



ปีการศึกษา ๒๕๓๕

โครงการ การศึกษาผลกระทบของรุกรลมบนเสาสงกมลมกลวง  
ที่มีต่อแรงวิกฤติที่ทำให้เสาสงเกิดการโก่งตัว

โดย

นาย วิศิษฐ์ อริยะ ๓๒.๑๓๑๑

นาย สมบูรณ์ นพคุณเจริญชัย ๓๒.๑๓๔๘

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สมชัย นรเศรษฐ์ โศภน

บริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา ๒๕๓๕

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า\* เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลกระทบของรูกลมบนเสาสูงกลมกลาง ที่มีต่อแรงวิกฤติที่ทำให้เสาเกิด  
การโก่งตัว

ผู้จัดทำ

นาย วิศิษฐ์ อริยะ  
นาย สมบูรณ์ นพคุณเจริญชัย

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โคกน)

ผลกระทบของรุกรมบนเสาสูงกลมกลาง ที่มีต่อแรงวิกฤติ

ที่ทำให้เสาสูงเกิด การโก่งตัว

นาย วิศิษฐ์ อริยะ

นาย สมบูรณ์ นพคุณเจริญชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โรจน

ปีการศึกษา ๒๕๓๕

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์โดยประมาณ เพื่อทำนายผลของการโก่งตัวของเสาสูงกลมกลาง เจาะรู ผลจากการทดลองนี้ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ของเสาเจาะรูกับเสาปกติ โดยอาศัยสมการของออย์เลอร์ เป็นเกณฑ์ การทดลองนี้จะประมาณแรงวิกฤติของการโก่งตัวในลักษณะต่างๆและผลของรูเจาะที่มีต่อแรงวิกฤติ

The effect of a hole on the column to the critical load

WISIT ARIYA

SOMBOON NOPPAKUNJARERNCHAI

Associate Professor

SOMCHAI NORASETHASOPON

Advisor

1992

Abstract

An approximate analysis for predicting buckling of columns with a hole is presented. Experimental results are attempted to build the equations by accomodate the Euler's Formular. The approximate analysis predicts the buckling loads of various types of the buckle and effects of the hole to the critical load.

## สารบัญ

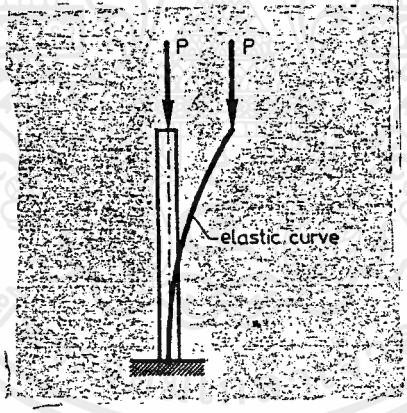
	หน้า
- บทคัดย่อ	1
- ABSTRACT	2
- สารบัญ	3
- สัญลักษณ์	4
- บทนำ	5
- Analysis	12
- อุปกรณ์ประกอบการทดลอง	13
- วิธีทดลอง	13
- UNIVERSAL TESTING MACHINE	15
- ผลการทดลอง	19
- ANALYTICAL RESULTS	33
- ข้อสังเกต	36

## สัญลักษณ์

P	=	load (kgf.)
$P_{crit}, F$	=	critical load (kgf.)
$F'$	=	critical load (สำหรับเสาเจาะรู (kgf.))
E	=	Modulus of elastic (kgf./mm <sup>2</sup> )
I	=	Moment of inertia (m <sup>4</sup> )
M	=	Bending moment (Nm)
l	=	ระยะห่างของรูเจาะบนเสาวัดจากปลายเสาด้านบนลงมา (cm.)
L	=	ความยาวของ column (cm.)
$L_e$	=	ความยาวยังผล [equivalent length (cm.)
d	=	Diameter ของรูเจาะ (mm.)
D	=	Diameter ของ column (mm.)

บทนำ ( INTRODUCTION )

เสา (Column) มีลักษณะเป็นท่อน (bar) ซึ่งเรียวยาวและมีหน้าตัดสำหรับรับแรงกด ซึ่งอยู่ในแกนตามความยาว ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 1 ถ้าแรง  $P$  มีค่าน้อย เสาจะอยู่ในลักษณะตรงเสมอ ถึงแม้ว่าจะมีแรงมากจะทำให้เสาโค้งออก แต่เสาก็จะกลับมาอยู่ในลักษณะตรง หลังจากเอาแรงด้านข้างออก ภาวะของเสานี้เรียกว่า stable ถ้าแรง  $P$  ถูกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งเสาเริ่มจะมี deflection ทางด้านข้าง ดังในรูปที่ 1 นั่นคือเสาตรงจะอยู่ในภาวะ unstable และภาวะ stable ของเสาจะต้องมีการโก่งงอ (buckling) เกิดขึ้น



รูปที่ 1

แรง  $P$  ที่ทำให้เริ่มเกิดการโก่งงอนี้มีชื่อเรียกว่า แรงวิกฤติ  $P_{cr}$  (critical load หรือ buckling load) ฉะนั้นแรงวิกฤติคือ แรงที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้เสาเกิดการโก่งงอ (buckling) ในกรณีของเสาซึ่งมีขนาดยาว แรงวิกฤติ  $P_{cr}$  นี้จะทำให้เกิดความเค้นในเสา ซึ่งน้อยกว่า Proportional limit ของวัสดุที่ใช้ทำเสา อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการโก่งงอขึ้นแล้ว เสานี้ก็ไม่ว่าจะทำงานได้ตามความประสงค์ ฉะนั้นในการออกแบบเสายาว ขนาดของแรงจึงถูกจำกัด

ด้วยการโก่งงอของเสา แทนที่จะเป็นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเสา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เสามีขนาดที่สั้นมาก จะไม่มีการโก่งงอเกิดขึ้น แต่เสาสั้นนี้จะประสบความเสียหายจากการที่มีความเค้นขนาดเกิน proportional limit หรือ crushing สำหรับเสาที่มีความยาวปานกลาง (intermediate length) ความเสียหายอาจจะเนื่องมาจากการโก่งงอ หรือ crushing หรือผล (effect) ของการโก่งงอและ crushing รวมกันก็ได้ ทั้งนี้ต้องขึ้นกับความเรียว (slenderness ratio) ของเสาและวัสดุที่ใช้ทำเสา ค่าความเรียวของเสายาวและเสายาวปานกลางจะเป็นเท่าใดนั้นจะได้กล่าวต่อไป ในการทดลองนี้จะไม่กล่าวถึงเสาสั้น ซึ่งความเสียหายไม่ได้เกิดจากการโก่งงอ

การหาค่าแรงวิกฤติของเสายาวโดยใช้สูตรของ Euler

การหาสูตรสำหรับแรงวิกฤติของเสายาว ได้ถูกหามาโดยนักคณิตศาสตร์ชาวสวิสเซอร์แลนด์ ชื่อ ออยเลอร์ (Euler) ในปี ค.ศ.1757 โดยการใช้ differential equation of elastic curve

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M$$

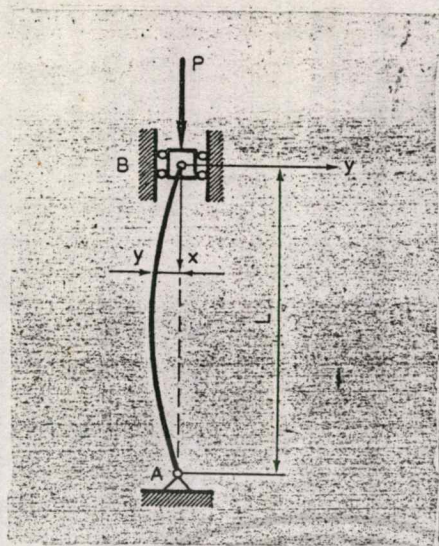
ฉะนั้น สูตรที่จะได้จากการใช้สมการนี้จะใช้ได้จนกระทั่งความเค้นในเสาลถึงค่า proportional limit เท่านั้น

ให้พิจารณาเสายาว L ซึ่งถูกรองรับแบบธรรมดา (simply supported - pinned หรือ pivoted) ที่ปลายเสาทั้งสองด้าน ในขณะที่เกิดการโก่งงอขึ้น โมเมนต์ตัดที่หน้าตัดใดๆของเสา ระยะ x จากปลายบน คือ

$$M = Py$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -Py$$

ให้  $k^2 = P/EI$



รูปที่ 2

คำตอบของสมการนอ

$$y = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx$$

จากเงื่อนไข  $y = 0$  ที่  $x = 0$  จะได้ว่า  $C_2 = 0$

ฉะนั้น deflection curve ของเสาจะเป็นรูปครึ่ง sine wave คือ

$$y = C_1 \sin kx \tag{1}$$

จาก  $y = 0$  ที่  $x = L$  จะได้ว่า

$$0 = C_1 \sin kL$$

ถ้า  $C_1 = 0$  แล้ว  $y$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ฉะนั้นจะไม่มีภาระโก่งงอเกิดขึ้น เพื่อที่จะหาแรงวิกฤติ  $P_{cr}$   $C_1$  ไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\sin kL = 0$$

$$kL = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \tag{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดหรือ อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกซ้ำหรือเผยแพร่ข้อมูลข้างต้นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

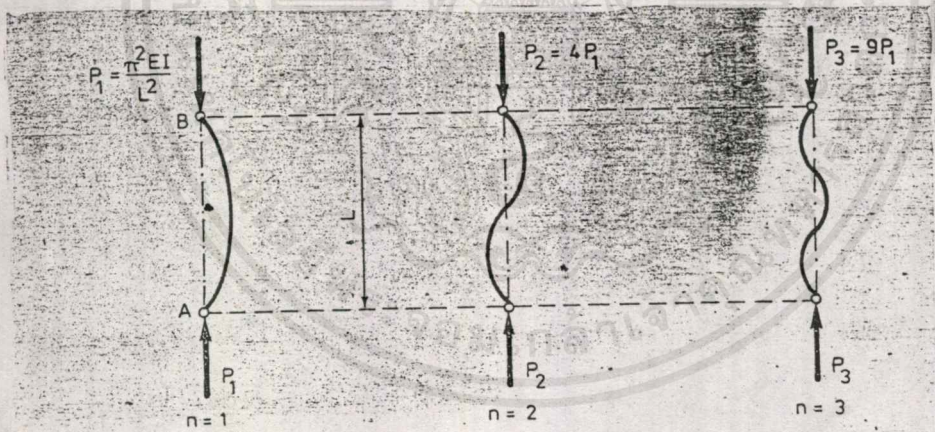
เนื่องจาก  $P_{cr}$  เป็นแรงน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการโก่งงอขึ้น ฉะนั้น  $P_{cr}$  จึง  
ได้จากการแทนค่า  $n = 1$  นั่นคือ แรงวิกฤติ สำหรับกรณีนี้

$$P_{cr} = \pi^2 EI / L^2 \quad (3)$$

ถ้าค่า  $k = n\pi/L$  ถูกแทนลงในสมการ (1) จะได้

$$y = C_1 \sin n\pi x / L$$

จะเห็นว่า deflection curve สำหรับค่าต่างๆของ  $n$  มีลักษณะเป็นจำนวน  
half-sine wave ตามค่าของ  $n$  ดังที่แสดงอยู่ในรูป 3 อย่างไรก็ตามเสาชนิดนี้จะ  
เกิดการโก่งงอในลักษณะของหนึ่ง half-sine wave เสมอ การที่จะให้ได้การ  
โก่งงอแบบ  $n=2$  จำเป็นที่จะต้องเพิ่มที่รองรับ ณ จุดกึ่งกลางเสา



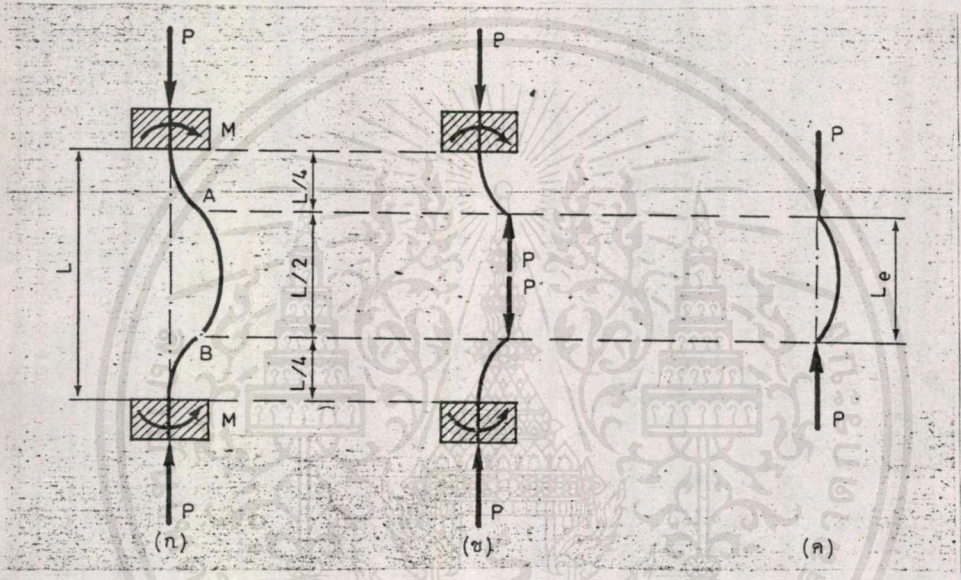
รูป 3

ฉะนั้น deflection curve ของ  $P_{cr}$  จะเป็นหนึ่ง half-sine  
wave โดยมี inflection point ณ A และ B ซึ่งค่าของโมเมนต์ตัดเป็นศูนย์  
ค่า  $P_{cr}$  ในสมการ (3) นี้ ยังมีชื่อเรียกอีกว่า Euler's load



### แรงวิกฤติของเสาชนิดอื่น

แรงวิกฤติของเสาซึ่งปลายเป็นอย่างอื่น เช่น ปลายยึดแน่นมิให้หมุนได้ สามารถที่จะหาได้โดยพิจารณาเสาแบบธรรมดาของรูป 3 หรืออีกนัยหนึ่ง  $P_{cr} = C [\pi^2 EI/L^2]$  โดยที่ค่า  $C$  เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายเสา ตัวอย่างเช่น ให้พิจารณาเสาที่ปลายถูกยึดแน่นตามรูป 4 จากความสัมพันธ์ของ deflection curve จะมี deflection point ณ จุด AB ตามรูป 4 ก



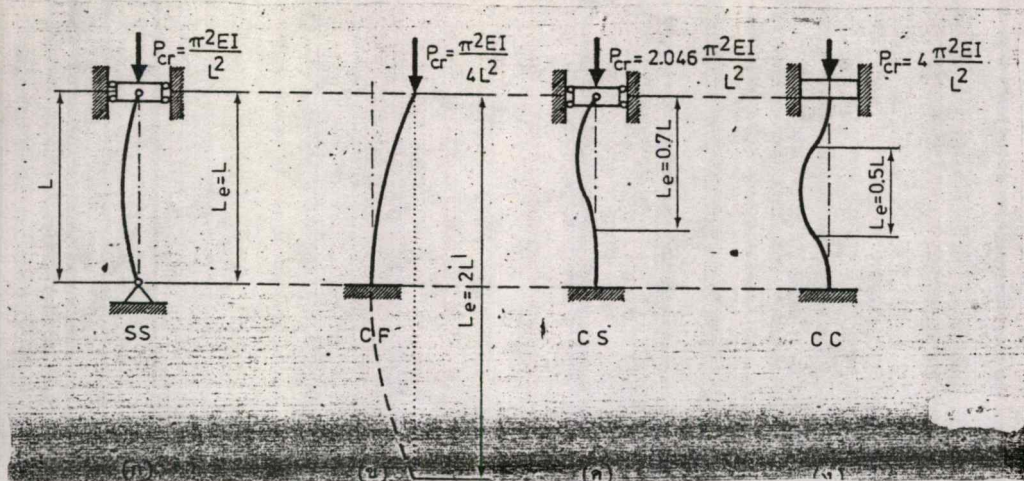
รูป 4

free body ของเสาที่ถูกแสดงอยู่ในรูป 4 ข และ ค จะเห็นว่าส่วนของเสาในรูป 4 ค มีลักษณะเช่นเดียวกับเสาธรรมดาในรูปแรกของ 3 โดยมีความยาวเป็น  $L_e$  ค่า  $L_e$  นี้เรียกว่า equivalent length ฉะนั้นแรงวิกฤติของ เสา ซึ่งปลายทั้งสองข้างถูกยึดแน่น จะหาได้จากสมการ (3) ซึ่งเป็น Euler's load คือ

$$P_{cr} = \pi^2 EI/L_e^2 = \pi^2 EI/(L/2)^2 = 4\pi^2 EI/L^2 \quad (4)$$

โดยการให้หลักของ equivalent length นี้จะทำให้สามารถหาแรงวิกฤติของเสา ซึ่งมีปลายต่างๆกันได้ ดังที่แสดงอยู่ในรูป 5 ในรูปนี้ถ้าให้ S C และ F แทนปลายแบบ simply supported clamped และ free ตามลำดับ

เช่น SC หมายถึงเสาซึ่งปลายด้านหนึ่งเป็นแบบ simply supported (หรือ pinned) ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นแบบ clamped (หรือ fixed) เป็นต้น



รูป 5

### ข้อจำกัดการใช้สูตรของ Euler

จากสูตรของแรงวิกฤติ จะเห็นว่าสำหรับเสายาว แรงวิกฤติจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามค่าของ  $E$  และ  $I$  ถ้าค่า  $I$  ของหน้าตัดของเสารอบแกนทั้งสอง (principal axes) มีค่าไม่เท่ากัน ดังเช่นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสาจะเกิดการโก่งงอในแกนซึ่งมีค่า  $I$  น้อยที่สุด

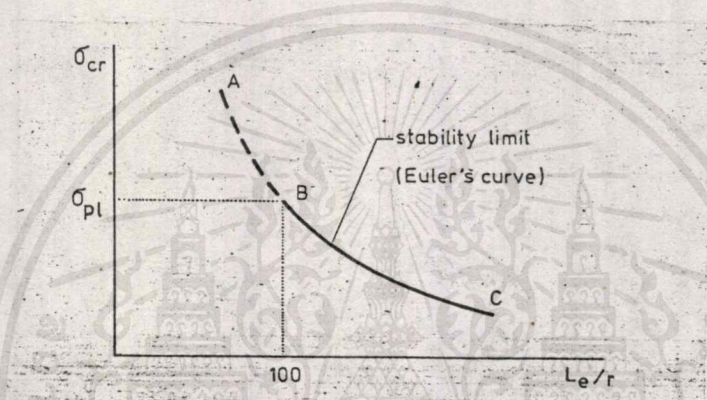
จากสูตรของแรงวิกฤติจะพบว่า แรงวิกฤติไม่ขึ้นกับความแข็งแรงวัสดุที่ใช้ทำเสา สมมติให้เสาสองอันมีขนาดและลักษณะเหมือนกันทุกประการ อันหนึ่งทำด้วยเหล็กซึ่งมี proportional limit สูง แต่อีกอันหนึ่งทำด้วยเหล็กธรรมดา ซึ่งค่าของ proportional limit ต่ำกว่า แต่ว่าเหล็กทั้งสองชนิดนี้มีค่าของยังโมดูลัส  $E$  เท่ากัน ฉะนั้นขนาดของแรงวิกฤติก็จะเท่ากันด้วย

เนื่องจากสูตรของแรงจะใช้ได้ในขณะที่ความเค้นที่เกิดขึ้นยังไม่เกิน proportional limit เท่านั้น ฉะนั้นจึงจะต้องมีข้อจำกัดในการใช้สูตรสำหรับวัสดุแต่ละชนิด

จากสูตรของเสาทั่วไป  $P_{cr} = \pi^2 EI / L_e^2$  ให้แทนค่า  $I = Ar^2$  โดยที่  $A$  เป็นพื้นที่หน้าตัด และ  $r$  คือ radius of gyration ของหน้าตัดรอบแกนซึ่งให้ค่า  $I$  น้อยที่สุด ดังนั้น

$$\sigma_{cr} = P_{cr}/A = \pi^2 E / (L_e/r)^2 \quad (5)$$

$\sigma_{cr}$  คือค่าความเค้นวิกฤติ ส่วนค่า  $L_e/r$  มีชื่อเรียกว่า ความเรียว (slenderness ratio) สำหรับวัสดุชนิดหนึ่ง ข้อจำกัดของการใช้สูตร (5) จะขึ้นอยู่กับความเรียว กราฟของสมการ (5) สำหรับค่า  $E = 205 \text{ GN/m}^2$  (เหล็ก) ถูกแสดงอยู่ในรูป 6



รูปที่ 6

สมมติว่าเสาทำด้วยเหล็ก ซึ่งมี proportional limit  $\sigma_{p1}$  เท่ากับ  $200 \text{ MN/m}^2$  ฉะนั้นจากสมการ (5) ค่าต่ำสุดของความเรียวซึ่ง Euler's load ยังใช้ได้คือ

$$(L_e/r)^2 = \pi^2 E / \sigma_{p1} = \pi^2 * 205 * 10^9 / 200 * 10^6$$

$$L_e/r = 100$$

ถ้า  $L_e/r$  มีค่าน้อยกว่า 100 ดังเช่นเส้นประ AB ในรูป 6 ความเค้นวิกฤติจะมีค่าเกิน proportional limit ซึ่ง Euler's load ในสมการ 1.5 จะใช้ไม่ได้

## ANALYSIS

ใน Project นี้ทำการศึกษาเสาสูงสองประเภทคือแบบ Fixed end และ Pinned end โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ทาค่าแรงวิกฤติที่ทำให้เกิดการโก่งงอของท่อ PVC 2 ลักษณะคือ

1. เจาะรูที่ตำแหน่งต่างๆของท่อ
2. เจาะรูตรงกลางท่อ โดยรูเจาะมีขนาดต่างๆกัน

เมื่อได้ผลการทดลองแล้ว นำมาพล็อตกราฟ Dimensionalless ระหว่าง

1. ตำแหน่งของรูเจาะต่อความยาวของท่อ และ แรงวิกฤติของท่อที่เจาะรู ต่อแรงวิกฤติของท่อที่ไม่เจาะรู ( $F'/F$ )
2. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ( $d/D$ ) และแรงวิกฤติของท่อที่เจาะรู

## อุปกรณ์ทดลอง

1. UNIVERSAL TESTING MACHINE
2. ท่อ PVC ขนาด 15 มม. ทน 19 มม.
3. หัวจับปลายเสาแบบ FIXED END และ แบบ PINNED END

## วิธีทดลอง

1. เลือก Test condition ของเครื่อง UTM ดังนี้

- Test Mode = Single Tension
- Test Speed 5 mm./min
- Return Position 10 mm.
- Recorder Mode X-P
- X-Axis Load
- Load cell 10000 kgf.
- F/S Load 200 (\*50) kgf.
- Chart Mode FORWAED UP CONNECT

2. เตรียมท่อ PVC 2 ชุด สำหรับการทดลอง (แบบ FIXED END และ แบบ PINNED END)

2.1).- เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.5 มม. ที่ตำแหน่ง  $l=L/2$  (L=ความยาวของท่อ) โดยใช้ท่อที่มีความยาวต่างๆกันดังนี้ L = 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 มม.

- เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.5 มม. ที่ตำแหน่ง  $l=L/3$  โดยใช้ท่อที่มีความยาวเหมือนกับข้อแรก

- เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.5 มม. ที่ตำแหน่ง  $l=2L/3$  โดยใช้ท่อที่มีความยาวเท่ากับข้อที่ผ่านมา

2.2). เจาะรูบนท่อยาว L = 50 ซม. ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

แตกต่างกันไว้ดังนี้การใช้ d เท่ากับ 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5 และ 8 มม. ให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3). เจาะรูบนท่อยาว  $L = 50$  มม. ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังนี้  $d = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14$  และ  $15$  มม.

2.4). เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $15$  มม. บนท่อที่ยาว  $L = 50$  มม. ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้  $l = 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40$  มม.

3. นำท่อประกอบเข้ากับอุปกรณ์ทดลองตามรูป แล้วปรับ STROKE และ LOAD ให้เท่ากับศูนย์จากนั้นเริ่ม TEST START

4. ทำการบันทึกค่าโดย

4.1). วาดกราฟแท่งระหว่าง MAXIMUM LOAD กับความยาวท่อ ( $L$ ) ของ specimens ในข้อ 2.1 เพื่อทำการเปรียบเทียบผลกระทบจากลักษณะการยึดตัวของปลายเสา แบบ FIXED END และ แบบ PINNED END

4.2). วาดกราฟแท่งระหว่าง MAXIMUM LOAD กับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของรูเจาะ ( $d$ ) ทำการบันทึกค่าและเปรียบเทียบผลกระทบทั้งแบบ FIXED END และ PINNED END

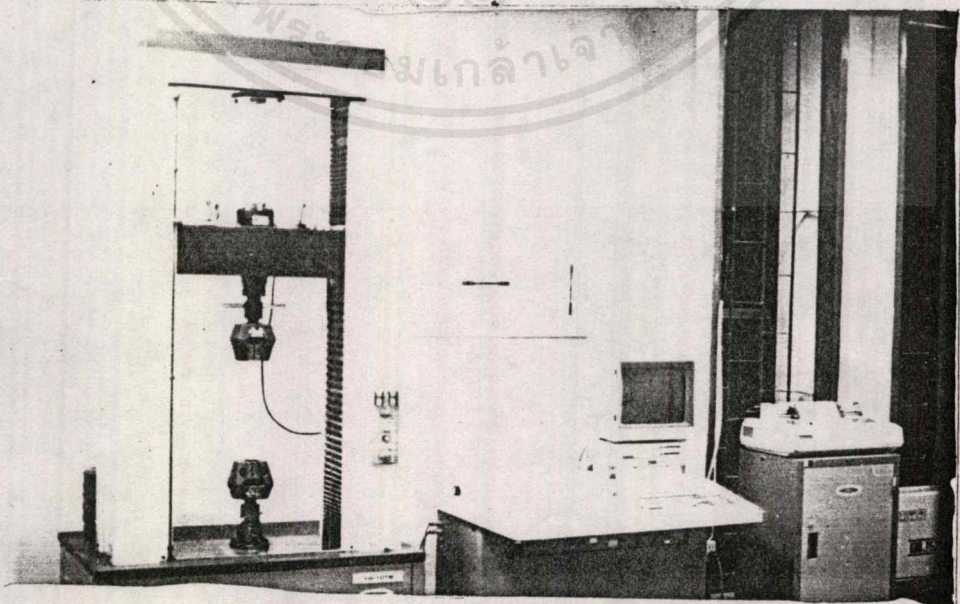
4.3). พล็อตกราฟ Dimensionalless ของ specimen ตามข้อ 2.3 โดยบันทึกค่า เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของรูเจาะหารส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ( $d/D$ ) กับ แรงวิกฤติของท่อที่เจาะรูส่วนแรงวิกฤติของท่อที่ไม่เจาะรู ( $F'/F$ )

4.4). พล็อตกราฟ Dimensionalless ของ specimen ในข้อ 2.4 ระหว่างตำแหน่งของรูเจาะส่วนความยาวท่อ ( $l/L$ ) แรงวิกฤติของเสาเจาะรูส่วนแรงวิกฤติของเสาไม่เจาะรู ( $F'/F$ )

## Universal Testing Machine

เครื่อง Universal Testing Machine นี้เป็นเครื่องทดสอบวัสดุ วัสดุทดสอบ (specimens) ด้วยการดึงหรือการกด โดยสามารถรับแรงได้ที่ load cell (รูป 8) และสามารถเลือก ความเร็วในการทดสอบ (Test Speed) ได้ด้วย computer ซึ่ง Universal Testing Machine มีคุณสมบัติต่างๆคือ

- computer control and measuring system
- maximum load 10 tons
- equipment
- load cell 2 and 10 tons with load amp.
- extensometer 2.5-25 mm. with strain amp; calibration device
- dynamics strain amp.
- tension and compression head
- tension and compression calibration device
- plate and rod grips



รูป 7. UNIVERSAL TESTING MACHINE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STROKE  
0.0 mm

LOAD  
0.0 %

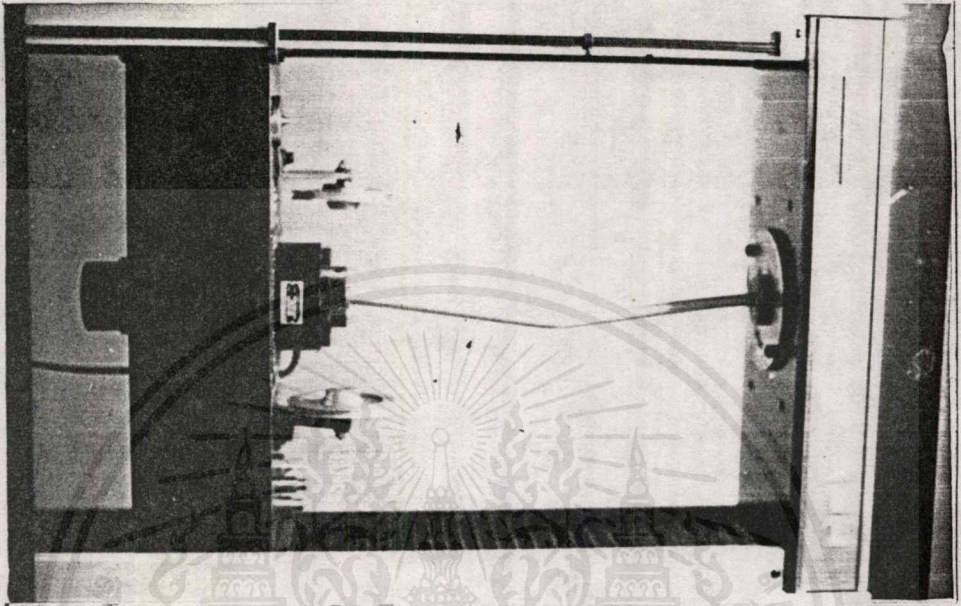
TEST  
UP START

TEST MODE SINGLE TENSION  
TEST SPEED 5 mm/min (1/1)  
TRAVERSE SPEED 100 mm/min  
RETURN POSITION 10 mm  
STOP  
RECORDER MODE X-P  
X-AXIS LOAD  
LOAD CELL 10000. kgf  
F/S LOAD 200 (\* 50) kgf (AUTO)  
CHART RATIO 1.0000  
CHART MODE FORWARD UP CONNECT

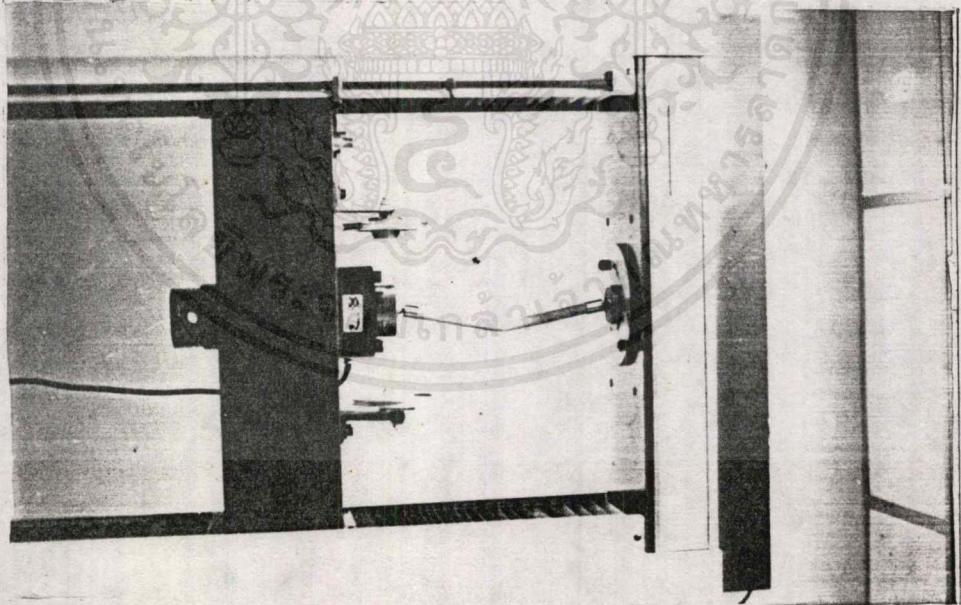
TESTING TIME 13 min

Print [ ] f2:Set [ ] f3:Run [ ] f4:Memo [ ] f10:Disp Change

รูป 8. ภาวะการทดสอบ



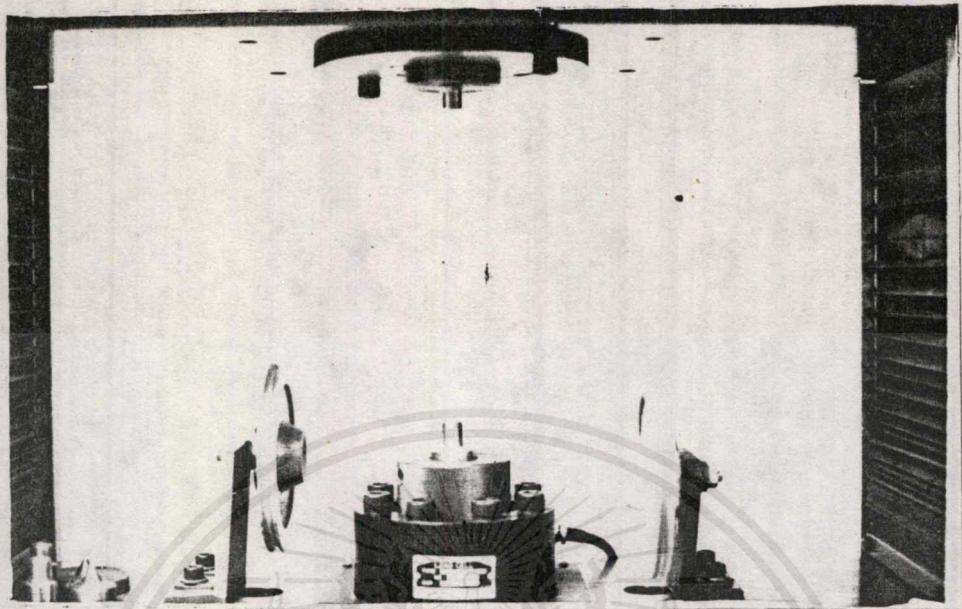
(ก)



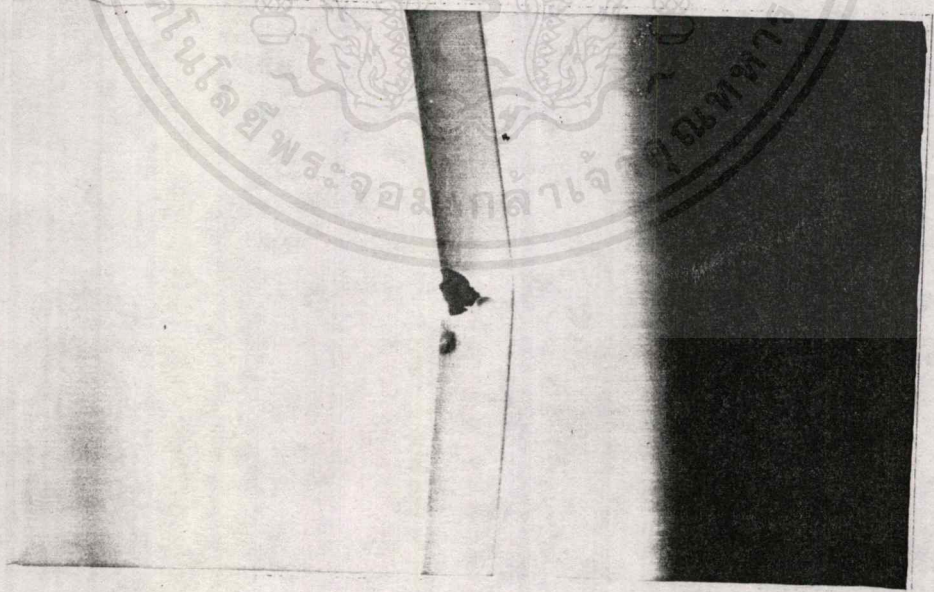
(ข)

รูป 9. การทดสอบ (ก) แบบปลายยึด (ข) แบบปลายอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 10. ลักษณะหัวจับแบบปลายยึดที่ออกแบบ



รูป 11. ลักษณะการโก่ง

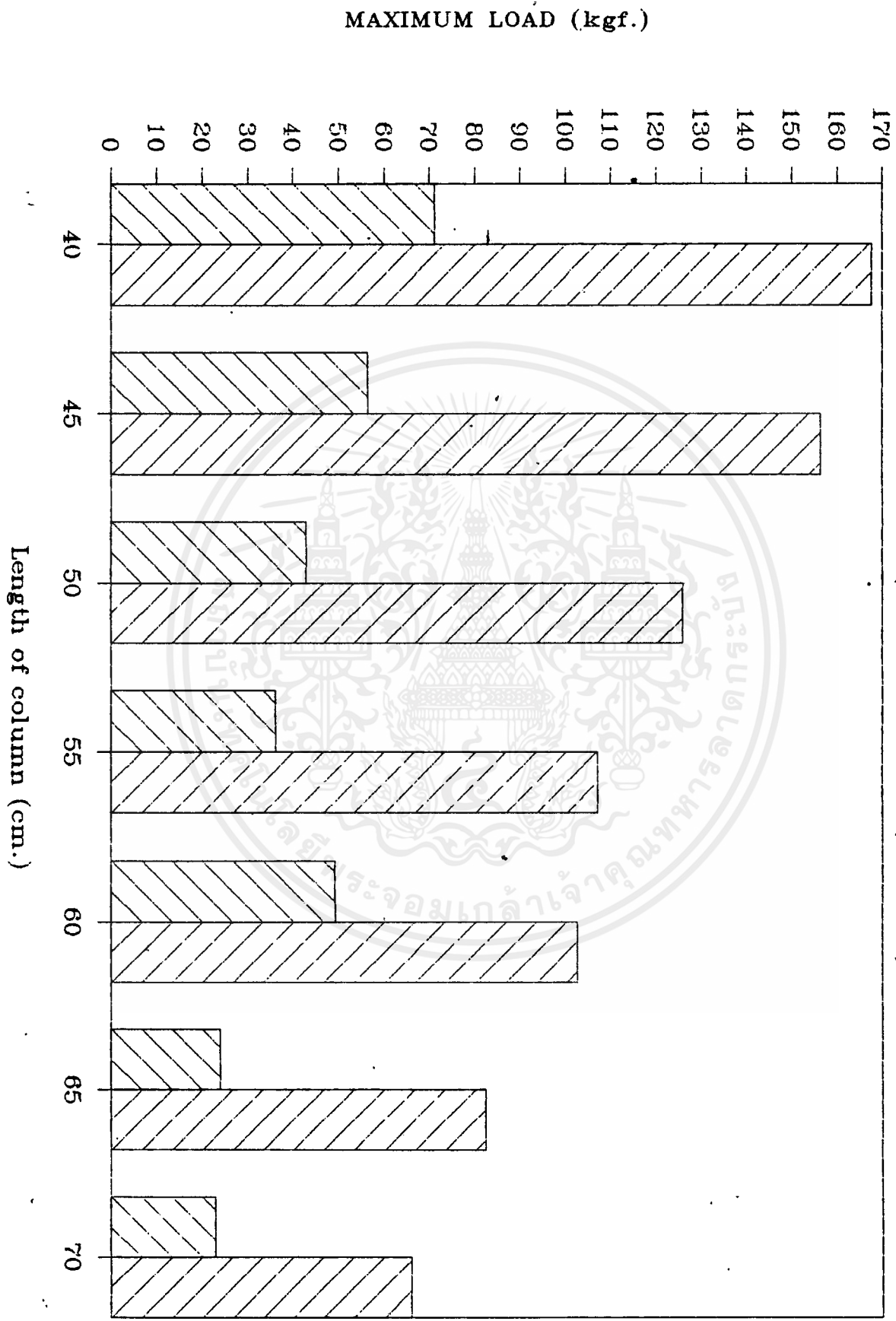
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

RELATION BETWEEN LENGTH AND MAX. LOAD AT  $l = L/2$   
FIXED ENDED AND PINNED END  
Diameter of hole is 8.5 mm.

Length of column (cm.)	MAXIMUM LOAD (kgf.)	
	PINNED END	FIXED END
40	71.36	167.68
45	56.64	156.32
50	43.12	125.92
55	36.32	107.20
60	49.28	102.56
65	24.00	82.56
70	23.04	66.08

# RELATION BETWEEN LENGTH AND MAX. LOAD AT $l=L/2$ (FIXED END AND PINNED END)



RELATION BETWEEN LENGTH AND MAXIMUM LOAD

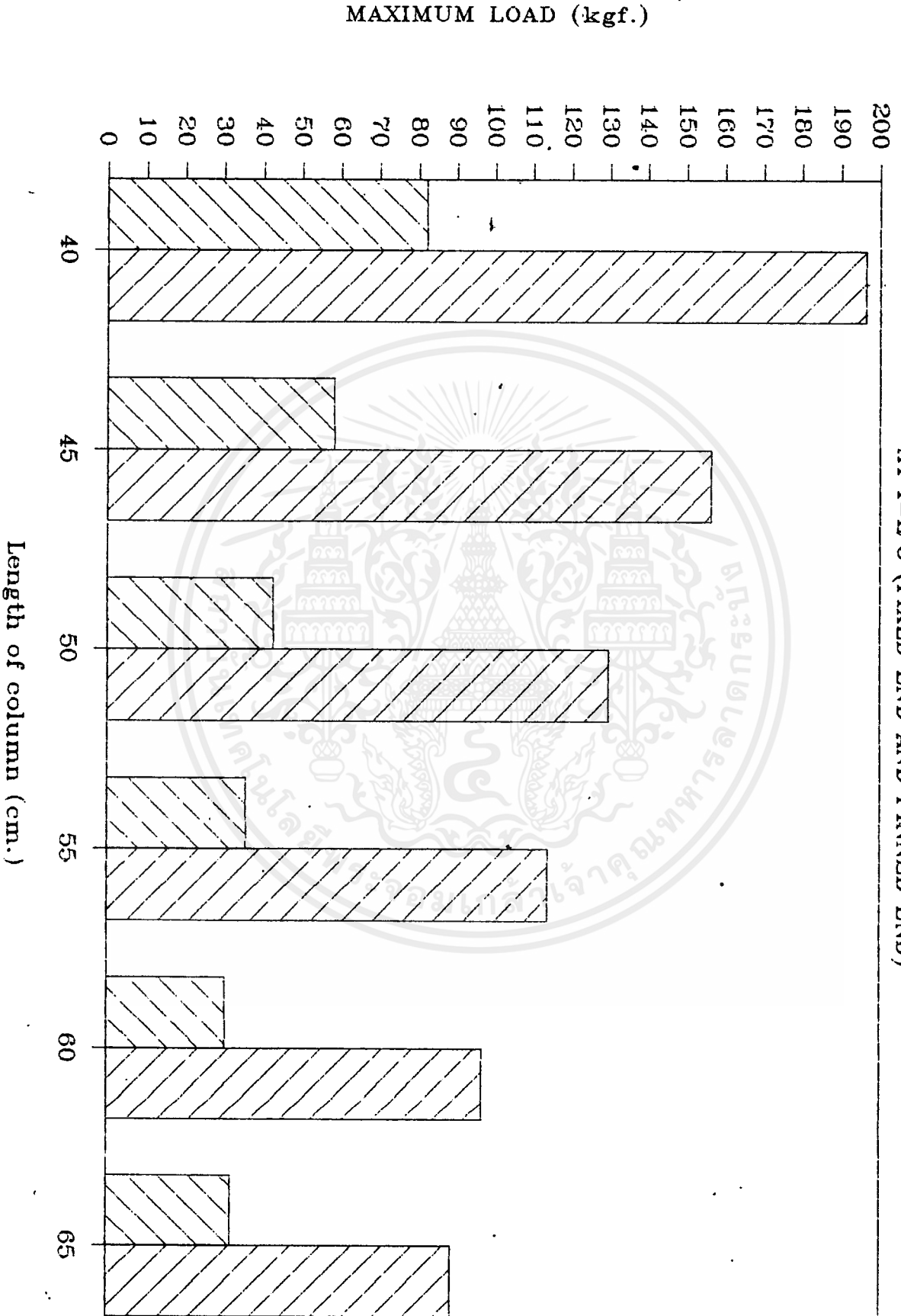
AT  $l = L/3$  (FIXED END AND PINNED END)

Diameter of hole is 8.5 mm.

Length of column (cm.)	MAXIMUM LOAD (kgf.)	
	PINNED END	FIXED END
40	82.24	196.4
45	58.24	156.48
50	42.64	129.90
55	35.76	113.76
60	30.32	96.48
65	31.76	88.56

# RELATION BETWEEN LENGTH AND MAX. LOAD

AT  $l=L/3$  (FIXED END AND PINNED END)



RALATION BETWEEN LLENGTH AND MAXIMUM LOAD

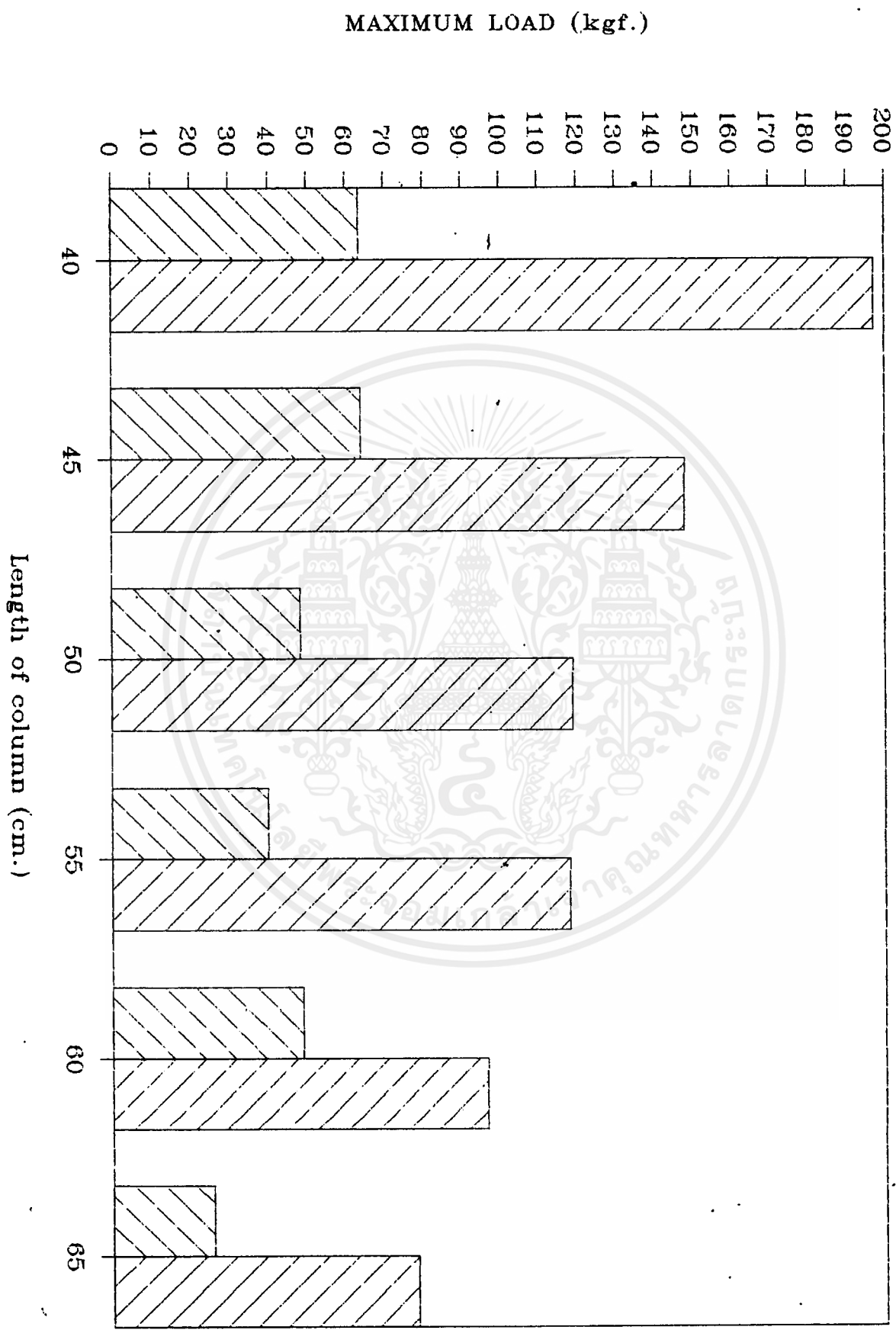
AT  $l = 2L/3$  (FIXED END AND PINNED END)

Diameter of hole is 8.5 mm.

Length of column (cm.)	MAXIMUM LOAD (kgf.)	
	PINNED END	FIXED END
40	63.52	197.20
45	63.92	148.16
50	48.32	119.40
55	39.84	118.24
60	48.80	96.64
65	25.60	78.48

# RELATION BETWEEN LENGTH AND MAX. LOAD

AT  $l = 2L/3$  (FIXED END AND PINNED END)



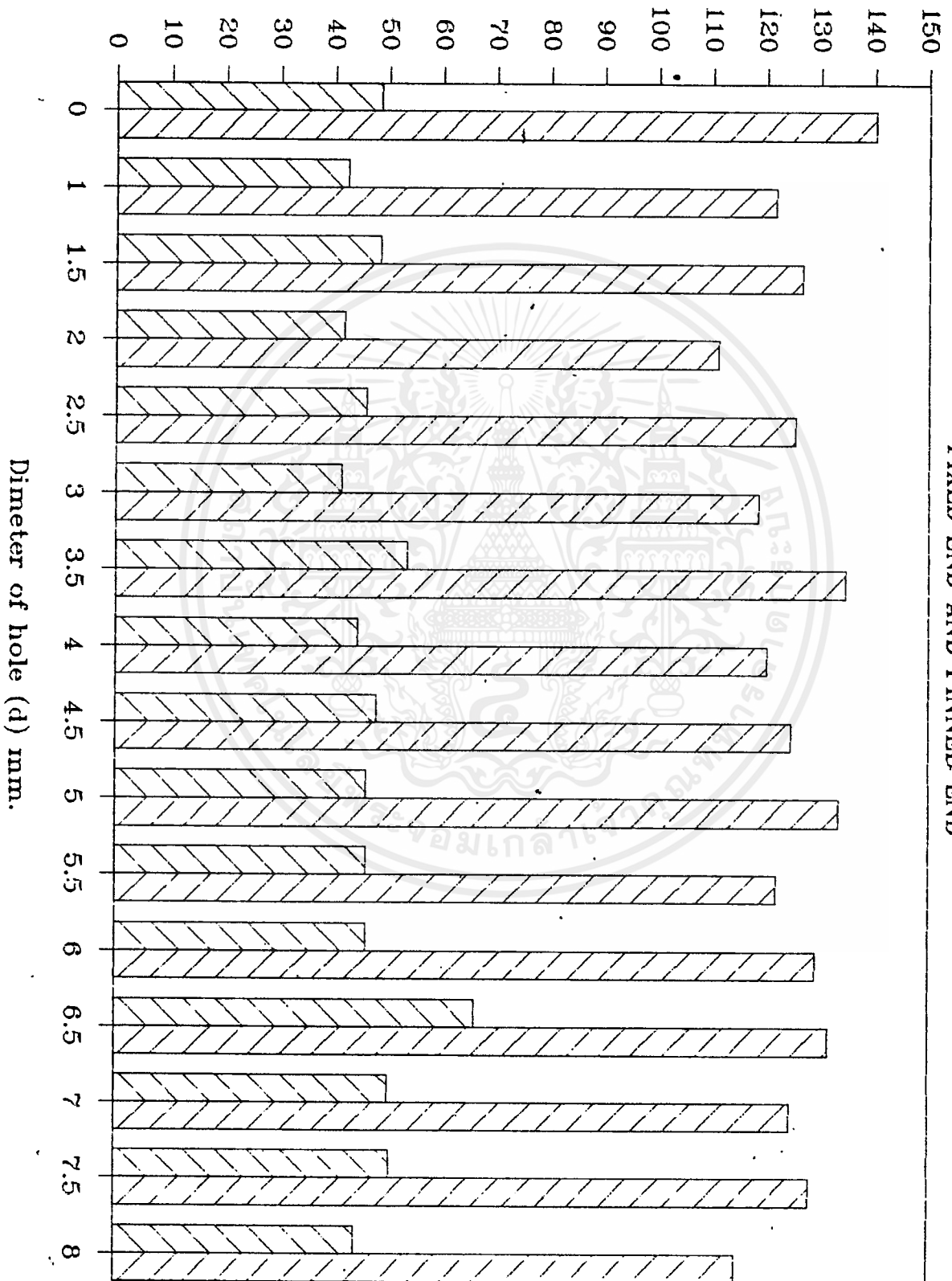
COMPARISON MAXIMUM LOAD OF FIXED END AND PINNED END

Diameter of hole (d) = 8.5 mm., l = L/2

Diameter (mm.)	FORCE (kgf.)	
	FIXED END	PINNED END
0	140.16	48.71
1	121.77	42.42
1.5	126.77	48.55
2	111.13	41.86
2.5	125.48	46.05
3	118.54	41.29
3.5	132.84	53.63
4	120.16	44.36
4.5	124.51	47.91
5	133.54	46.01
5.5	121.93	45.89
6	129.19	45.97
6.5	131.61	66.13
7	124.35	50.08
7.5	128.06	50.40
8	114.35	43.79

Force (kgf.)

# COMPARISON MAXIMUM LOAD FIXED END AND PINNED END



Diameter of hole (d) mm.

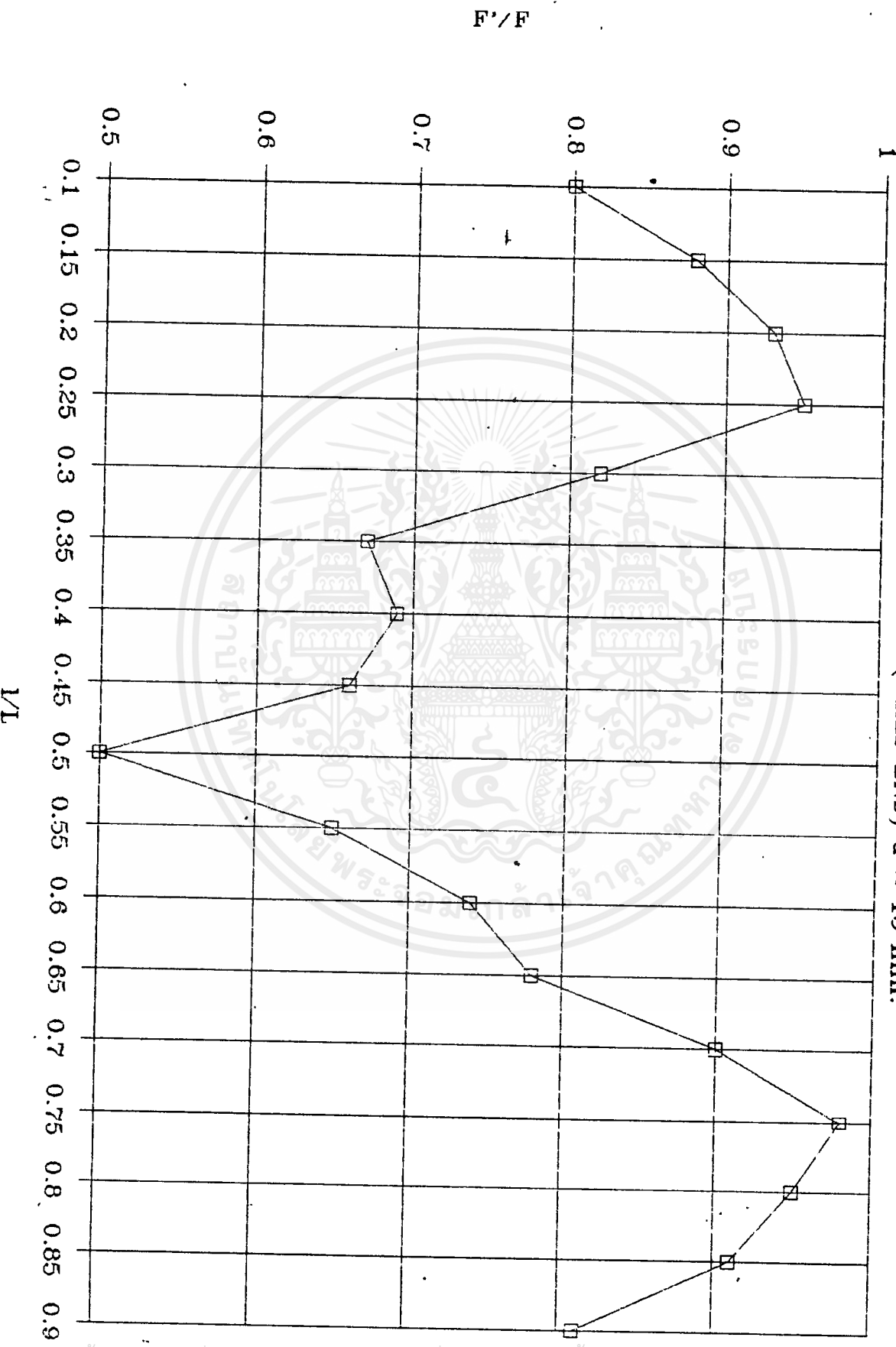
RELATION BETWEEN POSITION OF HOLE AND FORCE

(FIXED END) L = 50 cm., d = 15 mm.

l (mm.)	FORCE (kgf.)		
	test no.1	test no.2	average
5	92.58	100.16	96.37
7.5	117.74	94.68	106.21
10	115.80	107.74	111.77
12.5	112.29	115.80	114.05
15	97.42	100.00	97.21
17.5	82.90	78.22	80.57
20	76.94	90.81	83.87
22.5	65.97	94.19	80.08
25	71.61	47.90	59.76
27.5	74.68	81.29	77.98
30	97.58	80.16	88.87
32.5	82.58	105.32	93.95
35	105.32	112.25	108.79
37.5	114.67	121.77	118.22
40	98.06	130.96	114.51
42.5	99.19	121.29	110.24
45	101.93	93.71	97.82

# RELATION BETWEEN POSITION OF HOLE-FORCE

Dimensionalless (FIXED END)  $d = 15 \text{ mm.}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาของเอกสารนี้ อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

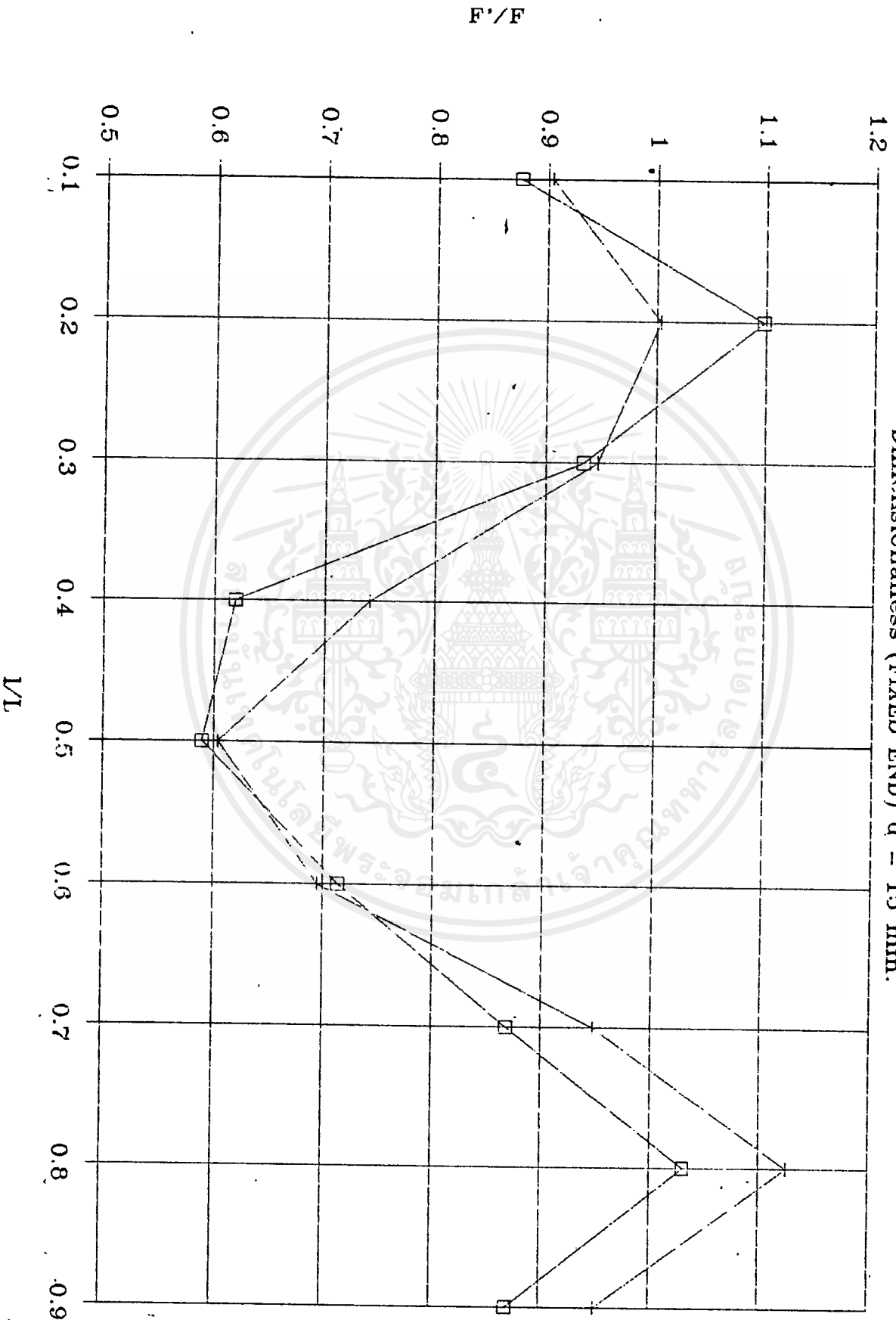
RELATION BETWEEN POSITION OF HOLE AND FORCE

( FIXED END ) L = 50 cm., d = 15 mm.

l (mm.)	FORCE (kgf.)	
	test no.1	test no.2
5	109.83	104.03
10	137.90	115.48
15	117.25	119.19
20	77.72	85.16
25	74.03	69.52
30	89.68	80.00
35	102.09	109.03
40	111.93	129.35
45	100.64	109.19

# RELATION BETWEEN POSITION OF HOLE-FORCE

Dimensionalless (FIXED END)  $d = 15 \text{ mm.}$



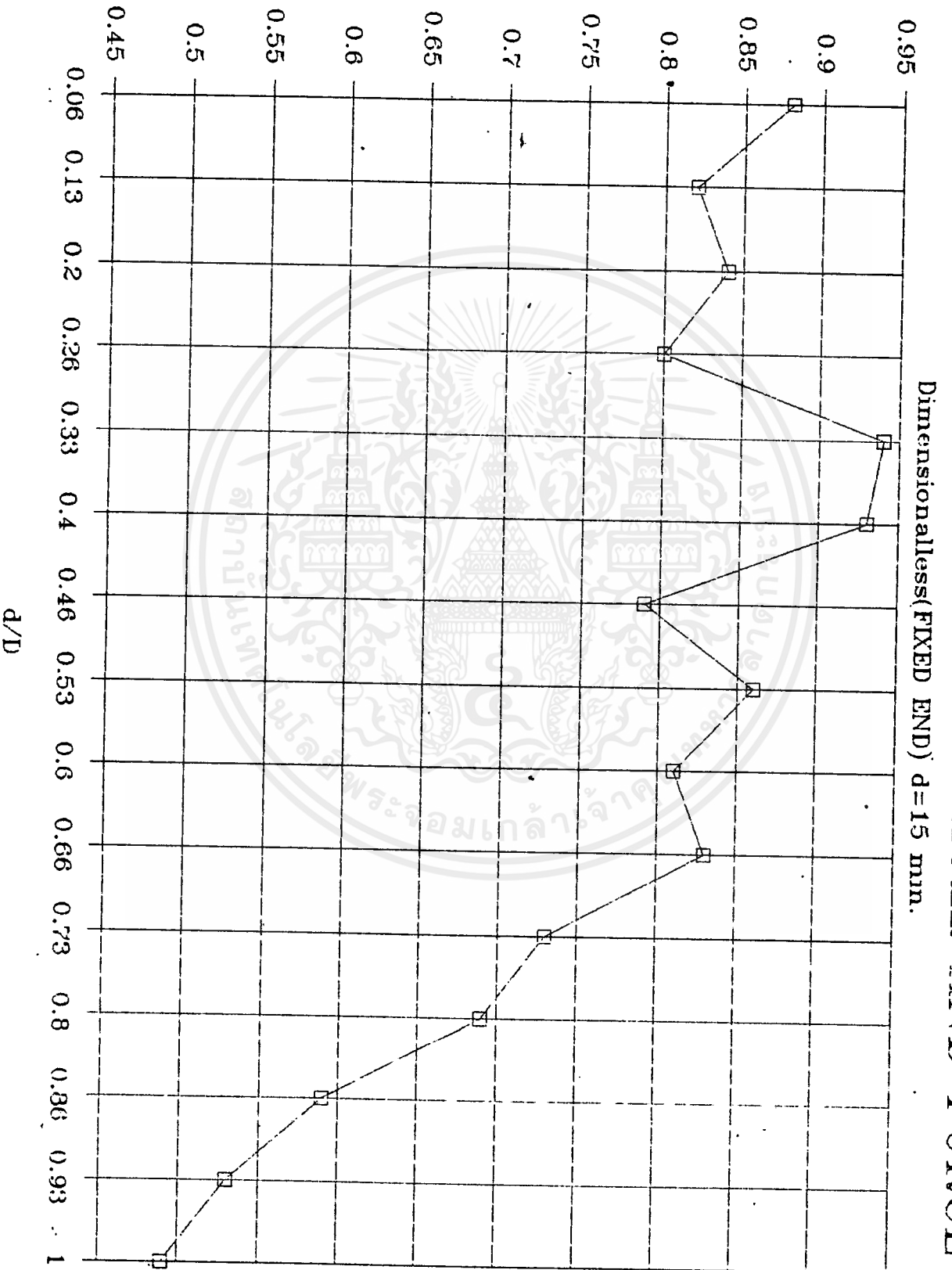
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา รูป ๑๗ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RELATION BETWEEN SIZE OF HOLE AND FORCE

(FIXED END) L=50 cm., d=15 mm.

Dimeter (d) (mm.)	FORCE (kgf.)		
	test no.1.	test no.2	average
0	140.20	140.16	140.18
1	124.51	121.77	123.14
2	119.83	111.13	115.48
3	110.25	124.54	117.39
4	104.19	120.16	112.17
5	131.45	133.34	132.39
6	130.64	129.19	129.92
7	97.90	124.35	110.69
8	125.64	114.35	119.99
9	106.29	122.09	114.19
10	122.90	110.64	116.52
11	100.80	102.58	101.69
12	99.03	95.48	97.25
13	79.03	85.48	82.25
14	72.10	76.77	74.44
15	65.97	70.32	68.15

# RELATION BETWEEN SIZE OF HOLE AND FORCE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

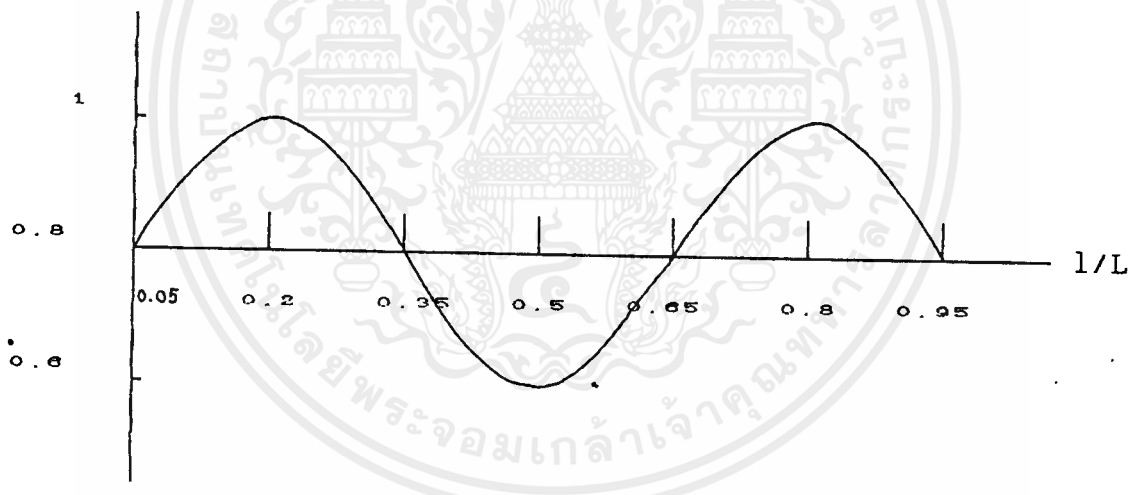
### ANALYTICAL RESULTS

1. ผลจากตำแหน่งของรูเจาะ

จากรูป 17 เป็นผลการทดสอบเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งรูเจาะ (L=50 mm d=15 mm.) เราสามารถประมาณค่าได้เป็น

l/L	0.05	0.2	0.35	0.5	0.65	0.8	0.95
F'/F	0.8	1	0.8	0.6	0.8	1	0.8

F'/F



รูป 18. กราฟจากการประมาณ

เราจะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงวิกฤตของ columns ที่มีรูเจาะบริเวณต่างๆ (F') กับแรงวิกฤตของ columns ที่ไม่ได้เจาะรู (F)

ให้  $F' = BF$

โดย  $F = -\pi^2 EI / L_u^2$  ..... (Euler's formular)

และ  $B = \text{BULK COEFICIENT}$

จากกราฟเป็นลักษณะของกราฟ sine ซึ่งจากการ approximate จะได้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = 0.2\sin\phi + 0.8$$

ซึ่ง

$$\phi = [ 10/3(l/L) - 1/6 ]\pi$$

เมื่อ  $0.1 < l/L < 0.9$

จากผลการทดลอง เราพบว่า

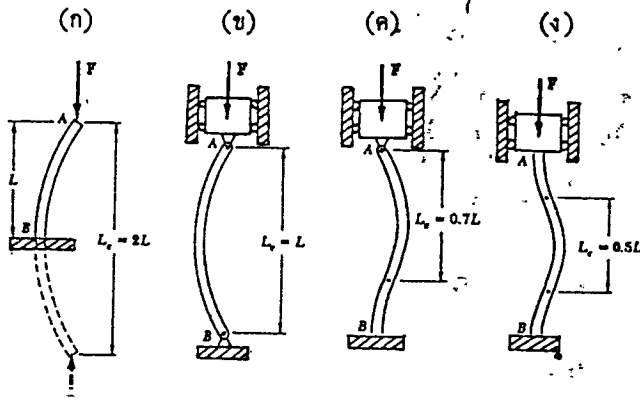
- 1). เมื่อเจาะรูที่บริเวณกลางท่อน ( $l=L/2$ ) จะทำให้ท่อนอ่อนแอที่สุด หรือรับแรงวิกฤติ ที่ทำให้ท่อนงอได้น้อยที่สุด
- 2). จากบริเวณ  $l = L/2$  ท่อนสามารถรับแรงวิกฤติได้มากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มหรือลด ( $l/L$ ) จนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง ซึ่งมีค่าประมาณ  $0.2l/L$  และ  $0.8l/L$  ท่อนจะรับแรงได้น้อยลงอีก การที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลมาจาก ในการทดลองที่ไม่สามารถ ทำ FIXED END ได้อย่างสมบูรณ์

หมายเหตุ เราสามารถ approximate ได้เฉพาะในช่วง  $0.1 < l/L < 0.9$  เท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดในการเจาะรูที่ปลายของเสา และเราสมมุติกราฟ เป็นกราฟ sine ในช่วงที่เราวิเคราะห์เท่านั้น

## 2. ความสัมพันธ์ระหว่าง FIXED END และ PINNED END

### Theoretical Analysis

จาก Euler's Formular ;  $F = \pi^2 EI / L_0^2$



รูป 19. เสาสูงแบบต่างๆ

แบบ PINNED END  $L_e = L$

แบบ FIXED END  $L_e = 0.5L$

จาก Euler's Formular เราพบว่า เมื่อ L ของท่อทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากันแล้ว แรงวิกฤติของเสาสูงแบบ FIXED END จะมีค่ามากกว่าแบบ PINNED END ถึง 4 เท่าตัว

Experimental Analysis

จากตาราง และกราฟแห่งรูป approximate แรงวิกฤติของเสาสูงแบบ FIXED END ประมาณ 3 เท่าของแรงวิกฤติของแบบ PINNED END การที่เป็นเช่นนี้ อาจเนื่องมาจาก เราไม่สามารถทำอุปกรณ์ PINNED END ได้อย่างสมบูรณ์คือ ช่วงปลายเสา ไม่สามารถโค้งได้อย่างเต็มที่ ดูรูป 9(ข)

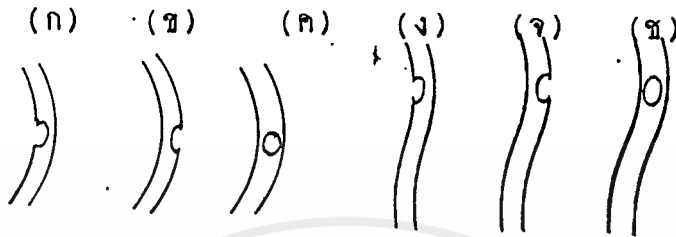
3. ผลของขนาดของรูเจาะที่มีต่อแรงวิกฤติ

จากรูป 18. จะเห็นได้ว่า ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ที่ 66% ขึ้นไปหรือ  $2/3(d/D)$  ขึ้นไป จะมีผลต่อแรงวิกฤติอย่างมาก

หมายเหตุ การทดสอบน้ำใช้ ท่อ PVC เป็น specimens ซึ่งท่อ PVC นี้มีค่า elastic สูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเล็ก ๆ จึงไม่ค่อยมีผลกระทบนัก แต่ในทางปฏิบัติแล้ว specimens อาจเป็นวัสดุชนิดอื่น ซึ่งอาจเกิดการแตกหักได้ (Fracture mechanics) เมื่อมีรูเจาะเพียงขนาดเล็กก็ได้

ข้อสังเกต

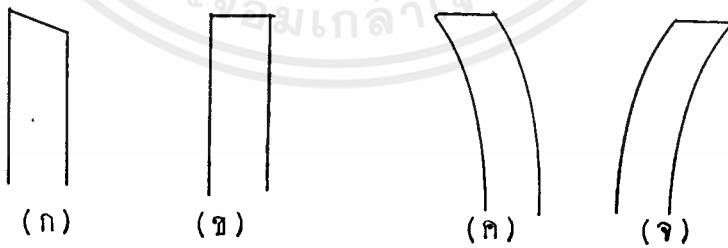
- รูเจาะที่อยู่บริเวณต่างๆ ของการโค้งของเสา (รูป 20) ก็มีผลต่อแรงวิกฤติ



รูป 20

ซึ่งทำให้ การทดสอบแต่ละครั้งได้ค่าที่ต่างกัน แต่ จะยึดเอา รูป ก หรือรูป 11 เป็นหลักเนื่องจาก การโค้งลักษณะนี้ รับแรงวิกฤติได้ต่ำที่สุด

- ที่ปลายตัดของ specimens ก็มีผลต่อลักษณะการโค้งของเสา สังเกต ปลายตัด 2 ลักษณะ ดังรูป



รูป 21 แสดงปลายตัดของเสา ที่มีผลต่อการโค้ง

รูป ก จะช่วยทำให้ เกิดการโค้งไปทางด้านขวา กลายเป็นรูป ค ส่วน รูป ข จะโค้งแบบปกติ เป็นรูป ค. หรือ รูป ง.

เพราะฉะนั้นเพื่อความถูกต้อง จะต้องให้ปลายตัดของไปใช้ specimens ไม่เรียบสม่ำเสมอขึ้น ดังรูป ขัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้าหากปราศจาก  
ความช่วยเหลือและกำลังใจ จากบุคคลหลายๆท่าน ผู้จัดทำขอขอบคุณ  
รศ. ลมชัย นรเศรษฐ์โรศกน ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาแก่ผู้เขียน และ  
ช่วยแก้ปัญหาต่างๆ มาโดยตลอด  
คุณ มณฑา เทียมเมือง เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้  
ให้ความช่วยเหลือและช่วยอำนวยความสะดวก โดยตลอดมา  
และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาต่างๆแก่ผู้จัดทำ  
ในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้