

การออกแบบเจอนัลแบร์ริงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสารหล่อลื่นนอนนิวตโรเนียน

OPTIMUM DESIGN OF JOURNAL BEARINGS WITH
NON-NEWTONIAN LUBRICANTS



นาย จำลอง ปราบแก้ว
MR. CHAMLONG PRABKEAO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

ISBN 974 - 621 - 942 - 1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 28909
วัน, เดือน, ปี..... 1. 11. 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบเจอนัลแบริงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสาร
หล่อลื่นนอนนิวโทเนียน

นักศึกษา

นายจำลอง ปราบแก้ว

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พ.ศ.

2540

บทคัดย่อ

เรื่องจักรสมัยใหม่จะทำงานที่ความเร็วรอบและอุณหภูมิสูงมาก สารหล่อลื่นนิวโทเนียนที่
ใช้กับเครื่องจักรในปัจจุบันจึงจำเป็นต้องเติมสารเติมแต่งลงไปจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นนอน-นิวโท
เนียน ซึ่งจะทำการค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง วิทยา
นิพนธ์ฉบับนี้ได้เน้นถึงการออกแบบและศึกษาพฤติกรรมของเจอนัลแบริงเมื่อใช้สารหล่อลื่นนอน-
นิวโทเนียน โดยเริ่มจากเขียนสมการโมดิฟายด์เรโนลด์ แล้วแก้สมการหาค่าการกระจายความดัน
(P) และการกระจายอุณหภูมิ (ΔT) โดยวิธี Finite difference จากนั้นก็คำนวณหาอัตราการไหล (Q)
แล้วเอาค่าที่ได้ไปใช้ในโปรแกรมออฟติไมซ์ชันในที่นี้ได้ใช้วิธี Area Elimination แบบ Grid
Search เพื่อหาค่า Optimum Clearance (C) และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (λ) ที่
เหมาะสมที่สุดตาม Objective function และเงื่อนไขสมการบังคับที่กำหนดไว้ กล่าวคือให้อุณหภูมิ
ที่เพิ่มขึ้น และอัตราการไหลของสารหล่อลื่นมีค่าน้อยที่สุดแล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงคุณ
ลักษณะของเจอนัลแบริงเมื่อใช้สารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียน เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบใช้
งานต่อไป

Thesis Title Optimum Design of Journal Bearings with Non-Newtonian Lubricants.
Student Mr. Chamlong Prabkeao
Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr. Mongkol Mongkolwongroj
Level of study Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department Mechanical Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Year 1997

Abstract

Modern machinery is operated under severe condition at a very high speed and high temperature. An additive specially high molecular weight polymer mixed in lubricating oil will result as a Non-Newtonian lubricant which will improve viscosity index. This thesis emphasises on the behavior of journal bearings with Non-Newtonian lubricants starting from the analytical solution of modified Reynolds equation. Numerical calculation is performed by using Finite difference method to obtain pressure (P), flow rate (Q), and temperature distribution (T). These parameters are employed in an optimum program to find the optimum clearance (C) and the diameter-length ratio (λ) under the defined objective function and constraints where the flow rate and the change in temperature are minimized. An Area Elimination by Grid Search is the Optimum method used in this study. An optimum size of the bearing is obtained by a Grid Search method.

A set of optimized clearance and Diameter-length ratio with various loading capacities establishes characteristic diagrams which are useful for design.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากท่าน รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาชี้แนะถึงแนวทางและวิธีการแก้ปัญหาตลอดจนขั้นตอนต่างๆจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนขอถือโอกาสนี้ขอพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับโปรแกรมการคำนวณและขอแนะนำอื่นๆเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งได้รับการแนะนำจาก ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ อำนวย คณะรัฐ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ คุณ อุดม จันทร์จรัสสุข เจ้าหน้าที่วิจัย ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่คอยให้คำปรึกษาในการเขียนโปรแกรมการคำนวณ ผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้รับกำลังใจและสนับสนุนจาก คุณ วิมลรัตน์ ปราบแก้ว ภรรยา และ ต.ญ. จิรดา ปราบแก้ว บุตรสาว จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จำลอง ปราบแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
บทที่	
1. บทนำ	1
หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น	1
คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันหล่อลื่น	2
การผลิตและส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่น	4
น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน	4
สารเพิ่มคุณสมบัติ	6
ชนิดของการหล่อลื่น	7
ประเภทของสารหล่อลื่น	9
ลักษณะทางเรขาคณิตของเจอนัลแบริง	12
2. ไฮโดรไดนามิกเจอนัลแบริงที่หล่อลื่นด้วยสารนิวโทเนียน	13
สมการเรโนลด์ในทฤษฎีการหล่อลื่น	13
สมการแสดงคุณลักษณะต่างๆของแบริง	21
ผลจากการทำ Optimization กับเจอนัลแบริงเมื่อใช้สารหล่อลื่นนิวโทเนียน.....	25
3. การพัฒนาสมการโมดิฟายเรโนลด์สำหรับเจอนัลแบริงที่ใช้สารนอน-นิวโทเนียน	29
การคำนวณค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น โดยวิธี Analytical สำหรับเจอนัล แบริงแบบสั้น	31
การวิเคราะห์เจอนัลแบริงแบบสั้นด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม	38
การคำนวณหาอัตราการไหลของสารหล่อลื่น	44
สมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารหล่อลื่น	45
4. วิธีการทำออดิไมค์เซชัน	56
รูปแบบมาตรฐานของการทำออดิไมค์เซชัน	56

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การออกพதிไมค์เซชั่นด้วยวิธีการกำจัดพื้นที่	57
โปรแกรมและการทดสอบโปรแกรม	59
5. การออกแบบเจอนัลเบริ่งที่สภาวะดีที่สุดเมื่อใช้สารลื่นอนนิวโทเนียน	60
ฟังก์ชันวัตถุประสงคค์	60
สมการบังคับ	61
การทำออกพติไมค์เซชั่น เจอร์นัลเบริ่ง	61
6. สรุปและวิจารณ์	67
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	70
ประวัติผู้เขียน	91

สารบัญภาพ

	หน้า
1. แสดงการเปรียบเทียบความหนืดของมาตรฐานต่างๆ.....	3
2. แสดงชนิดของการหล่อลื่น.....	8
3. แสดงการเปลี่ยนรูปของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนเมื่อถูกแรงเฉือน F กระทำ.....	9
4. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน(τ) และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง dv/dy ของสารหล่อลื่นนิวโทเนียน.....	10
5. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน(τ) และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ.....	11
6. ลักษณะทางเรขาคณิตของเจอร์นัลแบร์ริง.....	12
7. แสดงการไหลของฟิล์มสารหล่อลื่นระหว่างแผ่นระนาบ.....	14
8. แสดงการสมดุลย์ของปริมาตรควบคุม.....	14
9. แสดงค่า Optimum Clearance.....	25
10. แสดงค่าความดันสูงสุดใน Optimum bearing.....	25
11. แสดงค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นใน Optimum bearing.....	26
12. แสดงค่า Optimum Length/Diameter ratio.....	26
13. แสดงค่าอัตราการไหลใน Optimum bearing.....	27
14. แสดงค่าความหนืดเฉลี่ยใน Optimum bearing.....	27
15. แสดงค่า Optimum Clearance เมื่อการไหลของสารหล่อเป็นแบบ Turbulent.....	28
16. แสดงค่า Optimum Length/Diameter ratio เมื่อการไหลของสารหล่อลื่นเป็นแบบ Turbulent.....	28
17. แสดงค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นใน Optimum bearing เมื่อการไหลของสารหล่อเป็นแบบ Turbulent.....	28
18. แสดงค่าความดันสูงสุดใน Optimum bearing เมื่อการไหลของสารหล่อลื่นเป็นแบบ Turbulent.....	28
19. กราฟแสดงคุณลักษณะการไหลของสารหล่อลื่น นอน-นิวโทเนียน เมื่อเติมสารเติมแต่ง Polyisobutylene 2%.....	29
20. ลักษณะทางเรขาคณิตของ Sliding bearing.....	30

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

21. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า θ , Z และ P เมื่อค่า $\delta = 0.2$ และค่า $\epsilon = 0.4$	36
22. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า θ , Z และ P เมื่อค่า $\delta = 0.4$ และค่า $\epsilon = 0.4$	36
23. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า θ , Z และ P เมื่อค่า $\delta = 0.2$ และค่า $\epsilon = 0.8$	37
24. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า θ , Z และ P เมื่อค่า $\delta = 0.4$ และค่า $\epsilon = 0.8$	37
25. รูปแบบของผลต่างจำกัดสำหรับเจอนัลแบริง โดยการคลี่แผ่นฟิล์มน้ำมัน	39
26. แสดง Flow chart การคำนวณการกระจายความดันใน Journal bearing	42
27. แสดงการกระจายความดันของสารหล่อลื่นในเจอรันัลแบริงเมื่อค่า $\epsilon = 0.5$	43
28. แสดงการกระจายความดันของสารหล่อลื่นในเจอรันัลแบริงเมื่อค่า $\epsilon = 0.7$	43
29. แสดงทิศทางการไหลของสารหล่อลื่นในแนวแกน Z	44
30. แสดงการส่งผ่านพลังงานผ่านผิวปริมาตรควบคุม	45
31. แสดงการส่งผ่านพลังงานกลผ่านผิวปริมาตรควบคุม	46
32. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของสารหล่อลื่น	48
33. แสดงการนำความร้อนที่ขอบเขตผิวสัมผัสระหว่างใบเบียง	49
34. แสดงรูปแบบการคำนวณการกระจายอุณหภูมิด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง	51
35. แสดง Flow chart การคำนวณการกระจายอุณหภูมิของสารหล่อลื่น	54
36. แสดงการกระจายอุณหภูมิของสารหล่อลื่น เมื่อค่า $\epsilon = 0.5$	55
37. แสดงการกระจายอุณหภูมิของสารหล่อลื่น เมื่อค่า $\epsilon = 0.7$	55
38. แสดงวิธีการออฟติไมซ์ชันโดยการกำจัดพื้นที่	57
39. แสดง Flow chart แสดงการทำ Optimization สมการ Paraboloid แบบ Grid Search	58
40. การทดสอบโปรแกรม Minimize $F(x,y) = x^2 + y^2$	59
41. แสดง Flow chart แสดงการทำ Optimization เจอรันัลแบริงแบบ Grid Search	62
42. แสดง Flow chart sub program	63
43. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Radial clearance(C) กับ Journal Speed ที่ค่าภาระต่างๆ	64
44. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Slenderness ratio(L/D)	64
45. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Temperature rise(DT)	65
46. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Oilflow rate(Q)	65
47. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Objective function กับ Journal Speed ที่ภาระต่างๆ	66

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่ขัดสีกันอยู่เสมอทำให้เกิดแรงเสียดทาน และเกิดความร้อนจึงจำเป็นต้องมีการหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนที่ไร้ร่องรับเพลาจ้ำพวก แบริ่งชนิดต่าง ๆ เช่น แบริ่งปลอก (Journal bearing) แบริ่งลูกกลิ้ง (Rolling bearing) ตลอดจนชิ้นส่วนจ้ำพวกเฟือง และส่วนสัมผัสอื่น ๆ จะต้องมีฟิล์มน้ำมันช่วยในการหล่อลื่นเพื่อลดการสึกหรอ และอุณหภูมิการใช้งานของเครื่องจักร เครื่องจักรจึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

เครื่องจักรสมัยใหม่ จะทำงานที่สภาวะความเร็วรอบสูง อุณหภูมิของเครื่องจักรก็จะสูงตามไปด้วย การหล่อลื่นแบบเดิมจะใช้สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติเป็นของไหลนิวโทเนียน ซึ่งเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงจะทำให้ค่าความหนืดลดลงต่ำกว่ากำหนดระยะห่างระหว่างเพลากับแบริ่ง (Clearance) ไม่เหมาะสมจะทำให้แบริ่งรับภาระได้น้อยลง และอาจเกิดความไม่เสถียรของระบบเพลาก็ได้ การหล่อลื่นที่ดีจะต้องกำหนดค่า Clearance (C) และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแบริ่ง (λ) ที่เหมาะสมที่สุด โดยให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของสารหล่อลื่นมีค่าน้อยที่สุด สารหล่อลื่นนิวโทเนียนเมื่อผสมด้วยสารเติมแต่ง (Additives) จะทำให้มีคุณสมบัติเป็น นอน-นิวโทเนียน (Non-Newtonian) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ให้มากที่สุด เพื่อให้เครื่องจักรมีสมรรถนะในการทำงานสูงสุด สารหล่อลื่น นอน-นิวโทเนียน ได้จากการเพิ่มสารเติมแต่งชนิด High molecular weight เช่น Polyisobutylene, Methacrylate, และ Acrylatecopolymer ลงในสารหล่อลื่นนิวโทเนียน ซึ่งจะทำได้ค่าความหนืดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการหาค่าระยะห่างระหว่างเพลากับแบริ่ง (Clearance) และค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแบริ่ง (λ) ที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีการ Optimization เมื่อใช้สารหล่อลื่น นอน-นิวโทเนียน

หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่นำไปหล่อลื่นเครื่องยนต์ เครื่องจักรกลต่างๆมีหน้าที่และประโยชน์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. **ให้การหล่อลื่น** คุณภาพของการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่นนั้นขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมัน ทั้งนี้ ฟิล์มน้ำมันจะทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะ หรือวัสดุไม่ให้เสียดสีกันโดยตรง น้ำมันที่ดีต้องรักษาฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นให้สม่ำเสมอ หรือคงที่ทุกๆ อุณหภูมิทำงาน เพื่อลดแรงเสียดทานและการสึกหรอ ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรยาวนานขึ้น

2. **ระบายความร้อน** เมื่อเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรทำงานจะเกิดความร้อนขึ้น ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันหล่อลื่นจะเป็นตัวระบายความร้อนออกมา ทำให้อุณหภูมิของการทำงานลดลง จึงรักษาอุปกรณ์และชิ้นส่วนของเครื่องจักรและเครื่องยนต์

3. **รักษาความสะอาด** โดยทั่วไปในเครื่องยนต์จะเกิดการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้เกิดเขม่าและคราบสกปรกภายใน น้ำมันหล่อลื่นจะสามารถชะล้างเขม่า ขจัดคราบสกปรกออกจากผิวโลหะ และกระจายเขม่า สิ่งสกปรกไม่ให้รวมตัวเป็นก้อนทำให้ไส้กรองอุดตัน ดังนั้น เมื่อเปลี่ยนถ่ายน้ำมัน จะสังเกตว่าน้ำมันหล่อลื่นมีสีดำ แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นได้ทำหน้าที่ชะล้างสิ่งสกปรก เพื่อรักษาความสะอาดของเครื่องยนต์แล้ว

4. **ป้องกันสนิมและการกัดกร่อน** ไอน้ำและก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เมื่อรวมตัวกันจะกลายเป็นกรด ซึ่งจะกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ และทำให้เกิดสนิมได้ น้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เหมือนเกราะป้องกันการกัดกร่อนและสนิมได้ โดยทำลายกรดและเคลือบผิวของโลหะนั้นไว้

5. **ป้องกันกำลังอัดรั่วไหล** โดยเฉพาะเครื่องยนต์ เมื่อเครื่องยนต์เกิดการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบจะเกิดแรงดันขึ้น น้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่อุดช่องว่างระหว่างแหวนและกระบอกสูบไม่ให้ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้รั่วไหล ทำให้ช่วยรักษากำลังของเครื่องยนต์

คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันหล่อลื่น

คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นมีดังนี้ คือ

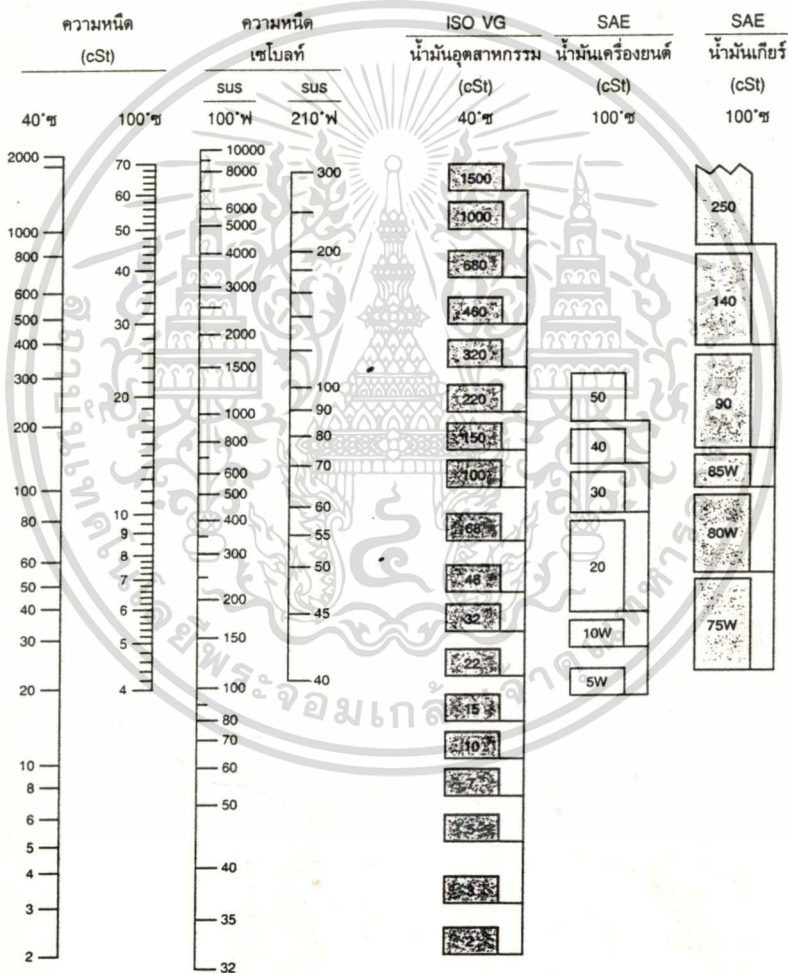
1. ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด คือ ความต้านทานการไหลของน้ำมัน ความหนืดหรือความข้นใส เป็นคุณสมบัติของน้ำมัน มีการแปรผันกลับกับอุณหภูมิของน้ำมัน ถ้าอุณหภูมิของน้ำมันต่ำลงน้ำมันจะข้นขึ้น หรือมีความหนืดสูงขึ้น มีฟิล์มน้ำมันที่หนาขึ้น ถ้าน้ำมันมีอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำมันจะใสขึ้น หรือมีความหนืดลดลง มีฟิล์มน้ำมันที่บางลง หน่วยการวัดความหนืดมีหลายระบบ ดังแสดงในภาพที่ 1

2.ดัชนีความหนืด (Viscosity Index,VI)

ดัชนีความหนืด คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน น้ำมันที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันหล่อลื่นเพราะว่าน้ำมันที่ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำต้องมีความหนืดที่ต่ำ คือ ไม่ข้นเกินไป เพื่อให้เกิดการหล่อลื่นได้และมีอุณหภูมิสูงก็ต้องข้นเพียงพอที่ฟิล์มน้ำมันจะยังคงหล่อลื่นได้

ภาพที่ 1



หน่วยความหนืด
 cSt = เซนติสโตก
 SUS = เซโบลท์ยูนิเวอร์แซล-วินาที

ภาพแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของมาตรฐานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.การรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation)

น้ำมันปิโตรเลียมโดยธรรมชาติ จะเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิสูง ๆ เกิดเป็นสารประเภทยางเหนียวหรือโคลน หรือแล็กเกอร์ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศได้ยากหรือได้ช้า เพื่อไม่ให้น้ำมันเป็นโคลนน้ำมันเสื่อมคุณภาพง่าย หรือเป็นยางเหนียวไปเกาะตามชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์

4.จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอแล้วเกิดการลุกวาบขึ้น เมื่อถูกเปลวไฟ ไขว้ช่วงอุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันที่สามารถทำงานได้ก่อนที่จะเป็นอันตราย ซึ่งถ้าน้ำมันมีจุดวาบไฟที่สูง น้ำมันหล่อลื่นนั้นก็จะเป็นน้ำมันมีความปลอดภัยในการทำงานมากขึ้น

5.จุดไหลเท (Pour Point)

จุดไหลเท คือ อุณหภูมิที่ต่ำสุดที่น้ำมันยังสามารถไหลได้ก่อนที่ไข (WAX) ที่มีอยู่ในน้ำมันจะเกิดการแข็งตัว (Crystallize) ทำให้น้ำมันไหลได้ยาก ในที่มีอากาศหนาวหรือเย็นจะต้องพิจารณาเลือกใช้น้ำมันที่มีจะไหลต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งาน เพื่อป้องกันการแข็งตัวของน้ำมัน

การผลิตและส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันปิโตรเลียม เมื่อนำมากลั่นภายใต้กระบวนการต่าง ๆ จะได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่นำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ, น้ำมันหล่อลื่น, ก๊าซ เป็นต้น อีกทั้งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมีสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปคุณภาพดีและเหมาะสมสำหรับการใช้งาน จะแบ่งขั้นตอนการผลิต ดังนี้คือ

1. การผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน
2. การผสมน้ำมันพื้นฐานและสารเพิ่มคุณภาพเข้าด้วยกันเพื่อให้คุณภาพเหมาะสมสำหรับงานแต่ละชนิด

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil)

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral Base Oil) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจะผ่านการกลั่นจากหอกลั่นน้ำมันดิบ แล้วกลั่นต่อในหอกลั่นสูญญากาศ หลังจากนั้นจึงผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ แยกส่วนที่ไม่ต้องการออกดังนี้คือ

1.1 หอกลับบรรยากาศ ที่ใช้กลั่นน้ำมันดิบ จะกลั่นแยกน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ออกไป เหลือส่วนที่ข้นและหนัก ไปผ่านหอกลับสูญญากาศ เพื่อกลั่นแยกเป็นน้ำมันหล่อลื่น

1.2 การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่น โดยให้ตัวทำละลายกำจัด สารจำพวกอโรมาติก เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นมีสีใส ดัชนีความหนืดดีขึ้นและไม่รวมตัวออกซิเจนได้ง่าย

1.3 ไฮโดรทรีตติ้ง หรือไฮโดรแครกกิง เป็นกระบวนการที่นำไฮโดรเจนเข้ามาเปลี่ยนแปลง โครงสร้างโมเลกุล เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นมีความคงทนในการใช้งาน และขจัดสิ่งไม่พึงประสงค์ ออกไป

1.4 การแยกไขออก คือแยกส่วนที่เป็นไขโดยใช้ตัวทำละลาย เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นยังคง ใช้ได้ในงานที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่น ในเครื่องทำความเย็น หรือใช้ในบริเวณที่มีอากาศหนาวเย็น เป็นต้น

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปิโตรเลียมนี้จะแตกต่างกันสำหรับ แหล่งที่มาและชนิดของน้ำมันดิบและอาจรวมไปถึงการนำไปใช้งานด้วย

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์ จะเป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมีที่ซับซ้อน และยุ่งยากหลายขั้นตอน เพื่อให้ ได้โครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ โดยปกติราคาแพง เหมาะสำหรับงานพิเศษ เช่น ในเครื่อง ยนต์รถแข่งที่ต้องการน้ำมันสมรรถนะสูง เป็นต้น น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์ที่มีอยู่หลาย ชนิด เช่น

2.1 โพลีแอลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolefin หรือ PAO) มีคุณสมบัติพิเศษ คือ ดัชนี ความหนืดสูงการระเหยต่ำป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ดี มักจะนำมาผลิตน้ำมันหล่อลื่นยานยนต์

2.2 เอสเทอร์ (Ester) มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดีคงทนต่อความร้อนสูงมีจุดไหลเทต่ำ มีอยู่หลายชนิด เช่น Dabasic Acid Ester, Polyol Ester, Phosphate Ester เป็นต้น สามารถนำ มาผลิตน้ำมันหล่อลื่นได้หลายชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่นระบบเทอร์โบไบน์เครื่องบินไอพ่น น้ำมัน ไฮโดรลิกกันไฟ เป็นต้น ทั้งนี้แล้วแต่ความเหมาะสมของการใช้งานของ Ester แต่ละชนิด

2.3 ไกลคอล (Glycol) ดัชนีความหนืดสูง คงทนต่อความร้อนสูง เหมาะสำหรับงานที่มี อุณหภูมิสูง เช่น ใช้เป็นน้ำมันไฮโดรลิกกันไฟ หรือในระบบเบรครถยนต์

2.4 ซิลิโคน (Silicone) ทนความร้อนสูง มีความคงทนสูง ราคาแพงมาก สามารถจะนำ ไปใช้งานได้หลายชนิด เช่น น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

สารเพิ่มคุณสมบัติ (Additives)

ปัจจุบันเครื่องยนต์และเครื่องจักรที่ทันสมัยได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น น้ำมันหล่อลื่นจึงมีความจำเป็นต้องมีคุณภาพและประสิทธิภาพที่สูงตามไปด้วย ถ้าใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพียงอย่างเดียวคงไม่เพียงพอ จึงต้องเติมสารเคมีหรือสารเพิ่มคุณภาพเข้าไป เพื่อให้คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นดียิ่งขึ้น และเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการ สารเพิ่มคุณภาพมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ดังนี้คือ

ชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ

หน้าที่ของสารเพิ่มคุณภาพ

- | | |
|---|--|
| 1. สารชะล้างเขม่า (Detergent) | ทำความสะอาดภายในเครื่องยนต์ โดยการชะล้างสิ่งสกปรกคราบตะกอน เขม่าต่างๆออกจากชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ |
| 2. สารละลาย - ย่อยเขม่า (Dispersant) | ย่อยหรือสลายสิ่งสกปรก คราบตะกอน เขม่าให้เป็นชิ้นส่วนเล็กๆละลายผสมอยู่กับน้ำมันเครื่องอุดตัน ทั้งยังป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกเหล่านี้ตกตะกอนเพื่อรอการถ่ายทิ้ง |
| 3. สารป้องกันการสึกกร่อน (Anti-Corrosion) | ป้องกันการกัดกร่อนของคาก่ามะถัน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของคาก่ามะถันที่มีผสมอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเฉพาะในเครื่องยนต์ดีเซล |
| 4. การป้องกันเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (Anti-Oxidants) | ป้องกันไม่ให้น้ำมันเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เป็นยางเหนียวหรือเป็นโคลนเมื่อเครื่องยนต์ร้อนจัด |
| 5. สารป้องกันการสึกหรอ (Anti-wear Agents) | เพื่อลดการสึกหรอของชิ้นส่วน และไม่ทำให้โลหะหลอมละลายติดกัน เมื่อชิ้นส่วนขาดการหล่อลื่นชั่วขณะ |
| 6. สารรับความกดดัน (Extreme Pressure) | ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์ม ทำให้เพิ่มความสามารถในการรับภาระได้มาก |
| 7. สารป้องกันการเกิดสนิม (Rust Inhibitor) | ป้องกันการเกิดสนิมกับชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ทำงานด้วยเหล็ก ขณะที่เครื่องจักรไม่ได้ทำงาน หรือรอการใช้งาน |
| 8. สารป้องกันการเกิดฟอง(Foam Inhibitor) | ป้องกันไม่ให้น้ำมันเกิดฟองในขณะใช้งาน |

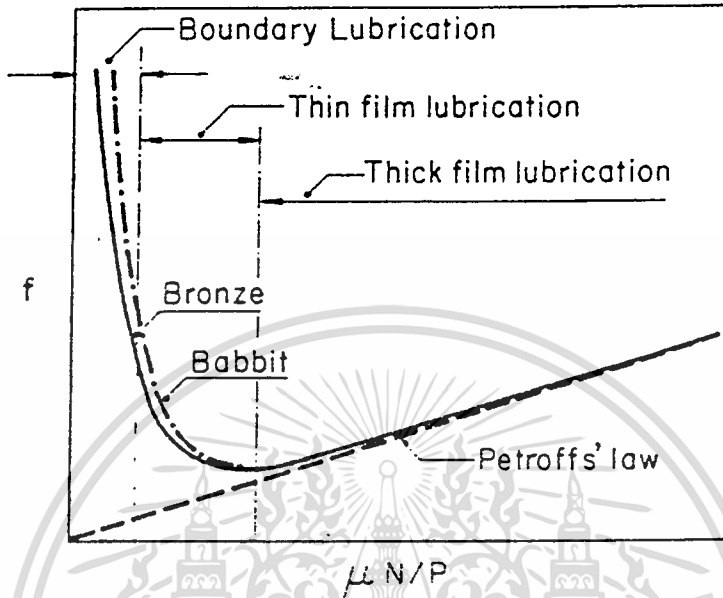
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. สารเพิ่มดัชนีความหนืด(Viscosity Index) รักษาความหนืดให้คงที่เสมอถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลง
10. สารทำให้น้ำรวมตัวกับน้ำมัน (Emulsifier) เป็นสารที่ทำให้น้ำรวมตัวกับน้ำมันเพื่อให้สามารถหล่อลื่นได้ เช่นสารที่ใส่ผสมน้ำมันหล่อเย็นในงานกลึงโลหะ
11. สารลดจุดไหลเทของน้ำมัน (Pour Point Depressant) เป็นตัวทำหน้าที่ให้น้ำมันมีจุดไหลเทต่ำกว่าเดิม สามารถใช้หล่อลื่นในที่อุณหภูมิต่ำได้ โดยไม่ทำให้น้ำมันแข็งตัว
12. สารลดความเสียดทาน (Friction Modifier) ใช้ลดแรงเสียดทาน โดยยึดเกาะที่ผิวสัมผัสของโลหะ
13. สารช่วยให้ยึดเกาะติดดี (Tackiness Agent) เพิ่มคุณสมบัติการเกาะติดผิวของน้ำมันและจารบี
- เมื่อเลือกสรรน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ดี ไม่ว่าจะเป็น้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันสังเคราะห์ พร้อมทั้งเลือกสารเพิ่มคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน นำมาผสมกันตามขั้นตอนที่ถูกต้องให้ได้ความหนืดที่ต้องการ

ชนิดของกรหล่อลื่น (Type of lubrication)

การหล่อลื่นสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ การหล่อลื่นแบบเบาดารี การหล่อลื่นแบบแผ่นฟิล์มบาง การหล่อลื่นแบบแผ่นฟิล์มหนา สำหรับการหล่อลื่นของเจอนัลเบร็งอาจอธิบายความแตกต่างของการหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด ได้ด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) และค่าความหนืดของสารหล่อลื่น (μ) คูณด้วยความเร็วรอบของเพลาน (N) แล้วหารด้วยค่าภาระที่เบร็งรองรับต่อพื้นที่ภาพฉาย (P) หรือค่า $\mu N/P$ ดังแสดงในภาพที่ 2

ภาพที่ 2



ภาพแสดงชนิดของการหล่อลื่น

จากภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า $\mu N/P$ สูง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) จะต่ำ และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า $\mu N/P$ เรียกว่า การหล่อลื่นแบบแผ่นฟิล์มหนา ซึ่งเป็นการหล่อลื่นที่มีสารหล่อลื่นคั่นอยู่ระหว่างผิวของเพลลาและแบร็ง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารหล่อลื่น ไม่ขึ้นอยู่กับคุณภาพของผิวเพลลาและแบร็ง

เมื่อค่า $\mu N/P$ ลดลง จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) จะลดลงจนมีค่าต่ำสุด เรียกว่าการหล่อลื่นแบบแผ่นฟิล์มบาง โดยมีสารหล่อลื่นเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ คั่นอยู่ระหว่างผิวของเพลลา กับแบร็ง ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของผิวของเพลลา กับแบร็ง และคุณสมบัติของสารหล่อลื่น

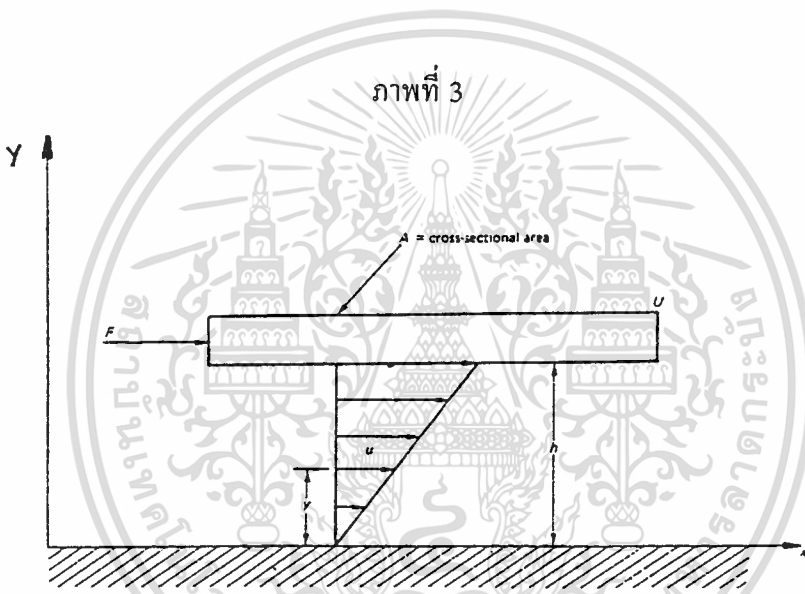
ถ้าหากลดค่า $\mu N/P$ ให้ต่ำลงไปอีก ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และยังพบว่าสารหล่อลื่นบางส่วนถูกทำลายไป การหล่อลื่นแบบนี้เรียกว่า การหล่อลื่นแบบเบาดารี

ประเภทของสารหล่อลื่น (Type of lubricant)

โดยปกติของเหลวที่สามารถนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นแบ่งตามลักษณะคุณสมบัติ มีอยู่ 2 ประเภท คือ

1. สารหล่อลื่นนิวโทเนียน (Newtonian lubricant)

สามารถอธิบายถึงคุณสมบัติของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนได้ดังภาพที่ 3 นั่นคือ ถ้าสารหล่อลื่นนิวโทเนียนอยู่ระหว่างแผ่นราบทั้งสอง เมื่อมีแรง F มากระทำกับแผ่นราบด้านบนซึ่งมีพื้นที่สัมผัสสารหล่อลื่น A เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U



ภาพแสดงการเปลี่ยนรูปของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนเมื่อถูกแรงเฉือน F กระทำ

จากรูป แรงเฉือน F จะแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ A และความเร็ว U และแปรผกผันกับระยะ y สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$F = \mu \frac{AU}{y}$$

โดยที่ μ คือแฟกเตอร์ของสัดส่วน หรือเรียกว่าความหนืดเชิงพลวัต (dynamic viscosity) ดังนั้น ความเค้นหาได้จากสมการ

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A} = \frac{\mu U}{y}$$

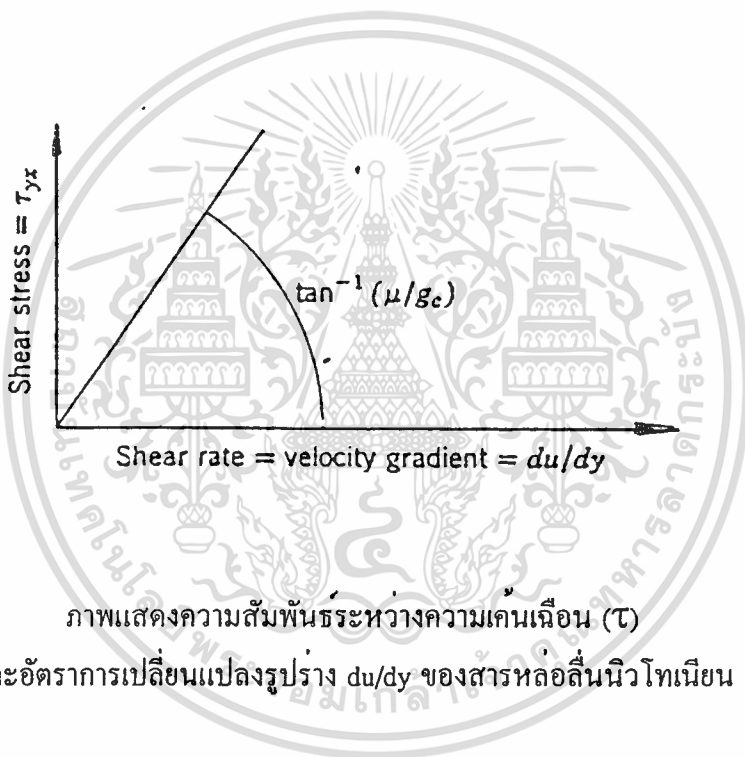
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน U/y คือความเร็วเชิงมุมของเส้นตรง MN หรือ อัตราการเปลี่ยนรูปร่างเชิงมุมของสารหล่อลื่นนิวโทเนียน สามารถเขียนในเทอม $\frac{du}{dy}$ แทน $\frac{U}{y}$ ได้

ดังนั้น ความเค้นเฉือน $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ หากนำค่าความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับอัตรา

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนจะได้ดังภาพที่ 4

ภาพที่ 4



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ)

และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง du/dy ของสารหล่อลื่นนิวโทเนียน

2. สารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียน (Non-Newtonian lubricant)

ได้มีความพยายามศึกษาพัฒนานำสารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียนมาใช้เพื่อแก้ปัญหาของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนที่เมื่ออุณหภูมิของเครื่องจักรสูงขึ้น ค่าความหนืดจะลดลง การพัฒนาสารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียน อาจทำได้โดยการใส่สารเติมแต่งชนิด high molecular weight เช่น Polyisobutylene, Acrylatecopolymer เติมลงไปนในสารหล่อลื่นนิวโทเนียน จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารหล่อลื่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราการเปลี่ยนรูปร่างของสารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียนเป็นไปดังสมการ

$$\tau_{yx} = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

เมื่อ K = consistency index

n = flow behavior index

หากค่า $K = \mu$ และ $n = 1$ จะมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นนิวโทเนียน

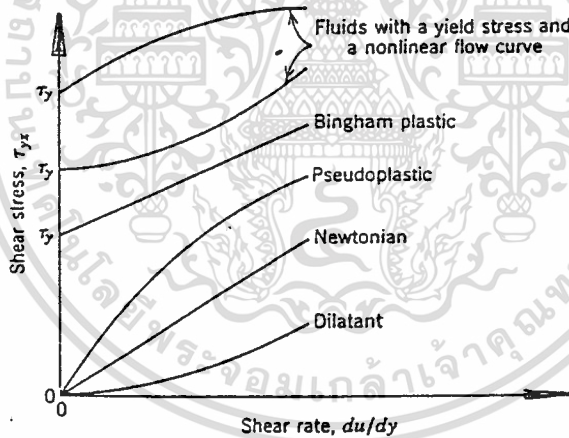
ถ้าค่า $n < 1$ (ค่าความชันน้อยกว่า 1) เรียกว่า Pseudoplastic

ถ้าค่า $n > 1$ (ค่าความชันมากกว่า 1) เรียกว่า Dilatant

สำหรับสารหล่อลื่นที่ค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้นที่จุดคลาก (yield point) เรียกว่า Bingham plastic นั่นคือ

$$\tau_{yx} = \tau_y + \mu_p \frac{du}{dy}$$

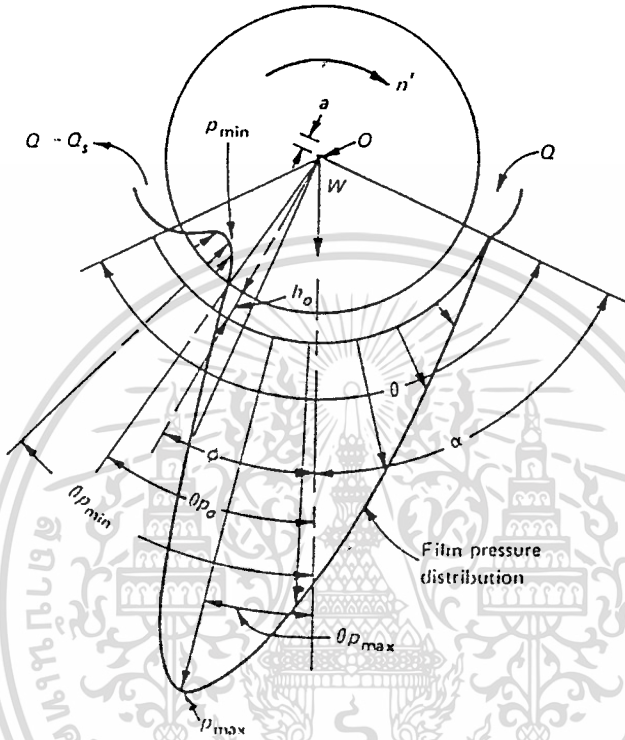
ภาพที่ 5



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และอัตราการเปลี่ยนรูปร่างของสารหล่อลื่นชนิดต่าง ๆ

ลักษณะทางเรขาคณิตของเจอร์นัลแบร์ริง (Journal bearing geometre)

ภาพที่ 6



ภาพแสดงลักษณะทางเรขาคณิตของเจอร์นัลแบร์ริง

เจอร์นัลแบร์ริง (Journal bearing) เป็นแบร์ริงซึ่งมีลักษณะเป็นปลอกหุ้มเพลลาไว้ ระหว่างผิวสัมผัสของเพลลา กับแบร์ริงจะเป็นสารหล่อลื่น โดยฟิล์มสารหล่อลื่นจะยกเพลลาให้ลอยพ้นจากแบร์ริง เพื่อป้องกันการเสียดสีระหว่างเพลลา กับแบร์ริง ในขณะที่เพลลาหมุน แบร์ริงจะเป็นตัวรับภาระในแนวรัศมี (Radial Load) ภาพที่ 6 แสดงรูปร่างลักษณะของเจอร์นัลแบร์ริง 360 องศา เพลลาหมุนด้วยอัตราความเร็วเชิงมุม ω และรับภาระ W เมื่อเพลลาเริ่มหมุนในตอนแรกจะเกิดการเสียดสีของโลหะระหว่างเพลลา กับแบร์ริงตรงจุดที่รับภาระ หลังจากที่เพลลาหมุนไปได้เล็กน้อย สารหล่อลื่นสามารถไหลได้ทั่วถึงก็จะยกเพลลาให้ลอยจากแบร์ริงเป็นระยะความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น เมื่อเพลลาหมุนเร็วขึ้นจนกระทั่งความเร็วคงที่ ฟิล์มน้ำมันจะถูกรีดจนบางที่สุด เรียกว่า ความหนาของฟิล์มน้ำมันน้อยสุด

บทที่ 2

ไฮโดรไดนามิกเจอนัลแบร์ริงที่หล่อลื่นด้วยสารนิวโทเนียน

(Hydrodynamic Journal bearing with newtonian lubricant)

การหล่อลื่นไฮโดรไดนามิกเจอนัลแบร์ริง เป็นการหล่อลื่นเพลลาที่หมุนอยู่ในแบร์ริง โดยมีฟิล์มสารหล่อลื่นคั่นอยู่ระหว่างเพลลา กับแบร์ริง การวิเคราะห์พฤติกรรมของสารหล่อลื่น เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบเจอนัลแบร์ริง การวิเคราะห์เจอนัลแบร์ริง จะแยกพิจารณาเป็นกรณีดังนี้คือ กรณีที่เจอนัลแบร์ริงมีความยาวไม่จำกัด กรณีนี้ใช้ต่อเมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 จะพิจารณาการไหลของสารหล่อลื่นในเส้นรอบวงเพียงมิติเดียวเท่านั้น ความดันของฟิล์มน้ำมันก็จะเปลี่ยนแปลงตามแนวเส้นรอบวงเช่นกัน โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลในแนวแกนของแบร์ริง สำหรับกรณีที่อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 จะพิจารณาการไหลของสารหล่อลื่นในแนวแกนเท่านั้น และแรงดันของสารหล่อลื่นก็จะคิดตามแนวแกนเช่นกัน สำหรับกรณีที่เจอนัลแบร์ริงที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) อยู่ระหว่าง 0.25-4 ถือว่าเป็นเจอนัลแบร์ริงที่มีความยาวจำกัด การวิเคราะห์พฤติกรรมจะใช้สมการเรโนลด์สองมิติ

สมการเรโนลด์ในทฤษฎีการหล่อลื่น (Reynolds equation in Lubrication theory)

สมการพื้นฐานที่แสดงพฤติกรรมของสารหล่อลื่น คือสมการเรโนลด์ (Reynolds equation)

ซึ่ง Mr. O. Reynolds ได้วิเคราะห์รูปแบบทางคณิตศาสตร์ ภายใต้ข้อสมมุติฐานดังนี้

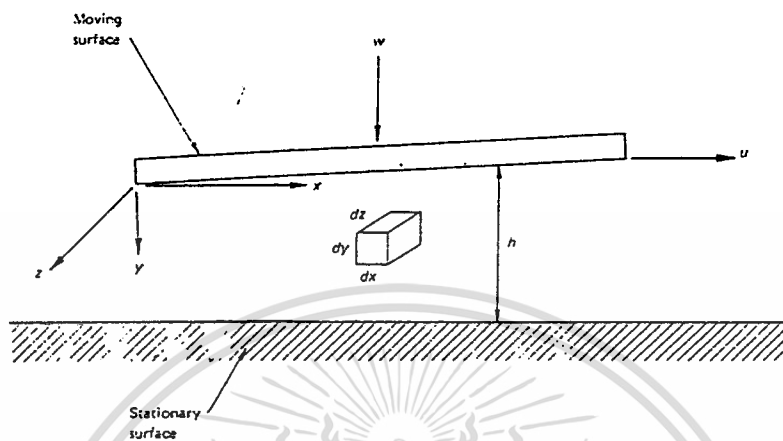
1. สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นนิวโทเนียน(Newtonian lubricant)
2. การไหลของสารหล่อลื่นเป็นแบบลามิน่า(Laminar flow)
3. สารหล่อลื่นไม่สามารถอัดตัวได้(Incompressible fluid)
4. ฟิล์มน้ำมันบางมาก ดังนั้นจะไม่มี Pressure Variation ตามแนวแกน y
5. ไม่มีการลื่นไถลของสารหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส
6. ความหนืดของสารหล่อลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ
7. ไม่คิดว่า Fluid Inertia
8. ความโค้งของผิวสัมผัสมีค่ามากกว่าความหนาของฟิล์มของสารหล่อลื่นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ไม่คิดผลที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงและแรงทางแม่เหล็ก

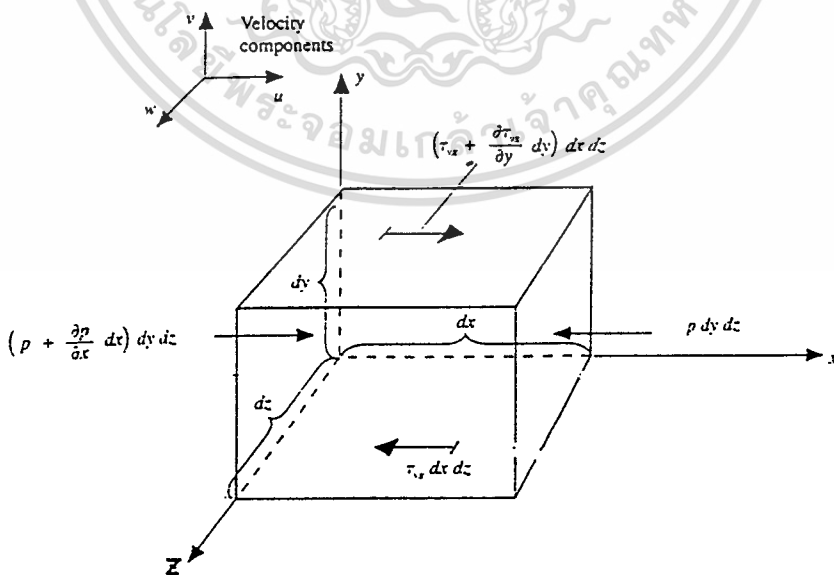
ภาพที่ 7



ภาพแสดงการไหลของฟิล์มสารหล่อลื่นระหว่างแผ่นระนาบ

พิจารณาก่อนทรงปริมาตรสี่เหลี่ยมขนาด $dx dy dz$ ของสารหล่อลื่น โดยกำหนดให้พื้นที่ผิวปริมาตรเป็นปริมาตรควบคุม Control Volume ดังภาพที่ 8

ภาพที่ 8



ภาพแสดงการสมดุลของปริมาตรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 8 แสดงแรงที่เกิดความดันกระทำต่อก่อนปริมาตรของไหล และเมื่อสมดุลย์แรงในแนวแกน จะได้

$$\sum F_x = 0 = \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) dydz - P dydz - \tau_x dx dz + \left(\tau_x + \frac{\partial \tau_x}{\partial y} dy \right) dx dz$$

เมื่อคูณสมการแล้วจัดรูปสมการใหม่ให้ง่ายขึ้นจะได้

$$\frac{\partial P}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_x}{\partial y} dx dy dz = 0$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) dx dy dz = 0$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \quad (2.1)$$

ในทำนองเดียวกันตามแนวแกน Z ก็จะได้

$$\frac{\partial P}{\partial z} = - \frac{\partial \tau_z}{\partial y} \quad (2.2)$$

สำหรับสารหล่อลื่น Newtonian ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stresses และ Velocity gradients เป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน (Newton's viscous law)

$$\tau_x = \mu \frac{\partial u}{\partial y} ; \quad \tau_z = \mu \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial y} = - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

เมื่อ u และ w เป็นส่วนประกอบของความเร็วในทิศทาง x และ z ตามลำดับ

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} ; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2.4)$$

ภายใต้ข้อสมมุติฐานว่า พิล์มน้ำมันบางมากจะไม่มีกระจายความดันตามแนวแกน y อินทิเกรตสมการ (2.4) จะได้ผลเฉลยทั่วไปสำหรับการกระจายความเร็ว u และ w ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} y + c \\ u &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} y^2 + c_1 y + c_2 \\ w &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} y^2 + c_3 y + c_4\end{aligned}\quad (2.5)$$

เมื่อ c_1, c_2, c_3 และ c_4 เป็นค่าคงที่

ภายใต้เงื่อนไขขอบเขต สำหรับองค์ประกอบความเร็ว จากรูปที่ 2.1 สำหรับ u และ w ดังนี้

$$u = U, \quad w = 0 \quad \text{ที่ } y = 0$$

$$u = 0, \quad w = 0 \quad \text{ที่ } y = h$$

เมื่อ U คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของระนาบบน

จากเงื่อนไขขอบเขตข้างบน เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (2.5) จะสามารถหาค่า c_1, c_2, c_3 และ c_4 ได้ดังนี้

$$c_1 = \frac{-h}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{U}{h}; \quad c_2 = U$$

$$c_3 = \frac{-h}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z}; \quad c_4 = 0$$

แทนค่าคงที่ข้างบนลงในสมการ (2.5) จะได้ส่วนประกอบความเร็ว u และ w ดังนี้

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - hy) + U \frac{(h-y)}{h}\quad (2.6)$$

$$w = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} (y^2 - hy)$$

จากข้อสมมุติฐานให้ของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ จากปริมาตรควบคุมเมื่อมีของไหลไหลเข้าไปในปริมาตรควบคุม จะต้องเท่ากับปริมาตรไหลออกจากปริมาตรควบคุม เมื่อกำหนดให้ u เท่ากับความเร็วการไหลในแนวแกน x , v เท่ากับความเร็วการไหลในแนวแกน y และ w เท่ากับความเร็วการไหลในแนวแกน z จะได้

$$u dy dz + v dx dz + w dx dy = \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) dy dz + \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} dy \right) dx dz + \left(w + \frac{\partial w}{\partial z} dz \right) dx dy$$

เมื่อแก้สมการแล้วจัดรูปใหม่จะได้สมการต่อเนื่องดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

เมื่อสมมุติว่าไม่มีการไหลออกทางด้านข้างของ bearing

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

เพราะฉะนั้น
$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.8)$$

differentiate สมการ (2.2) จะได้

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (y-h)y + U \left(1 - \frac{y}{h} \right) \right]$$

อินทิเกรตตามแนวแกน y จาก $y = 0$ ถึง $y = h$ จะได้

$$\int_0^h \frac{\partial v}{\partial y} dy = - \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial P}{\partial x} y \frac{(y-h)}{2\mu} \right] dy = \int_0^h \frac{\partial U}{\partial x} \left(1 - \frac{y}{h} \right) dy$$

$$v \Big|_{y=0}^{y=h} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial P \left((y^3/3) - (hy^2/2) \right)}{\partial x 2\mu} \right] \Big|_0^h = \frac{\partial}{\partial x} \left[U \left(y - \frac{y^2}{2h} \right) \right]_0^h$$

เราสมมุติให้การเกาะติดของสารหล่อลื่นกับ bearing อย่างสมบูรณ์ เพราะฉะนั้น $v = 0$ เมื่อ $y = 0$ และที่ $y = h$ จะได้ดังนี้

$$0 = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial P}{\partial x 2\mu} \left(\frac{h^3}{3} - \frac{h^3}{2} \right) \right] - \frac{\partial U}{\partial x} \left(h - \frac{h}{2} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 6\mu U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.9)$$

สมการที่ (2.3) คือ สมการ One-dimensional flow Reynolds หากมีการไหลออกทางด้านข้างของ bearing การวิเคราะห์ ก็จะคล้ายกัน และจะได้สมการ Reynolds สำหรับ Journal bearings สำหรับสารหล่อลื่น Newtonian ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial z} \right) = -6\mu U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.10)$$

สมการแสดงความหนาของฟิล์มน้ำมัน

$$h = c(1 + \varepsilon \cos \theta) \quad (2.11)$$

เมื่อ	P	=	ความดันของฟิล์มน้ำมัน
	h	=	ความหนาของฟิล์มน้ำมัน
	μ	=	ความหนืดของน้ำมัน
	U	=	ความเร็วสัมผัสแนวเส้นรอบวงของเพลลา
	ε	=	อัตราการใช้ของเพลลาที่แบร์ริง (e/c)
	e	=	ระยะเยื้องศูนย์กลางของเพลลาที่แบร์ริง
	c	=	ช่องว่างระหว่างเพลลาที่แบร์ริง
	θ	=	มุมที่วัดจากแกน X ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ผลที่คำนวณได้จากสมการเรโนลด์ คือ ค่าอัตราการใช้ของน้ำมันหล่อลื่นที่ต้องการ การสูญเสียกำลังอันเนื่องมาจากความเสียดทาน และการกระจายความดันของฟิล์มน้ำมัน แล้วจึงกำหนดความสามารถในการรับภาระของแบร์ริงได้

สำหรับการคำนวณผลจากสมการเรโนลด์ สามารถทำได้ภายใต้ข้อสมมุติฐาน 2 กรณีดังนี้ คือ

1. กรณีที่แบร์ริงมีความยาวมากเมื่อเทียบกับขนาดวัดผ่านศูนย์กลาง โดยพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแบร์ริงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 ($L/D \geq 4$) แบร์ริงลักษณะนี้เรียกว่า แบร์ริงแบบยาว (Long bearing) ในกรณีนี้การเปลี่ยนแปลงความดันในแนวแกนเราถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความดันในแนวรัศมี นั่นคือ

$$\frac{\partial P}{\partial z} \gg \frac{\partial P}{\partial x}$$

สมการเรโนลด์จะลดรูปลงเหลือ

$$\frac{d}{dx} \left(h^3 \frac{dP}{dx} \right) = 6 \mu U \frac{dh}{dx} \quad (2.12)$$

จากรูปลักษณะทางเรขาคณิตของเจอนัลแบร์ริงภาพที่ 6 และภายใต้เงื่อนไขขอบเขต

$$P = P_{\max} \quad \text{ที่} \quad h = h_1$$

และ $P = P_0 \quad \text{ที่} \quad \theta = 0 \quad \text{และ} \quad \theta = 2\pi$

อินทิเกรตสมการที่ 2.3 จะได้

$$h_1 = \frac{2c(1-\varepsilon^2)}{2+\varepsilon^2} \quad (2.13)$$

$$P = P_0 + \frac{6\mu UR}{c^2} \left[\frac{\varepsilon \sin \theta (2 + \varepsilon \cos \theta)}{(2 + \varepsilon^2)(1 + \varepsilon \cos \theta)} \right] \quad (2.14)$$

$$\frac{W}{\mu LU} \left(\frac{c}{R} \right)^2 = \frac{12\pi\varepsilon}{(2 + \varepsilon^2)\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (2.15)$$

และ

$$\frac{F}{\mu LU} \left(\frac{c}{R} \right) = \frac{4\pi(1 + 2\varepsilon^2)}{(2 + \varepsilon^2)\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (2.16)$$

เมื่อ

- W = ภาระที่กระทำกับแบร์ริง
- F = แรงเสียดทานตามแนวเส้นรอบ
- h_1 = ความหนาฟิล์มน้ำมัน
- R = รัศมีของแบร์ริง

สมการที่ (2.6) สามารถเขียนในเทอมของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งเรียกว่าค่า Sommerfeld Number (S) จะได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \frac{(2 + \varepsilon^2)\sqrt{1 - \varepsilon^2}}{12\pi^2 \varepsilon} \quad (2.17)$$

$$\text{เมื่อ } S = \frac{\mu UL \left(\frac{R}{c}\right)^2}{\pi W} \quad (2.18)$$

$$= \left(\frac{R}{c}\right)^2 \frac{\mu N}{P}$$

เมื่อ

$$N = \text{ความเร็วรอบของเพล}$$

$$P = \text{ความดันเฉลี่ยของฟิล์มน้ำมัน}$$

2. กรณีที่แบร์ริงมีความยาวน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดวัดผ่านศูนย์กลาง โดยพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแบร์ริงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 ($L/D < 0.25$) แบร์ริงลักษณะนี้เรียกว่า แบร์ริงแบบสั้น (Short bearing) สมมติให้ทิศทางการไหลของสารหล่อลื่นในแนววงกลมมาเป็นการไหลในแนวแกน สมการเรโนลด์จะลดรูปได้ดังนี้ :-

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6\mu U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.19)$$

พิจารณาภายใต้เงื่อนไขขอบเขต

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad \text{ที่ } z = 0$$

$$P = 0 \quad \text{ที่ } z = \frac{L}{2} \quad \text{เมื่อ } L \text{ คือความยาวแบร์ริง}$$

ผลเฉลยของสมการที่ 2.10 จะได้ค่า P ดังนี้

$$P = \left(\frac{3\mu U}{Rc^2} \right) \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \left(\frac{L^2}{4} - z^2 \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{W}{\mu LU} \left(\frac{c}{R} \right)^2 \left(\frac{D}{L} \right)^2 = \frac{\varepsilon \sqrt{\pi^2 (1 - \varepsilon^2) + 16\varepsilon^2}}{(1 - \varepsilon^2)^2} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$F = \frac{\mu ULR}{c} \frac{2\pi}{(1-\varepsilon^2)^{3/2}} \quad (2.22)$$

และ

$$\tan \Phi = -\frac{\pi\sqrt{1-\varepsilon^2}}{4\varepsilon} \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Phi &= \text{มุมระหว่างแนวแรงกระทำกับเส้นที่ลากผ่านศูนย์กลางของเพลลาและแบร์ริง} \\ D &= \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา} \end{aligned}$$

สมการที่ 2.12 สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของค่า Sommerfeld number, (S) ได้ดังนี้

$$S \left(\frac{L}{D} \right)^2 = \frac{(1-\varepsilon^2)^2}{\pi\varepsilon\sqrt{\pi^2(1-\varepsilon^2)+16\varepsilon^2}}$$

สามารถแสดงคุณลักษณะต่าง ๆ ของแบร์ริง

Lund และ Saible ได้คิดค้นวิธีการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขออกมาเป็นสมการที่ใช้แสดงคุณลักษณะต่าง ๆ ของแบร์ริง เช่น สมการความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำมัน สมการการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมัน สมการการกระจายความดัน สมการอัตราการไหลของน้ำมัน และสมการความเสียหาย โดยใช้ตัวแปร Modified Sommerfeld Number $[\sigma = PS \left(\frac{L}{D} \right)]$ และตัวแปรไร้มิติของมวลเพลลา $cM\omega^2/W$ เป็นตัวกำหนดสถานะเริ่มต้นความไม่เสถียรของแบร์ริง โดยจะแยกพิจารณาที่ค่า Sommerfeld number (S) น้อยกว่า 1.5 และมากกว่า 1.5

$$1. \quad S \leq 1.5$$

$$1.1 \quad 0.25 \leq \frac{L}{D} \leq 0.5$$

$$h_0 = 1.585c \left(\frac{L}{D} \right)^{0.913} (S)^{0.655} \left(\frac{L}{D} \right)^{0.0922}$$

$$\Delta t = \frac{0.5}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.374}} (S)^{0.695/(L/D)^{0.139}} \cdot P \quad (2.25)$$

$$\frac{P}{P_{\max}} = 0.76 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.62} (S)^{0.24} \quad (2.26)$$

$$\frac{cRNL}{Q} = 0.128 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.048} (S)^{0.1/(L/D)^{0.47}} \quad (2.27)$$

$$f \frac{R}{c} = \frac{12.6}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.41}} (S)^{0.62/(L/D)^{0.1035}} \quad (2.28)$$

$$1.2 \quad 0.5 \leq \frac{L}{D} \leq 1$$

$$h_0 = 1.84c \left(\frac{L}{D}\right)^{1.13} (S)^{0.731} \left(\frac{L}{D}\right)^{0.252} \quad (2.29)$$

$$\Delta t = \frac{0.43}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.62}} (S)^{0.56/(L/D)^{0.302}} \cdot P \quad (2.30)$$

$$\frac{P}{P_{\max}} = 0.76 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.62} (S)^{0.62/(L/D)^{0.1035}} \quad (2.31)$$

$$\frac{cRNL}{Q} = 0.128 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.048} (S)^{0.06/(L/D)^{0.1035}} \quad (2.32)$$

$$f \frac{R}{c} = \frac{11.8}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.503}} (S)^{0.62/(L/D)^{0.1035}} \quad (2.33)$$

$$2. \quad S \geq 0.15$$

$$2.1 \quad 0.25 \leq \frac{L}{D} \leq 0.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_0 = 1.035c \left(\frac{L}{D}\right)^{0.673} (S)^{0.33} \left(\frac{L}{D}\right)^{0.2} \quad (2.34)$$

$$\Delta t = \frac{0.695}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.214}} (S)^{0.875/\left(\frac{L}{D}\right)^{0.042}} \cdot P \quad (2.35)$$

$$\frac{P}{P_{\max}} = 0.76 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.62} (S)^{0.24} \quad (2.36)$$

$$\frac{cRNL}{Q} = 0.128 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.048} (S)^{0.1/\left(\frac{L}{D}\right)^{0.47}} \quad (2.37)$$

$$f \frac{R}{c} = \frac{16.85}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.318}} (S)^{0.922/\left(\frac{L}{D}\right)^{0.087}} \quad (2.38)$$

$$2.2 \quad 0.5 \leq \frac{L}{D} \leq 1$$

$$h_0 = 0.95c \left(\frac{L}{D}\right)^{0.556} (S)^{0.375} \quad (2.39)$$

$$\Delta t = \frac{0.695}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.214}} (S)^{0.875/\left(\frac{L}{D}\right)^{0.042}} \cdot P \quad (2.40)$$

$$\frac{P}{P_{\max}} = 0.55 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.1535} (S)^{0.083/\left(\frac{L}{D}\right)^{1.535}} \quad (2.41)$$

$$\frac{cRNL}{Q} = 0.128 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.048} (S)^{0.06/\left(\frac{L}{D}\right)^{0.212}} \quad (2.42)$$

$$f \frac{R}{c} = \frac{19}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.127}} (S)^{0.922/\left(\frac{L}{D}\right)^{0.087}} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการข้างบนนี้ จะใช้เมื่อเพลาทนอยู่ในสภาวะเสถียร ซึ่งเราสามารถตรวจสอบสภาวะเสถียรของเพลได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$1. \quad \sigma \leq 0.28$$

$$\Psi(\sigma) = \frac{3}{0.55\sigma}$$

$$2. \quad 0.28 \leq \sigma \leq 2.9$$

$$\Psi(\sigma) = 6.88\sigma^{0.094}$$

$$3. \quad \sigma > 2.9$$

$$\Psi(\sigma) = 7.65$$

เมื่อ

c = ช่องว่างระหว่างเพลากับแบร์ริง

D = ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางของเพล

e = ระยะเยื้องศูนย์กลางของเพลากับแบร์ริง

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

h_0 = ค่าความหนาฟิล์มน้ำมันน้อยสุด

L = ความยาวของแบร์ริง

M = ครึ่งหนึ่งของมวลเพล

N = ความเร็วรอบของเพล

P = ความดันเฉลี่ยของแบร์ริง ($W/2RL$)

P_{\max} = ค่าสูงสุดของความดันฟิล์มน้ำมัน

Q = อัตราการไหลของน้ำมันที่ป้อนเข้าสู่แบร์ริง

R = รัศมีของเพล

t_{\max} = ค่าอุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มน้ำมัน

Δt = อุณหภูมิของน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

W = ภาระที่กระทำกับแบร์ริง

μ = ค่าความหนืดเฉลี่ยของน้ำมัน

Φ = มุมระหว่างแนวแรงกระทำกับเส้นที่ลากผ่านศูนย์กลางของเพลและแบร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ω = ความเร็วเชิงมุมของเพลลา

กลุ่มของตัวแปรไร้มิติ

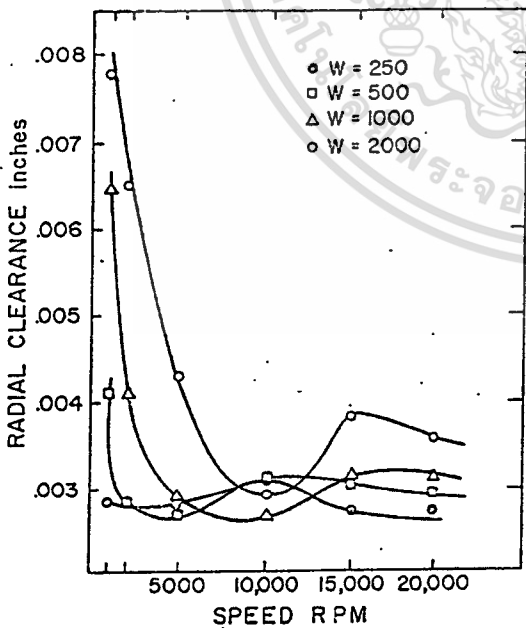
- fR/c = แรงเสียดทานที่เปลี่ยนแปลง
- $cRNL/Q$ = อัตราการไหลของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลง
- L/D = อัตราส่วนความยาวต่อขนาดวัดผ่านศูนย์กลางของแบร์ริง
- $cM\omega^2/W$ = ตัวแปรไร้มิติของมวลเพลลา
- S = Sommerfeld No. = $(R/c)^2 \cdot \mu N/P$
- σ = Modified Sommerfeld No. = $\pi S(L/D)^2$

2.3 ผลจากการทำ Optimization กับเจอนัลแบร์ริงเมื่อใช้สารหล่อลื่นนิวโทเนียน

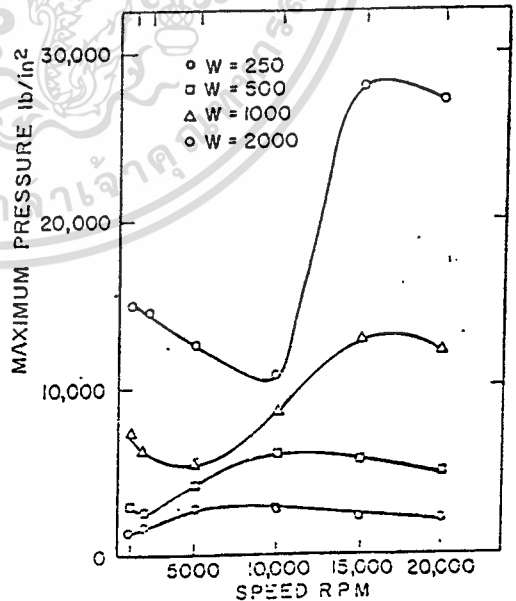
ในการออกแบบแบร์ริงเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุดเราจะต้องหาค่าความยาว(L) และขนาดวัดผ่านศูนย์กลางของแบร์ริง(D) ตลอดจนค่าระยะห่างระหว่างเพลลากับแบร์ริง(C) ที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธี Optimization จากการศึกษาของ A.Seireg และ H.Ezzat ได้สรุปผลการทำ Optimization เจอนัลแบร์ริง เมื่อใช้สารหล่อลื่นนิวโทเนียนดังภาพที่ 9-14

ภาพที่ 9

ภาพที่ 10



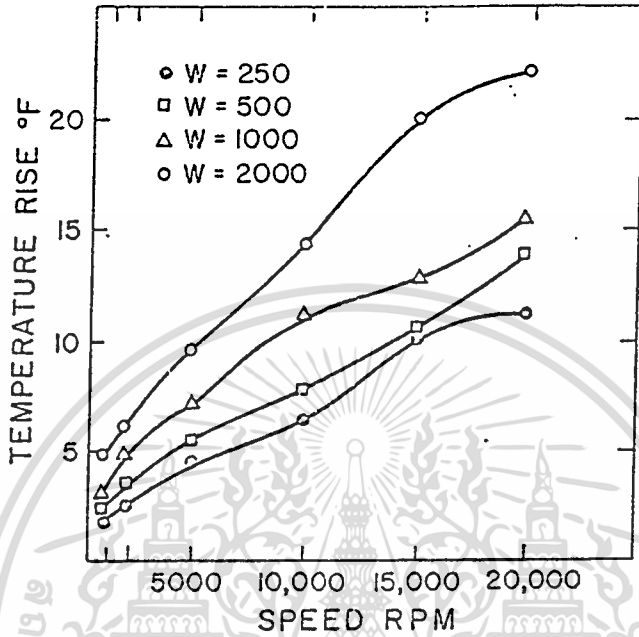
ภาพแสดงค่า Optimum Clearance



ภาพแสดงค่าความดันสูงสุดใน Optimum bearing

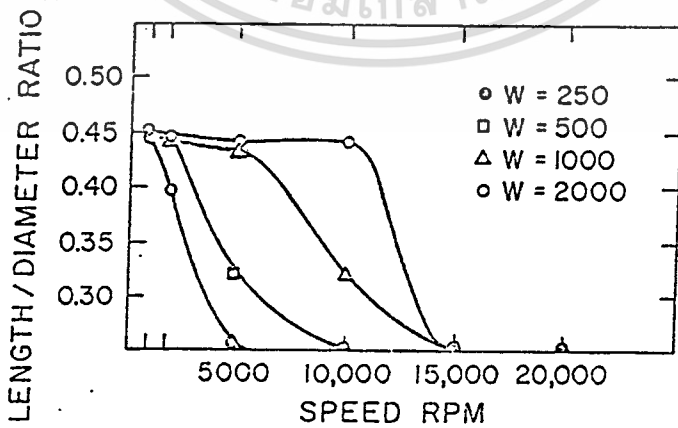
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 11



ภาพแสดงค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นใน Optimum bearing

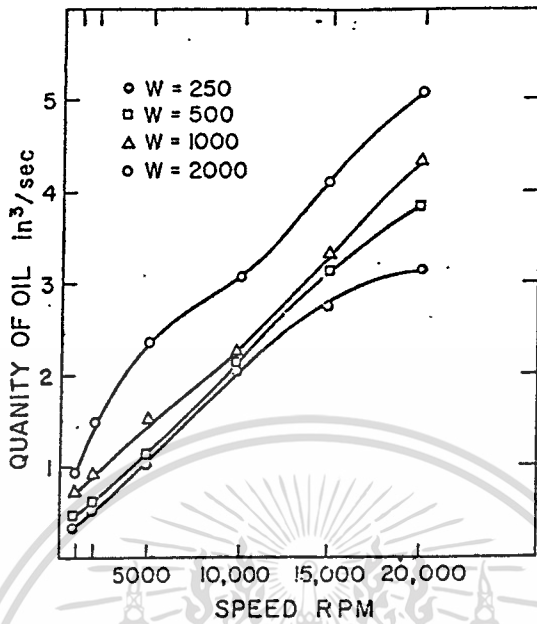
ภาพที่ 12



ภาพแสดงค่า Optimum Length/Diameter ratio

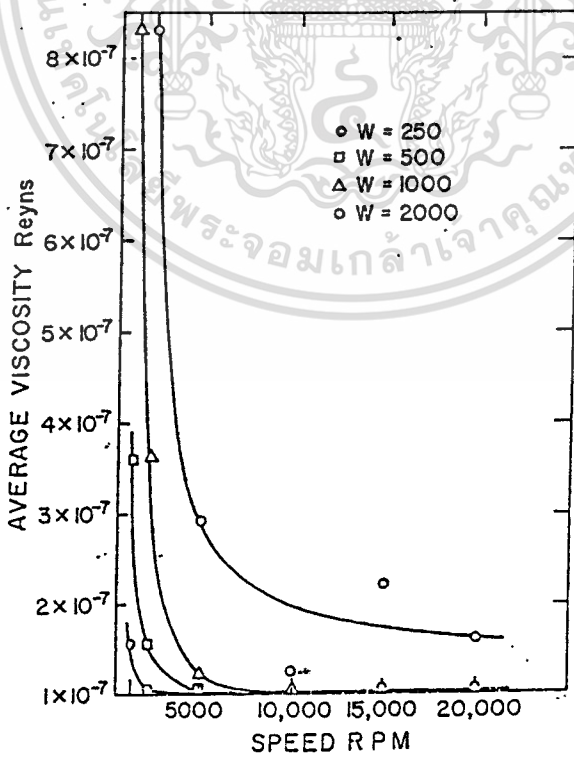
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 13



ภาพแสดงค่าอัตราการไหลที่ต้องการใน Optimum bearing

ภาพที่ 14

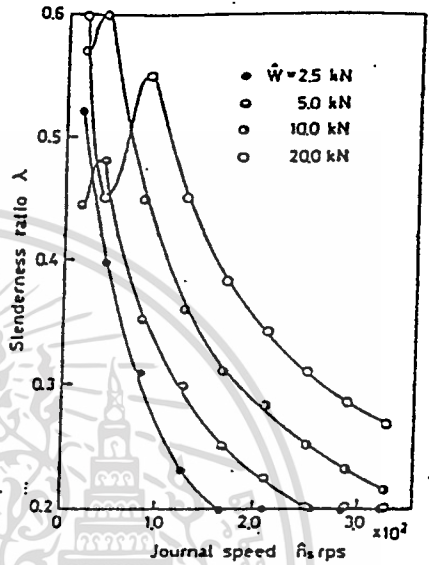
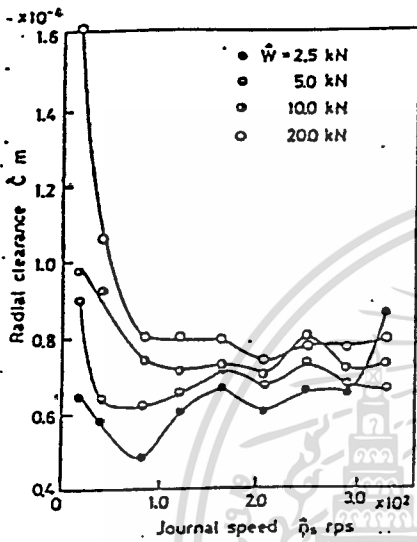


ภาพแสดงค่าความหนืดเฉลี่ย Optimum bearing

จากการศึกษา Optimum Design of Journal Bearings ของ Hiromu HASHIMOTO และ Yoshinori KATO ซึ่งได้ศึกษาในกรณีที่เพลามีความเร็วรอบสูงมาก และลักษณะการไหลของสารหล่อลื่นเป็นแบบ Turbulent ได้สรุปผลดังภาพที่ 15-18

ภาพที่ 15

ภาพที่ 16

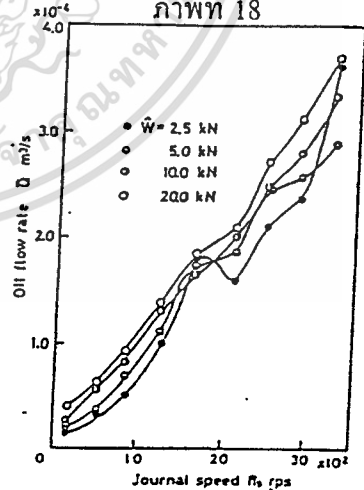
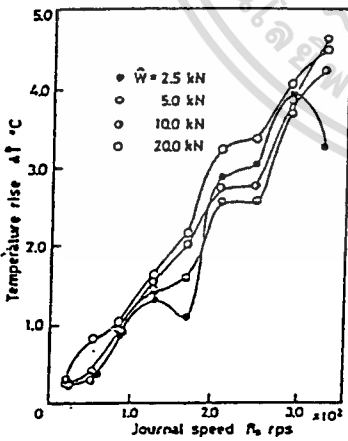


ภาพแสดงค่า Optimum Clearance เมื่อการไหลเป็นแบบ Turbulent

ภาพแสดงค่า Optimum Length/Diameter ratio เมื่อการไหลเป็นแบบ Turbulent

ภาพที่ 17

ภาพที่ 18



ภาพแสดงค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นใน Optimum bearing เมื่อการไหลเป็นแบบ Turbulent

ภาพแสดงค่า อัตราการไหลใน Optimum bearing เมื่อการไหลเป็นแบบ Turbulent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

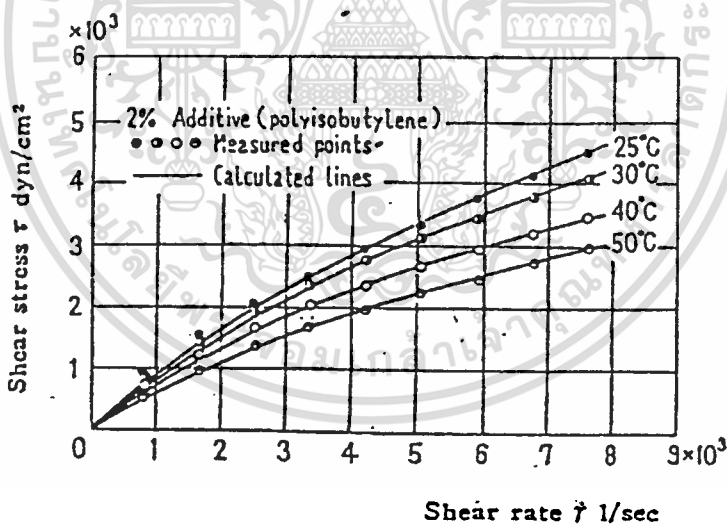
บทที่ 3

การพัฒนาสมการโมดิฟาย เรโนลด์ สำหรับเจอร์นัลเบริงที่ใช้สารหล่อลื่น นอน-นิวโทเนียน

(Development the modified Renolds equation for Non-newtonian lubricants)

ตามปกติแล้วสารหล่อลื่นนิวโทเนียนเมื่อเติมสารเพิ่มดัชนีความข้นใส (Viscosity- Index Improver) จำพวก Polyisobutylene ลงไปจะมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่น นอน-นิวโทเนียน แบบ Pseudoplastic ดังภาพที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของสารหล่อลื่น นอน-นิวโทเนียน เมื่อเติมสารเติมแต่ง Polyisobutylene ลงไป 2%

ภาพที่ 19



กราฟแสดงคุณลักษณะการไหลของสารหล่อลื่น นอน-นิวโทเนียน เมื่อเติมสารเติมแต่ง Polyisobutylene 2%

จากรูปความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ Shear rate สามารถหาค่าประมาณตามสมการเชิงปริมาตรได้ดังนี้

$$\tau + k\tau^3 = \mu \frac{dy}{dt} \quad (3.1)$$

เมื่อ τ : Shear stress, γ : Shear strain, k : Coefficient of pseudo - Plasticity

μ : Initial Viscosity, t : time ในการหาที่มาของสมการ Modified Renolds equation โดยการพิจารณาพื้นผิวของ Slider bearing ดังแสดงในภาพที่ 20 เมื่อ x, y, z เป็นระบบแกนอ้างอิง, h = ความหนาฟิล์มน้ำมัน, h_2 = ความหนาฟิล์มน้ำมันน้อยสุด, u, w เป็นความเร็วการไหลของสารหล่อลื่น, u_1, u_2 เป็นความเร็วที่ผิวสัมผัสล่างและบนตามลำดับ, δ = nonlinearity factor และ p = ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่น



รวมสมการแสดงคุณลักษณะการไหลที่ 3.1 กับสมการสมดุลของแรงในฟิล์มสารหล่อลื่น สามารถหาการกระจายความเร็วของสารหล่อลื่นในรูปของตัวแปรไร้มิติตามทิศทาง x และ z ได้ดังสมการที่ (3.2) และ (3.3) ตามลำดับ

$$u = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) + \delta \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^3 \left(\frac{y^4}{4} - \frac{h}{2} y^3 + \frac{3h^2 y^2}{8} - \frac{h^3 y}{8} \right) + \frac{U_1 - U_2}{h \left\{ 1 + \delta \left(\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 \right\}} \left\{ -y + \delta \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 \left(-y^3 + \frac{3}{2} h y^2 - \frac{3}{4} h^2 y \right) \right\} + U_1 \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$w = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} y(y-h) + \delta \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 \left(\frac{y^4}{4} - \frac{h}{2} y^3 + \frac{3h^2 y^2}{8} - \frac{h^3 y}{8} \right) \quad (3.3)$$

จากสมการความต่อเนื่อง $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ (3.4)

แทนค่าสมการ (3.2) และ (3.3) ลงในสมการความต่อเนื่องที่ (3.4) และอินทิเกรตครอบคลุมความหนาฟิล์มน้ำมันตามแนวแกน y จะได้รูปทั่วไปของสมการ Modified Reynolds equation สำหรับสารหล่อลื่นนอนนิวโทเนียนดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial x} + \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^3 \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial z} + \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 \right\} = \frac{1}{2} (U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{h}{2} \frac{\partial (U_1 + U_2)}{\partial x} + V \quad (3.5)$$

สำหรับเบริงเพลากลมการวิเคราะห์รูปทั่วไปของสมการ Reynolds จะได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial p}{\partial \theta} \right)^3 \right\} + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 \right\} = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.6)$$

การคำนวณค่าความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นโดยวิธี Analytical สำหรับเบริงแบบสั้น

เบริงแบบสั้น (Short bearing) หมายถึง เบริงที่มีความยาวน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดวงผ่าศูนย์กลาง ($L/D \leq 0.25$) นั่นคือ

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} \ll \frac{\partial p}{\partial z}$$

สมการเรโนลด์สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ภายใต้อาณัติสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) จะลดรูปลงเหลือดังนี้

$$\frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 \right\} = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.7)$$

โดยที่คุณสมบัติของสารหล่อลื่นเป็นแบบ Non-Linear $\delta < 1$ ค่าความดันของฟิล์มน้ำมันเป็นดังสมการ

$$P = P_0 + \delta P_1 + \delta^2 P_2 + \dots \quad (3.8)$$

นำสมการ (3.8) แทนลงในสมการ (3.7) จะได้สมการสำหรับความดันแต่ละส่วน ดังนี้ :-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสมการอันดับศูนย์ ภายใต้สภาวะคงตัว

$$\frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12} \frac{\partial P_0}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (3.9)$$

สำหรับแบร์ริงแบบวงกลม สมการความหนาของฟิล์มน้ำมัน

$$h = 1 + \varepsilon \cos \theta \quad (3.10)$$

แทนค่าสมการ (3.10) ลงในสมการ (3.9)

$$\frac{\partial h}{\partial \theta} = -\varepsilon \sin \theta$$

$$\frac{h^3}{48} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 P_0}{\partial z^2} = -\frac{\varepsilon \sin \theta}{2}$$

$$\frac{\partial^2 P_0}{\partial z^2} = -24 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} = A$$

อินทิเกรตทั้ง 2 ข้าง

$$\frac{\partial P_0}{\partial z} = \left[-24 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right] z + c = Az + c$$

$$P_0 = \left[-24 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right] \frac{z^2}{2} + cz + d$$

$$P_0 = \frac{A}{z} z^2 + Bz + c \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } A = -24 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3}$$

B และ C เป็นค่าคงที่

สำหรับสมการอันดับหนึ่ง ภายใต้สภาวะคงตัว

$$\frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial P_1}{\partial z} + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial P_0}{\partial z} \right)^3 \right\} = 0 \quad (3.12)$$

นำสมการ (3.10) แทนค่าลงในสมการ (3.12)

$$\frac{\partial P_0}{\partial z} = \left[-24 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right] z + B = Az + c$$

$$\left(\frac{h^3}{48} \right)^2 \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 P_1}{\partial z^2} \left(\frac{h^5}{1280} \left(\frac{D}{L} \right)^4 \frac{\partial}{\partial z} [A^3 z^3 + 3A^2 Bz^2 + 3Ac^2 z + B^3] \right) = 0$$

$$\frac{h^3}{48} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 P_1}{\partial z^2} + \frac{h^5}{1280} \left(\frac{D}{L} \right)^4 [3A^3 z^2 + 6A^2 Bz + 3AB^2] = 0$$

$$\frac{h^3}{48} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 P_1}{\partial z^2} - 32.4 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{(\varepsilon \sin \theta)^3 z^2}{h^4} + \frac{2.7B}{h} (\varepsilon \sin \theta)^2 z - \frac{72h^2}{1280} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \varepsilon \sin \theta c^2 = 0$$

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial z^2} = \frac{1555.2}{h^7} \left(\frac{L}{D} \right)^4 (\varepsilon \sin \theta)^3 z^2 - \frac{129.6B}{h^4} \left(\frac{L}{D} \right)^2 (\varepsilon \sin \theta)^2 z + \frac{2.7B^2}{h} \varepsilon \sin \theta$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial z} = \frac{1555.2}{h^7} \left(\frac{L}{D} \right)^4 (\varepsilon \sin \theta)^3 \frac{z^3}{3} - \frac{129.6B}{h^4} \left(\frac{L}{D} \right)^2 (\varepsilon \sin \theta)^2 \frac{z^2}{2} + \left[\frac{2.7B^2}{h} \varepsilon \sin \theta \right] z + E$$

$$P_1 = \frac{1555.2}{h^7} \left(\frac{L}{D} \right)^4 (\varepsilon \sin \theta)^3 \frac{z^4}{12} - \frac{129.6B}{h^4} \left(\frac{L}{D} \right)^2 (\varepsilon \sin \theta)^2 \frac{z^3}{6} + \left[\frac{2.7B^2}{h} \varepsilon \sin \theta \right] \frac{z^2}{2} + Ez + F$$

(3.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E และ F เป็นค่าคงที่

$$\text{จาก } P = P_0 + \delta P_1 \quad \text{เมื่อ } \delta = K \left(\frac{\mu U}{C_v} \right)^2$$

$$P = \left[\left\{ -24 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right\} \frac{z^2}{2} + cz + d + \delta \left[\begin{aligned} & \frac{1552.2}{h^7} \left(\frac{L}{D} \right)^4 (\varepsilon \sin \theta)^3 \frac{z^4}{12} \\ & - \frac{129.6B}{h^4} \left(\frac{L}{D} \right)^2 (\varepsilon \sin \theta)^2 \frac{z^3}{6} \\ & + \frac{2.7B}{h} \varepsilon \sin \theta \frac{z^2}{2} + Ez \end{aligned} \right] \right]$$

$$P = \left[\begin{aligned} & \frac{1552.2}{h^7} \delta \left(\frac{L}{D} \right)^4 (\varepsilon \sin \theta)^3 \frac{z^4}{12} - \frac{A}{h^4} \delta \left(\frac{L}{D} \right)^2 (\varepsilon \sin \theta)^2 \left(\frac{z^3}{6} \right) \\ & + \left[\frac{B}{h} \delta \sin \theta - 24 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3} \right] \frac{z^2}{2} + (C + \delta E)z + d + F \end{aligned} \right] \quad (3.14)$$

B.C.

1. $P = 0$, $\theta = 0$

$$0 = (C + \delta E)z + d + F$$

2. $\frac{dP}{d\theta} = 0$, $\theta = 0$

$$\frac{dP}{d\theta} = \left[\begin{aligned} & \left[\frac{1552.2\delta}{h^7} \left(\frac{L}{D} \right)^4 \varepsilon^3 (3 \sin \theta^2 \cos \theta) \frac{z^4}{12} - \frac{A\delta}{h^4} \left(\frac{L}{D} \right)^2 \varepsilon^2 2 \sin \theta \cos \theta \frac{z^3}{6} \right. \\ & \left. + \left[\frac{B}{h} \delta \varepsilon \cos \theta - 24 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \varepsilon \left(\frac{(1 + \varepsilon \cos \theta)^3 \cos \theta + 3 \sin \theta^2 (1 + \varepsilon \cos \theta)^2 \varepsilon}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^6} \right) \right] \frac{z^2}{2} \right. \\ & \left. + (C + \delta E)z + dF \right] \end{aligned} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = -\frac{\varepsilon B z^2}{h^2} + 12\varepsilon \left(\frac{L}{D}\right)^2 \frac{1}{(1+\varepsilon)^3} z^2 + (C + \delta E)z + d + F$$

$$3. \quad P = 0 \quad , \quad z = 0$$

$$0 = d + F \rightarrow d = -F$$

$$4. \quad P = 0 \quad , \quad z = 1$$

$$0 = \left[\begin{array}{l} \frac{1552.2\delta}{12h^7} \left(\frac{L}{D}\right)^4 (\varepsilon \sin \theta)^3 - \frac{A\delta}{6h^4} \left(\frac{L}{D}\right)^2 (\varepsilon \sin \theta)^2 \\ + \left[\frac{B\delta}{2h} \varepsilon \sin \theta - 12 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \frac{1}{(1-\varepsilon)^3} z^2 + (C + \delta E)z + d + F \right] \end{array} \right]$$

จาก 3.

$$d + F = 0$$

$$1. \quad (C + \delta E)z = 0 \Rightarrow E = -\frac{C}{\delta}$$

$$2. \quad \Rightarrow 0 = \frac{-\varepsilon z^2 \delta}{2h} B + 12\varepsilon \left(\frac{L}{D}\right)^2 \frac{1}{(1-\varepsilon)^3} z^2$$

$$B = \frac{24h}{\delta(1-\varepsilon)^3} \left(\frac{L}{D}\right)^2$$

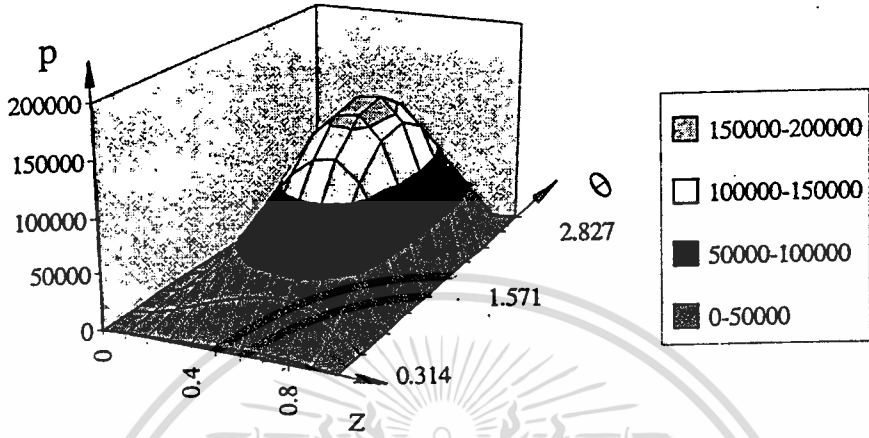
(3.15)

$$4. \quad \Rightarrow 0 = \left[\begin{array}{l} \frac{1552.2\delta}{12h^7} \left(\frac{L}{D}\right)^4 (\varepsilon \sin \theta)^3 - \frac{A\delta}{6h^4} \left(\frac{L}{D}\right)^2 (\varepsilon \sin \theta)^2 \\ + \frac{12\varepsilon \sin \theta}{(1-\varepsilon)^3} \left(\frac{L}{D}\right)^2 - \frac{12\varepsilon \sin \theta}{(1+\varepsilon \cos \theta)^3} \left(\frac{L}{D}\right)^2 \end{array} \right]$$

$$A = \frac{776.1}{h^3} \left(\frac{L}{D}\right)^2 (\varepsilon \sin \theta) + \frac{72h^4}{\varepsilon \sin \theta} \left[\frac{1}{(1-\varepsilon)^3} - \frac{1}{(1+\varepsilon \cos \theta)^3} \right]$$

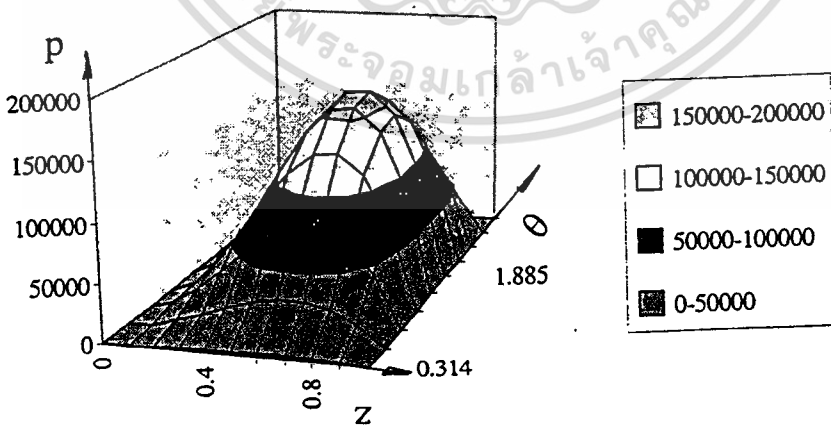
เมื่อแทนค่า L/D , δ และ ε ลงในสมการที่ (3.13) คำนวณค่า P แล้วเขียนกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า P , z และ θ ได้ดังภาพที่ 21-24

ภาพที่ 21



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง θ , z และ P เมื่อค่า $\delta = 0.2$ และค่า $\epsilon = 0.4$

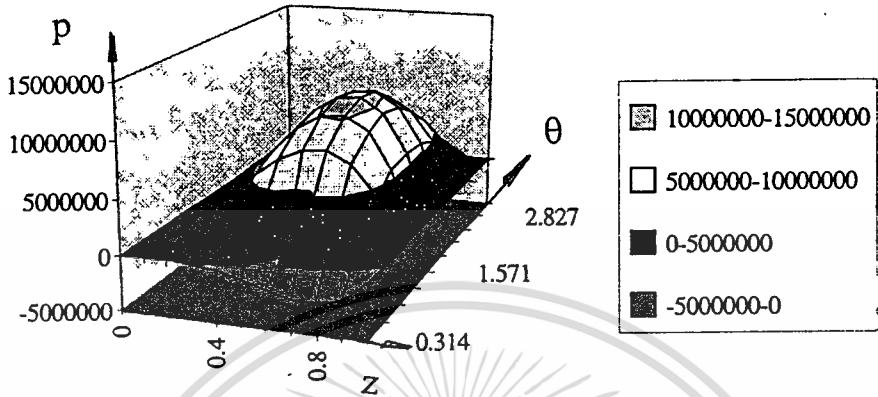
ภาพที่ 22



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง θ , z และ P เมื่อค่า $\delta = 0.4$ และค่า $\epsilon = 0.4$

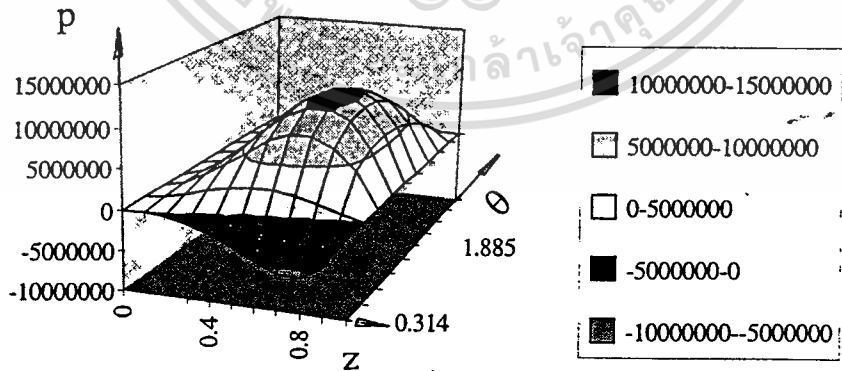
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 23



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง θ , Z และ P เมื่อค่า $\delta = 0.2$ และค่า $\epsilon = 0.8$

ภาพที่ 24



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง θ , Z และ P เมื่อค่า $\delta = 0.4$ และค่า $\epsilon = 0.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เจอนัลแบริงแบบสั้นด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method for short journal bearing)

เจอนัลแบริงที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.25 ถือว่าเป็นแบริงแบบสั้นจะพิจารณาการไหลและแรงดันของสารหล่อลื่นตามแนวแกนเท่านั้น การวิเคราะห์พฤติกรรมของ เจอนัลแบริงจะใช้สมการเรโนลด์ สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) สำหรับแบริงแบบสั้นเป็นดังสมการ (3.7) ดังกล่าวข้างต้น

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^3 \right\} + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \delta \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^3 \right\} = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{\partial h}{\partial t}$$

เมื่อคุณสมบัติของสารหล่อลื่นเป็นแบบ Non-linear $\delta < 1$ ค่าความดันของฟิล์มเป็นไปตามสมการที่ (3.8) คือ

$$P = P_0 + \delta P_1 + \delta^2 P_2 + \dots$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (3.8) ลงในสมการ (3.7) จะได้สมการความดันแต่ละส่วนดังนี้ สมการอันดับศูนย์ภายใต้สภาวะคงตัว ได้ดังสมการที่ (3.9) คือ

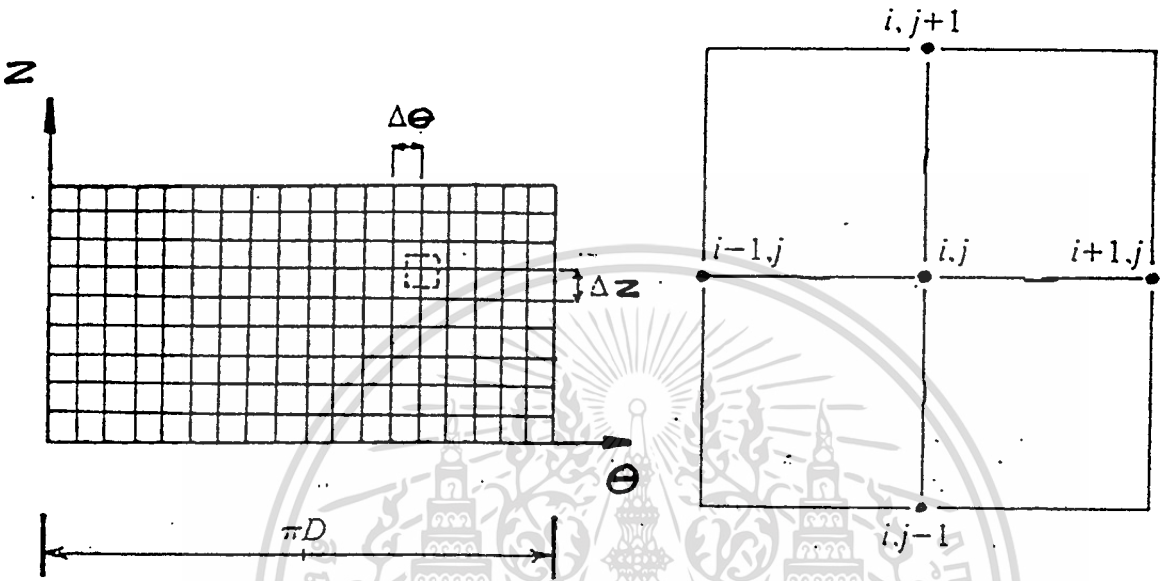
$$\frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12} \frac{\partial P_0}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta}$$

สมการอันดับหนึ่งภายใต้สภาวะคงตัว ได้ดังสมการที่ (3.12) คือ

$$\frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{h^3}{12} \frac{\partial P_1}{\partial z} + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial P_0}{\partial z} \right)^3 \right\} = 0$$

การวิเคราะห์เงื่อนไขเบริงด้วยวิธีผลต่างจำกัด ทำได้โดยการคลี่ฟิล์มน้ำมันระหว่างเพลากับเบริงแล้วแบ่งเป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆดังภาพที่ 25

ภาพที่ 25



รูปแบบของผลต่างจำกัดสำหรับเงื่อนไขเบริง โดยการคลี่แผ่นฟิล์มน้ำมัน

จากรูป

$$\left. \frac{\partial P}{\partial \theta} \right|_a = \frac{P_{ij} - P_{i-1,j}}{\Delta \theta}$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial \theta} \right|_b = \frac{P_{i+1,j} - P_{ij}}{\Delta \theta}$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial Z} \right|_c = \frac{P_{ij} - P_{i,j-1}}{\Delta Z}$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial Z} \right|_d = \frac{P_{i,j+1} - P_{ij}}{\Delta Z}$$

(3.16)

จากสมการอันดับหนึ่งภายใต้สภาวะคงตัวที่ (3.9) เขียนเป็น Finite different equation จะได้สมการ Reynold ในรูปผลต่างจำกัดดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12} \frac{\partial P_0}{\partial z} \right) &= \frac{\left. \frac{h^3}{12} \frac{\partial P_0}{\partial z} \right|_d - \left. \frac{h^3}{12} \frac{\partial P_0}{\partial z} \right|_c}{\Delta z^2} \\ &= \frac{h^3}{12 \Delta z^2} \left[(P_{i,j+1} - P_{ij}) - (P_{ij} - P_{i,j-1}) \right] \\ &= \frac{h^3}{12 \Delta z^2} (P_{i,j+1} - 2P_{ij} + P_{i,j-1}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \theta} = \frac{h|_b - h|_a}{\Delta \theta} = \frac{h_{j+1} - h_{j-1}}{\Delta \theta} \quad (3.18)$$

นำสมการ (3.17) และสมการ (3.18) แทนลงในสมการ (3.9) จะได้สมการ

$$\frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \left\{ \frac{h^3}{12 \Delta z} (P_{i,j+1} - 2P_{ij} + P_{i,j-1}) \right\} = \frac{1}{2 \Delta \theta} (h_{i+1} - h_{i-1}) \quad (3.19)$$

$$\frac{h^3}{48} \left(\frac{D}{L \Delta z} \right)^2 \left\{ (P_{i,j+1} - 2P_{ij} + P_{i,j-1}) \right\} = \frac{1}{2 \Delta \theta} (h_{i+1} - h_{i-1})$$

$$\frac{h_i^3}{24} \left(\frac{D}{L \Delta z} \right)^2 P_{i,j} = \frac{h_i^3}{48} \left(\frac{D}{L \Delta z} \right)^2 P_{i,j+\frac{1}{2}} + \frac{h_i^3}{48} \left(\frac{D}{L \Delta z} \right)^2 P_{i,j-\frac{1}{2}} - \frac{1}{2 \Delta \theta} \left(h_{i+\frac{1}{2}} - h_{i-\frac{1}{2}} \right) \quad (3.20)$$

เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่าย

$$AP_{i,j} = B \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$A = \frac{h_i^3}{24} \left(\frac{D}{L\Delta z} \right)^2$$

$$B = \frac{h_i^3}{48} \left(\frac{D}{L\Delta z} \right)^2 P_{i,j+\frac{1}{2}} + \frac{h_i^3}{48} \left(\frac{D}{L\Delta z} \right)^2 P_{i,j-\frac{1}{2}} - \frac{1}{2\Delta\theta} \left(h_{i+\frac{1}{2}} - h_{i-\frac{1}{2}} \right)$$

$$\therefore P_{i,j} = B/A$$

จากสมการอันดับหนึ่งภายใต้สภาวะคงตัว นำมาเขียนเป็นสมการ Finite difference จะได้สมการ Renold ในรูปของผลต่างจำกัดดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12} \frac{\partial P_1}{\partial z} \right) = \frac{\frac{h^3}{12} \frac{\partial P_1}{\partial z} \Big|_d - \frac{h^3}{12} \frac{\partial P_1}{\partial z} \Big|_c}{\Delta z}$$

$$= \frac{h^3}{12\Delta z^2} (P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}) \quad (3.25)$$

นำสมการที่ (3.25) แทนค่าลงในสมการ (3.12) จะได้

$$\frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \left\{ \frac{h^3}{12\Delta z} (P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}) + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{h^5}{80} (P_0)^3 \right\} = 0$$

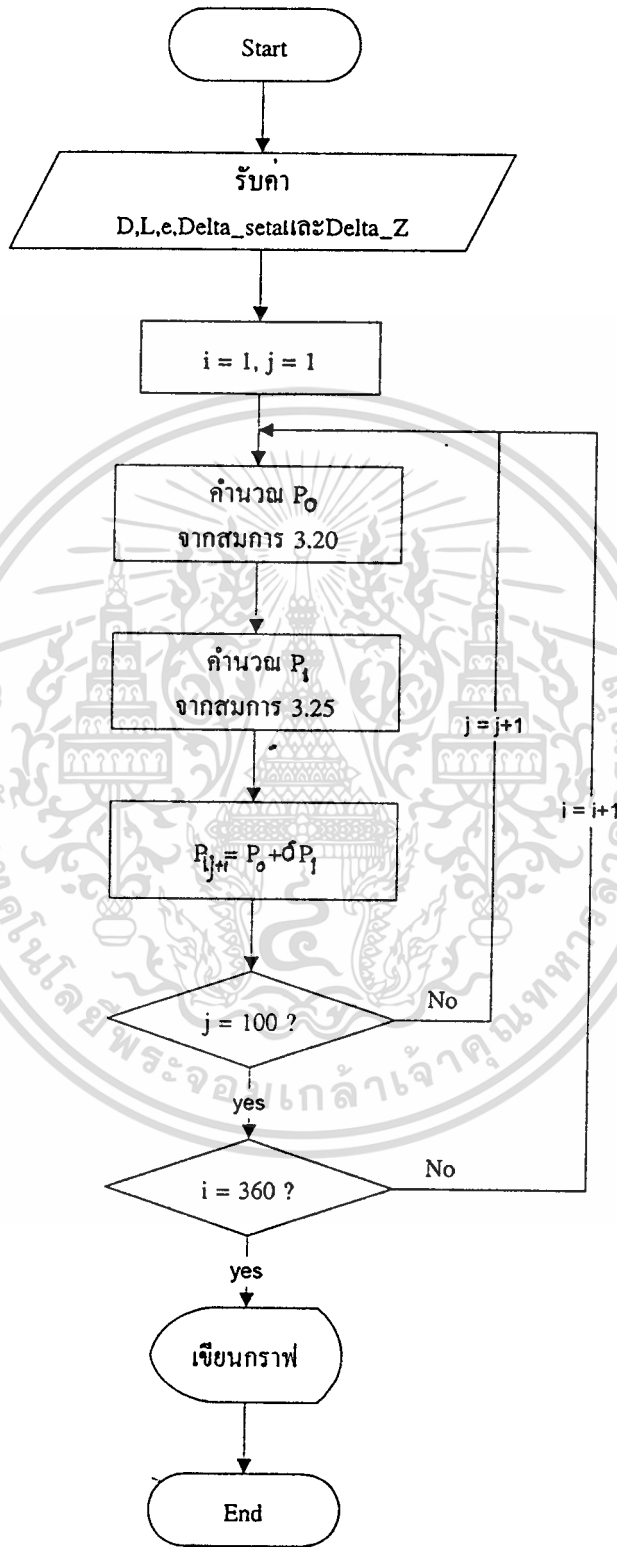
จากสมการที่ (3.8) $P = P_0 + \delta P_1 + \delta^2 P_2 + \dots$ และภายใต้เงื่อนไขขอบเขต

$$P(\theta, 0) = P(\theta, L) = 0$$

$$P(0, z) = P(\pi, z) = 0$$

เขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าความดันได้ดังภาพที่ 27 และ 28

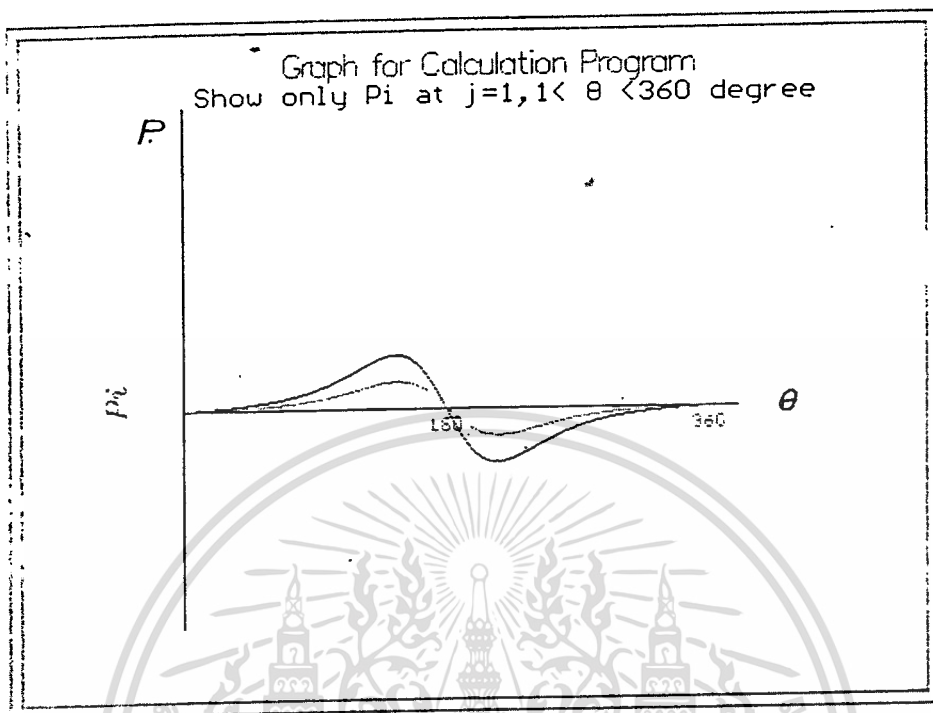
ภาพที่ 26



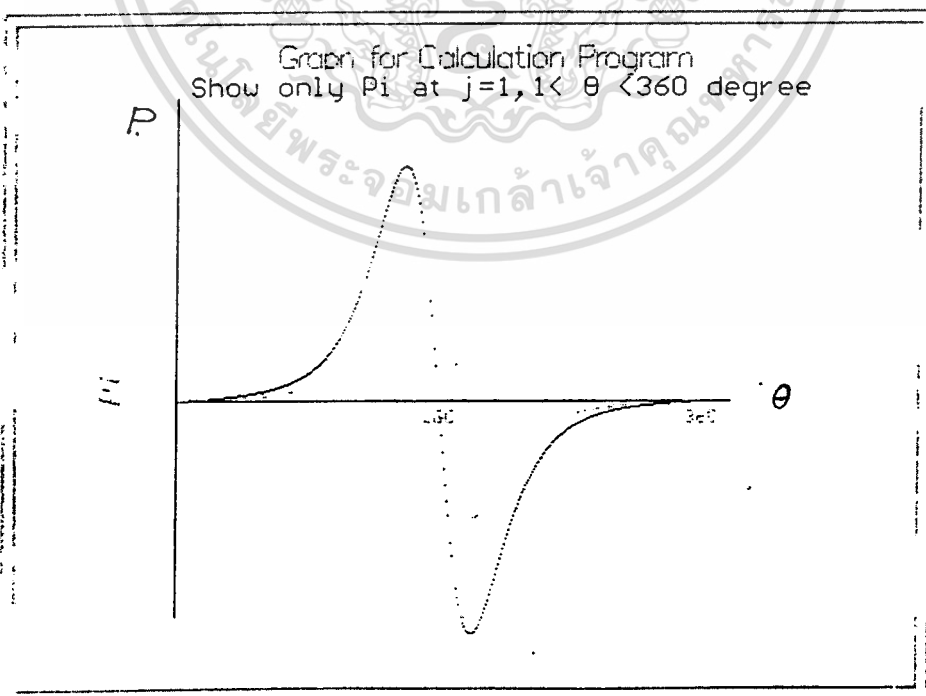
แสดง Flow chart การกระจายความดันของสารหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 27

ภาพแสดงการกระจายความดันของสารหล่อลื่นในเจอร์นัลแบร์ริงเมื่อค่า $\epsilon = 0.5$

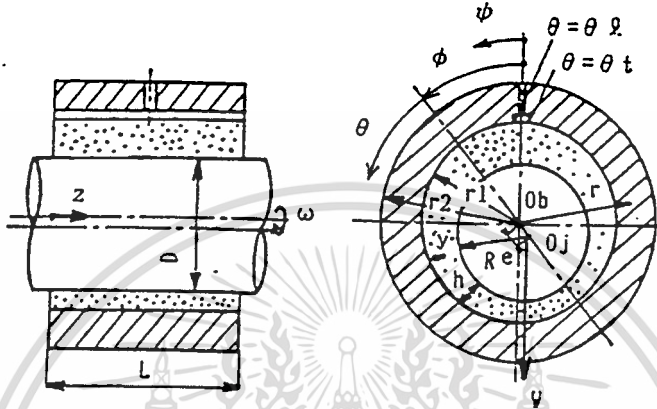
ภาพที่ 28

ภาพแสดงการกระจายความดันของสารหล่อลื่นในเจอร์นัลแบร์ริงเมื่อค่า $\epsilon = 0.7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาอัตราการไหลของสารหล่อลื่น เนื่องจากกรณีของ Short journal bearing ความเร็วของสารหล่อลื่นในแนวแกน θ จะมีผลต่อการไหลวนโดยรอบแกนเพลลา ฉะนั้นอัตราการไหลออกของสารหล่อลื่นขึ้นอยู่กับความเร็วของไหลในแนวแกน Z เท่านั้น จึงพิจารณาตัวแปรไร้มิติของสมการการกระจายความเร็วในแนวแกน Z เท่านั้น

ภาพที่ 29



ภาพแสดงทิศทางการไหลของสารหล่อลื่นในแนวแกน Z

การกระจายความเร็วของสารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียนในแนวแกน Z เป็นไปตามสมการที่ (3.3)

$$U = \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial z} y(y-h) + \delta \left[\frac{\partial P}{\partial z} \right]^3 \left[\frac{y^2}{4} - \frac{hy^3}{2} + \frac{3h^2y}{8} - \frac{h^3}{8} \right]$$

อัตราการไหลของสารหล่อลื่นคำนวณได้จากสมการ

$$Q = \int u da \tag{3.26}$$

หาอัตราการไหลออกด้านข้างของสารหล่อลื่นทั้งสองด้าน โดยการอินทิเกรตครอบคลุมความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นตามแนวเส้นรอบวงได้จากสมการ

$$Q = 2 \int_0^h \int_0^\pi u(R+Y) d\theta dy \tag{3.27}$$

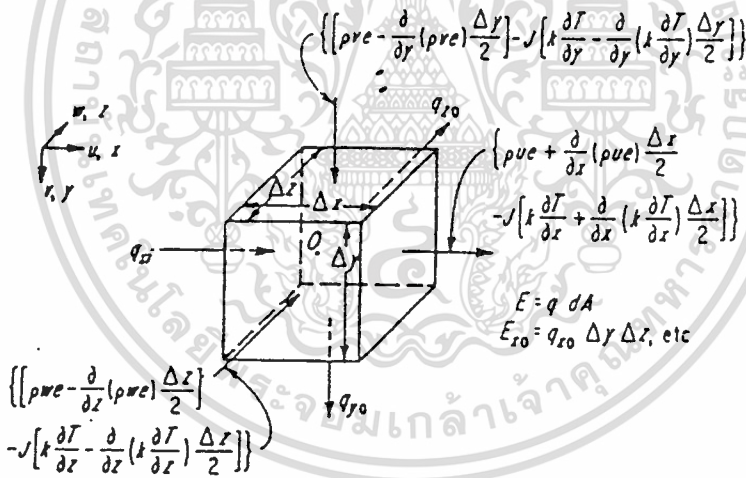
สมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารหล่อลื่น

ในการพิจารณาการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มของสารหล่อลื่น จะใช้หลักการของสมการพลังงาน จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิก ภายใต้สภาวะคงตัวสมดุลพลังงานบนปริมาตรควบคุมของก้อนปริมาตรสารหล่อลื่นดังภาพที่ 30 อธิบายดังสมการ

$$E_o - E_i = Hdo - Hdh \quad (3.28)$$

- เมื่อ E_i = พลังงานไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม
 E_o = พลังงานไหลออกจากปริมาตรควบคุม
 Hdo = งานจากสิ่งแวดล้อมกระทำต่อปริมาตรควบคุม
 Hdh = งานที่ปริมาตรควบคุมกระทำต่อสิ่งแวดล้อม

ภาพที่ 30



ภาพแสดงการส่งผ่านพลังงานผ่านผิวปริมาตรควบคุม

จากภาพที่ 30 พลังงานทั้งหมดที่ส่งผ่านผิวของปริมาตรควบคุม คือ

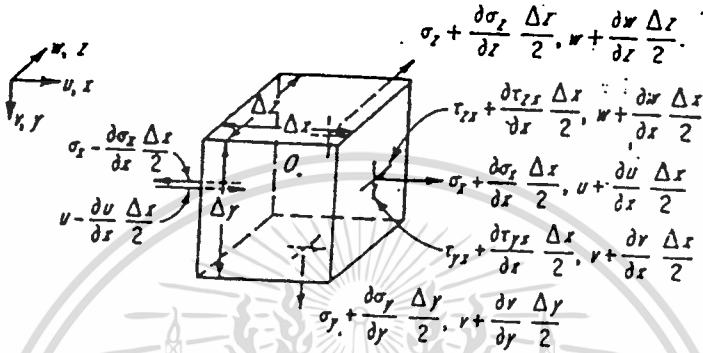
$$E_o - E_i = \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\partial(pue)}{\partial x} + \frac{\partial(pue)}{\partial y} + \frac{\partial(pue)}{\partial z} \right] \\ & - J \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \right\} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ e คือ พลังงานภายในซึ่งหาได้จากสมการ

$$e = \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + JcvT \tag{3.30}$$

ภาพที่ 31



ภาพแสดงการส่งผ่านพลังงานกลผ่านปริมาตรควบคุม

จากภาพที่ 31 พลังงานกลทั้งหมดที่ส่งผ่านผิวของปริมาตรควบคุม คือ

$$H_{do} - H_{ab} = \left[\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(u\sigma_x + v\tau_{yx} + w\tau_{zx}) + \frac{\partial}{\partial y}(u\tau_{xy} + v\sigma_y + w\tau_{zy}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}(u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\sigma_z) \end{aligned} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \tag{3.31}$$

แทนค่าสมการ (3.29) และ (3.31) ในสมการ (3.28) จะได้

$$\begin{aligned} &\rho \left[u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} + w \frac{\partial e}{\partial z} \right] - J \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \\ &= u \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) \\ &+ \left(\sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \tau_{xy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \tau_{zx} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{3.32}$$

สมมุติว่าแรงโน้มถ่วงมีผลต่อฟิล์มน้ำมันน้อยมากจึงให้แรงภายในมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\begin{aligned}\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}\end{aligned}\quad (3.33)$$

แทนค่าสมการ (3.30) และ สมการ (3.33) ลงในสมการ (3.32) จะได้

$$\begin{aligned}J\rho \left[u \frac{\partial (cvT)}{\partial x} + v \frac{\partial (cvT)}{\partial y} + w \frac{\partial (cvT)}{\partial z} \right] + P \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] \\ = J \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \phi\end{aligned}\quad (3.34)$$

เมื่อ ϕ คือ Dissipation Energy ดังนั้น

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]\quad (3.35)$$

เมื่อสมมุติให้ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นนั้นบางมากดังนั้นค่า Specific Heat (C_v) มีค่าคงที่ สมการพลังงานที่ 3.34 จะลดรูปลงเหลือ

$$J\rho C_v \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = J \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]\quad (3.36)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความหนืดกับอุณหภูมิได้มาจากการทดลอง ซึ่งผลจะอยู่ในรูปของสมการ Exponential ดังนี้

$$\mu = \mu_0 e^{-\alpha(T-T_0)} \tag{3.37}$$

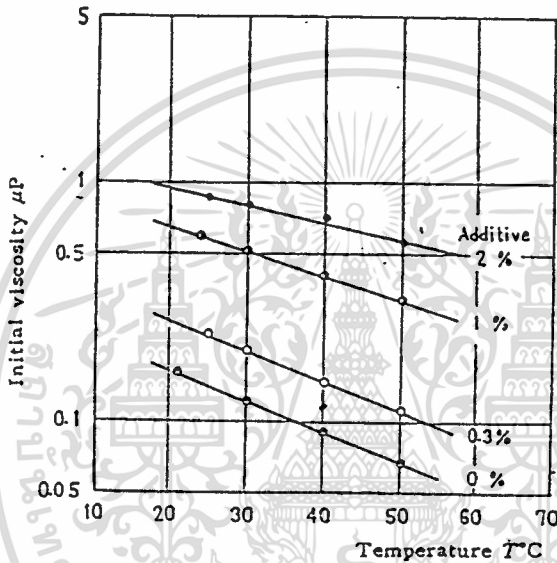
เมื่อ α คือ ค่าคงที่

T_0 คืออุณหภูมิอ้างอิง

เพื่อความสะดวกจึงมีการปรับปรุง สมการพลังงานให้มีลักษณะคล้ายกับสมการเรโนลด์

โดยสมมติให้ $T = T(x, z), P = P(x, z), v = 0$ ดังนั้น $\mu = \mu(x, z)$

ภาพที่ 32



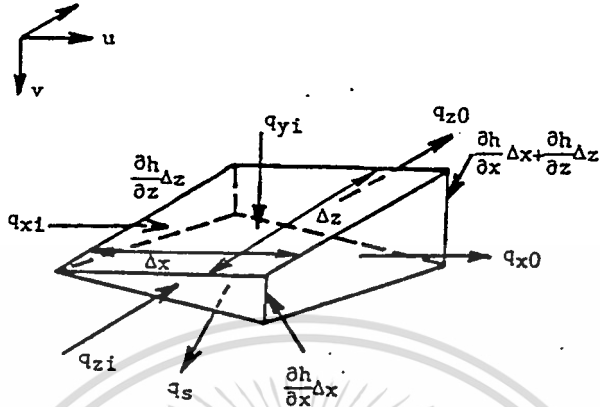
ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของสารหล่อลื่น

ภายใต้ข้อสมมุติฐานข้างต้นและอินทิเกรตสมการพลังงานที่ 3.36 ตลอดความหนาของฟิล์มน้ำมันจะได้

$$\begin{aligned} \rho C_v \int_0^h \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dy - J \int_0^h \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} dy - J \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_h - k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_0 \right) \\ = \mu \int_0^h \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} dy \end{aligned}$$

(3.38)

ภาพที่ 33



แสดงการนำความร้อนที่ขอบเขตผิวสัมผัสระนาบเอียง

จากภาพที่ 33 เทอมของการนำความร้อนอาจจะประเมินได้จากสมการ

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_h = k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_h + k \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_h + K_s (T - T_s)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_0 = K_r (T - T_r)$$

และ

$$\int_0^h \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} dy \tag{3.39}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(kh \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kh \frac{\partial T}{\partial z} \right) - k \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_h - k \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_h$$

เมื่อ T_s และ T_r คืออุณหภูมิที่แบร์ริงและเพลตามลำดับ k_s และ k_r คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนบริเวณรอยต่อของเพลากับผิวสัมผัสของเพลากับแบร์ริงตามลำดับภายใต้เงื่อนไขของสมการ

(3.38) องค์ประกอบของความเร็ว u และ w คือ

$$u = \frac{1}{2u} \frac{\partial P}{\partial x} y(y-h) + U \frac{y}{h} \tag{3.40}$$

$$w = \frac{1}{2u} \frac{\partial P}{\partial z} y(y-h)$$

จากสมการองค์ประกอบของความเร็วที่ (3.40) สามารถกระจายเทอมออกได้ดังนี้

$$\int \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} dy = \left[u \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_0^h + w \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)_0^h - \int_0^h u \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dy - \int_0^h w \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} dy + U \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_h - \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \int_0^h u dy - \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \int_0^h w dy \right]$$

แทนค่าผลที่ได้ลงในสมการ (3.38) จะได้สมการ Modified energy ดังนี้

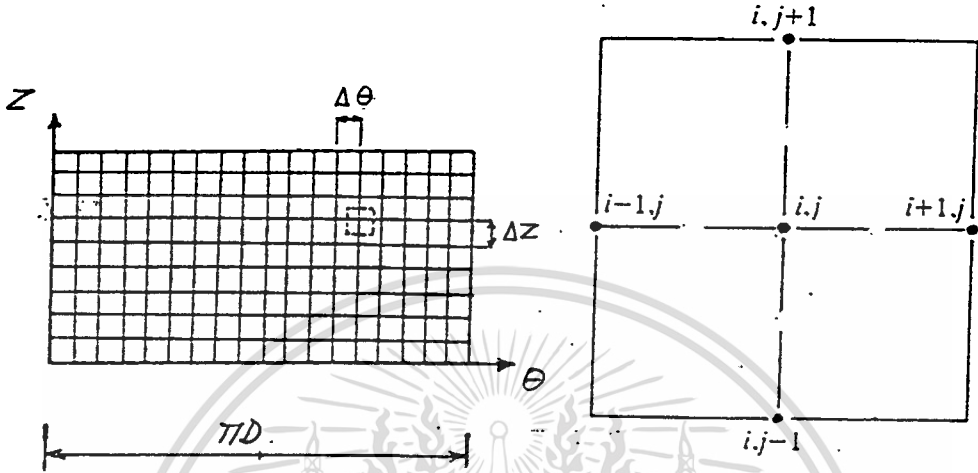
$$\rho J C_v \left\{ \left(\frac{hU}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right\} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(hk \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hk \frac{\partial T}{\partial z} \right) + K_s (T - T_s) \right] + K_r (T - T_r) + \frac{\mu U^2}{h} + \frac{h^3}{12\mu} \left\{ \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (3.41)$$

เมื่อสมมุติให้เพลลาและแบร์ริงเป็นฉนวนความร้อน งานและความร้อนจะถ่ายเทต่อฟิล์มสารหล่อลื่นเท่านั้น ดังนั้นสมการที่ 3.41 จะเปลี่ยนรูปเป็นสมการ Adiabatic Energy คือ

$$\frac{\rho J c_v}{R} \left[\frac{hu}{2} - \frac{h^3}{12\mu R} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{h^3}{12\mu R^2} \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right]^2 + \frac{\mu^2}{h} \quad (3.42)$$

การคำนวณผลของการกระจายอุณหภูมิโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference)

ภาพที่ 34



ภาพแสดงรูปแบบการคำนวณด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{P_{i+1,j} - P_{ij}}{\Delta \theta}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{T_{i+1,j} - T_{ij}}{\Delta \theta}$$

จากสมการพลังงานที่ 3.42 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการผลต่างสี่เหลี่ยมได้ดังนี้

$$A \left\{ B - C \frac{\partial P}{\partial \theta} \right\} \frac{\partial T}{\partial \theta} = C \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^2 + D \tag{3.43}$$

เมื่อ

$$A = \frac{\rho J c_v}{R}$$

$$B = \frac{hu}{2}$$

$$C = \frac{h^3}{12 \mu R}$$

$$D = \frac{\mu u^2}{h}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{T_{i+1,j} - T_y}{\Delta \theta} = \frac{\left\{ C \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^2 + D \right\}}{A \left(B - C \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)} \quad (3.44)$$

$$T_{i+1,j} = T_y + \left\{ \frac{\left(C \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^2 + D \right)}{A \left(B - C \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)} \right\} \Delta \theta \quad (3.45)$$

จากเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ทางเข้าจะเท่ากับอุณหภูมิห้อง

$$T_{1,j} = T_{ROOM} = 25 \text{ C}$$

เขียนโปรแกรมคำนวณผลได้ดังแสดงในภาพที่ 36 และ 37

จากสมการ (3.45) จะได้อุณหภูมิ T_{max} จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Temperature distribution ความแตกต่างของอุณหภูมิ จะได้จากสมการ

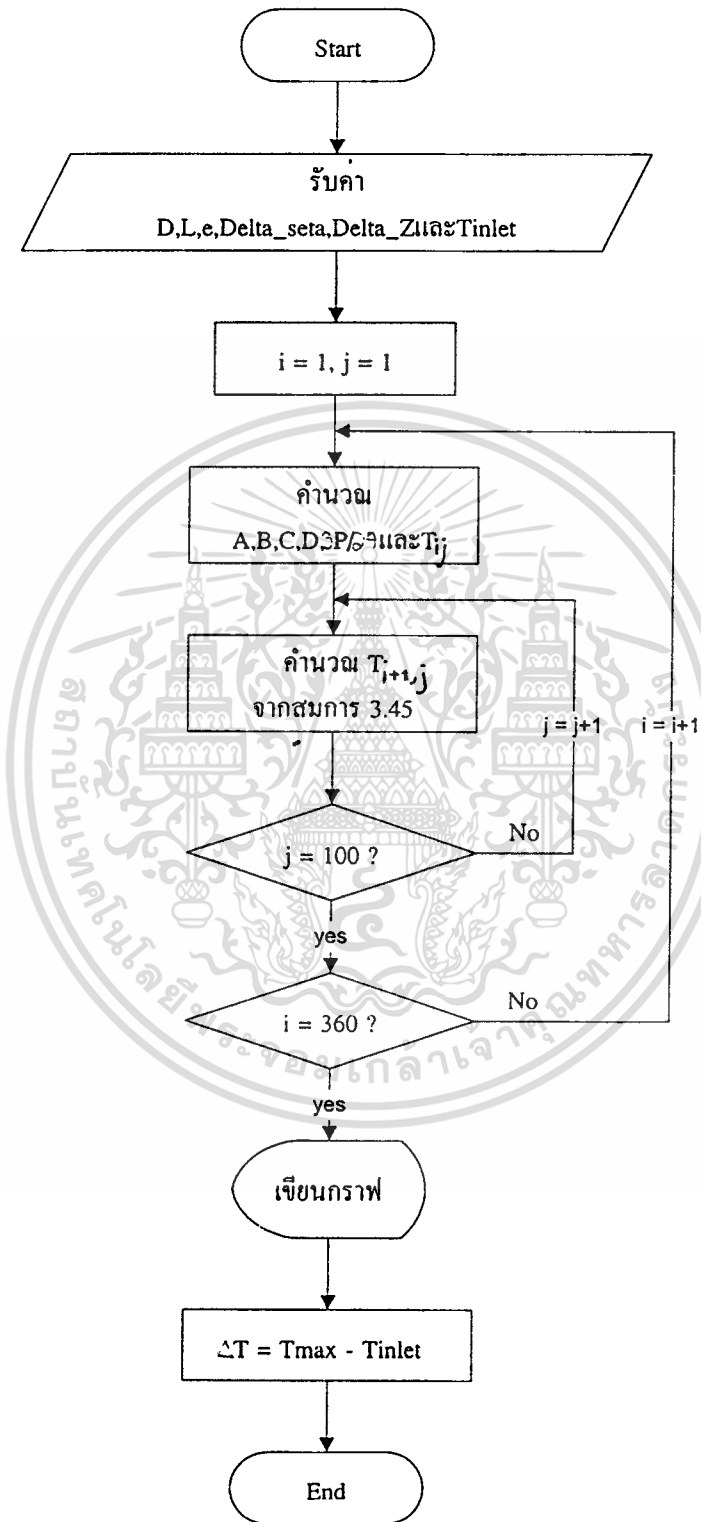
$$\Delta T = T_{max} - T_{inlet} \quad (3.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบเจอนัลเบริงเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุดเราจะต้องหาค่าความยาว (L) และขนาดวัดผ่านศูนย์กลางของเบริง (D) ตลอดจนค่าระยะห่างระหว่างเพลากับเบริง (C) ที่เหมาะสมที่สุดโดยให้อัตราการไหลของสารหล่อลื่น (Q) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) มีค่าน้อยที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการหาค่าที่สภาวะดีที่สุดด้วยวิธีการ Optimization ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

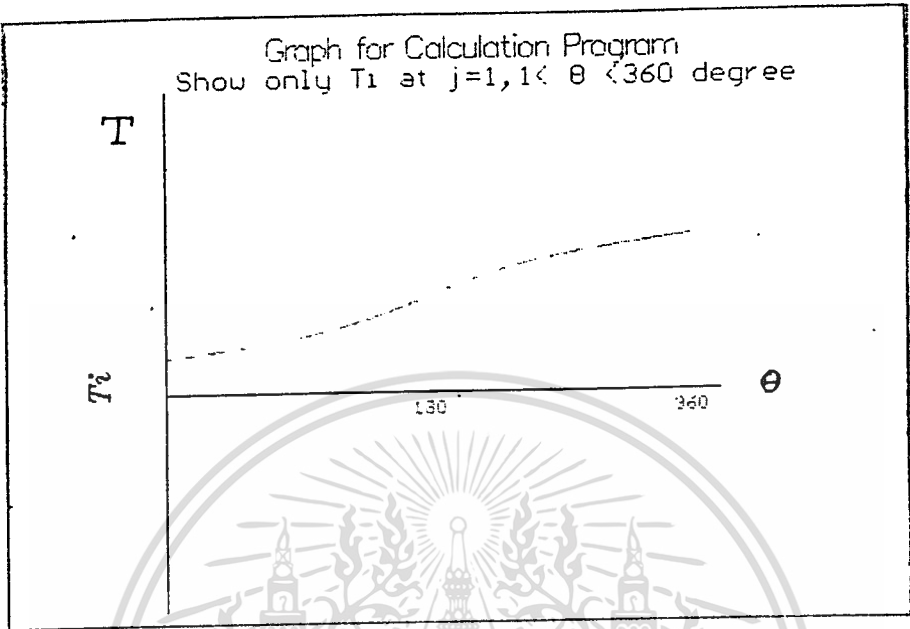


ภาพที่ 35



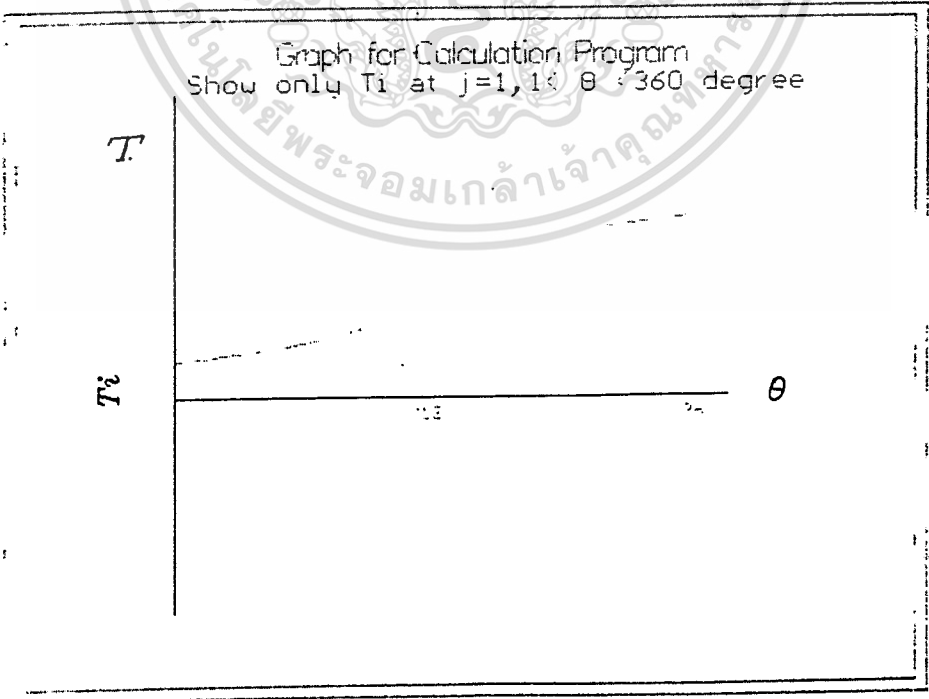
แสดง Flow chart การคำนวณหาการกระจัดอุณหภูมิของสารหล่อลื่น

ภาพที่ 36



แสดงการกระจายอุณหภูมิเมื่อค่า $\epsilon = 0.5$

ภาพที่ 37



ภาพแสดงการกระจายอุณหภูมิเมื่อค่า $\epsilon = 0.7$

บทที่ 4

วิธีการทำออฟติไมเคชัน

(Optimization Method)

การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจำเป็นต้องหาค่าที่เหมาะสมที่สุด(Optimum Value) ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้น ทั้งนี้เพื่อการประหยัดและมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดปัจจุบันนิยมใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ(Computer aids design optimization) การออกแบบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดมีอยู่หลายวิธี ค่าความแม่นยำของผลเฉลยตลอดจนข้อดีข้อเสียแต่ละวิธีไม่เหมือนกัน บางวิธีอาจเหมาะสมกับที่จะใช้กับปัญหาหนึ่งแต่ไม่เหมาะสมกับอีกปัญหาหนึ่ง ดังนั้นผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดกับปัญหานั้นๆ สำหรับในวิชานี้พันธฉบับนี้จะเลือกใช้วิธีการกำจัดพื้นที่(Area Elimination)

รูปแบบมาตรฐานการออกแบบด้วยวิธีออบติไมเคชัน (Standard design optimization)

ในการออกแบบเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดโดยวิธีการทำ Optimization นั้นโดยทั่วไป มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนด Objective function แล้วเลือกหาวิธีการ Optimization ที่เหมาะสมที่สุด
2. ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดตัวแปรออกแบบ(Design variables) ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

เหมาะสมที่สุด

3. กำหนดสมการบังคับ(Constraints equations) แล้วตรวจสอบค่าตัวแปรต่างๆ ให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของสมการบังคับ

4. กำหนดค่า Objective function และค่าตัวแปรออกแบบ(Design variables) หลายๆ ค่า ในที่สุดเลือกค่าที่สภาวะดีที่สุด

รูปแบบทั่วไปของสูตรทางคณิตศาสตร์ในการทำ Optimization

$$\text{Minimize } F(x) \quad \text{Objective function} \quad (4.1)$$

โดยมีเงื่อนไขว่า

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{equality constraints} \quad (4.2)$$

$$g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{inequality constraints} \quad (4.3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad \text{side constraints} \quad (4.4)$$

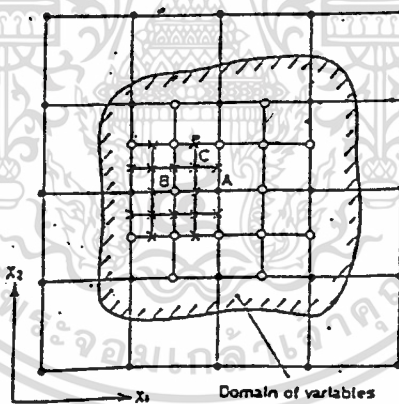
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $x = (x_1, \dots, x_n)$ เป็น vector ของตัวแปรออกแบบ (design variables) และ side constraints เป็นขอบเขตของตัวแปรออกแบบที่เป็นค่าต่ำสุด (x_i^L) และค่าสูงสุด (x_i^U) โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (Constraint function) อาจเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

การออฟติไมซ์เซชันด้วยวิธีการกำจัดพื้นที่ (Area Elimination) เป็นวิธีการแบ่งพื้นที่ออกเป็นช่วงๆ (Grid search) เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือได้ สำหรับเทคนิคของวิธีนี้คือการลดขอบเขตของตัวแปรออกแบบโดยการแบ่งช่วงของตัวแปรออกแบบแต่ละตัวออกเป็นช่วงย่อยๆ หลายๆ ช่วง จากนั้นก็ลากเส้นให้ตัดกันจะได้ลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ หลายๆ ช่องคล้ายตาข่าย จุดตัดแต่ละจุดจะให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ที่แตกต่างกันแต่จะมีค่าหนึ่งทีน้อยที่สุดจากนั้นก็ทำการลดขอบเขตของตัวแปรออกแบบให้เข้าใกล้จุดที่มีค่าน้อยที่สุดแล้วทำการแบ่งช่วงของตัวแปรออกแบบออกเป็นช่วงย่อยๆ ตามวิธีการเดิมจนกว่าจะได้ค่า Objective function ที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะให้ค่าผลเฉลยของตัวแปรออกแบบที่เหมาะสมที่สุดตามต้องการ

ภาพที่ 38



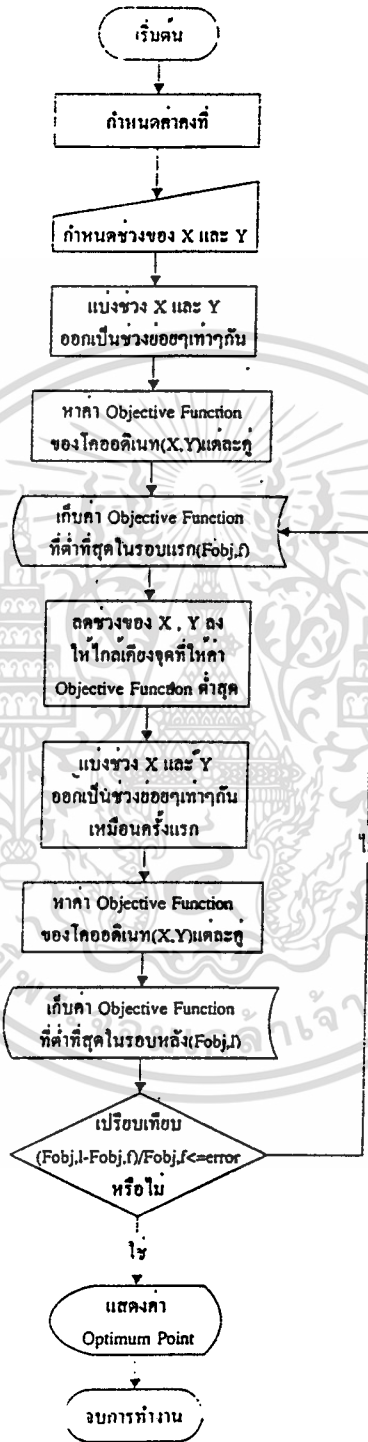
ภาพแสดงถึงวิธีการออฟติไมซ์เซชัน โดยการกำจัดพื้นที่

จากภาพที่ 38 ขั้นแรกทำการแบ่งช่วงเท่าๆกันของแต่ละตัวแปรอย่างหยาบๆ โดยเริ่มจากค่าขอบเขตทั้งสองข้างของตัวแปรออกแบบทั้งสอง แล้วจึงคำนวณค่า Objective Function แต่ละค่าจากรูป สมมุติว่าจุด A จะให้ค่า Objective Function ต่ำที่สุดสำหรับการแบ่งพื้นที่ครั้งแรก แล้วทำการแบ่งขอบเขตด้วยวิธีการเดิมโดยลดขอบเขตของตัวแปรดังรูป แล้วหาค่า Objective Function แต่ละจุดอีกครั้ง สมมุติว่าค่า Objective Function ที่จุด B เป็นค่าต่ำที่สุด จากนั้นก็ลดขอบเขตพื้นที่และแบ่งช่วงตามวิธีการเดิมดังรูป สมมุติที่จุด C เป็นจุดที่ให้ค่า Objective Function ต่ำสุด ทำการแบ่งและลดขอบเขตในลักษณะนี้จนกว่าจะได้ค่าตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 39



ภาพแสดง Flow chart แสดงการทำ Optimization สมการ Paraboloid แบบ Grid Search

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมและการทดสอบโปรแกรม

เขียนโปรแกรมตาม Flow chart ดังภาพที่ 39 จากนั้นก็ทำการทดสอบโปรแกรมโดยเลือกตัวอย่าง Function Paraboloid มาทำการทดสอบ นั่นคือ

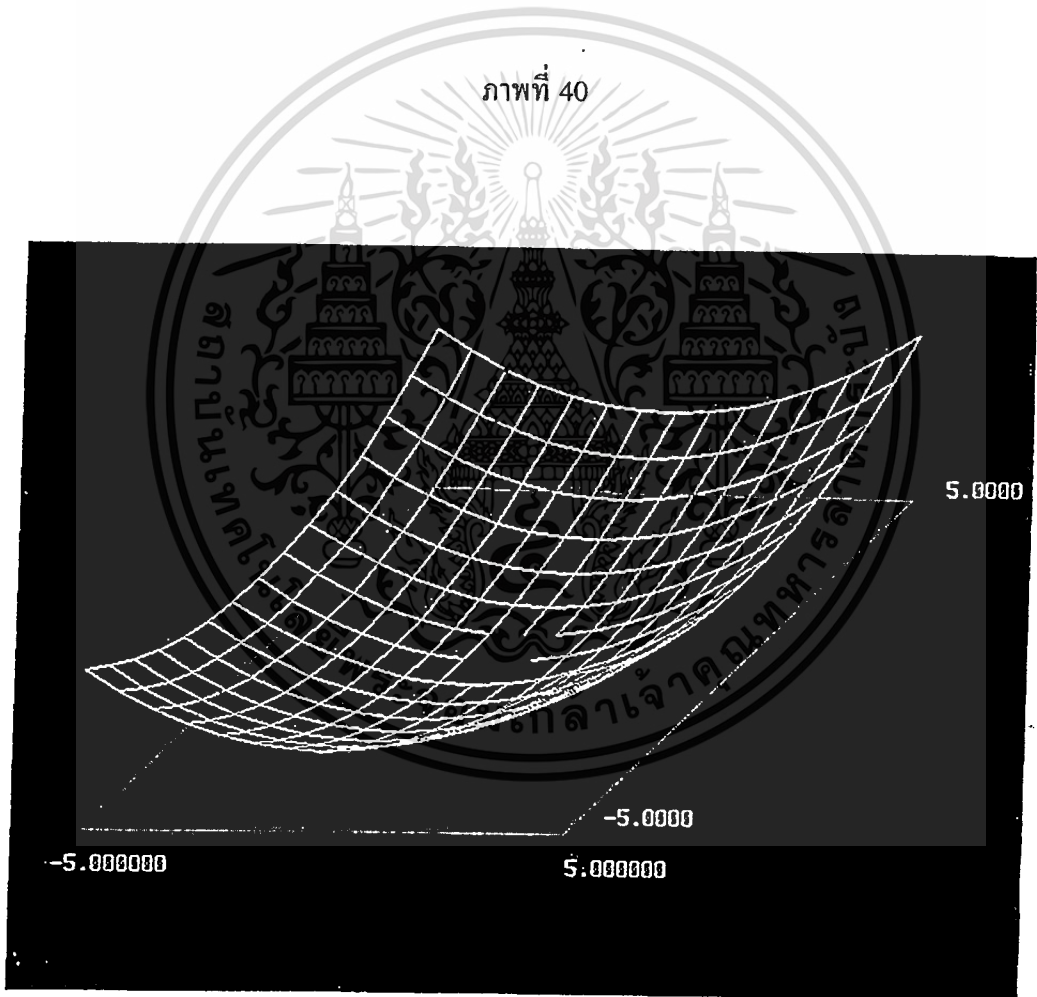
$$\text{Minimize } F(x,y) = x^2 + y^2$$

ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนี้จะอยู่ที่จุด (0,0) เมื่อกำหนดขอบเขตของตัวแปรดังนี้

$$-5 \leq x \leq 5$$

$$-5 \leq y \leq 5$$

ผลการทดสอบโปรแกรมได้ดังภาพที่ 40



ผลของการทดสอบโปรแกรม $\text{Minimize } F(x,y) = x^2 + y^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การออกแบบเจอนัลแบริงที่สภาวะดีที่สุดเมื่อใช้สารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียน (Optimum Design of Journal Bearings with Non-newtonian lubricants)

เจอนัลแบริงมักจะใช้รองรับเพลานในเครื่องจักรที่มีความเร็วรอบสูง เช่น ในเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์และในคอมเพรสเซอร์ เป็นต้น หลักการของเจอนัลแบริงคือ เพลาจะหมุนอยู่ในปลอกของแบริง ระหว่างเพลากับแบริงจะมีฟิล์มสารหล่อลื่นคั่นอยู่ เมื่อเพลาหมุน ฟิล์มของสารหล่อลื่นจะมีความดันยกเพลาให้ลอยตัวขึ้น เพื่อป้องกันการเสียดสีระหว่างเพลากับแบริง ในการออกแบบเจอนัลแบริง ผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาถึงชนิดของสารหล่อลื่นที่ใช้ พร้อมกับกำหนดค่าภาระที่ใช้ (P) ความเร็วรอบของเพลาน (N) รัศมีของเพลาน (R) ความยาวของแบริง (L) และค่าระยะห่างระหว่างเพลากับแบริง (C) ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน หากกำหนดค่าต่างๆ เหล่านี้ไม่เหมาะสม หรือผู้ผลิตทำชิ้นงานออกมาไม่ได้ขนาดตามที่กำหนด จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรลดลง เช่น อาจเกิดความร้อนสูงที่ระบบเพลานของเครื่องจักร ทำให้เพลานสึกหรอ อายุการใช้งานสั้นลง หรืออาจเกิดความไม่เสถียรในระบบเพลานได้ ปัญหาดังกล่าว ผู้ออกแบบอาจแก้ไขได้โดยการทำ Optimization เพื่อให้ได้ค่าต่างๆ เหมาะสมที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เราต้องการออกแบบเจอนัลแบริงเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดเมื่อใช้สารหล่อลื่นนิวโทเนียนและสารหล่อลื่นนอนนิวโทเนียน ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ในที่นี้เราต้องการกำหนดค่าตัวแปรออกแบบ Clearance (C) และ Slenderness (λ) ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ΔT) และอัตราการไหล (Q) ของสารหล่อลื่นมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } F(C, \lambda) = \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 Q$$

โดยที่ ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้มาจากสมการที่ 2.16

$$\Delta T = \Delta T_{\max} - \Delta T_{\text{inlet}}$$

และ Q = อัตราการไหลของสารหล่อลื่น ได้มาจากสมการที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α_1 = weighting factors ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

α_2 = weighting factors ของอัตราการไหลของสารหล่อลื่น

สมการบังคับ (Constraints)

เพื่อให้ได้ผลตรงเป้าหมายแม่นยำเร็วขึ้น จึงได้กำหนดขอบเขตไว้ด้วยสมการบังคับดังนี้คือ

$$0.0001 \leq C \leq 0.1$$

$$0.10 \leq \lambda \leq 0.25$$

$$\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$$

$$\mu \geq \mu_{\min}$$

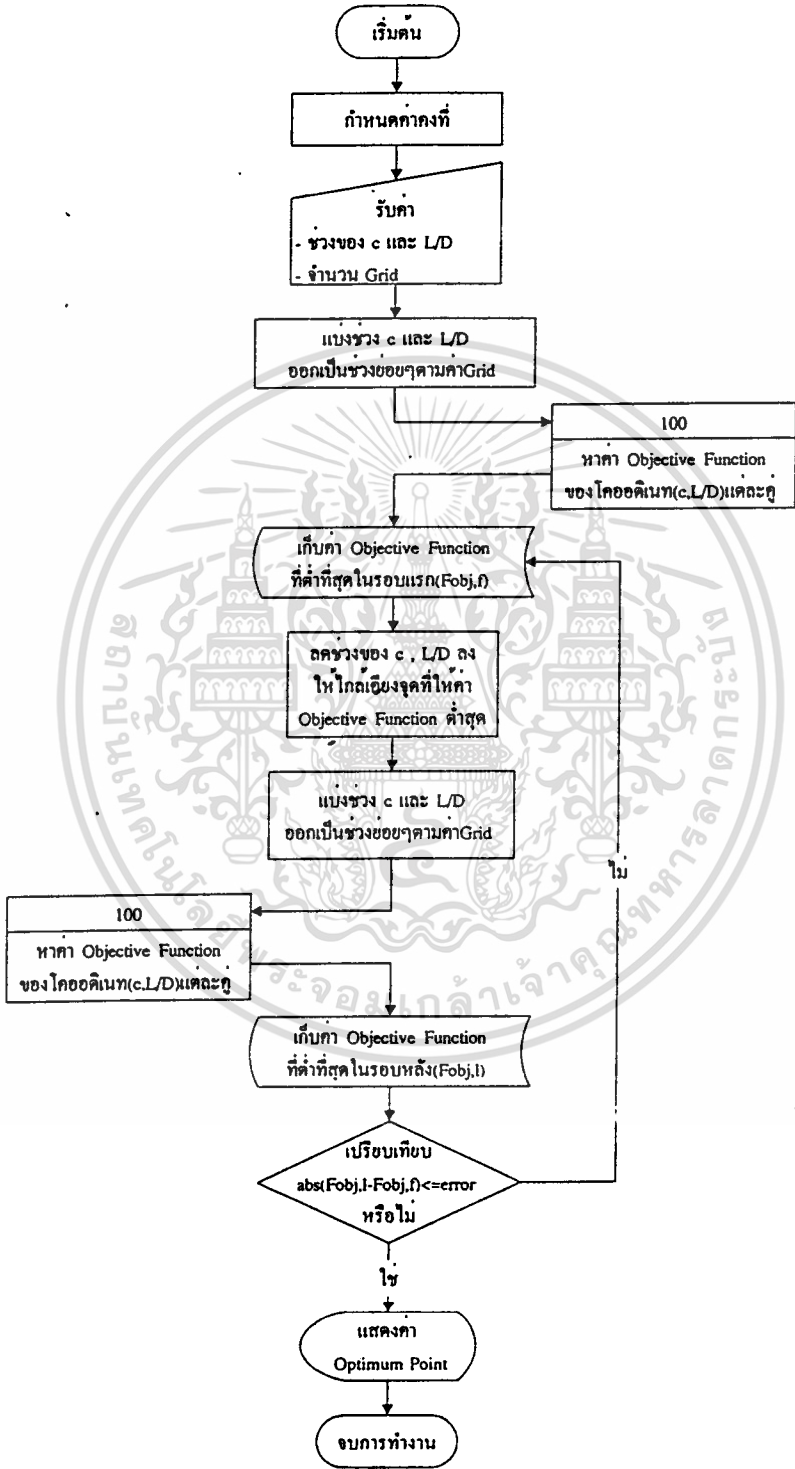
$$\Delta T \leq \Delta T_0$$

$$h \geq h_0$$

การทำ Optimization เจอนัลเบริง

เขียนโปรแกรม Optimization แบบ Area Elimination ตาม Flow chart ดังแสดงในภาพที่ 41 เมื่อกำหนดให้ค่า $0.0001 \leq C \leq 0.10$ ค่า $0.1 \leq \lambda \leq 0.25$ และสารหล่อลื่นที่ใช้มีค่าความหนืด (μ) = 0.02 N.S/m^2 ค่าความร้อนจำเพาะเมื่อปริมาตรคงที่ (C_v) = 1.76 kJ/kg.K และค่าความหนาแน่น (ρ) = 860 kg/m^3 เฟลาหมุนด้วยความเร็วรอบ = 50, 100, 200 และ 300 rpm ผลที่คำนวณได้จากโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 43-47

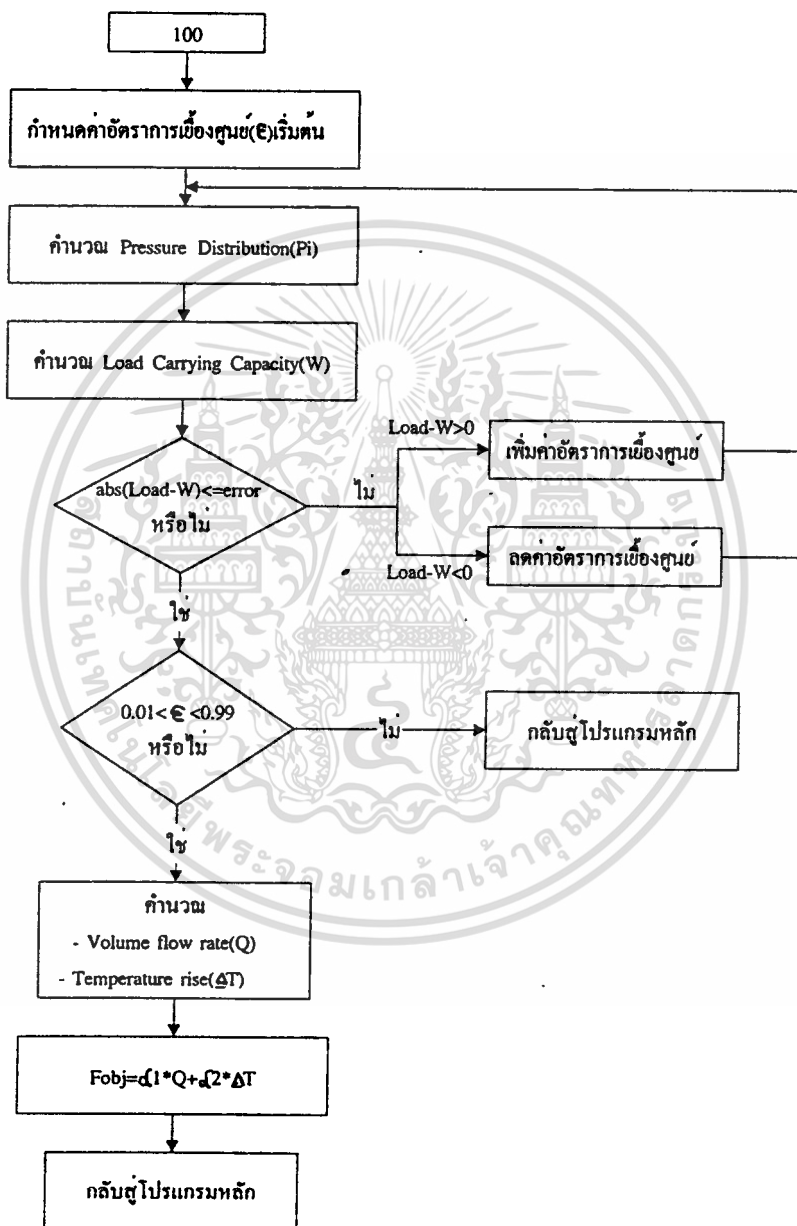
ภาพที่ 41



Flow Chart แสดงการทำ Optimization เอนัลแบริงแบบ Grid Search

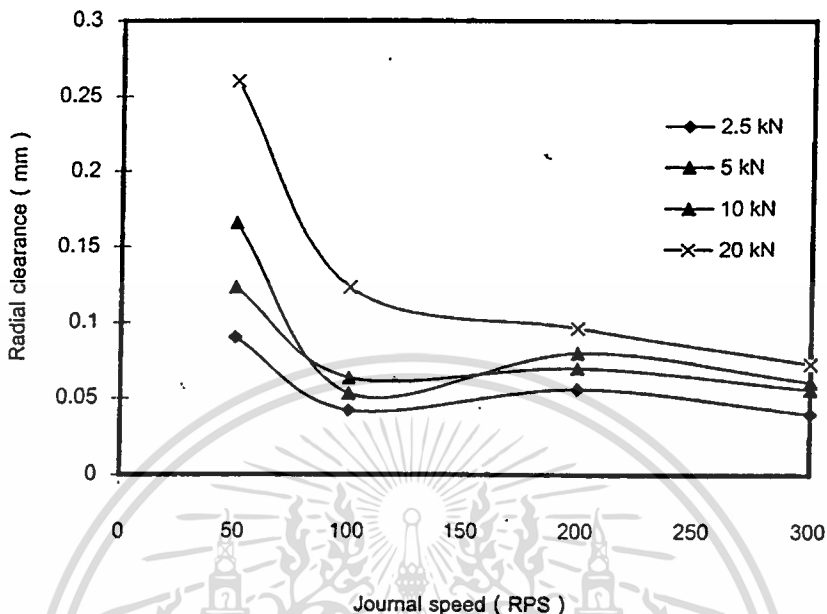
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 42



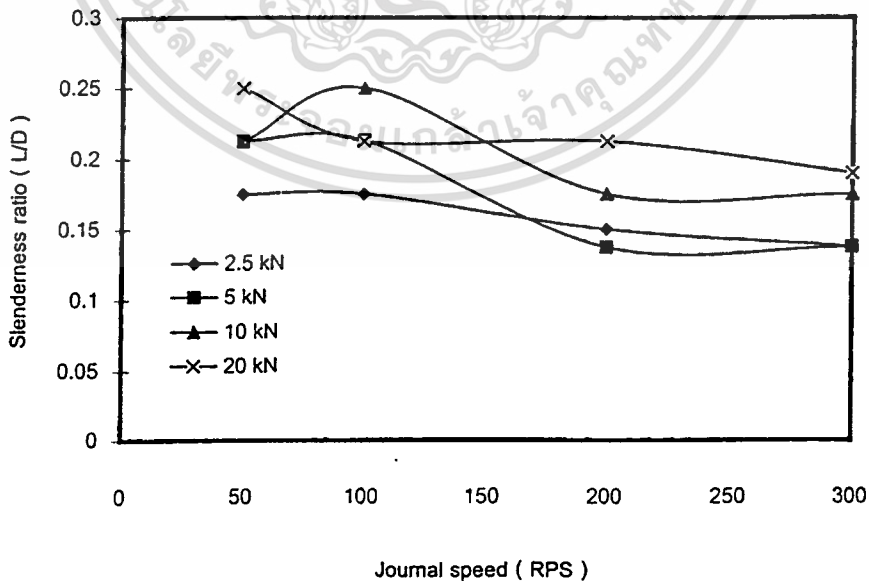
แสดง Flow Chart Sub Program

ภาพที่ 43



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Radial clearance(c) กับ Journal speed ที่ค่าภาระต่างๆ

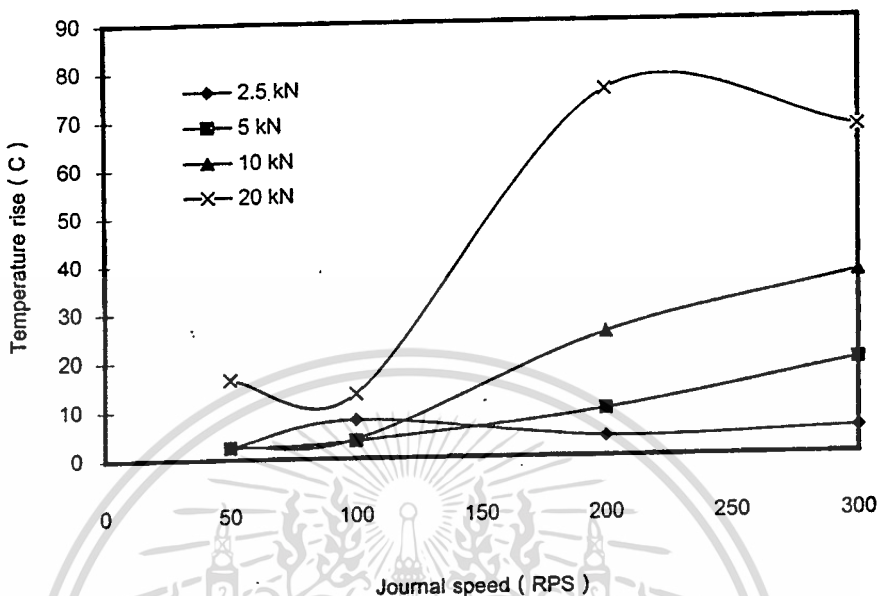
ภาพที่ 44



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง slenderness ratio(L/D) กับ Journal speed ที่ค่าภาระต่างๆ

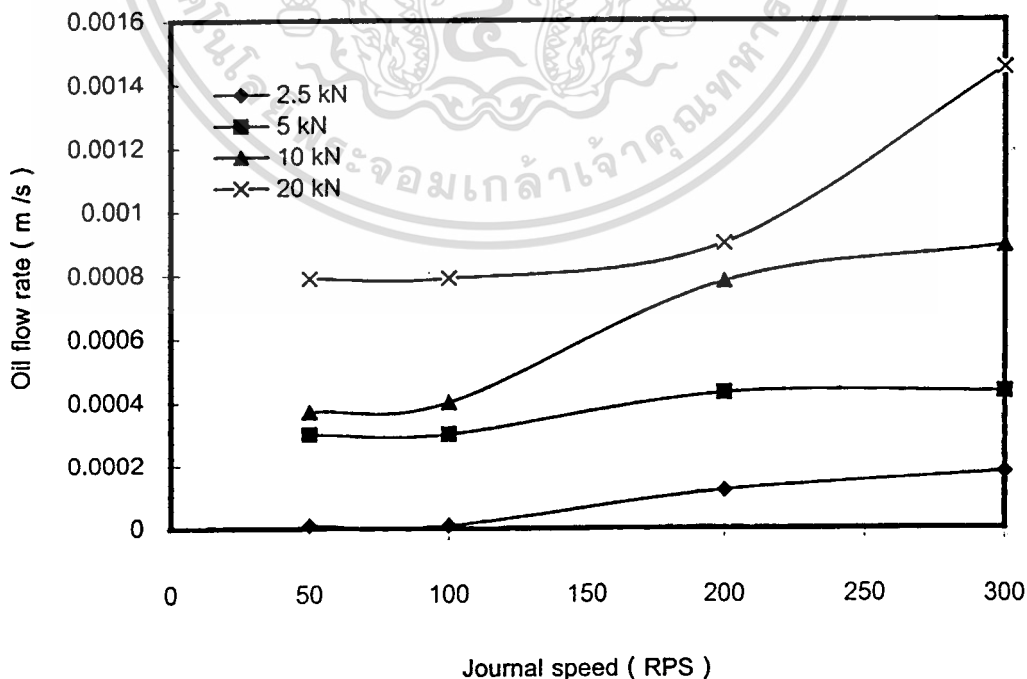
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45



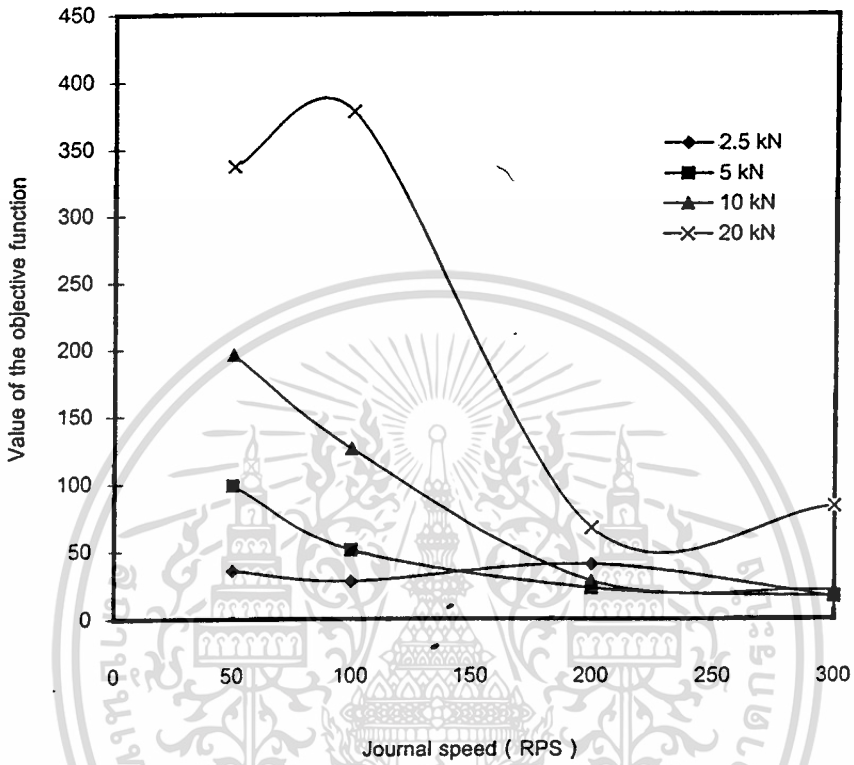
ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Temperature rise (ΔT) กับ Journal speed ที่ค่าภาระต่างๆ

ภาพที่ 46



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Oil flow rate (Q) กับ Journal speed ที่ค่าภาระต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 47



ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ Objective function กับ Journal speed ที่ค่าภาระต่างๆ

บทที่ 6

สรุปและขอเสนอแนะ

โปรแกรมที่ใช้ในการทำ Optimization แบบ Area Elimination ได้ทดสอบด้วยฟังก์ชัน Paraboloid ซึ่งผลการทดสอบโปรแกรมให้ค่าฟังก์ชันต่ำสุดที่จุด $x = 0, y = 0$ ฉะนั้นจึงน่าจะเชื่อได้ว่าวิธีการที่ใช้น่าจะเหมาะสม ในกรณีของเจอนัลแบริงที่ใช้สารหล่อลื่นนอนนิวโทเนียนยังไม่ปรากฏว่ามีผู้ใดได้เขียนโปรแกรม Optimization เอาไว้ อันเนื่องมาจากการวิเคราะห์หาอัตราการไหล (Q) และค่า (Δt) ยังไม่มีผู้ใดกำหนดได้ชัดเจน สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้วิเคราะห์หาค่าอัตราการไหล (Q) โดยเริ่มจากการพัฒนาสมการเรโนลด์ภายใต้ข้อสมมุติฐานให้เจอนัลแบริงเป็นแบบสั้น นั่นคือค่า L/D ไม่เกิน 0.25 การวิเคราะห์การไหลจะพิจารณาการไหลออกด้านข้างเท่านั้น และการไหลของสารหล่อลื่นเป็นแบบ Laminar flow ภายใต้สภาวะคงตัว จากนั้นก็หาค่าการกระจายความความดัน (P) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) โดยวิธี Analytical method และ วิธี Finite difference แล้วจึงนำค่าความดันไปคำนวณหาค่าการกระจายความเร็วการไหลออกด้านข้างของสารหล่อลื่น (U) แล้วจึงคำนวณหาค่าอัตราการไหล (Q) แล้วจึงนำค่า (Q) และ (ΔT) ไปใช้ในโปรแกรม Optimization

ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมสามารถสรุปได้ดังนี้

จะเห็นว่าที่ค่า Journal speed สูงๆ ค่า Radial clearance จะต่ำลงโดยเริ่มและที่ภาระ Load สูง จะให้ค่า Radial สูงตามไปด้วย และมีแนวโน้มจะใกล้เคียงกันที่ความเร็วสูงๆ อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 43 หากเปรียบเทียบค่า Slenderness ratio (L/D) กับค่า Journal speed จะเห็นว่า มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยที่ความเร็วรอบสูงและที่ค่า Load สูงๆ ค่า L/D ก็มีค่าสูงด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 44 การกระจายของอุณหภูมิจะมีแนวโน้มสูงขึ้นที่ความเร็วสูงๆ หากสังเกตดูกับผลที่กระทำกับสารหล่อลื่นนิวโทเนียน จะเห็นว่า การเพิ่มของอุณหภูมิในกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นนอนนิวโทเนียน จะเพิ่มขึ้นช้ากว่า ดังแสดงในรูปที่ 45 อัตราการไหลของสารหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้นที่ Journal speed สูงๆ และที่ Load มาก ก็ต้องใช้อัตราการไหลมากขึ้นตามไปด้วย แต่แนวโน้มในการเพิ่มจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับในกรณีที่ใช้สารหล่อลื่นนิวโทเนียน ดังแสดงในรูปที่ 46 เมื่อเปรียบเทียบค่า Objective function กับค่า Journal speed จะเห็นว่าที่ค่า Journal Speed มากๆ ค่า Objective function จะลดลง Stability ถ้าเป็นสารหล่อลื่นนอนนิวโทเนียน ที่ 0 ค่าสูงๆ จะไม่เสถียร เป็นผลทำให้ไม่สามารถแก่สมการได้ ถ้าไปวิเคราะห์ช่วง Transient จะเห็นชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อย่างไรก็ตาม หากทำการทดสอบเพื่อให้เกิดความมั่นใจยิ่งขึ้นว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมมีความน่าเชื่อถือเพียงใดนั้น อาจจำเป็นต้องเขียนโปรแกรมทำ Optimization ในหลายๆวิธีมาเปรียบเทียบผลที่ได้ว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด และอาจทำการทดลองเปรียบเทียบด้วย หากผลที่ได้สอดคล้องกันน่าจะเชื่อถือได้ว่าผลการวิเคราะห์และโปรแกรมการคำนวณมีความถูกต้องเชื่อถือได้



บรรณานุกรม

1. Hashimoto, H. and M. Mongkolwongrojn "Dynamic Behaviour of Short Elliptical Journal Bearings With Non-Newtonian" การสัมมนาวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 5 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2534.
2. Bourgin, J.M. Francois and B. Gay "Numerical Solution of A Non-Newtonian Film Flow".
3. EZZAT, H. " Optimum Design of Hydrodynamic Journal Bearings" M. Sc. Thesis, The University of Wisconsin 1967.
4. JASBIR S. ARRORA "Introduction to Optimum Design" McGrawHill, Inc. 1989.
5. Hashimoto, H. and Kato Y. "A Study of the Characteristic Analysis of High-speed Journal Bearings" JSME International Journal. 1987.
6. Hashimoto, H. and M. Mongkolwongrojn, "Adiabatic Approximate Solution for Static and Dynamic Characteristics of Turbulent Partial Journal Bearing with Sureface Roughness Effect", Proceeding of ASME/STLE Tribology Conference, San Diego California, October 18-21,1992
7. Mischke, C. R. An Introduction to Computer-Aided Design. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1968. (Mechanical Engineering Department, Iowa State University, Ames, Iowa 50010.)



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Program Pressure_Distribution;
uses dos,crt,graph;
const j_max = 100;
var P_para,P_para_b_i,P_para_2,P_para_temp,T_temp,T:array[1..j_max]of real;
    G_seta,GZ,E,delta_seta,delta_z,lamda,L,D:real;
    const1,const2,const3,Term_A,Term_B,Term_B_2:real;
    i_run,j_run,k,m,count_i:longint;
    grDriver,grMode : integer;
    ErrCode:integer;
    u,mew,J,dens,cv,w,difP,Clear:real;
    A,B,C,DE:real;
{-----Functions-----}
function ha(z:integer;Er,delta_a:real):real;
var ha_v:real;
begin
    ha_v:=(z-0.5)*delta_a;
    ha:=Clear*(1+Er*(cos(ha_v*pi/180)));
end;

function ha_3(ha_t:real):real;
begin
    ha_3:=ha_t*ha_t*ha_t;
end;
{+++++}
function hb(z:integer;Er,delta_b:real):real;
var hb_v:real;
begin
    hb_v:=(z+0.5)*delta_b;
    hb:=Clear*(1+Er*(cos(hb_v*pi/180)));
end;

function hb_3(hb_t:real):real;
begin
    hb_3:=hb_t*hb_t*hb_t;
end;
{+++++}
function he(z:integer;Er,delta_e:real):real;
var he_v:real;
begin
    he_v:=z*delta_e;
    he:=Clear*(1+Er*(cos(he_v*pi/180)));
end;

function he_3(he_t:real):real;
begin
    he_3:=he_t*he_t*he_t;
end;
{+++++}

function hf(z:integer;Er,delta_f:real):real;
var hf_v:real;
begin
    hf_v:=z*delta_f;
    hf:=Clear*(1+Er*(cos(hf_v*pi/180)));
end;

```

```

function hf_5(hf_t:real):real;
begin
  hf_5:=hf_t*hf_t*hf_t*hf_t*hf_t;
end;
{+++++}
function sub1_Term_A:real;
begin
  Sub1_Term_A:=((he_3(he(i_run,E,delta_set)))/24)*const1;
end;

function sub1_Term_B:real;
begin
  Sub1_Term_B:=((he_3(he(i_run,E,delta_set)))/48)*const1*P_para_b_i[j_run];
end;

function Sub2_Term_B:real;
var Temp_sub2_b:real;
begin
  if j_run>1
  then Temp_sub2_b:=P_para[j_run-1]
  else Temp_sub2_b:=0;
  Sub2_Term_B:=((he_3(he(i_run,E,delta_set)))/48)*const1*Temp_sub2_b;
end;

function Sub3_Term_B:real;
begin
  Sub3_Term_B:=const3*(hb(i_run,E,delta_set)-ha(i_run,E,delta_set));
end;

function Sub3_term_B_2:real;
begin
  Sub3_Term_B_2:=const2*((hf_5(hf(i_run,E,delta_set)))/1280);
end;

{-----procedure-----}
procedure init_para;
var ll:1..j_max;
begin
  for ll:=1 to j_max do
  begin
    P_para[ll]:=0;
    P_para_b_i[ll]:=0;
    T_temp[ll]:=25;
    T[ll]:=25;
  end;
  mew :=0.0000001;
  cv :=0.01;
  dens :=1000;
  J :=100;
  Clear :=0.001;
  w :=100;
  const1 :=0;
  const2 :=0;
  const3 :=0;
  count_i:=0;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

procedure In_data;
begin
  writeln;
  writeln(' ***** Please enter parameter for compile *****');
  writeln;
  write('   Enter Dimeter  : ');
  readln(D);
  write('   Enter length  : ');
  readln(L);
  write('   Enter Ebselon  : ');
  readln(E);
  write('   Enter Delta_set: ');
  readln(delta_set);
  write('   Enter Delta_z  : ');
  readln(delta_z);
end;

procedure Initialize;
begin
  grDriver := detect;
  InitGraph(grDriver,grMode,'c:\lang\tp7\bgi');
  ErrCode:=Graphresult;
  if ErrCode = grOk then
  begin
    Setbkcolor(7);
    SetfillStyle(1,15);
    Bar(10,10,GetmaxX-10,GetMaxY-10);
    SetFillStyle(1,15);
    Bar(2,2,GetMaxX-2,7);
    Bar(2,2,7,GetMaxY-2);
    Bar(GetMaxX-7,2,GetMaxX-2,GetMaxY-2);
    Bar(2,GetMaxY-7,GetMaxX-2,GetMaxY-2);
    Setcolor(13);
    SetTextStyle(6,0,3);
    OutTextXY(190,13,'Graph for Calculation Program');
    Setcolor(12);
    SetTextStyle(2,0,7);
    OutTextXY(130,40,'Show only Pi at  $j=1, 1 < \epsilon < 360$  degree');
    Setcolor(9);
    Line(120,60,120,420);
    Line(120,270,500,270);
    Setcolor(14);
    SetTextStyle(7,1,2);
    OutTextXY(60,250,' $\pi$ ');
    Setcolor(10);
    SetTextStyle(2,0,5);
    OutTextXY(470,273,'360');
    OutTextXY(290,273,'180');
    SetTextStyle(7,0,2);
    OutTextXY(530,255,' $\epsilon$ ');
  end
  else
    Writeln('Graphics error: ',GraphErrorMsg(ErrCode));
end;

```

```

procedure Cal_const;
begin
  const1:=(D/(L*delta_z))*(D/(L*delta_z));
  const2:=(D/L)*(D/L)*(D/L)*(D/L);
  const3:=1/(2*delta_set);
  u:= w*D/2;
end;

procedure Transfer;
begin
  for m:= 1 to 100 do
  begin
    P_para_b_i[m]:=P_para[m];
    P_para_temp[m]:=P_para_2[m];
    T_temp[m]:=T[m];
    P_para[m]:=0;
  end;
end;

procedure Compile_Answer1;
var int_tmp,int_tmp_2:longint; str_tmp1,str_tmp2,str_tmp3:string;
begin
  for i_run:=1 to 360 do
  begin
    for j_run:= 1 to 1 do
    begin
      A:= (dens*J*cv*2)/D;
      B:= (he(i_run,E,delta_set)*u)/2;
      C:= (he(i_run,E,delta_set)*he(i_run,E,delta_set)*he(i_run,E,delta_set))/ (6*
      mew*D);
      De:= (mew*u*u)/he(i_run,E,delta_set);
      Term_A :=Sub1_Term_A;
      Term_B :=Sub1_Term_B+Sub2_Term_B-Sub3_Term_B;
      P_para[j_run] :=Term_B/Term_A;
      Term_B_2 :=Sub1_Term_B+Sub2_Term_B+Sub3_Term_B_2*P_para [j_run];
      P_para_2[j_run]:=Term_B_2/Term_A;
      difP:=(P_para_2[j_run]-P_para_temp[j_run])/delta_set;
      if (i_run > 1 ) then T[j_run]:=T_temp[j_run]+((C*difP+D)/(A*(B-C*difP)))*
      delta_set;
      if j_run=1 then
      begin
        Setcolor(0);
        SetTextStyle(2,0,1);
        {int_tmp:=round(T[j_run]);
        OutTextXY(120+i_run,265-(round(int_tmp)),'.');}
        int_tmp:=round(p_para[j_run]);
        int_tmp_2:=round(P_para_2[j_run]);
        OutTextXY(120+i_run,265-(round(int_tmp/5)),'.');
        Setcolor(0);
        OutTextXY(120+i_run,265-(round(int_tmp_2/5)),'.');
        writeln(report5,'P',i_run,',',j_run,'=',P_para[j_run]);
      end;
    end;
  end;
  Transfer;
end;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(* Main program *)  
begin  
  clrscr;  
  Init_para;  
  In_data;  
  Cal_const;  
  Initialize;  
  Compile_Answer1;  
  readln;  
  Closegraph;  
end.
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Program Temperature_Distribution;
uses dos,crt,graph;
const j_max = 100;
var P_para,P_para_b_i,P_para_2,P_para_temp,T_temp,T:array[1..j_max]of real;
    G_seta,GZ,E,delta_seta,delta_z,lamda,L,D:real;
    const1,const2,const3,Term_A,Term_B,Term_B_2:real;
    i_run,j_run,k,m,count_i:longint;
    grDriver,grMode : integer;
    ErrCode:integer;
    u,mew,J,dens,cv,w,difP,Clear:real;
    A,B,C,DE:real;
{-----Functions-----}
function ha(z:integer;Er,delta_a:real):real;
var ha_v :real;
begin
    ha_v:=(z-0.5)*delta_a;
    ha:=Clear*(1+Er*(cos(ha_v*pi/180)));
end;

function ha_3(ha_t:real):real;
begin
    ha_3:=ha_t*ha_t*ha_t;
end;
{+++++}
function hb(z:integer;Er,delta_b:real):real;
var hb_v:real;
begin
    hb_v:=(z+0.5)*delta_b;
    hb:=Clear*(1+Er*(cos(hb_v*pi/180)));
end;

function hb_3(hb_t:real):real;
begin
    hb_3:=hb_t*hb_t*hb_t;
end;
{+++++}
function he(z:integer;Er,delta_e:real):real;
var he_v:real;
begin
    he_v:=z*delta_e;
    he:=Clear*(1+Er*(cos(he_v*pi/180)));
end;

function he_3(he_t:real):real;
begin
    he_3:=he_t*he_t*he_t;
end;
{+++++}

function hf(z:integer;Er,delta_f:real):real;
var hf_v:real;
begin
    hf_v:=z*delta_f;
    hf:=Clear*(1+Er*(cos(hf_v*pi/180)));
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function hf_5(hf_t:real):real;
begin
  hf_5:=hf_t*hf_t*hf_t*hf_t*hf_t;
end;
{+++++++}
function sub1_Term_A:real;
begin
  Sub1_Term_A:=((he_3(he(i_run,E,delta_seta)))/24)*const1;
end;

function sub1_Term_B:real;
begin
  Sub1_Term_B:=((he_3(he(i_run,E,delta_seta)))/48)*const1*P_para_b_i[j_run];
end;

function Sub2_Term_B:real;
var Temp_sub2_b:real;
begin
  if j_run>1
  then Temp_sub2_b:=P_para[j_run-1]
  else Temp_sub2_b:=0;
  Sub2_Term_B:=((he_3(he(i_run,E,delta_seta)))/48)*const1*Temp_sub2_b;
end;

function Sub3_Term_B:real;
begin
  Sub3_Term_B:=const3*(hb(i_run,E,delta_seta)-ha(i_run,E,delta_seta));
end;

function Sub3_term_B_2:real;
begin
  Sub3_Term_B_2:=const2*((hf_5(hf(i_run,E,delta_seta)))/1280);
end;

{-----procedure-----}
procedure init_para;
var ll:1..j_max;
begin
  for ll:=1 to j_max do
  begin
    P_para[ll]:=0;
    P_para_b_i[ll]:=0;
    T_temp[ll]:=25;
    T[ll]:=25;
  end;
  mew :=0.0000001;
  cv :=0.01;
  dens :=1000;
  J :=100;
  Clear :=0.001;
  w :=100;
  const1 :=0;
  const2 :=0;
  const3 :=0;
  count_i:=0;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

procedure In_data;
begin
  writeln;
  writeln(' ***** Please enter parameter for compile *****');
  writeln;
  write('   Enter Dimeter  :');
  readln(D);
  write('   Enter length   :');
  readln(L);
  write('   Enter Ebselon   :');
  readln(E);
  write('   Enter Delta_set :');
  readln(delta_set);
  write('   Enter Delta_z   :');
  readln(delta_z);
end;

procedure Initialize;
begin
  grDriver := detect;
  InitGraph(grDriver,grMode,'c:\lang\tp7\bg');
  ErrCode:=Graphresult;
  if ErrCode = grOk then
  begin
    Setbkcolor(7);
    SetfillStyle(1,15);
    Bar(10,10,GetmaxX-10,GetMaxY-10);
    SetFillStyle(1,15);
    Bar(2,2,GetMaxX-2,7);
    Bar(2,2,7,GetMaxY-2);
    Bar(GetMaxX-7,2,GetMaxX-2,GetMaxY-2);
    Bar(2,GetMaxY-7,GetMaxX-2,GetMaxY-2);
    Setcolor(13);
    SettextStyle(6,0,3);
    OutTextXY(190,13,'Graph for Calculation Program');
    Setcolor(12);
    SettextStyle(2,0,7);
    OutTextXY(130,40,'Show only Ti at j=1,1 < ε < 360 degree');
    Setcolor(9);
    Line(120,60,120,420);
    Line(120,270,500,270);
    Setcolor(14);
    SetTextStyle(7,1,2);
    OutTextXY(60,250,'Ti');
    Setcolor(10);
    SetTextStyle(2,0,5);
    OutTextXY(470,273,'360');
    OutTextXY(290,273,'180');
    SetTextStyle(7,0,2);
    OutTextXY(530,255,ε);
  end
  else
    Writeln('Graphics error: ',GraphErrorMsg(ErrCode));
end;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

procedure Cal_const;
begin
  const1:=(D/(L*delta_z))*(D/(L*delta_z));
  const2:=(D/L)*(D/L)*(D/L)*(D/L);
  const3:=1/(2*delta_set);
  u:= w*D/2;
end;

procedure Transfer;
begin
  for m:= 1 to 100 do
  begin
    P_para_b_i[m]:=P_para[m];
    P_para_temp[m]:=P_para_2[m];
    T_temp[m]:=T[m];
    P_para[m]:=0;
  end;
end;

procedure Compile_Answer1;
var int_tmp,int_tmp_2:longint; str_tmp1,str_tmp2,str_tmp3:string;
begin
  for i_run:=1 to 360 do
  begin
    for j_run:= 1 to 1 do
    begin
      A:= (dens*J*cv*2)/D;
      B:= (he(i_run,E,delta_set)*u)/2;
      C:= (he(i_run,E,delta_set)*he(i_run,E,delta_set)*he(i_run,E,delta_set))/ (6*
mew*D);
      De:= (mew*u*u)/he(i_run,E,delta_set);
      Term_A :=Sub1_Term_A;
      Term_B :=Sub1_Term_B+Sub2_Term_B-Sub3_Term_B;
      P_para[j_run] :=Term_B/Term_A;
      Term_B_2 :=Sub1_Term_B+Sub2_Term_B+Sub3_Term_B_2*P_para [j_run];
      P_para_2[j_run]:=Term_B_2/Term_A;
      difP:=(P_para_2[j_run]-P_para_temp[j_run])/delta_set;
      if (i_run > 1 ) then T[j_run]:=T_temp[j_run]+((C*difP+D)/(A*(B-C*difP)))*
delta_set;
      if j_run=1 then
      begin
        Setcolor(0);
        SetTextStyle(2,0,1);
        int_tmp:=round(T[j_run]);
        OutTextXY(120+i_run,265-(round(int_tmp)),'.');
        {int_tmp:=round(p_para[j_run]);
        int_tmp_2:=round(P_para_2[j_run]);
        OutTextXY(120+i_run,265-(round(int_tmp/5)),'.');
        Setcolor(0);
        OutTextXY(120+i_run,265-(round(int_tmp_2/5)),'.');
        writeln(report5,'P',i_run,',',j_run, '=',P_para[j_run]);}
      end;
    end;
  end;
  Transfer;
end;
end;

```

เอกสารนี้เป็น end; การที่สวจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(* Main program *)  
begin  
  clrscr;  
  Init_para;  
  In_data;  
  Cal_const;  
  Initialize;  
  Compile_Answer1;  
  readln;  
  Closegraph;  
end.
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<math.h>
#include<dos.h>
#include<graphics.h>
#define pi 3.141592654

int grid,i,j,count=0;
double result[50][50], xs, xe, ys, ye;
int xm,ym;
FILE *fp;
void ShowGraph(void)
{
    double l = 300.0 / (grid-1);
    double MinResult,MaxResult,scale;
    char *str;
    int dec,sign,ndig=5;

    MaxResult = abs(result[0][0]);
    MinResult = abs(result[0][0]);
    for(i=0;i<=(grid-1);i++)
        for(j=0;j<=(grid-1);j++)
            {
                if (MaxResult<abs(result[i][j])) MaxResult = abs(result[i][j]);
                if (MinResult>abs(result[i][j])) MinResult = abs(result[i][j]);
            }
    scale = 100/(MaxResult-MinResult);
    initgraph(VGA,VGAHI,"");
    for(i=0;i<=(grid-1);i++)
        for(j=0;j<=(grid-1);j++)
            {
                if (((i==xm) || (i==xm+1)) &&((j==ym) || (j==ym+1))) setcolor(4);
                else setcolor(15);
                if (j==0) moveto(50+i*1,370-j*1/1.4-(result[i][j]-MinResult)*scale);
                else lineto(50+i*1+j*1/1.4,370-j*1/1.4-(result[i][j]-MinResult)*scale);
            }
    for(j=0;j<=(grid-1);j++)
        for(i=0;i<=(grid-1);i++)
            {
                if (((i==xm) || (i==xm+1)) &&((j==ym) || (j==ym+1))) setcolor(4);
                else setcolor(15);
                if (i==0) moveto(50+j*1/1.4,370-j*1/1.4-(result[i][j]-MinResult)*scale);
                else lineto(50+i*1+j*1/1.4,370-j*1/1.4-(result[i][j]-MinResult)*scale);
            }
    setcolor(2);
    moveto(50,370);
    lineto(350,370);
    lineto(562,158);
    lineto(262,154);
    lineto(50,370);
    gotoxy(5,25);
    printf("%0.6f",xs);
    gotoxy(45,25);
    printf("%0.6f",xe);
    gotoxy(48,23);
    printf("%0.4f",ys);

```

```

gotoxy(74,10);
printf("%.4f",ye);
getch();
closegraph();
}

void main(void)
{
    double x,y,F,stepx,stepy;
    double xmin,ymin,PreF,Fmin,error,temp;

    clrscr();
    printf(" Please enter range of X from: ");
    scanf("%lf",&xs);
    printf(" To:");
    scanf("%lf",&xe);
    printf(" Please enter range of Y from: ");
    scanf("%lf",&ys);
    printf(" To: ");
    scanf("%lf",&ye);
    printf(" Please enter size of grid: ");
    scanf("%d",&grid);

    /*Open File*/
    fp=fopen("result.dat","w");

    /*Find Start Point*/
    stepx = (xe-xs)/(grid-1);
    stepy = (ye-ys)/(grid-1);
    for(i=0;i<=(grid-1);i++)
    {
        x = xs+(stepx*i);
        for(j=0;j<=(grid-1);j++)
        {
            y = ys+(stepy*j);
            F = (x*x)+(y*y);
            fprintf(fp," x:%7.6f y:%5.4f F:%10.5fn",x,y,F);
            result[i][j] = F;
            if ( ( F < Fmin ) || ( count == 0 ) )
            {
                xm = i;
                ym = j;
                Fmin = F;
                xmin = x;
                ymin = y;
                printf(" x:%5.4f y:%5.4f F:%10.5fn",xmin,ymin,Fmin);
                getch();
            }
        }
        count = 1;
    }
}
ShowGraph();
temp = xmin-stepx;
if( temp >= xs ) xs=xmin-stepx;
temp = xmin+stepx;
if( temp <= xe ) xe=xmin+stepx;
ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

```

```

temp = ymin-stepy;
if( temp >= ys ) ys=ymin-stepy;
temp = ymin+stepy;
if( temp <= ye ) ye=ymin+stepy;
printf("End of Start");
fprintf(fp, "Start Point is x:%7.9f y:%5.4f F:%10.5f\n",xmin,ymin,Fmin);
do{
    PreF = Fmin;
    stepx = (xe-xs)/(grid-1);
    stepy = (ye-ys)/(grid-1);
    count = 1;
    for(i=0;i<=(grid-1);i++)
    {
        x = xs+(stepx*i);
        for(j=0;j<=(grid-1);j++)
        {
            y = ys+(stepy*j);
            F = (x*x)+(y*y);
            fprintf(fp, " x:%7.6f y:%5.4f F:%10.5f\n",x,y,F);
            result[i][j] = F;
            if ( F <= Fmin )
            {
                xm = i;
                ym = j;
                Fmin = F;
                xmin = x;
                ymin = y;
                printf(" x:%7.6f y:%5.4f F:%10.5f\n",xmin,ymin,Fmin);
                getch();
            }
        }
    }
    ShowGraph();
    temp = xmin-stepx;
    if( temp >= xs ) xs=xmin-stepx;
    temp = xmin+stepx;
    if( temp <= xe ) xe=xmin+stepx;
    temp = ymin-stepy;
    if( temp >= ys ) ys=ymin-stepy;
    temp = ymin+stepy;
    if( temp <= ye ) ye=ymin+stepy;
    error= Fmin-PreF;
    if( error < 0 ) error=-error;
    count = count+1;
}while( error > 0.000001);
printf(" Fmin:%10.5f X:%7.6f Y:%5.4f error:%10.9f count:%3
d",Fmin,xmin,ymin,error,count);
fprintf(fp, " Optimum Point: X:%7.6f Y:%5.4f Fmin:%10.5f\n",xmin,ymin,Fmin);
fclose(fp);
}

```

```

/*Program Optimum_Design;*/
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>

const float pi= 3.1415927;
float Pi= 3.1415927;
float P_para[100],P_para_b_i[100],P_para_2[100],P_para_temp[100],T_temp[100],T[150];
float G_set,GZ,E,delta_set,delta_z,lamda,L,D;
float const1,const2,const3,Term_A,Term_B,Term_B_2;
int i_run,j_run,k,m,count_i;
FILE *report;
char filename[10];
int grDriver,grMode,ErrCode;
float u,mew,J,dens,delta,cv,w,difP,Clear,difP_z,maxC,minC,maxL,minL;
float
A,B,C,DE,Aq,Bq,Cq,Dq,Eq,Q,hq,const4,Tmax,spacec,space_l,L_D,Fobj,Ftemp,Qobj,Tobj;
float ctemp,Ltemp,Fold,Load,Force;
int grid,i,jc,n,meng;

/*-----Functions-----*/

float ha(int z,float Er,float delta_a)
{
    float ha_v;
    ha_v=(z-0.5)*delta_a;
    ha_v=Clear*(1+Er*(cos(ha_v*pi/180)));
    return(ha_v);
}

float ha_3(float ha_t)
{
    float ha;
    ha=ha_t*ha_t*ha_t;
    return(ha);
}

float hb(int z,float Er,float delta_b)
{
    float hb_v;
    hb_v=(z+0.5)*delta_b;
    hb_v=Clear*(1+Er*(cos(hb_v*pi/180)));
    return(hb_v);
}

float hb_3(float hb_t)
{
    float hb;
    hb=hb_t*hb_t*hb_t;
    return(hb);
}

float he(int z,float Er,float delta_e)
{
    float he_v;
    he_v=z*delta_e;
    he_v=Clear*(1+Er*(cos(he_v*pi/180)));
    return(he_v);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float he_3(float he_t)
{
    float he;
    he=he_t*he_t*he_t;
    return(he);
}

float hf(int z,float Er,float delta_f)
{
    float hf_v;
    hf_v=z*delta_f;
    hf_v=Clear*(1+Er*(cos(hf_v*pi/180)));
    return(hf_v);
}

float hf_5(float hf_t)
{
    float hf;
    hf=hf_t*hf_t*hf_t*hf_t*hf_t;
    return(hf);
}

float Sub1_Term_A(void)
{
    float Sub1;
    Sub1=((he_3(he(i_run,E,delta_set)))/24)*const1;
    return(Sub1);
}

float Sub1_Term_B(void)
{
    float Sub1;
    Sub1=((he_3(he(i_run,E,delta_set)))/48)*const1*P_para_b[i_run];
    return(Sub1);
}

double Sub2_Term_B(void)
{
    double Temp_sub2_b;
    if(j_run>1) Temp_sub2_b=P_para[j_run-1];
    else Temp_sub2_b=0;
    Temp_sub2_b=((he_3(he(i_run,E,delta_set)))/48)*const1*Temp_sub2_b;
    return(Temp_sub2_b);
}

float Sub3_Term_B(void)
{
    float sub;
    sub=const3*(hb(i_run,E,delta_set)-ha(i_run,E,delta_set));
    return(sub);
}

float Sub3_Term_B_2(void)
{
    float sub;
    sub=const2*((hf_5(hf(i_run,E,delta_set)))/1280);
    return(sub);
}

```

```

/*-----procedure-----*/
void Init_para(void)
{
    int ll;
    for(ll=1;ll<=100;ll++)
    {
        P_para[ll]=0;
        P_para_b_i[ll]=0;
        T_temp[ll]=25;
        T[ll]=25;
    }
    const1=0;
    const2=0;
    const3=0;
    count_i=0;
}

void In_data(void)
{
    printf("\n");
    printf(" ***** Please enter parameter for compile *****\n");
    printf("\n");
    printf("    Enter minimum clearance: ");
    scanf("%f",&minC);
    printf("    Enter maximum clearance: ");
    scanf("%f",&maxC);
    printf("    Enter minimum L/D : ");
    scanf("%f",&minL);
    printf("    Enter maximum L/D : ");
    scanf("%f",&maxL);
    printf("    Enter grid : ");
    scanf("%d",&grid);
    printf("    Enter filename : ");
    scanf("%s",filename);
    report=fopen(filename,"w");
    if (report==NULL)
    { printf("File not avialable");
      exit(1);
    }
    fprintf(report,"*****Input Data*****\n");
    fprintf(report,"  Min_C: %5.4f  Max_C: %5.4f\n",minC,maxC);
    fprintf(report,"  Min_L/D: %5.4f  Max_L/D: %5.4f\n",minL,maxL);
    fprintf(report,"  Number of Grid: %d\n",grid);
}

void Cal_const(void)
{
    const1=(D/(L*delta_z))*(D/(L*delta_z));
    const2=(D/L)*(D/L)*(D/L)*(D/L);
    const3=1/(2*delta_set);
    u= w*D/2;
}

```

```

void Transfer(void)
{
    for(m=1;m<=100;m++)
    {
        P_para_b_i[m]=P_para[m];
        P_para_temp[m]=P_para_2[m];
        T_temp[m]=T[m];
        P_para[m]=0;
    }
}

void Compile_Answer1(void)
{
    long int tmp,int tmp_2;
    char str_tmp1,str_tmp2,str_tmp3;
    int meng,meng2;
    Q=0;
    Tmax=0;
    for(i_run=1;i_run<=360;i_run++)
    {
        for(j_run=1;j_run<=100;j_run++)
        {
            A=(dens*J*cv*2)/D;
            B=(he(i_run,E,delta_seta)*u)/2;
            C=(he(i_run,E,delta_seta)*he(i_run,E,delta_seta)*he(i_run,E,delta_seta))/(
                6*mew*D);
            DE=(mew*u*u)/he(i_run,E,delta_seta);
            Term_A =Sub1_Term_A();
            Term_B =Sub1_Term_B()+Sub2_Term_B()-Sub3_Term_B();
            P_para[j_run] =Term_B/Term_A;
            Term_B_2 =Sub1_Term_B()+Sub2_Term_B()+Sub3_Term_B_2()*
                P_para[j_run];
            P_para_2[j_run]=Term_B_2/Term_A;
            difP=(P_para_2[j_run]-P_para_temp[j_run])/delta_seta;
            if (i_run > 1 ) T[j_run]=T_temp[j_run]+((C*difP+D)/(A*(B-C*difP)))**
                delta_seta;
            if (T[j_run] > Tmax) Tmax = T[j_run];
        }

        difP_z=(P_para_2[100]-P_para_2[99])/delta_z;
        const4= delta*difP_z*difP_z*difP_z;
        hq= he(i_run,E,delta_seta);
        Aq= 0.5*difP_z*((0.5*D*hq*hq*hq/3)+(hq*hq*hq*hq/4)-(0.25*D*hq*hq)
            -(hq*hq*hq/3));
        Bq= const4*0.25*((0.1*D*hq*hq*hq*hq*hq)+(hq*hq*hq*hq*hq/6));
        Cq= const4*0.5*((D*hq*hq*hq*hq/8)+(hq*hq*hq*hq*hq/5));
        Dq= (3/8)*const4*((D*hq*hq*hq*hq/6)+(hq*hq*hq*hq*hq/4));
        Eq= (const4/8)*((0.25*D*hq*hq*hq*hq)+(hq*hq*hq*hq*hq/3));
        if (i_run < 181) Q=Q+((Aq+Bq-Cq+Dq-Eq)*(pi/180));
        Transfer();
    }
    printf(" T: %10.5f Q: %10.5f",Tmax-25,Q);
    fprintf(report," T: %10.5f Q: %10.5f",Tmax-25,Q);
}

```

```

void Find_Force(void)
{
    float Force_X,Force_Y;
    Init_para();
    Cal_const();
    Force_X=0;
    Force_Y=0;
    for(i_run=1;i_run<=360;i_run++)
    {
        for(j_run=1;j_run<=100;j_run++)
        {
            Term_A    =Sub1_Term_A();
            Term_B    =Sub1_Term_B()+Sub2_Term_B()-Sub3_Term_B();
            P_para[j_run] =Term_B/Term_A;
            Term_B_2   =Sub1_Term_B()+Sub2_Term_B()+Sub3_Term_B_2()*
                P_para[j_run];
            P_para_2[j_run]=Term_B_2/Term_A;
            if(i_run<181)
            {
                Force_X=Force_X+P_para_2[j_run]*(D*Pi/360)*delta_z*cos
                    (i_run*Pi/180);
                Force_Y=Force_Y+P_para_2[j_run]*(D*Pi/360)*delta_z*sin
                    (i_run*Pi/180);
            }
        }
        Transfer();
    }
    Force=sqrt((Force_X*Force_X)+(Force_Y*Force_Y));
    printf(" Force: %10.4fn",Force);
}

void Find_E(void)
{
    float maxE,minE,tempE,check1,check2;
    maxE=0.99;
    minE=0.01;

    E=maxE;
    printf(" E: %5.4f",E);
    /*printf(report," E: %5.4f",E);*/
    Find_Force();
    check1= Load-Force;

    E=minE;
    printf(" E: %5.4f",E);
    Find_Force();
    check2=Load-Force;

    do
    { if((check1<0)&&(check2>0))
        {
            tempE=(minE+maxE)/2;
            E=tempE;
            printf(" E: %5.4f",E);
            /*printf(report," E: %5.4f",E);*/
            Find_Force();
            if((Load-Force)<0)

```

```

        { maxE=tempE;
          check1=Load-Force;
        }
    else
        { minE=tempE;
          check2=Load-Force;
        }
    }
    if ((check1>0)&&(check2>0)) E=0.0;
    if ((check1<0)&&(check2<0)) E=0.0;
} while((fabs(check1)>10)&&(fabs(check2)>10)&&(E!=0.0));
if (fabs(check1)<10) E=maxE;
if (fabs(check2)<10) E=minE;
fprintf(report," E: %5.4f Force: %10.4f",E,Force);
}

/* Main program */
void main(void)
{
    clrscr();
    mew=0.02;
    cv=1.76;
    dens=860;
    J=1;
    w=628.3;
    delta=0.4;
    Load=2500;
    Q=0;
    D=10;
    n=1;
    meng=1;
    In_data();

do
{ if (n > 2) Fold=Fobj;
  spacec=(maxC-minC)/(grid-1);
  space_l=(maxL-minL)/(grid-1);
  for(i=0;i<=(grid-1);i++)
  {
      Cclear= minC+i*spacec;
      for(jc=0;jc<=(grid-1);jc++)
      {
          Init_para();
          L_D= minL+jc*space_l;
          L= L_D*D;
          printf("*****\n");
          printf("C: %5.4f L_D: %5.4f\n",Clear,L_D);
          fprintf(report,"*****\n");
          fprintf(report,"C: %5.4f L_D: %5.4f\n",Clear,L_D);
          delta_z=L/100;
          delta_set=1;
          Cal_const();
          Find_E();
          if (E==0)
          {
              printf(" ***** Finding E has error *****\n");
              fprintf(report," ***** Finding E has error *****\n");
          }
      }
  }
}

```

```

else
}
{
Compile_Answer1();
if((Tmax-25)<=70)
{ if (Q>0) Ftemp=(Q*10000)+(Tmax-25);
  if (Q<0) Ftemp=(-Q*10000)+(Tmax-25);
  if (meng==1)
  { Fobj=Ftemp;
    Qobj=Q;
    Tobj=Tmax-25;
    ctemp=Clear;
    Ltemp=L_D;
    meng=2;
  }
  if (Ftemp<Fobj)
  { Fobj=Ftemp;
    Qobj=Q;
    Tobj=Tmax-25;
    ctemp=Clear;
    Ltemp=L_D;
  }
  printf(" F: %10.5f Fmin: %10.5f\n",Ftemp,Fobj);
  fprintf(report," F: %10.5f Fmin: %10.5f\n",Ftemp,Fobj);
}
else
{ printf("\n ***** Too high temperature rise *****\n");
  fprintf(report,"\n ***** Too high temperature rise *****\n");
}
}
}
/*calculate new range*/
printf("*****Fobj of Loop %d*****\n",n);
printf("F: %10.5f T: %10.5f Q: %10.5f\n",Fobj,Tobj,Qobj);
printf("      C: %5.4f L_D: %5.4f\n",ctemp,Ltemp);
fprintf(report,"*****Fobj of Loop %d*****\n",n);
fprintf(report,"F: %10.5f T: %10.5f Q: %10.5f\n",Fobj,Tobj,Qobj);
fprintf(report,"      C: %5.4f L_D: %5.4f\n",ctemp,Ltemp);
if ( n==1 ) Fold=Fobj;
n=n+1;
if ((ctemp+spacec)<maxC) maxC=ctemp+spacec;
if ((ctemp-spacec)>minC) minC=ctemp-spacec;
if ((Ltemp+space_l)<maxL) maxL=Ltemp+space_l;
if ((Ltemp-space_l)>minL) minL=Ltemp-space_l;
}while(( n<3)||((fabs(Fold-Fobj)>1)));
printf("F: %10.5f T: %10.5f Q: %10.5f\n",Fobj,Tobj,Qobj);
printf("      C: %5.4f L_D: %5.4f\n",ctemp,Ltemp);
fprintf(report,"Fobj: %10.5f T: %10.5f Q: %10.5f\n",Fobj,Tobj,Qobj);
fprintf(report,"      C: %5.4f L_D: %5.4f Loop: %d\n",ctemp,Ltemp,n);
fclose(report);
}

```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายจำลอง ปรามแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 29 กรกฎาคม 2501
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2529
ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์	เรื่องการออกแบบเจอนัลเบริงแบบสันที่ใช้สารหล่อลื่น นิวโทเนียน
ประสบการณ์ในการทำงาน	อาจารย์ระดับ 3 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
อาชีพปัจจุบัน	รับราชการ ตำแหน่งอาจารย์ระดับ 6 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้