



การศึกษาทางทฤษฎีและทางปฏิบัติของ ไฮโดร ไดนามิกส์ เจอร์นอลแบร์ริง
THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON HYDRODYNAMIC JOURNAL BEARINGS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

007726

ปริญญาโทปีการศึกษา 2534

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาทางทฤษฎีและทางปฏิบัติของไฮโดรไดนามิกส์เจอร์นอลแบร์ริง

ผู้จัดทำ

- | | | |
|------------------|----------------|---------|
| 1. นายมงคล | เกษรตีวิทยากุล | 31.1205 |
| 2. นายมนต์ศักดิ์ | นิมसार | 31.1207 |
| 3. นายสุวิทย์ | จิตรราภักดิ์ | 31.1370 |

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาทางทฤษฎีและทางปฏิบัติของไฮโดรไดนามิกส์เจอร์นอลแบริง

นายมงคล	เกียรติวิทยากุล	31.1205
นายมนต์ศักดิ์	นิมसार	31.1207
นายสุริยนต์	จิตรวาทย์	31.1370
ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2534		

บทคัดย่อ

การทดลองนี้ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ และทางพลศาสตร์ของเจอร์นอลแบริงแบบวงกลมและแบบวงรี ซึ่งคิดความหยาบของผิวด้วย เมื่อกวาร์ไหลเป็นแบบเทอร์บิวเลนท์โดยได้ทำการศึกษาทั้งแบริงแบบเส้นและแบบความยาวจำกัด

คุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์ จะประกอบด้วย การกระจายความดันของแผ่นฟิล์มของไหล มุมแอตติจูด และค่าขอมเมอร์เฟลด์ ซึ่งจะคำนวณออกมาได้โดยใช้วิธีผลต่างแบบจำกัด โดยให้อัตราส่วนความรี และความหยาบสัมพัทธ์เฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ จะประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดหยุ่น ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง และค่าความเร็วเวอร์ลออนเซ็ต ซึ่งจะคำนวณออกมาโดยใช้ทฤษฎีของ Routh Hurwitz stability criterion เมื่อคิดว่าเพลามีการสั่นน้อยมาก

ผลการทดสอบจะเห็นว่าความหยาบของผิวจะมีผลอย่างมากกับคุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์และทางพลศาสตร์ สำหรับเจอร์นอลแบริงแบบวงรีที่มีความเร็วสูง

Theoretical and Experimental Studies on Hydrodynamic Journal Bearings

Mongkol Kiatwittayakul 311205

Monsak Pimsarn 311207

Suriyon Chitraphan 311370

Dr.Mongkol Mongkolvongroj : Advisor

Year 1991

Abstract

This project deal with the investigation of the static and dynamic behavior of circular and elliptical Journal bearings with rough surface in turbulent regime based on the short and finite length bearing theory.

The static charaeteristic; pressure distribution, attitude angle and sommerfeld number are calculated numerically by using Finite difference method at varying ellipticity ratio and average relative roughness.

The dynamic characteristic; spring coefficient, damping coefficient and whirl onset velocity are calculated by the Routh-Hurwitz stability criterion under the assumption of small displacements of the journal center.

The results show that the surface ronghness has highly effect on the static and dynamic characteristics especially for a high speed elliptical journal bearing.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของ ไฮโดร ไดนามิกส์ เจอร์จอลแบร์ริง	2
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง	11
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	16
บทที่ 5 ผลการคำนวณจากคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์	22
บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์	44
ภาคผนวก	46
กิตติกรรมประกาศ	88
เอกสารอ้างอิง	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปรากฏการณ์การเคลื่อนตัวของน้ำมัน (oil whirl phenomena) ที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรที่มีการใช้เจอร์นอลแบร์ริง เป็นที่ทราบกันดีว่า ปรากฏการณ์นี้เกิดจากแรงทางพลศาสตร์ของแผ่นฟิล์มน้ำมัน ซึ่งมีความสำคัญมากต่อสมรรถนะของเครื่องจักร ในอดีตได้มีการศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวทั้งทางทฤษฎี และทางปฏิบัติ โดยลักษณะของเจอร์นอลแบร์ริงจะเป็นรูปร่างกลมและการไหลเป็นแบบลามินาร์เป็นส่วนมาก ขณะที่เครื่องจักรที่พบเห็นในปัจจุบันนี้จะมีขนาด และความเร็วของส่วนที่มีการหมุนของเครื่องจักรเพิ่มมากขึ้น หรือใช้สารหล่อลื่นที่มีสัมประสิทธิ์ความหนืดต่ำ ก็จะทำให้ฟิล์มน้ำมันมีการไหลเป็นแบบเทอร์บิวเลนซ์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่จะต้องมีการศึกษาผลของการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ ที่มีต่อคุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์ และทางพลศาสตร์ ของเจอร์นอลแบร์ริง

ในปริิถยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษา ทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์ และทางพลศาสตร์ เมื่อการไหลของฟิล์มน้ำมันเป็นแบบเทอร์บิวเลนซ์ โดยศึกษาทั้งแบร์ริงอย่างสิ้น และแบบความยาวจำกัด ทั้งนี้ในการศึกษาทางทฤษฎียังได้ทำการศึกษาผลของความหนายของผิวที่มีต่อสมรรถนะของเจอร์นอลแบร์ริง โดยการคำนวณจะอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลข (iterative method) ผลต่างแบบจำกัด (finite difference) และทฤษฎี Routh-Hurwitz criterion ในทางปฏิบัตินั้น ได้ทำการศึกษาผลของค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของสารหล่อลื่นที่มีต่อคุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์

บทที่ 2

ทฤษฎีของไฮโดรไดนามิกส์เจอร์นอลแบร์ริง

หลักการของเจอร์นอลแบร์ริง

เจอร์นอลแบร์ริง คือ แบร์ริงชนิดที่เป็นปลอกหุ้มเพลลาไว้ โดยมีฟิล์มน้ำมันยกแบร์ริงให้ลอยพ้นจากเพลลาเพื่อป้องกันการเสียดสีระหว่างแบร์ริงกับเพลลาขณะที่เพลลาหมุน แบร์ริงจะเป็นตัวรับภาระในแนวรัศมี (Radial load) ของเพลลา รูป 1 แสดงรูปร่างลักษณะของเจอร์นอลแบร์ริง 360 องศา เพลลาหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω และรับภาระ P เมื่อเพลลาเริ่มหมุนในตอนแรก จะเกิดการเสียดสีของโลหะระหว่างเพลลาและแบร์ริงตรงจุดที่รับภาระ

หลังจากที่เพลลาหมุนไปได้เล็กน้อย น้ำมันสามารถไหลได้ทั่วถึงก็จะยกแบร์ริงให้ลอยจากเพลลาเป็นระยะความหนาของฟิล์มน้ำมัน เมื่อเพลลาหมุนเร็วขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ตำแหน่งคงที่ ฟิล์มน้ำมันจะถูกบีบจนบางที่สุดเรียกว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาความสามารถในการรับภาระของแบร์ริง



รูป 2.1 เจอร์นอลแบร์ริง 360 องศา

สำหรับในบริเวณนี้หนังสือฉบับนี้จะแสดงถึงเจอร์นอลแบร์ริงรูปวงรี ดังรูป 2.2 ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

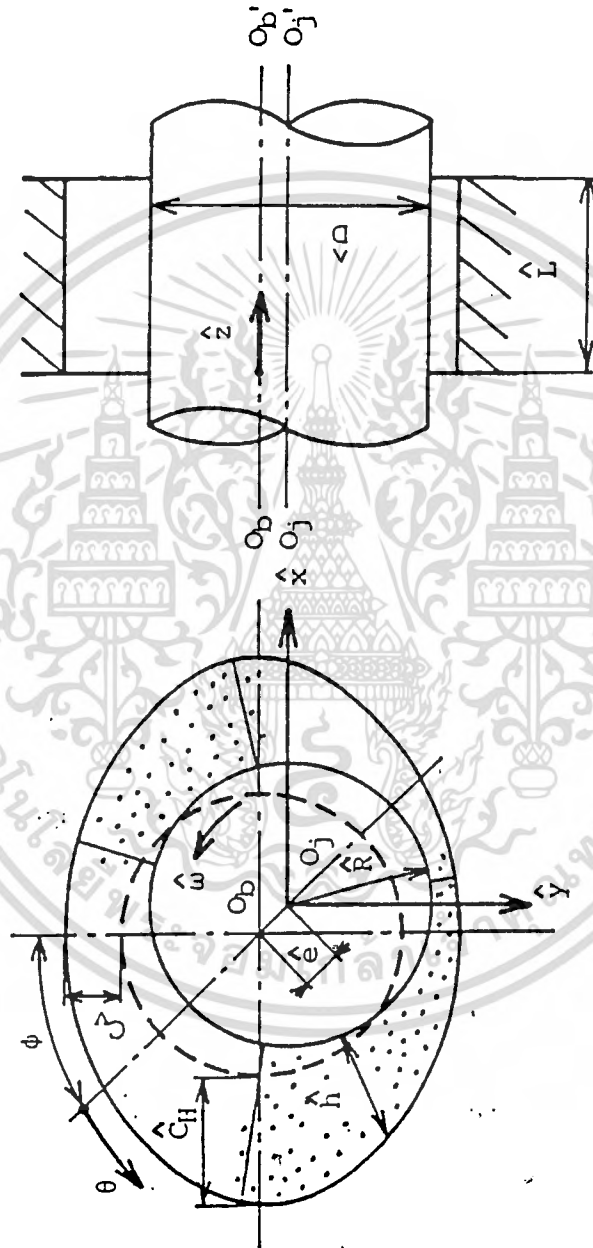
(1) แบร์ริงรูปวงรีอย่างสั้น (Short elliptical bearing)

(2) แบร์ริงรูปวงรีแบบความยาวจำกัด (Finite length elliptical bearing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ถ้า $\hat{L}/\hat{D} < 0.5$ เป็น Short bearing.

$0.5 < \hat{L}/\hat{D} < 1.5$ เป็น Finite length bearing.



รูป 2.2 เจอรินอลแบบริงรูปวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ทางทฤษฎีสำหรับเบร้งอย่างสั้น

สำหรับทฤษฎีเบร้งอย่างสั้น เราสามารถใช้สมการ Reynold's equation สำหรับการไหลแบบลามินาร์ และเทอร์บิวเลนซ์ ภายใต้สภาวะคงตัว (steady state) สมการจะอยู่ในรูป

$$\frac{d^2 p}{dz^2} = \frac{4 \lambda^2}{G_z h^3} \frac{dh}{d\theta} \dots\dots (1)$$

โดยที่

- λ = อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลา, \hat{L}/\hat{D}
- Z = ตัวแปรไร้มิติเป็นฟังก์ชันตามแกน, \hat{z}/\hat{L}
- G_z = ค่าสัมประสิทธิ์เทอร์บิวเลนซ์ (The modified turbulent coefficient)
- h = ตัวแปรไร้มิติของความหนาแผ่นฟิล์ม, \hat{h}/\hat{C}_v
- p = ตัวแปรไร้มิติของความดันแผ่นฟิล์ม, $\hat{P}\hat{C}_v^2/\hat{\mu}\hat{R}^2\hat{\omega}$

สำหรับความหนาของแผ่นฟิล์มของเจอร์นอลเบร้ง ลักษณะแบบวงรี ดังรูป 2

$$h = 1 + e \cos \theta + m \sin^2 (\theta + \phi) \dots\dots (2)$$

เมื่อ

- h = ตัวแปรไร้มิติของความหนาแผ่นฟิล์ม, \hat{h}/\hat{C}_v
- e = อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง, \hat{e}/\hat{C}_v
- m = อัตราส่วนของวงรี (ellipticity ratio), $(\hat{C}_H - \hat{C}_V)/\hat{C}_V$
- θ = พิกัดรอบรูป (circumferential coordinate)
- ϕ = มุมแอตติจูด (attitude angle)

เงื่อนไขขอบเขตของความดันแผ่นฟิล์ม สำหรับเจอร์นอลเบร้งแบบวงรี มีดังนี้

$$\frac{dP}{dz} = 0, Z = 1/2 \dots\dots (3)$$

$$P = 0, Z = 0 \dots\dots (4)$$

แทนค่าสมการ (2) ในสมการเรย์โนลด์ (1) ค่าของการกระจายความดันแผ่นฟิล์มหาได้โดย การแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตตามสมการ (3) และ (4)

ค่าตัวแปรไร้มิติของการกระจายความดันแผ่นฟิล์มอาจแสดงได้เป็น

$$P = \frac{\lambda^2}{G_z h^3} [e \sin \theta - m \sin 2 (\theta + \phi)] Z(Z-1) \dots\dots (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ค่าสัมประสิทธิ์เทอร์บิวเลนซ์ G_z อาจแสดงได้ในรูปของสมการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 $G_z = \min (G_{z1}, G_{z2})$

เมื่อ $G_{z1} = 1/12$ (ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นการไหลแบบลามินาร์)
 $G_{z2} = 2/C_{fm} R_h$ (ค่าสัมประสิทธิ์เป็นการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์)
 $R_h = \rho U h / \mu$

ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน cf_m อาจคำนวณได้จาก

$$\frac{1}{\sqrt{C_{fm}}} = 3.54 - 1.73 \ln \left[\frac{k_{nm}}{h} + \frac{11.80}{R_h \sqrt{C_{fm}}} \right] \dots\dots (6)$$

หลังจากที่เราได้สมการการกระจายความดันของแผ่นฟิล์ม แรงที่กระทำกับฟิล์มน้ำมันตามแนวรัศมี (radial) และตามแนวสัมผัส (tangential) ขนาดและทิศทางของแรงสามารถหาออกมาได้จากการ อินทิเกรตสมการการกระจายความดันเฉพาะความดันย่านที่เป็นบวก ภายในเงื่อนไขของสมการเรย์โนลด์

$$F_e = \frac{\hat{C}_v^z \hat{F}_e}{\hat{\mu} R^3 \hat{L} \hat{\omega}} = - \int_0^1 \int_{p>0} p \cos \theta d\theta dz \dots\dots (7)$$

$$F_\phi = \frac{\hat{C}_v^z \hat{F}_\phi}{\hat{\mu} R^3 \hat{L} \hat{\omega}} = \int_0^1 \int_{p>0} p \sin \theta d\theta dz \dots\dots (8)$$

สำหรับสภาวะคงตัว (steady state), มุมแอตติจูดสามารถได้จากสัมพันธ

$$\phi_o = \tan^{-1} (F_{\phi_o} / F_{e_o}) \dots\dots (9)$$

โดยที่ Subscript o แสดงถึงสภาวะคงตัว (steady state)

การคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical calculation) สำหรับการกระจายความดัน (Iterative method) จะกระทำจนกระทั่งคำตอบของมุมแอตติจูด ออกมา

โดยค่า Sommerfeld number ออกมา

$$S_o = \frac{1}{\pi \sqrt{F_{e_o}^2 + F_{\phi_o}^2}} \dots\dots (10)$$

ทฤษฎีแบริงความยาวจำกัด (Finite length bearing)

สมการเรย์โนลด์ (Reynold's equation) สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ภายในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) ของแบริงความยาวแบบจำกัด จะอยู่ในรูป

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (G_\theta h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta}) + \frac{1}{4\lambda} \frac{\partial}{\partial z} (G_z h^3 \frac{\partial p}{\partial z}) = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ค่าความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำมัน (Oil film thickness) จะมีค่าดังสมการ

$$h = 1 + e \cos \theta + m \sin^2 (\theta + \phi) \dots\dots (12)$$

เมื่อ ดิฟเฟอเรนเชียล h เทียบกับ t และ แทนค่าในสมการ (12) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (G_{\theta} h^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}) + \frac{1}{4\lambda} \frac{\partial}{\partial z} (G_z h^3 \frac{\partial P}{\partial z})$$

$$= - (1/2) (1-2\phi) \epsilon \sin\theta + \epsilon \cos\theta + (1/2) m \sin 2(\theta + \phi)$$

..... (13)

แล้วใช้ Finite difference แก้สมการ (13) หาความดัน (P) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์เทอร์บิวเลนซ์ (modified turbulence coefficient) G_{θ} , G_z มีค่าดังต่อไปนี้

$$G_{\theta} = \min (G_{\theta 1}, G_{\theta t})$$

$$G_z = \min (G_{z 1}, G_{z t})$$

เมื่อ

$$G_{\theta 1} = G_{z 1} = 1/12$$

$$G_{\theta t} = 1/C_{fm} R_h$$

$$G_{z t} = 2G_{\theta t} ; R_h = \rho h U / \mu$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานเฉลี่ย (average friction coefficient)

C_{fm} คำนวณจากสมการ

$$\frac{1}{\sqrt{C_{fm}}} = 3.54 - 1.73 \ln \left(\frac{k_{sm}}{h} - \frac{11.80}{R_h \sqrt{C_{fm}}} \right)$$

..... (14)

หลังจากนั้นก็จะสามารถคำนวณหาแรงแผ่นฟิล์มน้ำมัน F_E , F_{ϕ} , ϕ และค่าข้อมเมอร์เฟลด์ ได้จากสมการที่ใช้ในแบร์ริงอย่างสั้น

พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบร์ริง (Dynamic characteristics)

เมื่อเราอินทิเกรตการกระจายความดัน (Pressure distribution) องค์ประกอบของแรงทางพลศาสตร์ของแผ่นฟิล์มของไหล (Dynamic fluid film force components) ในแนวรัศมี (F_E) และในแนวสัมผัส (F_{ϕ}) ก็จะสามารถทราบค่าได้ ดังสมการ (7) และ (8)

เมื่อเราสมมติว่า การเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางของเจอร์นอลมีค่าน้อยมาก (Small vibration of the journal center)

เมื่อเขียนแรงให้อยู่ในรูปพิกัดคาร์เทเซียน (X,Y)

$$F_x = F_E \sin\phi - F_{\phi} \cos\phi$$

..... (15)

$$F_y = F_E \cos\phi + F_{\phi} \sin\phi$$

..... (16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อแรง F_x และ F_y มีค่าแปรผันตรงกับการขจัด (x,y) และความเร็ว (x,y) ไม่ว่าจะถี่แค่ไหน ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อเรื่องและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภายใต้ตำแหน่งสมดุลที่คงตัว เพราะฉะนั้นจะได้

$$F_x = F_{x0} + k_{xx} x + k_{xy} y + b_{xx} \dot{x} + b_{xy} \dot{y} \quad \dots (17)$$

$$F_y = F_{y0} + k_{yx} x + k_{yy} y + b_{yx} \dot{x} + b_{yy} \dot{y} \quad \dots (18)$$

เมื่อตัวห้อย "o" แสดงสภาวะคงตัว (steady state)

เมื่อนำสมการ (17) และ (18) แทนค่าลงในสมการการเคลื่อนที่ของเหลว ที่ถูกติดตั้งในแนวขวางเมื่อปลายเพลลาถูกรองรับด้วยแบริ่งที่จุดศูนย์กลางอยู่ในแนวระดับเดียวกัน และใช้ทฤษฎีของ Routh Hurwitz stability criterion กับสมการเคลื่อนที่ ค่า whirl onset velocity, w_{cr} จะมีค่าเท่ากับ

$$w_{cr} = \sqrt{\frac{a_1 a_3 a_5}{a_1^2 + a_2 a_5 - a_1 a_4 a_5}} \quad \dots (19)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์ $a_1 = K_{xx} B_{yy} + K_{yy} B_{xx} - K_{xy} B_{yx} - K_{yx} B_{xy} \quad \dots (20)$

$$a_2 = K_{xx} K_{yy} - K_{xy} K_{yx} \quad \dots (21)$$

$$a_3 = B_{xx} K_{yy} - B_{xy} B_{yx} \quad \dots (22)$$

$$a_4 = K_{xx} + K_{yy} \quad \dots (23)$$

$$a_5 = B_{xx} + B_{yy} \quad \dots (24)$$

เมื่อ $K_{ij} = \iint S_{ij} K_{ij}, B_{ij} = \iint S_{ij} b_{ij} \quad (i, j = x, y) \quad \dots (25)$

เมื่อ K_{ij} = ตัวแปรไว้มิติของสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Spring coefficient)

B_{ij} = ตัวแปรไว้มิติของสัมประสิทธิ์ความหน่วง (Damping coefficient)

การคำนวณสำหรับเจอร์นอลแบริ่งรูปร่างแบบความยาวจำกัด โดยวิธีผลต่างแบบจำกัด (Finite difference method)

การคำนวณในกรณีนี้ จะแบ่งเป็นการคำนวณออกเป็น 2 อย่าง คือ การคำนวณค่าคุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์ และทางพลศาสตร์ ในการคำนวณเราจะใช้วิธีทางผลต่างแบบจำกัด มาช่วยในการคำนวณหาค่าความดันฟิล์มน้ำมัน

วิธีผลต่างจำกัด (Finite difference method)

จากสมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมการเรย์โนลด์สำหรับเจอร์นอลแบริ่งรูปร่างแบบความยาวจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

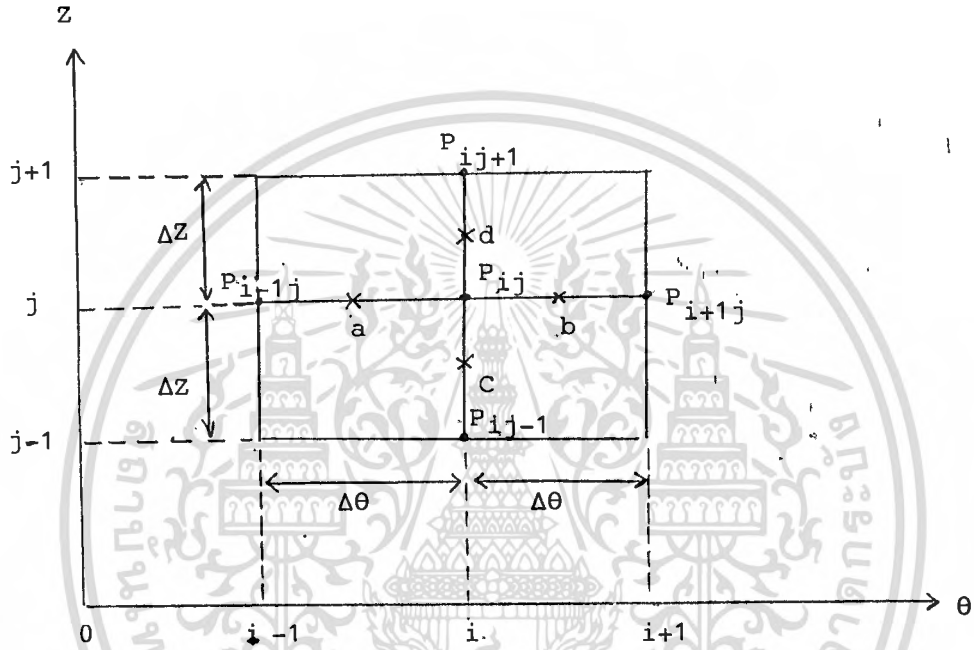
จากสมการความหนาของฟิล์มน้ำมัน

$$h = 1 + \epsilon \cos \theta + m \sin^2 (\theta + \phi) \quad \dots\dots (12)$$

เมื่อดิฟเฟอเรนเชียล h เทียบกับ θ และเทียบกับ t แล้วนำไปแทนในสมการ (11) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (G_\theta h^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}) + \frac{1}{4\lambda} \frac{\partial}{\partial Z} (G_z h^3 \frac{\partial P}{\partial Z}) = -\frac{1}{2} (1-2\phi) \epsilon \sin \theta + \dot{\epsilon} \cos \theta + \frac{1}{2} m \sin 2 (\theta + \phi) \quad \dots\dots (13)$$

รูปแบบของผลต่างจำกัดสำหรับเจอร์นอลแบร์ริง โดยการคลี่แบร์ริง



จากรูป

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \Big|_a = \frac{P_{1j} - P_{1-1j}}{\Delta \theta}, \quad \frac{\partial P}{\partial \theta} \Big|_b = \frac{P_{1+1j} - P_{1j}}{\Delta \theta}$$

$$\frac{\partial P}{\partial Z} \Big|_c = \frac{P_{1j} - P_{1j-1}}{\Delta Z}, \quad \frac{\partial P}{\partial Z} \Big|_d = \frac{P_{1j+1} - P_{1j}}{\Delta Z}$$

เพราะฉะนั้นเราจะได้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (G_\theta h^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}) \Big|_e = \frac{G_\theta h^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \Big|_b - G_\theta h^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \Big|_a}{\Delta \theta}$$

$$= (G_\theta h^3)_b (P_{1+1j} - P_{1j}) - (G_\theta h^3)_a (P_{1j} - P_{1-1j})$$

$$= \frac{1}{(\Delta \theta)^2} [(G_\theta h^3)_b P_{1+1j} + (G_\theta h^3)_a P_{1-1j}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภา (Δθ) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อของเอกสารต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
- [(G_θ h³)_b + (G_θ h³)_a] P_{1j}] (26)



$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial}{\partial z} (G_z h^3) \frac{\partial P}{\partial z} \right|_e &= \frac{G_z h^3 \left. \frac{\partial P}{\partial z} \right|_d - G_z h^3 \left. \frac{\partial P}{\partial z} \right|_c}{\Delta z} \\ &= \frac{(G_z h^3)_e \left[(P_{1j+1} - P_{1j}) - (P_{1j} - P_{1j-1}) \right]}{(\Delta z)^2} \\ &= \frac{(G_z h^3)_e \left[P_{1j+1} + P_{1j-1} - 2P_{1j} \right]}{(\Delta z)^2} \quad \dots\dots (27) \\ (\because (G_z h^3)_e &= (G_z h^3)_d = (G_z h^3)_c) \end{aligned}$$

ดังนั้นนำสมการ (26) และ (27) แทนในสมการ (13) จะได้สมการเรย์โนลด์
ในรูปผลต่างจำกัด

$$\begin{aligned} &\frac{1}{(\Delta\theta)^2} \left[(G_\theta h^3)_b P_{1+1j} + (G_\theta h^3)_a P_{1-1j} - \left[(G_\theta h^3)_a + (G_\theta h^3)_b \right] P_{1j} \right] \\ &+ \frac{(G_z h^3)_e \left[P_{1j+1} + P_{1j-1} - 2P_{1j} \right]}{4\lambda^2 (\Delta z)^2} \\ &= -\frac{1}{2} (1-2\phi) \epsilon \sin \theta_e + \epsilon \cos \theta_e + \frac{1}{2} m \sin 2(\theta_e + \phi) \dots (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\left[(G_\theta h^3)_a + (G_\theta h^3)_b + \frac{(G_z h^3)_e}{2\lambda^2 (\Delta z)^2} \right] P_{1j}}{(\Delta\theta)^2} \\ &= \frac{1}{(\Delta\theta)^2} \left[(G_\theta h^3)_a P_{1-1j} + (G_\theta h^3)_b P_{1+1j} \right] + \frac{(G_z h^3)_e (P_{1j-1} + P_{1j+1})}{4\lambda^2 (\Delta z)^2} \\ &+ \frac{1}{2} (1-2\phi) \epsilon \sin \theta_e - \epsilon \cos \theta_e - \frac{1}{2} m \sin 2(\theta_e + \phi) \end{aligned}$$

เขียนในรูปอย่างง่าย

$$AP_{1j} = B \quad \dots\dots (29)$$

โดยที่

$$A = \frac{(G_\theta h^3)_a + (G_\theta h^3)_b + \frac{(G_z h^3)_e}{2\lambda^2 (\Delta z)^2}}{(\Delta\theta)^2}$$

$$B = \frac{1}{(\Delta\theta)^2} \left[(G_\theta h^3)_a P_{1-1j} + (G_\theta h^3)_b P_{1+1j} \right]$$

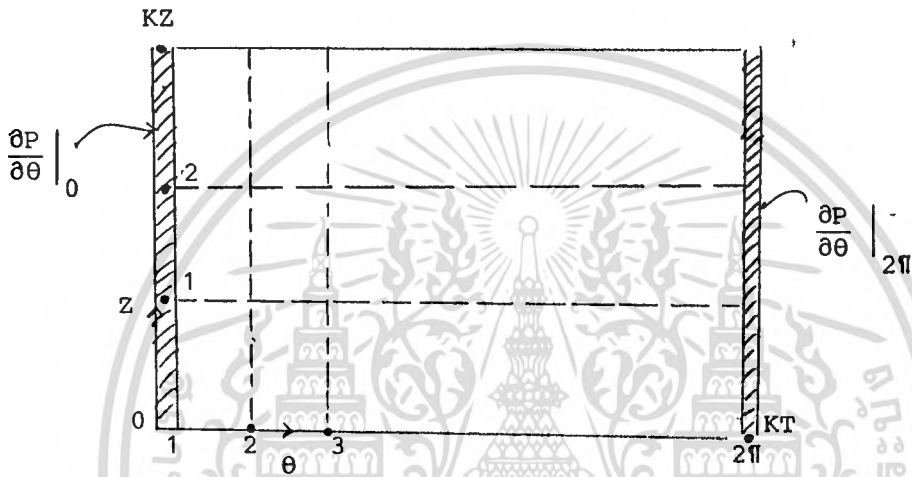
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{(G_z h^3)_e (P_{1j-1} + P_{1j+1})}{4\lambda^2 (\Delta z)^2}$$

$$+ \frac{1}{2} (1-2\phi) \epsilon \sin \theta - \epsilon \cos \theta - \frac{1}{2} m \sin 2(\theta + \phi)$$

$$P_{1,j}^{new} = P_{1,j}^{old} + \frac{(B - P_{1,j}^{old})}{A} \dots (30)$$

โดยค่า ω คือค่า over relaxation มีค่า 1.1 - 1.9
จากรูปเมื่อคลี่แบบรีงออก



เราพบว่า

$$P |_{\theta=0} = P |_{\theta=2\pi}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} |_{\theta=0} = \frac{\partial P}{\partial \theta} |_{\theta=2\pi}$$

เมื่อแบ่งแบบรีงดังรูปและจากสมการเงื่อนไขข้างบนจะได้ว่า

$$\frac{P(2, KZ) - P(1, KZ)}{\Delta \theta} = \frac{P(MAXKT, KZ) - P(KOSIKT, KZ)}{\Delta \theta}$$

$$P(1, KZ) = P(MAXKT, KZ)$$

$$P(1, KZ) = P(MAXKT, KZ) = \frac{P(2, KZ) + P(KOSIKT, KZ)}{2} \dots (31)$$

เมื่อ MAXKT = ค่า KT สูงสุดหรือจำนวน node ในแนว θ

$$KOSIKT = MAXKT - 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง

3.1 การออกแบบเครื่องทดสอบเจอร์นอลแบร์ริง

3.1.1 การวางโครงร่างของเครื่อง เพื่อไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือนจึงจัดอุปกรณ์บนฐานที่ทำเป็นชิ้นเดียวกันให้เป็นริจิดบอดี้ (Rigid body) และเช่าะร่องเพื่อให้สามารถปรับระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ได้ ทั้งยกเพลลาให้สูงพอที่จะขนานตม้น้ำหนักด้วย

3.1.2 กำลังขับใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขับเพลลา แต่ให้เฟืองทดเพิ่มอัตราเร็วรอบขึ้นเป็นประมาณ 2:1 เท่า และเพื่อลดการสั่นสะเทือน จึงเลือกใช้ดีดปลิงยางต่อระหว่างเพลลา กับเฟืองทดสำหรับมอเตอร์ 3 เฟส เราไม่สามารถปรับความเร็วรอบได้ จึงเลือกใช้ฟูลเลอร์และสายพานต่อเข้ากับเฟืองทด

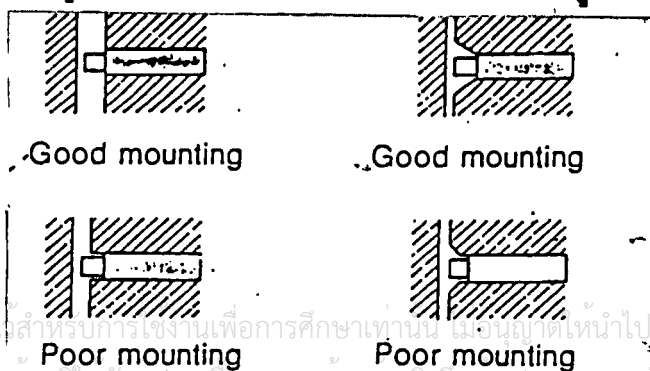
3.1.3 เพลลาและแบร์ริง ซึ่งเป็นหัวใจของเครื่อง เลือกใช้เพลลาต้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 มม. แบร์ริงมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 50.95 มม. เคลียแรนซ์ 0.15 มม. แบร์ริงจะทำด้วยทองเหลือง บนตัวแบร์ริงเจาะรูเพื่อใส่แก๊ปเซนเซอร์, รูจึ้นน้ำมัน รูติดตั้ง strain gage และติดตะขอขนานตม้น้ำหนัก

3.1.4 การป้อนน้ำมัน น้ำมันหล่อลื่นจะถูกจ่ายเข้ามาด้วยความดันที่เกิดจากการยกขวดน้ำมันให้สูง และน้ำมันจะรั่วไหลออกทางด้านข้างของแบร์ริงจึงต้องมีภาครองน้ำมันไว้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัดผลและวิธีการติดตั้ง

3.2.1 แก๊ปเซนเซอร์ (Gap sensor) รุ่น AEC 5505 วัดระยะขจัดโดยไม่สัมผัส ใช้หลักการของ เอ็ดดี้เคอร์เรนท์ (Eddy current) ที่มีความถี่สูง สามารถวัดระยะในช่วง 0-2.0 มม. ใช้กับแหล่งจ่ายไฟขนาด 12 โวลต์ (DC), 40 mA ให้เอาท์พุท 5v (5mV/mm) วิธีการติดตั้งแก๊ปเซนเซอร์

1. เจาะรูบนแบร์ริงเพื่อวางเซนเซอร์ โดยมีลักษณะดังรูป 3.1



รูป 3.1 การติดตั้งแก๊ปเซนเซอร์

2. จัดวางเซนเซอร์ให้ได้ระดับเดียวกับผิวด้านในของแม่พิมพ์ เราทราบจากข้อมูลของแม่พิมพ์เซนเซอร์ว่าระยะขจัดเป็น 0 สัญญาณเอาท์พุทมีค่าประมาณ -4.8 โวลต์ โดยการกดแม่พิมพ์ด้านที่ติดเซนเซอร์ให้แนบติดกับเพลาลงและปรับตำแหน่งของเซนเซอร์จนกระทั่งได้สัญญาณเอาท์พุทประมาณ -4.8 โวลต์ นั่นคือ เซนเซอร์อยู่ระดับเดียวกับผิวด้านในแม่พิมพ์พอดี

3.2.2 x-y คอนเวอร์เตอร์ (x-y Converter) นำสายสัญญาณของแม่พิมพ์เซนเซอร์ต่อเข้ากับอินพุทของ x-y คอนเวอร์เตอร์

3.2.3 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ใช้เพาเวอร์ซัพพลายป้อนสัญญาณอินพุท DC + 12, -12 โวลต์ และกราวด์ให้แก่ x-y คอนเวอร์เตอร์

3.2.4 ดิจิตอลสโตเรจโคป DS 6411 (Digital Storage Scope DS 6411) ซึ่งสามารถอ่านสัญญาณจากอินพุทได้ 2 แชนแนล เมื่อนำสัญญาณจากเอาท์พุทของ x-y คอนเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับอินพุทของสโตเรจโคป เพื่อวัดสัญญาณออกมาเป็นโวลต์ (peak to peak)

3.2.5 แผ่นซีมทองเหลือง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับแรงดันจากแผ่นฟิล์ม เพื่อให้การวัดผลเป็นไปได้อย่างแม่นยำและผลที่ได้มีค่าแม่นยำถูกต้องมากที่สุด เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการคำนวณหาความหนาแผ่นซีมที่นำมาใช้ การคำนวณหาขนาดแผ่นซีมทองเหลือง



ให้ชุด Strain gage รับ Load แบบกระจายและปลายทั้ง 2 ข้างเป็นแบบ Fixed Support

จาก
$$S_m = \frac{kw r^2}{2} \dots\dots (1)$$

กำหนดให้
$$S_m = \text{maximum yield stress} = 4.4 \times 10^4 \text{ lb/in}^2$$

$$r = \text{รัศมีวงในของชุด strain gage} = 0.1 \text{ in}$$

$$w = \text{Pressure} = 3 \text{ atm} = 44.0877 \text{ lbf/in}^2$$

$$t = \text{ความหนาของแผ่นซีม}$$

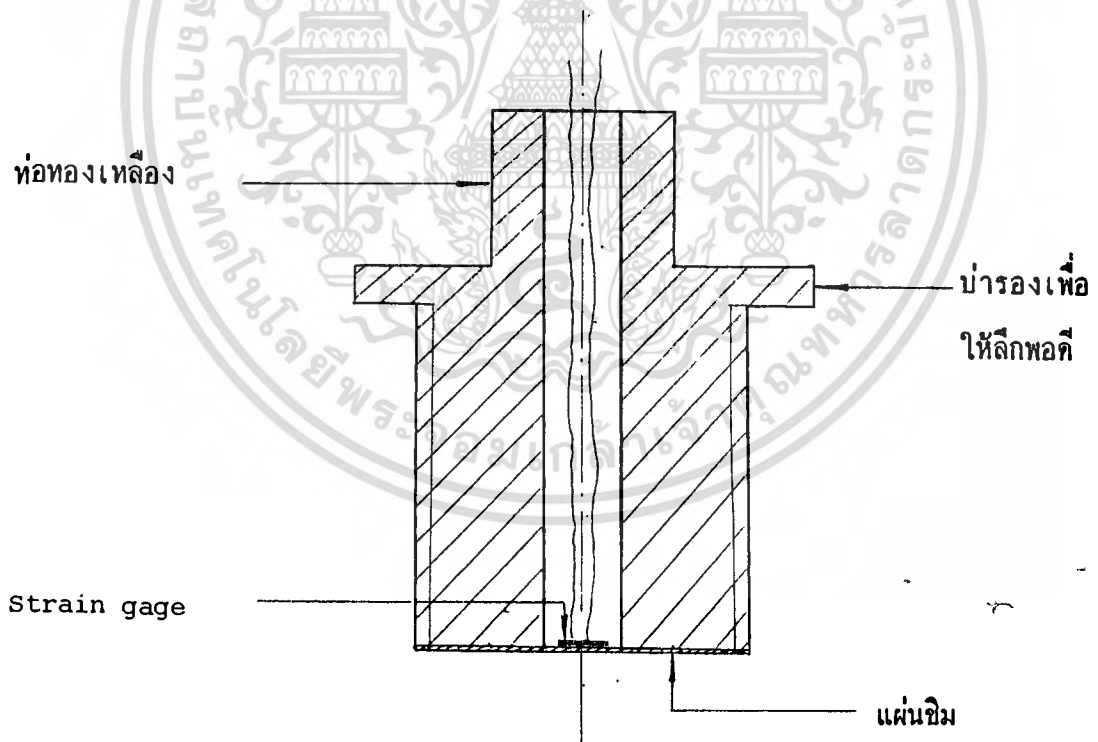
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร (1) $k = 0.75$
 จะได้ $t^2 = \frac{kwr^2}{S_m}$
 $t = (0.75) \times (44.0877) \times (0.1)^2$
 $= 0.068 \text{ มม.}$

เลือก ใช้แผ่นซีมที่มีขนาดหนา 0.1 มม.

3.2.6 บุชทองเหลือง เพื่อที่จะทำการติดตั้งแผ่นซีมทองเหลืองกับตัวบุชทองเหลือง ซึ่งจะนำไปติดตั้งกับตัวเบร้งที่เจาะรูไว้

3.2.7 สเตรนเกจ (Strain gage) ใช้เป็นตัววัดค่าแรงดันที่กระทำผ่านแผ่นซีมทองเหลือง ออกมาเป็นค่าของสเตรน วิธีการติดตั้งสเตรนเกจบนแผ่นซีมทองเหลือง



ภาพแสดงชุดการติด Strain gage

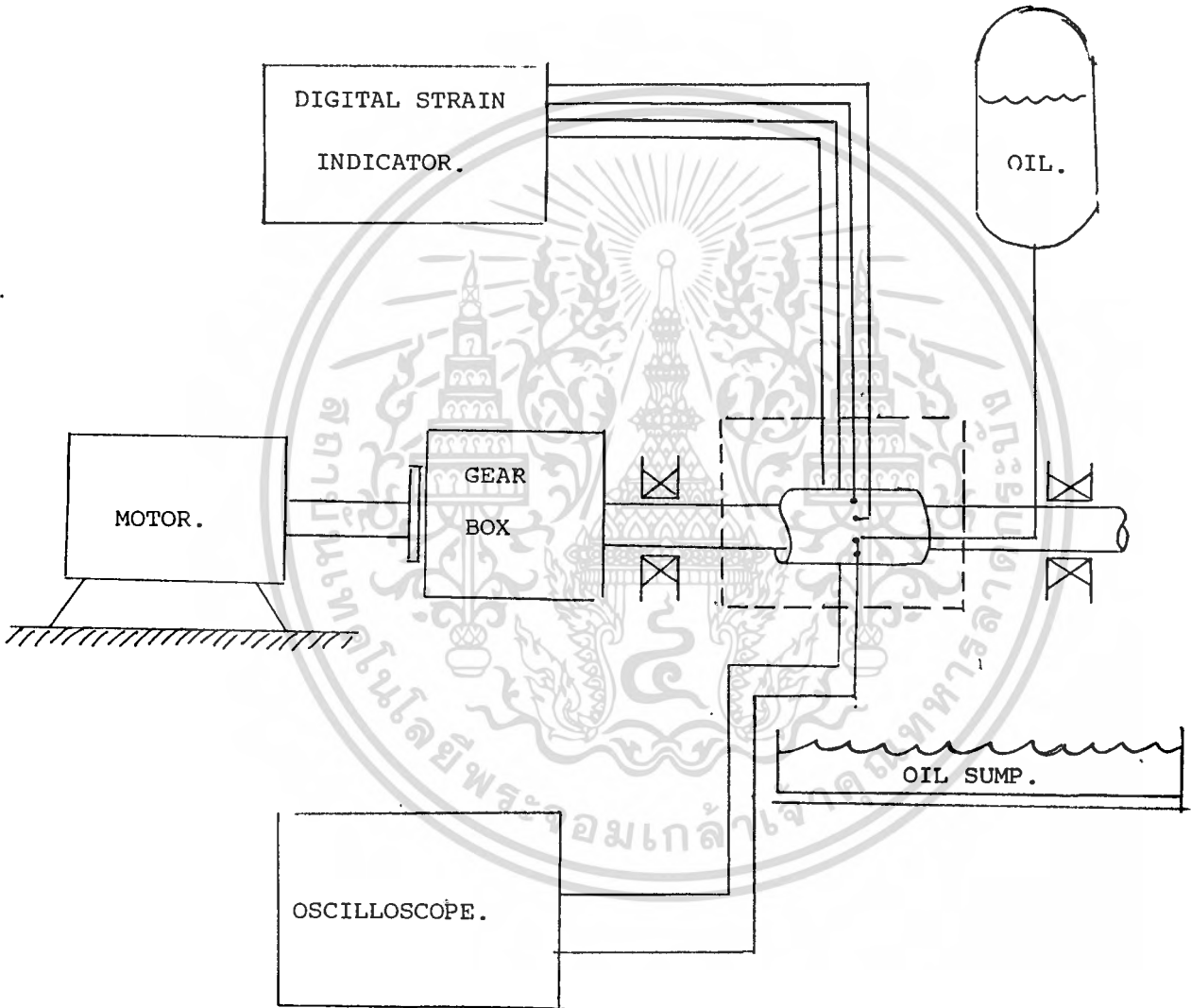
ขั้นตอนการประกอบชุด Strain gage

1. ทำความสะอาดแผ่นซีมที่คำนวณได้และตัดให้ เรียบร้อยแล้วล้างด้วยน้ำยา Acetone ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกขั้นหนึ่งคือแผ่นซีมนี้จะมีรอยขีดข่วนของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2. นำ Strain gage มาติดตั้งโดยใช้ Strain gage Cement

3. นำแผ่นซีเมนต์ติดตั้ง Strain gage เรียบร้อยแล้วมาประกอบกับท่อทองเหลือง โดยใช้กาว Epoxy

3.2.8 ดิจิตอลสเตรนอินดิเคเตอร์ (Digital strain indicator)

ใช้เป็นอุปกรณ์วัดค่าสเตรนจากสเตรนเกจ โดยใช้หลักการของวงจรมอเตอร์ ซึ่งชุดอุปกรณ์ก็จะประกอบด้วย สวิตช์บ็อกซ์ (Switch box) และดิจิตอลสเตรนอินดิเคเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปแสดงการติดตั้งอุปกรณ์

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 วิธีการทดลอง

หลังจากเราติดตั้งอุปกรณ์เสร็จแล้วตามบทที่ 3 เราก็จะนำการทดลองโดยใช้ความเร็วรอบของเพล่า 2650 rpm ภายใต้ภาระ (Load) เท่ากับ 5 kg ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 27 °C และแบร์ริงเป็นแบบวงกลม ซึ่งค่า $\lambda = 1$ ($\lambda = L/D$) L คือความยาวแบร์ริง D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเพล่า

การทดลองจะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

1. ทำการทดลองโดยใช้เกรดน้ำมัน SAE 40
2. ทำการทดลองโดยใช้เกรดน้ำมัน SAE 20W-50

ในการทดลองเราจะติดตั้ง สเตนเกจ , แกปเซนเซอร์ และท่อป้อนน้ำมันที่แบร์ริง

เป็นดังรูป 4.1

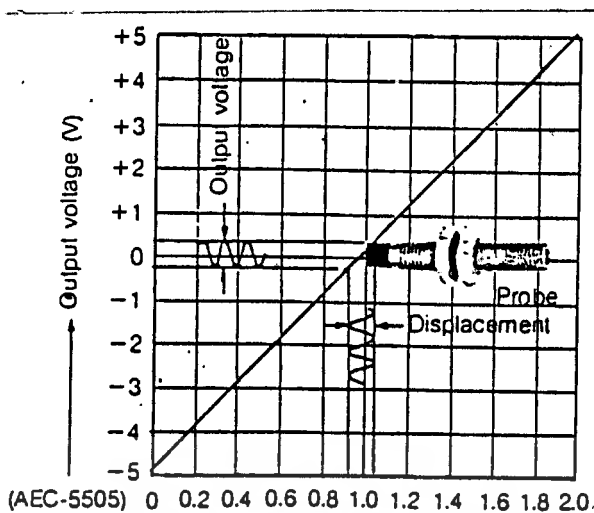


ตำแหน่งการติดตั้ง สเตนเกจ S_1 , S_2 , S_3 และ S_4 ทำมุมห่างกัน 60° และตำแหน่งการติดตั้ง แกปเซนเซอร์ G_1 และ G_2 ทำมุมห่างกัน 90°

4.2 วิธีการคำนวณผลการทดลอง

1. ในตอนแรกข้อมูลที่ได้จากการวัดจากแกปเซนเซอร์ แล้วผ่านสตรอเวจสโคปจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง V-t เราจะต้องทำการเปลี่ยนหน่วยให้เป็นมิลลิเมตร โดยใช้กราฟรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากกราฟรูปที่ 4.2 กราฟเป็นเส้นตรงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$A = mB + b$$

A = ค่าระยะขจัดหน่วยเป็น โวลต์

B = ค่าระยะขจัดหน่วยเป็น มม.

แทนค่า $A = -4.8$, $B = 0$ และ $A = -4.3$, $B = 0.1$

แก้สมการจะหาค่าได้ $m = 0.2$, $b = 0.96$

สมการเส้นตรงของกราฟนี้คือ

$$B = 0.2 A + 0.96$$

เพราะฉะนั้นระยะความหนาของแผ่นฟิล์ม $\Delta B = 0.2 \Delta A$ (1)

A = peak to peak voltage

2. ผลจากการวัดจากสเตรนอินดิเคเตอร์ ค่าที่ได้คือ ความเครียด ซึ่งจะสามารถแปลงไปเป็นความดันมาตรฐานโดย วิธีการคาลิเบร โดยการใช้น้ำหนัก $P_u = 8.5 \text{ kgf/cm}^2$ เทียบเท่ากับความเครียด 4078×10^{-6} หรือเขียนเป็นสูตร

$$P_g = \text{สเตรนที่วัดได้} * 8.5 / 4078 \times 10^{-6} \text{ kgf/cm}^2$$

หรือ

$$P_g = \frac{8.5 \times \text{ค่าสเตรนที่วัดได้}}{1.03 \times 4078 \times 10^{-6}} \text{ atm} \quad \text{..... (2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

1. เมื่อเกรตน้ำมันเท่ากับ SAE 40

ตำแหน่ง gage	strain*10 ⁻⁶	P _g (atm)	P _m (atm)
S ₁	656	1.328	2.328
S ₂	1160	2.347	3.347
S ₃	1280	2.59	3.59
S ₄	1020	2.064	2.064
ตำแหน่ง gap	Peak to peak voltage (v)	ความหนาแน่นฟิล์ม (μm)	
G ₁	0.032	6.4	
G ₂	0.026	5.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อเกรดน้ำมันเท่ากับ SAE 20W-50

ตำแหน่ง gage	strain*10 ⁻⁶	P _g (atm)	P _a (atm)
S ₁	240	0.486	1.486
S ₂	1280	2.69	3.69
S ₃	1060	2.145	3.145
S ₄	700	1.417	2.417
ตำแหน่ง gap	Peak to peak voltage (v)		ความหนาแน่นฟิล์ม (μm)
G ₁	0.012		2.4
G ₂	0.002		4.0

หมายเหตุ สัญญาณที่วัดได้จากแกมมาเซนเซอร์ แล้วนำมาอ่านค่าที่สต่อเรจสโคปจะมีผล ดังรูป 4.3 และ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mV

40
30
20
10

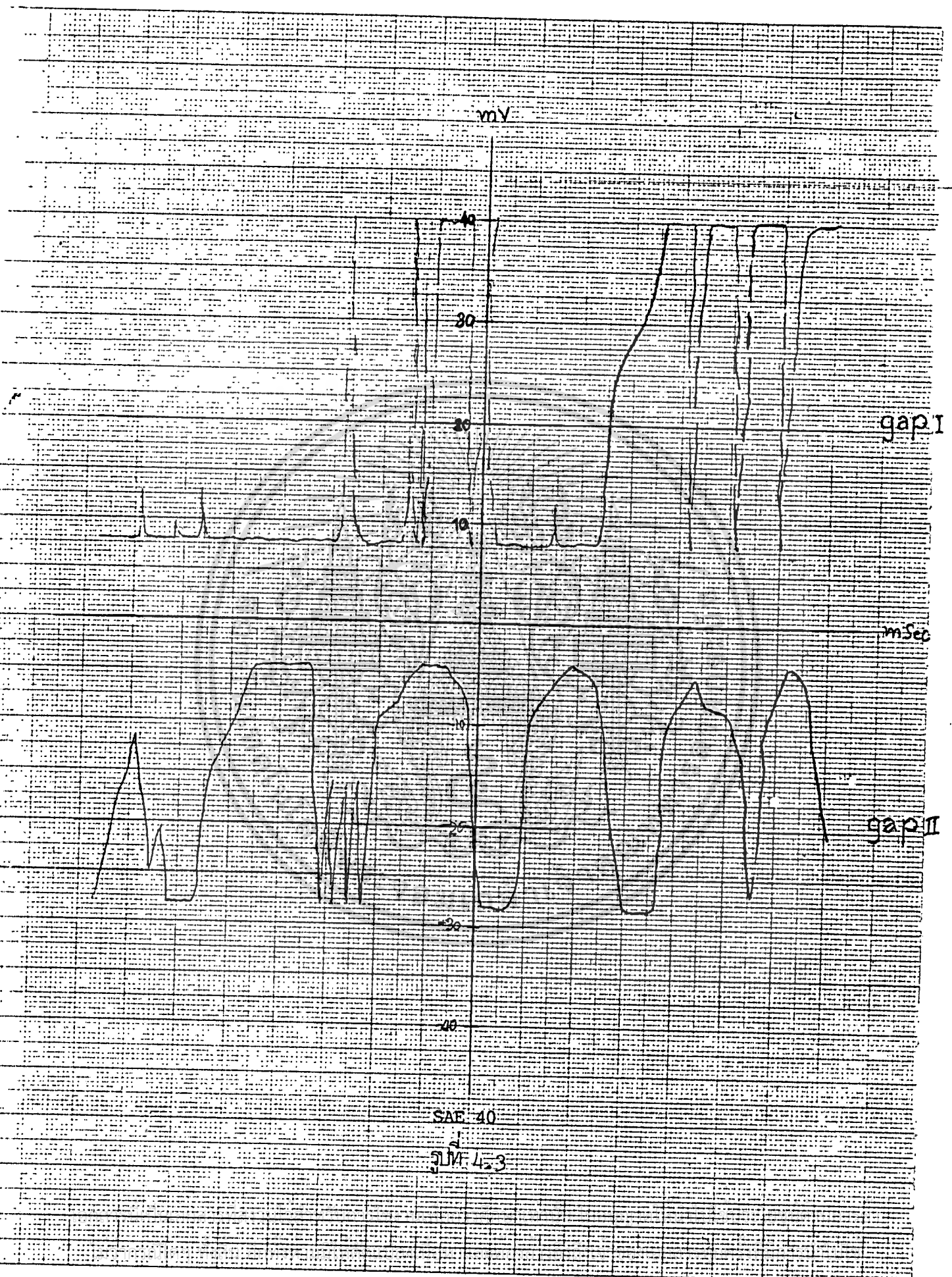
gap I

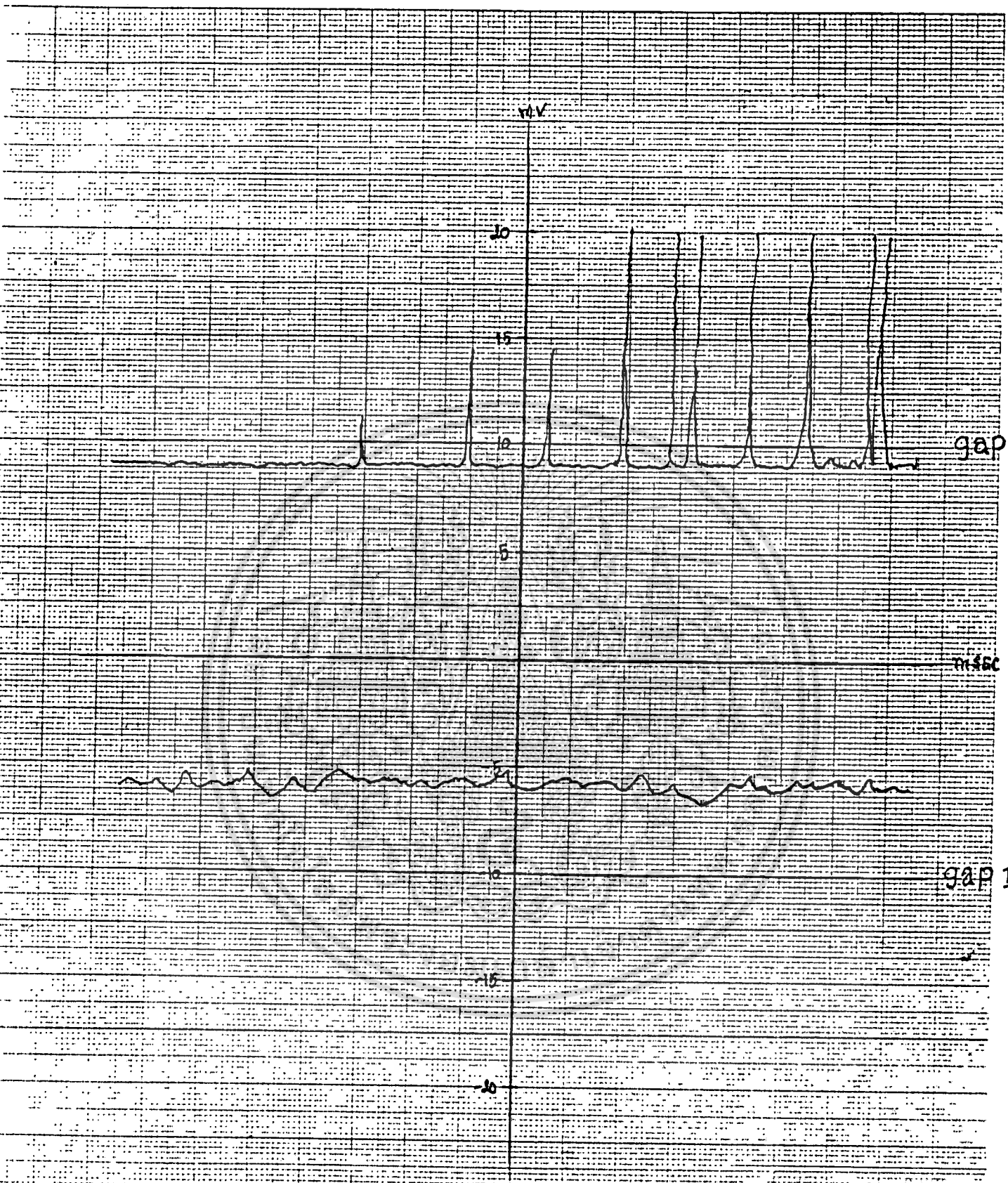
mSec

gap II

SAE 40

JMF 4-3

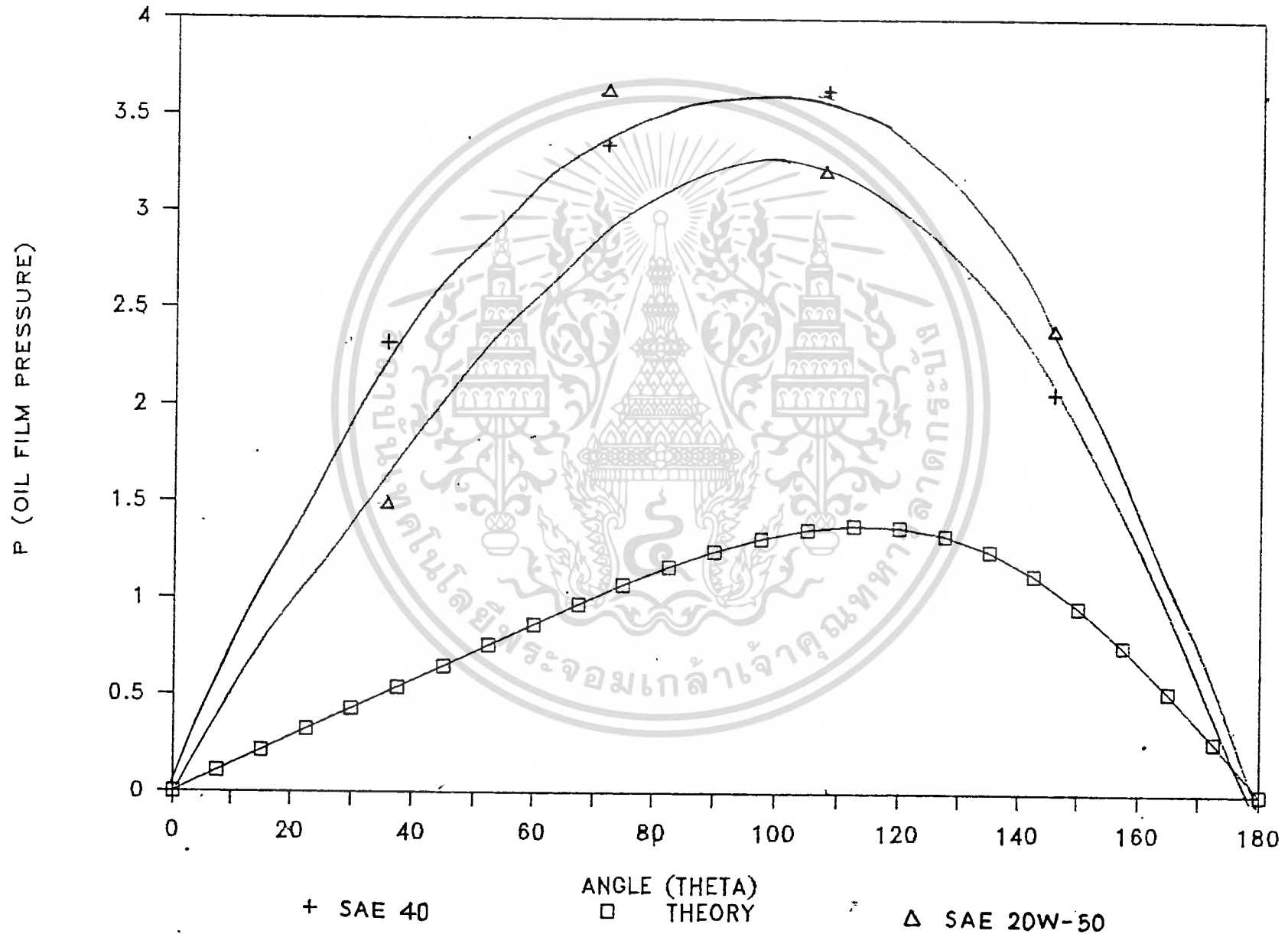




SAE 20W-50

4.4 mV

COMPARE (THEORY & EXPERIMENT)



บทที่ 5

ผลการคำนวณจากคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์

5.1 ผลจากทฤษฎีของแบริงอย่างสั้น

คุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์ (Static characteristics)

จากกราฟ รูปที่ 5.1 แบบริงแบบวงกลม ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับมุม จะเป็นลักษณะคล้ายพาราโบลาคว่ำและถ้าผิวหยาบมากขึ้น ความดันจะมีค่าสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางที่

จากกราฟ รูปที่ 5.2 แบบริงแบบวงรี ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับมุม จะเป็นลักษณะคล้ายกับพาราโบลาคว่ำ แต่จะเกิดลักษณะดังกล่าวสองช่วง โดยที่ช่วงหลังจะมีความดันน้อยกว่าช่วงแรกความดันจะสูงขึ้นเมื่อผิวหยาบมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางที่

จากกราฟ รูปที่ 5.3 และ 5.4 แบบริงแบบวงกลมและวงรี เมื่อผิวหยาบมากขึ้น จะพบว่าค่าของช่อมเมอร์เฟลด์จะมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางที่ และยิ่งพบอีกว่าถ้าความหยาบของผิวคงที่ ค่าช่อมเมอร์เฟลด์ จะลดลงเมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น

จากกราฟ รูปที่ 5.5 และ 5.6 แบบริงแบบวงกลมจะมีค่าช่อมเมอร์เฟลด์น้อยกว่าแบบริงแบบวงรีเสมอไม่ว่าจะเป็นผิวหยาบหรือผิวเรียบ โดยที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางที่

จากกราฟ รูปที่ 5.7 และ 5.8 ค่าช่อมเมอร์เฟลด์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้มุมแอตติจูดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง หลังจากนั้นจะลดลง ถึงแม้ว่าความหยาบของผิวเปลี่ยนไป ก็จะไม่ทำให้ผลที่กล่าวมาเหมือนเดิม ไม่ว่าค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางจะมีค่าไม่เท่ากันก็ตาม

5.2 ผลจากทฤษฎีของแบริงแบบความยาวจำกัด

คุณสมบัติทางสถิตยศาสตร์ (Static characteristics)

จากกราฟ รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงผลของความหยาบของผิว ของเจอร์นอลแบริงกับการกระจายความดันของแผ่นฟิล์มน้ำมัน เราจะเห็นว่าถ้าหากความหยาบของผิวเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการกระจายความดันของแผ่นฟิล์ม มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางและอัตราส่วนความรีของแบริงมีค่าคงที่

จากกราฟ รูปที่ 5.11 แสดงผลของอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง กับค่าช่อมเมอร์เฟลด์ เมื่ออัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าช่อมเมอร์เฟลด์มีแนวโน้มที่จะลดลง ซึ่งก็จะหมายถึงความถึงภาวะของแบริงมีค่ามากขึ้นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็น คุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic characteristics) บกพิมพ์ของ คู่มือการปฏิบัติงาน โดยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมี คู่มือการปฏิบัติงาน และ คู่มือการปฏิบัติงาน ของเอกสารที่ดัดแปลงแก้ไข

จากกราฟ รูปที่ 5.12 (K_{xx}) และ 5.14 (K_{yy}) แสดงผลของความสัมพันธ์

ระหว่างค่าชอมเมอร์เฟลด์ กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น เมื่อให้ค่าชอมเมอร์เฟลด์มีค่าคงที่ จะเห็นว่าถ้าหากความหนาของผิวมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะมีค่าน้อยลง และมีค่าเป็นลบ

จากกราฟ รูปที่ 5.13 (K_{xx}) และ 5.15 (K_{yy}) เมื่อเราให้ค่าชอมเมอร์เฟลด์คงที่ จะเห็นว่าถ้าหากความหนาของผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกสำหรับ K_{xx} ส่วนในกรณีของ K_{yy} ค่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นบวก

จากกราฟ รูปที่ 5.16 (B_{xx}) และ 5.18 (B_{yy}) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าชอมเมอร์เฟลด์กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง เมื่อให้ค่าชอมเมอร์เฟลด์คงที่ ถ้าหากความหนาของผิวมีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจะมีค่าลดลง และมีค่าเป็นลบ

จากกราฟ รูปที่ 5.19 (B_{xx}) และ 5.19 (B_{yy}) เมื่อเราให้ค่าชอมเมอร์เฟลด์คงที่ จะเห็นว่าถ้าหากความหนาของผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกสำหรับ K_{xx} ส่วนในกรณีของ K_{yy} ค่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นบวก

จากกราฟ รูปที่ 5.20 (B_{xx}) และ 5.22 (B_{yy}) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าชอมเมอร์เฟลด์กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง เมื่อให้ค่าชอมเมอร์เฟลด์คงที่ ถ้าหากความหนาของผิวมีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจะมีค่าลดลง และมีค่าเป็นลบ

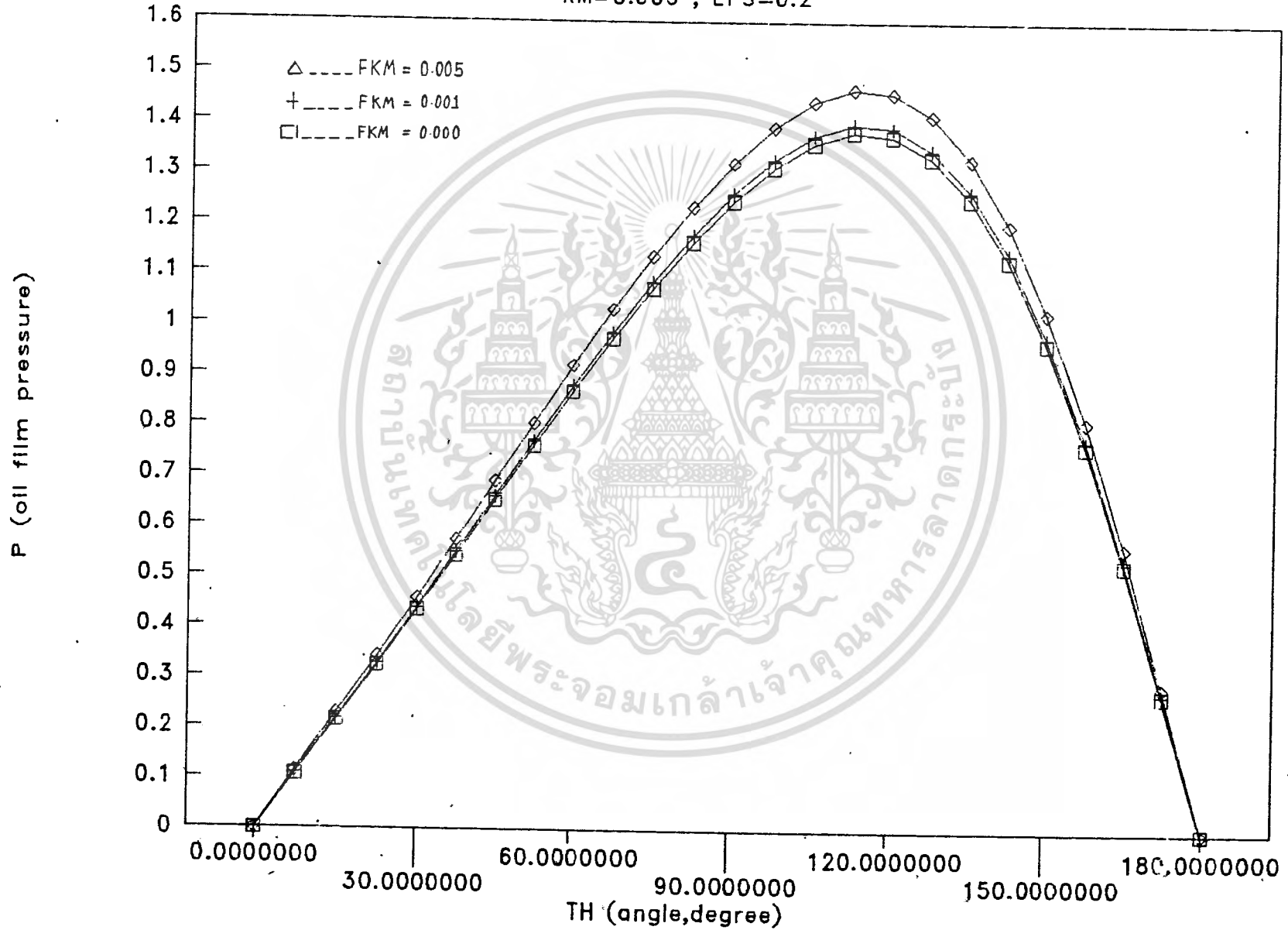
จากกราฟ รูปที่ 5.21 (B_{xx}) และ 5.23 (B_{yy}) เมื่อเราให้ค่าชอมเมอร์เฟลด์คงที่ จะเห็นว่าถ้าหากความหนาของผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเป็นบวก

จากกราฟ รูปที่ 5.24 แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าชอมเมอร์เฟลด์ กับค่าความเร็วเวอร์ลออนเซต (whirl onset velocity) W_{cr} เมื่อเราให้ค่าชอมเมอร์เฟลด์มีค่าคงที่ ถ้าความหนาของผิวมากขึ้น ค่า whirl onset velocity จะมากขึ้น

รูปที่ 5.1

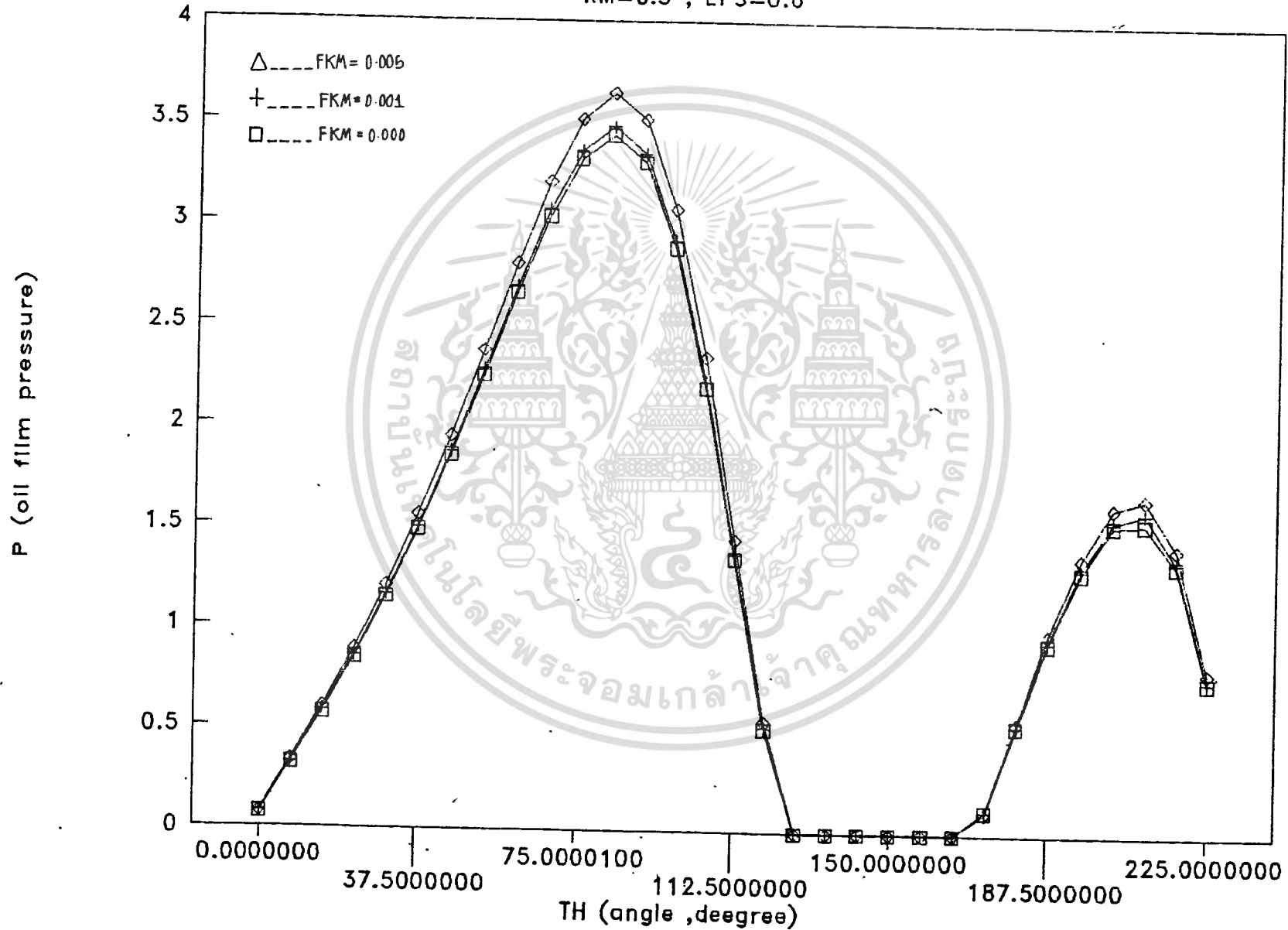
PRESSURE & ANGLE (circular, vary FKM)

RM=0.000 , EPS=0.2



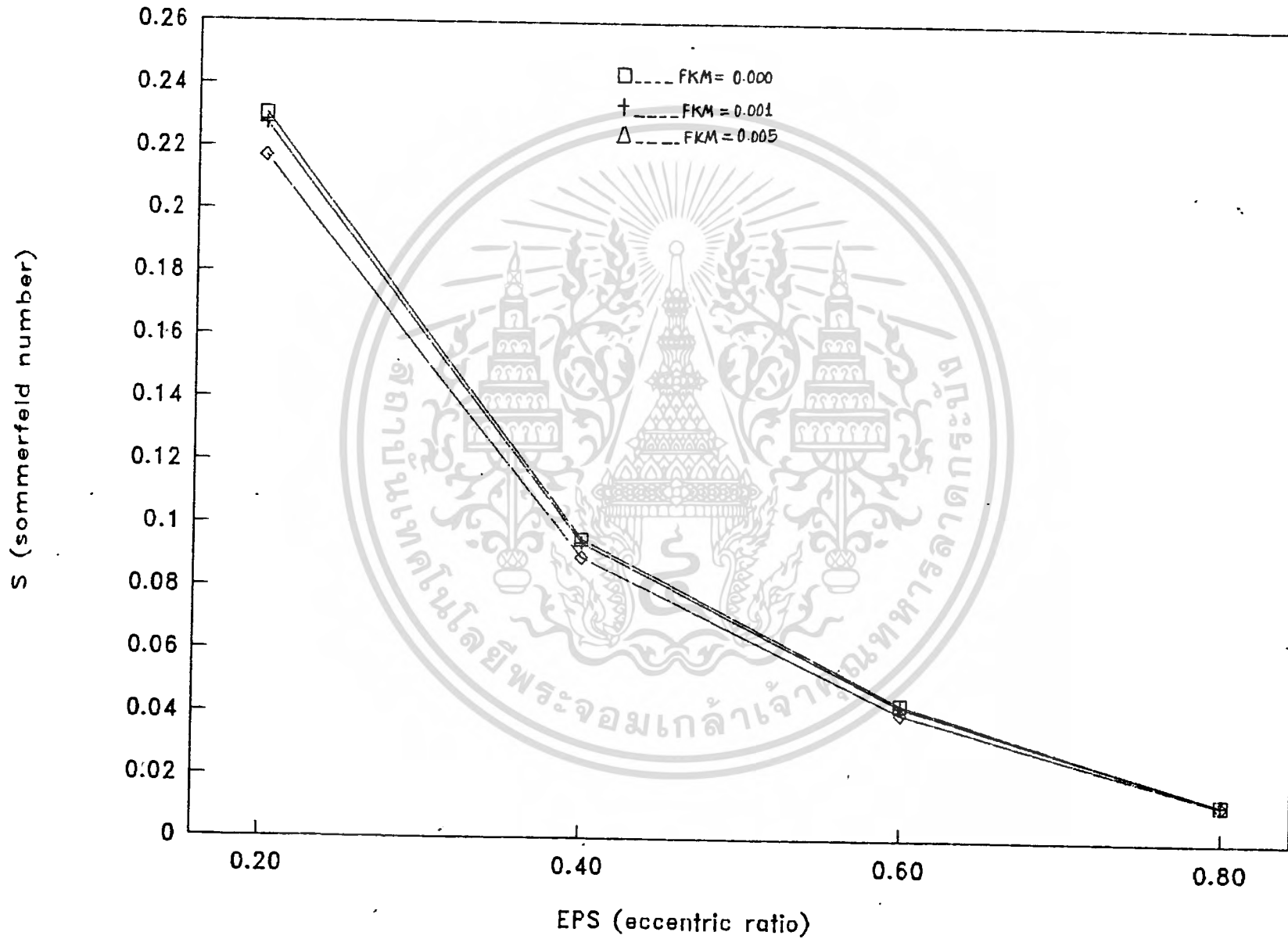
PRESSURE & ANGLE (vary roughness)

RM=0.5 , EPS=0.6

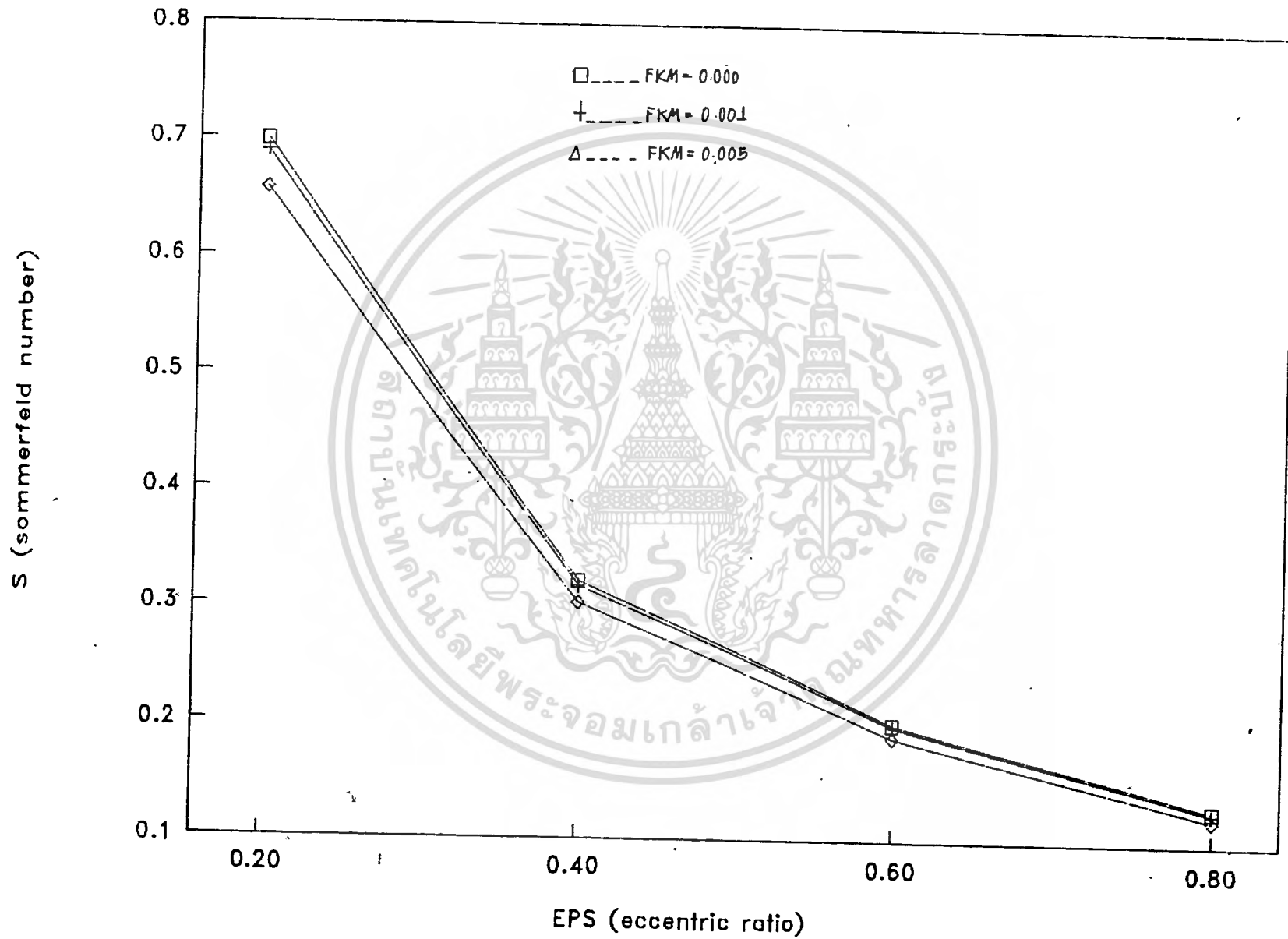


รูปที่ 5.3

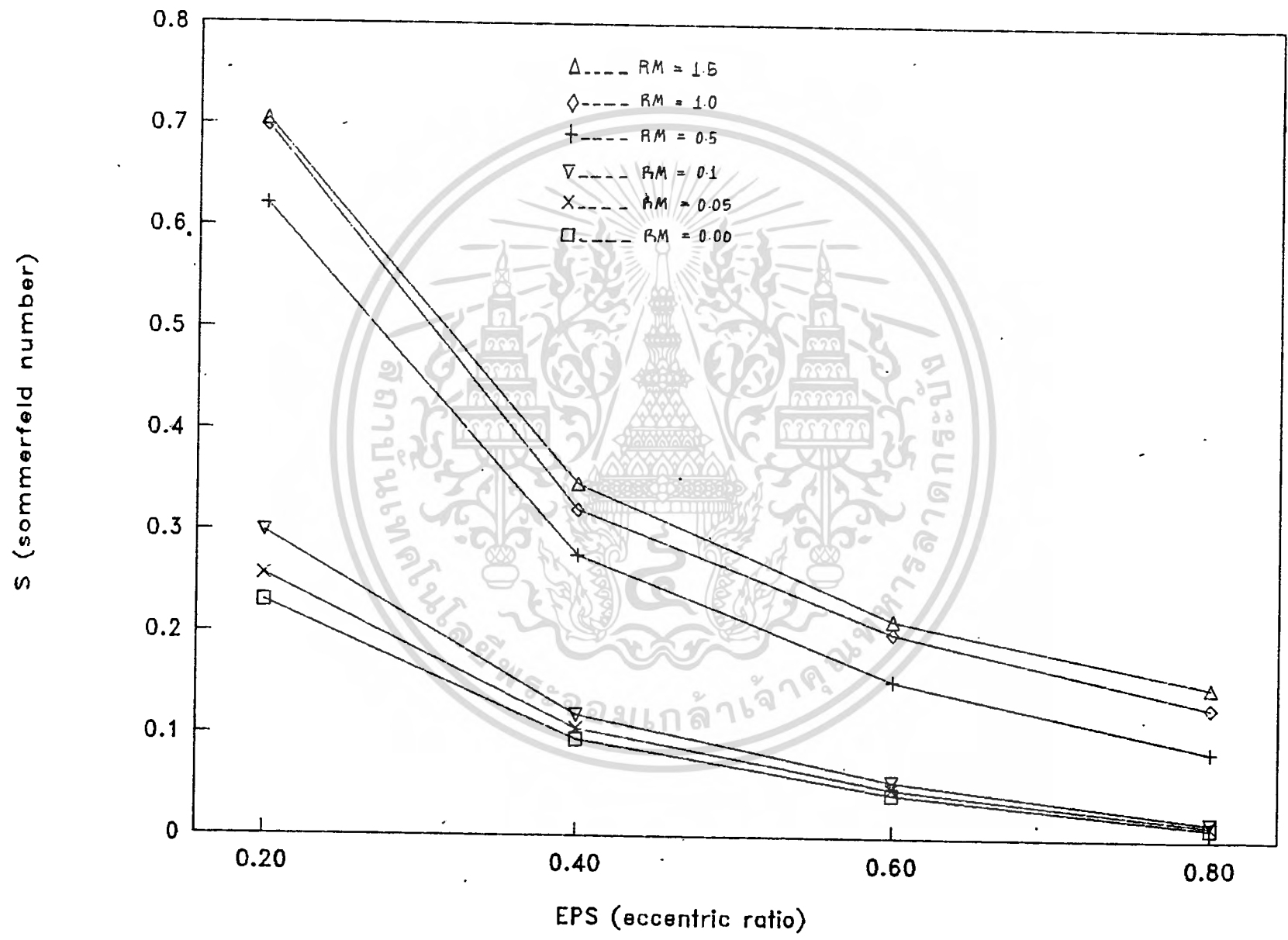
CIRCULAR (smooth and roughness)



ELLIPTIC (smooth and roughness)

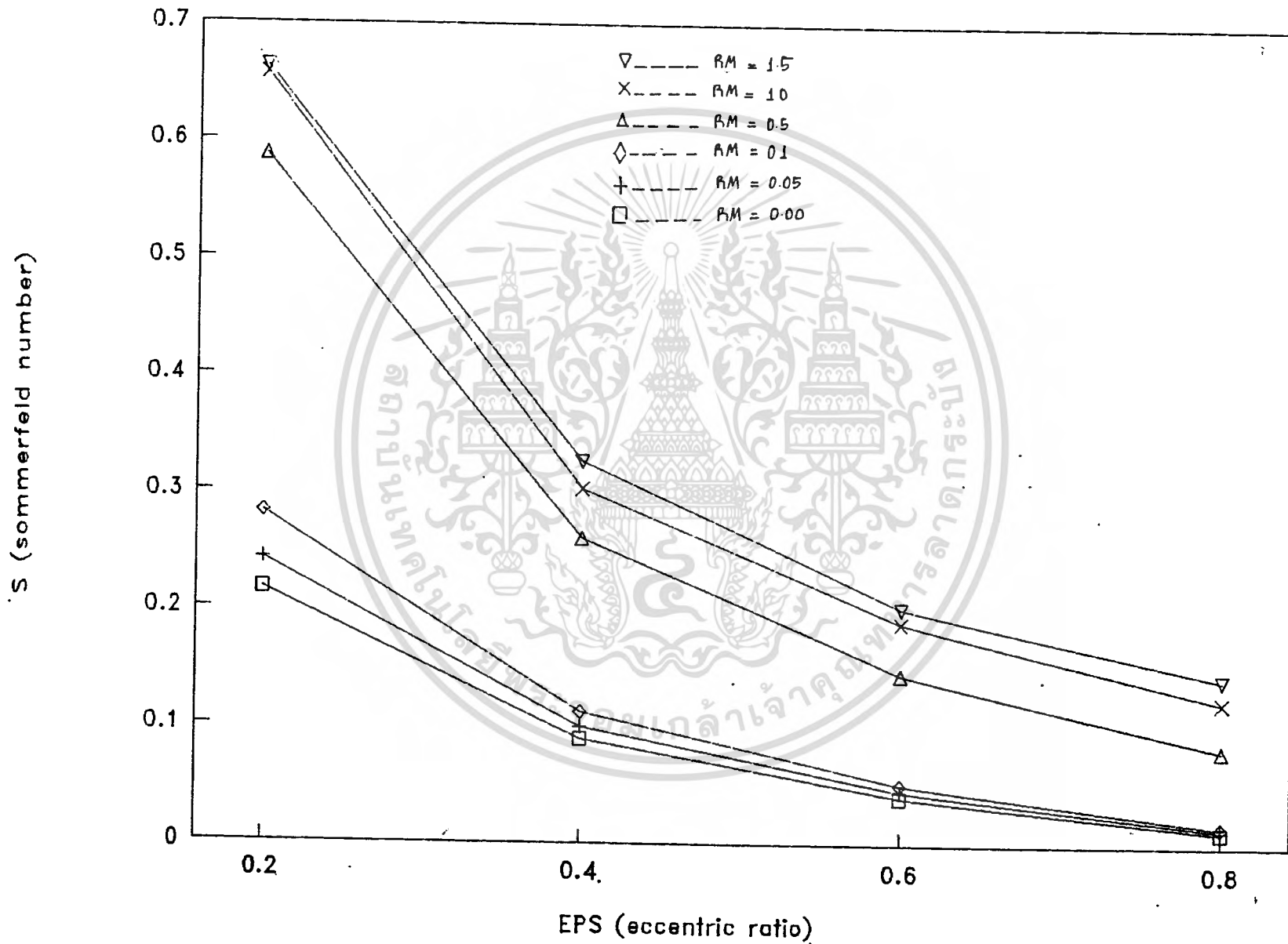


SMOOTH (circular & elliptic)



รูปที่ 5.6

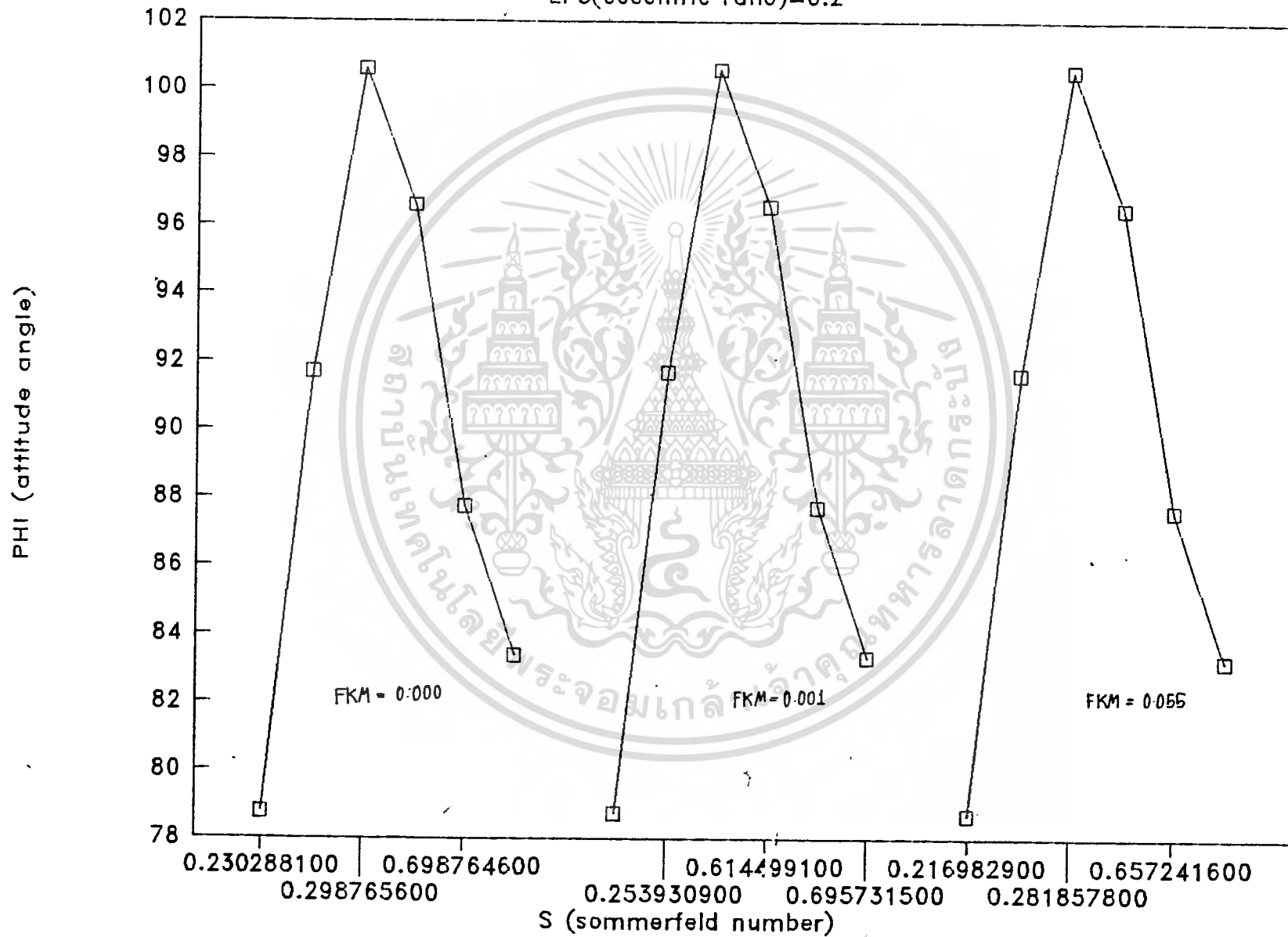
ROUGHNESS (circular & elliptic)



รูปที่ 5.7

PHI & S (vary roughness)

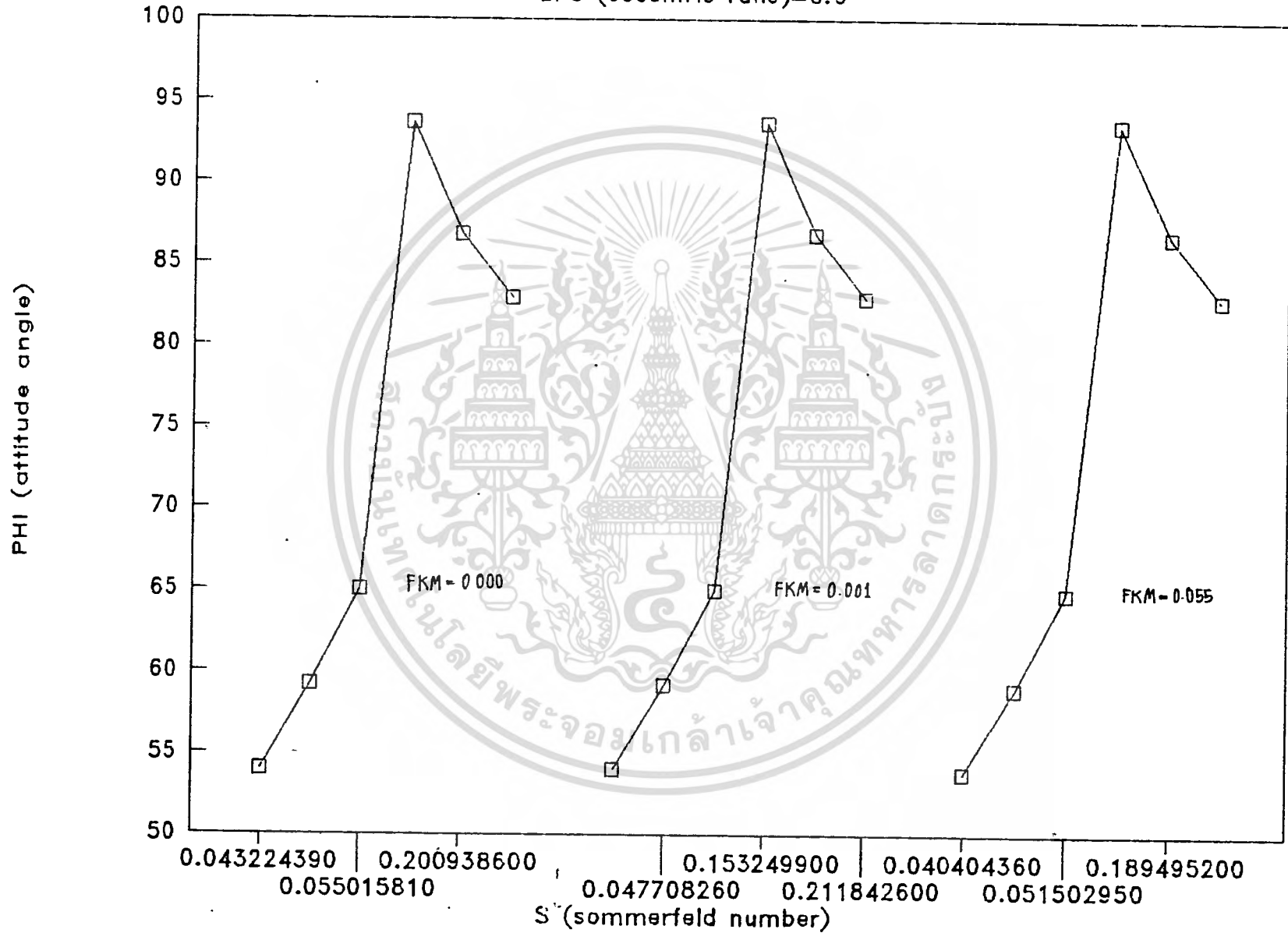
EPS(eccentric ratio)=0.2



รูปที่ 5.8

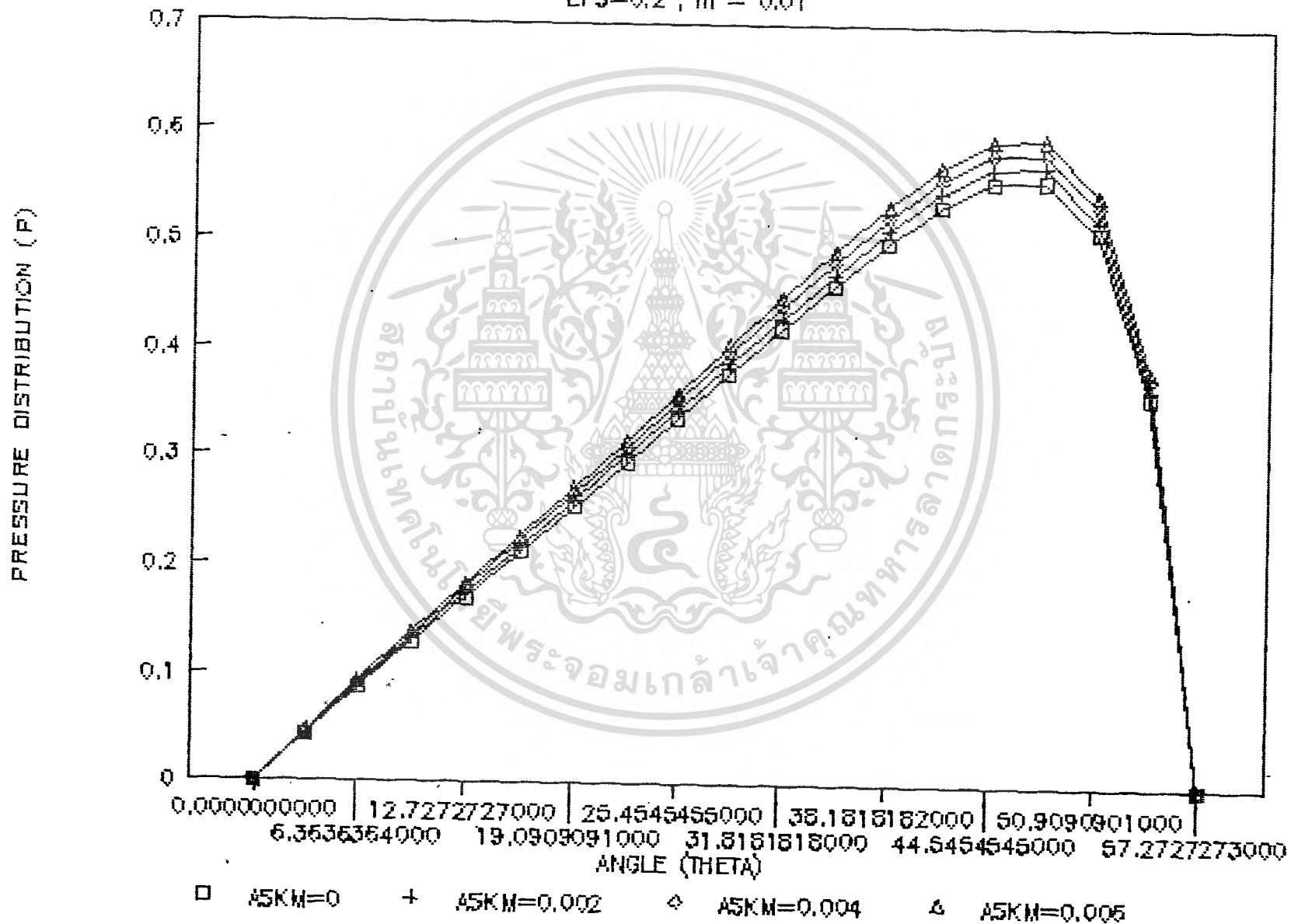
PHI & S (vary roughness)

EPS (eccentric ratio)=0.6



รูปที่ 5.9 PRESSURE DISTRIBUTION & ANGLE

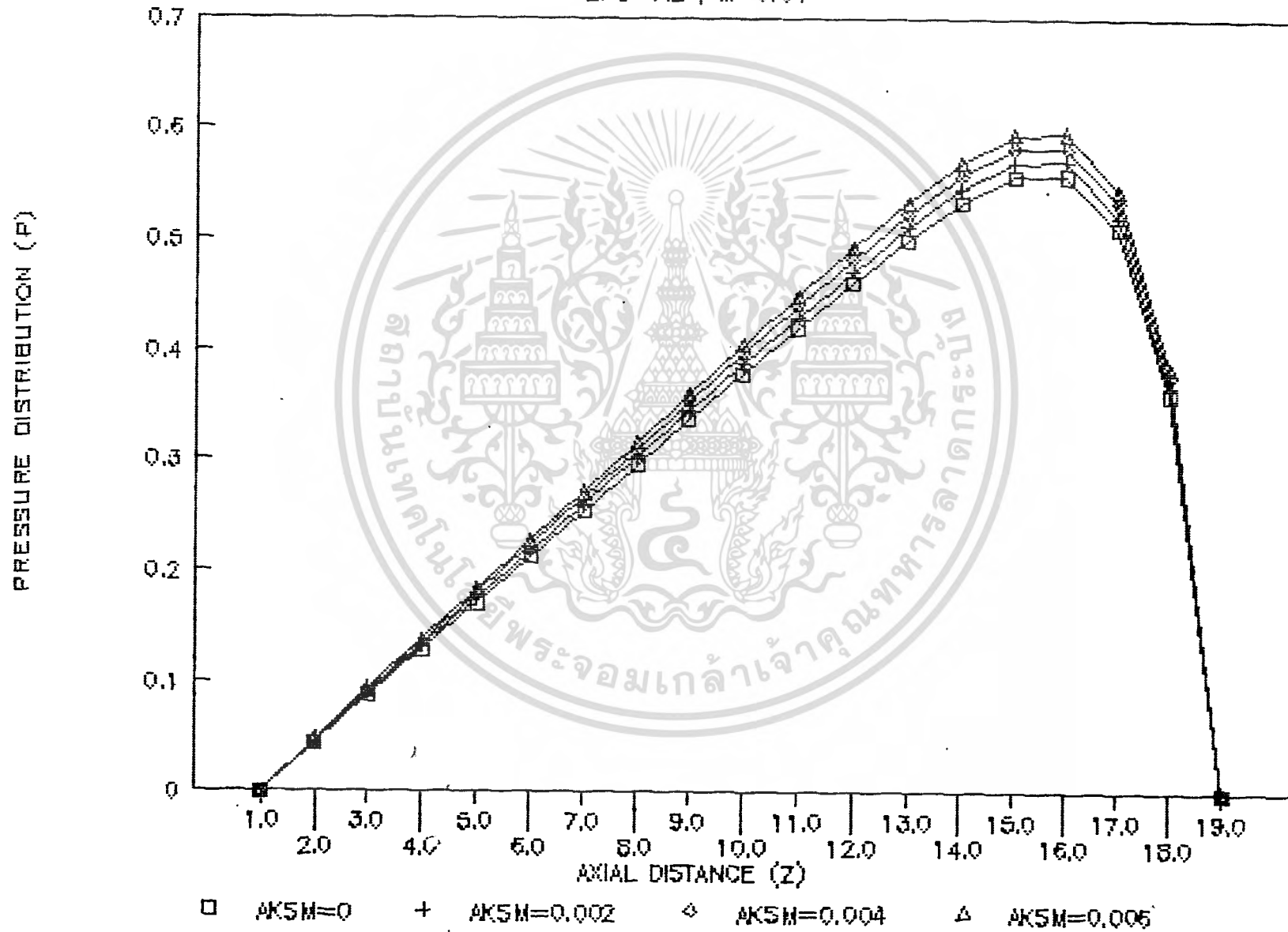
EPS=0.2 , m = 0.01



รูปที่ 5.10

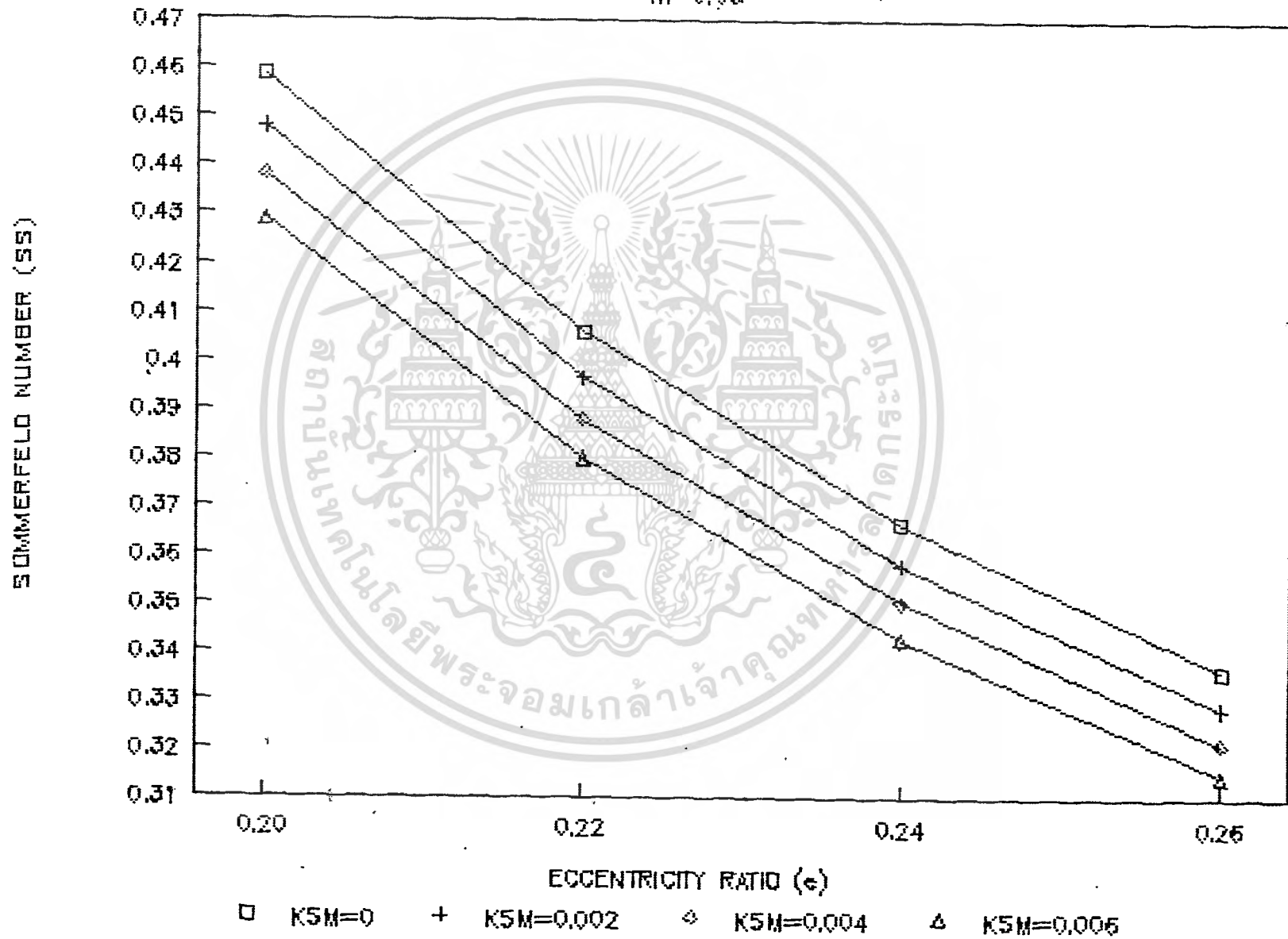
PRESSURE & AXIAL DISTANCE

EP5=0.2 , M=0.01



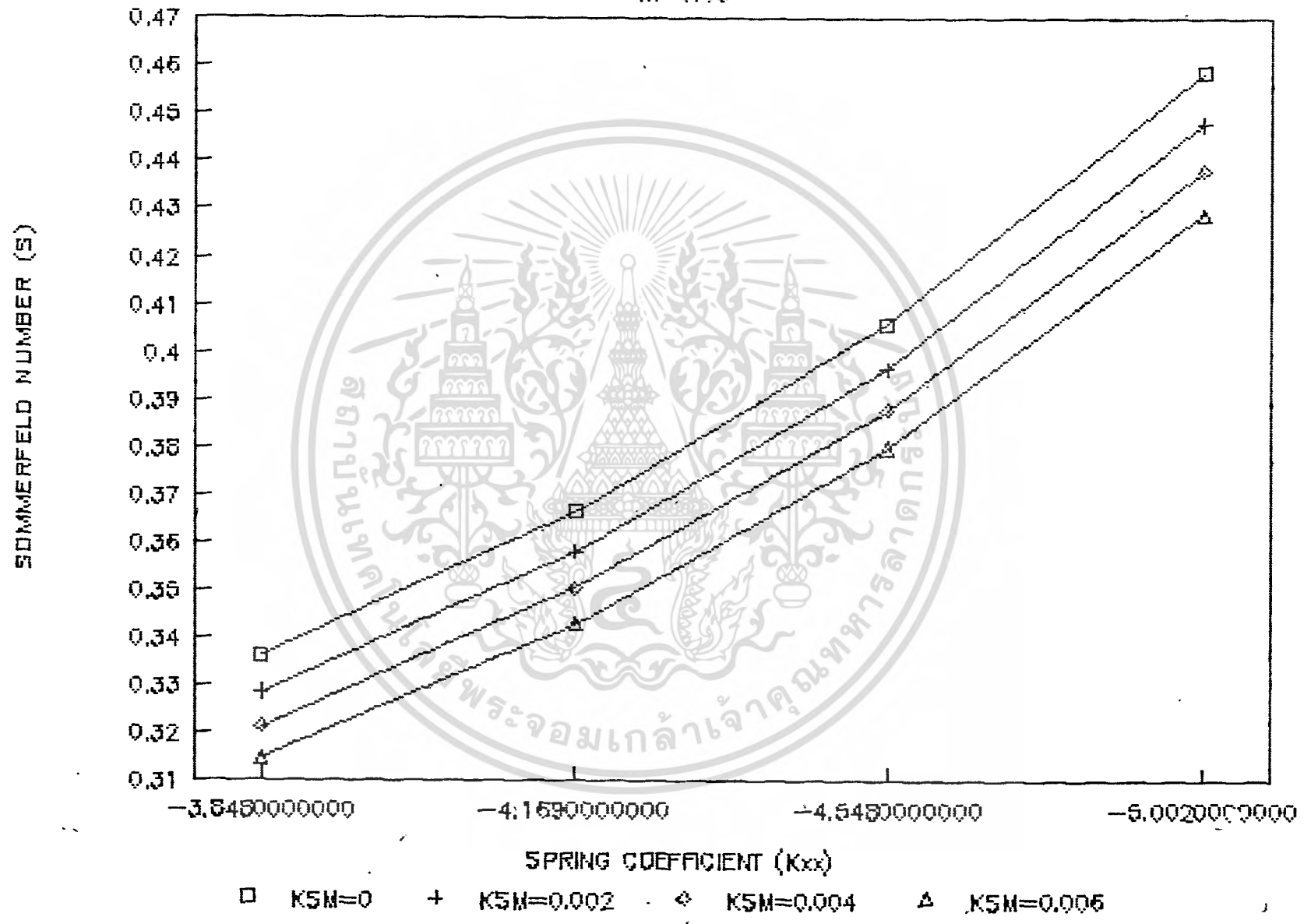
รูปที่ 5.11 SUMMERFELD NUMBER & ECCENTRICITY RATIO

$m=0.05$

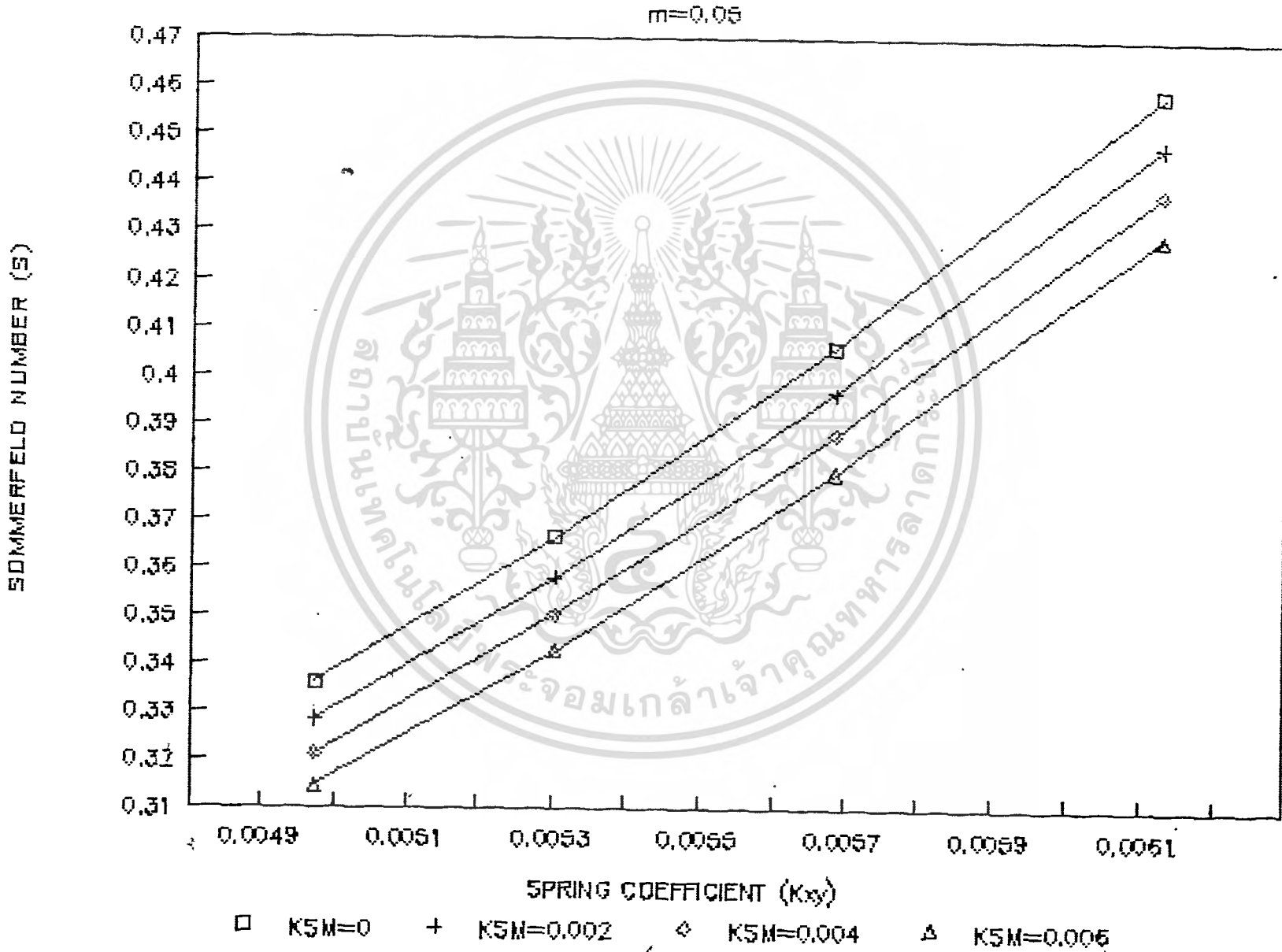


SOMMERFELD NUMBER & SPRING COEFFICIENT

$m=0.05$

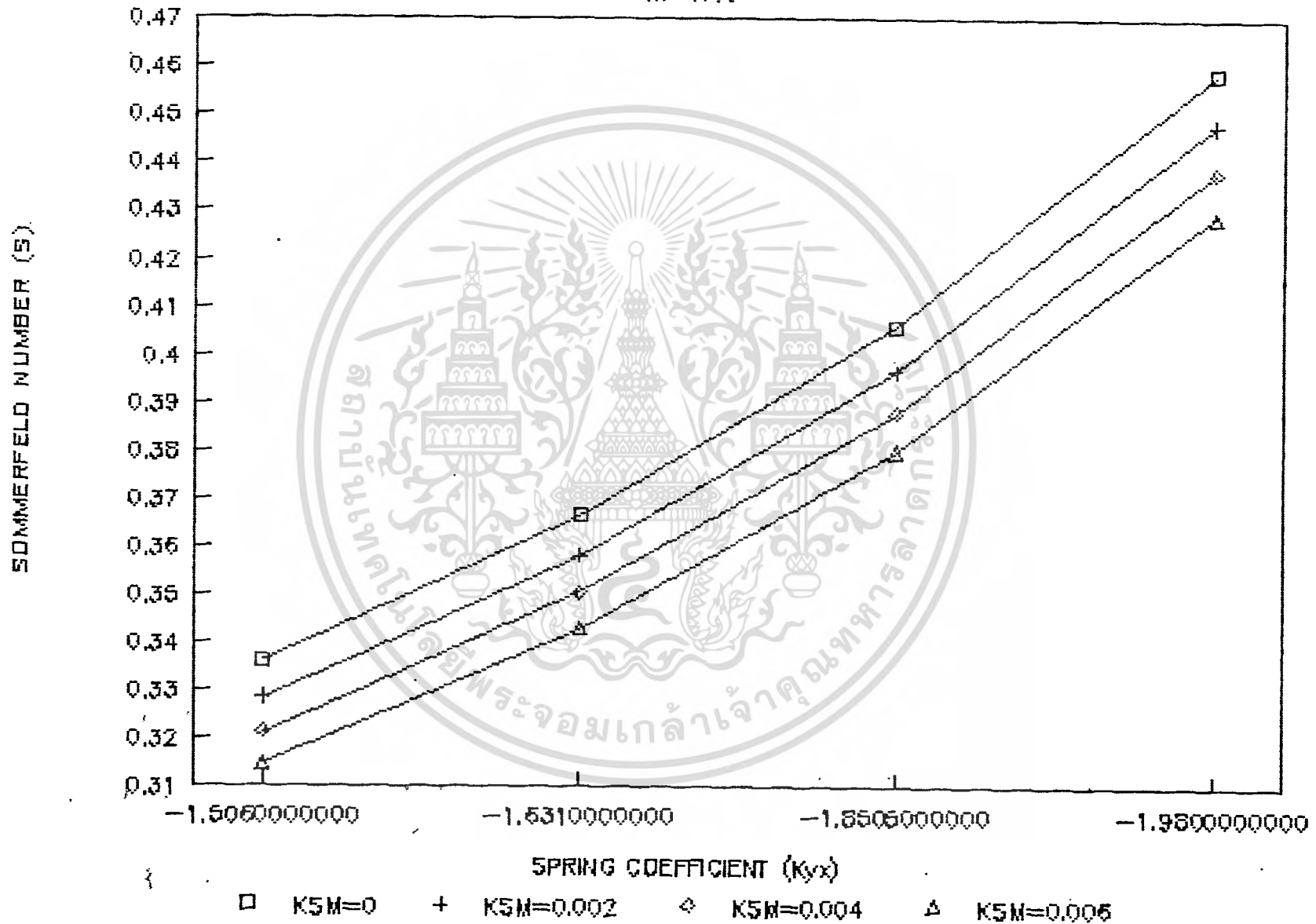


รูปที่ 5.13 SOMMERFELD NUMBER & SPRING COEFFICIENT

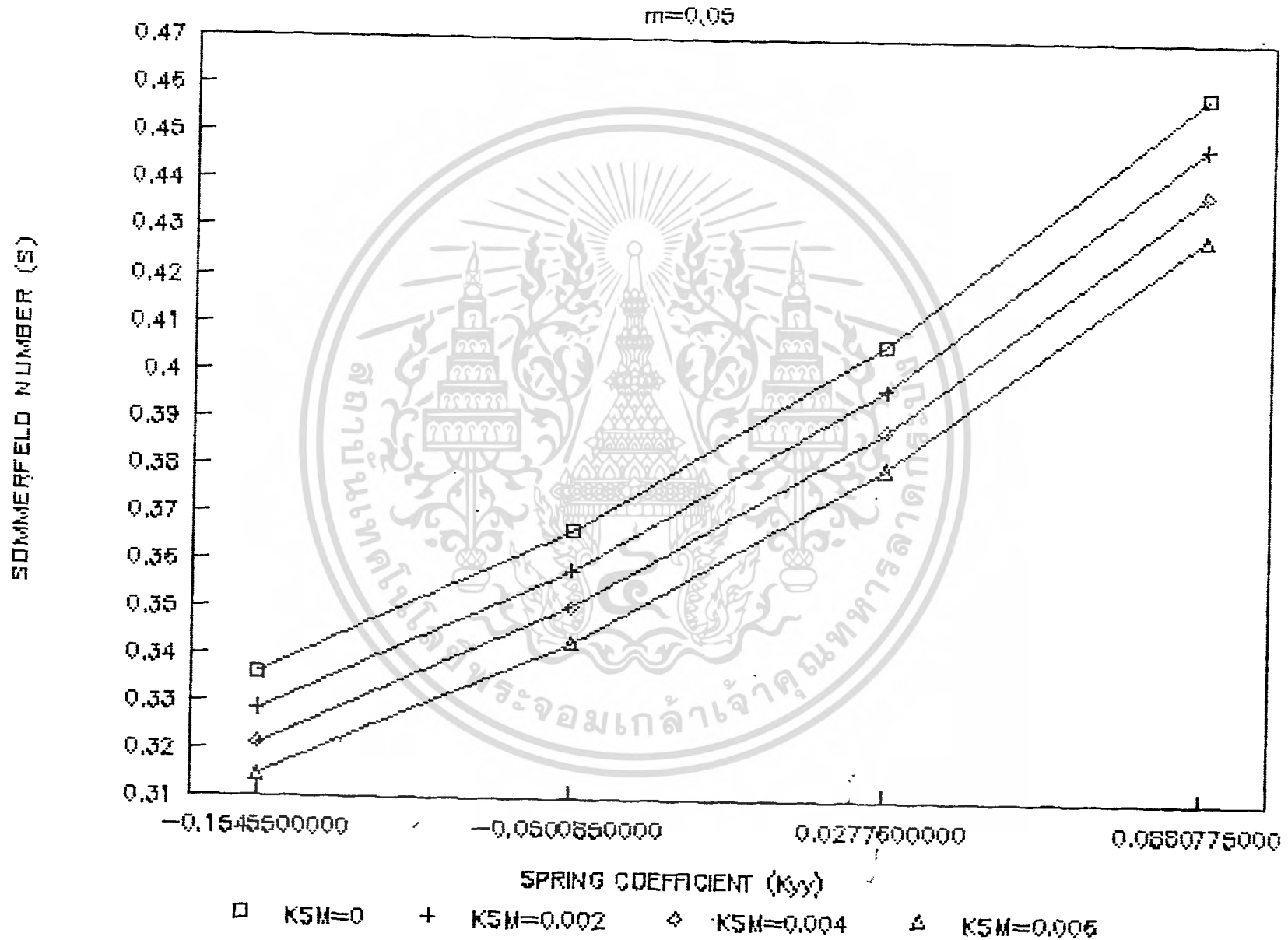


รูปที่ 5.14 SOMMERFELD NUMBER & SPRING COEFFICIENT

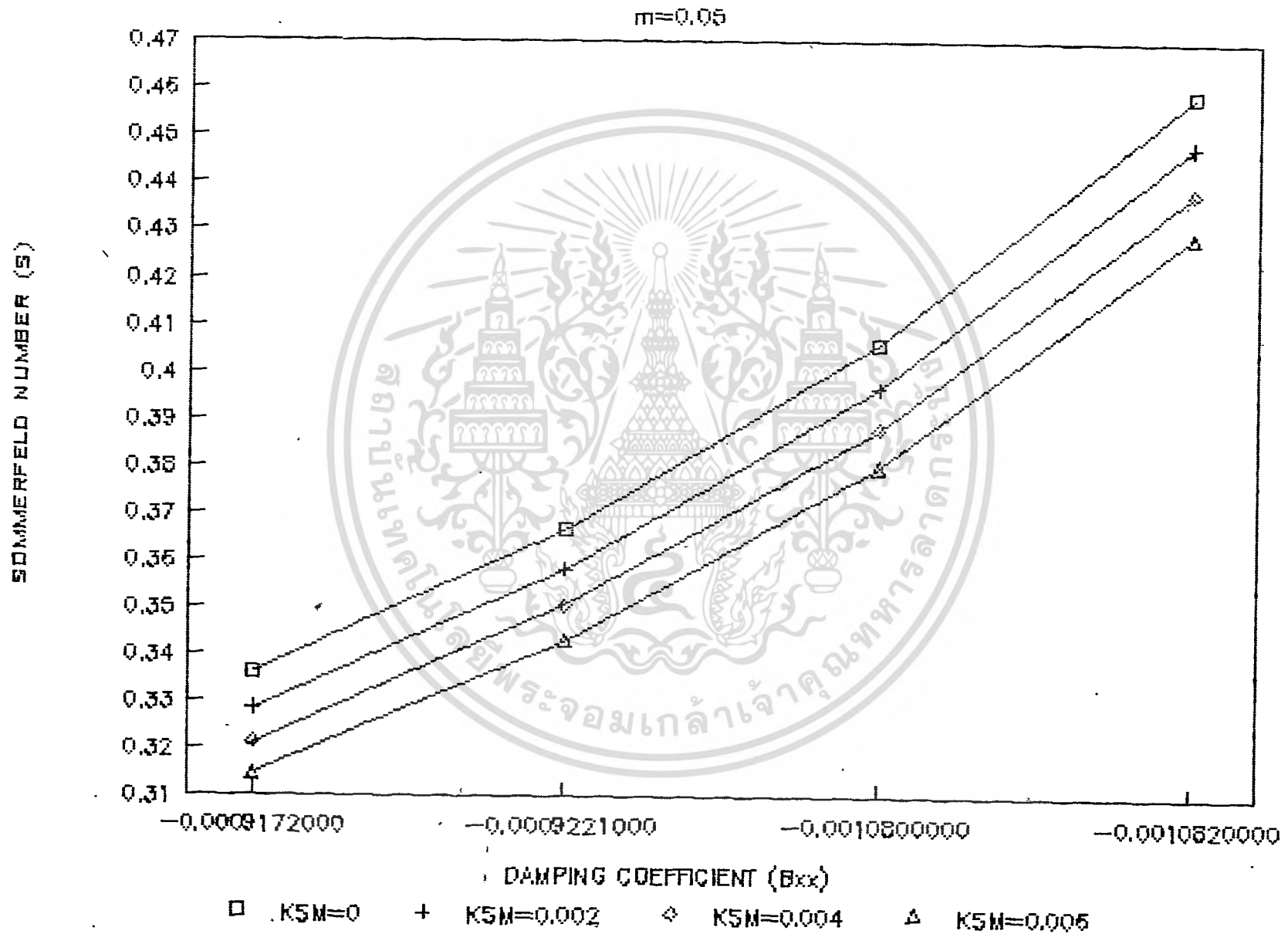
$m=0.05$



รูปที่ 5.15 SOMMERFELD NUMBER & SPRING COEFFICIENT



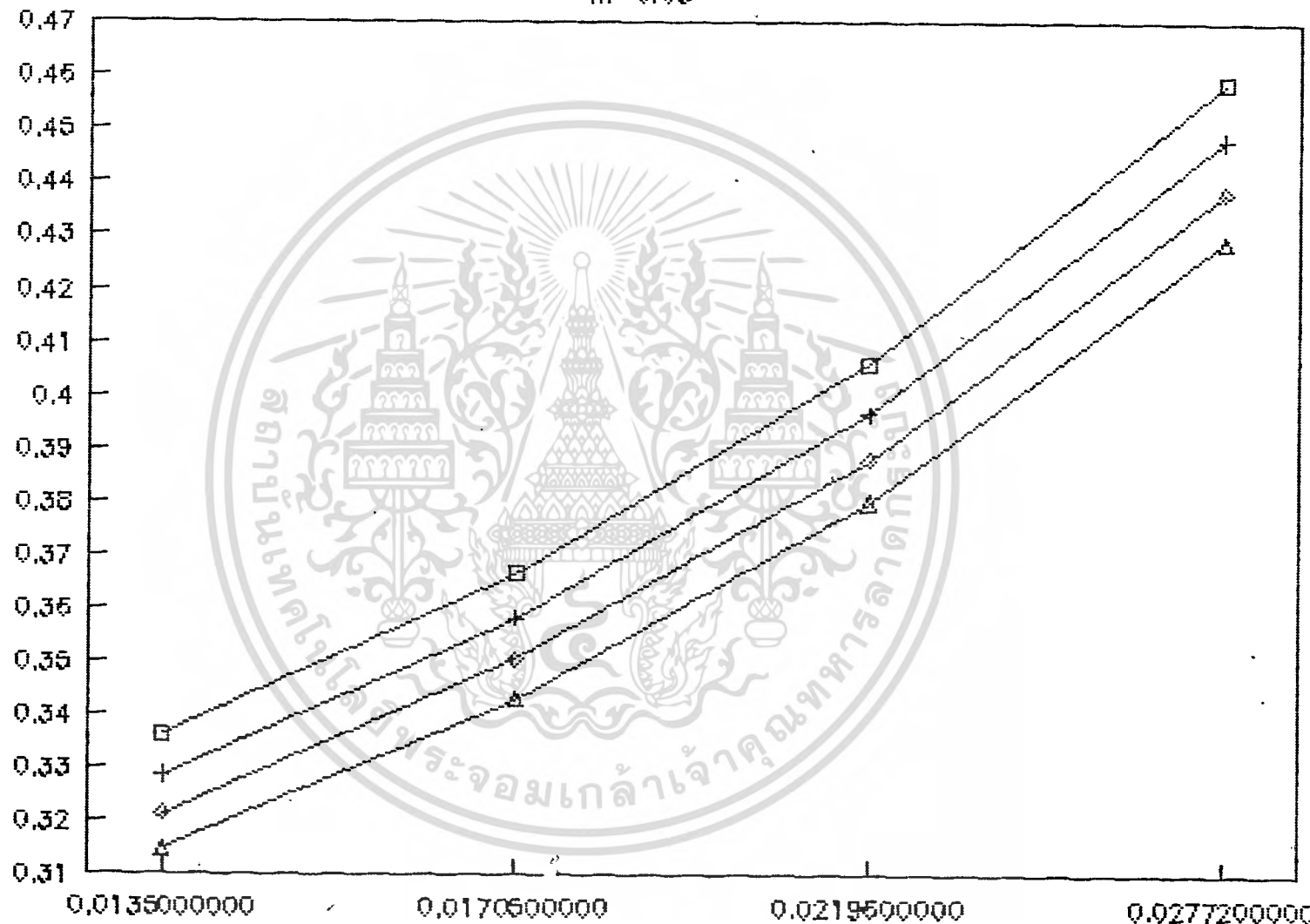
รูปที่ 5.16 SOMMERFELD NUMBER & DAMPING COEFFICIENT



SOMMERFELD NUMBER & DAMPING COEFFICIENT

$m=0.05$

SOMMERFELD NUMBER (SS)

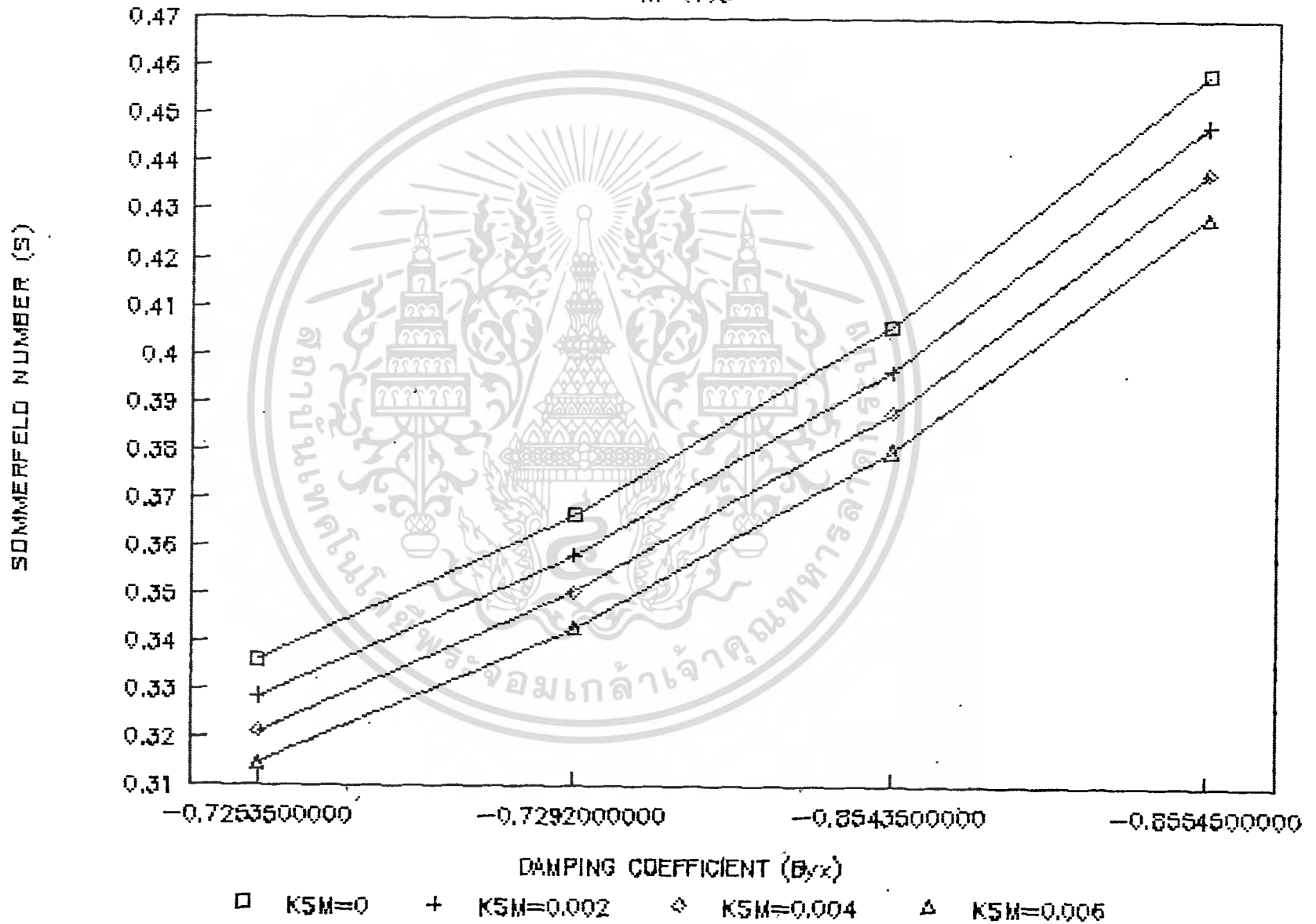


□ KSM=0
+ KSM=0.002
◇ KSM=0.004
△ KSM=0.005

รูปที่ 5.18

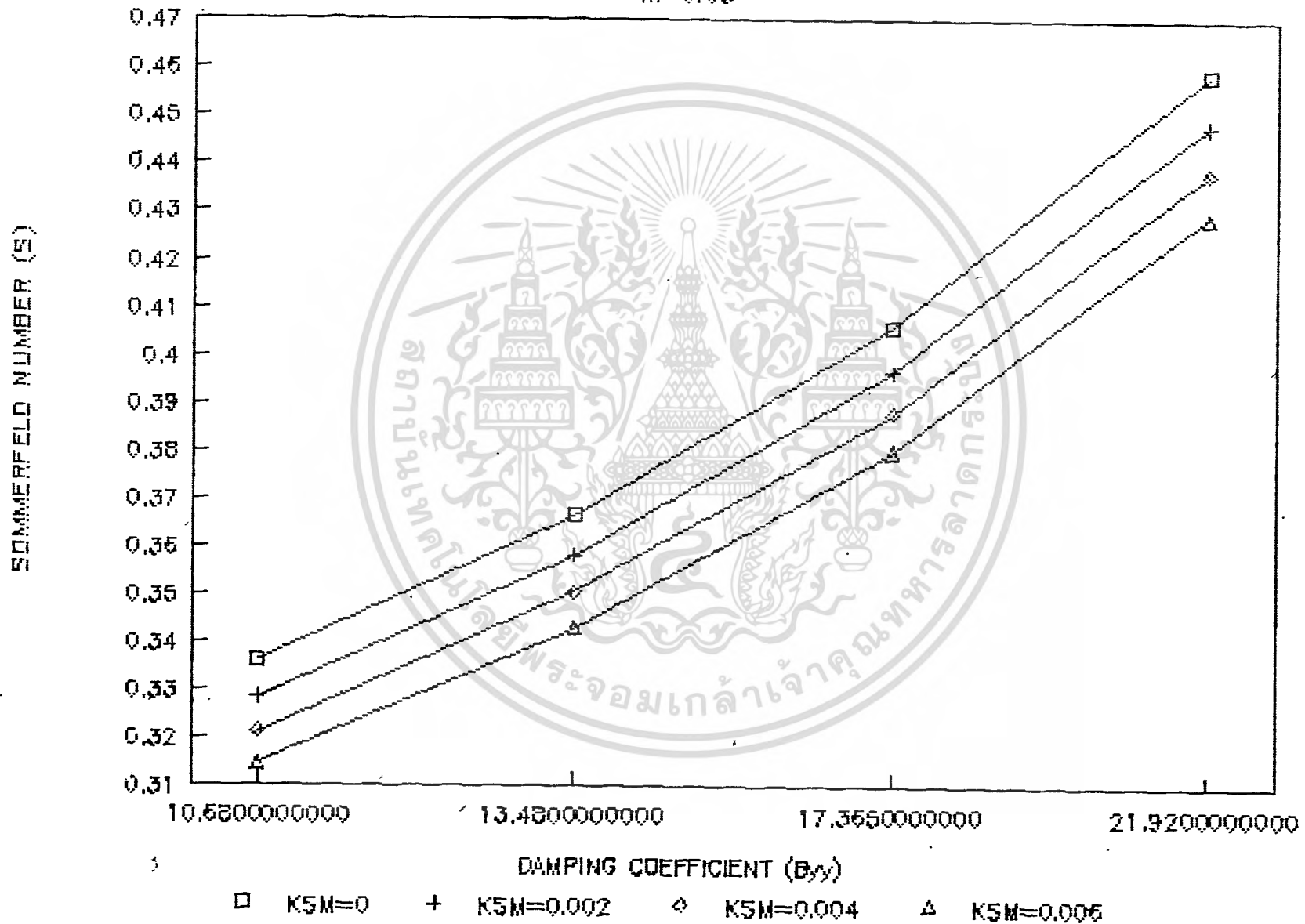
SOMMERFELD NUMBER & DAMPING COEFFICIENT

$m=0.05$



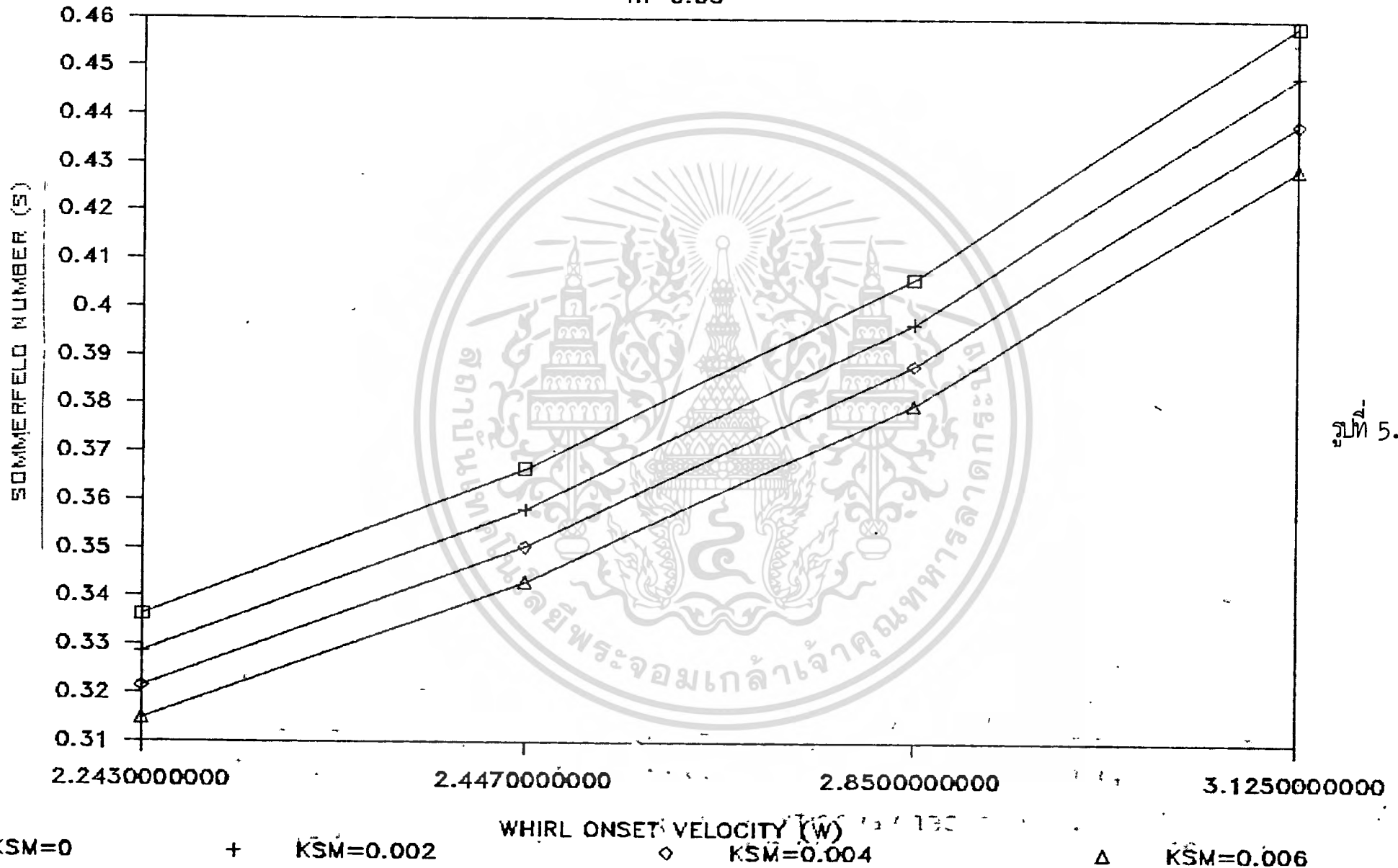
5.19 SOMMERFELD NUMBER & DAMPING COEFFICIENT

$m=0.05$



SOMMERFELD NO. & WHIRL ONSET VELOCITY. (W)

$m=0.05$



รูปที่ 5.20

บทที่ 6 สรุปผลและวิจารณ์

จากผลจากทางทฤษฎี และจากการทดลองทำให้เราเข้าใจการทำงานของ เจอร์ นอลแบริ่งที่สถานะต่างๆ กัน โดยเฉพาะจากทางทฤษฎีจะพบว่าเจอร์นอลแบริ่งแบบวงกลม และ วงรีนั้นประสิทธิภาพของแบริ่งแบบวงรีจะให้ค่าที่ดีกว่า (มีความเสถียรกว่า) เพราะค่าการกระจายความดัน จะมีค่าช่วงการกระจายความดันที่กว้างกว่า คือ มีช่วงการกระจายอยู่สองช่วง ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟ

ค่าความเร็วเวอร์ลออนเซต (Whirl onset velocity) ของแบริ่งรูปวงรี จะ มีค่ามากกว่าแบริ่งรูปวงกลม ดังนั้นแบริ่งรูปวงรีจะเหมาะสมกับการหล่อลื่นที่มีความเร็วรอบสูง (การไหลของแผ่นฟิล์มน้ำมันเป็นแบบเทอร์บิวเลนซ์)

เมื่อความหนืดของแบริ่งมีค่าสูงขึ้น จะทำให้ค่าความเร็วเวอร์ลออนเซตมีค่าสูง ขึ้นตามไปด้วย

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ จากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ ต่างกัน พบว่าค่าการกระจายความดันของค่าที่มีสัมประสิทธิ์ความหนืดต่ำ จะมีค่าน้อยกว่า ค่าที่มี สัมประสิทธิ์ความหนืดสูงกว่า

ภาคผนวก

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณทางธรณี

โปรแกรมที่ใช้เป็นภาษา FORTRAN VERSION 5 ของบริษัท MICROSOFT

C*****

C MAIN PROG. SHORT ELLIPTICAL JOURNAL BEARING **

C STATIC CHARACTERISTIC ANALYSIS **

C*****

COMMON/VARIAL/VT(49),RM,FKM,RE,DTH,MAXKT,MAXNUM

1,MAXDIV

DIMENSION P(49),VERROR(77)

PI=3.141593

C

.

C

.

1 READ(5,100) NO

READ(5,105) RE

READ(5,105) RM

READ(5,105) FKM

READ(5,105) EPS

READ(5,105) PHIDEG

IF (NO.EQ.0) GO TO 9999

100 FORMAT(I3)

105 FORMAT(F10.6)

WRITE(2,110) NO,RE,RM,FKM,EPS,PHIDEG

110 FORMAT(1H1/1H/1H/1H/1H/1H,'**** READ DATA ****NO=',I3

1/1H ,5X,'RE=',F10.3,/1H,5X,'RM=',F10.3,/1H,5X,'FKM=',F10.6,/1H,5X

2,'EPS=',F10.6,/1H,5X,'PHIDEG=',F6.4)

C*****

C PREPARATION **

C*****

เอกสารนี้เป็นเอกสาร MAXNUM=77 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากทฤษฎีของเบริงแบบความยาวจำกัด

/***** READ DATA *****/ NO. 66

KOSIKT = 18
KOSIKZ = 18
RAM = 1.000
RM = .200
EPS = .300000
PHIS = 60.000000
HANI = .1000D-02
OME = 1.500
RE = 5000.000
AKSM = .00600
XINT = .00010
DEPS = .100D-02
DPHI = .100D-02
DEPSD = .100D-02
DPHID = .100D-02

** KAISU = 8
NHAS = 0
GOSA2 = .5208333D-02
IND1 = 0
IND2 = 0 **

+DEPS
-DEPS
+DEPSD
-DEPSD
+DPHI
-DPHI
+DPHID
-DPHID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
WEA=-.4500D-01
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

```

MAXDIV=7
CLIM=0.01
MAXKT=49
NKT=MAXKT-1
DTH=2.0*PI/FLOAT(NKT)
ERROR2=777.77
DO 1000 KT=1,MAXKT
1000 VT(KT)=DTH*FLOAT(KT-1)

```

C*****

C ITERATION OF ATTITUDE ANGLE **

C*****

```

IND=0
NDIV=0
PHI=PHIDEG*PI/180.0
DO 2000 NUM=1,MAXNUM
PHI1=PHI
ERROR1=ERROR2
CALL LUBP (P, EPS, PHI, WEPS, WPHI, IND2)
IF(IND2.NE.0) GO TO 9999
PHI2=ATAN(WPHI/WEPS)
IF(WEPS.LT.0.0) PHI2=PHI2+PI
ERROR2=ABS(PHI2-PHI1)
IF(PHI2.NE.0.0) ERROR2=ERROR2/ABS(PHI2)
PHI=PHI2
IF(ERROR2.LT.CLIM) GO TO 2100
IF(ERROR2.GE.ERROR1) NDIV=NDIV+1
IF(NDIV.GE.MAXDIV) GO TO 2200
PHI=(PHI1+PHI2)/2.0
VERROR(NUM)=ERROR2
2000 CONTINUE
NUM=MAXNUM

```

C*****

C IND=0: CONVERGING, IND=1: OVER, IND=2: DIVERGING **

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C*****

```
      IND=1
      GO TO 2300
2200  IND=2
      GO TO 2300
2100  IND=0
2300  WRITE(2,200) NUM,NDIV,ERROR2,IND
      200  FORMAT(1H,'**NUMBER OF ITERATIONS NUM='I3
            1,/1H,5X,'NDIV=',I2,/1H,5X,'ERROR2=',F15.7
            2,/1H,5X,'IND=',I2,'**')
      IF(IND.EQ.2) THEN
      WRITE(2,210) (VERROR(K),K=1,NUM)
210  FORMAT(1H,5F15.7)
      END IF
      W=SQRT(WEPS*WEPS+WPHI*WPHI)
      S=1.0/PI/W
C*****
C   WRITE RESULTS      **
C*****
      PHIDEG=PHI*180.0/PI
      WRITE(2,300) RE, RM, EPS, S, PHIDEG, IND
300  FORMAT(1H /1H , '*****STATIC CHARACTERISTICS*****'
            1/1H ,5X,'RE=',F10.0,/1H,5X,'RM=',F10.3,/1H,5X,'EPS=',F10.6
            2,/1H,5X,'S=',F15.9,/1H,5X,'PHI( DEG)=' ,F10.6,/1H ,5X,'IND=' ,I2)
      DO 3000 KT=1,MAXKT
      P(KT)=P(KT)/4.0
      TH=VT(KT)*180.0/PI
      WRITE(2,310) TH,P(KT)
310  FORMAT(1H ,10X,F15.7,3X,F15.7)
3000  CONTINUE
      GO TO 1
```

9999 WRITE(2,999)

999 FORMAT(1H /1H ,65X,'(*)')

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STOP

END

C*****

C SUBROUTINE LUBP **

C*****

SUBROUTINE LUBP (P, EPS, PHI, WEPS, WPHI, IND2)

COMMON/VARIAL/VT(49), RM, FKM, RE, DTH, MAXKT, MAXNUM

1, MAXDIV

DIMENSION P(49), F(49), GZ(49)

C*****

C PURPOSE: CALCULATION OF PRESSURE DISTRIBUTION **

C*****

DO 1000 KT=1, MAXKT

TH=VT(KT)

H=1.0+EPS*COS(TH)+RM*SIN(TH+PHI)*SIN(TH+PHI)

CALL COEFIC(H, CFM, IND2)

IF(IND2.NE.0) GO TO 9999

GZT=2.0/(CFM*H*RE)

GZL=1/12.0

GZ(KT)=MIN(GZL, GZT)

P(KT)=(EPS*SIN(TH)-RM*SIN(2.0*(TH+PHI)))/(GZ(KT)*H*H*H)

1000 CONTINUE

C*****

C FLUID FILM FORCE COMPONENTS **

C*****

DO 2000 KT=1, MAXKT

TH=VT(KT)

F(KT)=P(KT)*COS(TH)

IF(P(KT).LT.0.0) F(KT)=0.0

2000 CONTINUE

CALL SIMP1(F, 1, MAXKT, DTH, SUM)

WEPS=-SUM/6.0

```
DO 2100 KT=1,MAXKT
TH=VT(KT)
F(KT)=P(KT)*SIN(TH)
IF(P(KT).LT.0.0) F(KT)=0.0
2100 CONTINUE
CALL SIMP1(F,1,MAXKT,DTH,SUM)
WPHI=SUM/6.0
C
9999 RETURN
END
```

C*****

C SUBROUTINE COEFF **

C*****

SUBROUTINE COEFIC(H,CFM,IND2)

COMMON/VARIAL/VT(49),RM,FKM,RE,DTH,MAXKT,MAXNUM

1,MAXDIV

CFMINT=8.0/RE

CLIM=0.001

ERROR2=77.77

IND2=0

NDIV=0

CFM2=CFMINT

DO 1000 NUM=1,MAXNUM

IF(CFM2.LE.0.0) CFM2=CFMINT

CFM1=CFM2

ERROR1=ERROR2

TM1=SQRT(CFM1)

TM2=CFM1*TM1

TM3=FKM/H+11.80/(RE*H*TM1)

TM4=20.414*TM1/(11.80+RE*FKM*TM1)+1.0

FCM=1.0/TM1+1.73*LOG(TM3)-3.54

DFCM=-TM4/(2.0*TM2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
IF(DFCM.EQ.0.0) GO TO 1010
CFM2=CFM1-FCM/DFCM
ERROR2=ABS(CFM2-CFM1)
IF(CFM2.NE.0.0) ERROR2=ERROR2/ABS(CFM2)
IF(ERROR2.LE.CLIM) GO TO 1030
IF(ERROR2.GE.ERROR1) NDIV=NDIV+1
IF(NDIV.GE.MAXDIV) GO TO 1020
1000 CONTINUE
NUM=MAXNUM
C*****
C IND2=0: CONVERGING, IND2.NE.0; NOT CONVERGING **
C*****
IND2=1
GO TO 1040
1010 IND2=2
GO TO 1040
1020 IND2=3
GO TO 1040
1030 IND2=0
CFM=CFM2
1040 IF(IND2.EQ.0) GO TO 9999
WRITE(2,100) IND2
100 FORMAT(1H//1H,5X,'COMPUTATIONS STOP HERE CAUSED BY'
1,3X,'IND2=',I3)
9999 RETURN
END
```

```
C*****
C SUBROUTINE SIMP1 **
C*****
SUBROUTINE SIMP1(F,KS,KE,DELTA,SUM)
```

```
DIMENSION F(1)
DATA ZERO,VAL2,VAL3,VAL4,VAL5,VAL8,VAL12
```

```
1/0.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 8.0, 12.0/
KSM=KS
IF(KS.LE.0) KSM=1
KS1=KSM+1
KS2=KSM+2
SUM=ZERO
JJ=KE-KSM
IF(JJ.LE.0) GO TO 90
IF(JJ.LE.1) GO TO 40
KEM=KE
IF((JJ/2)*2.NE.JJ) KEM=KE-1
KE1=KEM-1
KE2=KEM-2
S1=ZERO
S2=ZERO
DO 10 K=KS1,KE1,2
10 S1=S1+F(K)
IF(KS2.GT.KE2) GO TO 30
DO 20 K=KS2,KE2,2
20 S2=S2+F(K)
30 SUM=DELTA/VAL3*(F(KSM)+VAL4*S1+VAL2*S2+F(KEM))
IF(KEM.EQ.KE) GO TO 90
SUM=SUM+(-F(KE1)+VAL8*F(KEM)+VAL5*F(KE))*DELTA/VAL12
GO TO 90
40 SUM=DELTA/VAL2*(F(KSM)+F(KS1))
90 RETURN
END
```

C*****END OF PROGRAM*****

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
C*****
C   MAIN PROGRAM ELLIPTICAL (FINITE LENGTH)  **
C*****

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

      COMMON/KYOTU1/PI,VT(19),VZ(19)

1     ,RAM, RM, KOSIKT, KOSIKZ, MAXKT, MAXKZ, DTH, DZ
2     ,RE, AKSM, XINT, MAXKI, MAXHS

      COMMON/KYOTU3/OME, LDIM, NDIM, IND1, IND2, IND3

      COMMON/KYOTU2/GGK, GEK, EGK, EEK, GGB, GEB, EGB, EEB, WHIRL

      DIMENSION P(19,19), VBVK(10)

      PI= 22.0D0/7.0D0

C     CALL IOUNIT(-5)
C     CALL IOUNIT(6)
C     CALL IOUNIT(8)
1  READ(5,100) NO
      READ(5,100) KOSIKT
      READ(5,100) KOSIKZ
      READ(5,105) RAM
      READ(5,105) EPS
      READ(5,105) PHIS
      READ(5,105) RM
      READ(5,105) HANI
      READ(5,105) OME
      READ(5,106) DEPS
      READ(5,106) DPHI
      READ(5,106) DEPSD
      READ(5,106) DPHID
      READ(5,106) RE
      READ(5,106) AKSM
      READ(5,106) XINT
      IF (NO.EQ.0) GOTO 9999
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100 FORMAT(I3,I4,I3)

105 FORMAT(F10.0)

106 FORMAT(F15.0)

WRITE(2,110) NO, KOSIKT, KOSIKZ, RAM, RM, EPS, PHIS, HANI,

1 OME, RE, AKSM, XINT, DEPS, DPFI, DEPSD, DPHID

110 FORMAT(1H1/1H /1H /1H /1H /1H/ , '***** READ DATA ***** NO.', I3/

1 1H, 5X, 'KOSIKT =', I4/

2 1H, 5X, 'KOSIKZ =', I3/

3 1H, 5X, 'RAM =', F10.3/

4 1H, 5X, 'RM =', F10.3/

5 1H, 5X, 'EPS =', F10.6/

6 1H, 5X, 'PHIS =', F10.6/

7 1H, 5X, 'HANI =', D10.4/

8 1H, 5X, 'OME =', F10.3/

9 1H, 5X, 'RE =', F10.3/

A 1H, 5X, 'AKSM =', F10.5/

B 1H, 5X, 'XINT =', F10.5/

C 1H, 5X, 'DEPS =', D10.3/

D 1H, 5X, 'DPFI =', D10.3/

E 1H, 5X, 'DEPSD =', D10.3/

F 1H, 5X, 'DPHID =', D10.3/

G 1H, 20('**'))

C ** ** ** **

C PREPARATION **

C ** ** ** *

LDIM =19

NDIM =19

MAXKI=77

MAXHS=15

MAXKT=KOSIKT + 1

MAXKZ=KOSIKZ + 1

MIDKZ=KOSIKZ/2 + 1

เอกสารนี้เป็นเอกสาร DTH งว = 2.000 * PI / DBLE(KOSIKT) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DZ = 1.0D0/DBLE(KOSIKZ)
PHI = PHIS * PI / 180.0D0
DO 1011 J=1,10
1011 VBVK(J) = 0.0D0
DO 1020 KT=1,MAXKT
1020 VT(KT) = DZ * DBLE(KT-1)
DO 1021 KZ=1,MAXKZ
1021 VZ(KZ) = DZ * DBLE(KZ-1)
DO 1022 KT=1,MAXKT
DO 1022 KZ=1,MAXKZ
P(KT,KZ) = 0.0D0
1022 CONTINUE
CALL COEFF(EPS, PHI, DEPS, DPHI, DEPSD, DPHID, WS, SS,
1 WEA, WEB, WEC, WED, WEE, WPA, WPB, WPC, WPD,
2 WPE, P, HANI)
IF (IND1.NE.0.OR.IND2.NE.0.OR.IND3.NE.0) GOTO 1068
C
CALL DYN(EPS, PHI, WEA, WEB, WEC, WED, WEE, WPA, WPB, WPC,
1 WPD, WPE, WS, SS, VBVK, BETA)
C*****
C PRINT OUT OF STATIC CHARACTERISTICS **
C*****
PHIDEG = PHI*180.0D0/PI
WRITE(2,160) WS,SS,PHIDEG,IND1,IND2
160 FORMAT(1H /1H , '***** STATIC CHAR. *****' /
1 1H ,5X, 'WS = ',D15.9/
2 1H ,5X, 'SS = ',D15.9/
3 1H ,5X, 'PHIDEG = ',F10.6/
4 1H ,5X, 'IND1 = ',I2/
5 1H ,5X, 'IND2 = ',I2)
C ** ** ** **
C PRINTOUT OF DYNAMIC OIL FILM COEFFICIENT **
C ** ** ** **

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ทางภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WRITE(2,180) G GK,GEK,EGK,EEK,GGB,GEB,EGB,EEB
180 FORMAT(1H /1H , '** OIL FILM COEFFICIENT **'
1          /1H , 5X , 'G GK=' ,D10.4/1H, 5X, 'GEK=' ,D10.4
2          /1H, 5X , 'EGK=' ,D10.4/1H , 5X, 'EEK=' ,D10.4
3          /1H , 5X , 'GGB=' ,D10.4/1H, 5X, 'GEB=' ,D10.4
4          /1H, 5X , 'EGB=' ,D10.4/1H , 5X, 'EEB=' ,D10.4)

```

C

```

IF (IND2.NE.0.OR.IND3.NE.0) GOTO 1066
DO 1060 KT=1,MAXKT
T=VT(KT) * 180.0D0 / PI
WRITE(2,170) T,P(KT,MIDKZ)
170 FORMAT(1H/1H ,5X, F15.7 , 5X , F15.7)
1060 CONTINUE

```

C

```

WRITE(2,333) P
333 FORMAT(1H/1H,5X,'P=' ,F15.7)
1066 WRITE(2,998) IND1, IND2
998 FORMAT(1H /1H , 5X, 'IND1= ' ,I2,/1H,5X,'IND2 =',I2)
GOTO 1
9999 WRITE(2,999)
999 FORMAT(1H //1H ,65(' *'))
STOP
END

```

C ** ** ** **

C SUBROUTINE COEFF

C ** ** ** **

```

SUBROUTINE COEFF(EPS, PHIS, DEPS, DPHI, DEPSD, DPHEID, WS,
1          SS, WEA, WEB, WEC, WED, WEE, WPA, WPB, WPC, WPD,
2          WPE, P, HANI)

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

COMMON/KYOTU1/PI, VT(19), VZ(19)

```

1          ,RAM, RM, KOSIKT, KOSIKZ, MAXKT, MAXKZ, DTH, DZ
2          ,RE, AKSM, XINT, MAXKI, MAXHS

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMMON/KYOTU3/OME, LDIM, NDIM, IND1, IND2, IND3
DIMENSION P(19,19), P1(19,19), P2(19,19)

C

DO 1030 KT=1,MAXKT
DO 1030 KZ=1,MAXKZ
P2(KT,KZ) = P(KT,KZ)

1030 CONTINUE

C*****

C CALCULATION OF STATIC CHARACTERISTICS **

C*****

PHI = PHIS
CALL LUBP(EPS, PHI, 0.0D0, 0.0D0, WEPS, WPHI, W, S, P2, HANI)
WS = W
SS = S
PHIS = PHI
DO 1000 KT=1,MAXKT
DO 1000 KZ=1,MAXKZ
P(KT,KZ) = P2(KT,KZ)

1000 CONTINUE

IF (IND1.NE.0.OR.IND2.NE.0) GOTO 1999

C*****

C CALCULATION OF DYNAMIC COEFFICIENTS **

C*****

WEA = WEPS
WPA = WPHI
WRITE(2,*)'+DEPS'
CALL LUBP2(EPS+DEPS, PHI, 0.0D0, 0.0D0, WEP, WPP, P1, HANI)
WRITE(2,*)'-DEPS'
CALL LUBP2(EPS-DEPS, PHI, 0.0D0, 0.0D0, WEM, WPM, P1, HANI)
WEB = (WEP-WEM)/(2.0D0*DEPS)
WPB = (WPP-WPM)/(2.0D0*DEPS)
WRITE(2,*)'+DEPSD'

CALL LUBP2(EPS, PHI, DEPSD, 0.0D0, WEP, WPP, P1, HANI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WRITE(2,*)'-DEPSD'
CALL LUBP2(EPS, PHI, -DEPSD, 0.0D0, WEM, WPM, P1, HANI)
WEC = (WEP-WEM)/(2.0D0*DEPSD)
WPC = (WPP-WPM)/(2.0D0*DEPSD)
WRITE(2,*)'+DPHI'
CALL LUBP2(EPS, PHI+DPHI, 0.0D0, 0.0D0, WEP, WPP, P1, HANI)
WRITE(2,*)'-DPHI'
CALL LUBP2(EPS, PHI-DPHI, 0.0D0, 0.0D0, WEM, WPM, P1, HANI)
WED = (WEM-WEP)/(2.0D0*DPHI)
WPD = (WPM-WPP)/(2.0D0*DPHI)
WRITE(2,*)'+DPHID'
CALL LUBP2(EPS, PHI, 0.0D0, DPHID, WEP, WPP, P1, HANI)
WRITE(2,*)'-DPHID'
CALL LUBP2(EPS, PHI, 0.0D0, -DPHID, WEM, WPM, P1, HANI)
WEE = (WEM-WEP)/(2.0D0*DPHID)
WPE = (WPM-WPP)/(2.0D0*DPHID)
WRITE(2, 140)WEA, WEB, WEC, WED, WEE, WPA, WPB, WPC, WPD, WPE
140 FORMAT(1H ,5X , 'WEA=' , D10.4/1H, 5X, 'WEB=' , D10.4
1 /1H ,5X, 'WEC=' , D10.4/1H, 5X, 'WED=' , D10.4
2 /1H ,5X , 'WEE=' , D10.4
3 /1H ,5X , 'WPA=' , D10.4/1H, 5X, 'WPB=' , D10.4
4 /1H ,5X, 'WPC=' , D10.4/1H, 5X, 'WPD=' , D10.4
5 /1H ,5X , 'WPE=' , D10.4)

```

1999 RETURN

END

C ** ** ** **

C SUBROUTINE DYN

C ** ** ** **

SUBROUTINE DYN(EPS, PHIS, WEA, WEB, WEC, WED, WEE,

1 WPA, WPB, WPC, WPD, WPE, WS, SS, VBVK, BETA)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

COMMON/KYOTU1/PI, VT(19), VZ(19)

1 ,RAM, RM, KOSIKT, KOSIKZ, MAXKT, MAXKZ, DTH, DZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ขอเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ,RE, AKSM, XINT, MAXKI, MAXHS
 COMMON/KYOTU3/OMÉ, LDIM, NDIM, IND1, IND2, IND3
 COMMON/KYOTU2/GGK, GEK, EGK, EEK, GGB, GEB, EGB, EEB, WHIRL
 DIMENSION VBVK(10)

C

$$SP = DSIN(PHIS)$$

$$CP = DCOS(PHIS)$$

C*****

C CALCULATION OF W1 AND W2 **

C*****

$$W1A = WEA*CP + WPA*SP$$

$$W1B = WEB*CP + WPB*SP$$

$$W1C = WEC*CP + WPC*SP$$

$$W1D = WED*CP + WPD*SP$$

$$W1E = WEE*CP + WPE*SP$$

$$W2A = WEA*SP - WPA*CP$$

$$W2B = WEB*SP - WPB*CP$$

$$W2C = WEC*SP - WPC*CP$$

$$W2D = WED*SP - WPD*CP$$

$$W2E = WEE*SP - WPE*CP$$

C*****

C CALCULATION OF SPRING AND DAMPING COEFFICIENTS **

C*****

$$GGK = (W2B*SP - (W2D-W1A)*CP/EPS)/WS$$

$$GEK = (W2B*CP + (W2D-W1A)*SP/EPS)/WS$$

$$EGK = (W1B*SP - W1D*CP/EPS)/WS$$

$$EEK = (W1B*CP + W1D*SP/EPS)/WS$$

$$GGB = (W2C*SP - W2E*CP/EPS)/WS$$

$$GEB = (W2C*CP + W2E*SP/EPS)/WS$$

$$EGB = (W1C*SP - W1E*CP/EPS)/WS$$

$$EEB = (W1C*CP - W1E*SP/EPS)/WS$$

C

เอกสารนี้เป็นเอกสาร VBVK(1) = EPS วิชาการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VBVK(2) = SS
 VBVK(3) = GGK
 VBVK(4) = GEK
 VBVK(5) = EGK
 VBVK(6) = EEK
 VBVK(7) = GGB
 VBVK(8) = GEB
 VBVK(9) = EGB
 VBVK(10) = EEB

C*****

C CALCULATION OF A1-A5 **

C*****

A1 = GGK*EEB + EEK*GGB - GEK*EGB - EGK*GEB
 A2 = GGK*EEK - GEK*EGK
 A3 = GGB*EEB - GEB*EGB
 A4 = GGK + EEK
 A5 = GGB + EEB

C

WRITE(2,100) A1,A2,A3,A4,A5

100 FORMAT(1H , 5X, 'A1=',D12.6/1H, 5X, 'A2=',D12.6
 1 /1H , 5X, 'A3=',D12.6/1H, 5X, 'A4=',D12.6
 2 /1H , 5X, 'A5=',D12.6)

C*****

C CALCULATION OF STABILITY LIMIT **

C*****

B11 = A1*A1 + A2*A5*A5 - A1*A4*A5
 B12 = A1*A3*A5
 IF (B11.EQ.0.0D0) THEN
 BETA = -999.8D0
 GOTO 1200
 ENDIF
 IF (B12.EQ.0.0D0) THEN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GOTO 1200
ENDIF
BETA = B11/B12
1200 WRITE(2,105) BETA
105 FORMAT(1H/1H,'** STABILITY LIMIT **'/1H,5X,'BETA=',D10.4)
IF (BETA.LT.0.0D0 ) GOTO 20
WHIRL = 1.0D0/DSQRT(BETA)
WRITE(2,106) WHIRL
106 FORMAT(1H,5X,'WHIRL=',D10.4)
20 RETURN
END

```

```

C ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** **
C SUBROUTINE LUBP
C ** ** ** **** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** **

```

```

SUBROUTINE LUBP(EPS,PHI,EPSP,PHID,WEPS,WPHI,W,S,PM,HANI)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/KYOTU1/PI,VT(19),VZ(19)
1 ,RAM,RM,KOSIKT,KOSIKZ,MAXKT,MAXKZ,DTH,DZ
2 ,RE,AKSM,XINT,MAXKI,MAXHS
COMMON/KYOTU3/OME,LDIM,NDIM,IND1,IND2,IND3
DIMENSION VGOSA(77), PM(19,19)

```

C*****

```

C ITERATION **

```

C*****

```

GOSA2 = 777.7D0
NHAS = 0
IND1 = 0
HANIPH= 0.01

```

C

```

DO 3000 KAISU=1,MAXKI
PHI0 =PHI
GOSA1 =GOSA2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 CALL LUBP2(EPS,PHI,EPSP,PHID,WEPS,WPHI,PM,HANI) ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
IF (IND1.NE.0) GOTO 3500
PHI1=DATAN(WPHI/WEPS)
IF (WEPS.LT.0.0D0) PHI1=PHI1+PI
GOSA2 = DABS(PHI1-PHI0)
IF (PHI1.NE.0.0D0) GOSA2=GOSA2/DABS(PHI1)
PHI = PHI1
IF (GOSA2.LT.HANIPH) GOTO 3100
IF (GOSA2.GE.GOSA1) NHAS=NHAS+1
IF (NHAS.GE.MAXHS) GOTO 3200
PHI = (PHI1 + PHI0)/2.0D0
VGOSA(KAISU) = GOSA2
3000 CONTINUE
KAISU = MAXKI
C*****
C IND1:0=CONVERGENCE, 1=OVER, 2=DIVERGENCE **
C*****
IND1 = 1
GOTO 3500
3200 IND1 = 2
GOTO 3500
3100 IND1 = 0
3500 WRITE(2,300) KAISU,NHAS,GOSA2,IND1,IND2
300 FORMAT(1H , ' ** KAISU =',I3/1H, 5X,'NHAS =',I2
1 /1H ,5X,'GOSA2 =',D15.7
2 /1H ,5X,'IND1 =',I2
3 /1H ,5X,'IND2 =',I2, ' **')
IF (IND1.EQ.2) THEN
WRITE(2,310) (VGOSA(I),I=1,KAISU)
310 FORMAT(1H ,6F15.7)
ENDIF
W =DSQRT(WEPS*WEPS + WPHI*WPHI)
S =999.9999D0
IF (W.EQ.0.0D0) GOTO 3700
```

S = 1.0D0 / (PI * W)

C

3700 RETURN

END

C ** ** ** **

C SUBROUTINE LUBP2

C ** ** ****

SUBROUTINE LUBP2(EPS, PHI, EPSD, PHID, WEPS, WPHI, PM, HANI)

IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)

COMMON/KYOTU1/PI, VT(19), VZ(19)

1 ,RAM, RM, KOSIKT, KOSIKZ, MAXKT, MAXKZ, DTH, DZ

2 ,RE, AKSM, XINT, MAXKI, MAXHS

COMMON/KYOTU3/OME, LDIM, NDIM, IND1, IND2, IND3

DIMENSION PM(19, 19), FTA(19, 19), GT(19, 19), GZ(19, 19),

1 FTB(19, 19), FZE(19, 19), VH(19)

2 ,FTAA(19), FTBB(19)

C

DO 1000 KT=1, MAXKT

VH(KT) = 1.0D0 + EPS * DCOS(VT(KT))

1 + RM * DSIN(VT(KT) + PHI) * DSIN(VT(KT) + PHI)

1000 CONTINUE

C

CALL KEISU(GT, GZ, VH, HANI)

IF (IND3.NE.0) GOTO 9999

DO 2000 KT=2, KOSIKT

HA = ((VH(KT-1)+VH(KT))*0.50D0)**3

HB = ((VH(KT)+VH(KT+1))*0.50D0)**3

HE = VH(KT)*VH(KT)*VH(KT)

DO 2100 KZ=2, KOSIKZ

GTA = (GT(KT-1, KZ) + GT(KT, KZ)) * 0.50D0

GTB = (GT(KT, KZ) + GT(KT+1, KZ)) * 0.50D0

GZE = GZ(KT, KZ)

FTA(KT, KZ) = GTA * HA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$FTB(KT, KZ) = GTB*HB$$

$$FZE(KT, KZ) = GZE*HE$$

2100 CONTINUE

2000 CONTINUE

C

$$GOSA2 = 77.77D0$$

$$NHAS = 0$$

$$IND2 = 0$$

$$DO 3000 KAISU=1, MAXKI$$

$$GOSA1 = GOSA2$$

$$BUNSHI = 0.0D0$$

$$BUNBO = 0.0D0$$

$$DO 3100 KZ=2, KOSIKZ$$

$$DO 3200 KT=2, KOSIKT$$

$$PM1 = PM(KT, KZ)$$

$$A = (FTA(KT, KZ) + FTB(KT, KZ)) / DTH / DTH$$

1 + FZE(KT, KZ) / 2.0D0 / RAM / RAM / DZ / DZ

$$B = (FTA(KT, KZ) * PM(KT-1, KZ) + FTB(KT, KZ) * PM(KT+1, KZ)) / DTH / DTH$$

1 + FZE(KT, KZ) * (PM(KT, KZ-1) + PM(KT, KZ+1)) / 4.0D0 / RAM / RAM / DZ / DZ

2 + 0.50D0 * (1.0D0 - 2.0D0 * PHID) * EPS * DSIN(VT(KT))

3 - EPSD * DCOS(VT(KT))

4 - 0.50D0 * RM * DSIN(2.0D0 * (VT(KT) + PHI))

$$PM(KT, KZ) = PM1 + OME * (B / A - PM1)$$

$$IF (PM(KT, KZ) .LT. 0.0D0) PM(KT, KZ) = 0.0D0$$

$$BUNSHI = BUNSHI + DABS(PM(KT, KZ) - PM1)$$

$$BUNBO = BUNBO + DABS(PM(KT, KZ))$$

3200 CONTINUE

3100 CONTINUE

$$PM(1, KZ) = (PM(2, KZ) + PM(KOSIKT, KZ)) / 2.0D0$$

$$GOSA2 = BUNSHI$$

$$IF (BUNBO .NE. 0.0D0) GOSA2 = GOSA2 / BUNBO$$

$$IF (GOSA2 .LE. HANI) GOTO 8888$$

$$IF (GOSA2 .GE. GOSA1) NHAS = NHAS + 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IF (NHAS.GE.MAXHS) GOTO 7777

3000 CONTINUE

KAISU = MAXKI

C*****

C IND2 =0 : CONVERGENCE; =1 : OVER; =2 : DIVERGENCE **

C*****

IND2 =1

GOTO 9999

C

7777 IND2 =2

GOTO 9999

8888 IND2 =0

DO 4000 KT=1,MAXKT

DO 4100 KZ=1,MAXKZ

FTAA(KZ)=PM(KT,KZ)

4100 CONTINUE

CALL DSIMP1(FTAA, 1, MAXKZ, DZ, XIG)

FTAA(KT)=XIG*DSIN(VT(KT))

FTBB(KT)=-XIG*DCOS(VT(KT))

4000 CONTINUE

CALL DSIMP1(FTAA, 1, MAXKT, DTH, XIG)

WPHI=XIG

CALL DSIMP1(FTBB, 1, MAXKT, DTH, XIG)

WEPS=XIG

9999 RETURN

END

C ** ** ** **

C SUBROUTINE KEISU **

C ** ** ** **

SUBROUTINE KEISU(GT,GZ,VH,HANI)

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

COMMON/KYOTU1/PI,VT(19),VZ(19)

1 ,RAM, RM, KOSIKT, KOSIKZ, MAXKT, MAXKZ, DTH, DZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
2      ,RE,AKSM,XINT,MAXKI,MAXHS
COMMON/KYOTU3/OME,LDIM,NDIM,IND1,IND2,IND3
DIMENSION VH(19),GT(19,19),GZ(19,19),CFM(19,19)
DO 5000 KZ=1,MAXKZ
DO 5010 KT=1,MAXKT
CFM(KT,KZ) = 0.0D0
```

5010 CONTINUE

5000 CONTINUE

C

```
DO 5020 KZ=1,MAXKZ
```

```
DO 5030 KT=1,MAXKT
```

C

```
IF (KT.NE.1) XXINT=CFM(KT-1,KZ)
```

```
IF (KT.EQ.1) XXINT=XINT
```

```
X2      =XXINT
```

```
GOSKE2 =77.77D0
```

```
IND3    =0
```

```
NHSKE   =0
```

```
DO 5040 KAIK=1,MAXKI
```

```
IF (X2.LE.0.0D0) X2=XINT
```

```
X1      =X2
```

```
GOSKE1 =GOSKE2
```

```
FXD     = -0.5D0/X1/DSQRT(X1)-(1.73D0*11.8D0*0.5D0/X1
```

```
1        /DSQRT(X1))/(AKSM*RE+11.8D0/DSQRT(X1))
```

```
IF (FXD.EQ.0.0D0) GOTO 5050
```

```
X2 = X1-((1.0D0/DSQRT(X1)-3.54D0+1.73D0*DLOG(AKSM/VH(KT)
```

```
1        + 11.8D0/RE/VH(KT)/DSQRT(X1))/FXD)
```

```
GOSKE2 =DABS(X2-X1)
```

```
IF (X2.NE.0.0D0) GOSKE2=GOSKE2/DABS(X2)
```

```
IF (GOSKE2.LE.HANI) GOTO 5070
```

```
IF (GOSKE2.GE.GOSKE1) NHSKE=NHSKE+1
```

```
IF (NHSKE.GE.MAXHS) GOTO 5060
```

5040 CONTINUE

```
KAIK =MAXKI  
IND3 =1  
GOTO 5080  
5050 IND3 =2  
GOTO 5080  
5060 IND3 =3  
GOTO 5080  
5070 INDE3=0  
5080 CONTINUE
```

C

```
IF (INDE3.NE.0) GOTO 5090  
CFM(KT,KZ)=X2  
GTT =1.0D0/(CFM(KT,KZ)*RE*VH(KT))  
GZT =2.0D0/(CFM(KT,KZ)*RE*VH(KT))  
GTL =1.0D0/12.0D0  
GZL =1.0D0/12.0D0  
GT(KT,KZ) =DMIN1(GTT,GTL)  
GZ(KT,KZ) =DMIN1(GZT,GZL)  
5030 CONTINUE  
5020 CONTINUE  
5090 CONTINUE  
RETURN  
END
```

C*****

** SUBROUTINE DSIMP1 **

C*****

SUBROUTINE DSIMP1(F,KS,KE,DELTA,SUM)

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

DIMENSION F(19)

DATA ZERO,VAL2,VAL3,VAL4,VAL5,VAL8,VAL12

1/0.0D0 ,2.0D0 ,3.0D0 ,4.0D0 , 5.0D0 , 8.0D0 , 12.0D0 /

KSM=KS

IF(KS.LE.0) KSM=1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
KS1=KSM+1
KS2=KSM+2
SUM=ZERO
JJ=KE-KSM
IF(JJ.LE.0) GOTO 90
IF(JJ.LE.1) GOTO 40
KEM=KE
IF((JJ/2)*2.NE.JJ) KEM=KE-1
KE1=KEM-1
KE2=KEM-2
S1=ZERO
S2=ZERO
DO 10 K=KS1,KE1,2
10 S1=S1+F(K)
IF(KS2.GT.KE2) GOTO 30
DO 20 K=KS2,KE2,2
20 S2=S2+F(K)
30 SUM=DELTA/VAL3*(F(KSM)+VAL4*S1+VAL2*S2+F(KEM))
IF(KEM.EQ.KE) GOTO 90
SUM=SUM+(-F(KE1)+VAL8*F(KEM)+VAL5*F(KE))*DELTA/VAL12
GOTO 90
40 SUM=DELTA/VAL2*(F(KSM)+F(KS))
90 RETURN
END
```

C*****END OF PROGRAM*****

COMMENT

NO = NUMBER OF COMPUTATION
KOSIKT = NUMBER OF DIVISION IN ^X DIRECTION
KOSIKZ = NUMBER OF DIVISION IN Z DIRECTION
RAM = L/D
EPS = ECCENTRICITY RATIO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- PHIS = ATTITUDE ANGLE UNDER STATIC CONDITION
RM = ELLIPTICITY RATIO
HANI = CONVERGING LIMIT
OME = OVER RELAXTION FACTOR
DEPS = SMALL VARIATION OF ECCENTRICITY RATIO
DPHI = SMALL VARIATION OF ATTITUDE ANGLE
DEPSD = SMALL VARIATION OF VELOCITY
DPHID = SMALL VARIATION OF VELOCITY
RE = RENOLD NUMBER
ASKM = ROUGHNESS FACTOR
XINT = INITIAL VALUE OF C_{fm}



ii

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากคอมพิวเตอร์

1. จากทฤษฎีของแบริงอย่างสั้น

////,**** READ DATA ****NO= 5

RE= 5000.000
, RM= .050
, FKM= .000000
, EPS= .400000
, PHIDEG= .0000

,**NUMBER OF ITERATIONS NUM= 9

, NDIV= 0
, ERROR2= .0083430
, IND= 0**

*****STATIC CHARACTERISTICS*****

RE= 5000.
, RM= .050
, EPS= .400000
, S= .105647300
, PHI (DEG)= 74.288880
IND= 0

ANGLE (θ)	PRESSURE (P)
.0000000	.0722637
7.5000000	.0992970
15.0000000	.2752267
22.5000000	.4578717
30.0000000	.6496010
37.5000000	.8526894
45.0000000	1.0691430
52.5000000	1.3004390
60.0000000	1.5471540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 67.5000000 งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าโดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

75.0000100	2.0813800
82.5000000	2.3601030
90.0000000	2.6349500
97.5000100	2.8916270
105.0000000	3.1107810
112.5000000	3.2683520
120.0000000	3.3371830
127.5000000	3.2902390
135.0000000	3.1053630
142.5000000	2.7708290
150.0000000	2.2902340
157.5000000	1.6848710
165.0000000	.9922242
172.5000000	.2604705
180.0000000	-.4595543
187.5000000	-1.1224870
195.0000000	-1.6943770
202.5000000	-2.1552680
210.0000000	-2.4985700
217.5000000	-2.7283130
225.0000000	-2.8555960
232.5000000	-2.8952470
240.0000000	-2.8632380
247.5000000	-2.7749810
255.0000000	-2.6443700
262.5000000	-2.4833650
270.0000000	-2.3019080
277.5000000	-2.1080130
285.0000000	-1.9079380
292.5000000	-1.7063850
300.0000000	-1.5067040
307.5000000	-1.3110880
315.0000000	-1.1207520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

322.5000000	-.9361033
330.0000000	-.7568815
337.5000000	-.5822865
345.0000000	-.4110859
352.5000000	-.2416975
360.0000000	-.0722629

(*)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากทฤษฎีของแบริงแบบความยาวจำกัด

/****** READ DATA *****/ NO. 66

KOSIKT = 18

KOSIKZ = 18

RAM = 1.000

RM = .200

EPS = .300000

PHIS = 60.000000

HANI = .1000D-02

OME = 1.500

RE = 5000.000

AKSM = .00600

XINT = .00010

DEPS = .100D-02

DPHI = .100D-02

DEPSD = .100D-02

DPHID = .100D-02

** KAISU = 8

NHAS = 0

GOSA2 = .5208333D-02

IND1 = 0

IND2 = 0 **

+DEPS

-DEPS

+DEPSD

-DEPSD

+DPHI

-DPHI

+DPHID

-DPHID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

, WEB=-.1102D+01
WEC= .2432D+01
, WED= .4694D-01
WEE=-.5489D+00
WPA= .0000D+00
, WPB= .0000D+00
WPC= .0000D+00
, WPD= .0000D+00
WPE= .0000D+00
A1=-.180516D+03
, A2= .816490D+02
A3= .529604D-02
, A4=-.278281D+02
A5= .541548D+02
/,** STABILITY LIMIT **
, BETA= .1010D-01
, WHIRL= .9951D+01
***** STATIC CHAR. *****
WS = .449961314D-01
SS = .707131499D+01
PHIDEG = 180.000000
IND1 = 0
IND2 = 0

** OIL FILM COEFFICIENT **

GGK=-.3338D+01
, GEK=-.2675D-01
, EGK=-.3508D+01
EEK=-.2449D+02
GGB= .5150D-01
, GEB= .6828D-01
EGB= .4073D+02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EEB= .5410D+02

	ANGLE (θ)	PRESSURE (P)	AT Z=MIDKT
/	.0000000	.0000000	
/	3.1818182	.0004216	
/	6.3636364	.0000000	
/	9.5454545	.0000000	
/	12.7272727	.0000000	
/	15.9090909	.0000000	
/	19.0909091	.0000000	
/	22.2727273	.0000000	
/	25.4545455	.0000000	
/	28.6363636	.0000000	
/	31.8181818	.0000000	
/	35.0000000	.0000000	
/	38.1818182	.0012263	
/	41.3636364	.0172574	
/	44.5454545	.0412230	
/	47.7272727	.0665111	
/	50.9090909	.0833122	
/	54.0909091	.0730524	
/	57.2727273	.0000000	

P(1,KZ)

/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000

P(2,KZ)

/,	P=	.00000000
/,	P=	.0002002
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.0032512
/,	P=	.0086274
/,	P=	.0144913
/,	P=	.0190401
/,	P=	.0183993
/,	P=	.00000000

P(3,KZ)

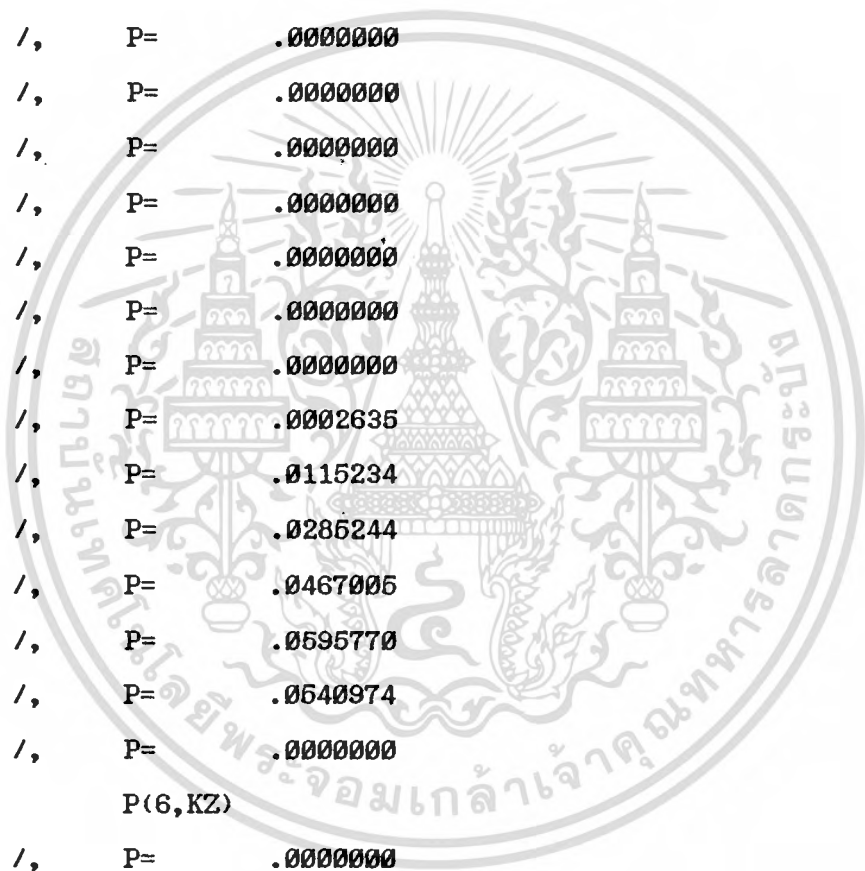
/,	P=	.00000000
/,	P=	.0003391
/,	P=	.00000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0063063
/,	P=	.0162687
/,	P=	.0270681
/,	P=	.0351528
/,	P=	.0331270
/,	P=	.0000000
/,	P(4,KZ)	.0000000
/,	P=	.0004299
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000458
/,	P=	.0090839
/,	P=	.0229051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส P=ไว้สำหรับ.0377713 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/,	P=	.0485898
/,	P=	.0448575
/,	P=	.0000000
	P(5, KZ)	
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0004816
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0002635
/,	P=	.0115234
/,	P=	.0285244
/,	P=	.0467005
/,	P=	.0595770
/,	P=	.0640974
/,	P=	.0000000
	P(6, KZ)	
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0005008
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0005491
/, P= .0135734
/, P= .0331189
/, P= .0539099
/, P= .0683085
/, P= .0612254
/, P= .0000000

P(7,KZ)

/, P= .0000000
/, P= .0004904
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0008270
/, P= .0151926
/, P= .0366842
/, P= .0594554
/, P= .0749439
/, P= .0665207
/, P= .0000000

P(8,KZ)

/, P= .0000000
/, P= .0004522

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.0010655
/,	P=	.0163544
/,	P=	.0392193
/,	P=	.0633831
/,	P=	.0796070
/,	P=	.0701834
/,	P=	.00000000
/,	P(9, KZ)	
/,	P=	.00000000
/,	P=	.0004358
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.00000000
/,	P=	.0011936
/,	P=	.0170467
/,	P=	.0407321

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/, P= .0657286
/, P= .0823804
/, P= .0723336
/, P= .0000000

P(10,KZ),

/, P= .0000000
/, P= .0004216
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0012263
/, P= .0172574
/, P= .0412230
/, P= .0665111
/, P= .0833122
/, P= .0730524
/, P= .0000000

P(11,KZ)

/, P= .0000000
/, P= .0004080
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000

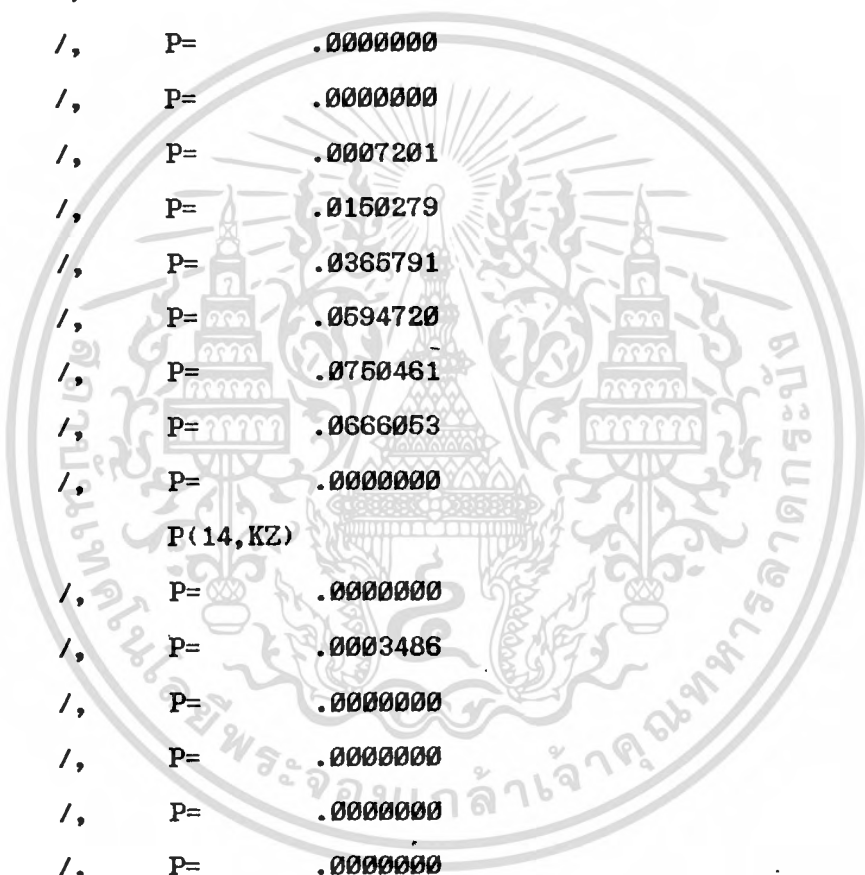
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบส่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0011498
/,	P=	.0169853
/,	P=	.0406937
/,	P=	.0657364
/,	P=	.0824186
/,	P=	.0723632
/,	P=	.0000000
P(12, KZ)		
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0003929
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0009732
/,	P=	.0162372
/,	P=	.0391454
/,	P=	.0633970
/,	P=	.0796809
/,	P=	.0702399
/,	P=	.0000000

P(13, KZ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/, P= .0003738
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0007201
/, P= .0150279
/, P= .0365791
/, P= .0594720
/, P= .0750461
/, P= .0666053
/, P= .0000000
/, P(14, KZ)
/, P= .0000000
/, P= .0003486
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0004334
/, P= .0133811



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/, P= .0329961
 /, P= .0539274
 /, P= .0684258
 /, P= .0613255
 /, P= .0000000

P(15,KZ)

/, P= .0000000
 /, P= .0003147
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0001669
 /, P= .0113280
 /, P= .0283985
 /, P= .0467177
 /, P= .0596964
 /, P= .0542009
 /, P= .0000000

P(16,KZ)

/, P= .0000000
 /, P= .0002686
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000
 /, P= .0000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 /, P= .0000000
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0089086
/,	P=	.0227904
/,	P=	.0377867
/,	P=	.0486986
/,	P=	.0449527
/,	P=	.0000000
	P(17,KZ)	
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0002055
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0000000
/,	P=	.0061713
/,	P=	.0161790
/,	P=	.0270701
/,	P=	.0362383
/,	P=	.0332023
/,	P=	.0000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
P(18,KZ)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/, P= .0000000
/, P= .0001189
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0031745
/, P= .0085760
/, P= .0144982
/, P= .0190894
/, P= .0184430
/, P= .0000000
/, P= .0000000

P(19,KZ)

/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000
/, P= .0000000

IND1= 0

, IND2 = 0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลงได้โดยสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากได้รับความเอื้อเฟื้อจาก ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่คอยแนะนำและให้ความรู้เกี่ยวกับโปรเจกต์ จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีคุณพ่อคุณแม่และเพื่อนที่คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. Eugene, A. Awallone, Theodore and Baumeister III,
"Marks's Standard Handbook for Mechanical
Engineer", McGraw-Hill, 1987.
2. Hashimoto, H., Wada, S. and Tsuda, H., "Performance
Characteristics of Elliptical Journal Bearings in
Turbulent Flow Regime" Bulletin of JSME, vol. 27,
No. 232, 1984, pp. 2265-2271.
3. Hashimoto, H. Wada, S. and Ito, J., "An Application
of Short Bearing Theory to Dynamic Characteristic
Problems of Turbulent Journal Bearings "Trans. ASME,
Journal of Tribology, Vol. 109, pp. 1-8.
4. Szeri, A.Z., "Tribology (Friction, Lubrication and
Wear)", McGraw-Hill, 1979.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้