded Type และ Bonded Type แต่แบบที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมจะเป็นแบบ Bonded Type จากรูปด้านล่าง แสดงลวดความต้านทาน Strain Gauge แบบ Bonded Type จะเห็นว่าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. Foil Strain Gauge คือตัวต้านทานไฟฟ้าที่ทำมาจาก Resistive Foil ใช้ในงานทั่วไป
2. Wire Strain Gauge คือตัวต้านทานไฟฟ้าที่ทำมาจาก Resistive Wire ใช้ในการวัดที่อุณหภูมิสูง ซึ่งลวดที่ใช้จะยึดติดแน่นอยู่กับพลาสติกหรือกระดาษ หรือซีเมนต์ อนึ่ง Strain Gauge ชนิดที่เป็นแผ่นโลหะบางจะมีข้อดีกว่าแบบเส้นลวด คือ มีขนาดบางกว่า มีความไวในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เป็นเชิงเส้นดี
3. Semiconductor Strain Gauge คือตัวต้านทานไฟฟ้าที่ทำมาจาก Semiconductor ใช้ในการวัดที่ต้องการความละเอียดสูง

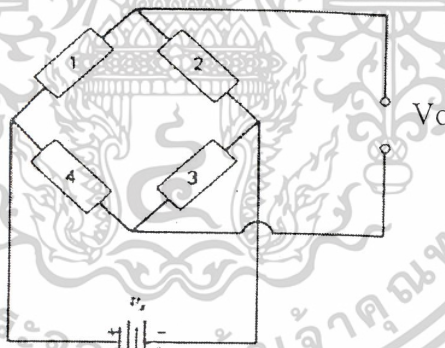


รูปที่ 2.6 Strain Gauge ชนิด Flat grid type wire gauge (ซ้าย)

Strain Gauge ชนิด Etched foil gauge (ขวา)

2.3.3 หลักการทำงานของ Strain Gauge

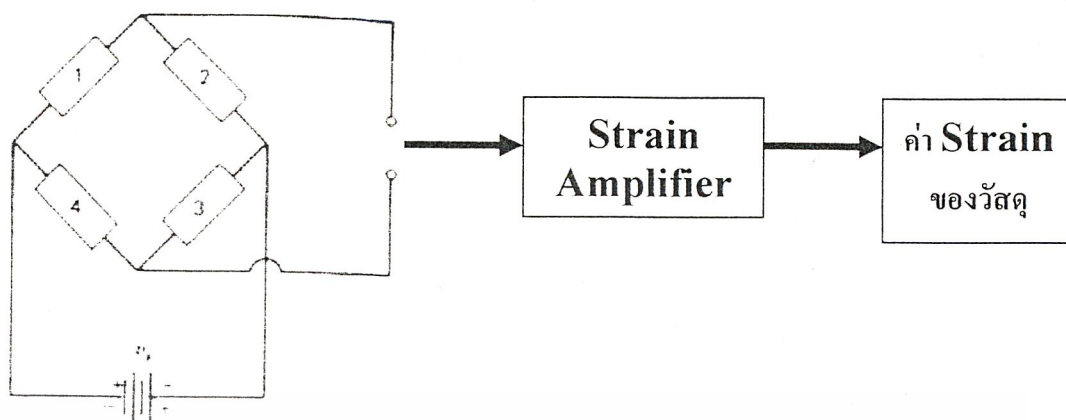
จากหลักการทำงานของ Strain Gauge ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน เมื่อมีความเครียดเกิดขึ้น ดังนั้น การต่อร่วมกับวงจรไฟฟ้าอื่นๆ จึงต้องมีความถูกต้อง และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสูง ซึ่งวงจรที่มีคุณสมบัติดังกล่าวที่ดีแบบหนึ่ง คือ วงจรบริดจ์ โดยการต่อตัวความต้านทานของ Strain Gauge ให้เป็นวงจรบริดจ์ อีกทั้งต้องมีการต่อไฟกระแสตรง หรือกระแสสลับเข้ากับวงจรบริดจ์ เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการต่อ Strain gauge เข้ากับวงจรบริดจ์

ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ Strain gauge สามารถหาได้โดยวัดค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าในวงจรบริดจ์ แต่เนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก จึงต้องใช้วงจรขยาย หรือใช้ Strain Amplifier ขยายแรงดันที่เกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงการวัดค่าความเครียดของวัสดุโดยใช้ Strain gauge ต่อเข้ากับ Strain Amplifier

สำหรับวัสดุที่ใช้ทำ Strain Gauge นั้นมีมากมายหลายชนิด ดังที่ได้แสดงในตารางต่อไปนี้

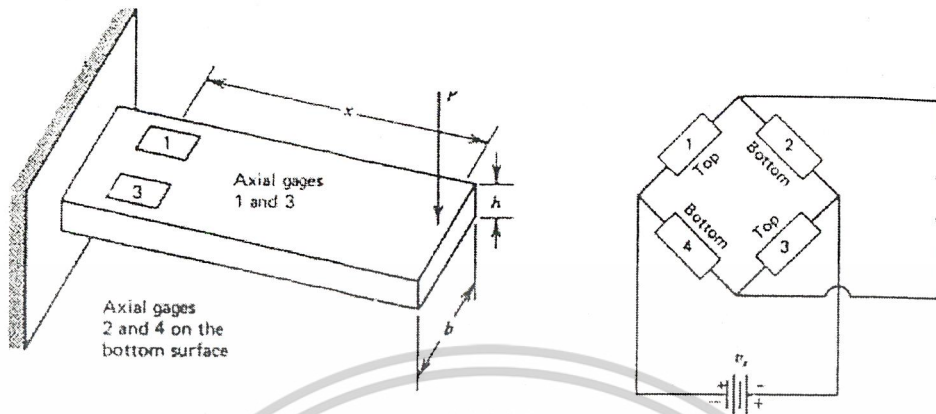
ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของ Strain Gauge

Common name	Composition	Gage Factor	Temp. coef. of resistance	Resistance, ohms per ft. in 1-millimeter Dia.	Stress equivalent to 10° C on steel psi.
Nichrome	Ni-0.80, Cr-0.20	2	300	638	2000
Maganin	Ni-0.04, Mn-0.12 Cu-0.84	0.47	Nil	260	-400
Advance		2.1	-	-	-66
Copel	Ni-0.45, Cu-0.55	2.4	2,-2	290	-200
Constantan		2.1	-	-	-60
Chromel-C	Ni-0.64, Fe-0.25 Cr-0.11	2.5	-	640	980
Iso-elastic	Ni-0.36, Cr-0.08 Fe-0.52, Mo-0.005	3.5	175	680	5000
Nickel	-	-12.1	6000	70	-13500
Platinum	-	4.8	3000	80	-
Soft Iron	-	4.2	5000	68	-
Carbon	-	20	-500	45000	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 รูปแบบการติดตั้ง Strain gauge เข้ากับวัสดุ



รูปที่ 2.9 แสดงการวัดแรงที่กระทำกับคานโดยใช้ Strain Gauge

จากรูปเป็นการวัดแรงที่ตกกระทบบนคานโดยใช้ Strain Gauge 4 ตัว โดยจะใช้ Strain Gauge ติดให้ตั้งบนพื้นผิวบนสุดของคาน 2 ตัว และติดให้ตั้งบนพื้นผิวล่างสุดของคานอีก 2 ตัว เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ และวัดการยืดและหดตัวของคานที่เกิดจากแรงที่มากกระทำ จะเกิดผลทำให้ค่าความต้านทานของ Strain Gauge เปลี่ยนแปลง และสามารถวัดค่าของความเครียดของคานออกมาได้

$$\epsilon_1 = -\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\epsilon_4 = \frac{6PX}{Ebh^2}$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6K_s P X}{Ebh^2}$$

$$V_0 = \frac{6K_s P X V_s}{Ebh^2}$$

$$S = \frac{V_0}{P} = \frac{6S_g X V_s}{Ebh^2}$$

ค่าความต้านทานนั้นเปลี่ยนแปลงตามขนาดความยาวของเส้นลวดต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

$$\frac{dL}{L} = \epsilon_a \text{ (axial strain)}$$

$$\frac{dD}{D} = \epsilon_t \text{ (transverse strain)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dD/D}{dL/L} = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_l} = \nu \quad (\text{poisons ratio})$$

หากค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขณะที่เกิดความเครียดขึ้นแล้ว มันจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อวัสดุอื่นๆ กล่าวคือ ผลที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในเนื้อวัสดุ ซึ่งบางทีอาจเรียกว่า Piezo resistance effect or Bridgeman effect

$$\frac{d\rho/\rho}{dl/l} = \Psi E$$

สำหรับกรณีที่ว่าวัสดุนั้นมีความยืดหยุ่นถูกจำกัด นั่นคือค่าของ $\frac{d\rho}{\rho}$ ค่อนข้างจะคงที่ ส่วนค่าของ Ψ จะเรียกว่า Bridgeman coefficient

2.3.5 Specification for the ideal strain gauge

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณลักษณะของ Strain Gauge ในอุดมคติ

Specification	Resistance Strain Gauge
1. Size	Very small
2. Weight	Insignificant
3. Ease of attachment to test piece	Relatively simple
4. Sensitivity to strain	Fair-higher output would be very advantageous
5. Sensitivity to ambient variables	Slightly affected, but the gauge can usually be protected or the variable compensated for
6. Static and dynamic strain indication	Will indicate both with equal ease
7. Remote indication and recording	Easily accomplish
8. Expense	Most gauge are comparatively inexpensive
9. Gauge length	Shortest gauge length presently available is 1/64 in.

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำขึ้นอย่างมากมาย และ Strain Gauge ก็ได้มีการพัฒนาเช่นเดียวกันโดยได้มีการนำเอาสารกึ่งตัวนำมาสร้างเป็น Strain Gauge ซึ่งจะใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางของวัสดุจำพวกเยอมาเนียม หรือซิลิกอน ซึ่ง gauge แบบนี้จะมีค่า gauge factor สูงมาก ขณะเดียวกันจะมีความเปราะ และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 ตัวแปรต่างๆที่ใช้

- K_s คือ ค่า Gauge Factor (อัตราการผลิตแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ต่อค่าความเครียด)
- R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ Strain Gauge แต่ละตัว
- ΔR คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ Strain Gauge แต่ละตัว
- V_o คือ ค่าแรงดัน (Output)
- V_s คือ ค่าแรงดัน (Input)
- P คือ แรงที่ตกกระทบบ
- X คือ ค่าความยาวจากจุดที่มีแรงตกกระทบบถึงจุดที่ทำการติดตั้ง Strain Gauge
- E คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำคาน (Modulus of Elasticity)
- b คือ ค่าความกว้างของคาน
- h คือ ค่าความหนาของคาน
- L คือ ค่าความยาวของวัสดุ
- ΔL คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ
- D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



55004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสร้างชุดทดลอง

การออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

อุปกรณ์และส่วนประกอบสำหรับการทดลอง มีดังต่อไปนี้

1. ปั๊มความดันสูง ซึ่งสามารถจะให้ความดันที่มากที่สุดที่ 200 bars ดังแสดงในรูปที่ 3.5
2. หัวฉีด ทั้งหมด 9 ตัว แสดงดังรูปที่ 3.1, 3.2 , 3.3 และ 3.4 มีรายละเอียดของหัวฉีดแต่ละตัวดังต่อไปนี้

หัวฉีดตัวที่ 1	ยาว 65 mm. Diameter Out 0.8 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 3.75
หัวฉีดตัวที่ 2	ยาว 65 mm. Diameter Out 0.5 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 3.75
หัวฉีดตัวที่ 3	ยาว 65 mm. Diameter Out 0.3 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 3.75
หัวฉีดตัวที่ 4	ยาว 45 mm. Diameter Out 0.8 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 2.5
หัวฉีดตัวที่ 5	ยาว 45 mm. Diameter Out 0.5 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 2.5
หัวฉีดตัวที่ 6	ยาว 45 mm. Diameter Out 0.3 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 2.5
หัวฉีดตัวที่ 7	ยาว 25 mm. Diameter Out 0.8 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 1.25
หัวฉีดตัวที่ 8	ยาว 25 mm. Diameter Out 0.5 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 1.25
หัวฉีดตัวที่ 9	ยาว 25 mm. Diameter Out 0.3 mm. Diameter In 16 . Aspect Ratio 1.25

3. Relief Valve 1 ตัว ดังรูปที่ 3.6

4. ชุดใส่ทราย ดังรูปที่ 3.7

5. Pressure Gauge ขนาด 2000 psi 1 ตัว ดังรูปที่ 3.8

6. ท่อ Galvanize $\frac{1}{2}$ inch ชนิดหนา

7. Multi meter ดังรูปที่ 3.9

8. Power Supply 12 Volt ดังรูปที่ 3.10

9. Strain Gauge gauge factor $2.10 \pm 1.0 \%$, gauge resistance $120.4 \pm 0.4 \Omega$ ใช้ 4 ตัว ต่อแบบวงจรมัดจักษ์ ดังรูปที่ 3.11

10. ถาดรองรับ ขนาด $60 \times 150 \times 0.7 \text{ mm}^3$ ดังรูปที่ 3.12

11. Ball Valve ขนาด Diameter $\frac{1}{2}$ inch 1 ตัว ดังรูปที่ 3.15

12. สายยาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $3/4$ นิ้ว ยาว 12 m.

13. บีกเกอร์ ขนาด 1000 ml.

14. แท็งก์รองน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15.ข้อต่องอ (Standard Elbow 90°) Diameter $\frac{1}{2}$ inch 1 ตัว

16.กระดาษทรายละเอียด เบอร์ 1000

17.ทราย Silicon carbide เบอร์ 120

18.นาฬิกาจับเวลา

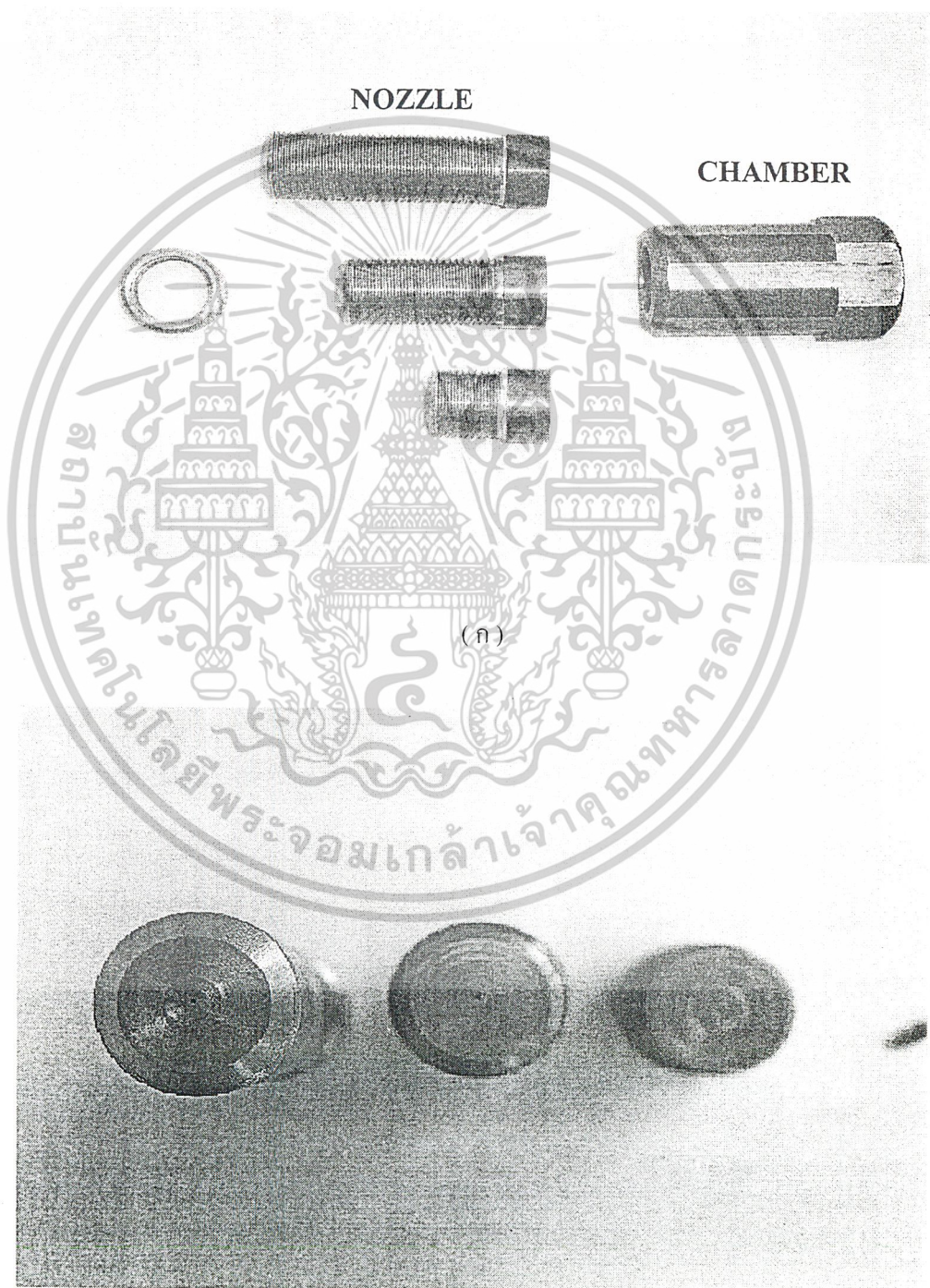


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบหัวฉีดนั้นจะพิจารณาตามค่า Aspect Ratio (AR) ซึ่งค่า Aspect Ratio นี้จะบอกถึงรูปร่างของหัวฉีด ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

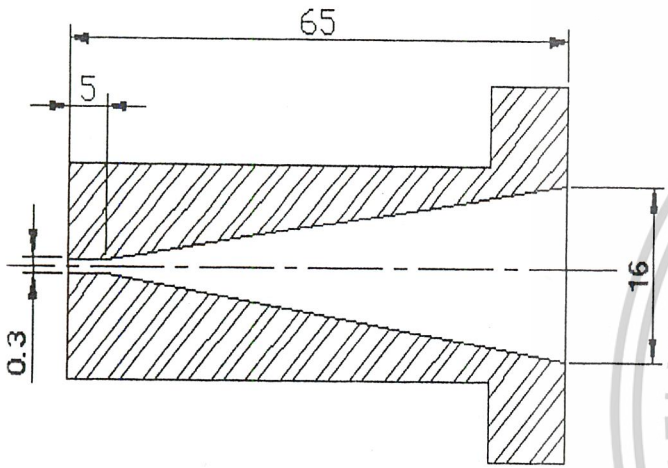
$$\text{Aspect Ratio (AR)} = \frac{L_t}{D}$$

- เมื่อ L_t = ความยาวของหัวฉีด
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า

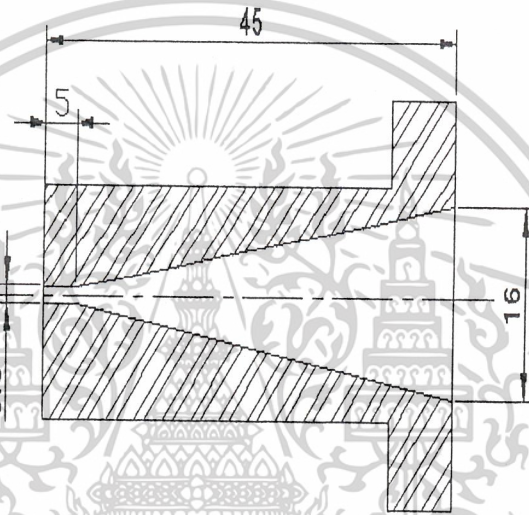


(ข)

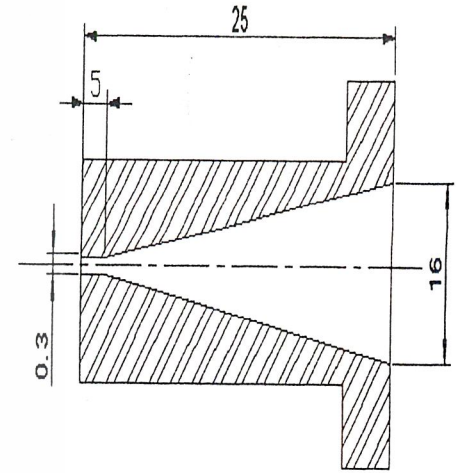
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรูปที่ 3.1 แสดงหัวฉีด (ก) แนวนอน, (ข) แนวตั้ง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) AR = 3.75

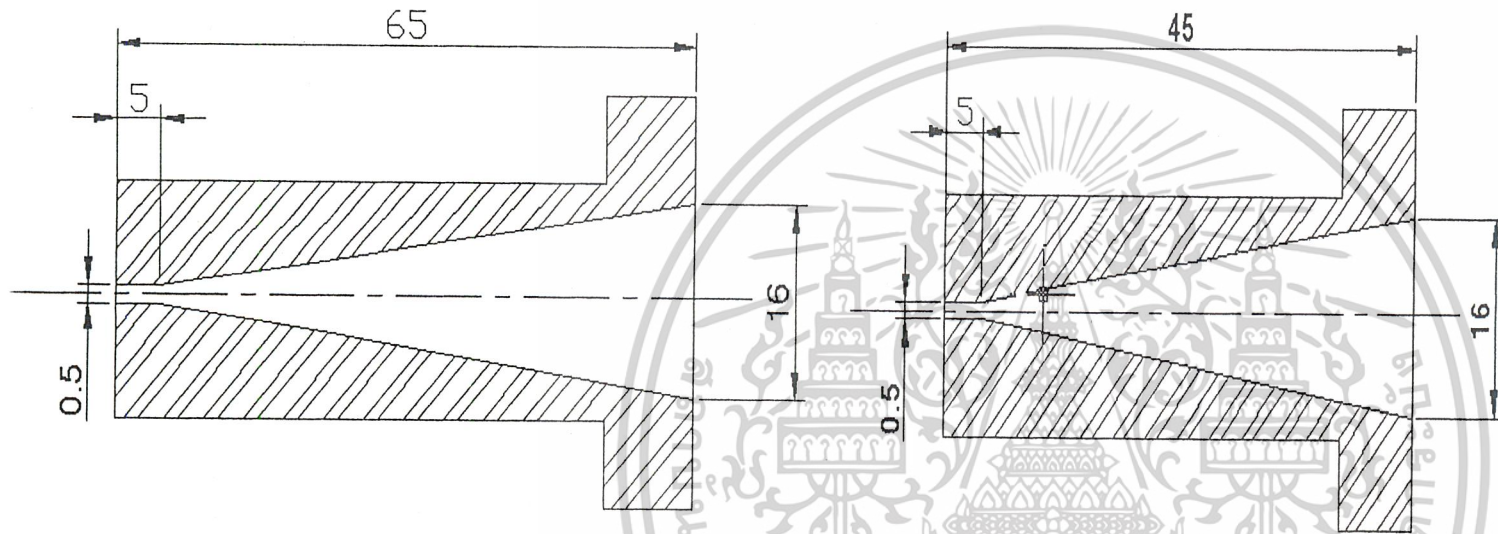


(ข) AR = 2.5

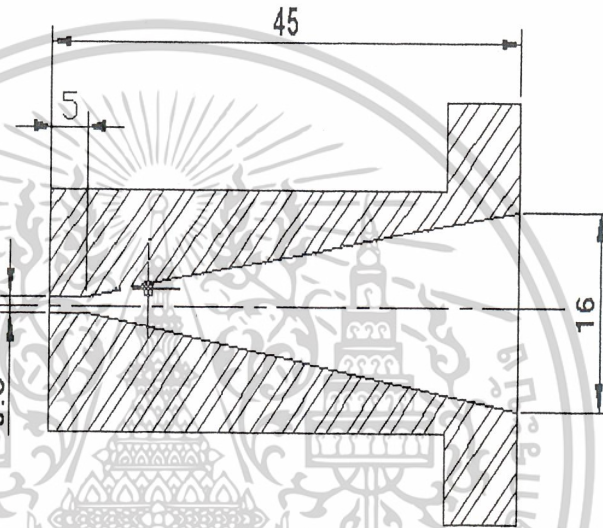


(ค) AR = 1.25

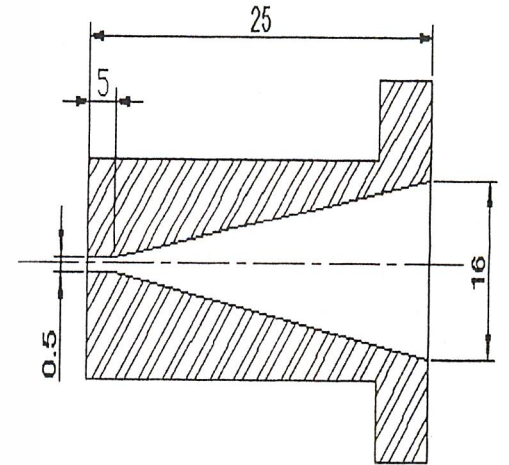
รูปที่ 3.2 แสดงหัวฉีด DI = 16 mm. , DO = 0.3 mm.



(ก) AR = 3.75

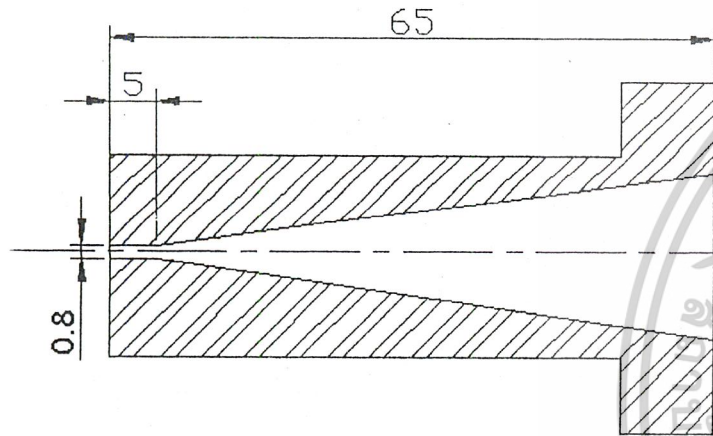


(ข) AR = 2.5

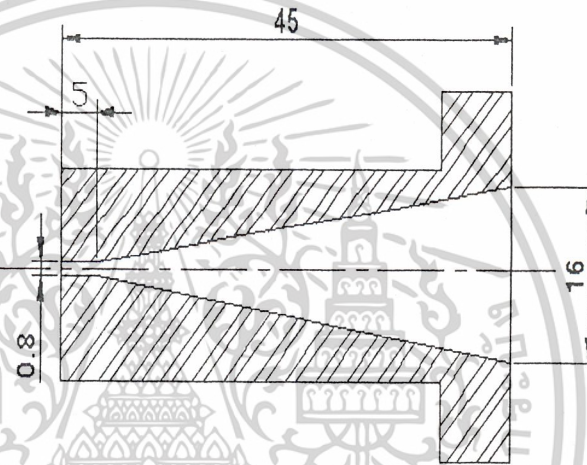


(ค) AR = 1.25

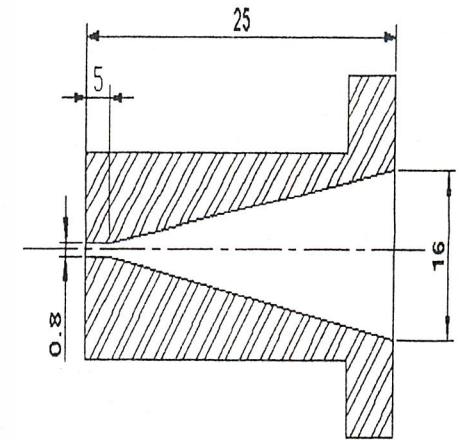
รูปที่ 3.3 แสดงหัวฉีด DI = 16 mm. , DO = 0.5 mm.



(ก) AR = 3.75

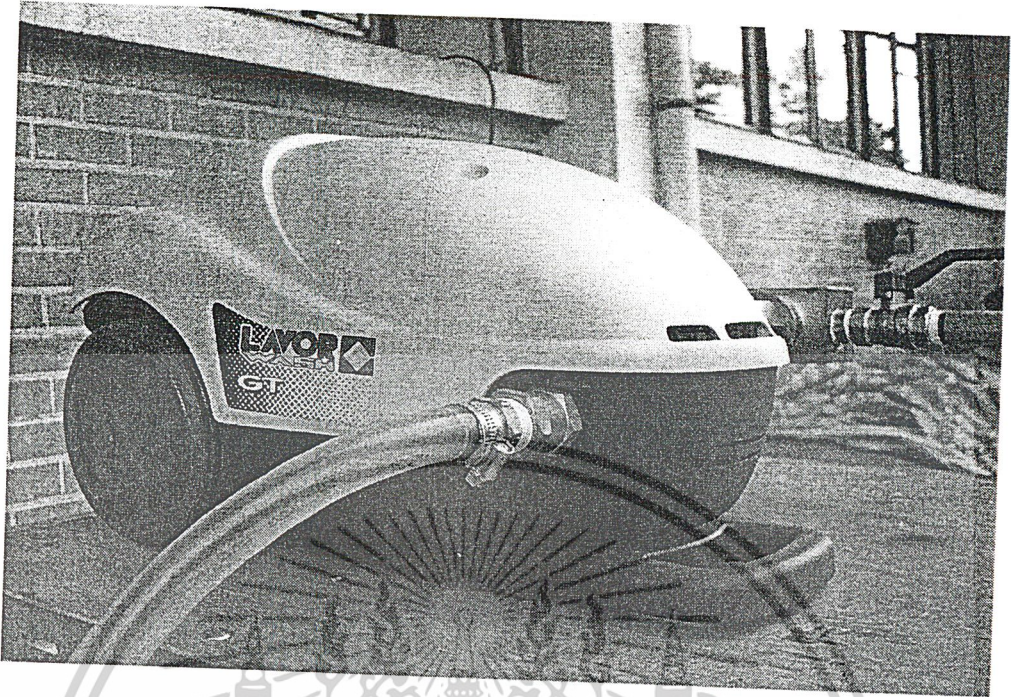


(ข) AR = 2.5

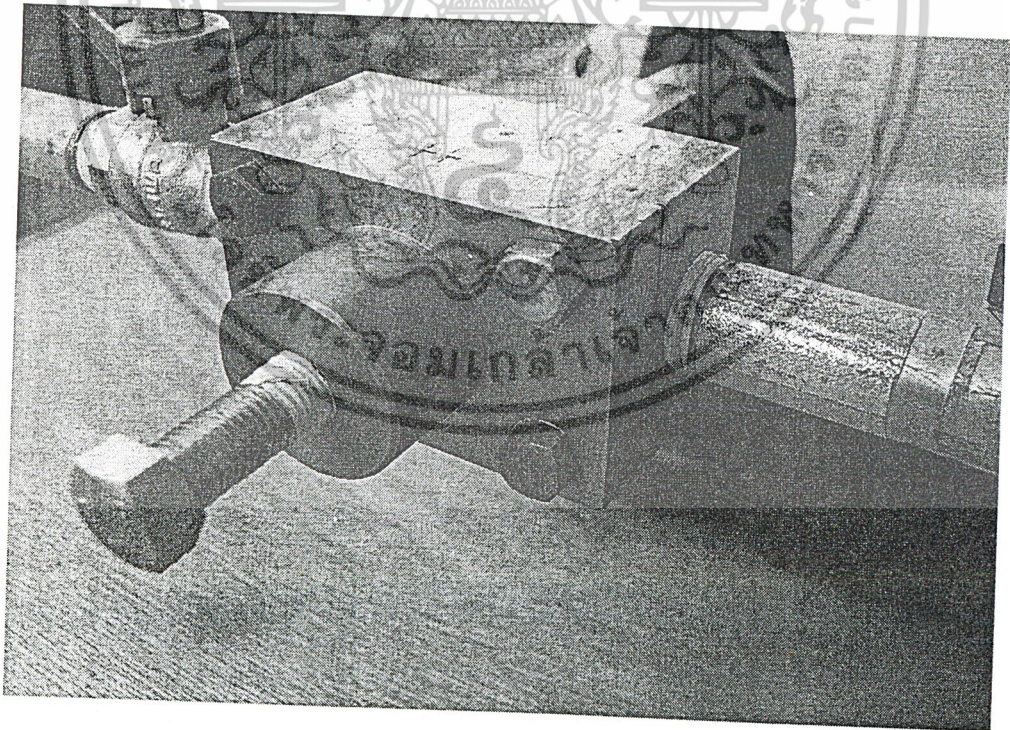


(ค) AR = 1.25

รูปที่ 3.4 แสดงหัวฉีด DI = 16 mm. , DO = 0.8 mm.

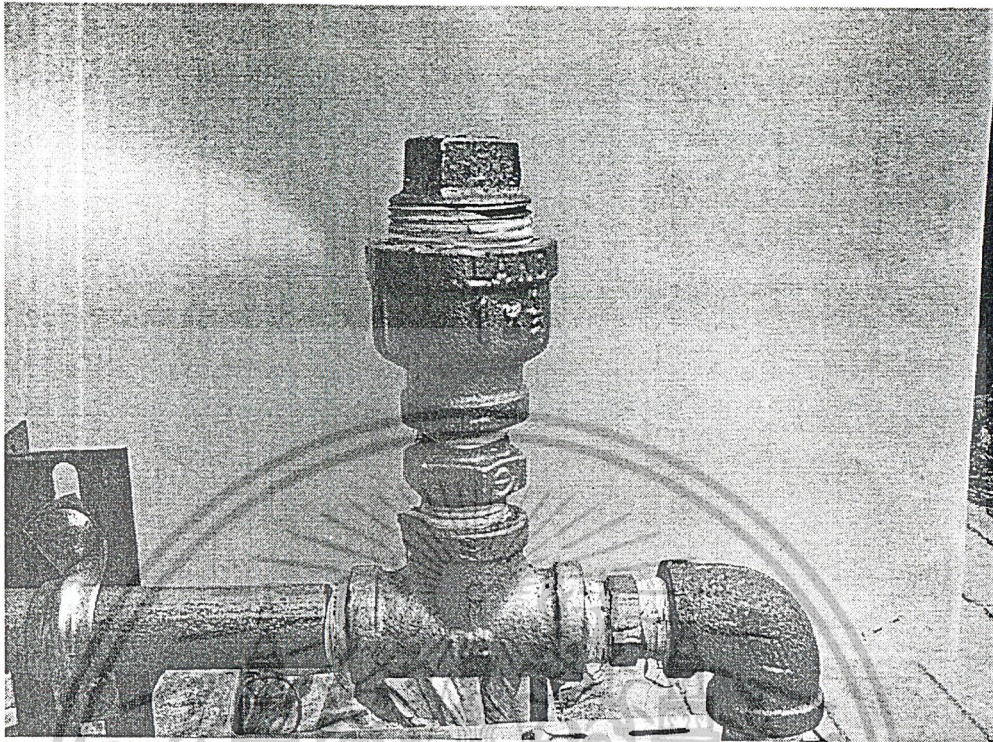


รูปที่ 3.5 แสดงปั๊มความดันสูง

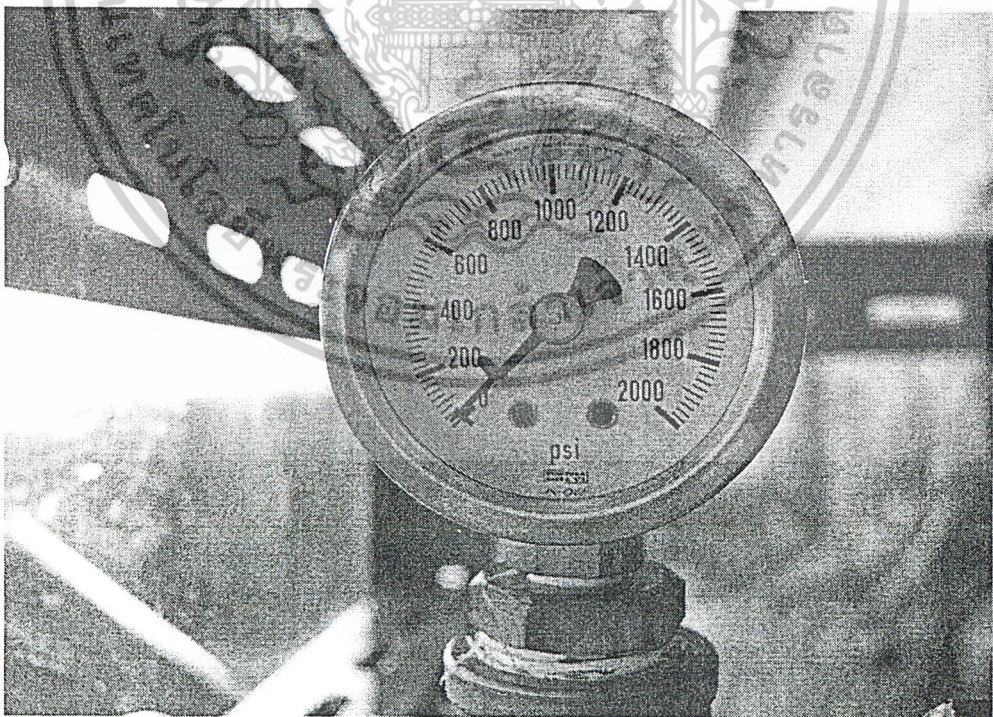


รูปที่ 3.6 แสดง Relief Valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

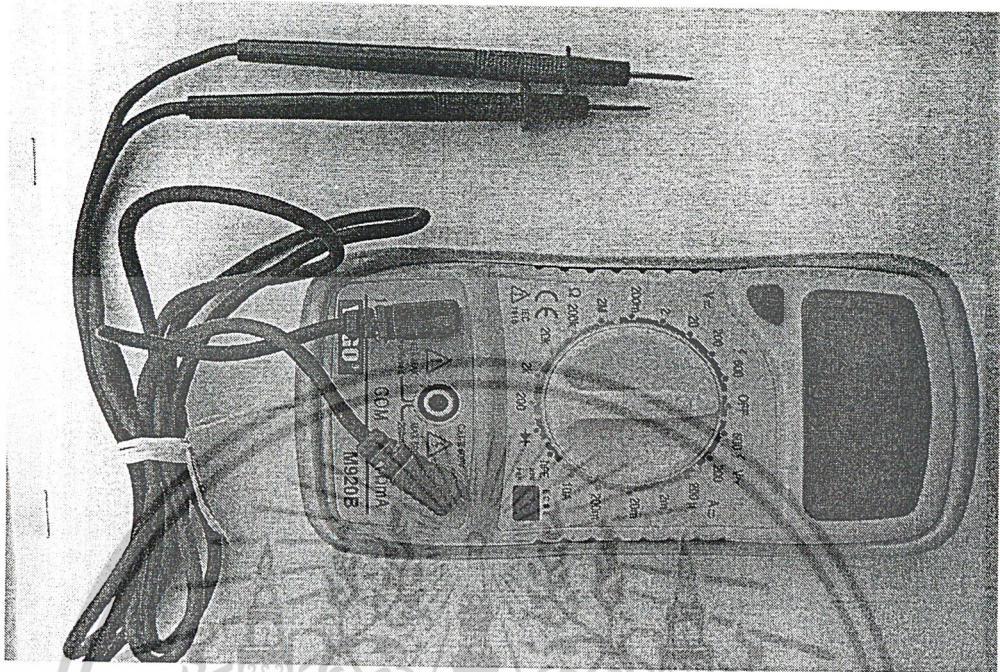


รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ใส่ทราย

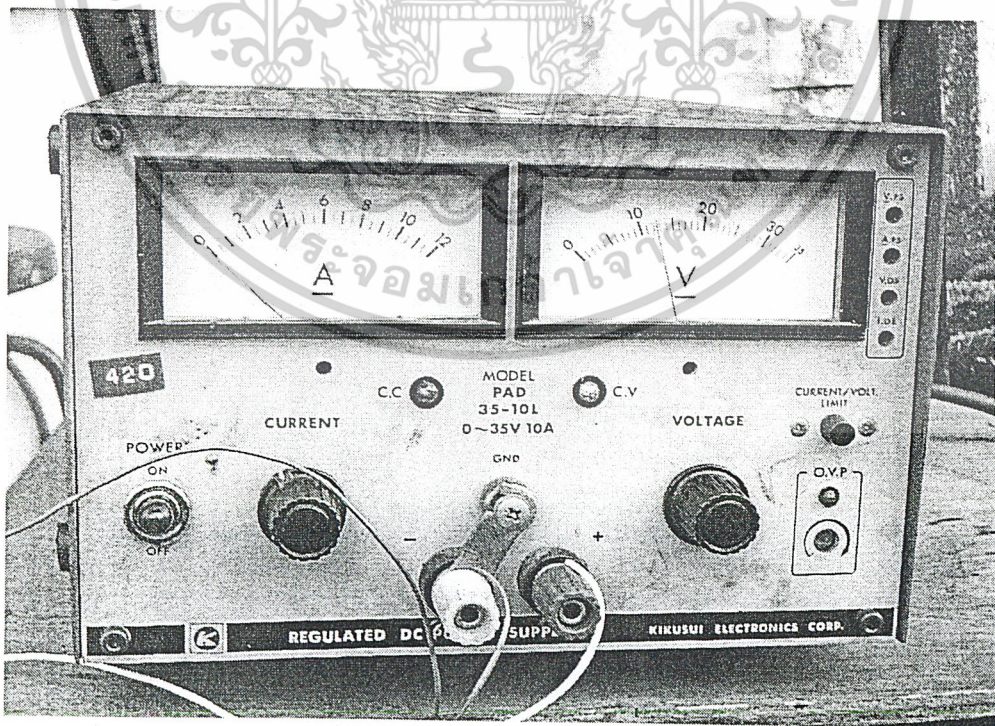


รูปที่ 3.8 แสดง Pressure Gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

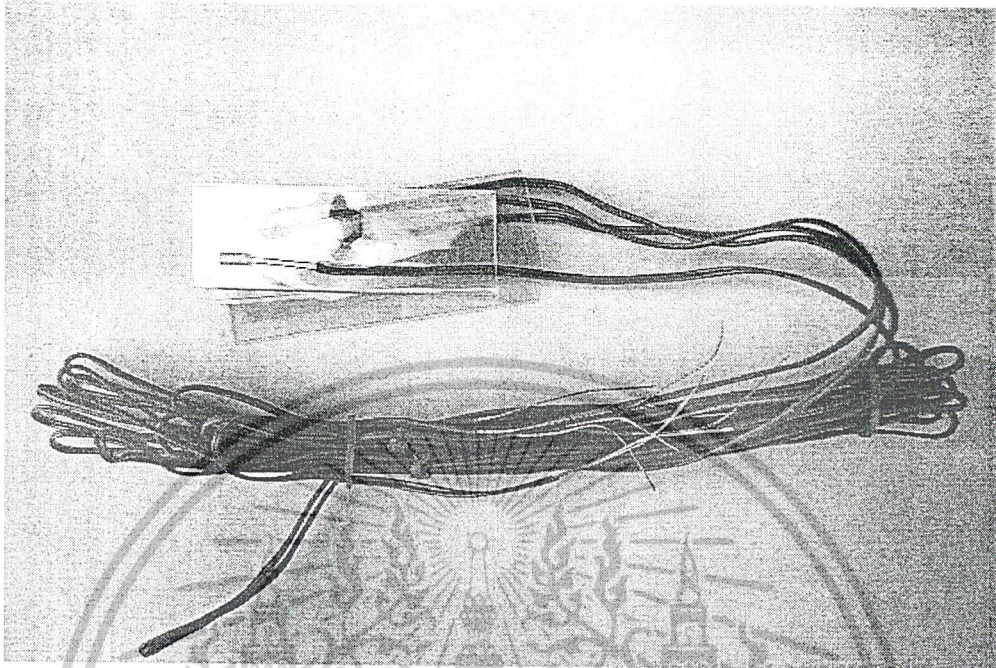


รูปที่ 3.9 แสดง Multi meter

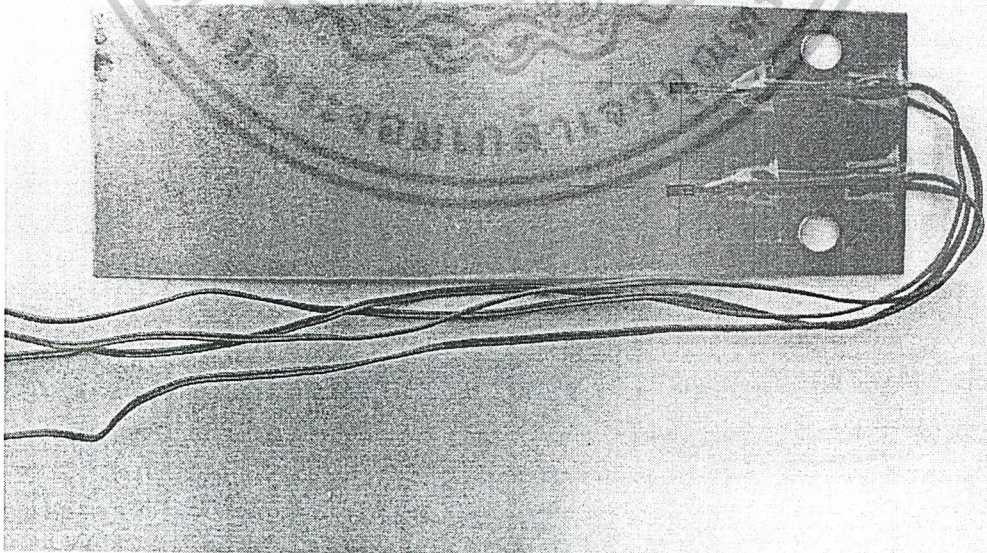


รูปที่ 3.10 แสดง Power Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

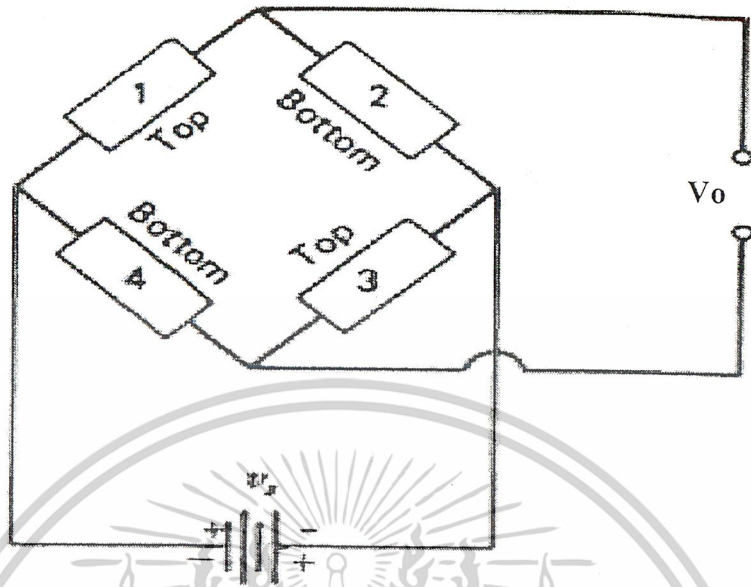


รูปที่ 3.11 แสดง Strain Gauge

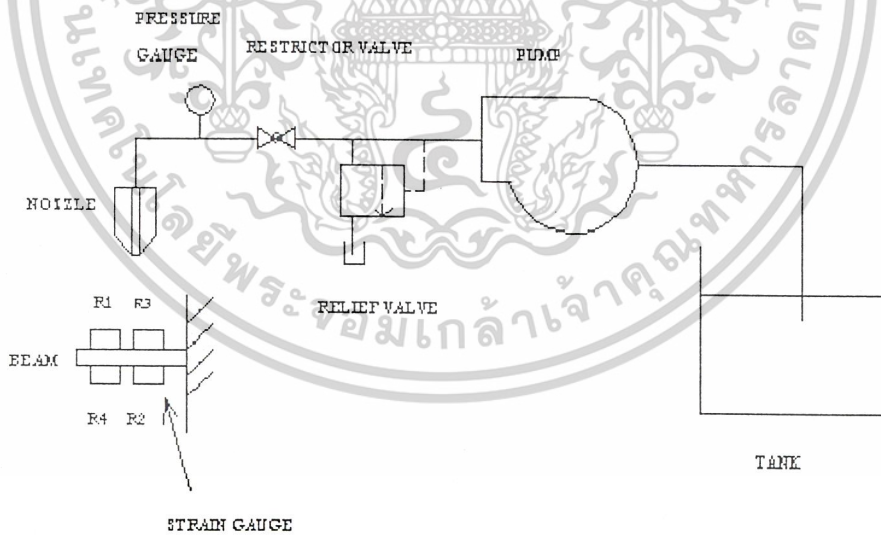


รูปที่ 3.12 แสดงการติด Strain Gauge บนกาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

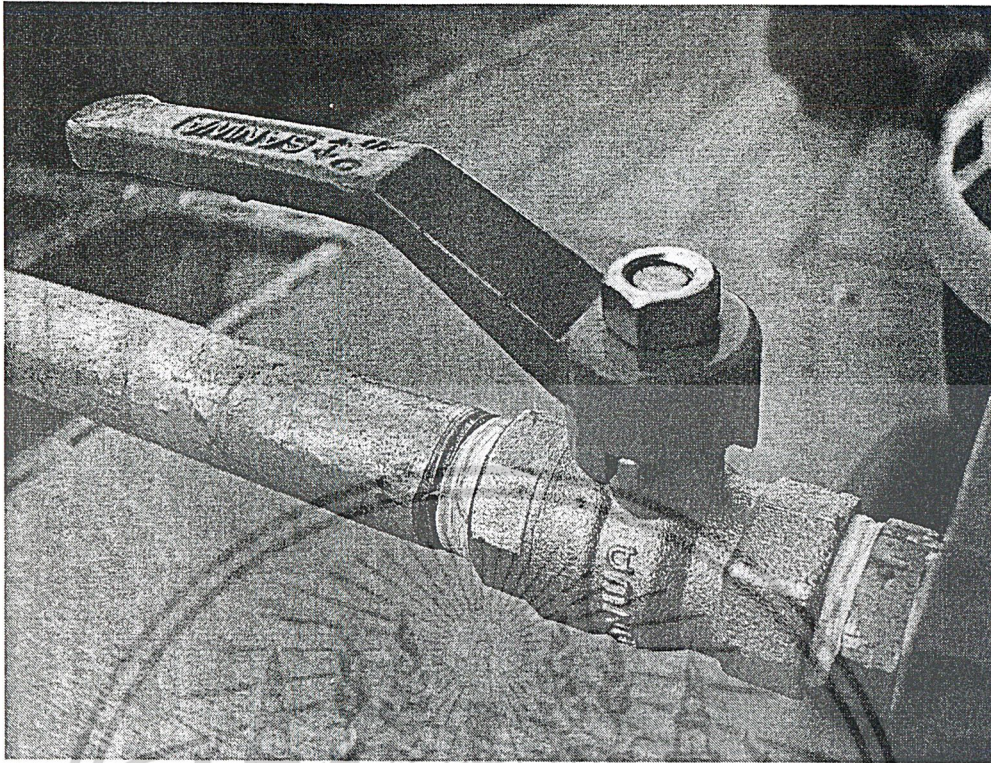


รูปที่ 3.13 แสดงการต่อ Strain Gauge แบบวงจรบรีดจ์

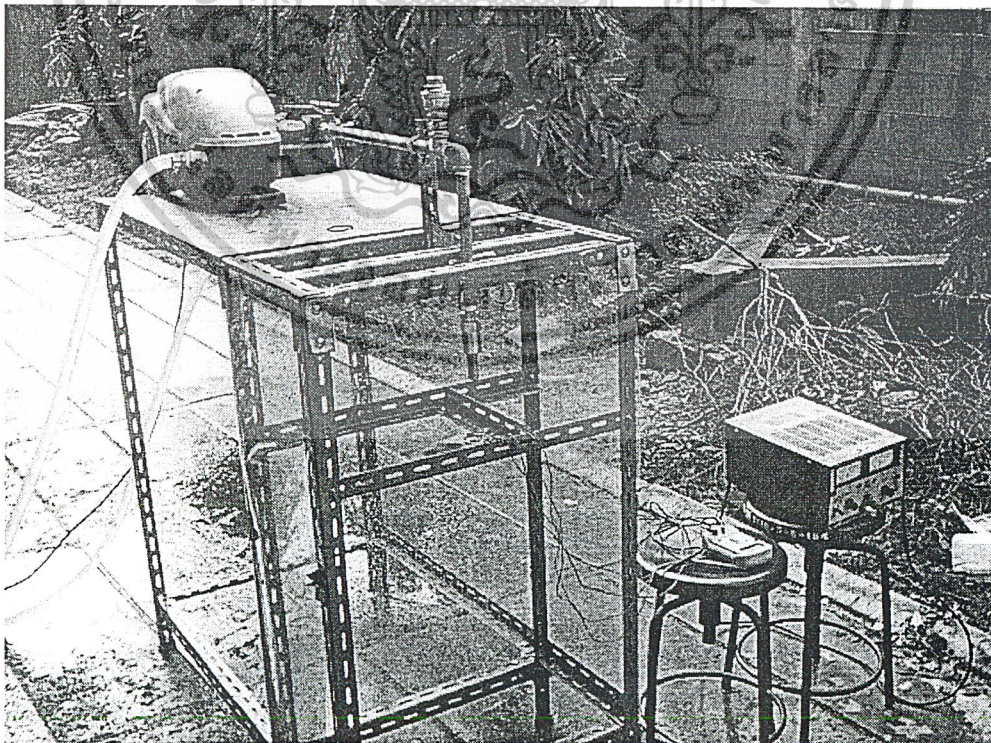


รูปที่ 3.14 แสดง Layout ของชุดอุปกรณ์ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดง Restrictor Valve



รูปที่ 3.16 แสดงชุดอุปกรณ์ทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

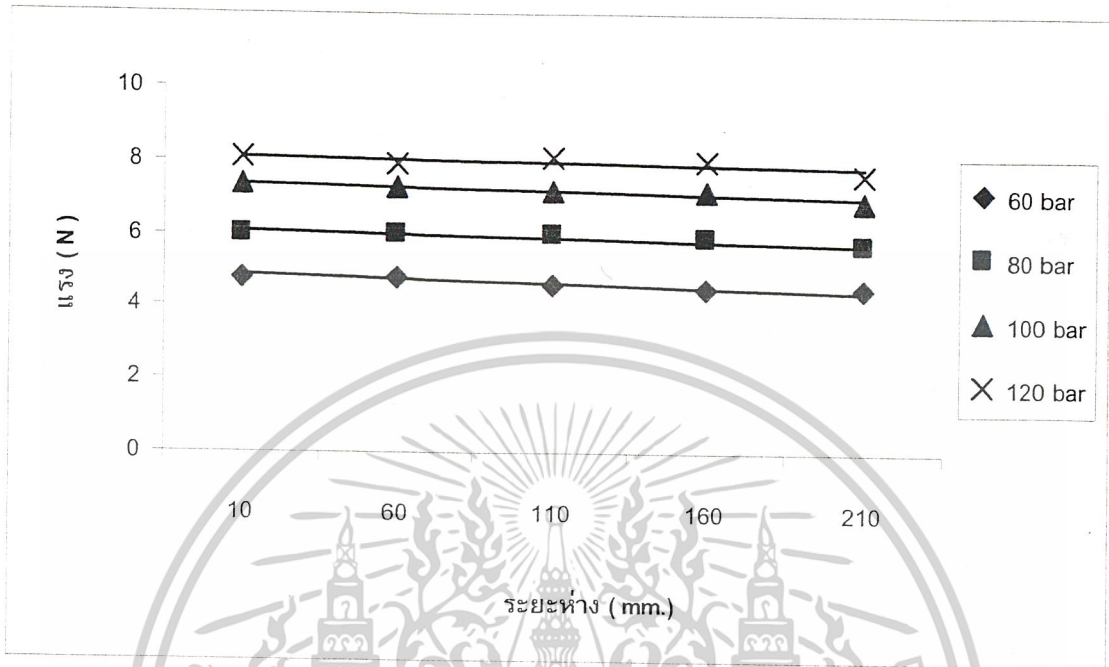
การทดลองและผลการทดลอง

วิธีการทดลอง

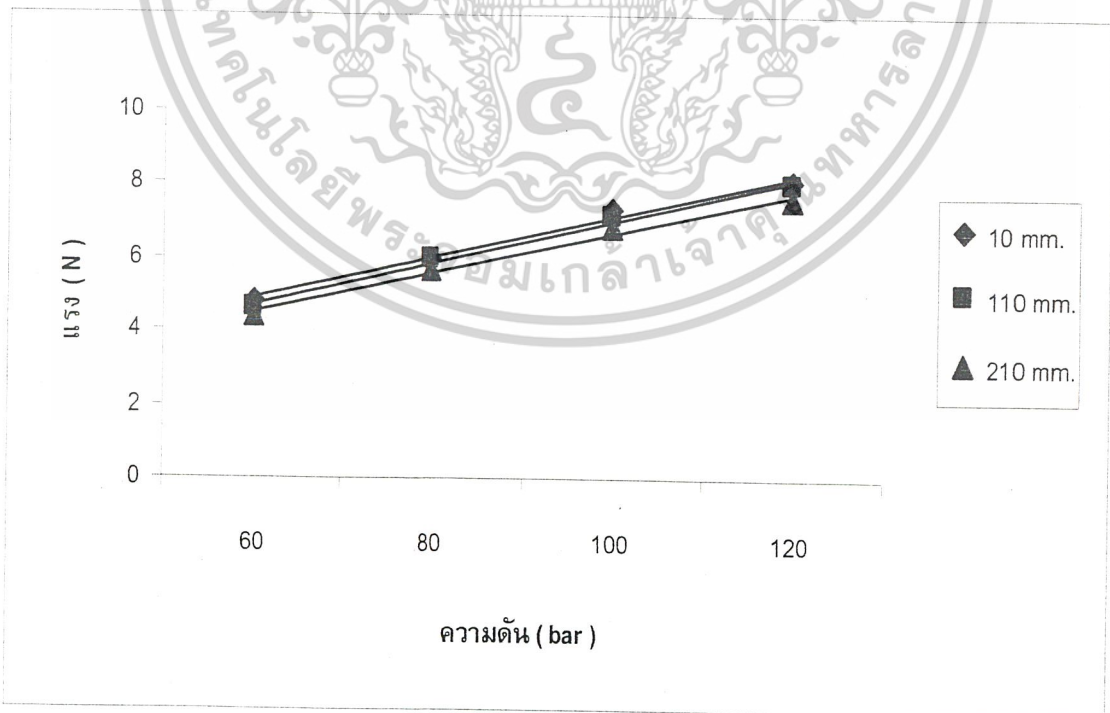
1. ติดตั้งหัวฉีดตัวแรก
2. ติดตั้งคานซึ่งตัวคานนี้จะมี Strain gauge ติดอยู่ 4 ตัว จะต่อแบบวงจรบริดจ์ โดยจะมีระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับตัวคาน 10 mm.
3. เปิด ball valve และเปิดปั๊ม
4. ปรับความดันโดยใช้ Relief valve ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความดันที่ค่าต่างๆ คือ 60 bar, 80 bar, 100 bar และ 120 bar.
5. อ่านค่า voltage จาก multi meter ที่ละค่าตามการเปลี่ยนแปลงของความดัน
6. ปรับระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับคานโดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจาก 10 mm. ไปที่ 60 mm., 110 mm., 160 mm., 210 mm. ตามลำดับ
7. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำ jet โดยใช้เวอร์เนีย
8. วัดอัตราการไหลของน้ำโดยการใช้น้ำปริมาตรของน้ำเทียบกับเวลา ($\frac{V}{t}$)
9. หลังจากเสร็จจากข้อ 8 แล้ว ทำการทดลองใหม่อีกโดยการเปลี่ยนหัวฉีดไปจนครบ
10. ทำการผสมทรายกับน้ำจากนั้นวัดผลของแรงปะทะแล้วนำผลของการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับน้ำที่ไม่ได้ผสมทรายของหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง



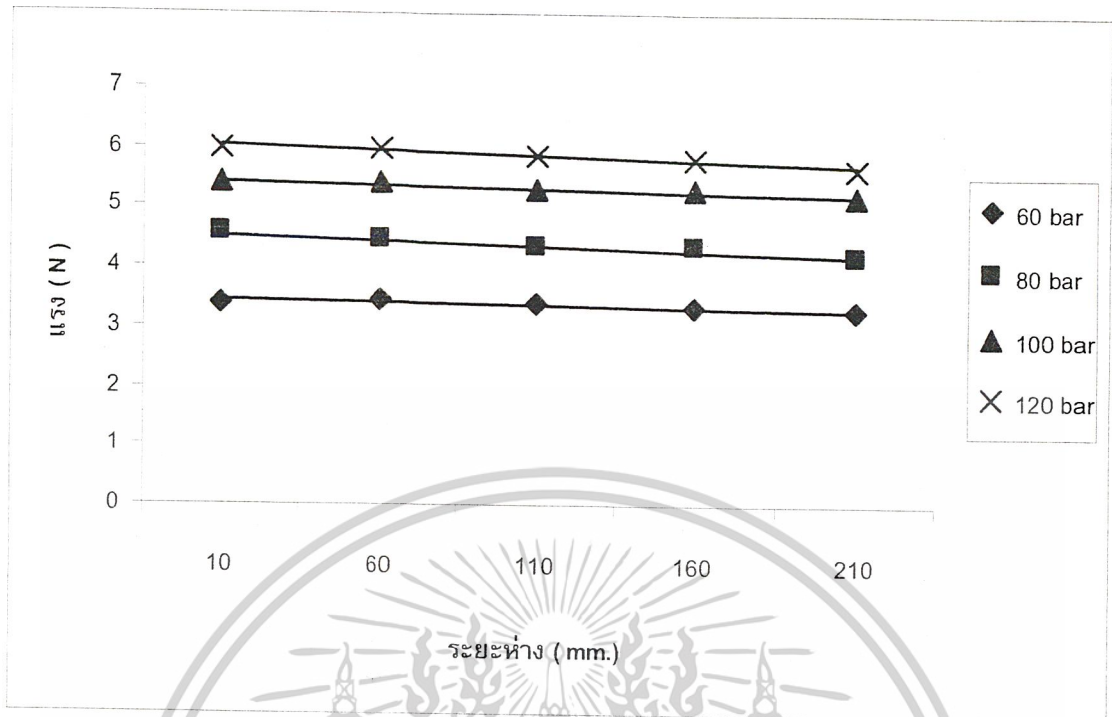
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 3.75



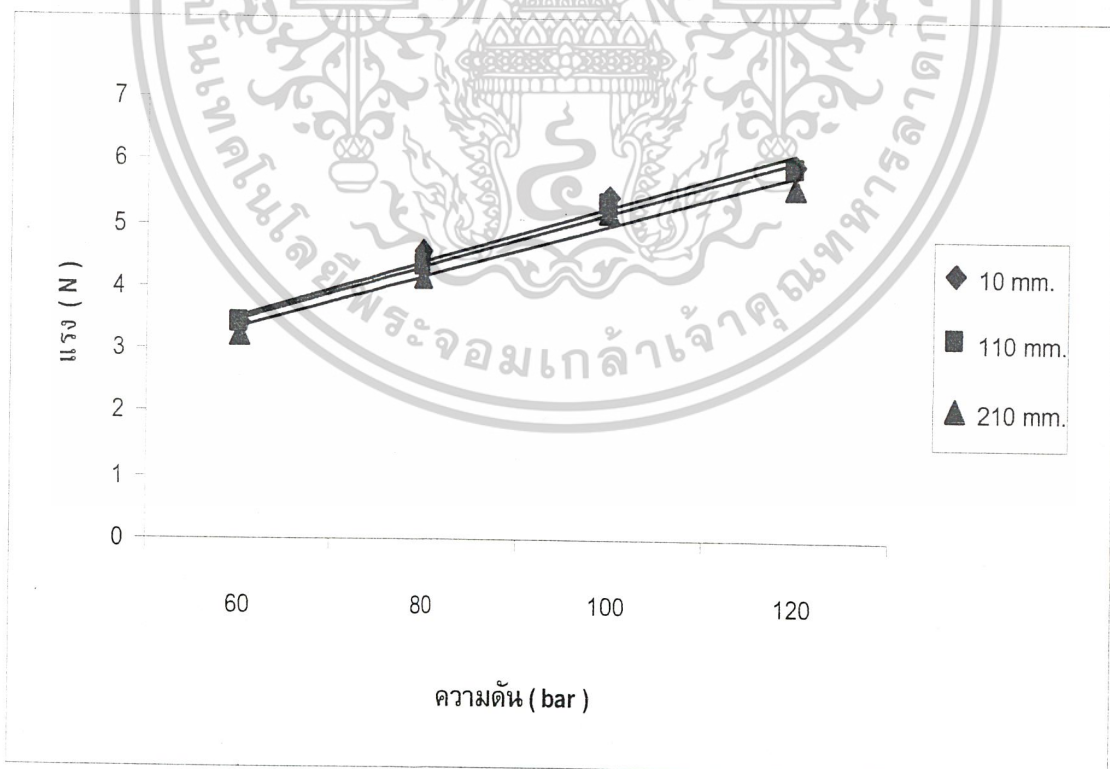
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 1 ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 3.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

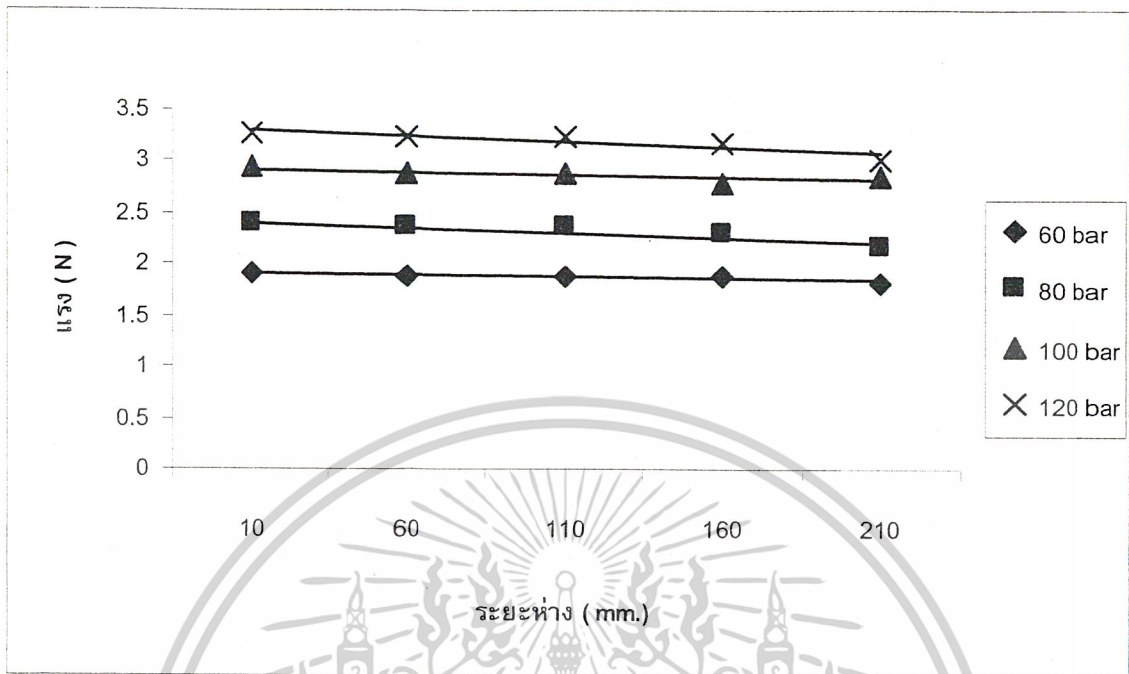


รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 3.75

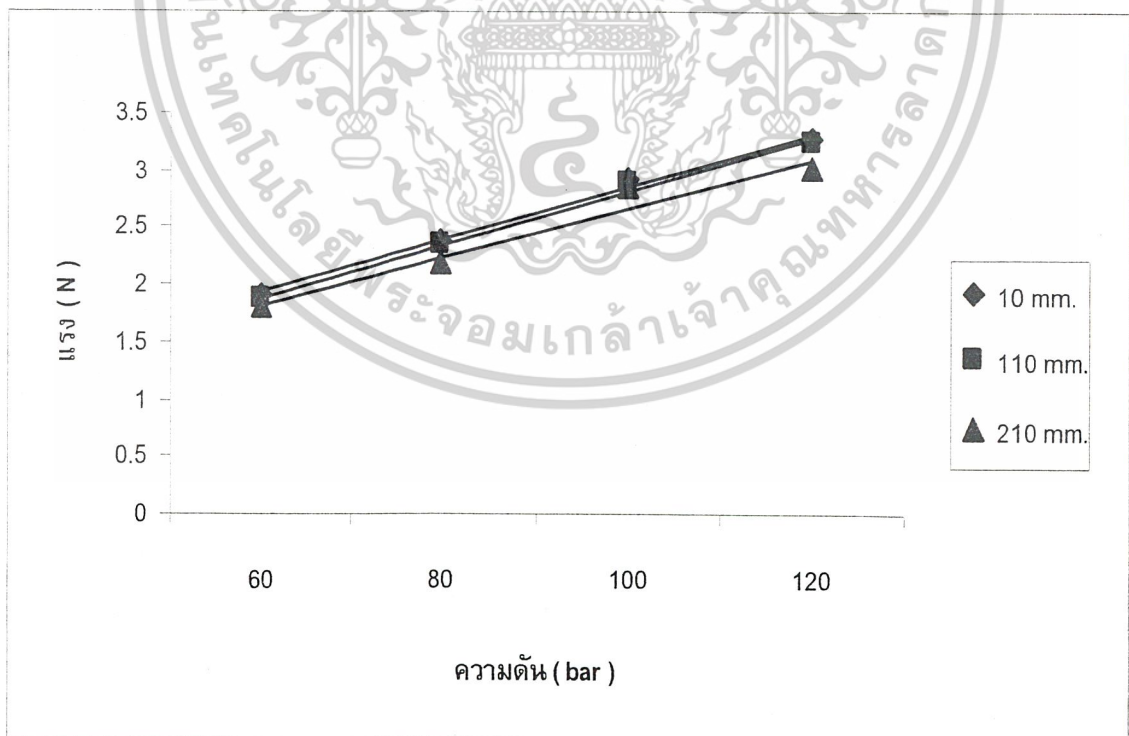


รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 3.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

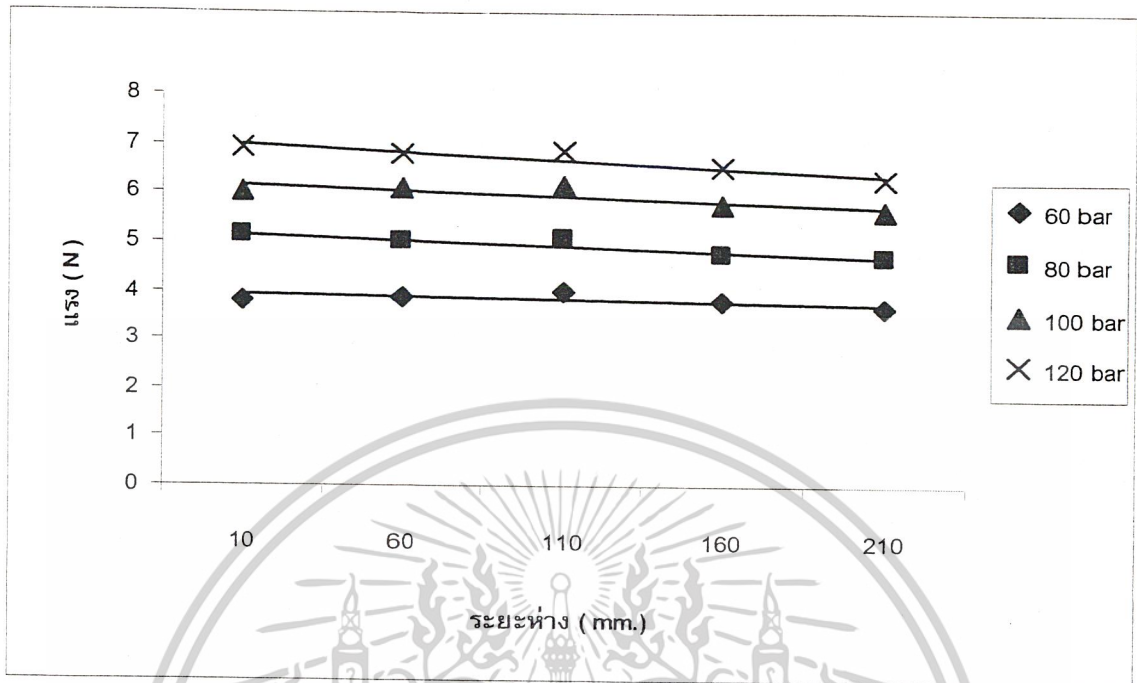


รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 3.75

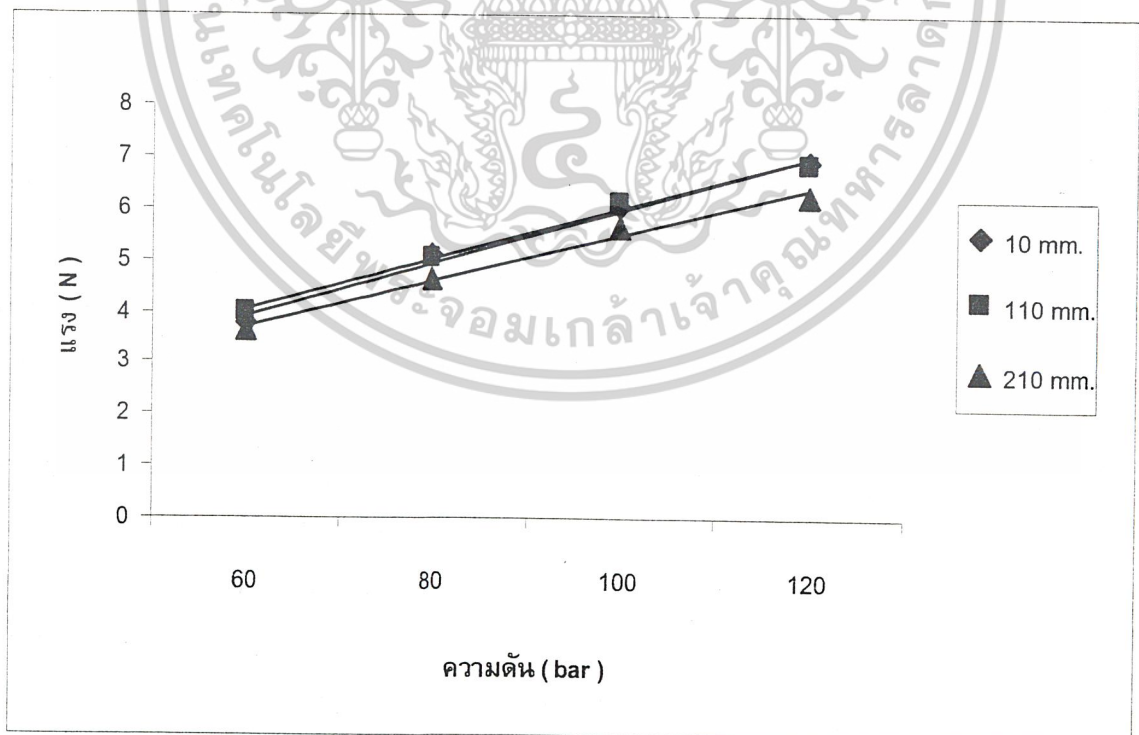


รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 3.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

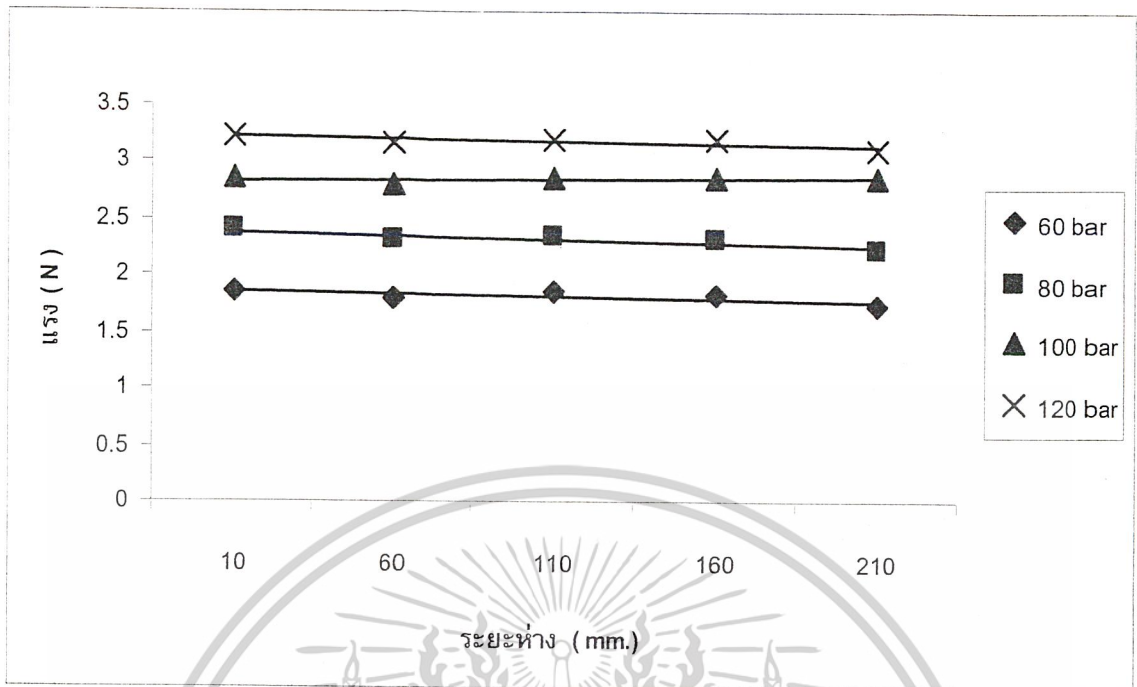


รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 2.5

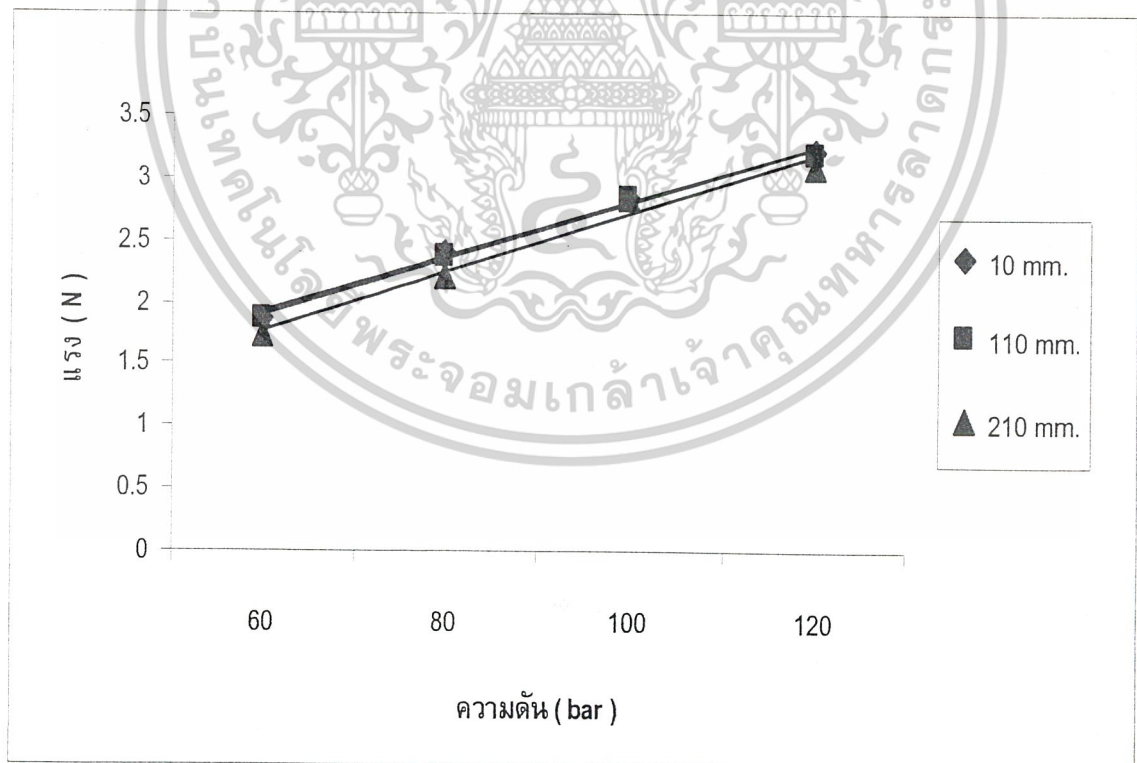


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

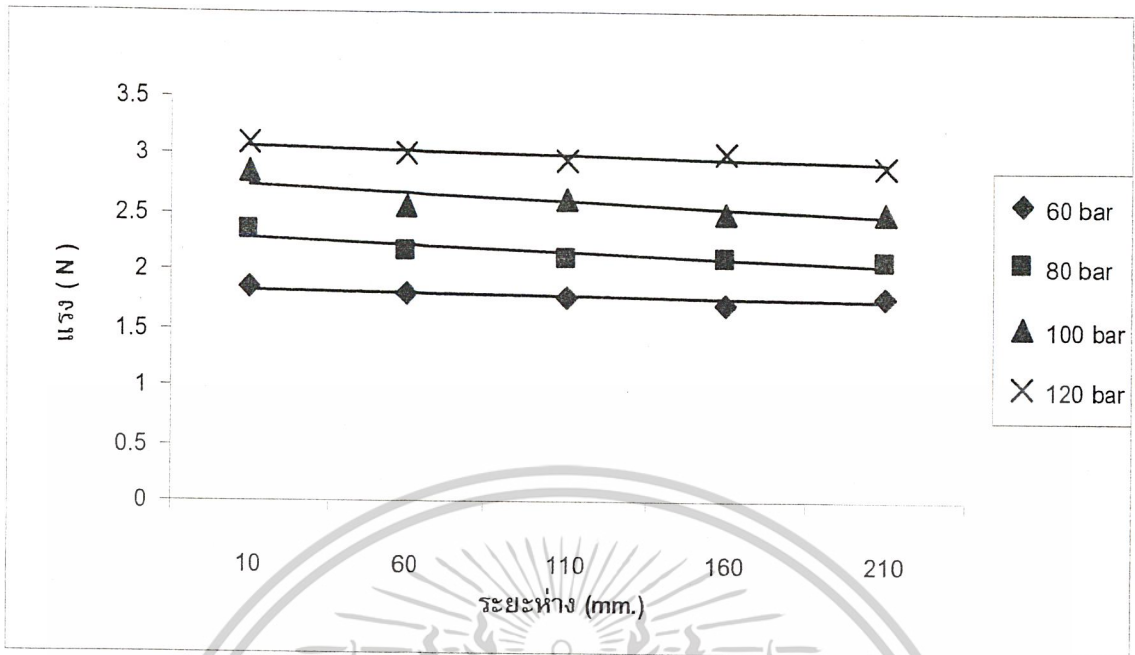


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 2.5

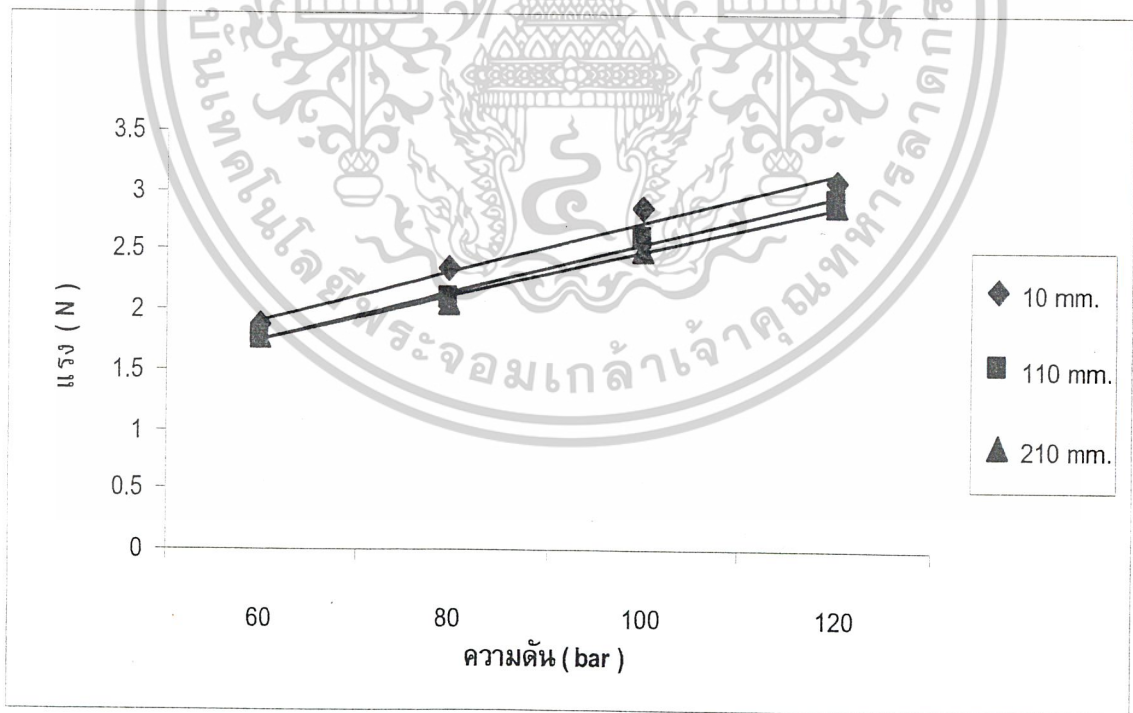


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

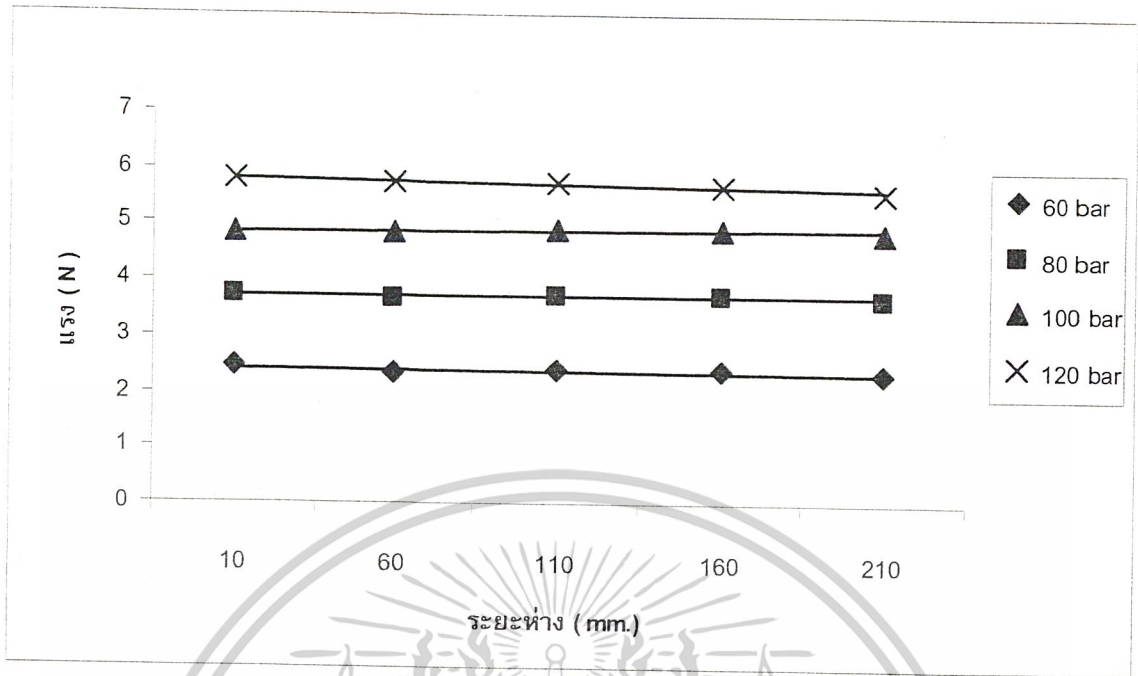


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 2.5

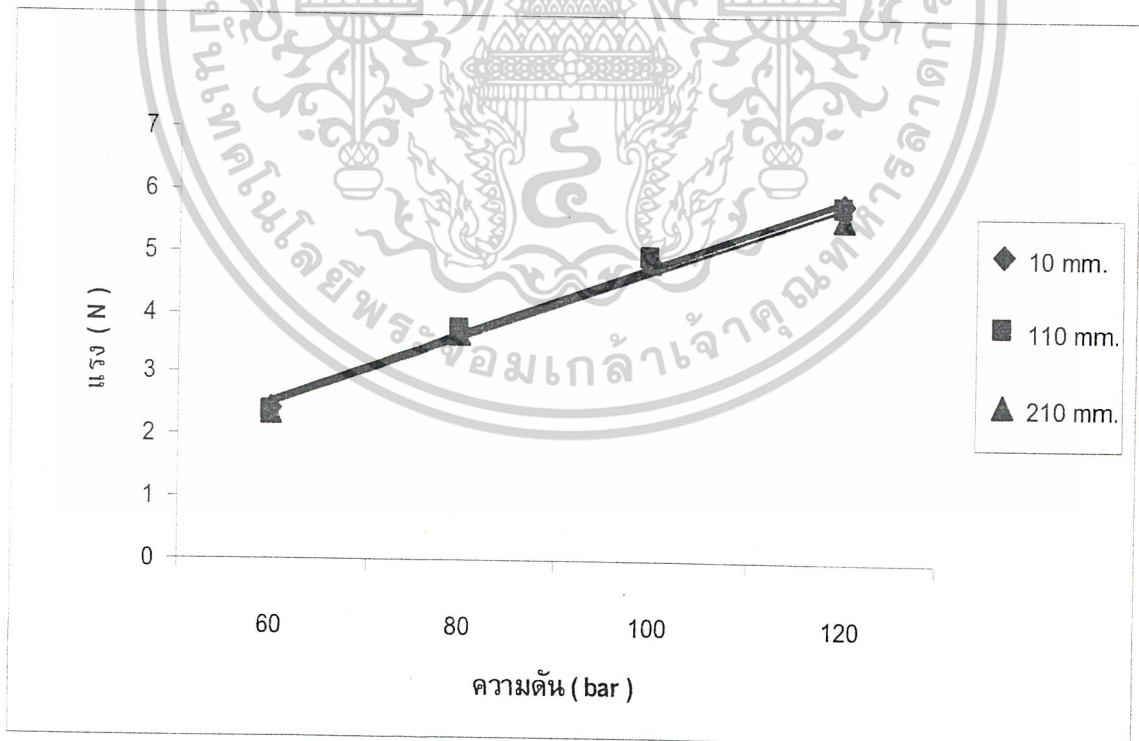


รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

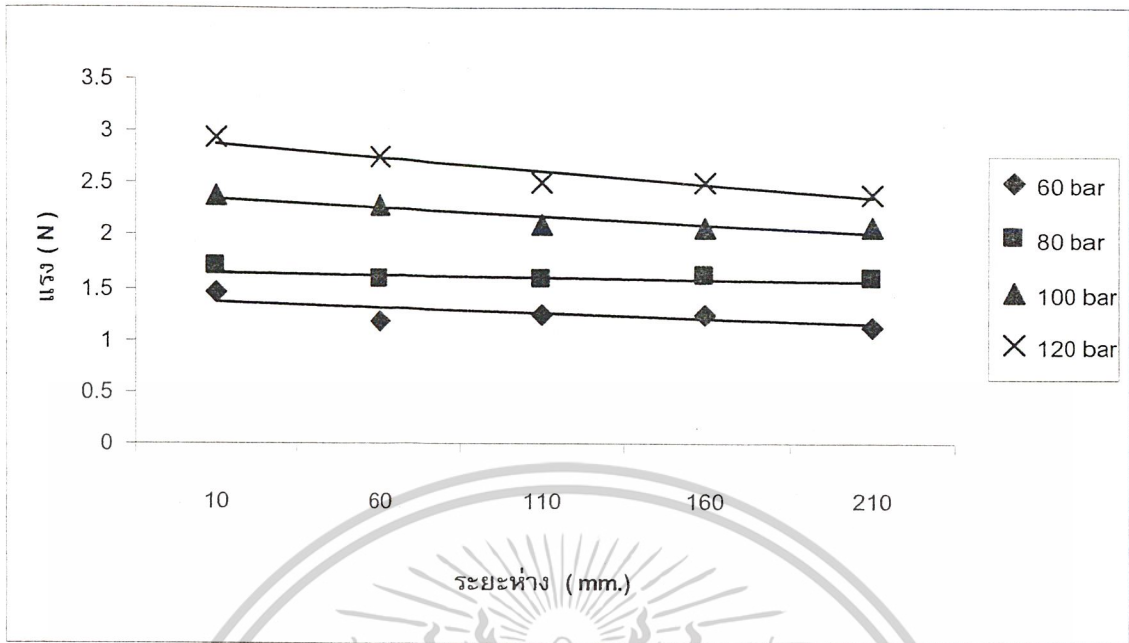


รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 1.25

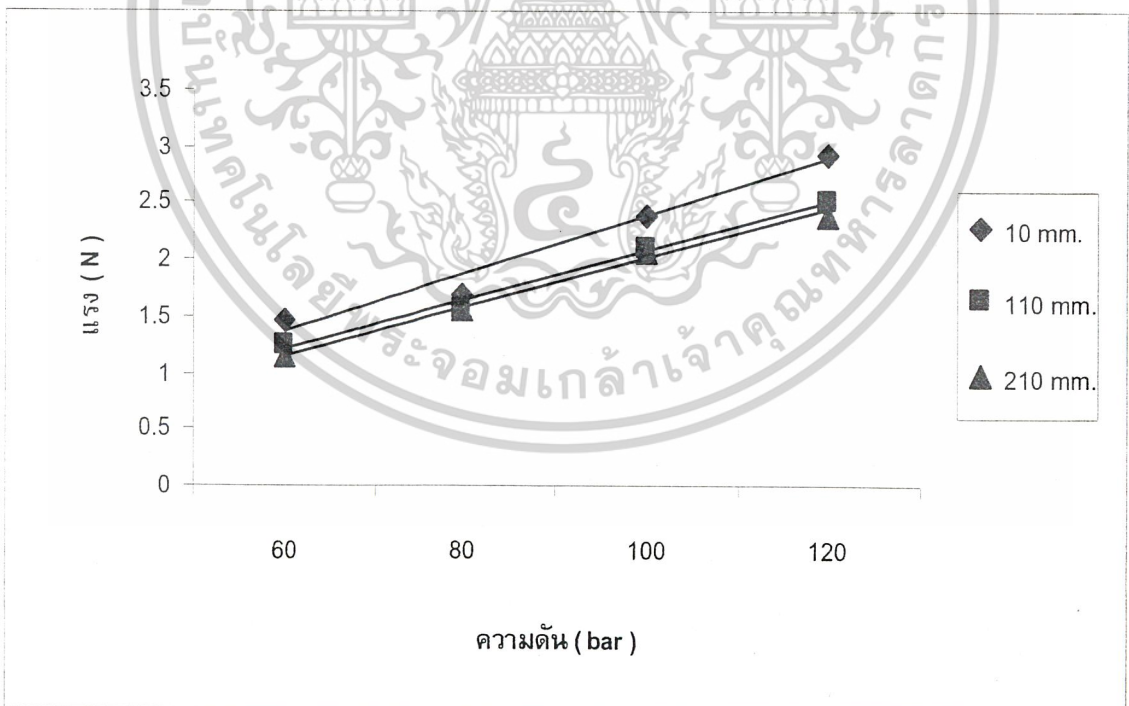


รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. AR = 1.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

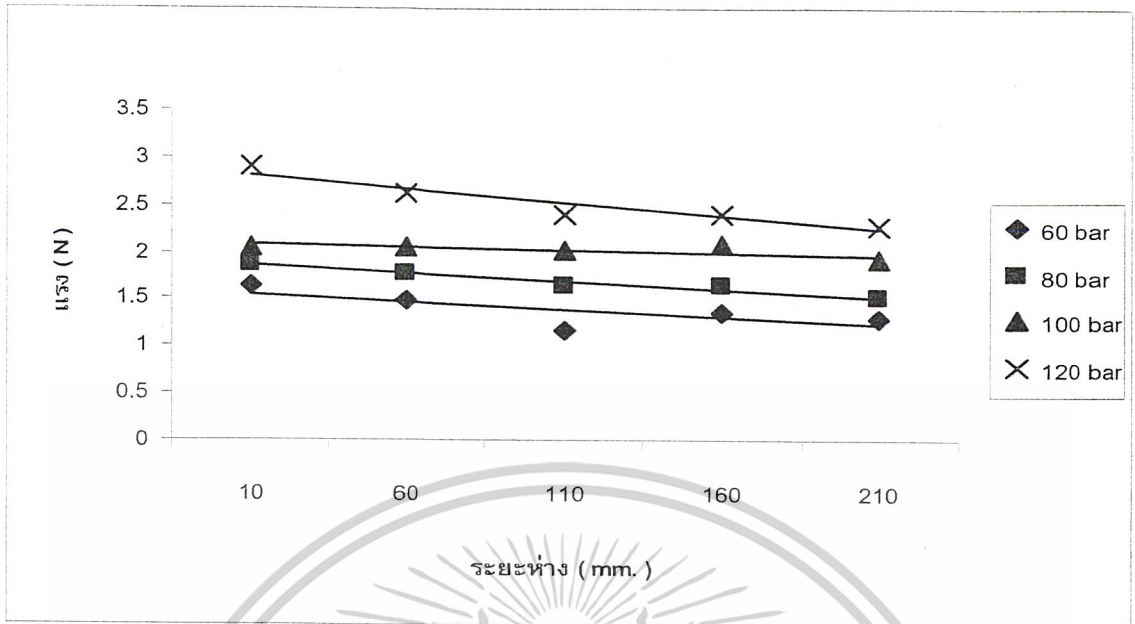


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 1.25

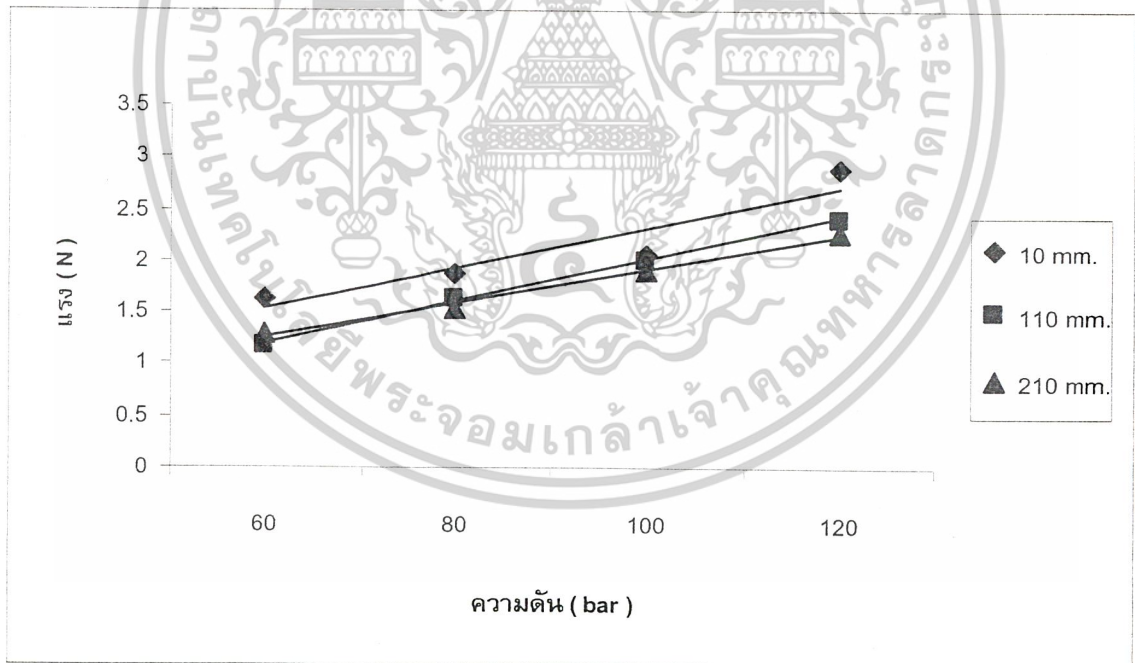


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. AR = 1.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

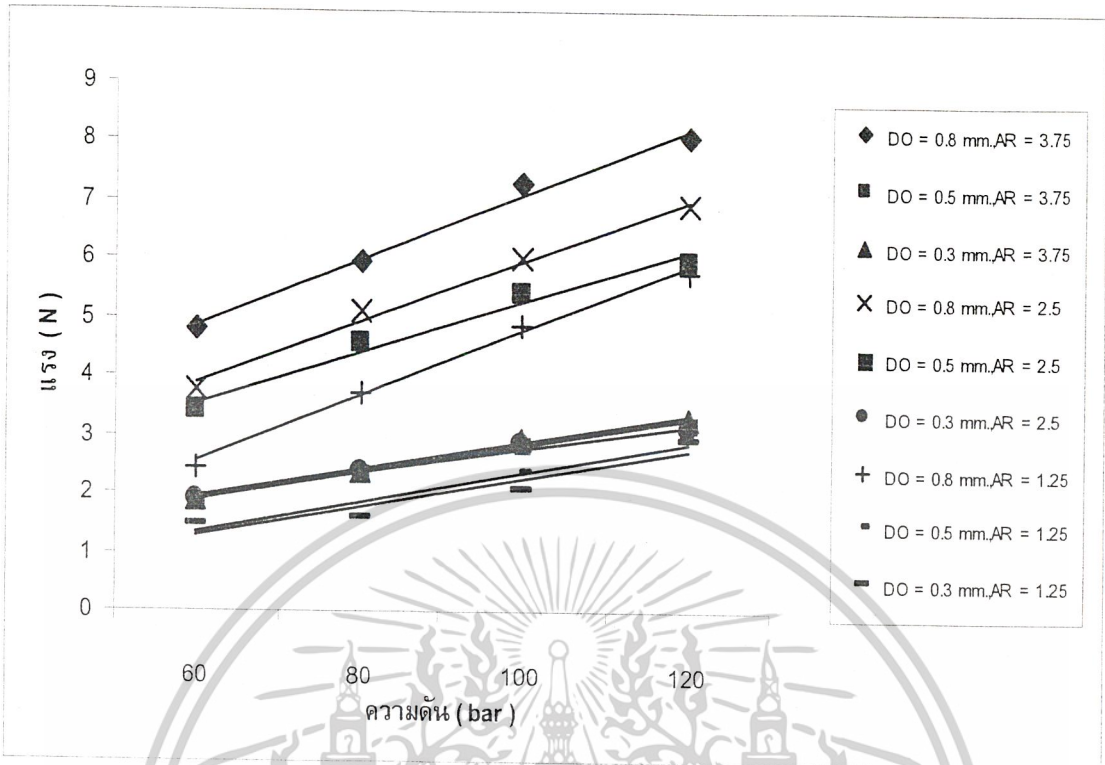


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างของหัวฉีดตัวที่ 9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 1.25

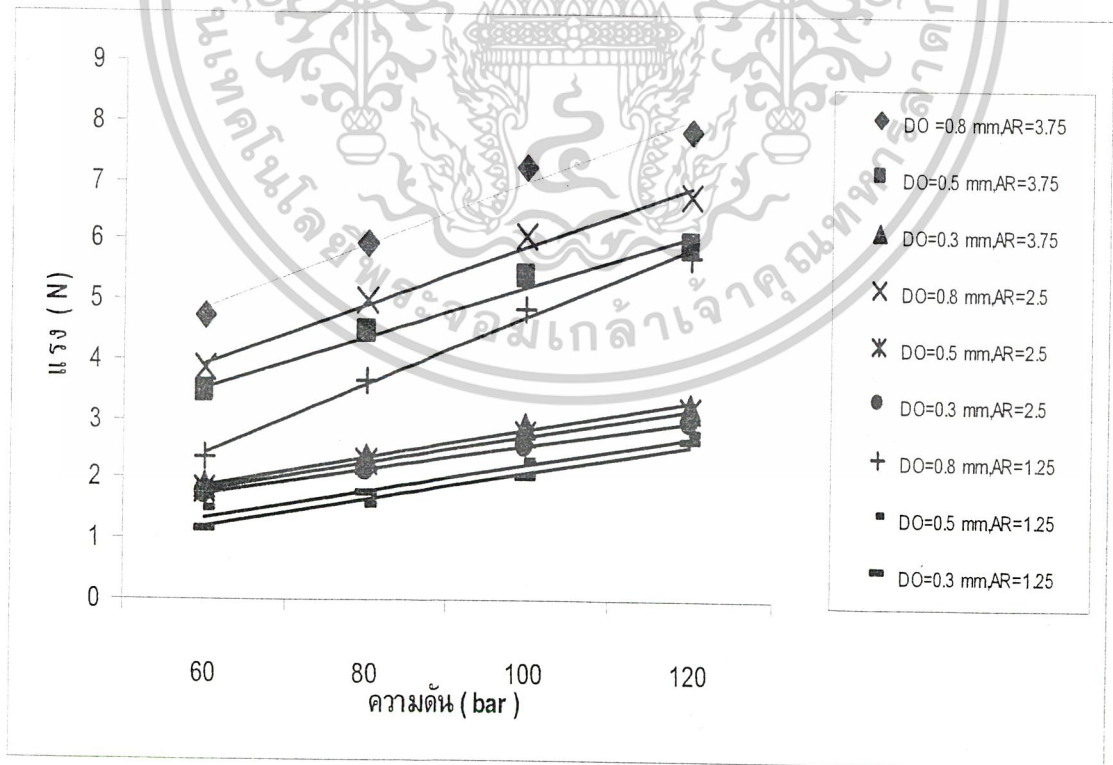


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดตัวที่ 9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. AR = 1.25

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะห่างและแรงกับความดันสามารถสรุปตามแนวโน้มของกราฟได้ว่า ที่ระยะห่างน้อยและความดันมากจะให้ค่าแรงปะทะที่สูงที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

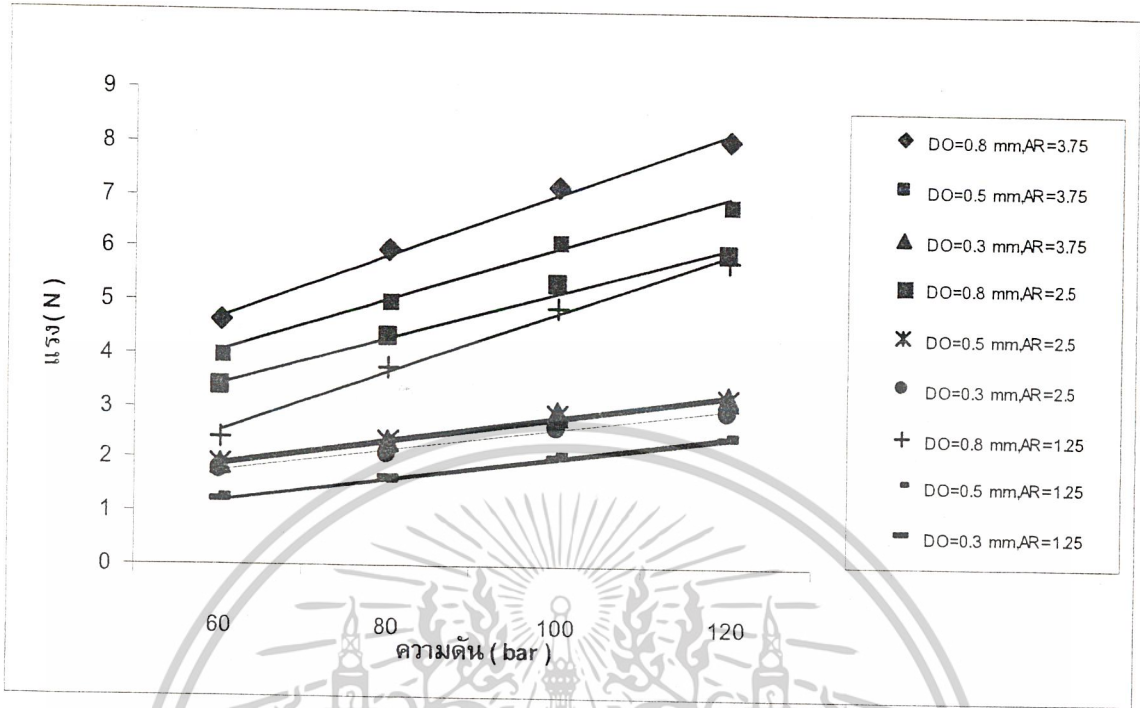


รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 10 mm.

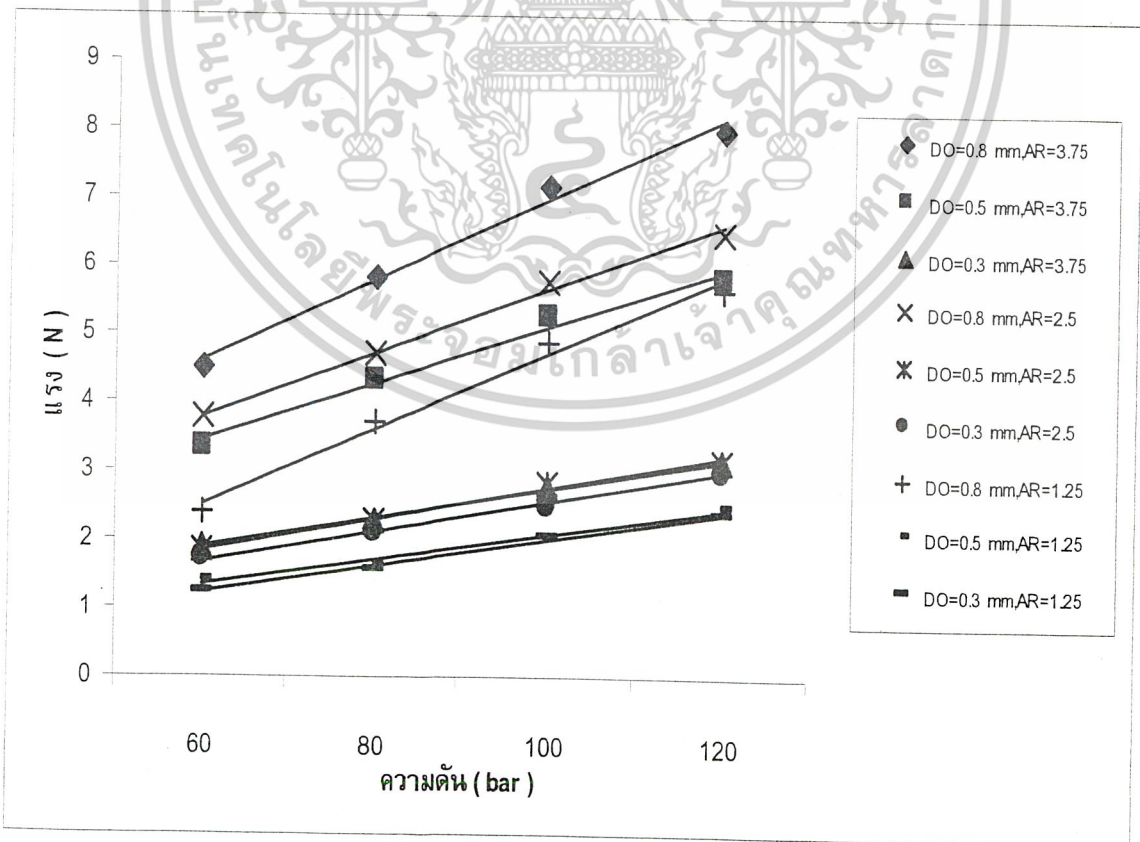


รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 60 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

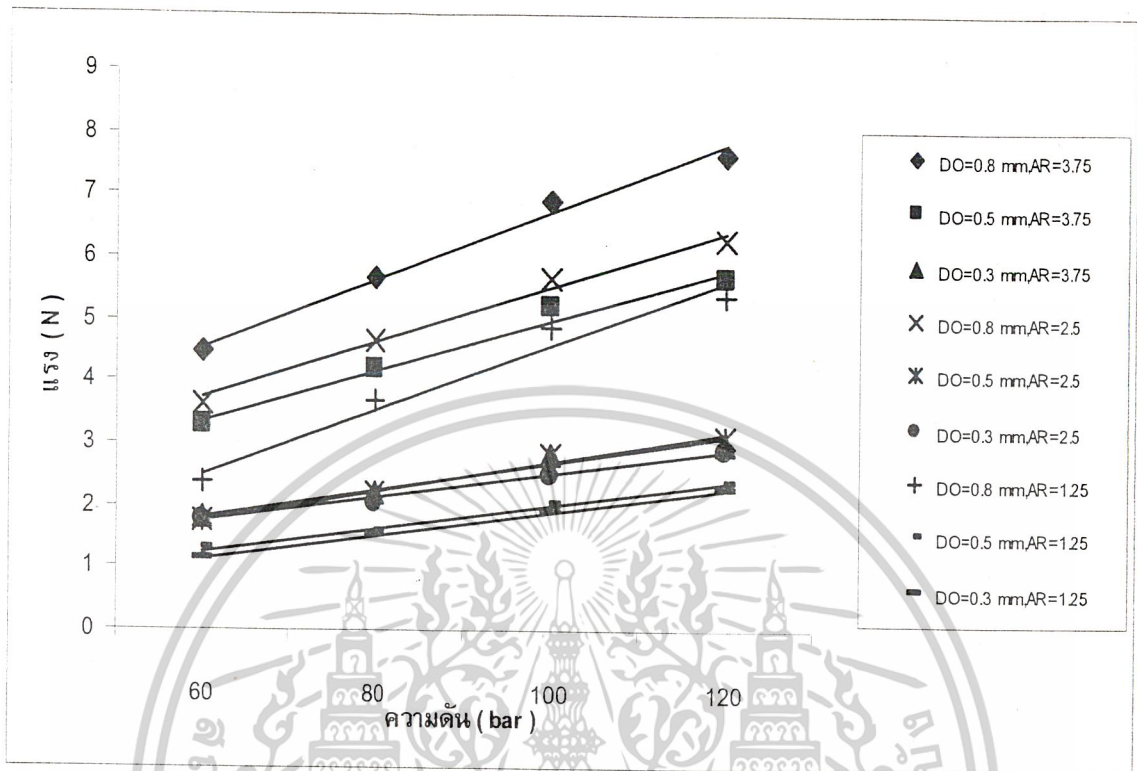


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 110 mm.



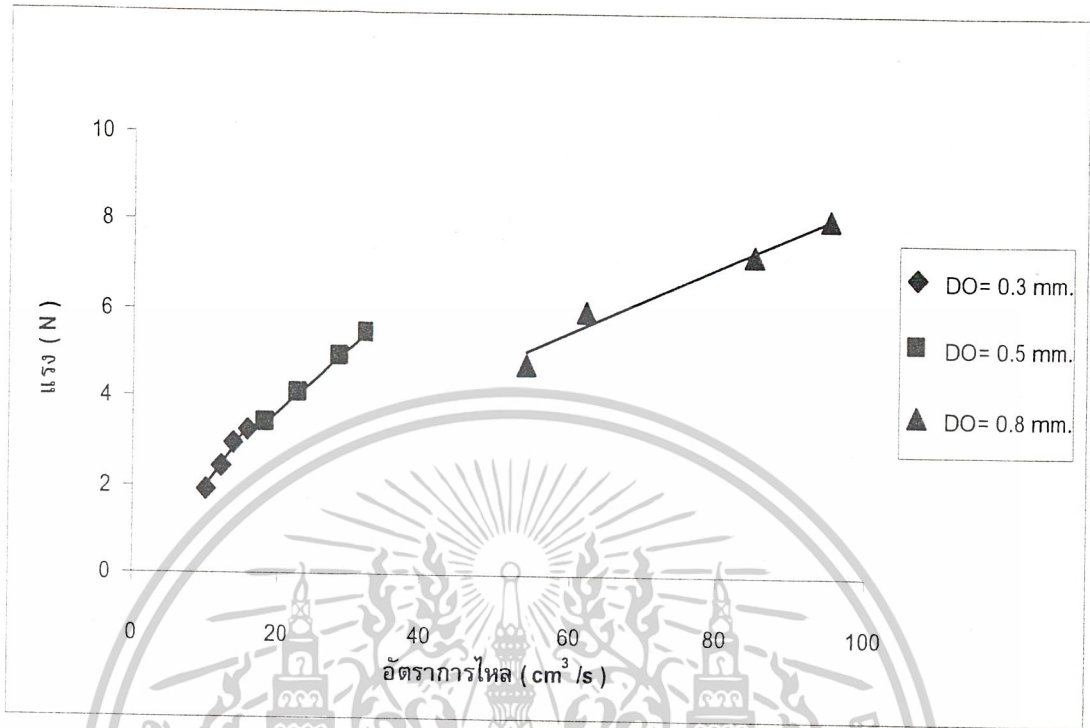
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 160 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

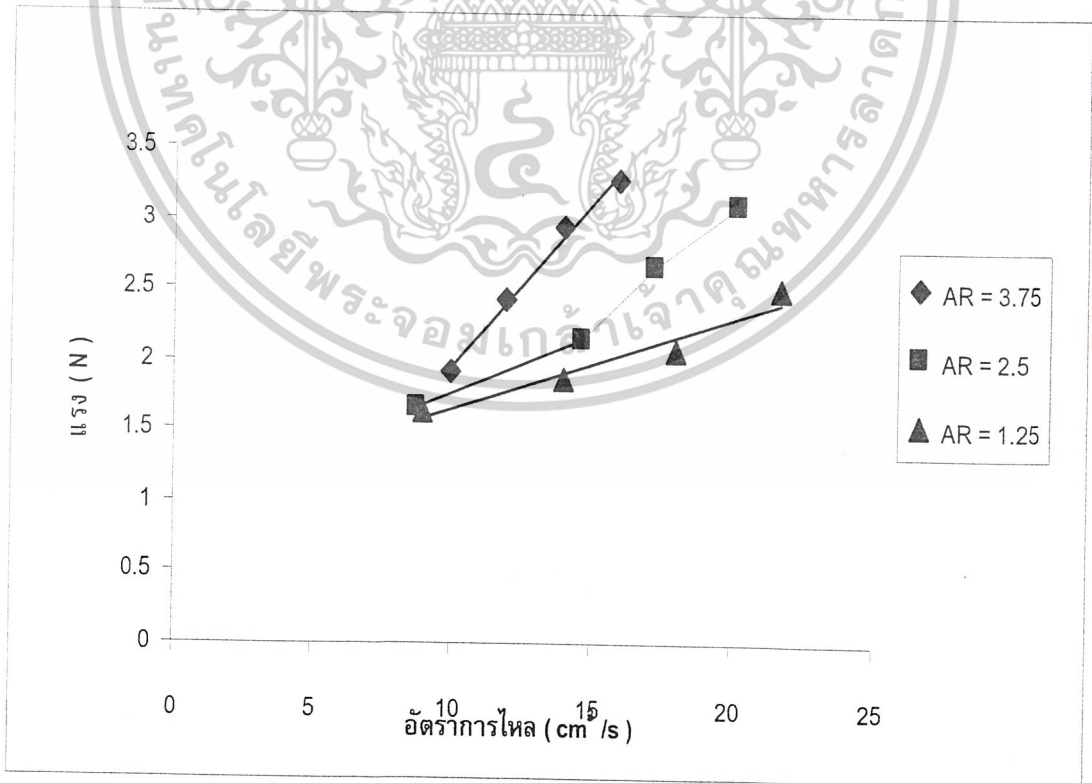


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันที่ระยะ 210 mm.

จากรูปที่ 4.19 ถึง 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความดันของหัวฉีดทุกตัว สามารถสรุปได้ว่า หัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm, Aspect Ratio 3.75 จะให้แรงมากที่สุดในทุกค่าความดัน รองลงมาเป็นหัวฉีดตัวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm, Aspect Ratio 2.5 แต่หัวฉีดตัวถัดไปเป็นหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm, Aspect Ratio 3.75 ซึ่งมีค่ามากกว่าหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm, Aspect Ratio 1.25 แสดงว่าหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm, ไม่ได้ให้ค่าแรงที่มากกว่าหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. เสมอไป กล่าวคือ ค่า Aspect Ratio มีผลทำให้เกิดแรงปะทะที่สูงขึ้น

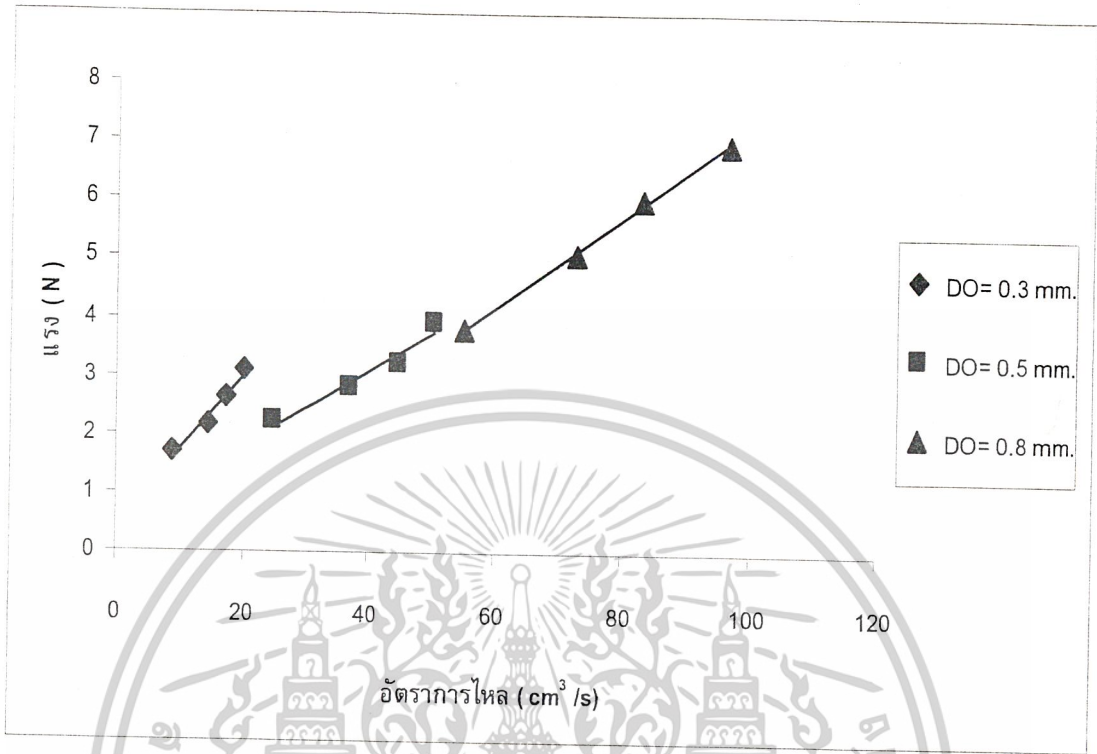


รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ AR = 3.75

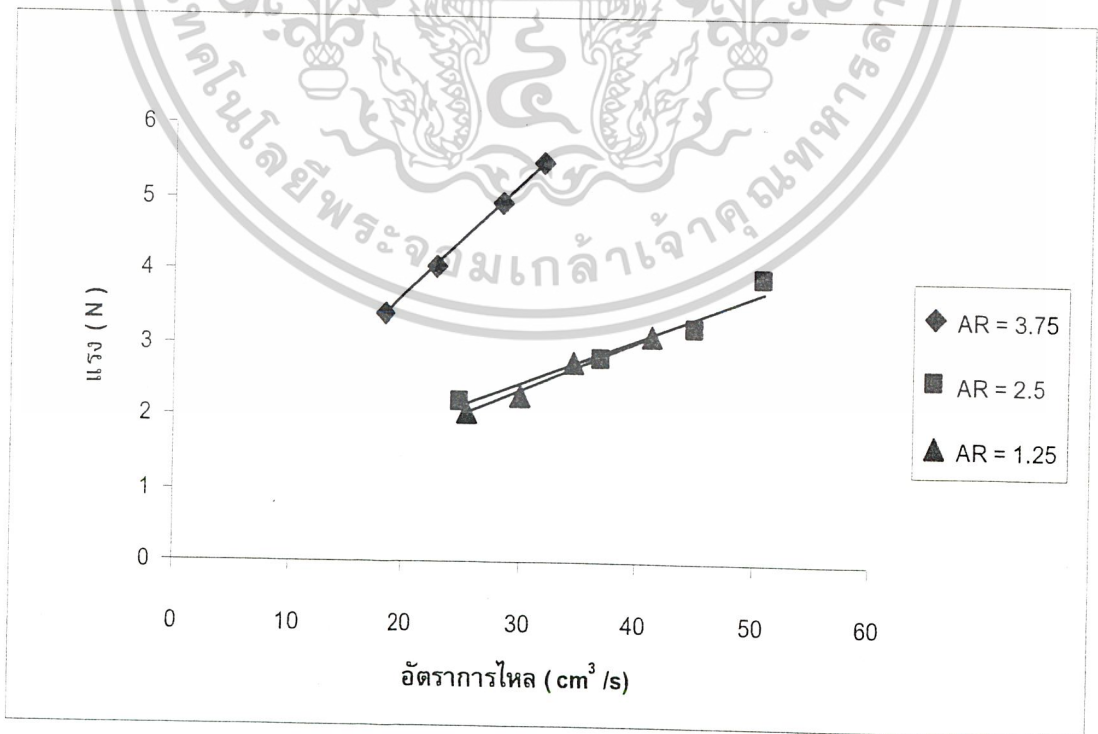


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ DO = 0.3 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

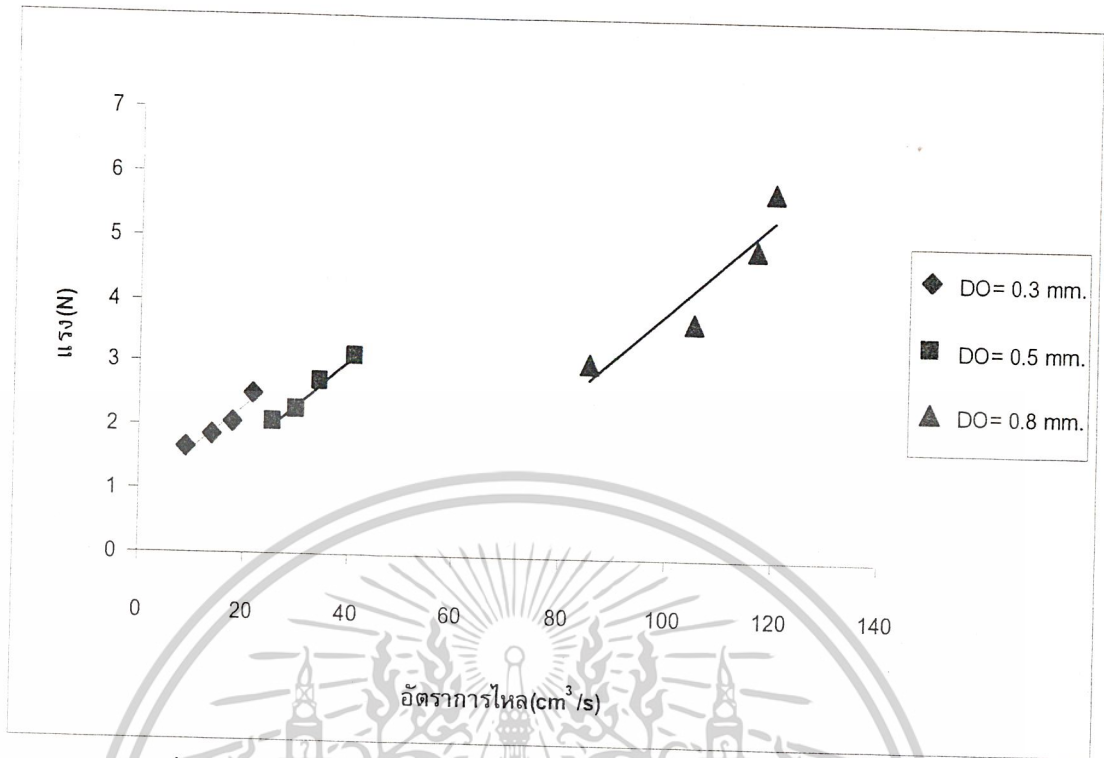


รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ AR = 2.5

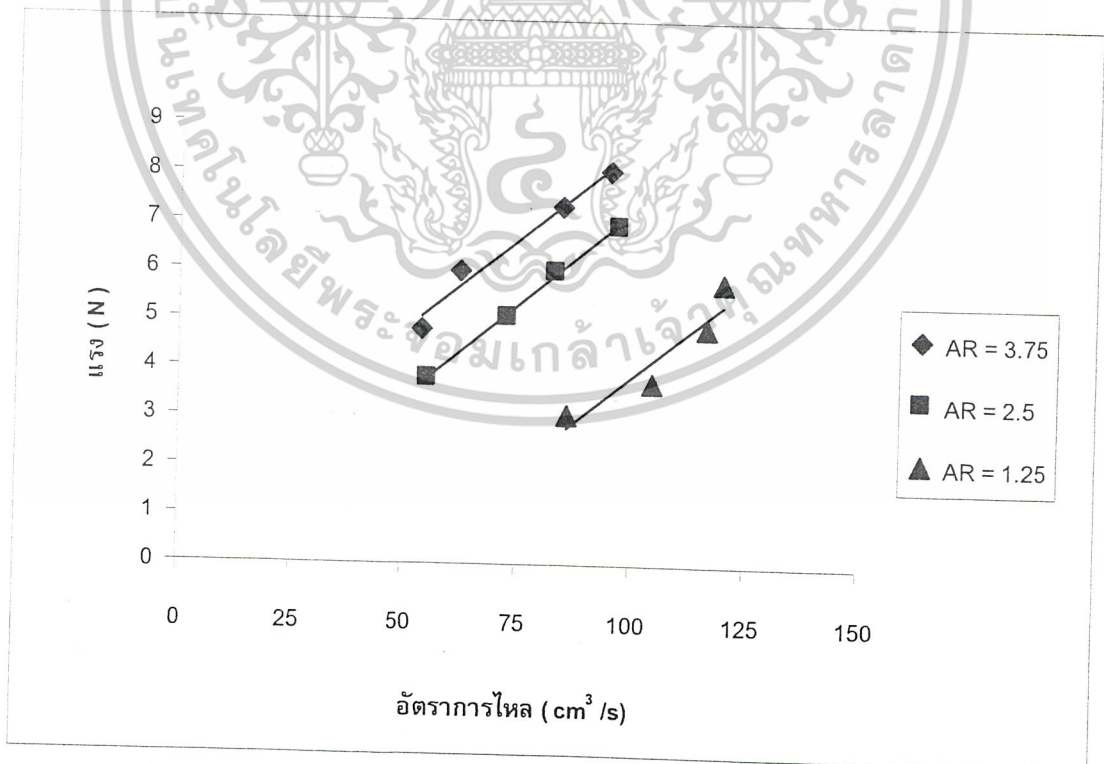


รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ DO = 0.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ AR = 1.25

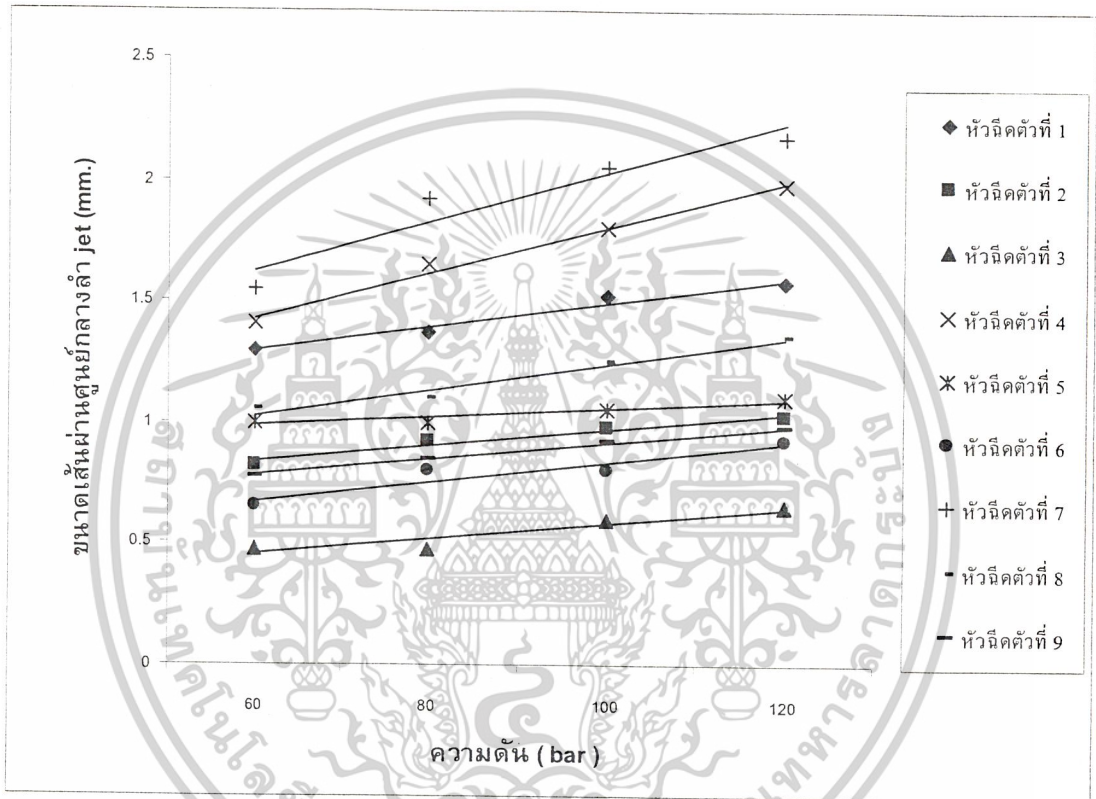


รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลที่ DO = 0.8 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

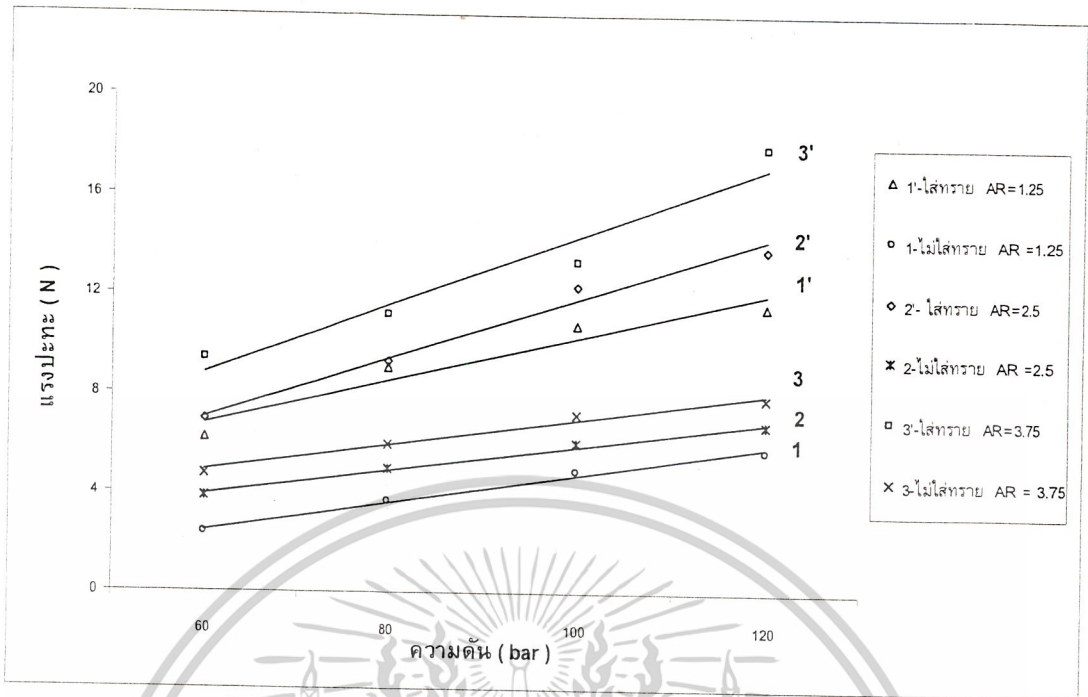
จากรูปที่ 4.24 , 4.26, 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลโดยให้ Aspect Ratio คงที่ และเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สรุปได้ว่า ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. จะให้อัตราการไหลและแรงปะทะมากที่สุด

แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.25, 4.27, 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับอัตราการไหลโดยให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่และเปลี่ยนแปลง Aspect Ratio สรุปได้ว่า หัวฉีดตัวที่มี Aspect Ratio มากจะให้แรงปะทะมากที่สุด

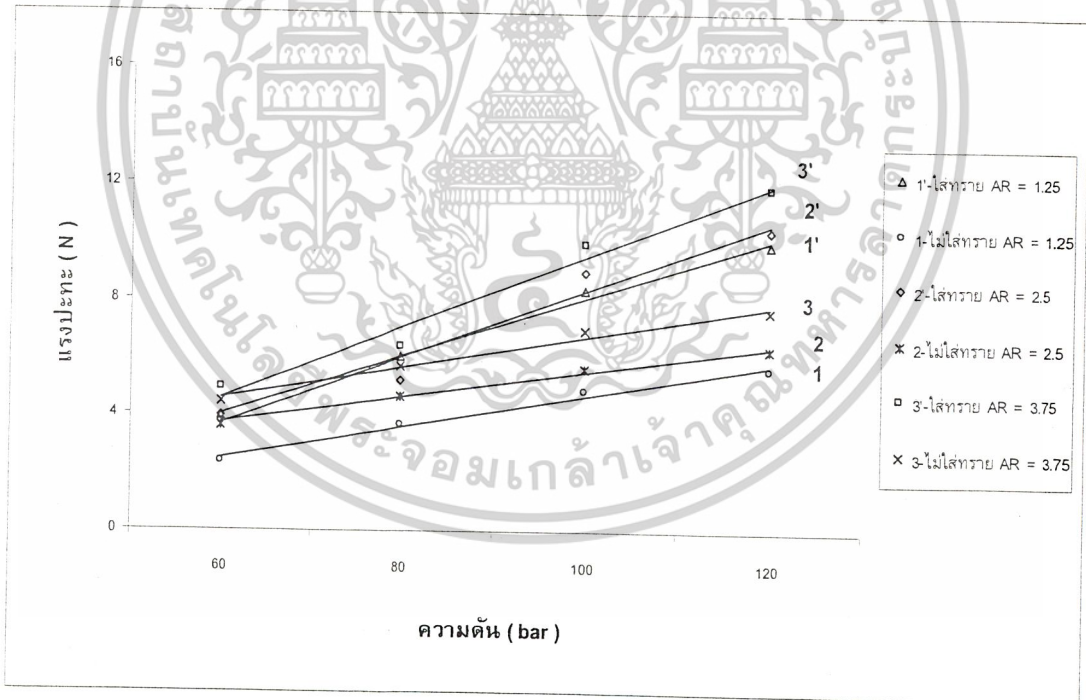


รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำ jet กับความดัน

จากรูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำ jet กับความดัน สรุปได้ว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำ jet จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. จะให้ขนาดของลำ jet ที่ใหญ่กว่าหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm. และ 0.3 mm. แต่เมื่อพิจารณาที่ Aspect Ratio โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ จะพบว่า หัวฉีดที่มี Aspect Ratio 1.25 จะให้ขนาดของลำ jet ที่ใหญ่กว่า หัวฉีดที่มี Aspect Ratio 2.5 และ 3.75 ตามลำดับ

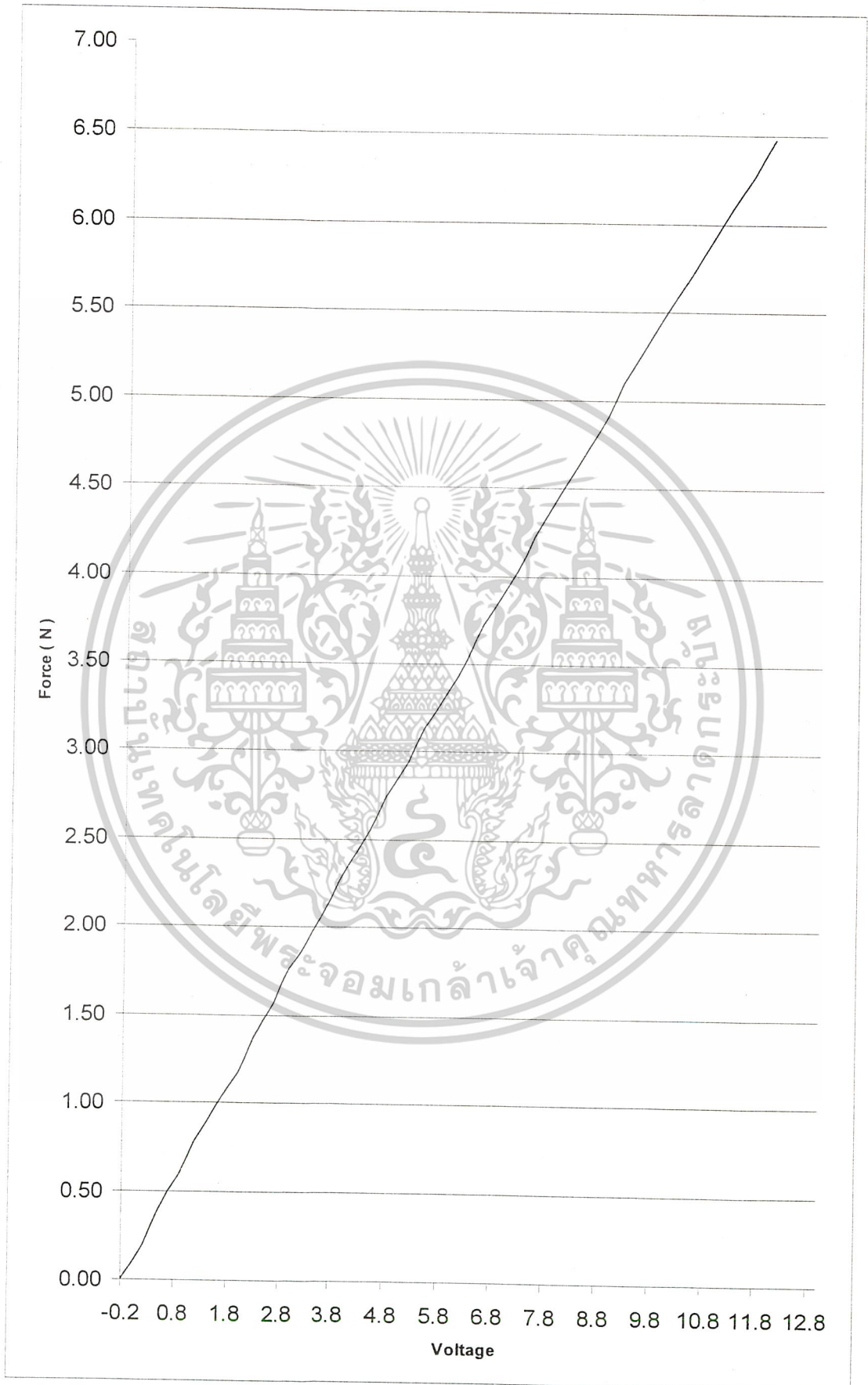


รูปที่ 4.31 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงปะทะของน้ำระหว่างใส่ทรายกับไม่ใส่ทรายที่ระยะ 60 mm. DO = 0.8 mm.

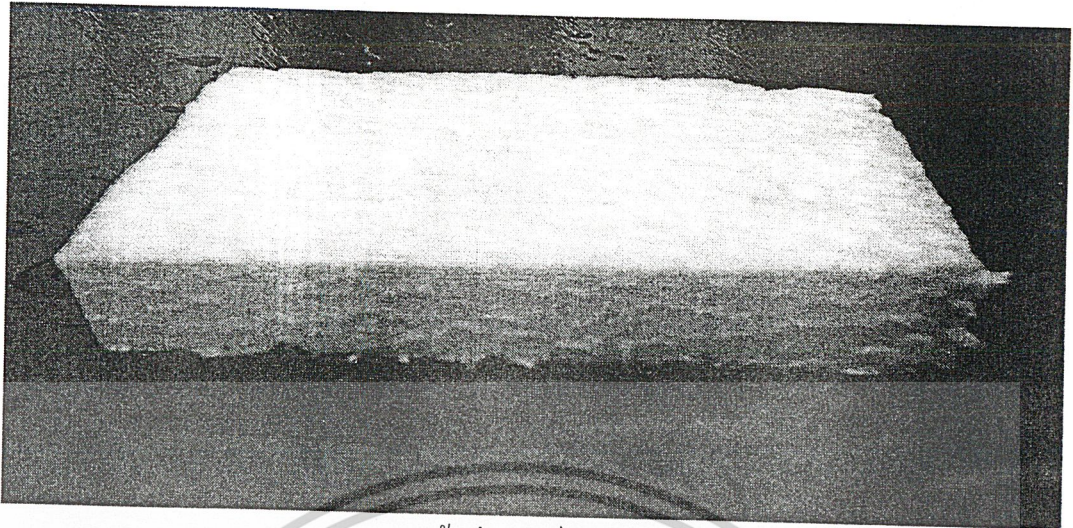


รูปที่ 4.32 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงปะทะของน้ำระหว่างใส่ทรายกับไม่ใส่ทรายของหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. สรุปลงได้ว่า หัวฉีดที่ฉีดน้ำที่ใส่ทรายจะให้แรงปะทะที่มากกว่าหัวฉีดที่ฉีดน้ำที่ไม่ได้ใส่ทราย ในทุกค่าความดัน

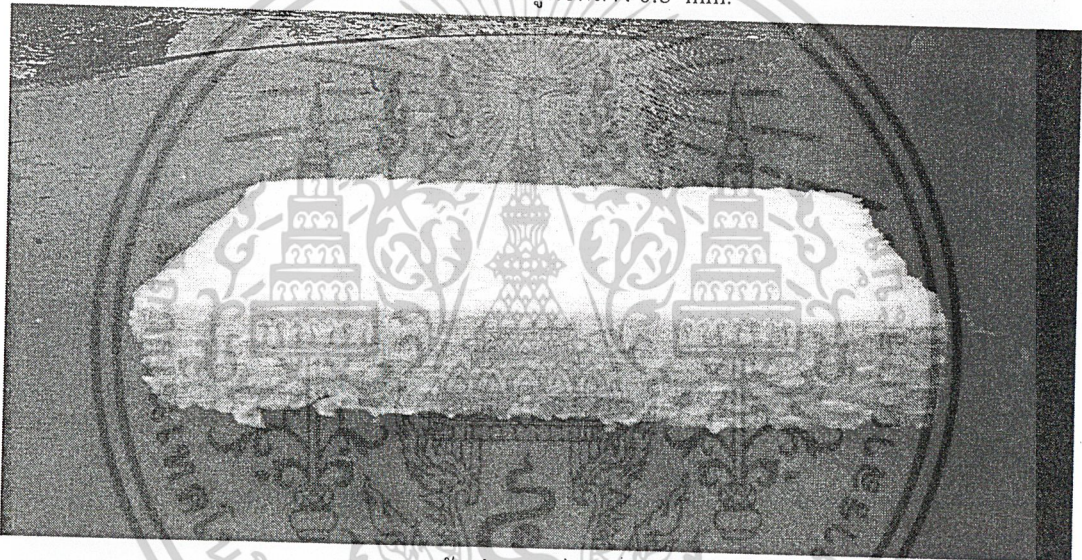
จากรูปที่ 4.32 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงปะทะของน้ำระหว่างใส่ทรายกับไม่ใส่ทรายของหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm. สรุปลงได้ว่า หัวฉีดที่ฉีดน้ำที่ใส่ทรายจะให้แรงปะทะที่มากกว่าหัวฉีดที่ฉีดน้ำที่ไม่ได้ใส่ทราย ในทุกค่าความดัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกับ Voltage ที่ใช้ในกรณี Calibrate
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm.

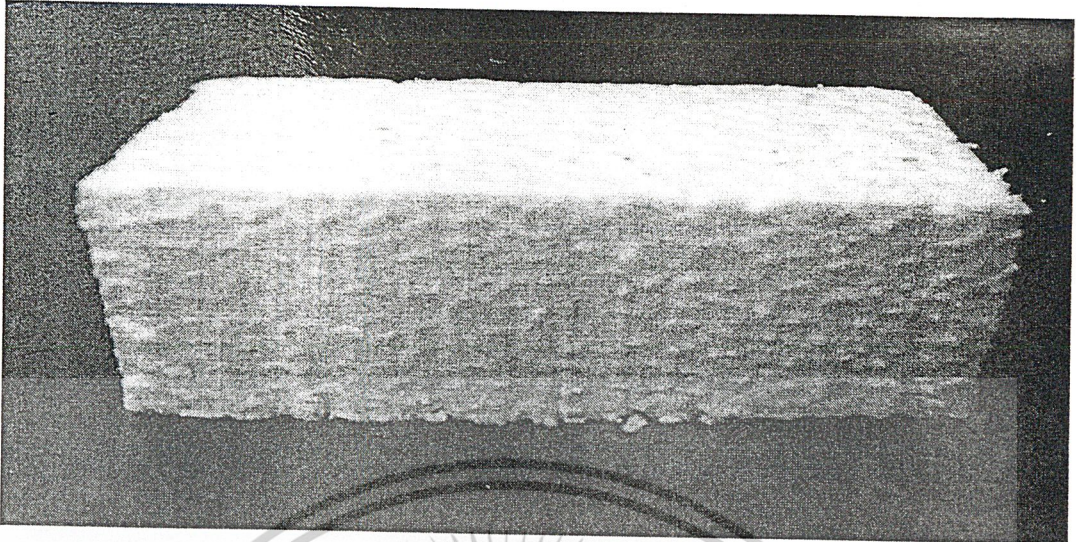


ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm.

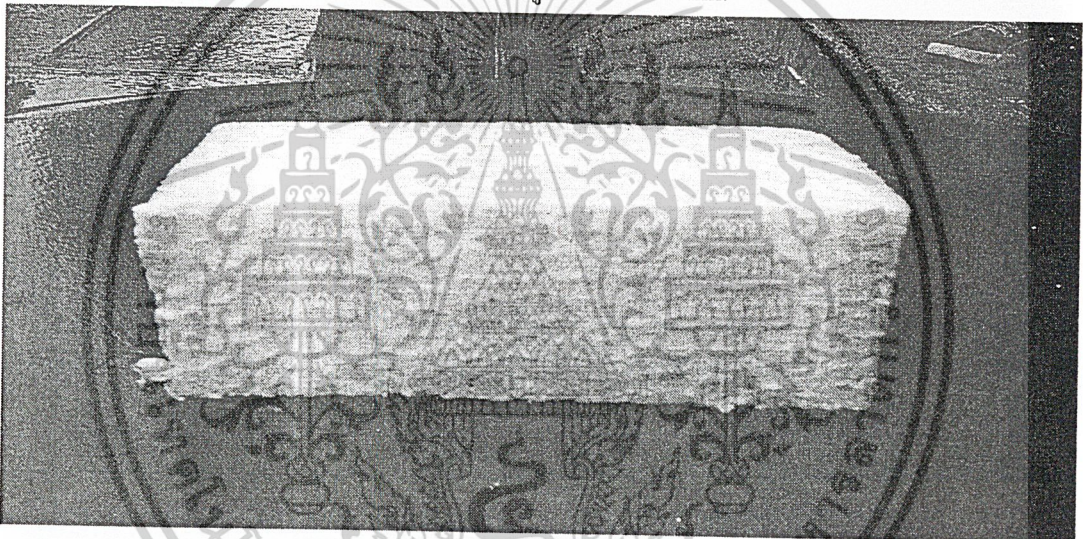


ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm.

รูปที่ 4.35 แสดงภาพถ่ายการยัดของไฟเบอร์ที่มีความหนา 15 mm และ AR = 3.75 โยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในท้องถิ่นเท่านั้น ไม่ควรนำออกนอกพื้นที่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm.

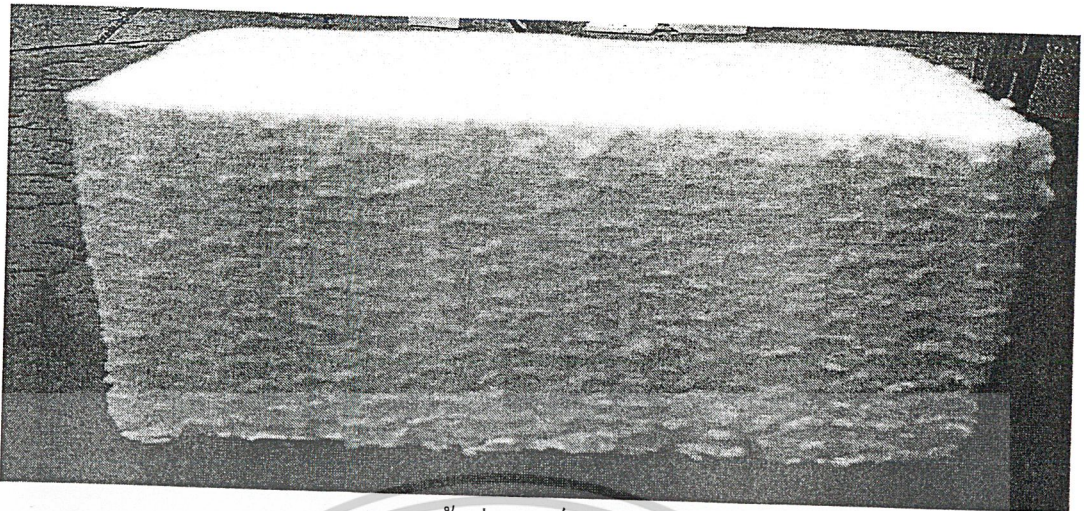


ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm.

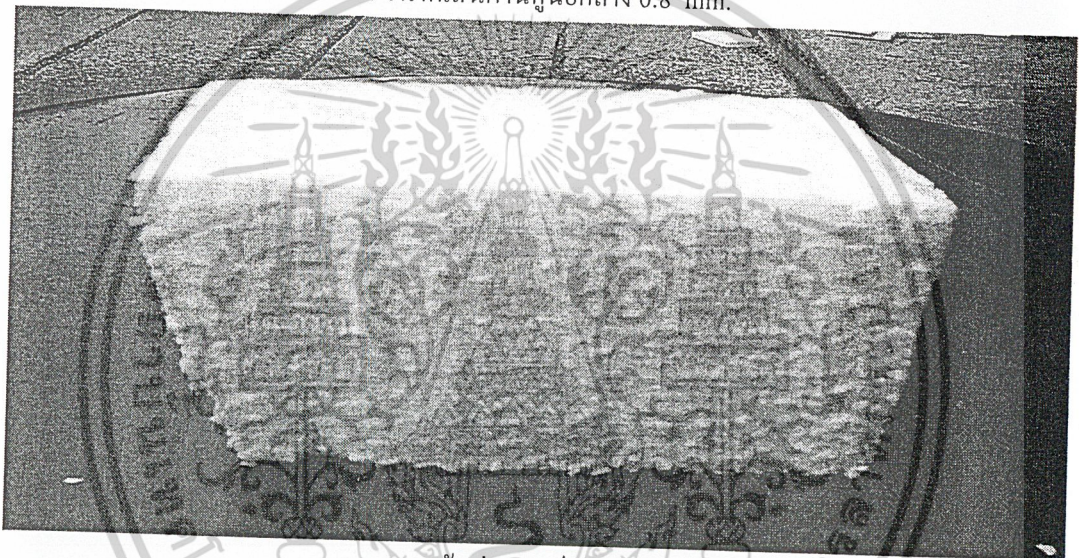


ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm.

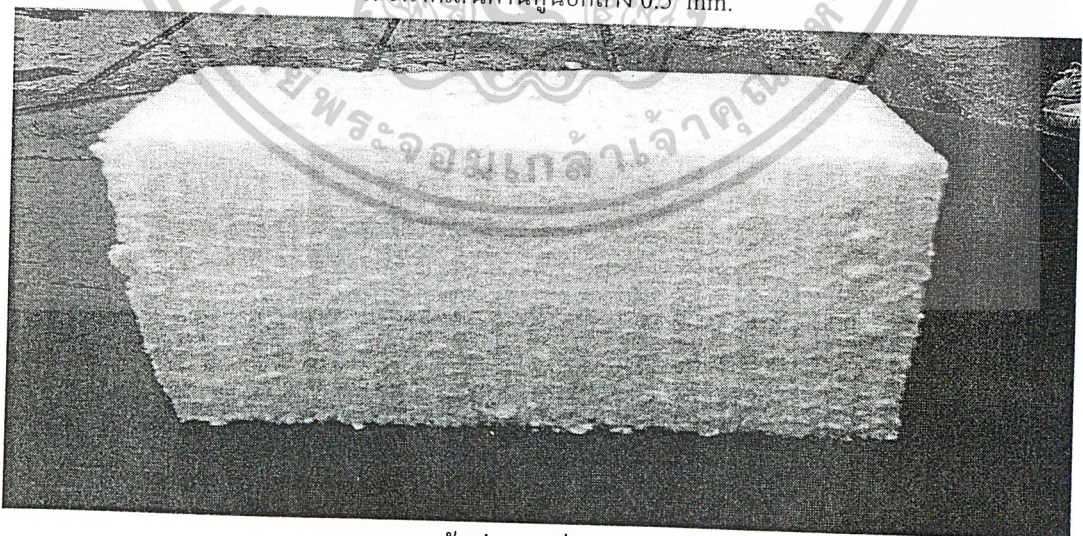
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.36 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างของไฟมที่มีความหนา 35 mm. และ AR = 3.75
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm.



ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm.



ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm.

รูปที่ 4.37 แสดงภาพถ่ายฝักรอยตัดของโฟมที่มีความหนา 50 mm. และ $AR = 3.75$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเชิงทดลองหัวฉีดแรงดันสูง โดยมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อระบบ สามารถสรุปการทดลองได้ดังนี้ คือ

1. หัวฉีดทุกตัวจะให้ค่าแรงปะทะที่มากที่สุด เมื่อความดันที่ 120 bar ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับ คานรองรับที่ 10 mm.
2. เมื่อพิจารณาที่ค่า Aspect Ratio ของหัวฉีดแต่ละตัวพบว่า หัวฉีดที่มีค่า Aspect Ratio 3.75 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 0.8 mm. จะให้ค่าแรงปะทะที่มากที่สุด
3. หัวฉีดที่มีขนาด Aspect Ratio 3.75 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. จะให้ประสิทธิภาพในการตัดได้ดีกว่า
4. เมื่อทำการผสมทรายกับน้ำเพื่อใช้ในการทดลองจะพบว่า แรงปะทะที่เกิดจากน้ำที่ผสมทรายจะให้ค่าแรงปะทะที่สูงกว่าแรงปะทะที่เกิดจากน้ำธรรมดาประมาณ 30 – 50 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเชิงทดลองหัวฉีดแรงดันสูงนี้ เป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาพฤติกรรมการไหลของ น้ำผ่านหัวฉีดแรงดันสูง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน, ระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงคานรองรับ, Aspect Ratio และการผสมทรายในน้ำจะมีผลอย่างไรบ้าง แต่อาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้มีประสิทธิภาพ ดีมากขึ้น ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยและพัฒนาต่อไป

1. เลือกใช้ปั๊มที่ให้ความดันสูงๆ เพื่อที่จะเปลี่ยนช่วงความดันได้กว้างๆ
2. ทำให้พื้นผิวด้านในของหัวฉีดมีความเรียบ
3. เพิ่มปั๊มที่สามารถดูดทรายเพื่อทำให้อัตราการไหลของทรายคงที่
4. เครื่องมือที่ใช้วัดขนาดลำ jet อาจจะทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อน ควรที่จะมีการใช้ระบบลำแสง วัดแทน
5. ถ้าต้องการให้ขนาดของสัญญาณ Out put (Voltage) มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความละเอียดควรมี วงจรขยายสัญญาณต่อระหว่าง Multi meter และ วงจรปริคต์
6. ควรเลือกใช้วัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนและไม่เกิดสนิมในการทำหัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] C.C.Parry and H.R.Lissner, "The Strain Gauge Primer", McGraw-Hill Book Company, pp.55-61
- [2] James W.Dally, "Instrumentation for Engineering Measurements", John Wiley & Sons : 1993
- [3] Robert W.Fox and Alan T.Mcdonald., "Introduction to Fluid Mechanics", John Wiley & Sons, pp.391-397.
- [4] M.K.Jackson and T.W.Davieds, "Nozzle Design for Coherent Water Jet Production", Department of Chemical Engineering, Exeter University, Exeter, Devon, U.K.
- [5] บรรจบ อรชร, "กลศาสตร์ของแข็ง", ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพมหานคร, หน้า 8-1 ถึง 8-2
- [6] นพดล อินนา, "กลศาสตร์ของไหล", บริษัทซีเคยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) : 2521
- [7] มนตรี พิรุณเกษตร, "กลศาสตร์ของไหล", บริษัทวิทย์พัฒน์ จำกัด : 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 1
(DO=0.8 mm. AR=3.75)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	4.81	5.985	7.31	8.09
60	4.76	5.985	7.21	7.87
110	4.61	5.94	7.16	8.04
160	4.51	5.84	7.16	7.99
210	4.46	5.66	6.90	7.65

ตารางที่ 2 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 2
(DO=0.5 mm. AR=3.75)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	3.39	4.56	5.42	5.985
60	3.44	4.45	5.40	5.985
110	3.39	4.32	5.30	5.89
160	3.34	4.32	5.30	5.84
210	3.26	4.19	5.20	5.64

ตารางที่ 3 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 3
(DO=0.3 mm. AR=3.75)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	1.91	2.40	2.94	3.27
60	1.87	2.35	2.89	3.24
110	1.87	2.35	2.89	3.24
160	1.87	2.30	2.80	3.16
210	1.82	2.18	2.85	3.01

ตารางที่ 4 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 4

(DO=0.8 mm. AR=2.5)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	3.78	5.10	6.03	6.92
60	3.87	4.98	6.08	6.77
110	3.97	5.03	6.13	6.87
160	3.78	4.71	5.79	6.52
210	3.63	4.66	5.64	6.28

ตารางที่ 5 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 5

(DO=0.5 mm. AR=2.5)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	1.87	2.40	2.85	3.22
60	1.80	2.30	2.80	3.16
110	1.87	2.35	2.85	3.19
160	1.82	2.30	2.85	3.19
210	1.75	2.22	2.85	3.09

ตารางที่ 6 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 6

(DO=0.3 mm. AR=2.5)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	1.87	2.35	2.85	3.09
60	1.79	2.16	2.55	3.01
110	1.77	2.11	2.62	2.94
160	1.71	2.11	2.50	3.01
210	1.77	2.06	2.50	2.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 7
(DO=0.8 mm. AR=1.25)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	2.45	3.73	4.86	5.79
60	2.35	3.66	4.86	5.74
110	2.40	3.73	4.91	5.74
160	2.40	3.73	4.91	5.69
210	2.35	3.66	4.86	5.59

ตารางที่ 8 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 8
(DO=0.5mm. AR=1.25)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	1.47	1.70	2.40	2.94
60	1.18	1.57	2.28	2.75
110	1.25	1.57	2.11	2.50
160	1.25	1.62	2.06	2.50
210	1.13	1.57	2.06	2.40

ตารางที่ 9 แสดงผลของแรงที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างและความดันของหัวฉีดตัวที่ 9
(DO=0.3 mm. AR=1.25)

ระยะห่าง (mm.)	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
10	1.64	1.87	2.06	2.89
60	1.47	1.77	2.06	2.62
110	1.18	1.64	2.01	2.40
160	1.37	1.64	2.08	2.40
210	1.30	1.52	1.91	2.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 แสดงอัตราการไหลและแรง เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความดัน ที่ AR = 3.75

AR=3.75	อัตราการไหล (cm ³ /s)				แรง (N)			
	ความดัน 60 bar	ความดัน 80 bar	ความดัน 100 bar	ความดัน 120 bar	ความดัน 60 bar	ความดัน 80 bar	ความดัน 100 bar	ความดัน 120 bar
0.3	10.00	12.00	14.00	16.00	1.91	2.42	2.94	3.27
0.5	18.40	22.85	28.42	32.00	3.39	4.06	4.92	5.475
0.8	54.17	62.17	84.98	95.00	4.81	5.985	7.31	8.09

ตารางที่ 11 แสดงอัตราการไหลและแรง เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความดัน ที่ AR = 2.5

AR=2.5	อัตราการไหล (cm ³ /s)				แรง (N)			
	ความดัน 60 bar	ความดัน 80 bar	ความดัน 100 bar	ความดัน 120 bar	ความดัน 60 bar	ความดัน 80 bar	ความดัน 100 bar	ความดัน 120 bar
0.3	8.76	14.69	17.26	20.20	1.67	2.15	2.65	3.09
0.5	25.00	37.00	45.00	51.00	2.20	2.80	3.20	3.90
0.8	55.46	72.72	83.20	97.00	3.78	5.10	6.03	6.92

ตารางที่ 12 แสดงอัตราการไหลและแรง เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความดัน ที่ AR = 1.25

AR=1.25	อัตราการไหล (cm ³ /s)				แรง (N)			
	ความดัน 60 bar	ความดัน 80 bar	ความดัน 100 bar	ความดัน 120 bar	ความดัน 60 bar	ความดัน 80 bar	ความดัน 100 bar	ความดัน 120 bar
0.3	9.05	14.06	18.02	21.70	1.64	1.87	2.06	2.50
0.5	25.60	30.25	34.60	41.35	2.06	2.28	2.74	3.12
0.8	85.83	105.01	116.5	120.00	3.07	3.73	4.86	5.79

ตารางที่ 13 แสดงขนาดของลำ jet เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และ AR

Diameter	AR	ความดัน 60 bar			ความดัน 80 bar			ความดัน 100 bar			ความดัน 120 bar		
		ขนาดลำ jet ครั้งที่ 1 (mm.)	ขนาดลำ jet ครั้งที่ 2 (mm.)	ขนาดลำ jet เฉลี่ย (mm.)	ขนาดลำ jet ครั้งที่ 1 (mm.)	ขนาดลำ jet ครั้งที่ 2 (mm.)	ขนาดลำ jet เฉลี่ย (mm.)	ขนาดลำ jet ครั้งที่ 1 (mm.)	ขนาดลำ jet ครั้งที่ 2 (mm.)	ขนาดลำ jet เฉลี่ย (mm.)	ขนาดลำ jet ครั้งที่ 1 (mm.)	ขนาดลำ jet ครั้งที่ 2 (mm.)	ขนาดลำ jet เฉลี่ย (mm.)
0.3 mm.	1.25	0.80	0.75	0.775	0.90	0.80	0.85	0.90	0.95	0.925	1.00	0.95	0.975
	2.5	0.60	0.70	0.65	0.70	0.90	0.80	0.80	0.80	0.80	0.95	0.90	0.925
	3.75	0.50	0.45	0.475	0.45	0.50	0.475	0.60	0.60	0.60	0.60	0.70	0.65
0.5 mm.	1.25	1.00	1.10	1.05	1.10	1.10	1.10	1.30	1.20	1.25	1.30	1.40	1.35
	2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10	1.05	1.10	1.10	1.10
	3.75	0.85	0.80	0.825	0.95	0.90	0.925	0.95	1.00	0.975	1.00	1.05	1.025
0.8 mm.	1.25	1.65	1.45	1.55	1.90	1.95	1.925	2.00	2.10	2.05	2.10	2.25	2.175
	2.5	1.40	1.41	1.405	1.60	1.70	1.65	1.70	1.90	1.80	1.95	2.00	1.975
	3.75	1.40	1.20	1.30	1.40	1.35	1.375	1.45	1.60	1.525	1.55	1.60	1.575

ตารางที่ 14 แสดงผลของแรงระหว่างใส่ทรายกับไม่ใส่ทรายที่มีการเปลี่ยนแปลง AR และความดัน ที่ระยะ 10 mm.

AR	น้ำ	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
1.25	ใส่ทราย	6.57	9.08	10.74	11.48
	ไม่ใส่ทราย	2.35	3.66	4.86	5.74
2.5	ใส่ทราย	6.67	9.27	12.36	13.83
	ไม่ใส่ทราย	3.87	4.98	6.08	6.77
3	ใส่ทราย	9.40	11.20	13.34	17.85
	ไม่ใส่ทราย	4.76	5.985	7.21	7.87

ตารางที่ 15 แสดงผลของแรงระหว่างใส่ทรายกับไม่ใส่ทรายที่มีการเปลี่ยนแปลง AR และความดัน ที่ระยะ 210 mm.

AR	น้ำ	แรงที่ความดัน 60 bar (N)	แรงที่ความดัน 80 bar (N)	แรงที่ความดัน 100 bar (N)	แรงที่ความดัน 120 bar (N)
1.25	ใส่ทราย	3.92	6.33	9.42	9.91
	ไม่ใส่ทราย	2.35	3.66	4.86	5.59
2.5	ใส่ทราย	3.92	5.20	8.93	10.40
	ไม่ใส่ทราย	3.63	4.66	5.64	6.28
3.75	ใส่ทราย	4.91	6.38	9.91	11.87
	ไม่ใส่ทราย	4.46	5.66	6.90	7.65

ตารางที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง กับ Voltage ของชุด Calibrate

Mass	Voltage	Force (N)	Mass	Voltage	Force (N)	Mass	Voltage	Force (N)
0	-0.20	0.00	240	4.10	2.35	480	8.50	4.71
20	0.20	0.20	260	4.50	2.55	500	8.90	4.91
40	0.50	0.39	280	4.80	2.75	520	9.20	5.10
60	0.90	0.59	300	5.20	2.94	540	9.60	5.30
80	1.20	0.78	320	5.50	3.14	560	10.00	5.49
100	1.60	0.98	340	5.90	3.34	580	10.40	5.69
120	2.00	1.18	360	6.30	3.53	600	10.80	5.89
140	2.30	1.37	380	6.60	3.73	620	11.20	6.08
160	2.70	1.57	400	7.00	3.92	640	11.60	6.28
180	3.00	1.77	420	7.40	4.12	660	12.00	6.47
200	3.40	1.96	440	7.70	4.32	680	12.40	6.67
220	3.80	2.16	460	8.10	4.51	700	12.80	6.87