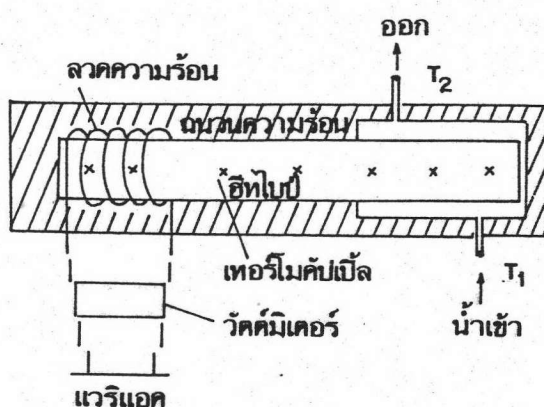


บทที่ 7

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฮีทปั๊ม ดังแสดง
ในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฮีทปั๊ม

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย

1. ลวดความร้อนสำหรับให้ความร้อนแก่ช่วงการระเหย
2. วัตต์มิเตอร์ (หรือโวลท์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์) สำหรับวัดกำลังไฟฟ้า
3. แวลวแอค (variac) สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้า
4. เครื่องควบคุมแรงดัน สำหรับเป็นแหล่งรับความร้อน
5. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำที่เข้า - ออก เครื่องควบคุมแรงดันแบบออริฟิซ (orifice)
6. เครื่องวัดมุมที่ฮีทปั๊มทำกับแนวระดับ
7. เทอร์โมคัปเปิ้ลและเครื่องอ่านมิลลิโวลท์
8. ฉนวนความร้อน

7.2 การสร้างและสอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

7.2.1 ออริฟิซ (orifice)

ออริฟิซเป็นเครื่องวัดปริมาณการไหลที่เรียกว่า อุปกรณ์ปฐม ซึ่งสัมพันธ์กับของไหลโดยตรง อาศัยหลักการวัดแรงดันสถิตย์ของจุด 2 จุด ระหว่าง อุปกรณ์นี้

1. ที่มาของสูตรสากลสำหรับการวัดการไหล

(ก) ทฤษฎีของเบอร์นูลลี (Bernoulli)

สูตรทั้งหมดในการวัดการไหลในท่อปิด มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของเบอร์นูลลี ซึ่งกล่าวว่าในการไหลแบบสม่ำเสมอ (steady flow) ที่ปราศจากแรงเสียดทาน ผลบวกของ velocity head , pressure head และ elevation head จะมีปริมาณคงที่ตลอดสาย ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho} \quad (7.1)$$

ในที่นี้

- V_1 = ความเร็วของของไหลที่ด้านไหลเข้า (m/sec)
- g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/sec²)
- P_1 = ความดันสถิตย์ที่ด้านไหลเข้า (kg_f/m²)
- ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)
- V_2 = ความเร็วของของไหลที่ด้านไหลออก (m/sec)
- P_2 = ความดันสถิตย์ที่ด้านไหลออก (kg_f/m²)

สมการ (7.1) เป็นสูตรทางทฤษฎีที่ยังไม่ได้ระบุถึงตัวคูณอื่น ๆ ที่จำเป็นในทางปฏิบัติ จากกฎมวลสารสมดุล

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (7.2)$$

โดยที่

- A_1 = พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m²)
- A_2 = พื้นที่หน้าตัดของออริฟิซ (m²)

จากสมการ(7.1) และ (7.2) ได้ว่า

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \quad (7.3)$$

โดยปกติแล้วเราจะคิดถึงหน่วยปริมาตรการไหลจริง ๆ มากกว่าความเร็ว เนื่องจากความเร็วคูณด้วยพื้นที่เท่ากับการไหล เราได้

$$F_s = A_2 V_2 \quad \text{หรือ} \quad V_2 = \frac{F_s}{A_2}$$

แทนค่าลงในสมการ(7.3) จะได้อัตราการไหลเป็น

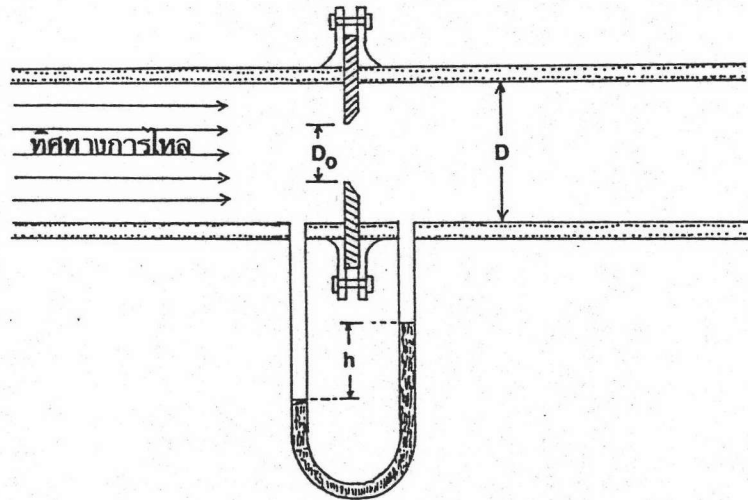
$$F_s = A_2 \sqrt{\frac{2g \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \quad (7.4)$$

สมการ(7.4) เป็นสมการทางทฤษฎีเท่านั้น ในทางปฏิบัติแล้วเราจะใส่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน(discharge coefficient) C ที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นฟังก์ชันของขนาดท่อ ชนิดของออริฟิซ แท็ปการต่อเพื่อวัดแรงดันและตัวเลข เรย์โนลด์

$$F_s = CA_2 \sqrt{\frac{2g \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \quad (7.4a)$$

(ข) การวัดความดันแตกต่าง

ในทางปฏิบัติมักจะใช้ท่อรูปตัวยู(U - tube) วัดตามรูป



รูปที่ 7.2 ออริฟิซที่มีมาโนมิเตอร์แบบท่อรูปตัวยู

ในท่อรูปตัวยูจะต้องบรรจุด้วยของเหลวที่ไม่ผสมกับของไหลและควรมีสีแตกต่างกันด้วย เพื่อจะอ่านค่าความแตกต่างได้ง่าย เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbon tetrachloride, CCl_4) พรอท

ในสมการที่ (7.4a) ต้องปรับปรุงตัว $\frac{P_1 - P_2}{\rho}$ เสียก่อนจะได้

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = h \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho} \right) \quad (7.5)$$

h = ค่าแตกต่างที่อ่านได้จากมาโนมิเตอร์ (m)

ρ_1 = ความหนาแน่นของของเหลวที่บรรจุในมาโนมิเตอร์ (kg/m^3)

ρ_2 = ความหนาแน่นของของไหลเหนือมาโนมิเตอร์ (kg/m^3)

จากสมการที่ (7.4a) จะได้

$$F_s = CA_2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \right] \left[\sqrt{2gh \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho} \right)} \right] \quad (7.6)$$

ปรับปรุงสมการ(7.6)

$$\begin{aligned}
 F_h &= m^3/hr, \text{ อัตราการไหล} = 3600 F_s \\
 A_2 &= D_o^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) \text{ ในที่นี้ } D_o = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางรูของออริฟิซ (m)} \\
 A_1 &= D^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) \text{ ในที่นี้ } D = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (m)} \\
 F_h &= 3600 \frac{\pi}{4} CD_o^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{h \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho} \right)} \right] \quad (7.7)
 \end{aligned}$$

ค. สูตรทางไฮดรอลิก (Hydraulic Formular)

สมการ(7.7) ยังไม่เหมาะสมในการคำนวณออริฟิซจริง ๆ เพราะยังมีตัวประกอบที่ไม่รู้ 3 ตัวคือ C D_o β ดังนั้น เพื่อที่จะทำให้ง่ายขึ้นจะได้ $\beta = \frac{D_o}{D}$ และ $D_o^2 = \beta^2 D^2$

แทนค่า D_o ลงในสมการ(7.7) จะได้เทอม

$$CD^2 \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

กำหนดตัวประกอบออริฟิซ(orifice factor) พิเศษเรียก S_o ซึ่ง

$$S_o = C \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

ซึ่งได้ตัวประกอบออริฟิซที่ประกอบด้วย velocity of approach factor นอกจากนี้เราจะต้องเพิ่มตัวคูณ R_a ซึ่งเป็นตัวชดเชยกับการเปลี่ยนแปลงของแผ่นออริฟิซตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง สมการสุดท้ายจะได้

$$F_h = \frac{3600}{4} \pi S_o R_a D^2 \sqrt{h \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho} \right)} \quad (7.8)$$

ในที่นี้

$$\begin{aligned}
 F_h &= \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m}^3/\text{hr)} \\
 S_o &= \text{ตัวประกอบออริฟิซ} \\
 R_a &= \text{ตัวคูณชดเชยพื้นที่ออริฟิซ} \\
 D &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (m)}
 \end{aligned}$$

- h = ค่าแรงดันแตกต่างที่อ่านได้หกมาในมิเตอร์ (m)
 ρ_1 = ความหนาแน่นของของเหลวที่บรรจุในมาในมิเตอร์ (kg/m^3)
 ρ_2 = ความหนาแน่นของของเหลวบนมาในมิเตอร์ (kg/m^3)
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

7.2.2 เทอร์โมคัปเปิ้ล (thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิ้ล เป็น เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดในบรรดาอุปกรณ์เครื่องวัด เทอร์โมคัปเปิ้ลให้ความแม่นยำในการวัดหอบประมาณ ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง มีการตอบสนองต่อความร้อนค่อนข้างเร็ว มีความทนทาน เชื่อถือได้ดี ราคาถูกและใช้งานได้มากมายหลายแบบ

การวัดอุณหภูมิอาศัยปรากฏการณ์ไฟฟ้าต่อ เนื่องจากผลของความร้อนใช้ความสัมพันธ์ที่ทราบกันดี นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิที่หัวต่อสองแห่งของโลหะคู่หนึ่งกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ เรามักจะให้อุณหภูมิของหัวต่ออันหนึ่ง (คือหัวต่ออ้างอิง) คงตัวอยู่ที่ค่าซึ่งเรารู้แน่นอน และวัดค่าอุณหภูมิของหัวต่ออีกอันหนึ่ง (หัวต่อที่ใช้วัดอุณหภูมิ) ได้อย่างแม่นยำ โดยการหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจร และอ้างอิงตารางเปรียบเทียบมาตรฐาน ANSI C96.1 สำหรับวัสดุเทอร์โมคัปเปิ้ลที่เราจะจะใช้

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรเทอร์โมคัปเปิ้ล เป็นฟังก์ชันของความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างหัวต่อที่ใช้วัดและหัวต่ออ้างอิง ดังนั้นสิ่งสำคัญที่จะต้องทำ คือทำให้หัวต่ออ้างอิงมีอุณหภูมิคงตัวอยู่ที่ค่าซึ่งรู้อย่างแน่ชัด ซึ่งสามารถทำได้โดย

- (1) ใช้เตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิได้
- (2) ใช้ถังกน้ำแข็ง
- (3) ใช้วิธีการทางไฟฟ้าสร้างอุณหภูมิ เทียบแทนอุณหภูมิที่ต้องการขึ้นภายนอกหรือภายในวงจรอุปกรณ์เครื่องวัด

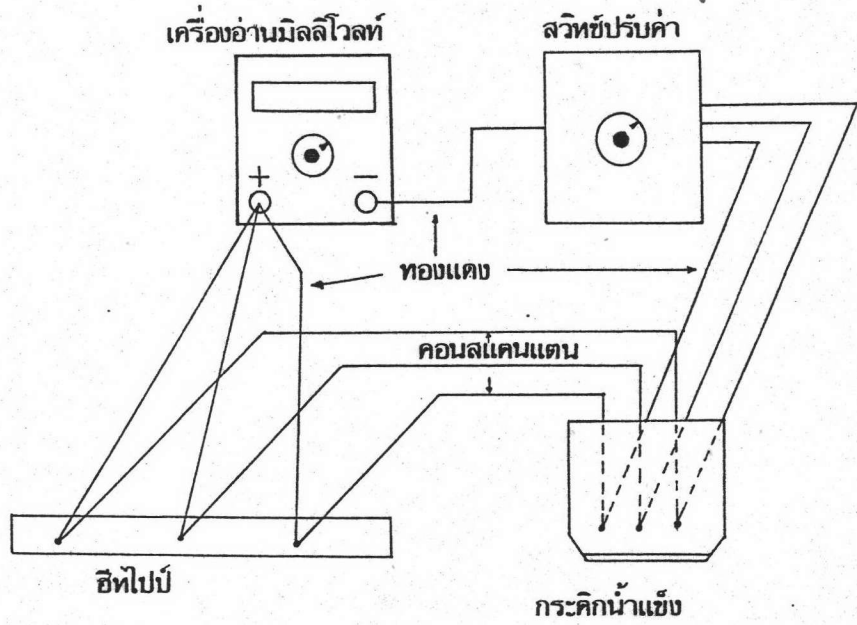
ก. การสร้างและสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิ้ล

ในการทดลองนี้ วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นแบบชนิด T ทองแดง/คอนสแตนแตน (copper/constantan) อุณหภูมิสูงสุดวัดได้ประมาณ 700°F (400°C) และสามารถวัดอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์มาก ๆ ได้ด้วย

อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย รูปที่ 7.3

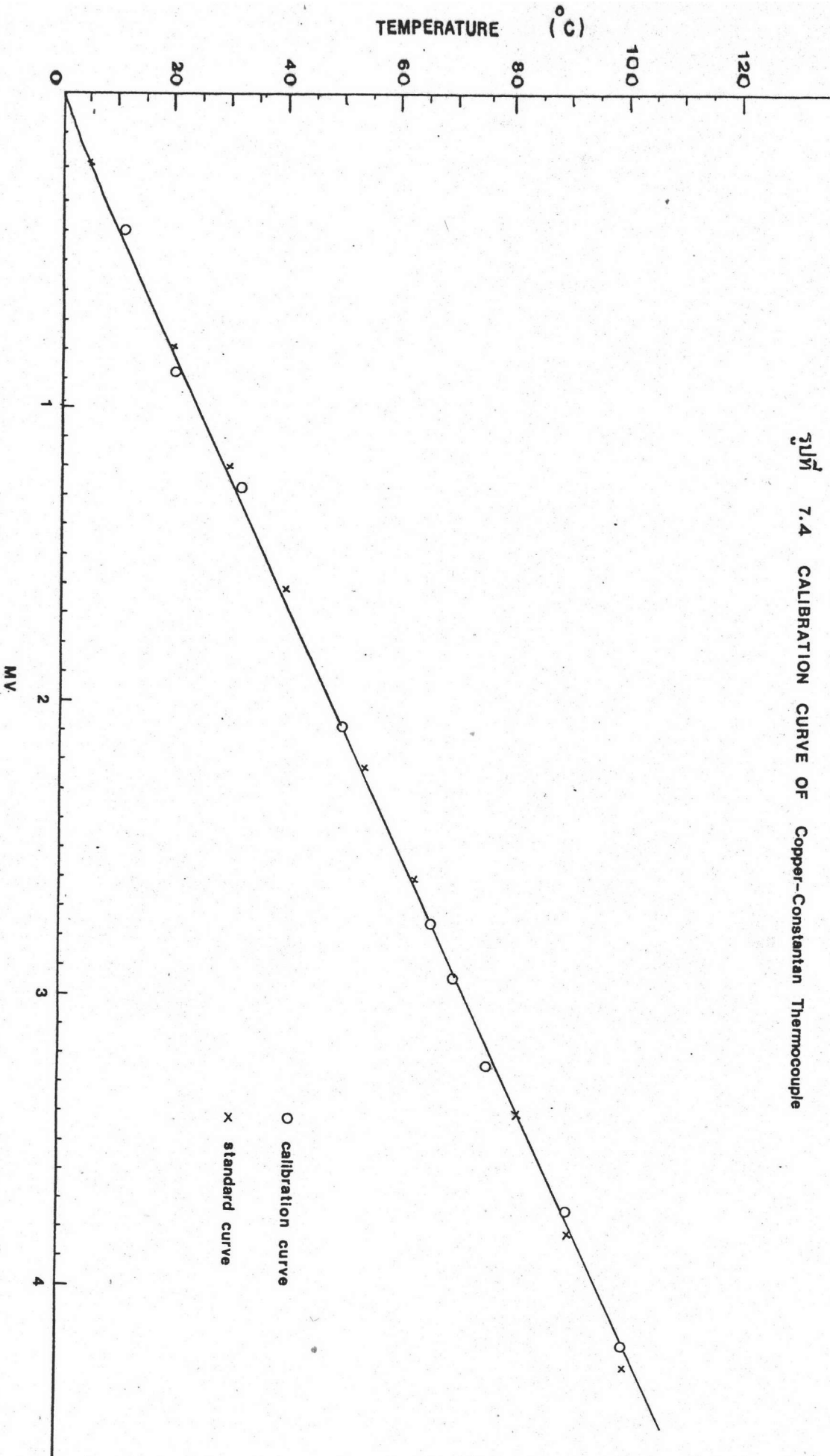
- (1) เทอร์โมคัปเปิ้ล ทองแดง/คอนสแตนแตน
- (2) กระจกน้ำแข็ง
- (3) เครื่องอ่านมิลลิโวลท์กระแสตรง (DC millivolt)

(4) สวิตช์ปรับค่า(selector switch)



รูปที่ 7.3 แสดงการประกอบเทอร์โมคัปเปิล

Fig 7.4 CALIBRATION CURVE OF Copper-Constantan Thermocouple



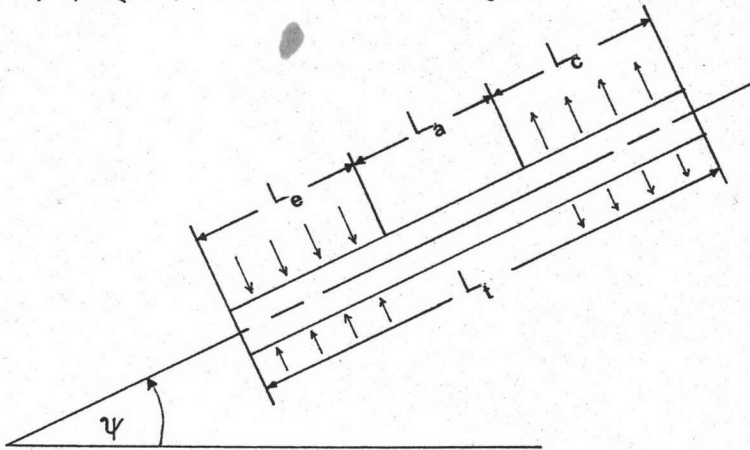
7.3 ขั้นตอนการทดลอง

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์และตรวจสอบความเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การดำเนินการทดลอง ซึ่งเป็นดังนี้

1. ปรับมุมเอียงของฮีทไปป์ที่ทำกับแนวระดับ โดยเริ่มแรกให้แนวของท่อฮีทไปป์อยู่ในแนวระดับ ($\psi = 0$)
2. ควบคุมอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ไหลเข้า - ออก เครื่องควบคุมให้มีค่าคงที่สม่ำเสมอและอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ตลอดระยะเวลาของการทดลอง
3. ปรับกำลังไฟฟ้าไปยังแหล่งรับความร้อนตามที่ต้องการ รอจนกระทั่งถึงสภาวะที่คงที่ (steady - state) จากนั้นบันทึกอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้า และอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจาก เครื่องควบคุม, อัตราการไหลเชิงปริมาตร
4. ทำการวัดจุดใหม่ โดยเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า รอจนกระทั่งถึงสภาวะคงที่ แล้วบันทึกข้อมูลดังในข้อ 3
5. ทำข้อ 4 ซ้ำจนกระทั่งได้จำนวนจุดตามที่ต้องการ
6. เปลี่ยนมุมเอียงของฮีทไปป์ แล้วทำตามข้อ 2 - 5 อีก จนกระทั่งได้ข้อมูลสำหรับมุมต่าง ๆ ที่ต้องการ

7.4 เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฮีทไปป์คือ มุมเอียงของฮีทไปป์ ($0 \leq \psi \leq 90$) และพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 7.5 แสดงการทำมุมและตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดสอบสมรรถนะของฮีทไปป์

7.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

สมรรถนะของฮีทไปป์ คำนวณได้จากสมการ

โดยที่

$$Q = GC_p (T_{out} - T_{in})$$

 Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์

 G = อัตราการไหลเชิงมวล

 C_p = ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของไหล

 T_{out} = อุณหภูมิของของไหลที่ทางออก เครื่องควบแน่น

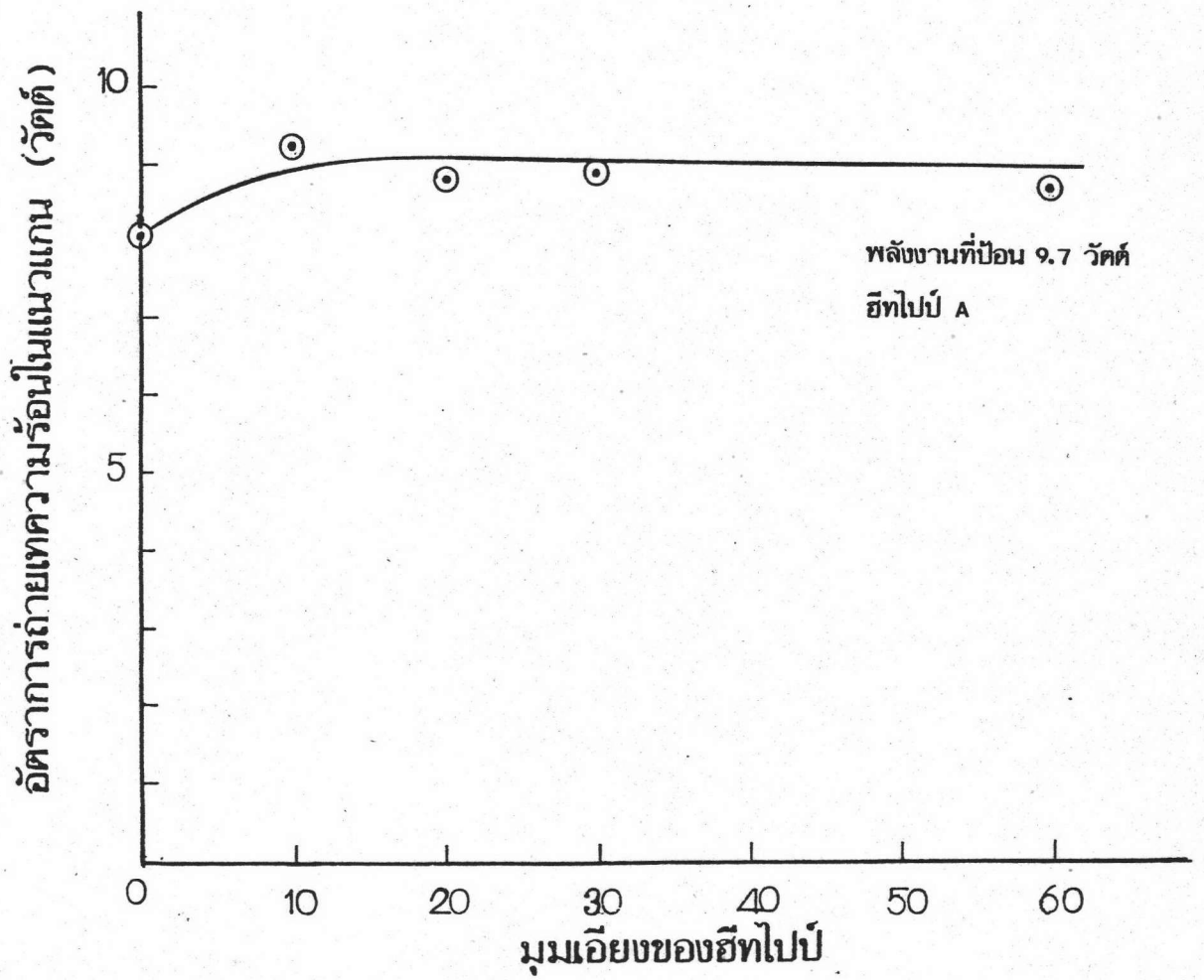
 T_{in} = อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้า เครื่องควบแน่น

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) ของระบบ

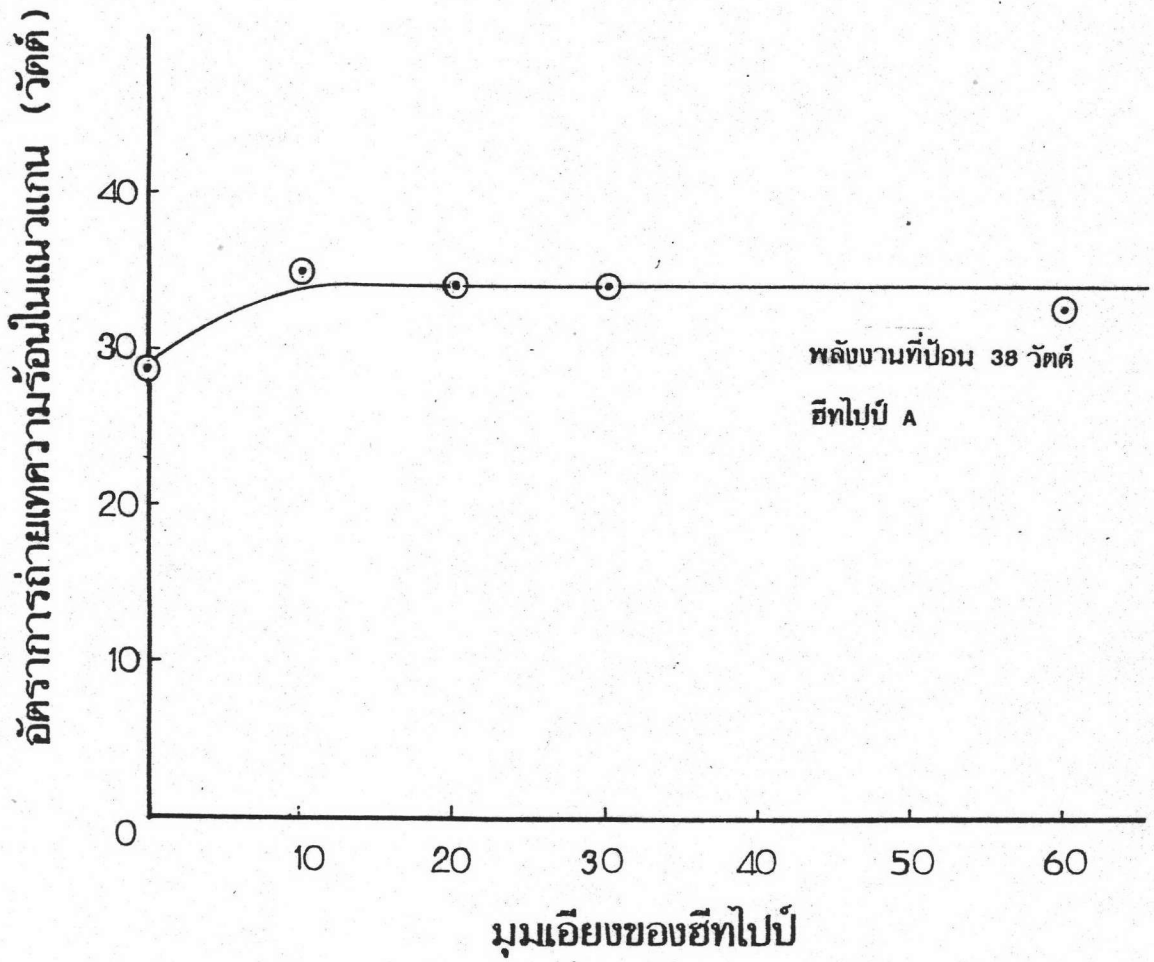
$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ } \eta = \frac{\text{พลังงานที่เครื่องควบแน่นได้รับ}}{\text{พลังงานที่ป้อนเข้าหลอดให้ความร้อน}}$$

7.6 ผลการทดลอง

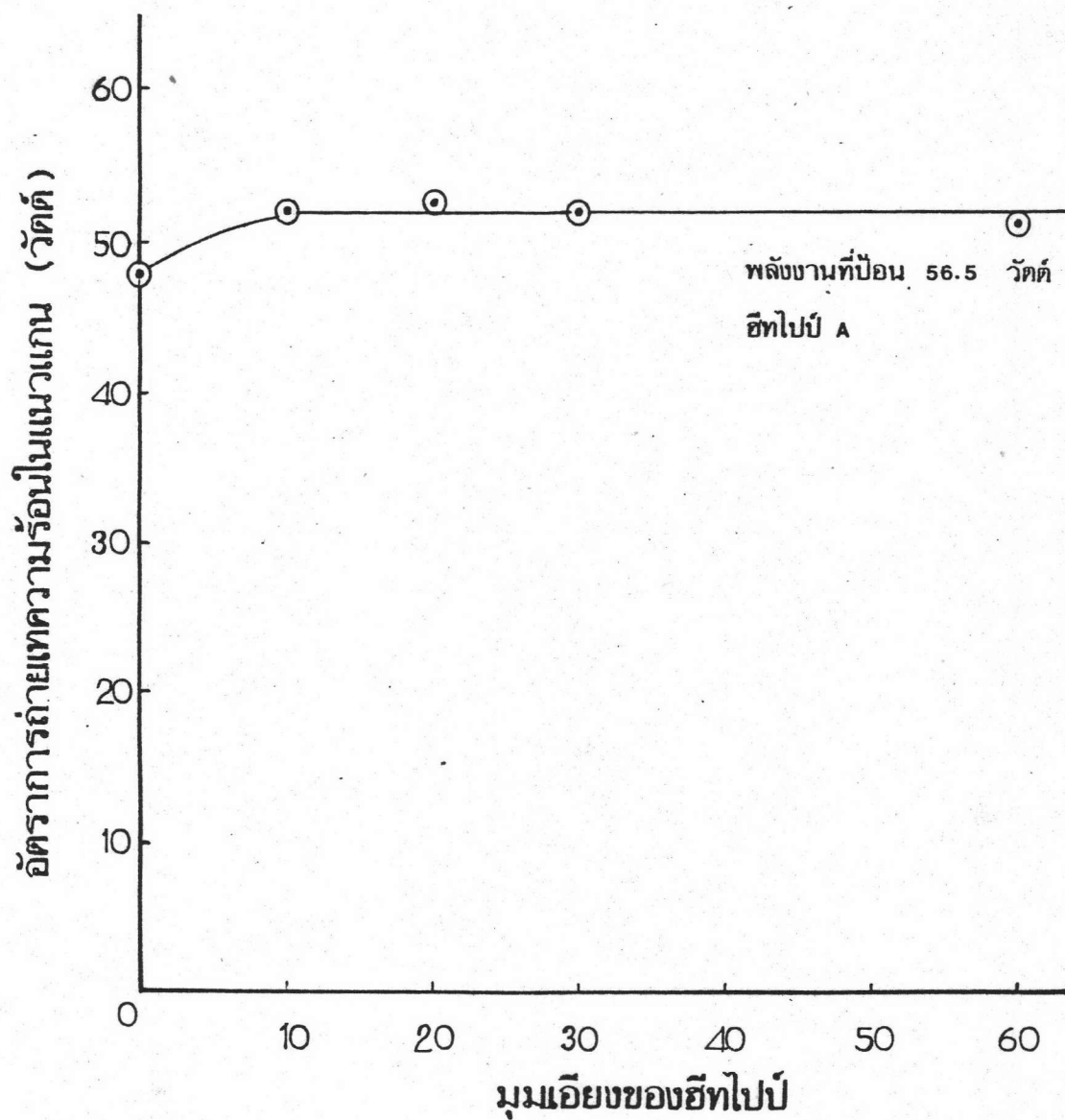
ข้อมูลเกี่ยวกับฮีทไปป์	ฮีทไปป์ A	ฮีทไปป์ B
ชนิด	ทองแดง/ น้ำ	ทองแดง/ น้ำ
เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มม)	8	8
ความหนาของท่อ (มม)	0.8	0.8
ความยาวทั้งหมด (มม)	300	300
รูปร่างของวิกค์	แบบดาข่าย	แบบดาข่าย
จำนวนชั้นของวิกค์ (ชั้น)	1	3
เมช (mesh) ของวิกค์ นิ้ว ⁻¹	100	150
วัสดุที่ทำวิกค์	ทองแดง	ทองเหลือง
ปริมาตรของของเหลวใช้งาน (กรัม)	1.36	1.47
ความยาวช่วงการระเหย (มม)	130	90
ความยาวช่วงคั่นกลาง (มม)	70	100
ความยาวช่วงการควบแน่น (มม)	100	110



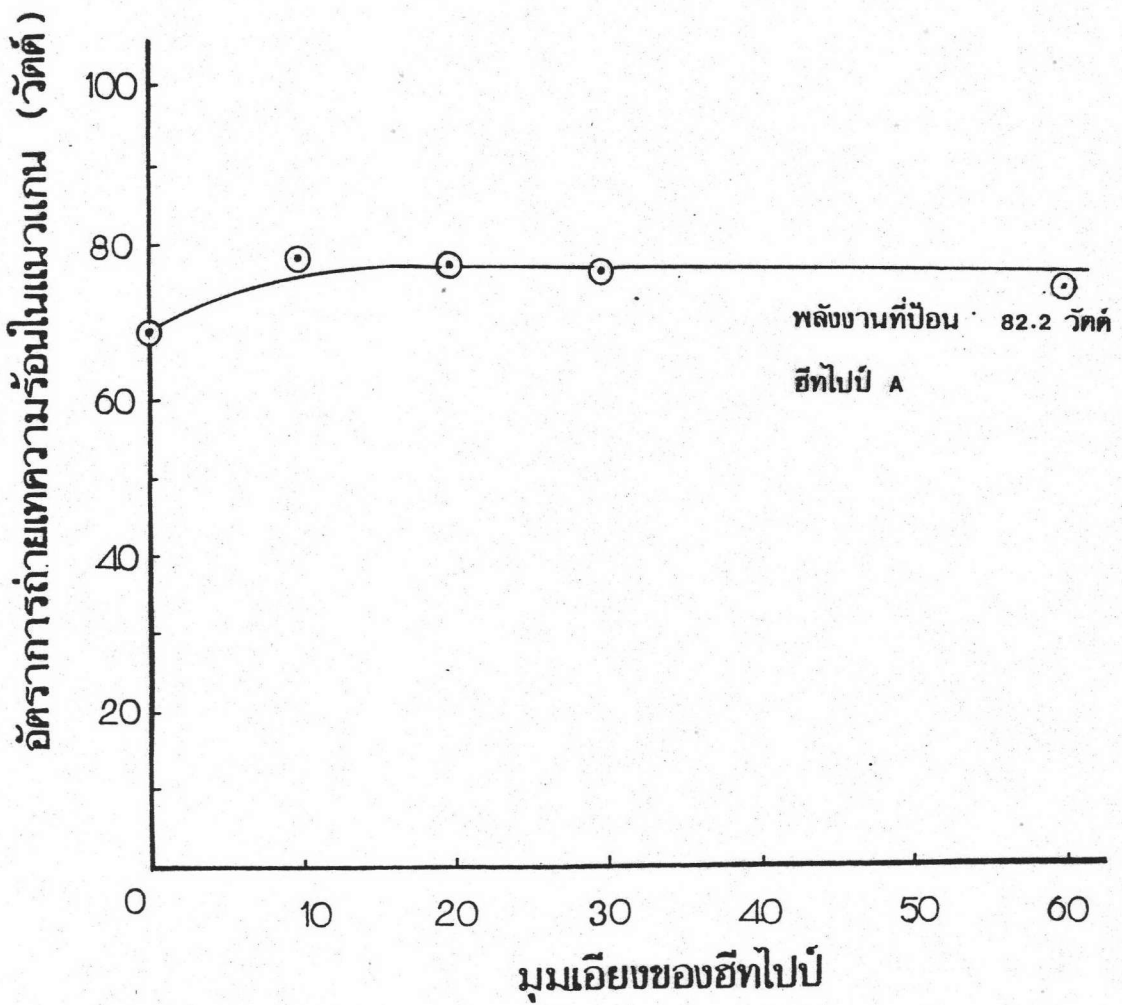
รูปที่ 7.6 ผลของมูมต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



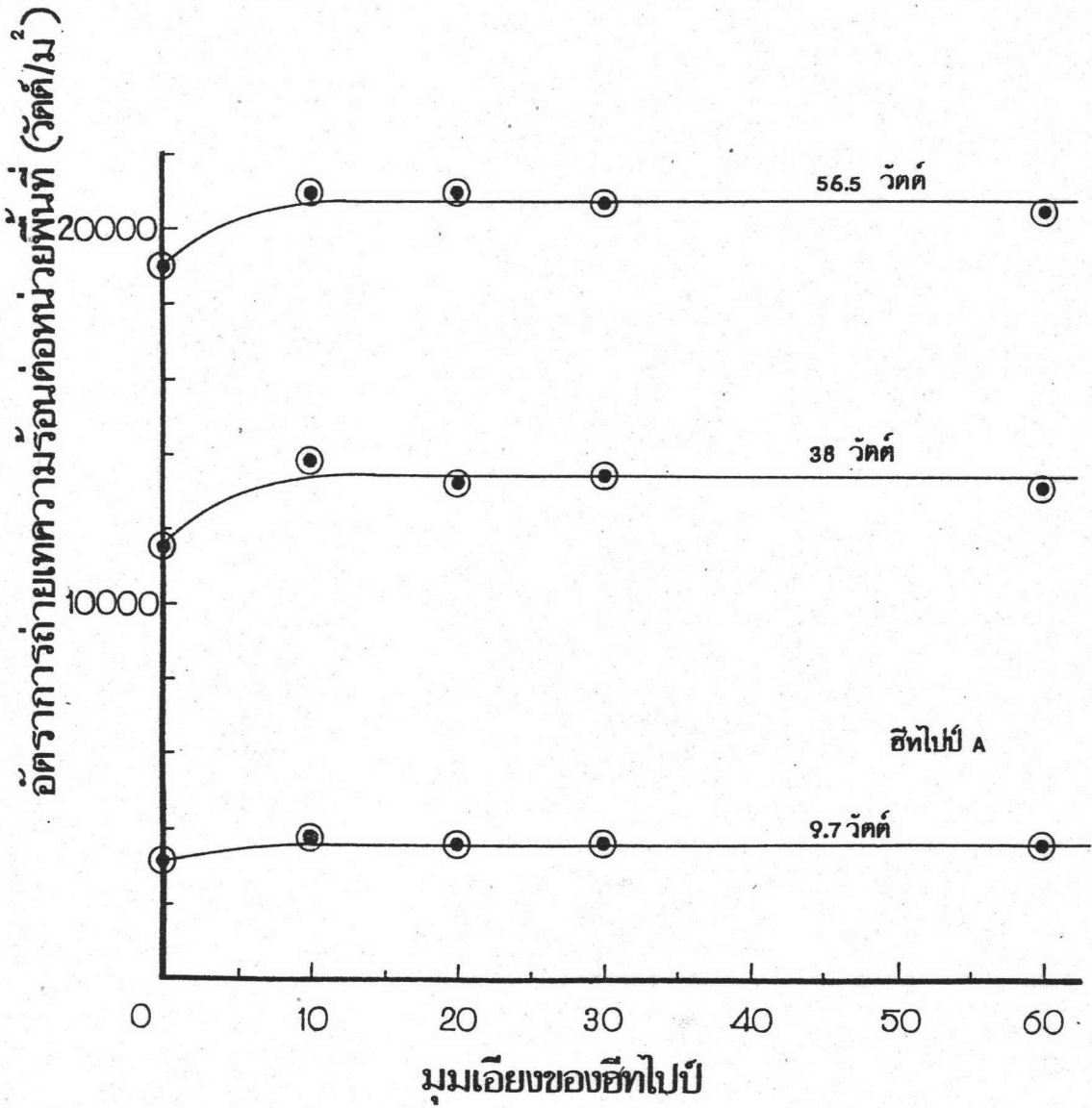
รูปที่ 7.7 ผลของมุดต่อสมรรถนะการทำงานของอีทไปป์



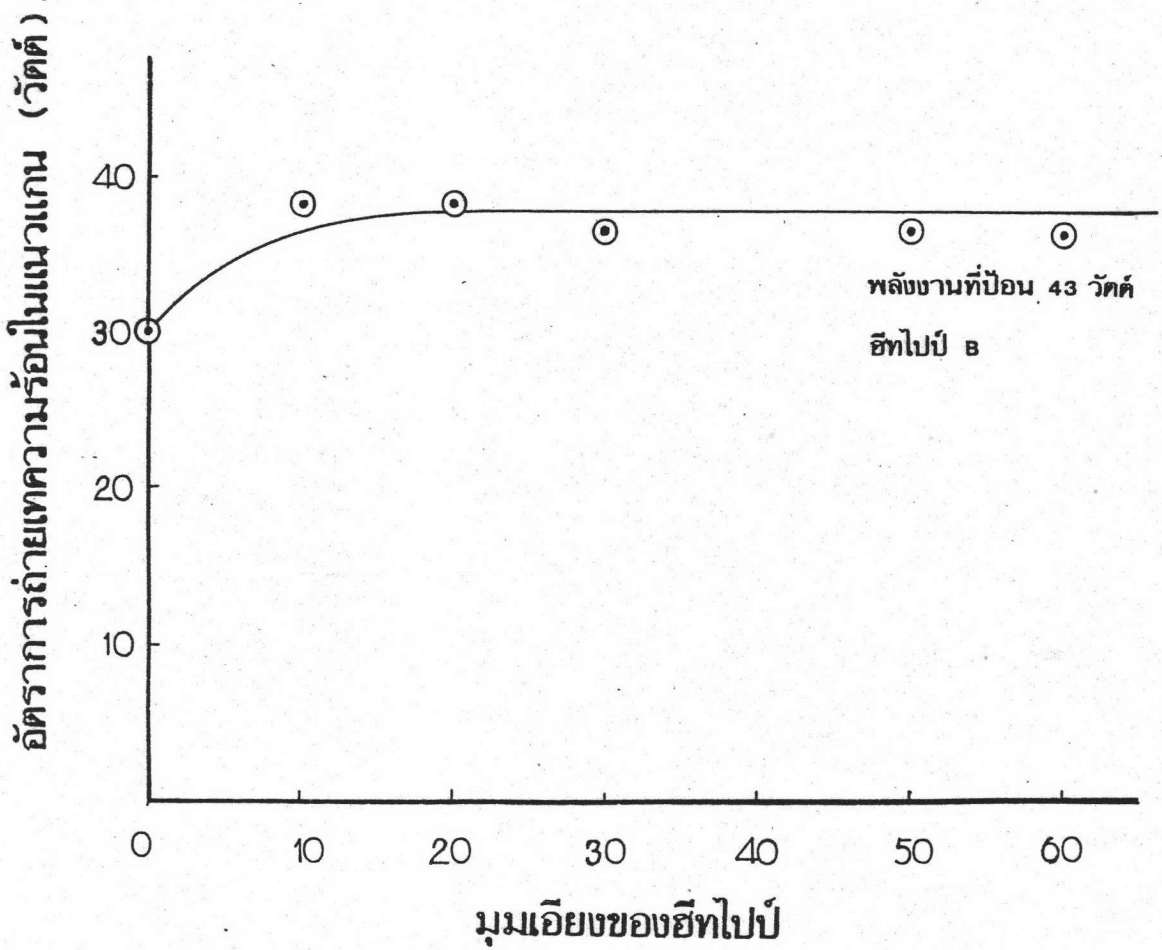
รูปที่ 7.8 ผลของมุมต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



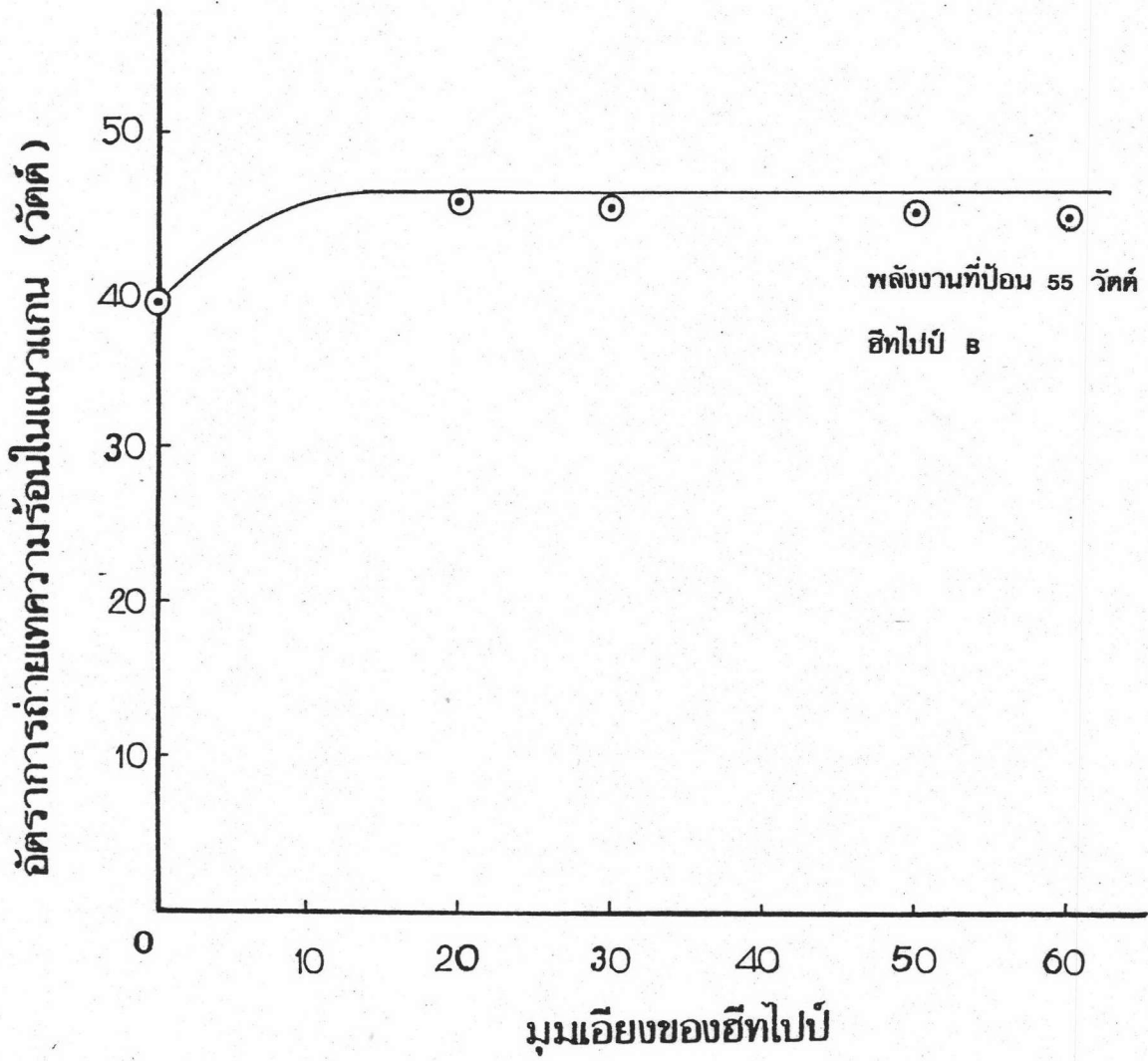
รูปที่ 7.9 ผลของมูมต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



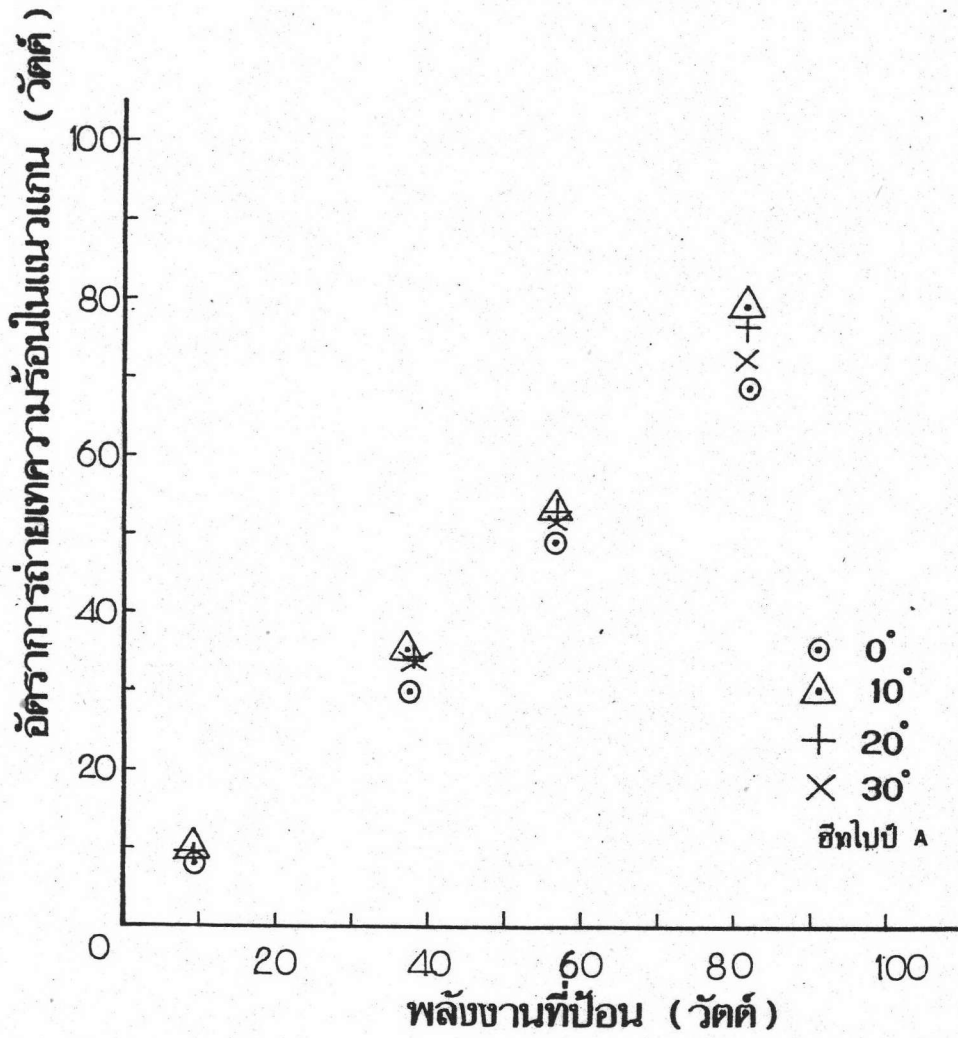
รูปที่ 7.10 ผลของมุมต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



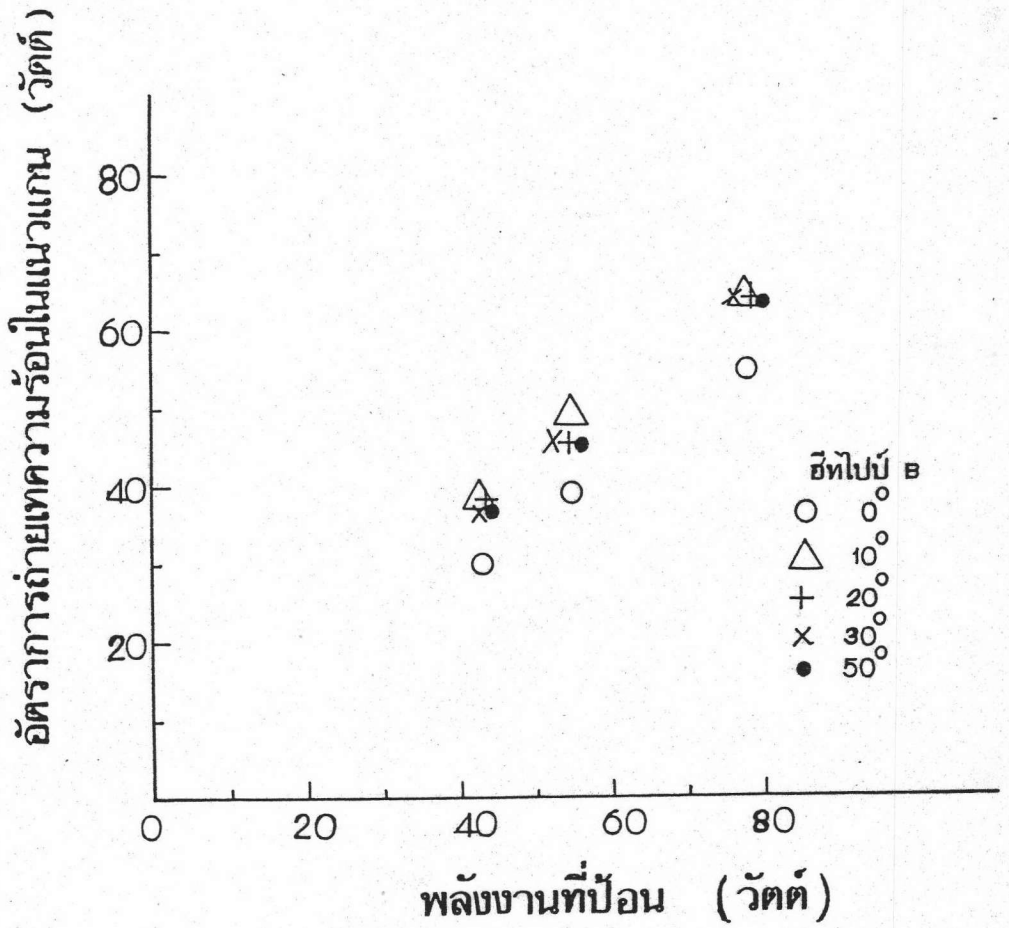
รูปที่ 7.11 ผลของมวลต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



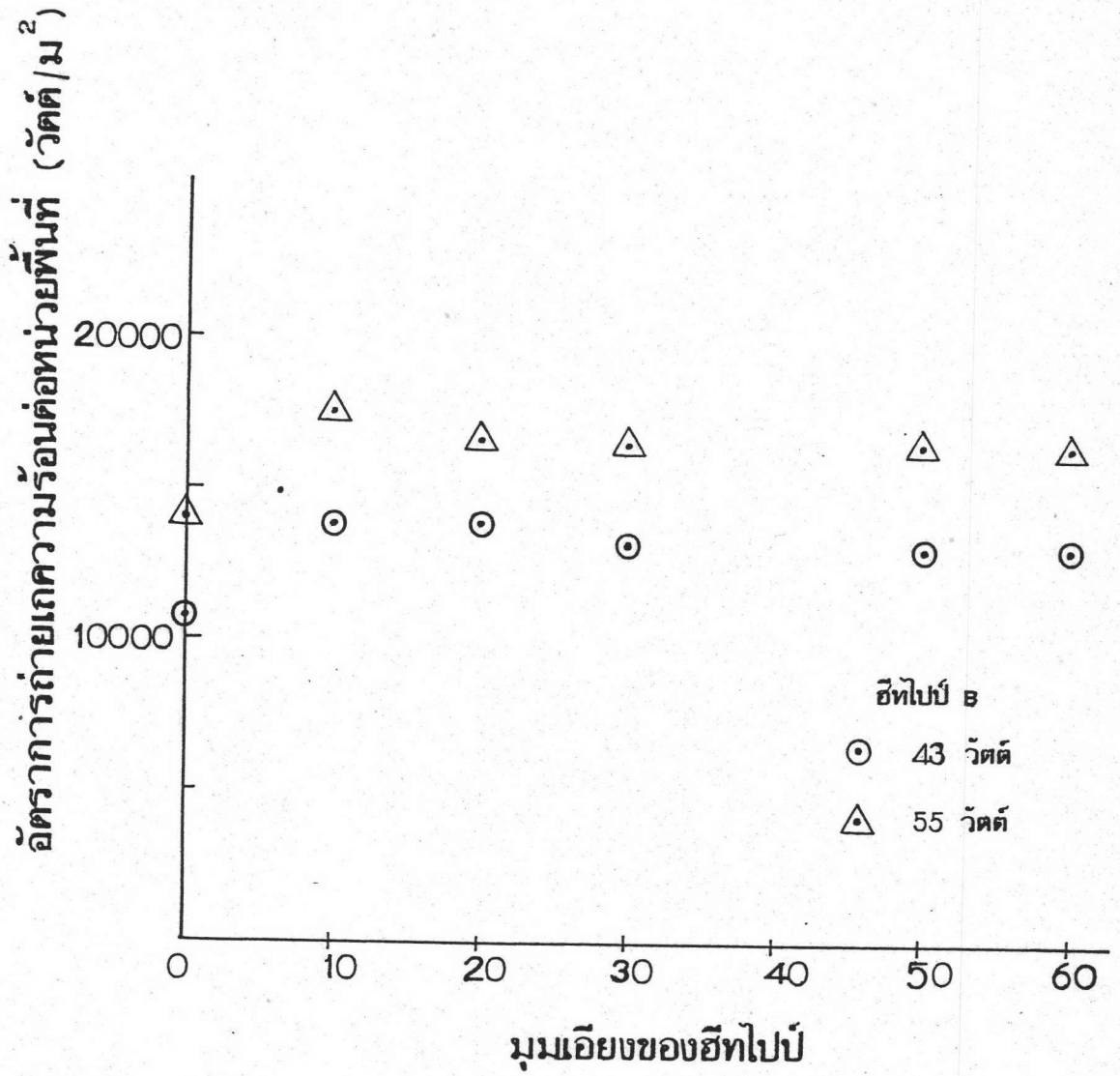
รูปที่ 7.12 ผลของมุมต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



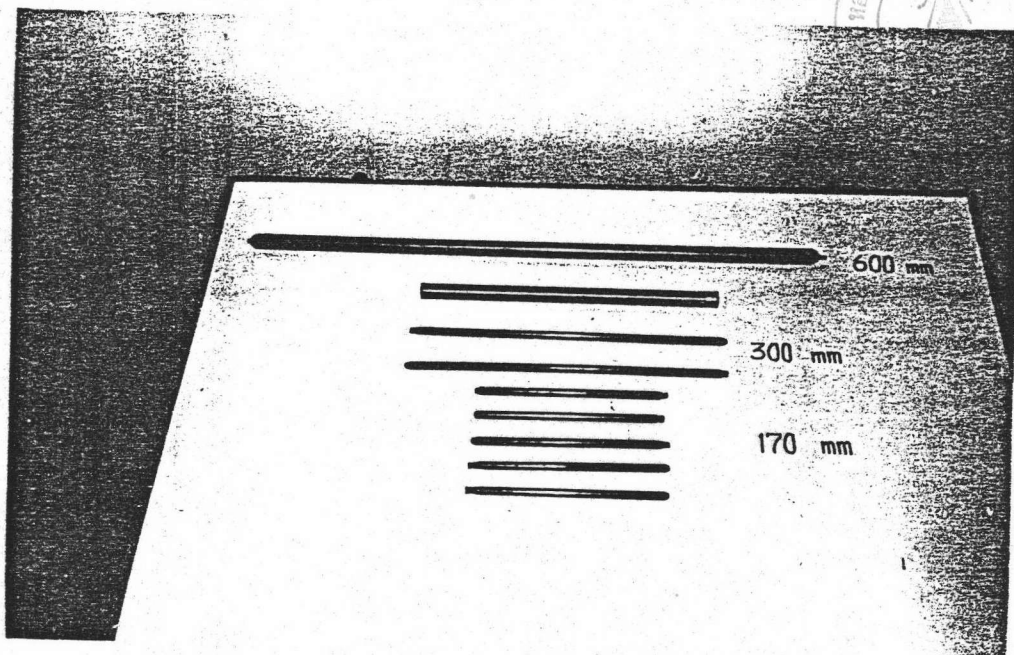
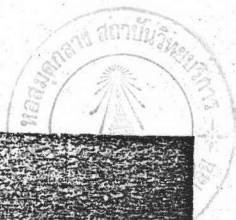
รูปที่ 7.13 ผลของมุมต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



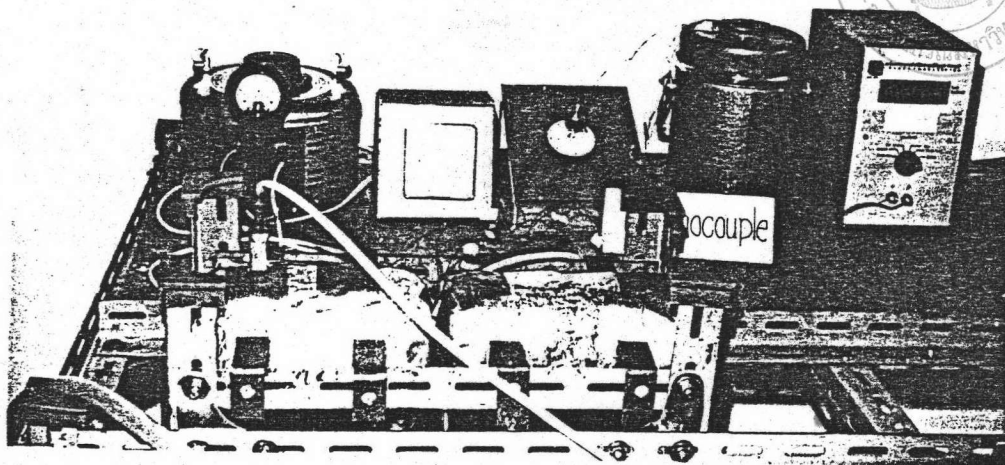
รูปที่ 7.14 ผลของมุมต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



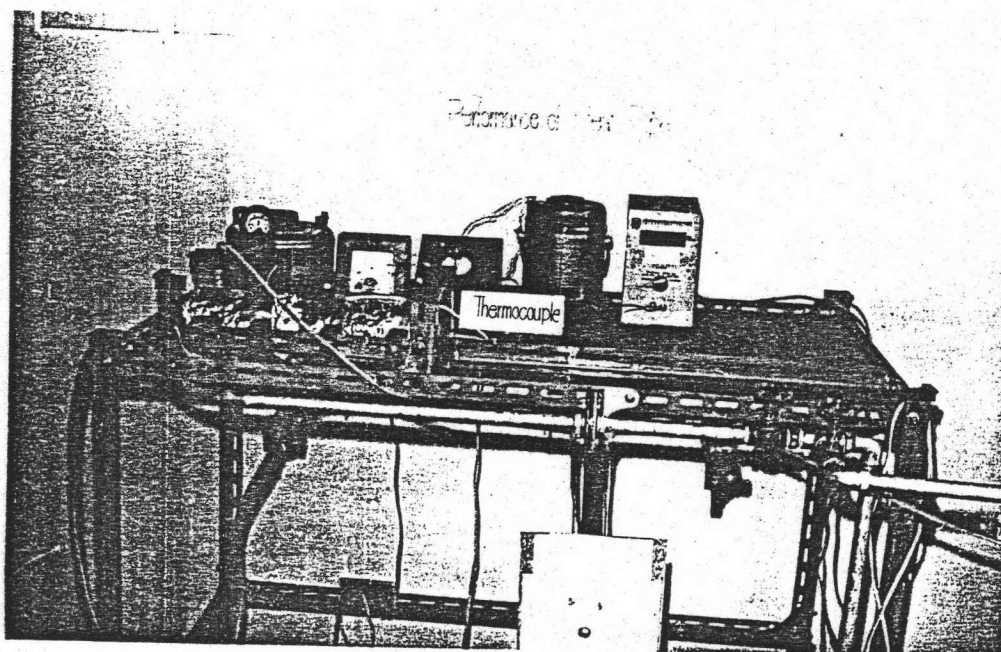
รูปที่ 7.15 ผลของมุลต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์



รูปที่ 7.16 สีสไปป์ขนาดต่างๆ

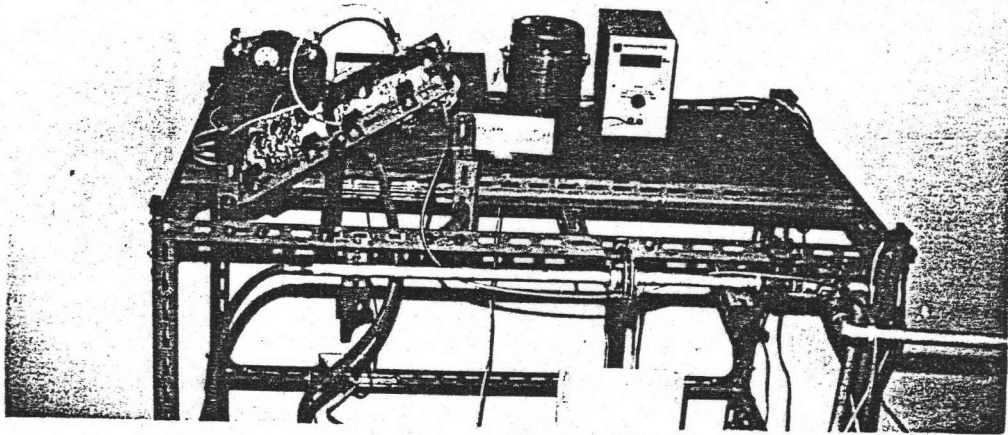


ก

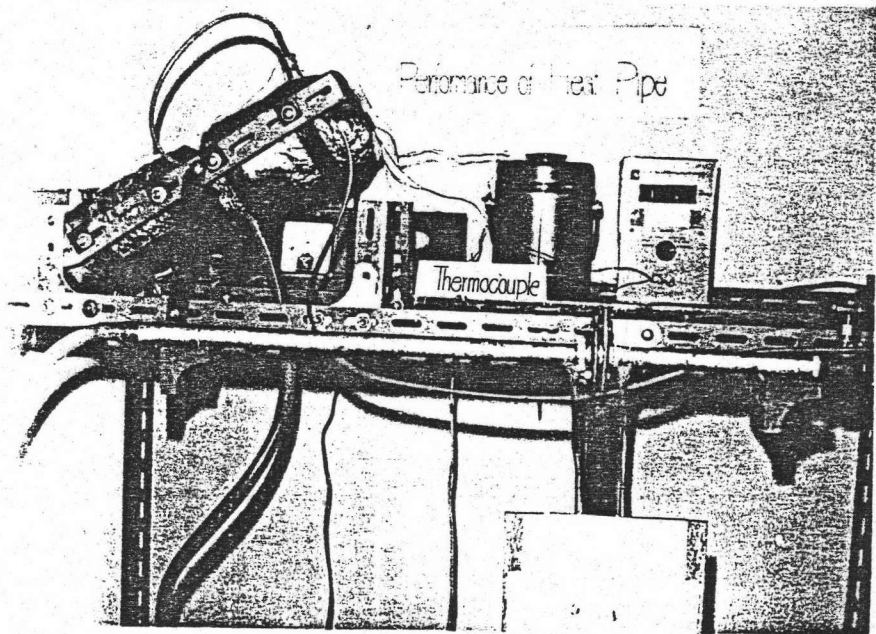


ข

รูปที่ 7.17 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบฮีทไปป์



ก



ข

รูปที่ 7.18 แสดงลักษณะการทำมุมของฮีทไปป์