

แบบจำลองทางความร้อนของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า

THERMAL MODEL OF ULTRA-THIN FILM HEAD SLIDERS IN A
MAGNETIC STORAGE SYSTEM

เมษา มอนเทิราลัยพร
MESA MONTIRALAIORN

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-613-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองทางความร้อนของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า

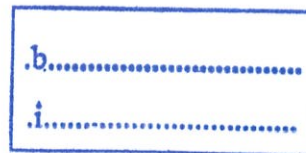
THERMAL MODEL OF ULTRA – THIN FILM HEAD SLIDERS IN A
MAGNETIC STORAGE SYSTEM



เมษา มณฑิราลัยพร

MESA MONTIRALAIORN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...49534
วัน, เดือน, ปี 24 ก.พ. 2547



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-613-4

**THERMAL MODEL OF ULTRA – THIN FILM HEAD SLIDERS IN A
MAGNETIC STORAGE SYSTEM**

MESA MONTIRALAIORN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-613-4

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองทางความร้อนของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า
THERMAL MODEL OF ULTRA-THIN FILM HEAD SLIDERS IN
A MAGNETIC STORAGE SYSTEM

ชื่อนักศึกษา นายเมษา มณฑิราลัยพร

รหัสประจำตัว 42062038

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชินรักษ์	เชียรพงษ์	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ผศ.สมยศ	จันทเกษม	
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 27 พฤษภาคม 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-401)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครฐ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....30.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๖.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองทางความร้อนของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า
นักศึกษา	นายเมษา มณฑิราลัยพร
รหัสประจำตัว	42062038
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการศึกษาผลกระทบทางความร้อนต่อพฤติกรรมของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดเทเปอร์เพลทในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูลในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและผลของความหนืด ซึ่งถ่ายเทความร้อนจากแบร์ริงอากาศสู่หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า ทำการแก้ปัญหาโดยอาศัยวิธีเชิงตัวเลข กฎทรงมวลโดยอาศัยหลักการของวิธีเพอเซอเบชัน วิธีโคเวอร์เจนพอมูเลชัน สมการสมดุลย์ สมการนาเวียร์-สโตค สมการพลังงานและกฎของฟูเรียร์ ทำการคำนวณหาความสูงการลอยตัว การกระจายความดัน การกระจายอุณหภูมิของราง การกระจายอุณหภูมิของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและ แบร์ริงอากาศ ผลการคำนวณค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีแหล่งความร้อนพบว่าค่าความสูงการลอยตัวเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 30 นาโนเมตร

Thesis Title	Thermal Model of Ultra – Thin Film Head Sliders in a Magnetic Storage System
Student	Mr.Mesa Montiralaiporn
Student ID.	42062038
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc. Prof.Mongkol Mongkolwongrojn

ABSTRACT

This study investigates the thermal effect on the characteristics of the magnetic head slider (tapered – flat type) in magnetic storage system. The heat generates due to read/write device in the magnetic head slider and viscous dissipation which transfers from the air bearing to the magnetic head slider. Continuity equation with perturbation technique, divergence formulation method, equilibrium equation, Navier Stoke’s equation, energy equation and Fourier’s law are formulated and calculated numerically to obtain flying height, pressure distribution, slider rail temperature distribution, air bearing temperature distribution and heat transfer between the air bearing and the magnetic head slider.

The simulation results depict the range of the differences of the head slider’s flying height is about 30 nanometre.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับหัวข้ออ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าจาก รศ. ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศ. ดร.อิโรมุ ฮาชิโมโต และ ผศ. ดร.ยาซึฮิสะ ฮัทโตรี ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำในบางจุดที่ผู้วิจัยติดปัญหาซึ่งมีส่วนช่วยทำให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหานั้น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคน ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำต่างๆ ในการแก้ไขและปรับปรุงรายละเอียดจนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณโครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ได้ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในด้านต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณบริษัท ซีเกท (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออนุญาตให้เยี่ยมชมโรงงาน

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เมษา มณฑิราลัยพร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.5 ทฤษฎีและแนวคิดในงานวิจัย.....	4
1.6 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดจานแข็ง.....	6
2.1 เครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดจานแข็ง.....	6
2.2 หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.3 บางตัวอย่างของการสร้างหัวอ่าน.....	8
2.4 การผลิตสื่อบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัย.....	11
3.1 ลักษณะของการหล่อลื่น.....	11
3.2 การหล่อลื่นด้วยอากาศ.....	12
3.3 การทำงานของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
3.4 สมการที่เกี่ยวข้อง.....	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยอากาศ.....	24
4.1 วิธีไดเวอร์เจนพอมูเลชัน.....	24
4.1.1 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
4.1.2 ปริมาตรควบคุม.....	25
4.1.3 สมการสมดุลย์การไหลของมวลในปริมาตรควบคุม.....	25
4.1.4 เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขรอยต่อ.....	39
บทที่ 5 ทฤษฎีทางความร้อน.....	48
5.1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและแบร์ริงอากาศ.....	48
5.1.1 สมการนาเวียร์-สโตค.....	52
5.1.2 สมการพลังงาน.....	60
5.1.3 กฎของฟูเรียร์.....	66
5.2 วิธีปริมาตรจำกัด.....	67
5.2.1 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	67
5.2.2 ปริมาตรควบคุม.....	68
5.2.3 สมการการนำความร้อน.....	68
5.2.4 เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขรอยต่อ.....	71
บทที่ 6 ผลการคำนวณ.....	76
6.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของหัวอ่าน.....	77
6.2 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านตามการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า.....	78
6.3 ผลการคำนวณลักษณะสำคัญต่างๆ ของหัวอ่าน.....	81
6.4 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่ออุณหภูมิอากาศโดยรอบเปลี่ยนแปลงไป.....	88
6.5 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อความดันอากาศโดยรอบเปลี่ยนแปลงไป.....	91
6.6 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีแหล่งความร้อนและอุณหภูมิอากาศ โดยรอบเปลี่ยนแปลงไป.....	95
6.7 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีแหล่งความร้อนและความดันอากาศ โดยรอบเปลี่ยนแปลงไป.....	104

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.8 พฤติกรรมการลยตัวของหัวอ่านเมื่อความเร็วของจานแข็งเปลี่ยนแปลงไป.....	113
6.9 พฤติกรรมการลยตัวของหัวอ่านที่ออกแบบโดยวิธีเหมาะสมที่สุด เมื่อมีแหล่งความร้อน.....	114
6.10 พฤติกรรมทางความร้อนของหัวอ่านเมื่อความหนาของฟิล์มอากาศ เปลี่ยนแปลงไป.....	120
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	127
7.1 บทสรุป.....	127
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	128
เอกสารอ้างอิง.....	129
ภาคผนวก.....	132
ภาคผนวก ก. โครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ.....	133
ภาคผนวก ข. ผลงานวิชาการที่เกี่ยวกับงานวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	138
ประวัติผู้เขียน.....	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุแข็งบางชนิดสำหรับทำหัวอ่าน.....	9
3.1 ความหนืดของอากาศ.....	16
6.1 ขนาดและค่าต่างๆ ของหัวอ่าน.....	76
6.2 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	77
6.3 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.64$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 12.61$ มิลลิเรเดียน).....	114
6.4 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.66$ มิลลิเมตร และ $L_{TP} = 0.248$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 14.64$ มิลลิเรเดียน).....	114
6.5 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทสำหรับสภาวะทำงานพลวัตเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.75$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 11.31$ มิลลิเรเดียน).....	115
6.6 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตและพลวัตเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่านกรณี $W_1 = 5500$ และ $W_2 = 50000$ (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.336$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 10.0$ มิลลิเรเดียน).....	115
6.7 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตและพลวัตเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่านกรณี $W_1 = 50000$ และ $W_2 = 5500$ (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.362$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 21.93$ มิลลิเรเดียน).....	115
6.8 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทแบบ ไอบีเอ็ม 3380 เมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน.....	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดจานแข็ง.....	6
2.2 แผ่นผังของหัวอ่านแบบไอบีเอ็ม 3370 บนจานบันทึกข้อมูล.....	7
2.3 หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดเล็ก (a) ชนิด minimonolithic (b) ชนิด minicomposite.....	8
2.4 ขนาดจานบันทึกข้อมูลแบบแข็ง.....	10
3.1 ความหนืดสัมบูรณ์ที่ความดัน 1 บรรยากาศ.....	16
3.2 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
3.3 ไดอะแกรมของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
3.4 ไดอะแกรมการทำงานของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
3.5 ลักษณะการไหลเนื่องจาก (a) แรงเฉือน (b) แรงดัน.....	21
3.6 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	22
4.1 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
4.2 รางของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
4.3 ปริมาตรควบคุม (วิธีไดเวอร์เจน ฟอมูลชัน).....	25
4.4 เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขรอยต่อการไหลของมวล (วิธีไดเวอร์เจน ฟอมูลชัน).....	39
5.1 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	48
5.2 ลักษณะการทำงานของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....	48
5.3 การไหลของอากาศระหว่างหัวอ่านและจานแข็งบันทึกข้อมูล.....	49
5.4 แรงกระทำกับก้อนของไหลของแบร์ริง.....	49
5.5 พลังงานเข้าออกก้อนของไหลของแบร์ริง.....	56
5.6 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและอุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูล.....	67
5.7 รางของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและอุปกรณ์อ่านเขียนข้อมูล.....	67
5.8 ปริมาตรควบคุม (วิธีปริมาตรจำกัด).....	68
5.9 เงื่อนไขและเงื่อนไขรอยต่อการไหลของมวล (วิธีปริมาตรจำกัด).....	71
6.1 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านแบบเทเปอร์แพลทเมื่อมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน.....	77
6.2 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า.....	79
6.3 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่าน	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า.....	79
6.4 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า.....	80
6.5 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า.....	80
6.6 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงการกระทำเปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า.....	81
6.7 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลทเมื่อไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	82
6.8 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลทเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า 13 mA แก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	82
6.9 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	83
6.10 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	83
6.11 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	84
6.12 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศเมื่อมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	84
6.13 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	85
6.14 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	85
6.15 ความหนืดของอากาศเมื่อมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	86
6.16 การถ่ายเทความร้อนจากหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลทสู่อากาศเมื่อมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	86
6.17 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	87
6.18 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่าน	

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
แบบเทเปอร์เฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	87
6.19 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ.....	89
6.20 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ.....	89
6.21 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ.....	90
6.22 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ.....	90
6.23 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ.....	91
6.24 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ.....	92
6.25 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ.....	93
6.26 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ.....	93
6.27 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ.....	94
6.28 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำ เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ.....	94
6.29 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศ โดยรอบ 5 องศาเซลเซียส.....	96
6.30 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศ โดยรอบ 5 องศาเซลเซียส.....	97
6.31 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
โดยรอบ 45 องศาเซลเซียส.....	102
6.41 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์จของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 45 องศาเซลเซียส.....	102
6.42 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุกยึดจับของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศ โดยรอบ 45 องศาเซลเซียส.....	103
6.43 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาวะกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่าย กระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 45 องศาเซลเซียส.....	103
6.44 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ.....	105
6.45 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์จของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศ โดยรอบ 0.85 บรรยากาศ.....	106
6.46 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์จของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ.....	106
6.47 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุกยึดจับของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศ โดยรอบ 0.85 บรรยากาศ.....	107
6.48 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาวะกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่าย กระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ.....	107
6.49 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ.....	108
6.50 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์จของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศ	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
โดยรอบ 1.15 บรรยากาศ.....	108
6.51 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ.....	109
6.52 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ.....	109
6.53 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่าย กระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ.....	110
6.54 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ.....	110
6.55 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่าน เปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศ โดยรอบ 1.30 บรรยากาศ.....	111
6.56 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ.....	111
6.57 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ.....	112
6.58 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่าย กระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ.....	112
6.59 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของจานแข็งเปรียบเทียบ เมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า.....	113
6.60 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลท	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	116
6.61 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	116
6.62 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	117
6.63 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	117
6.64 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่าน แบบเทเปอร์เฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	118
6.65 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่าน แบบเทเปอร์เฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน.....	118
6.66 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของจานแข็ง.....	119
6.67 ความหนาของฟิล์มอากาศ.....	120
6.68 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลท.....	121
6.69 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดทรงแทงโคยล์คัลเฟลท.....	121
6.70 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเอ็ทโปกเนนเซียลเฟลท.....	122
6.71 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลท.....	122
6.72 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดทรงแทงโคยล์คัลเฟลท.....	123
6.73 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดเอ็ทโปกเนนเซียลเฟลท.....	123
6.74 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศของหัวอ่าน ชนิดเทเปอร์เฟลท ($T_s - T_d = 0\text{ K}$)	124
6.75 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศของหัวอ่าน ชนิดทรงแทงโคยล์คัลเฟลท ($T_s - T_d = 0\text{ K}$)	124
6.76 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศของหัวอ่าน ชนิดเอ็ทโปกเนนเซียลเฟลท ($T_s - T_d = 0\text{ K}$)	125
6.77 ความดันอากาศกึ่งกลางรางของหัวอ่าน.....	125
6.78 อุณหภูมิอากาศด้านข้างรางของหัวอ่าน.....	126

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.79 การถ่ายเทความร้อนของรางของหัวอ่านที่ความสูง h.....	126
ผ.ก. 1 โครงสร้างของโปรแกรมหลัก (Main Program).....	135
ผ.ก. 2 โครงสร้างของโปรแกรมย่อย CALPFM คำนวณหาความดันสถิต.....	136
ผ.ก. 3 โครงสร้างของโปรแกรมย่อย CALTSL คำนวณหาอุณหภูมิของหัวอ่านที่สภาวะสถิต...	137

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

a_0	สัมประสิทธิ์ตัวปรับแก้พื้นผิว
B	ความกว้างของรางหัวอ่าน
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
C_v	ความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่
e	พลังงานภายในก้อนของไหล
F	สมการซึ่งไม่ขึ้นกับเวลาที่เปลี่ยนไป
f_0	ภาระกระทำต่อหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากแขนจับยึด
F_x, F_y, F_z	แรงลัพธ์กระทำในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ
G	สมการซึ่งขึ้นกับเวลาที่เปลี่ยนไป
h	ความหนาของเบร็งอากาศ
h_0	ความหนาของฟิล์มอากาศต่ำสุด
h_{TP}	ความสูงของเทเปอร์ของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า
k	ค่าการนำความร้อนของอากาศ
Kn	Knudsen number
i	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูล
L	ความยาวของหัวอ่าน
L_{TP}	ความยาวของเทเปอร์ของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า
x_s	ตำแหน่งจุดยึดจับระหว่างแขนจับยึดและหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า
p	ความดันที่เบร็งอากาศ
P	ความดันไร้มิติที่เบร็งอากาศ $P = p/Pa$
Pa	ความดันของอากาศโดยรอบ
Pr	Prandtl number
q	flux ความร้อนระหว่างผิวหัวอ่านและเบร็งอากาศ
Q	อัตราการไหลของของไหล
r	ความต้านทานกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูล
R	สัดส่วน L/B
S	แหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูล
T	อุณหภูมิของเบร็งอากาศ
T	อุณหภูมิไร้มิติ $T = T/Ta$

T_a	อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ
T_d	อุณหภูมิของผิวคิสก์
T_s	อุณหภูมิของผิวหัวอ่าน
u, v, w	องค์ประกอบความเร็วของแบร์ริงอากาศ
U	ความเร็วเชิงเส้นของคิสก์ ณ ตำแหน่งของหัวอ่าน
x, y, z	พิกัดในแบร์ริงอากาศ
X, Y, Z	พิกัดไร้มิติในแบร์ริงอากาศ $X = x/L, Y = y/L, Z = z/h$

Greek symbols

α	ค่า thermal diffusivity ของอากาศ
ϕ	molecular slip coefficient
γ	สัดส่วนของความจุความร้อนจำเพาะ $\gamma = C_p/C_v$
η_a	ความหนืดที่ความดันบรรยากาศ
λ	mean free path ของอากาศ
μ	ความหนืดของอากาศ
θ_{TP}	มุมเทเปอร์ของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า
σ	squeeze number
σ_M	momentum accommodation coefficient
σ_T	thermal accommodation coefficient
τ_{zx}	แรงเฉือนบนผิวก้นของไหลด้าน xy
τ_{yx}	แรงเฉือนบนผิวก้นของไหลด้าน xz
τ_{zy}	แรงเฉือนบนผิวก้นของไหลด้าน yz
Λ	bearing number

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เบื้องต้นขอกล่าวถึงศาสตร์ของไตรโบโลยี ไตรโบโลยีเกี่ยวข้องกับการกระทำกันของพื้นผิวแข็งสองพื้นผิวในสถานะที่กำหนด ในความเป็นจริงพื้นผิวเลื่อนตัวและพื้นผิวหมุนตัวแสดงถึงนัยสำคัญของเทคโนโลยีอย่างมากทีเดียว ตัวอย่างการสึกหรอที่สร้างขึ้นได้แก่ การเขียนด้วยดินสอ, การเมชิน และการขัดถู ตัวอย่างของความเสียหายที่สร้างขึ้นได้แก่ เบรก, คลัช, ล้อขับของรถไฟและรถยนต์, โบล์ตและน็อต ตัวอย่างของการสึกหรอที่เกิดขึ้นเองได้แก่ เครื่องยนต์สันดาปภายในและเครื่องยนต์เครื่องบิน ตัวอย่างของความเสียหายที่เกิดขึ้นเองได้แก่ เกียร์, ลูกเบี้ยว, กาบรองถื่นและปะเก็น

กล่าวกันว่า การสูญเสียอันเป็นผลมาจากความไม่รู้ในศาสตร์ของไตรโบโลยีในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณ 6% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ (gross national product) หรือประมาณ 200,000 ล้านดอลลาร์ต่อปีและประมาณกันว่าหนึ่งในสามแหล่งพลังงานของโลกปัจจุบันถูกใช้เพื่อเป็นความเสียหายในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งรวบรวมเป็นจำนวนเงินที่มากถึง 200,000 ล้านดอลลาร์อันเป็นประโยชน์ในการแบ่งแยกลงไป เราเชื่อว่าประมาณ 10,000 ล้านดอลลาร์ (5% ของพลังงานที่สูญเสียไป) สูญเสียไปกับรอยต่อระหว่างหัวอ่านและสื่อบันทึกข้อมูลของการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นความสำคัญของการลดความเสียหายและการควบคุมการสึกหรอไม่สามารถถูกมองข้ามเพื่อเหตุผลทางเศรษฐกิจและความเชื่อถือได้ในระยะยาว ตามรายงานของ Jost (พ.ศ.2509, 2519), สหราชอาณาจักรสามารถประหยัดเงินประมาณ 500 ล้านดอลลาร์ต่อปี และประเทศสหรัฐอเมริกาสามารถประหยัดการสูญเสียถึง 16,000 ล้านดอลลาร์ต่อปี โดยการใช้หลักการทางไตรโบโลยีที่ดีขึ้นการประหยัดที่กล่าวมาชัดเจนและมาก อีกทั้งได้มาโดยการปรับเปลี่ยนและลงทุนไม่สูง

จุดประสงค์ของการวิจัยทางไตรโบโลยีคือการลดและกำจัดความสูญเสียอันเกิดมาจากความสึกหรอและความเสียหายที่ทุกระดับของเทคโนโลยีที่ซึ่งการถูของพื้นผิวเกี่ยวข้อง การวิจัยทางไตรโบโลยีนำไปสู่สมรรถนะโรงงานที่สูงขึ้น, ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น, การเสียหายลดลงและการประหยัดที่เห็นได้ชัด

กระบวนการบันทึกทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำเร็จลงได้โดยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและสื่อบันทึกข้อมูลที่ระยะห่างเล็กมาก (น้อยกว่า 0.5 ไมโครเมตร) การสูญเสียก่อนเวลาอันควรและความเชื่อถือได้ของข้อมูลสามารถถูกปรับปรุงโดยความเข้าใจพื้นฐานทาง

ไทรโบโลยีของระยะห่างระหว่างหัวอ่านและสื่อบันทึกข้อมูล ในความเป็นจริงระยะห่างเป็นตัวจำกัดของการเข้าถึงความหนาแน่นการจุข้อมูลที่มาก

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang Shuyu และ Bogy D. B. [22] ในปี พ.ศ. 2542 ได้ทำการศึกษาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสองมิติในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า (magneto – resistive(MR) head) ของระบบแบร์ริงอากาศด้วยแบบจำลองนี้อุณหภูมิตอบสนองของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าถูกศึกษาหลายกรณี พบว่าอุณหภูมิหัวอ่านขึ้นกับกระแสไหลผ่านและการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเกิดขึ้นบริเวณ MR transducer ที่ทำยหัวอ่าน ค่ากระแสไฟฟ้าโดยปกติ (ประมาณ 13 mA) อุณหภูมิหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิอากาศโดยรอบประมาณ 25 องศาเซลเซียส เมื่อหัวอ่านลอยเหนือบริเวณขรุขระโดยไม่สัมผัส อุณหภูมิของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์มอากาศที่เปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เย็นตัวของแบร์ริงอากาศ (cooling effect)

Zhang Shuyu และ Bogy D. B. [21] ในปี พ.ศ. 2542 ศึกษาของ magneto – resistive (MR) transducer อ่อนไหวต่ออุณหภูมิมาก เพื่อศึกษาผลกระทบทางความร้อนต่อ MR transducer เมื่อหัวอ่านลอยเข้าใกล้ผิวของดิสก์ เรานำแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตไม่ต่อเนื่องในแบร์ริงอากาศระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและดิสก์และแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลข พบว่าการถ่ายเทความร้อนหลักมาจากการนำความร้อนซึ่งถ่ายเทความร้อนจากหัวอ่านสู่แบร์ริงอากาศเมื่อหัวอ่านมีอุณหภูมิผิวสูงกว่าดิสก์ และผลของแรงเฉือนซึ่งถ่ายเทความร้อนจากแบร์ริงอากาศสู่หัวอ่าน การที่แบร์ริงอากาศประพฤติตัวเป็นสารหล่อเย็นหรือตัวทำความร้อนขึ้นอยู่กับส่วนของการนำความร้อนหรือผลของแรงเฉือนเป็นตัวหลักของการถ่ายเทความร้อน เพราะว่าคุณค่าของผลจากแรงเฉือนมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกัน ปรากฏการณ์เกิดความร้อนในแบร์ริงอากาศปกติมีบทบาทน้อยถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิจากหัวอ่านและดิสก์ไม่เข้าใกล้ศูนย์มากๆ ผลการจำลองแสดงว่าผลการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดลงของความสูงการลอยตัว แต่ผลของแรงเฉือนลดลงตามการลดลงของความสูงการลอยตัว อีกนัยหนึ่งผลการทำความเย็นเพิ่มขึ้นตามการลดลงของความสูงการลอยตัว

Zhang Shuyu และ Bogy D. B. [19] ในปี พ.ศ. 2541 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบ quasi – steady ถูกนำมาใช้ศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและแบร์ริงอากาศเมื่อหัวอ่านลอยเหนือบริเวณขรุขระโดยไม่สัมผัส ผลการจำลองแสดงว่าการถ่ายเทความร้อนสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์มอากาศ เมื่อหัวอ่านลอยเหนือบริเวณขรุขระ ความสูงการลอยตัวเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้ความหนาของฟิล์มอากาศเปลี่ยนแปลงทำให้การถ่ายเทความร้อน

ระหว่างหัวอ่านและเบริงอากาศเปลี่ยนแปลง ผลตอบสนองของการลดลงของความสูงการลอยตัวคือการถ่ายเทความร้อนออกจากหัวอ่านเพิ่มขึ้นและในทางตรงข้ามเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิของ magneto – resistive (MR) transducer เปลี่ยนแปลงและการเปลี่ยนแปลงของขนาดของสัญญาณอ่าน

Tian Hong และคณะ [17] ในปี พ.ศ. 2540 ในบทความนี้รายงานการรบกวนสัญญาณของ MR เซนเซอร์ ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่าง MR เซนเซอร์และผิวดิสก์แม่ไม่เกิดการสัมผัสกันระหว่างหัวอ่านและดิสก์อีกทั้งผลการทดลองและทฤษฎีแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของ MR เซนเซอร์จะลดลงขณะระยะห่างระหว่างหัวอ่านและดิสก์ลดลงเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนสู่ดิสก์ซึ่งหมุนอยู่

Jander Albrecht และคณะ [16] ในปี พ.ศ. 2539 แบบจำลองรูปร่างอย่างง่ายถูกนำเสนอเพื่อวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า แบบจำลองนำไปสู่การแก้ปัญหาแบบวิเคราะห์โดยประมาณสำหรับความต้านทานเป็นฟังก์ชันของรูปร่างและชนิดของวัสดุ แบบจำลองมีประโยชน์ต่อการออกแบบหัวอ่านความจุสูงต่อไป

Hashimoto H. และ Hattori Y. [23] ในปี พ.ศ. 2543 เป้าหมายของบทความนี้เพื่อพัฒนาวิธีการสำหรับการออกแบบเหมาะสมที่สุดของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับปรุงระยะห่างระหว่างหัวอ่านและดิสก์ภายใต้เงื่อนไขการปฏิบัติงานแบบสถิตและพลวัตของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเสนอการใช้วิธีการนี้กับการออกแบบหัวอ่านแบบ IBM 3380 เพื่อสร้างตัวแปรที่ต้องการ ฟังก์ชันเป้าหมายนิยามเป็นผลรวมถ่วงน้ำหนักของระยะห่างต่ำสุด ความแตกต่างของระยะห่างสูงสุดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวรัศมีของหัวอ่านและ amplitude ratio สูงสุดของการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน ความกว้างของราง ความยาวเทเปอร์ มุมเทเปอร์ ตำแหน่งจตุรกรับและแรงกดถูกเลือกเป็นตัวแปรที่ต้องการ ก่อนทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดของหัวอ่าน ผลของตัวแปรที่ต้องการทั้ง 5 ตัวต่อฟังก์ชันเป้าหมายถูกหาและจากนั้นตัวแปรที่ต้องการถูกหาโดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ hybrid เป็นการรวมกันของวิธีการค้นหาโดยตรงและ successive quadratic programming จากผลลัพธ์ที่ได้ประสิทธิภาพของการออกแบบด้วยวิธีที่เหมาะสมที่สุดต่อพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชัดเจน

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า อันได้แก่ หัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทพร้อมทั้งนำวิธีทางตัวเลขมาใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อศึกษาพฤติกรรมดังต่อไปนี้

1. ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่สภาวะสถิต
2. การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่าน
3. การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศ
4. การกระจายอุณหภูมิของอากาศ
5. การกระจายความดันอากาศ

โดยทำการศึกษาผลของรูปร่างที่มีต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพื่อนำไปใช้ในการหา ลักษณะรูปร่าง ขนาดของหัวอ่านที่เหมาะสมในงานวิจัยต่อไป

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

การทำงานของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นอาศัยอากาศเป็นสารหล่อลื่นระหว่างหัวอ่านและดิสก์ สำหรับการศึกษาการทำงานของหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อน เราได้นำสมการสมดุลย์มวล สมการนาเวียร์-สโตกและสมการพลังงานโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous boundary conditions) และกฎของฟูเรียร์มาพิจารณาและเนื่องจากระยะการลอยตัวของหัวอ่านที่ศึกษานี้กำหนดให้ระยะการลอยตัวของหัวอ่านต่ำมาก สมมติฐานในทฤษฎีการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกจึงไม่เพียงพอ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงต้องพิจารณาผลของ “การลื่นไถลของโมเลกุล” ด้วย โดยมีสมมติฐานในการศึกษาดังนี้

1. พิจารณาให้สารหล่อลื่นมีลักษณะอัดตัวได้
2. พิจารณาผลของการลื่นไถลบริเวณขอบ
3. ความหนืดเป็นแบบนิวโตเนียน
4. ให้พื้นผิวดิสก์เป็นผิวเรียบ

1.5 ทฤษฎีและแนวคิดในงานวิจัย

ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้ทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยอากาศและทฤษฎีทางความร้อนโดยอาศัยหลักการคำนวณเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์พฤติกรรมของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากเป็นการหล่อลื่นด้วยอากาศซึ่งเป็นสารหล่อลื่นแบบอัดตัวได้จึงจำเป็นต้องพิจารณาความสามารถในการอัดตัวได้ ประกอบกับในปัจจุบันนี้ระบบเก็บข้อมูลต่างพัฒนาให้มีความสามารถในการเก็บบันทึกข้อมูลสูงขึ้นและระยะห่างระหว่างหัวอ่านและดิสก์ที่น้อยมาก จึงทำให้สมการการหล่อลื่นเป็นสมการไม่เชิงเส้นเพราะต้องพิจารณาความสามารถอัดตัวได้พร้อมทั้งผลเนื่องจากการลื่นไถลของโมเลกุล เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานจริงของหัวอ่านในทางกลศาสตร์ โดยแนวคิดในการแก้สมการการหล่อลื่นได้นำเอาวิธีโคเวออร์เจนต์ฟอุมูเลชันและวิธีนิวตันราฟสัน

ใช้แก้ความไม่เชิงเส้นของสมการซึ่งเป็นวิธีที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ เพื่อหาพฤติกรรมทางสถิติหรือสภาวะคงตัวของหัวอ่าน

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการคำนวณหาพฤติกรรมของหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนในสภาวะสถิติ โดยหัวอ่านที่ทำการศึกษาคือหัวอ่านแบบเทเปอร์แพลท จำลองพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่าน การกระจายอุณหภูมิจากหัวอ่าน การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและเบริงอากาศ การกระจายอุณหภูมิจากอากาศ และการกระจายความดันอากาศระหว่างหัวอ่านและจานแข็ง

1.7 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาระบบเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้า การทำงานของหัวอ่านและแหล่งความร้อนที่หัวอ่านด้วยการนำเอาทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยอากาศและทฤษฎีทางความร้อนเพื่อหาความสัมพันธ์ โดยการค้นคว้าจากบทความที่เกี่ยวข้อง
2. นำวิธีเชิงตัวเลขที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมมาใช้ในการแก้สมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. เขียนแผนภาพแสดงขั้นตอนในการเขียนโปรแกรม
4. เขียนโปรแกรมตามขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้
5. คำนวณหาผลลัพธ์ที่ต้องการโดยใช้โปรแกรม

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์และคุณค่าของงานวิจัยนี้คือ การได้ศึกษาการทำงานทางกลของหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนโดยอาศัยทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยอากาศและทฤษฎีทางความร้อนมาใช้เพื่อวิเคราะห์การทำงานของหัวอ่าน อันเป็นประโยชน์เพื่อความเข้าใจการทำงานและช่วยในการปรับปรุงการทำงานให้ดีขึ้นทั้งนำไปสู่การพัฒนาออกแบบให้หัวอ่านมีรูปร่างขนาดที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบเก็บข้อมูลมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

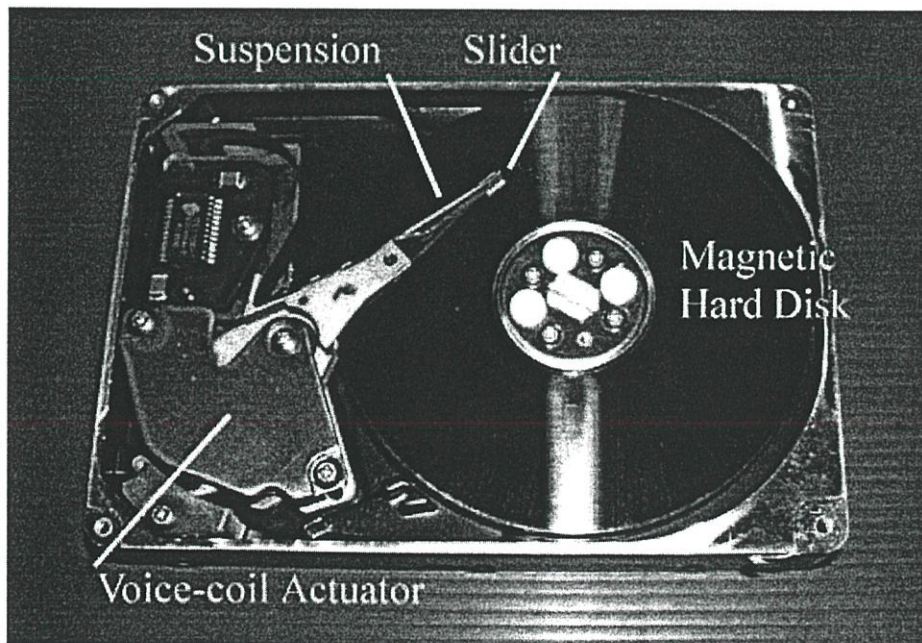
บทที่ 2

เครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดจานแข็ง

2.1 เครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดจานแข็ง (ฮาร์ดดิสก์)

เทคโนโลยีของเครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้จานหมุนปกติอ้างอิงจากเทคโนโลยี “วินเชสเตอร์” ใช้จานแข็งอยู่ในเครื่อง จานหมุนที่ความเร็วเชิงมุมคงที่และมีแทรคข้อมูลถูกบันทึกอย่างหนาแน่นบนพื้นผิว หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนตัวโดย actuator ซึ่งวางหัวอ่านแต่ละตัวบนแทรคข้อมูลที่ต้องการ โดยปกติจะใช้หัวอ่านตัวหรือสองตัว(เพื่อการเข้าถึงที่รวดเร็วกว่า)เคลื่อนที่บนแต่ละพื้นผิวของจาน ในขณะที่หัวอ่านทุกตัวเคลื่อนที่พร้อมกัน หัวอ่านเพียงหนึ่งตัวถูกเลือกที่เวลาหนึ่งเพื่ออ่านหรือเขียน actuator ปกติใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์หรือวอยซ์คอล์ยมอเตอร์ (VCM หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า voice coil actuator) VCM ถูกใช้ในไดรฟ์ที่ต้องการการสลับที่เล็กและเร็วกว่า

การออกแบบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า(slider)และแขนจับ(suspension)ถูกใช้ในเครื่องเหล่านี้ ปกติจะเป็นรูปแบบของ IBM 3370 Whitney หรือ Coronado (Jones, พ.ศ.2523) เส้นผ่านศูนย์กลางจานแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 95 ถึง 355 มม. ในการใช้งาน ภาพระยะใกล้หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าแบบฟิล์มบาง IBM 3370 แสดงในรูป 2.2 หัวอ่านเป็นแบบ taper – flat สองรางซึ่งจะยึดจับด้วยแขนจับแบบ leaf spring (flexure) ทำจากโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก อุปกรณ์อ่าน – เขียนสำหรับฟิล์มบางแบบ inductive อยู่บริเวณท้ายราง



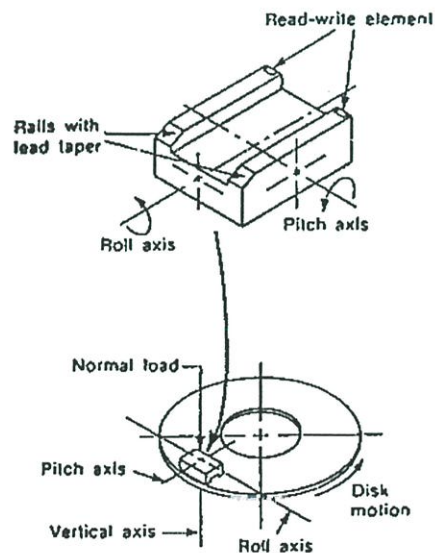
รูปที่ 2.1 เครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดจานแข็ง

2.2 หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

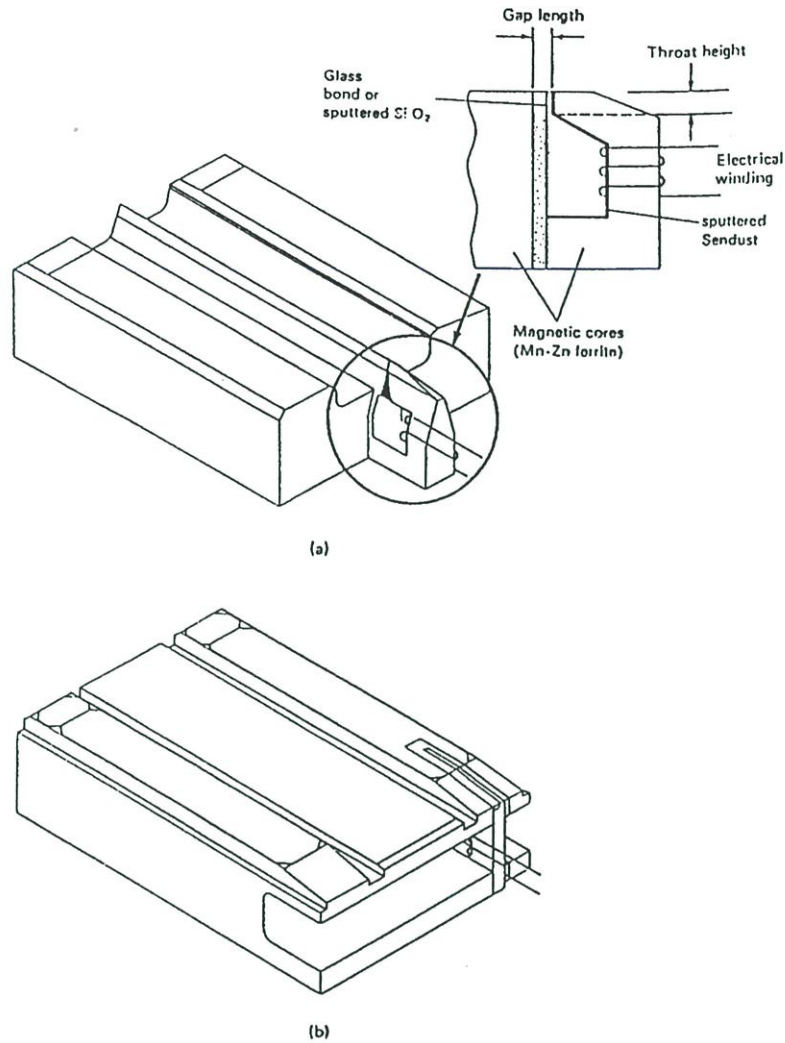
เครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับการใช้งานทั่วไปใช้หัวอ่านที่มีแกนวงแหวนทำจากสารแม่เหล็กและพื้นด้วยขดลวด โดยปกติมีหัวอ่านถูกนำมาใช้งานสองแบบ หัวอ่านแบบ minimonolithic (or mini – winchester) และ minicomposite

หัวอ่านแบบ minimonolithic ประกอบด้วยตัวหัวอ่านและแกนพื้นขดลวด ทั้งคู่ทำจากวัสดุชิ้นเดียว โดยปกติจะเป็นหัวอ่านแบบสามราง รางตรงกลางเป็นตำแหน่งวางอุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูลซึ่งจะอยู่บริเวณท้ายหัวอ่าน (ดูรูป 2.3 (a)) แกนโดยปกติทำจาก Mn – Zn ferrite เชื่อมด้วยแก้วกับรางตรงกลางซึ่งโดยปกติทำจาก Mn – Zn ferrite (ดูรูป 2.3 (a)) (ฟิล์มบางของ Sendust (85% Fe, 9% Si, 6% Al) ถูกเคลือบที่แกนเหล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหัวอ่านอย่างที่ยูจกกันในเรื่องหัวอ่านแบบ metal – in – gap (MIG)) การออกแบบหัวอ่านแบบ minimonolithic สืบต่อมาจากเทคโนโลยีของไครฟ์แบบวินเชสเตอร์ ข้อแตกต่างสำคัญคือ ขนาด มวลและแขนจับ

หัวอ่านแบบ minicomposite ประกอบด้วยแกน Mn – Zn เชื่อมต่อดัวยแก้วกับผิวหัวอ่านซึ่งทำจากสารที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กทนการสึกหรอ (เช่น Calcium titanate) หัวอ่านมีขนาดเท่าๆ กับหัวอ่านแบบ minimonolithic (ดูรูป 2.3 (b))



รูปที่ 2.2 แผนผังของหัวอ่านแบบไอบีเอ็ม 3370 บนจานบันทึกข้อมูล



รูปที่ 2.3 หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดเล็ก

(a) ชนิด minimonolithic

(b) ชนิด minicomposite

2.3 บางตัวอย่างของการสร้างหัวอ่าน

เครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้หัวอ่าน - เขียนแบบ inductive หัวอ่านทั่วไปคือการทำงานร่วมกันของการขึ้นรูปพื้นผิวแบเรียมออกไซด์และช่องอ่าน - เขียนของแกนวงแหวนแม่เหล็กพื้นลวด

สำหรับหัวอ่านของงานแบบแข็ง แกนวงแหวนแม่เหล็กเป็นแก้วยึดติดกับพื้นผิวแบเรียมออกไซด์ แก้วถูกใช้เป็นวัสดุแทนระยะช่อง สำหรับช่องว่างเล็กๆ (< 1 ไมโครเมตร) จะใช้ sputtered หรือ evaporated SiO_2 แทนโดยปกติ Mn - Zn ferrite (วัสดุทนทานต่อการสึกหรอและมีความแข็งแรงมาก อีกทั้งสามารถใช้กับความถี่สูงแทนที่ laminated alloy ถูกใช้เป็นวัสดุทำแกนมาก่อน ชิ้นงานของผิวแบเรียมออกไซด์สามารถสร้างจากทั้งวัสดุแม่เหล็ก (เช่น Mn - Zn ferrite) หรือวัสดุไม่ใช้สาร

แม่เหล็กแต่ทนการสึกหรองสูง เช่น calcium titanate แบบต่อมาของหัวอ่านที่กล่าวถึงคือ หัวอ่านแบบ composite วัสดุทนการสึกหรองอื่นซึ่งถูกใช้สร้างต้นแบบของหัวอ่านแบบ Composite คือ photosensitive glass ceramic ($\text{SiO}_2 - 81.5\%$, $\text{Li}_2\text{O} - 12\%$, $\text{K}_2\text{O} - 3.5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\%$, $\text{CeO}_2 - 0.03\%$, และ $\text{Ag} - 0.02\%$) ผลิตโดย Corning Glass Works, นีวยอร์กภายใต้เครื่องหมายการค้าของ Fotoceram คุณสมบัติทางฟิสิกส์บางตัวของวัสดุทำหัวอ่านแข็งแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุแข็งบางชนิดสำหรับทำหัวอ่าน

วัสดุ	ค่ายังส์โมดูลัส (GPa)	Knoop microhardness (GPa (kg/mm^2))	Flexural strength (Mpa)	Electrical resistivity (ohm-cm)
Ni-Zn ferrite	122	6.9(700)	150	$10^5 - 10^7$
Mn-Zn ferrite	122	5.9(600)	120	$5 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-1}$
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{TiC}(70-30)$	450	22.6(2300)	880	$2 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-3}$
Fotoceram (Glassceramic)	87	4.9(500)	200	5×10^{14}

หัวอ่านในฮาร์ดดิสก์สมัยใหม่ถูกทำให้เล็กลงโดยใช้เทคโนโลยีฟิล์มบาง ด้วยกรรมแตกต่างสองสามข้อ หัวอ่านแบบฟิล์มใช้ฟิล์มสารแม่เหล็กของ permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) ฝังตัวโดยวิธี evaporation, sputtering หรือ plating โลหะที่มีค่าการนำสูง เช่น ทองแดงฝังตัวโดยวิธี evaporation, sputtering หรือ plating และทองคำฝังตัวโดยวิธี plating ถูกใช้เป็นตัวนำ (คอยล์) วัสดุที่ถูกใช้เป็นฉนวนหรือช่องว่างบ่อยที่สุดในห้องอ่านแบบฟิล์มคือ SiO_2 , SiO และ Al_2O_3 ซึ่งฝังตัวโดยวิธี evaporation หรือ sputtering ซึ่งแข็งและทนทานปานกลาง (Berghof และ Gatzen, 1980) ในบางกรณี ฉนวนจากสารอินทรีย์ เช่น Cured Photoresist Polyimide สามารถนำมาใช้ได้ ถึงแม้ว่าฉนวนจากสารอินทรีย์เป็นวัสดุที่เสถียรภาพทางความร้อนน้อยกว่าและอ่อนนุ่มกว่า (Mee และ Daniel, 1987)

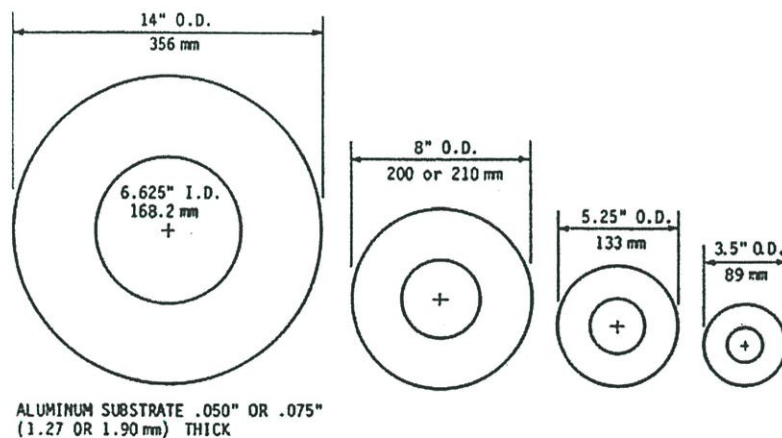
หัวอ่านแบบฟิล์มต้องถูกฝังตัวบน Substrates ซึ่งต้องแสดงพฤติกรรมการสึกหรอที่ดี ค่าการนำความร้อนสูง พฤติกรรมในการแมชชีนที่ดีและในบางตัวอย่าง พฤติกรรมทางแม่เหล็กไม่มาก แบบหลายแบบถูกสร้างขึ้นมาซึ่งมีการสร้างวัสดุ hybrid thin - film bulk magnetic ในกรณีเหล่านี้ ferrite ถูกเลือกให้ทำหน้าที่เป็น pole หรือ shield ความสมดุทธ์ของโครงสร้างคือ รูปร่างของฟิล์ม บางครั้ง Ni - Zn ferrite ถูกกล่าวถึงมากกว่า Mn - Zn ferrite เพราะความต้านทานที่สูงของมัน ทำให้ไม่เกิดการช้อตของตัวนำที่อยู่ในฟิล์ม (เช่น เครื่องขับเทป IBM 3480) สารที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก $\text{Al}_2\text{O}_3\text{Ti C} (70 - 30\%)$ โดยปกติถูกใช้สำหรับหัวอ่านซึ่งต้องการความทนทานเป็นพิเศษ

(เช่น ชุดขั้วงาน IBM 3380) การใช้ magnetic ferrites, มากกว่าวัสดุแบบ nonmagnetic substrate (เช่น $Al_2O_3 - TiC$) ขอมให้ substrate กลายเป็นส่วนหนึ่งของแกนหัวอ่านและทำให้การออกแบบชั้นหัวอ่านแบบฟิล์มง่ายขึ้น

อายุการใช้งานที่คาดหวังของหัวอ่านสมัยใหม่อย่างน้อย 3,000 ถึง 4,000 ชั่วโมง สำหรับชุดขั้วเทปและอย่างน้อย 7,500 ชั่วโมง สำหรับเครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดงานแข็ง ประมาณ 3 ถึง 7 ปีของการใช้งานเครื่องตามลำดับ การใช้งานเครื่องรวมประมาณ 7,500 รอบการสัมผัสตอนเริ่ม/หยุดและการบินคงที่ที่สภาวะเงื่อนไขที่ต้องการ

2.4 การผลิตสื่อบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

ความเสียหายจากฝุ่นละอองมีผลกระทบรุนแรงต่ออายุหัวอ่านและสื่อบันทึกข้อมูล(รอยต่อ) เพราะฉะนั้น สื่อบันทึกข้อมูลทุกชนิดถูกผลิตและประกอบจนถึงขั้นตอนสุดท้ายในห้องสะอาด โดยปกติเป็น class 100 (ไม่เกิน 100 อนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.3 ไมโครเมตรต่อลูกบาศก์ฟุต)



รูปที่ 2.4 ขนาดของงานบันทึกข้อมูลแบบแข็ง

บทที่ 3

ทฤษฎีและแนวคิดที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัย

3.1 ลักษณะของการหล่อลื่น

การลื่นไถลระหว่างพื้นผิวแข็งที่สะอาดโดยปกติจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงและเกิดการสึกหรอรุนแรงเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของพื้นผิว เช่น ความแข็งต่ำ พลังงานพื้นผิวสูง ปฏิกริยา และความสามารถในการทำละลายซึ่งกันและกัน พื้นผิวสะอาดจะจับสิ่งแปลกปลอมได้ดี เช่น สารประกอบอินทรีย์จากสิ่งแวดล้อม พื้นผิวที่ถูกขึ้นรูปใหม่โดยปกติมีค่าแรงเสียดทานต่ำและการสึกหรอต่ำกว่าพื้นผิวสะอาด การเกิดขึ้นของสิ่งแปลกปลอมที่รอยต่อไม่สามารถรับรองได้ขณะอยู่ในกระบวนการลื่นไถล เพราะฉะนั้นสารหล่อลื่นจึงถูกนำมาใช้ แบ่งได้เป็นสองกรณี คือ การหล่อลื่นด้วยของแข็งและการหล่อลื่นด้วยของไหล (ของเหลวหรือแก๊ส)

3.1.1 การหล่อลื่นด้วยของแข็ง

การหล่อลื่นด้วยของแข็งคือการใช้วัสดุใดๆ ในลักษณะผงหรือฟิล์มบางของของแข็งบนพื้นผิวที่ต้องการการปกป้องจากความเสียหายระหว่างการเคลื่อนที่สัมผัสเพื่อลดความเสียดทานและการสึกหรอ การหล่อลื่นด้วยของแข็งถูกใช้กับงานซึ่งมีการลื่นไถลแบบสัมผัสเกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น แบร็ริงอากาศที่ทำงานที่ภาระสูงและความเร็วต่ำ และแบร็ริงแบบไฮโดรไดนามิกส์ซึ่งต้องการขั้นตอนการเริ่มและหยุดการปฏิบัติงาน คำว่าสารหล่อลื่นของแข็งครอบคลุมวัสดุมากมายซึ่งมีความเสียดทานและการสึกหรอต่ำ (Bhushan, พ.ศ.2530 (ชุด a), พ.ศ.2530 (ชุด b), Bhushan และ Gupta, พ.ศ.2534) วัสดุแข็งถูกใช้สำหรับการสึกหรอต่ำภายใต้เงื่อนไขการปฏิบัติงานที่หนัก

3.1.2 การหล่อลื่นด้วยของไหล

ลักษณะการหล่อลื่นซึ่งมีฟิล์มของไหลที่หนาระหว่างสองพื้นผิวลื่นไถลโดยป้อนภายนอกเรียกว่า การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก ลักษณะการหล่อลื่นด้วยของไหลอีกประเภทจะไม่ใช่ป้อนภายนอก

3.1.2.1 การหล่อลื่นแบบไฮโดรสแตติก

แบร็ริงแบบไฮโดรสแตติกรองรับภาระบนฟิล์มหนาของของไหลซึ่งส่งมาโดยแหล่งความดันภายนอก เช่น ป้อน ซึ่งสร้างความดันของไหลให้ฟิล์ม ไฮโดรสแตติกแบร็ริงถูกออกแบบสำหรับใช้กับทั้งของไหลแบบอัดตัวไม่ได้และของไหลแบบอัดตัวได้ เนื่องจากแบร็ริงอากาศแบบไฮโดรสแตติกไม่ต้องการการเคลื่อนที่สัมผัสของผิวแบร็ริงเพื่อสร้างความดันซึ่งต่างจากแบร็ริงแบบไฮโดรไดนามิกส์

ไฮโดรสเตติกแบร์ริงใช้กับงานที่ไม่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์หรือน้อยมากระหว่างพื้นผิว ไฮโดรสเตติกแบร์ริงมีค่าความแข็งของสปริงสูงแต่ก็ยังมีข้อด้อยคือต้องการปั๊มแรงดันสูงและอุปกรณ์ทำความสะอาดของไหลซึ่งต้องการพื้นที่ติดตั้งและต้นทุน

3.1.2.2 การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ (HD)

การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์บางครั้งเรียกว่าการหล่อลื่นแบบฟิล์มของไหลหรือฟิล์มหนา แบร์ริงชนิดนี้สามารถสร้างความดันเพียงพอที่จะรับภาระโดยไม่ต้องการความดันจากปั๊มภายนอก นี่เป็นหลักสำคัญของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ กลไกที่จำเป็นต่อการทำงานของเจอร์นัลแบร์ริงแบบสร้างแรงดันเองและทรัสแบร์ริงซึ่งถูกใช้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ความสามารถในการรับภาระสูงที่การทำงานความเร็วรอบเพลาสสูง และใช้กับภาระต่ำเมื่อของไหลมีความหนืดสูง (Fuller, พ.ศ.2527)

3.1.2.3 การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ (EHD)

การหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์เป็นซับเซตของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกของของแข็งเข้ามามีบทบาทในการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ ความหนาของฟิล์มของการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ประมาณ $0.5 - 5\mu\text{m}$ ซึ่งบางกว่าการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์

3.1.2.4 การหล่อลื่นแบบผสม

ช่วงการเปลี่ยนแปลง (transition) ระหว่างการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์/อีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ และการหล่อลื่นแบบขอบเขต เกิดการสัมผัสของของแข็งบ่อยครั้งแต่ยังคงรองรับด้วยฟิล์มของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์

3.1.2.5 การหล่อลื่นแบบขอบเขต

เมื่อภาระเพิ่มขึ้น ความเร็วลดลงหรือความหนืดของของไหลลดลงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก การหล่อลื่นแบบขอบเขตมีเงื่อนไขคือผิวแข็งอยู่ใกล้กันมากจนพื้นผิวกระทบกับฟิล์มสารหล่อลื่นแบบโมเลกุลเดียวหรือแบบหลายโมเลกุล(ของของเหลวหรือแก๊ส) และของแข็งส่วนใหญ่เกิดการสัมผัส (ซึ่งของแข็งไม่ใช่สารหล่อลื่นแบบแข็ง)

3.2 การหล่อลื่นด้วยอากาศ

แบร์ริงแก๊สมีข้อได้เปรียบในการนำไปใช้งานหลายอย่าง แบร์ริงแก๊สถูกวิเคราะห์เสมือนเป็นแบร์ริงหล่อลื่นด้วยน้ำมันแบบไฮโดรไดนามิกส์ซึ่งห่างไกลจากของไหลอัดตัวได้ ยิ่งไปกว่านี้อากาศ

มีความหนืดต่ำกว่า 1,000 เท่าแม้เปรียบเทียบกับน้ำมันที่มีความหนืดต่ำสุด ความต้านทานแรงเฉือนของอากาศน้อยกว่าน้ำมันมาก อย่างไรก็ตามระยะระหว่างผิวเบร็งหรือฟิล์มสารหล่อลื่นจะน้อยกว่าน้ำมันมากดังนั้นในการผลิตเบร็งแก๊สต้องใช้ความละเอียดเป็นพิเศษ

ข้อได้เปรียบของเบร็งแก๊ส

1. ความเสียดทานหรือความต้านทานแรงเฉือนน้อยมาก
2. สารหล่อลื่นมีปริมาณไม่จำกัดและสะอาด
3. สารหล่อลื่นไม่เกาะติดพื้นผิว
4. สารหล่อลื่นทำงานได้ดีแม้อุณหภูมิต่ำมากหรือสูงมาก
5. สารหล่อลื่นไม่ยุบตัวเพราะฟองอากาศหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระทันหัน

ข้อด้อยของเบร็งแก๊ส

1. สำหรับเบร็งขนาดเดียวกัน ความสามารถในการรับภาระของเบร็งแก๊สจะน้อยกว่าเบร็งน้ำมันหลายเท่า
2. พื้นผิวต้องมีความเรียบมาก
3. การวางตำแหน่งต้องดี
4. ขนาดและระยะห่างต้องมีความถูกต้องสูง
5. ความเร็วที่ใช้ต้องสูง
6. ภาระกระทำต้องต่ำ
7. ความเสถียรภาพของเบร็งแก๊สค่อนข้างต่ำ

ถ้าระยะห่างอิสระโดยเฉลี่ยของโมเลกุล (mean free path of molecules) ใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาฟิล์มของแก๊ส การไหลของโมเลกุลจะเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม, ถ้าระยะห่างอิสระโดยเฉลี่ยของโมเลกุลมีระยะเท่ากับความหนาของฟิล์มอากาศ แก๊สจะเกิดการไหลไม่ต่อเนื่อง ชั้นของแก๊สจะติดกับผิวของแข็งทันทีทันใดโดยมีความเร็วเส้นไหลสัมพันธ์กับผิวแข็งจำกัด ทำให้เกิดการลดลงของความหนืดของแก๊ส (rarefaction) อัตราส่วนระยะห่างอิสระโดยเฉลี่ยของโมเลกุลต่อความหนาของฟิล์มอากาศคืออัตราส่วนการวัดระดับขึ้นของการลดลงของความหนืด

เคนูด์เซนัมเบอร์ (Knudsen number) ค่าพารามิเตอร์การไหลที่ตำแหน่งหนึ่งๆ ถูกนิยามเป็น

$$Kn = \lambda/h \quad 3.1)$$

ที่ซึ่ง λ เป็นค่าระยะห่างอิสระโดยเฉลี่ยที่ตำแหน่งหนึ่งๆ จุดเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขขอบเขต ระหว่างการไหลแบบต่อเนื่อง (continuum flow), การไหลแบบลื่นไถล (slip flow), และการไหลแบบโมเลกุลอิสระขึ้นกับค่า Kn_1 สามารถนิยามโดยประมาณต่อไปนี้ (Hsia และ Domoto, พ.ศ.2526; Gans, พ.ศ.2528 ; Mitsuya และ Ohkubo, พ.ศ.2530)

การไหลแบบต่อเนื่อง ; $Kn_1 < 0.01$

การไหลแบบลื่นไถล ; $0.01 < Kn_1 < 3$

การไหลแบบทรานซิชัน ; $3 < Kn_1, Kn_1 / (Re)^{1/2} < 10$

การไหลแบบโมเลกุลอิสระ ; $10 < Kn_1 / (Re)^{1/2}$

ที่ซึ่ง Re คือ เรโนลด์คัมเบอร์ ถ้าเรานิยามให้ค่า Re ขึ้นกับความหนาของฟิล์มอากาศสำหรับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า, $\rho U h / \eta, (Re)^{1/2}$ มีค่าเท่ากับ 0.1 เราถือว่าปรากฏการณ์ลดลงของความหนืดไม่ได้ขึ้นกับ Kn_1 เท่านั้น เพราะว่าปรากฏการณ์เหล่านี้อ่อนไหวเมื่อฟิล์มสารหล่อลื่นรับภาระมาก

ในช่วงการไหลแบบลื่นไถล ซึ่งเป็นการประมาณครั้งแรก การไหลอาจยังคงใช้ทฤษฎีความต่อเนื่องดั้งเดิมแต่ด้วยเงื่อนไขขอบเขตปรับปรุง แทนที่ความเร็วที่ขอบเขตหลักการของความเร็วลื่นไถลถูกนำมาใช้ ในการนิยามเงื่อนไขขอบเขตการไหลแบบลื่นไถลของ Burgdorfer (พ.ศ.2502), และต่อมา Hsing และ Malanoski (พ.ศ.2512) แนะนำว่าสมการอาจถูกต้องเมื่อระยะห่างต่ำสุดของแบร์ริงเท่ากับระยะห่างอิสระโดยเฉลี่ยของแก๊ส มันถูกใช้เป็นปรับแก้ระดับหนึ่งต่อสนามความเร็วที่ขอบเขต การวิเคราะห์ทางทฤษฎีเมื่อไม่นานมานี้โดย Gans (พ.ศ.2528) พยายามนิยามสมการเรโนลด์สำหรับการไหลแบบลื่นไถล จากทฤษฎีจลน์ของก๊าซที่ซึ่งการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเฉลี่ยถูกพิจารณาตามการไหลของมวล ผลลัพธ์ชี้ว่าสมการของ Burgdorfer (พ.ศ.2502) ที่จริงถูกต้องแม้ระยะห่างจะยิ่งน้อย มันถูกยืนยันโดยการทดลองจาก Mitsuya และ Ohkubo (พ.ศ.2530)

จาก Burgdorfer (พ.ศ.2502), ความหนืดที่ตำแหน่งหนึ่งๆ (η) สัมพันธ์กับความหนืดของอากาศโดยรอบ (η_a)

$$\eta = \frac{\eta_a}{1 + (6a\lambda/h)} \quad 3.2)$$

ที่ซึ่ง a เป็นสัมประสิทธิ์ปรับแก้พื้นผิวสำหรับ λ ก่อนหน้านี้เราเคยเน้นว่าระยะห่างอิสระโดยเฉลี่ยของโมเลกุลแปรผกผันกับความหนาแน่น ρ (Kennard, พ.ศ.2481) สำหรับก๊าซสมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขแบบ isothermal

$$P/P_a = \rho/\rho_a = \lambda_a/\lambda \quad 3.3)$$

ที่ซึ่ง λ_a เป็นระยะห่างอิสระโดยเฉลี่ยของโมเลกุลของอากาศโดยรอบ และ P_a เป็นความดันโดยรอบ ตอนนี้เรานิยามค่าเคนูคเซ็นของอากาศโดยรอบ

$$Kn = \lambda_a/h_m \quad 3.4)$$

ที่ซึ่ง h_m คือ ความหนาฟิล์มอากาศอ้างอิง (โดยปกติคือค่าเฉลี่ยต่ำสุด) เพราะฉะนั้นสมการสำหรับความหนืดกลายเป็น

$$\eta = \frac{\eta_a}{1 + (6aKnP_a h_m / ph)} \quad 3.5)$$

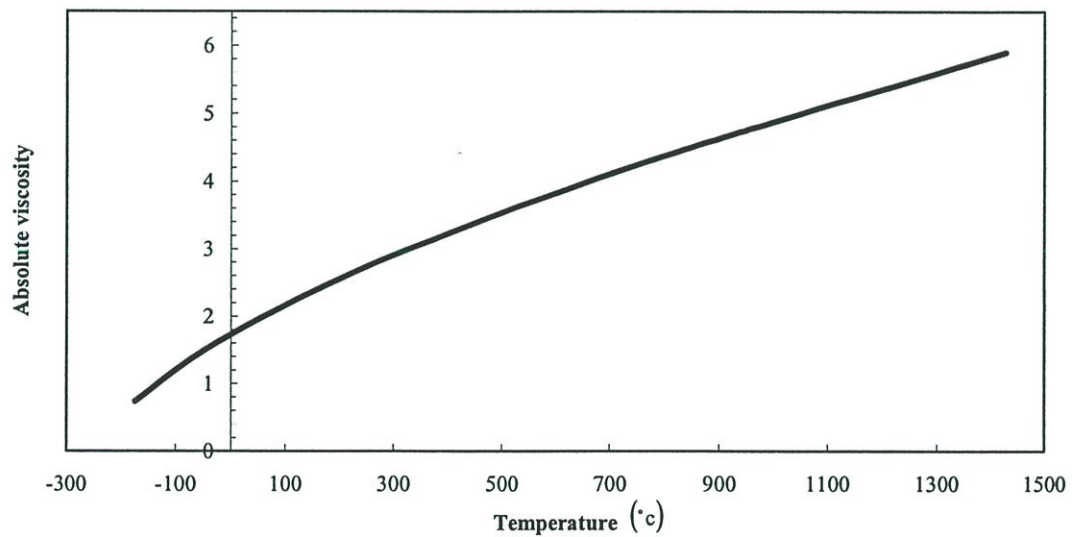
ขนาดของการลื่นไถลขึ้นอยู่กับตำแหน่งของผิวการหล่อลื่นและหาโดยค่าเคนูคเซ็นนัมเบอร์ที่ตำแหน่งหนึ่งๆ $Kn_1 = Kn/PH$ ดังนั้นขนาดของการลื่นไถลที่แต่ละจุดบนผิวหล่อลื่น แปรผกผันกับค่า PH ในกรณีของหัวอ่านและจานแข็ง Hsia และ Domoto (พ.ศ.2526) และ Mitsuya และ Ohkubo (พ.ศ.2530) พบว่า Kn_1 มีค่าสูงโดยสัมประสิทธิ์เท่ากับ 2 ใกล้ขอบท้ายและขอบข้างด้านท้ายค่าเฉลี่ย Kn_1 พบว่ามีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ Kn

ระยะห่างอิสระเฉลี่ยของโมเลกุลของสภาวะโดยรอบสำหรับอากาศ คือ $0.064\mu\text{m}$ และสัมประสิทธิ์การปรับแก้พื้นผิว a มีค่าประมาณ 1.24 สำหรับอากาศบนแก้ว (Kennard, พ.ศ.2481; Mitsuya และ Ohkubo, พ.ศ.2530) สัมประสิทธิ์ปรับแก้พื้นผิวสำหรับอากาศบนพื้นผิวหัวอ่านนั้นไม่ทราบค่าเพราะฉะนั้นเราสมมติเป็น $a = 1.24$ เพื่อให้เท่ากับอากาศบนแก้ว

ตารางที่ 3.1 ความหนืดของอากาศ

อุณหภูมิ (°C)	ความหนืดสัมบูรณ์ (N·s/m ²)
-173.3	0.738×10^{-5}
-73.3	1.359
26.7	1.849
126.7	2.270
226.7	2.650
326.7	2.995
426.7	3.312
526.7	3.616
626.7	3.892
726.7	4.175
826.7	4.444
926.7	4.692
1426.7	5.900

หมายเหตุ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (จาก Svehla (1962))

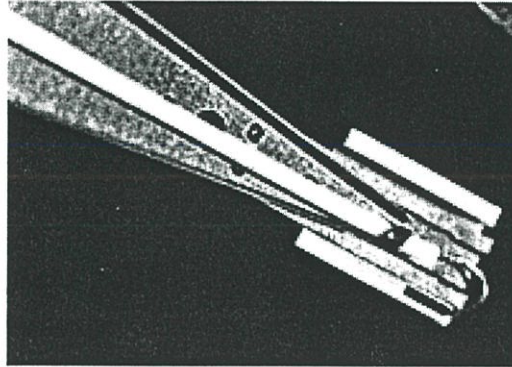


รูปที่ 3.1 ความหนืดสัมบูรณ์ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

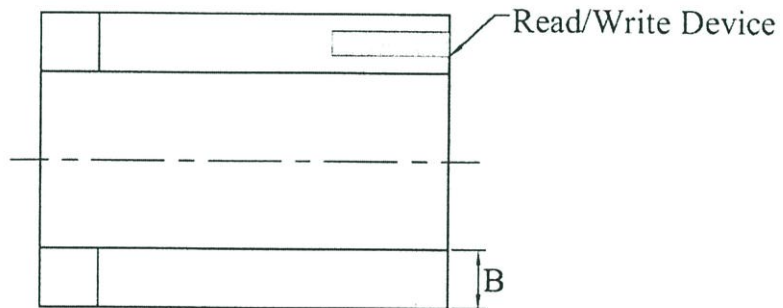
ทำการ fit curve โดยใช้วิธี linear least square method จะได้

$$\mu(T) = 3.261 \times 10^{-8} T + 1.731 \times 10^{-5} \quad (3.6)$$

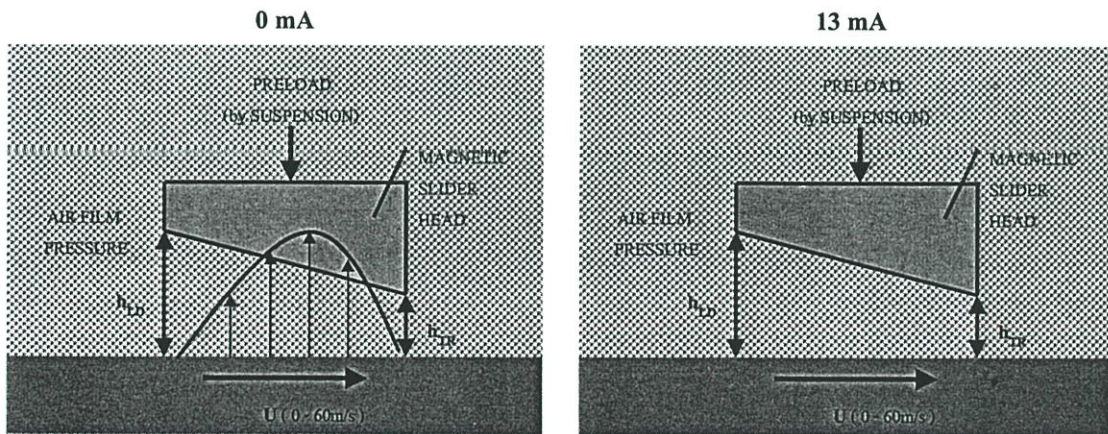
3.3 การทำงานของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 โค้ดแกรมของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 โค้ดแกรมการทำงานของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

3.4 สมการที่เกี่ยวข้อง

3.4.1 สมการสมดุลมวลในปริมาตรควบคุม

$$(Q_I^X + Q_{III}^X + Q_{II}^X + Q_{IV}^X) + (Q_I^Y + Q_{II}^Y + Q_{III}^Y + Q_{IV}^Y) = Q_{i,j}^V \quad (3.7)$$

ที่ซึ่ง

$$\left. \begin{aligned} Q^X &= \int_{Y_1}^{Y_2} \left(\phi PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda(PH) \right) dY, \\ Q^Y &= \int_{X_1}^{X_2} R^2 \left(\phi PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) dX, Q^V = \int_{X_1}^{X_2} \int_{Y_1}^{Y_2} \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial T} dXdY \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

ที่ซึ่ง

$$\phi = \phi(Kn, P, H)/\mu(T)$$

และ $\phi(P, H)$ คือสัมประสิทธิ์การไหลเนื่องจากความดันซึ่งใช้สำหรับการไหลไม่ต่อเนื่องในกรณีความหนาฟิล์อากาศน้อยมากมาก
สมมติเกิดการสั่นสะเทือนเล็กน้อยในแนวแกน z

$$H = H_0 + \Delta H(T), P = P_0 + \Delta P(T) \quad (3.9.a)$$

ที่ซึ่ง

$$\left| \frac{\Delta H}{H_0} \right| \ll 1, \left| \frac{\Delta P}{P_0} \right| \ll 1 \quad (3.9.b)$$

3.4.2 สมการสมดุล

$$F_0 + K_z(Z_0 + X_{GS}\Theta_0) = 2 \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 (P_0 - 1) dx dy \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} M_0 + K_\Theta \Theta_0 - [F_0 + K_z(Z_0 + X_{GS}\Theta_0)] X_{GS} \\ = 2 \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 (P_0 - 1)(X_G - X) dXdY \end{aligned} \quad (3.11)$$

ที่ซึ่ง F_0 คือ ภาระกระทำไรรวม K_z คือ ค่าความแข็งสปริงแนวแกน z ของแขนจับไรรวม X_{Gs} คือ ระยะไรรวมระหว่างจุดศูนย์ถ่วงและจุดรองรับ M_0 คือ โมเมนต์เริ่มต้นของแขนจับไรรวม K_0 คือ ค่าความแข็งสปริงของการหมุนของแขนจับไรรวม X_G คือ ระยะไรรวมของจุดศูนย์ถ่วง

3.4.3 สมการนาเวียร์-สโตค

สมการนาเวียร์-สโตคสำหรับแบร์ริง

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad 3.12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad 3.13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad 3.14)$$

ที่ซึ่ง u, v เป็นความเร็วในทิศทาง x และ y p คือ ความดัน μ คือ ความหนืดของอากาศ องค์ประกอบความเร็ว w ในทิศทาง z ประมาณเท่ากับศูนย์ ชัดเจนว่าความดัน p คงที่ตลอดความหนาของแบร์ริงอากาศ

3.4.4 สมการพลังงาน

สมการพลังงานสำหรับแบร์ริง

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 = 0 \quad 3.15)$$

โดยปกติเทอมเนื่องจากแรงเสียดทาน (viscous dissipation term) มีขนาดเล็กกว่าเทอมการนำความร้อนในสมการ (3.15) แต่เมื่อความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและผิวฉลึงก์เข้าใกล้หรือมีค่าเท่ากับศูนย์ “ผลการอุ่น” (“warming effect”) จากแรงเสียดทานไม่สามารถถูกตัดทิ้งได้ เพราะฉะนั้นเราให้ความสนใจเทอมนี้ในสมการ (3.15) ในการวิเคราะห์ต่อไป

3.4.5 เงื่อนไขขอบเขต

เราสมมติความเร็วดิสก์ U ไม่เท่ากับศูนย์ในทิศทาง x และความเร็ว V เท่ากับศูนย์ในทิศทาง y ซึ่งก็คือกรณีหัวอ่านลอยเหนือกึ่งกลางรัศมีของจานแม่เหล็ก สำหรับอุณหภูมิพิจารณาให้จานแม่เหล็กมีขนาดใหญ่กว่าแบร์ริงอากาศมากและหมุนด้วยความเร็วสูง เราสมมติว่าจานแม่เหล็กมี

อุณหภูมิแต่ละจุดคงที่และสมมติใช้เงื่อนไขการลื่นไถล (slip condition) สำหรับความเร็วและเงื่อนไขการกระโดด (jump condition) สำหรับอุณหภูมิที่ขอบของแบร์ริงอากาศ เราสามารถเขียนเงื่อนไขขอบสำหรับความเร็วและอุณหภูมิเป็นดังนี้

$$u(0) = U + \frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad 3.16$$

$$u(h) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad 3.17$$

$$v(0) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad 3.18$$

$$v(h) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad 3.19$$

$$T(0) = T_d + 2 \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{Pr} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad 3.20$$

$$T(h) = T_s + 2 \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{Pr} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad 3.21$$

ที่ซึ่ง σ_M เป็นค่าสัมประสิทธิ์ momentum accommodation และ σ_T คือค่าสัมประสิทธิ์ thermal accommodation γ คือสัดส่วนของ C_p ต่อ C_v ซึ่งเป็นค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ และที่ปริมาตรคงที่ตามลำดับ T_s และ T_d เป็นอุณหภูมิผิวของหัวอ่านและอุณหภูมิของผิวงานแม่เหล็กตามลำดับ เพื่อความสะดวกเราเขียน $a = (2 - \sigma_M)/\sigma_M$ และ $b = 2(2 - \sigma_T)\gamma/(\sigma_T(\gamma + 1)Pr)$ ในการวิเคราะห์ต่อไป

3.3.5 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กและแบร์ริงอากาศ

เพื่อหาการถ่ายเทความร้อนในแบร์ริงอากาศ เราจำเป็นต้องรู้จักการกระจายอุณหภูมิโดยการแก้สมการนาเวียร์-สโตคและสมการพลังงาน

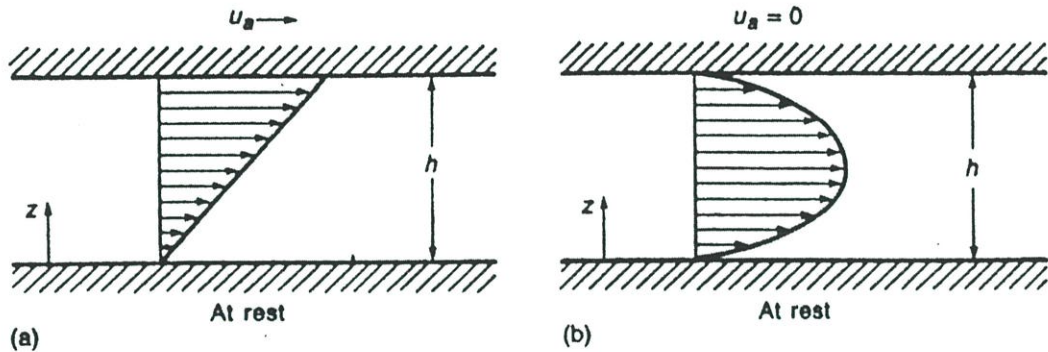
3.3.5.1 การกระจายความเร็ว

การกระจายความเร็วสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตสมการนาเวียร์-สโตค (ลดรูป) (3.10)-(3.12) โดยใช้เงื่อนไขขอบ (3.14)-(3.17) ด้วยวิธีการตรงไปตรงมาผลลัพธ์เป็นดังต่อไปนี้

$$u = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (a\lambda h + hz - z^2) + U \left(1 - \frac{z + a\lambda}{h + 2a\lambda} \right) \quad 3.22$$

$$v = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (a\lambda h + hz - z^2) \quad 3.23$$

เทอมทางขวาของสมการ (3.20) เทอมแรกเป็นเทอมการไหลเนื่องจากความดัน (Poiseulle flow term) (ดูรูป 3.4.b) และเทอมที่สองเป็นเทอมการไหลเนื่องจากแรงเฉือน (Couette flow term) (ดูรูป 3.4.a) ในขณะที่สมการ (3.21) มีเฉพาะเทอมการไหลเนื่องจากความดัน เพราะว่าเราให้ความเร็วของงานแม่เหล็กในทิศทาง y $V = 0$ จากสมการข้างบนพบว่าผลลัพธ์ยังไม่รู้ ค่าของเทอม pressure gradient ในทิศทาง x และ y เพื่อให้ผลลัพธ์สมบูรณ์เราจำเป็นต้องแก้สมการเรโนลด์เพื่อหาการกระจายความดัน สำหรับการแก้ปัญหาจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข



รูปที่ 3.5 ลักษณะการไหลเนื่องจาก (a) แรงเฉือน (b) แรงดัน

3.3.5.2 การกระจายอุณหภูมิของอากาศ

เราใส่ผลความเร็วจากสมการ (3.20) และ (3.21) ลงไปในสมการพลังงาน (3.13) จากนั้นอินทิเกรตสมการพลังงานเพื่อหาการกระจายอุณหภูมิในแบร์ริงอากาศ

$$T = T_d + \frac{(h + b\lambda)}{(h + 2b\lambda)}(T_s - T_d) + \frac{1}{k} \frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] (b\lambda) + \frac{1}{k} \frac{\mu U^2 h (b\lambda)}{2(h + 2a\lambda)^2} + \frac{1}{k} \frac{U h^3}{6(h + 2a\lambda)} \frac{\partial p}{\partial x} \left[\frac{(h + b\lambda)}{(h + 2b\lambda)} - 1 \right] \quad (3.24)$$

เช่นเดียวกับสมการความเร็ว สมการอุณหภูมิประกอบด้วยส่วนของเทอมการไหลเนื่องจากความดัน และเทอมการไหลเนื่องจากแรงเฉือนและเทอมประสมระหว่างสองเทอมนี้

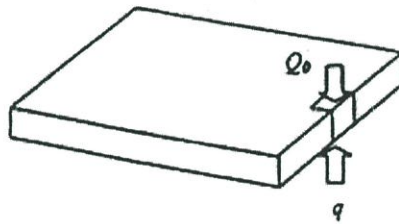
3.3.5.3 การถ่ายเทความร้อน

จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) $q = -k \partial T / \partial z$ และการกระจายอุณหภูมิ (3.22) เราได้ การถ่ายเทความร้อนสู่หัวอ่านดังต่อไปนี้

$$q = -k \frac{T_s - T_d}{h + 2b\lambda} + \frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \frac{\mu h U^2}{(h + 2a\lambda)^2} - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{U h^3}{6(h + 2a\lambda)(h + 2b\lambda)} \quad (3.25)$$

ที่ซึ่ง x และ y เป็นพิกัดในแบร์ริงอากาศ k, μ และ λ คือ ค่าการนำความร้อน ความหนืดและระยะห่างอิสระของโมเลกุลของอากาศ T เป็นความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง slider plate และผิวงานแม่เหล็ก (เราสมมติอุณหภูมิผิวงานแม่เหล็กเท่ากับอุณหภูมิโดยรอบ) U เป็นความเร็วเชิงเส้นของดิสก์ h เป็นความหนาของแบร์ริงอากาศ $a = (2 - \sigma_M) / \sigma_M$ และ $b = 2(2 - \sigma_T) \gamma / (\sigma_T (\gamma + 1) Pr)$ ซึ่ง σ_M เป็นสัมประสิทธิ์ momentum accommodation และ σ_T เป็นสัมประสิทธิ์ thermal accommodation γ เป็นอัตราส่วนความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่และปริมาตรคงที่ และ Pr เป็น Prandtl number ของอากาศ

3.3.6 ความร้อนในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับปัญหาการนำความร้อน 2 มิติใน slider plate สมการที่เกี่ยวข้องคือ

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + s \quad (3.26)$$

ซึ่ง k คือ ค่าการนำความร้อนของ slider plate T เป็นความแตกต่างของอุณหภูมิของ slider plate และอุณหภูมิอากาศ x, y เป็นพิกัดใน slider plate อย่าลืมว่า slider plate ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิด ดังนั้นคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะไม่สม่ำเสมอ Source term S (W/m^2) ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือการเกิดความร้อน Q เนื่องจากกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังอุปกรณ์อ่าน/เขียน ส่วนที่ 2 คือการแลกเปลี่ยน

เปลี่ยนความร้อน q โดยแบร์ริงอากาศ ในตอนนี้ slider plate เป็น heat source หรือ sink และสมมติให้การแลกเปลี่ยนความร้อนด้านบนของ slider plate ไม่มี ดังนั้น S สามารถเขียนเป็น

$$s = Q + \frac{q}{t} \quad (3.27)$$

ซึ่ง t เป็นความหนาของ slider plate การเกิดความร้อน Q สามารถเขียนได้เป็น

$$Q = \begin{cases} \frac{I^2 R_{sr}}{A_s t} & (x, y) \in \Gamma_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.28)$$

ที่ซึ่ง I_s, R_s, A_s และ Γ_s คือ กระแส ความต้านทาน พื้นที่และขอบเขตของหัวอ่าน MR

สำหรับหัวอ่าน เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา 2 มิตินี้ เราต้องการพิจารณาแค่ 4 ขอบของ slider plate เพราะว่า slider plate นั้นบางมาก ($\approx 3\mu\text{m}$) และหัวอ่าน MR ไกลจากขอบด้านบนและด้านข้าง เพราะฉะนั้นความร้อนถ่ายเทสู่ทั้ง 3 ด้านน้อยมาก เราสมมติว่า boundary condition ของมันเป็น adiabatic ขณะที่ขอบหลังของ slider plate อากาศค่อนข้างนิ่ง เราจึงไม่คิดการถ่ายเทความร้อนจากขอบหลังของ slider body และคิดเงื่อนไขเป็น adiabatic ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจาก slider plate สู่ air bearing พฤติกรรมเหมือน sink ในปัญหา 2 มิติ

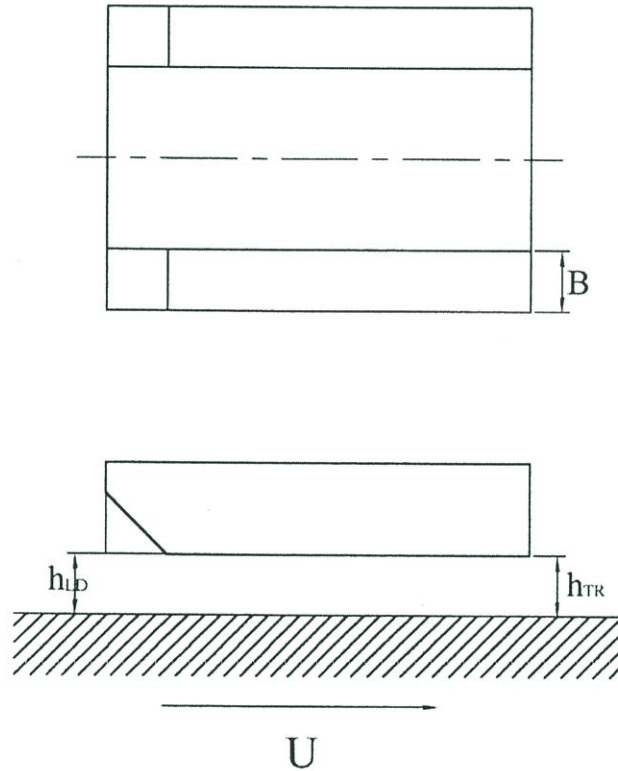
การแก้สมการนาเวียร์-สโตค และสมการพลังงานโดยใช้แนวความคิดของการถ่ายเทความร้อนแบบ micro-structural และ Bogy (1997) ได้การถ่ายเทความร้อน q ระหว่าง slider และแบร์ริงอากาศ

บทที่ 4

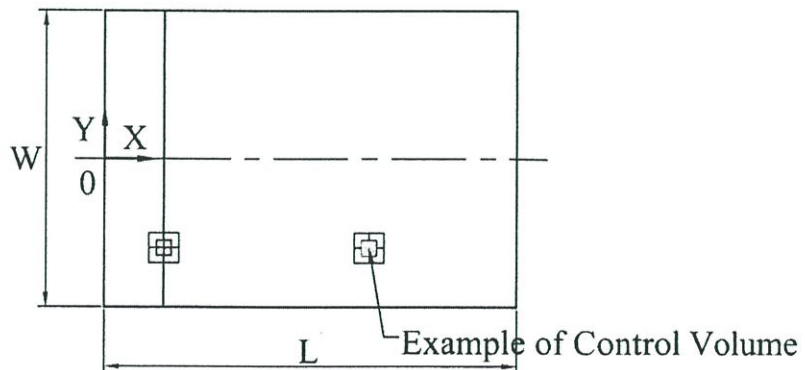
ทฤษฎีการเคลื่อนที่ด้วยอากาศ

4.1 วิธีไดเวอร์เจนซ์ ฟอรัมูเลชัน (Divergence Formulation Method)

4.1.1 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

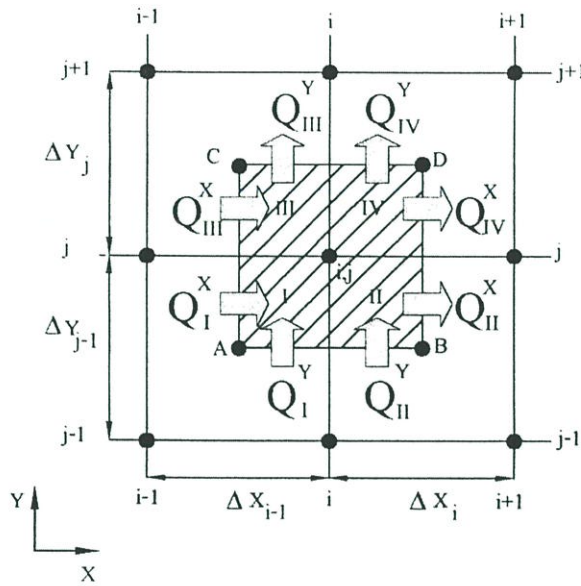


รูปที่ 4.1 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 รางของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

4.1.2 ปริมาตรควบคุม



รูปที่ 4.3 ปริมาตรควบคุม (วิธีโคเวอจัน ฟอมูเลชัน)

4.1.3 สมการสมดุลการไหลของมวลในปริมาตรควบคุม

$$(Q_I^X + Q_{III}^X + Q_{II}^X + Q_{IV}^X) + (Q_I^Y + Q_{II}^Y + Q_{III}^Y + Q_{IV}^Y) = Q_{i,j}^V \tag{4.1}$$

ที่ซึ่ง

$$\left. \begin{aligned} Q^X &= \int_{Y_1}^{Y_2} \left(\phi PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda(PH) \right) dY, \\ Q^Y &= \int_{X_1}^{X_2} R^2 \left(\phi PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) dX, Q^V = \int_{X_1}^{X_2} \int_{Y_1}^{Y_2} \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial T} dXdY \end{aligned} \right\} \tag{4.2}$$

ที่ซึ่ง

$$\phi = \phi(Kn, P, H) / \mu(T) \tag{4.3}$$

และ $\phi(P, H)$ คือ สัมประสิทธิ์การไหลแบบโมเลกุลลื่นไหล (molecular slip flow coefficient) ซึ่ง เป็นผลของปรากฏการณ์ไหลไม่ต่อเนื่องของอากาศ (air rarefaction effects) ภายใต้เงื่อนไขการ ลอยตัวที่ต่ำมาก

สมมติหัวอ่านสั้นสะท้อนเล็กน้อยในแนวแกน z

$$H = H_0 + \Delta H(T), P = P_0 + \Delta P(T) \quad 4.4.a)$$

ที่ซึ่ง

$$\left| \frac{\Delta H}{H_0} \right| \ll 1, \left| \frac{\Delta P}{P_0} \right| \ll 1 \quad 4.4.b)$$

แทนสมการ (4.4.a) ลงในสมการ (4.1) และ(4.2), และตัดเทอมที่มีเลขชี้กำลังสูง เราได้สมการต่อไป นี้ ซึ่งประกอบด้วยเทอมที่มีเลขชี้กำลังศูนย์และหนึ่งตามลำดับ

$$F(P_0) = Q_{I0}^X + Q_{III0}^X - Q_{II0}^X - Q_{IV0}^X + Q_{I0}^Y + Q_{II0}^Y - Q_{III0}^Y - Q_{IV0}^Y = 0 \quad 4.5)$$

$$G(P_T) = Q_{IT}^X + Q_{IIIT}^X - Q_{IIT}^X - Q_{IVT}^X + Q_{IT}^Y + Q_{IIIT}^Y - Q_{IIT}^Y - Q_{IVT}^Y - Q_{i,jT}^V = 0 \quad 4.6)$$

ที่ซึ่งแต่ละ Q :

$$\left. \begin{aligned} Q_0^X &= \int_{Y1}^{Y2} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial X} - \Lambda(P_0 H_0) \right) dY, \\ Q_0^Y &= \int_{X1}^{X2} R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial Y} \right) dX \\ Q_T^X &= \int_{Y1}^{Y2} \left[\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial \Delta P}{\partial X} + \left\{ \frac{\partial(\phi P H^3)}{\partial P} \right\}_0 \Delta P + \frac{\partial(\phi P H^3)}{\partial H} \Big|_0 \Delta H \right] \frac{\partial P_0}{\partial X} \\ &\quad - \Lambda(P_0 \Delta H + \Delta P H_0) dY \\ Q_T^Y &= \int_{X1}^{X2} R^2 \left[\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial \Delta P}{\partial Y} + \left\{ \frac{\partial(\phi P H^3)}{\partial P} \right\}_0 \Delta P + \frac{\partial(\phi P H^3)}{\partial H} \Big|_0 \Delta H \right] \frac{\partial P_0}{\partial Y} dX \\ Q_T^V &= \int_{X1}^{X2} \int_{Y1}^{Y2} \sigma \frac{\partial}{\partial T} (P_0 \Delta H + \Delta P H_0) dX dY \\ \phi &= \phi(Kn, P, H) / \mu(T) \end{aligned} \right\} 4.7)$$

สมการ (4.5) เป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นกระบวนการทำซ้ำของนิวตัน - ราฟสันถูกใช้ทำสมการให้เป็นเชิงเส้น

$$F(P_0^{(k)}) + \left. \frac{\partial F(P_0^{(k)})}{\partial P_0} \right|_{P_0=P_0^{(k)}} \delta P_0 = 0 \quad (4.8)$$

$$\delta P_0 = P_0^{(k+1)} - P_0^{(k)} \quad (4.9)$$

แทนสมการ (4.5) ลงในสมการ (4.8)

$$F(P_0^{(k+1)}) = (Q_{I0}^X)^{(k+1)} + (Q_{III0}^X)^{(k+1)} - (Q_{II0}^X)^{(k+1)} - (Q_{IV0}^X)^{(k+1)} \\ + (Q_{I0}^Y)^{(k+1)} + (Q_{II0}^Y)^{(k+1)} - (Q_{III0}^Y)^{(k+1)} - (Q_{IV0}^Y)^{(k+1)} = 0 \quad (4.10)$$

ที่ซึ่ง

$$\left. \begin{aligned} (Q_0^X)^{(k+1)} &= \int_{X1}^{X2} \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \delta P_0 \right. \\ &\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} - \Lambda (P_0^{(k)} H_0 + H_0^{(k)} \delta P_0) \right] dY \\ (Q_0^Y)^{(k+1)} &= \int_{X1}^{X2} R^2 \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \delta P_0 \right. \\ &\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \right] dX \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

ทำสมการ (4.10) ให้อยู่ในรูปสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

$$\begin{aligned}
(Q_{I0}^X)^{(k+1)} &= \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_A^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_A + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_A^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_A \delta P_0 \Big|_A \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_A^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} \Big|_A - \Lambda (P_0^{(k)} H_0 \Big|_A + H_0^{(k)} \delta P_0 \Big|_A) \right] \frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \\
(Q_{III0}^X)^{(k+1)} &= \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C \delta P_0 \Big|_C \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} \Big|_C - \Lambda (P_0^{(k)} H_0 \Big|_C + H_0^{(k)} \delta P_0 \Big|_C) \right] \frac{\Delta Y_j}{2} \\
(Q_{II0}^X)^{(k+1)} &= \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_B^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_B + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_B^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_B \delta P_0 \Big|_B \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_B^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} \Big|_B - \Lambda (P_0^{(k)} H_0 \Big|_B + H_0^{(k)} \delta P_0 \Big|_B) \right] \frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \\
(Q_{IV0}^X)^{(k+1)} &= \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D \delta P_0 \Big|_D \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} \Big|_D - \Lambda (P_0^{(k)} H_0 \Big|_D + H_0^{(k)} \delta P_0 \Big|_D) \right] \frac{\Delta Y_j}{2}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
(Q_{I0}^Y)^{(k+1)} &= R^2 \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_A^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_A + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_A^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_A \delta P_0 \Big|_A \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_A^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \Big|_A \right] \frac{\Delta X_{i-1}}{2} \\
(Q_{II0}^Y)^{(k+1)} &= R^2 \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_B^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_B + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_B^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_B \delta P_0 \Big|_B \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_B^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \Big|_B \right] \frac{\Delta X_i}{2} \\
(Q_{III0}^Y)^{(k+1)} &= R^2 \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C \delta P_0 \Big|_C \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \Big|_C \right] \frac{\Delta X_{i-1}}{2} \\
(Q_{IV0}^Y)^{(k+1)} &= R^2 \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D \delta P_0 \Big|_D \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \Big|_D \right] \frac{\Delta X_i}{2}
\end{aligned}
\tag{4.12}$$

โดยปกติสมการต่อไปนี้จะถูกใช้สำหรับจุด A,B,C และ D

$$F|_A = \frac{F_{i-1,j-1} + F_{i-1,j} + F_{i,j} + F_{i,j-1}}{4}$$

$$F|_B = \frac{F_{i,j} + F_{i+1,j} + F_{i+1,j-1} + F_{i,j-1}}{4}$$

$$F|_C = \frac{F_{i-1,j} + F_{i-1,j+1} + F_{i,j+1} + F_{i,j}}{4}$$

$$F|_D = \frac{F_{i,j} + F_{i,j+1} + F_{i+1,j+1} + F_{i+1,j}}{4}$$

$$\frac{\partial F}{\partial X}|_A = \frac{F_{i,j} - F_{i-1,j} + F_{i,j-1} - F_{i-1,j-1}}{2\Delta X_{i-1}}$$

$$\frac{\partial F}{\partial X}|_B = \frac{F_{i+1,j} - F_{i,j} + F_{i+1,j-1} - F_{i,j-1}}{2\Delta X_i}$$

$$\frac{\partial F}{\partial X}|_C = \frac{F_{i,j+1} - F_{i-1,j+1} + F_{i,j} - F_{i-1,j}}{2\Delta X_{i-1}}$$

$$\frac{\partial F}{\partial X}|_D = \frac{F_{i+1,j+1} - F_{i,j+1} + F_{i+1,j} - F_{i,j}}{2\Delta X_i}$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y}|_A = \frac{F_{i,j} - F_{i,j-1} + F_{i-1,j} - F_{i-1,j-1}}{2\Delta Y_{j-1}}$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y}|_B = \frac{F_{i+1,j} - F_{i+1,j-1} + F_{i,j} - F_{i,j-1}}{2\Delta Y_{j-1}}$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y}|_C = \frac{F_{i,j+1} - F_{i,j} + F_{i-1,j+1} - F_{i-1,j}}{2\Delta Y_j}$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y}|_D = \frac{F_{i+1,j+1} - F_{i+1,j} + F_{i,j+1} - F_{i,j}}{2\Delta Y_j}$$

4.13)

แทนความสัมพันธ์ในสมการ (4.13) ลงในสมการ (4.10) และ (4.12) เรามีสมการไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ต่อไปนี้ซึ่งติดอยู่ในเทอม δp_0 :

$$\begin{aligned} & A_0 \delta P_{i,j} + A_1 \delta P_{i-1,j} + A_2 \delta P_{i+1,j} + A_3 \delta P_{i,j-1} + A_4 \delta P_{i,j+1} \\ & A_5 \delta P_{i-1,j-1} + A_6 \delta P_{i+1,j-1} + A_7 \delta P_{i-1,j+1} + A_8 \delta P_{i+1,j+1} + A_9 = 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

ที่ซึ่ง

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8} \left(A_{x2} + \frac{2A_{x3}}{\Delta X_{i-1}} - A_{x5} \right) + \frac{\Delta Y_j}{8} \left(C_{x2} + \frac{2C_{x3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{x5} \right) \\ &\quad - \frac{\Delta Y_{j-1}}{8} \left(B_{x2} - \frac{2B_{x3}}{\Delta X_i} - B_{x5} \right) - \frac{\Delta Y_j}{8} \left(D_{x2} - \frac{2D_{x3}}{\Delta X_i} - D_{x5} \right) \\ &\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(A_{y2} + \frac{2A_{y3}}{\Delta Y_{j-1}} \right) + \frac{\Delta X_i}{8} \left(B_{y2} + \frac{2B_{y3}}{\Delta Y_{j-1}} \right) \\ &\quad - \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(C_{y2} - \frac{2C_{y3}}{\Delta Y_j} \right) - \frac{\Delta X_i}{8} \left(D_{y2} - \frac{2D_{y3}}{\Delta Y_j} \right) \\ A_1 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8} \left(A_{x2} - \frac{2A_{x3}}{\Delta X_{i-1}} - A_{x5} \right) + \frac{\Delta Y_j}{8} \left(C_{x2} - \frac{2C_{x3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{x5} \right) \\ &\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(A_{y2} + \frac{2A_{y3}}{\Delta Y_{j-1}} \right) \\ &\quad - \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(C_{y2} - \frac{2C_{y3}}{\Delta Y_j} \right) \\ A_2 &= -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8} \left(B_{x2} + \frac{2B_{x3}}{\Delta X_i} - B_{x5} \right) - \frac{\Delta Y_j}{8} \left(D_{x2} + \frac{2D_{x3}}{\Delta X_i} - D_{x5} \right) \\ &\quad + \frac{\Delta X_i}{8} \left(B_{y2} + \frac{2B_{y3}}{\Delta Y_{j-1}} \right) \\ &\quad - \frac{\Delta X_i}{8} \left(D_{y2} - \frac{2D_{y3}}{\Delta Y_j} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned}
A_3 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8} \left(A_{X2} + \frac{2A_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - A_{X5} \right) \\
&\quad - \frac{\Delta Y_{j-1}}{8} \left(B_{X2} - \frac{2B_{X3}}{\Delta X_i} - B_{X5} \right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(A_{Y2} - \frac{2A_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}} \right) \quad + \frac{\Delta X_i}{8} \left(B_{Y2} - \frac{2B_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}} \right) \\
A_4 &= \frac{\Delta Y_j}{8} \left(C_{X2} + \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5} \right) \\
&\quad - \frac{\Delta Y_j}{8} \left(D_{X2} - \frac{2D_{X3}}{\Delta X_i} - D_{X5} \right) \\
&\quad - \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(C_{Y2} + \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_j} \right) \quad - \frac{\Delta X_i}{8} \left(D_{Y2} + \frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_j} \right) \\
A_5 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8} \left(A_{X2} - \frac{2A_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - A_{X5} \right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(A_{Y2} - \frac{2A_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}} \right) \\
A_6 &= -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8} \left(B_{X2} + \frac{2B_{X3}}{\Delta X_i} - B_{X5} \right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_i}{8} \left(B_{Y2} - \frac{2B_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}} \right) \\
A_7 &= \frac{\Delta Y_j}{8} \left(C_{X2} - \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5} \right) \\
&\quad - \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(C_{Y2} + \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_j} \right)
\end{aligned}
\tag{4.15 ต่อ)$$

$$\begin{aligned}
 A_8 = & \left. \begin{aligned} & -\frac{\Delta Y_j}{8} \left(D_{x2} + \frac{2D_{x3}}{\Delta X_i} - D_{x5} \right) \\ & -\frac{\Delta X_i}{8} \left(D_{y2} + \frac{2D_{y3}}{\Delta Y_j} \right) \end{aligned} \right\} \\
 A_9 = & \frac{\Delta Y_{j-1}}{2} (A_{x1} - A_{x4}) + \frac{\Delta Y_j}{2} (C_{x1} - C_{x4}) \\
 & -\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} (B_{x1} - B_{x4}) - \frac{\Delta Y_j}{2} (D_{x1} - D_{x4}) \\
 & + \frac{\Delta X_{i-1}}{2} (A_{y1}) + \frac{\Delta X_i}{2} (B_{y1}) \\
 & -\frac{\Delta X_{i-1}}{2} (C_{y1}) - \frac{\Delta X_i}{2} (D_{y2}) \left. \vphantom{A_9} \right\} 4.15 \text{ ต่อ) }
 \end{aligned}$$

၇၅၅

$$\begin{aligned}
 A_{x1} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_A^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_A, A_{x2} = \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_A^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_A, \\
 A_{x3} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_A^{(k)}, A_{x4} = \Lambda(P^{(k)} H_0|_A), A_{x5} = \Lambda H_0|_A \\
 \\
 B_{x1} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_B^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_B, B_{x2} = \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_B^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_B, \\
 B_{x3} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_B^{(k)}, B_{x4} = \Lambda(P^{(k)} H_0|_B), B_{x5} = \Lambda H_0|_B \\
 \\
 C_{x1} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C, C_{x2} = \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C, \\
 C_{x3} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)}, C_{x4} = \Lambda(P^{(k)} H_0|_C), C_{x5} = \Lambda H_0|_C \\
 \\
 D_{x1} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D, D_{x2} = \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D, \\
 D_{x3} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)}, D_{x4} = \Lambda(P^{(k)} H_0|_D), D_{x5} = \Lambda H_0|_D
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

$$\left. \begin{aligned}
 &A_{Y1} = R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right)_A^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_A, A_{Y2} = R^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right) \right\}_A^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_A, \\
 &A_{Y3} = R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right)_A^{(k)} \\
 &B_{Y1} = R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right)_B^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_B, B_{Y2} = R^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right) \right\}_B^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_B, \\
 &B_{Y3} = R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right)_B^{(k)} \\
 &C_{Y1} = R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right)_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C, C_{Y2} = R^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right) \right\}_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C, \\
 &C_{Y3} = R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right)_C^{(k)} \\
 &D_{Y1} = R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right)_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D, D_{Y2} = R^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right) \right\}_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D, \\
 &D_{Y3} = R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \right)_D^{(k)}
 \end{aligned} \right\} 4.16 \text{ ต่อ) }$$

ที่ซึ่ง $\phi(P, H)$ มีค่าดังต่อไปนี้

$$\phi(P, H) = a_0 + a_1 \left(\frac{1}{PH} \right) + a_2 \left(\frac{1}{PH} \right)^2 + a_3 \left(\frac{1}{PH} \right)^3 \quad (4.17)$$

แล้ว

$$\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi P_0 H^3) = H^3 \left(a_0 - a_2 \left(\frac{Kn}{P_0 H_0} \right)^2 - 2a_3 \left(\frac{Kn}{P_0 H_0} \right)^3 \right) \quad (4.18)$$

ค่าของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่จุด A, B, C และ D ควรถูกคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (4.13)

บริเวณ A :

$$\left. \begin{aligned} P_0^{(k)} \Big|_A &= \frac{P_{0i-1,j-1}^{(k)} + P_{0i-1,j}^{(k)} + P_{0i,j}^{(k)} + P_{0i,j-1}^{(k)}}{4} \\ H_0 \Big|_A &= \frac{H_{0i-1,j-1} + H_{0i-1,j} + H_{0i,j} + H_{0i,j-1}}{4} \\ \phi_0^{(k)} \Big|_A &= \frac{\phi_{0i-1,j-1}^{(k)} + \phi_{0i-1,j}^{(k)} + \phi_{0i,j}^{(k)} + \phi_{0i,j-1}^{(k)}}{4} \\ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_A &= \frac{\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i-1,j-1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i-1,j}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j-1}^{(k)}}{4} \\ \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_A &= \frac{P_{0i,j}^{(k)} - P_{0i-1,j}^{(k)} + P_{0i,j-1}^{(k)} - P_{0i-1,j-1}^{(k)}}{2\Delta X_{i-1}} \\ \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_A &= \frac{P_{0i,j}^{(k)} - P_{0i,j-1}^{(k)} + P_{0i-1,j}^{(k)} - P_{0i-1,j-1}^{(k)}}{2\Delta Y_{j-1}} \end{aligned} \right\} 4.19.a$$

បទីវណ្ណ B :

$$\begin{aligned}
 P_0^{(k)} \Big|_B &= \frac{P_{0i,j}^{(k)} + P_{0i+1,j}^{(k)} + P_{0i+1,j-1}^{(k)} + P_{0i,j-1}^{(k)}}{4} \\
 H_0 \Big|_B &= \frac{H_{0i,j} + H_{0i+1,j} + H_{0i+1,j-1} + H_{0i,j-1}}{4} \\
 \phi_0^{(k)} \Big|_B &= \frac{\phi_{0i,j}^{(k)} + \phi_{0i+1,j}^{(k)} + \phi_{0i+1,j-1}^{(k)} + \phi_{0i,j-1}^{(k)}}{4} \\
 \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_B &= \frac{\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i+1,j}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i+1,j-1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j-1}^{(k)}}{4} \\
 \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_B &= \frac{P_{0i+1,j}^{(k)} - P_{0i,j}^{(k)} + P_{0i+1,j-1}^{(k)} - P_{0i,j-1}^{(k)}}{2\Delta X_i} \\
 \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_B &= \frac{P_{0i+1,j}^{(k)} - P_{0i+1,j-1}^{(k)} + P_{0i,j}^{(k)} - P_{0i,j-1}^{(k)}}{2\Delta Y_{j-1}}
 \end{aligned} \tag{4.19.b}$$

បទីវណ្ណ C :

$$\begin{aligned}
 P_0^{(k)} \Big|_C &= \frac{P_{0i-1,j}^{(k)} + P_{0i-1,j+1}^{(k)} + P_{0i,j+1}^{(k)} + P_{0i,j}^{(k)}}{4} \\
 H_0 \Big|_C &= \frac{H_{0i-1,j} + H_{0i-1,j+1} + H_{0i,j+1} + H_{0i,j}}{4} \\
 \phi_0^{(k)} \Big|_C &= \frac{\phi_{0i-1,j}^{(k)} + \phi_{0i-1,j+1}^{(k)} + \phi_{0i,j+1}^{(k)} + \phi_{0i,j}^{(k)}}{4} \\
 \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_C &= \frac{\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i-1,j}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i-1,j+1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j+1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j}^{(k)}}{4} \\
 \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C &= \frac{P_{0i,j+1}^{(k)} - P_{0i-1,j+1}^{(k)} + P_{0i,j}^{(k)} - P_{0i-1,j}^{(k)}}{2\Delta X_{i-1}} \\
 \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C &= \frac{P_{0i,j+1}^{(k)} - P_{0i,j}^{(k)} + P_{0i-1,j+1}^{(k)} - P_{0i-1,j}^{(k)}}{2\Delta Y_j}
 \end{aligned} \tag{4.19.c}$$

បរិច្ឆេទ D:

$$P_0^{(k)} \Big|_D = \frac{P_{0i,j}^{(k)} + P_{0i,j+1}^{(k)} + P_{0i+1,j+1}^{(k)} + P_{0i+1,j}^{(k)}}{4}$$

$$H_0 \Big|_D = \frac{H_{0i,j} + H_{0i,j+1} + H_{0i+1,j+1} + H_{0i+1,j}}{4}$$

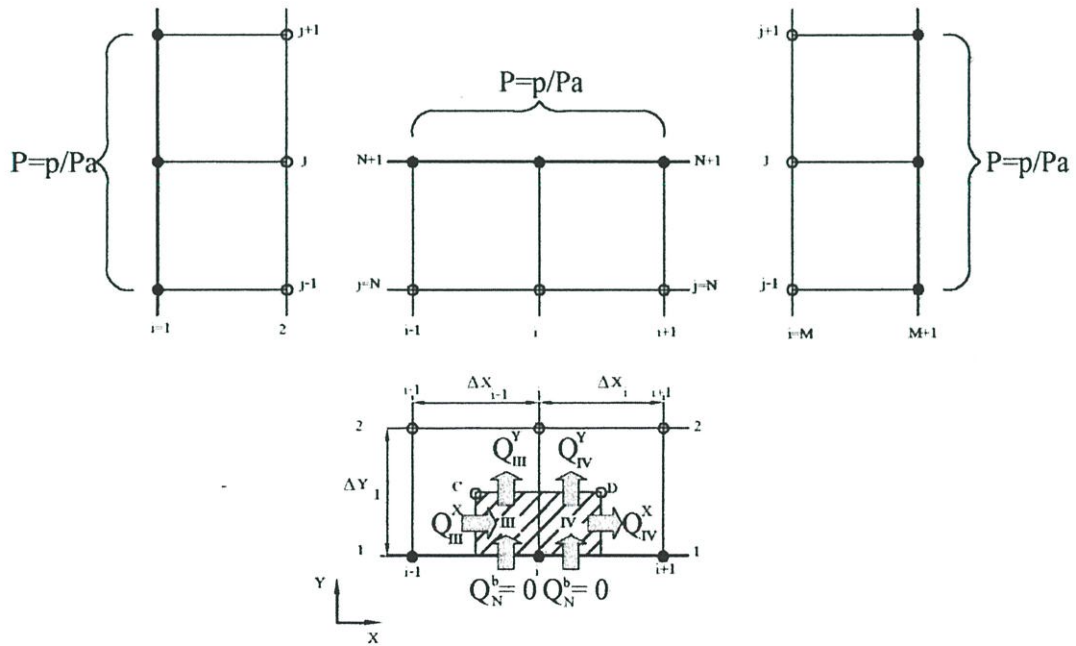
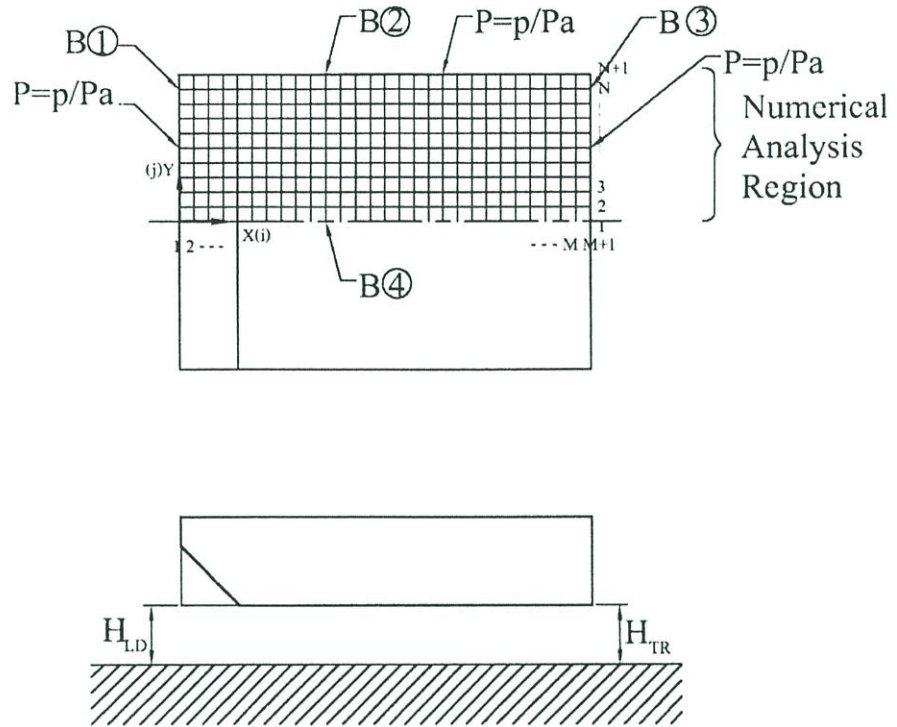
$$\phi_0^{(k)} \Big|_D = \frac{\phi_{0i,j}^{(k)} + \phi_{0i,j+1}^{(k)} + \phi_{0i+1,j+1}^{(k)} + \phi_{0i+1,j}^{(k)}}{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_D = \frac{\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j+1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i+1,j+1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i+1,j}^{(k)}}{4} \quad 4.19.d$$

$$\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D = \frac{P_{0i+1,j+1}^{(k)} - P_{0i,j+1}^{(k)} + P_{0i+1,j}^{(k)} - P_{0i,j}^{(k)}}{2\Delta X_i}$$

$$\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D = \frac{P_{0i+1,j+1}^{(k)} - P_{0i+1,j}^{(k)} + P_{0i,j+1}^{(k)} - P_{0i,j}^{(k)}}{2\Delta Y_j}$$

4.1.4 เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขรอยต่อ



รูปที่ 4.4 เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขรอยต่อของการไหลของมวล (วิธีโคเวอร์เจน ฟอมูลชัน)

(ก) เงื่อนไขขอบบน B1, B2 และ B3

$$P = P_a \quad \text{บน B1, B2 และ B3} \quad 4.20)$$

แทนลงในสมการ (4.4.a)

$$P_0 = P_a \quad \text{บน B1, B2 และ B3} \quad 4.21)$$

$$\Delta P = 0 \quad \text{บน B1, B2 และ B3} \quad 4.22)$$

(ข) รอยต่อการไหลของมวลบน B4 (ธรรมชาติของความสมมาตร)

$$Q_{III}^X - Q_{IV}^X - Q_{III}^Y - Q_{IV}^Y + 2Q_n^b - Q_{i,j}^V = 0 \quad 4.23)$$

0

แทนสมการ (4.4.a) ลงไป เราได้

$$F_B(P_0) = Q_{III0}^X - Q_{IV0}^X - Q_{III0}^Y - Q_{IV0}^Y = 0 \quad 4.24)$$

$$G_B(P_T) = Q_{IIIT}^X - Q_{IVT}^X - Q_{IIIT}^Y - Q_{IVT}^Y - Q_{i,jT}^V = 0 \quad 4.25)$$

ที่ซึ่งแต่ละ Q :

$$\left. \begin{aligned} Q_0^X &= \int_{Y_1}^{Y_2} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial X} - \Lambda(P_0 H_0) \right) dY \\ Q_0^Y &= \int_{X_1}^{X_2} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial Y} \right) dX \\ Q_T^X &= \int_{Y_1}^{Y_2} \left[\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial \Delta P}{\partial X} + \left\{ \frac{\partial(\phi P H^3)}{\partial P} \right\}_0 \Delta P + \frac{\partial(\phi P H^3)}{\partial H} \Big|_0 \Delta H \right] \frac{\partial P_0}{\partial X} \\ &\quad - \Lambda(P_0 \Delta H + \Delta P H_0) dY \\ Q_T^Y &= \int_{X_1}^{X_2} R^2 \left[\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial \Delta P}{\partial Y} + \left\{ \frac{\partial(\phi P H^3)}{\partial P} \right\}_0 \Delta P + \frac{\partial(\phi P H^3)}{\partial H} \Big|_0 \Delta H \right] \frac{\partial P_0}{\partial Y} dX \\ Q_T^V &= \int_{X_1}^{X_2} \int_{Y_1}^{Y_2} \sigma \frac{\partial}{\partial T} (P_0 \Delta H + \Delta P H_0) dXdY \end{aligned} \right\} 4.26)$$

$$\phi = \phi(Kn, P, H)/\mu(T) \quad 4.26 \text{ ต่อ)}$$

สมการ (4.24) เป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นกระบวนการทำซ้ำของนิวตัน – ราฟสัน จากสมการ (4.8) และ (4.9) ถูกใช้ทำสมการเป็นเชิงเส้น

$$F(P_0^{(k)}) + \left. \frac{\partial F(P_0^{(k)})}{\partial P_0} \right|_{P_0=P_0^{(k)}} \delta P_0 = 0 \quad 4.8)$$

$$\delta P_0 = P_0^{(k+1)} - P_0^{(k)} \quad 4.9)$$

แทนสมการ (4.24) ลงในสมการ (4.8)

$$F_B(P_0^{(k+1)}) = (Q_{III0}^X)^{(k+1)} - (Q_{IV0}^X)^{(k+1)} - (Q_{III0}^Y)^{(k+1)} - (Q_{IV0}^Y)^{(k+1)} = 0 \quad 4.27)$$

ที่ซึ่งจากสมการ (4.11)

$$\left. \begin{aligned} (Q_0^X)^{(k+1)} &= \int_{Y1}^{Y2} \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \delta P_0 \right. \\ &\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} - \Lambda (P_0^{(k)} H_0 + H_0^{(k)} \delta P_0) \right] dY \\ (Q_0^Y)^{(k+1)} &= \int_{X1}^{X2} R^2 \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \delta P_0 \right. \\ &\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \right] dX \end{aligned} \right\} 4.11)$$

ทำสมการ (4.27) ให้อยู่ในรูปสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

$$\begin{aligned}
(Q_{III0}^X)^{(k+1)} &= \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C \delta P_0 \Big|_C \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} \Big|_C - \Lambda (P_0^{(k)} H_0 \Big|_C + H_0^{(k)} \delta P_0 \Big|_C) \right] \frac{\Delta Y_j}{2} \\
(Q_{IV0}^X)^{(k+1)} &= \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D \delta P_0 \Big|_D \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} \Big|_D - \Lambda (P_0^{(k)} H_0 \Big|_D + H_0^{(k)} \delta P_0 \Big|_D) \right] \frac{\Delta Y_j}{2} \\
(Q_{III0}^Y)^{(k+1)} &= R^2 \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C \delta P_0 \Big|_C \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \Big|_C \right] \frac{\Delta X_{i-1}}{2} \\
(Q_{IV0}^Y)^{(k+1)} &= R^2 \left[(\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D \delta P_0 \Big|_D \right. \\
&\quad \left. + (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \Big|_D \right] \frac{\Delta X_i}{2}
\end{aligned} \tag{4.28}$$

แทนความสัมพันธ์ในสมการ (4.13) ลงในสมการ (4.27) และ (4.28) เราได้สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ขึ้นกับเทอม δP_0 :

$$\begin{aligned} A_0 \delta P_{i,1} + A_1 \delta P_{i-1,1} + A_2 \delta P_{i+1,1} + 0 + A_4 \delta P_{i,2} \\ + 0 + 0 + A_7 \delta P_{i-1,2} + A_8 \delta P_{i+1,2} + A_9 = 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

ที่ซึ่ง

$$\begin{aligned} A_0 = & \frac{\Delta Y_1}{8} \left(C_{X2} + \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5} \right) \\ & - \frac{\Delta Y_1}{8} \left(D_{X2} - \frac{2D_{X3}}{\Delta X_i} - D_{X5} \right) \\ & - \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(C_{Y2} - \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_1} \right) \quad - \frac{\Delta X_i}{8} \left(D_{Y2} - \frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_1} \right) \\ A_1 = & \frac{\Delta Y_1}{8} \left(C_{X2} - \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5} \right) \\ & - \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(C_{Y2} - \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_1} \right) \\ A_2 = & - \frac{\Delta Y_1}{8} \left(D_{X2} + \frac{2D_{X3}}{\Delta X_i} - D_{X5} \right) \\ & - \frac{\Delta X_i}{8} \left(D_{Y2} - \frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_1} \right) \\ A_3 = & 0 \\ A_4 = & \frac{\Delta Y_1}{8} \left(C_{X2} + \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5} \right) \\ & - \frac{\Delta Y_1}{8} \left(D_{X2} - \frac{2D_{X3}}{\Delta X_i} - D_{X5} \right) \\ & - \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(C_{Y2} + \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_1} \right) \quad - \frac{\Delta X_i}{8} \left(D_{Y2} + \frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_1} \right) \\ A_5 = & 0 \\ A_6 = & 0 \\ A_7 = & \frac{\Delta Y_1}{8} \left(C_{X2} - \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5} \right) \\ & - \frac{\Delta X_{i-1}}{8} \left(C_{Y2} + \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_1} \right) \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\begin{array}{l}
 A_8 = \\
 \\
 A_9 = \frac{\Delta Y_1}{2}(C_{X1} - C_{X4}) \\
 \quad - \frac{\Delta Y_1}{2}(D_{X1} - D_{X4}) \\
 \quad - \frac{\Delta X_{i-1}}{2}(C_{Y1}) \quad - \frac{\Delta X_i}{2}(D_{Y2})
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 -\frac{\Delta Y_1}{8} \left(D_{X2} + \frac{2D_{X3}}{\Delta X_i} - D_{X5} \right) \\
 -\frac{\Delta X_i}{8} \left(D_{Y2} + \frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_1} \right)
 \end{array} \right\} 4.30 \text{ ต่อ) }$$

ที่ซึ่ง

$$\begin{aligned}
 C_{x_1} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C, C_{x_2} = \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C, \\
 C_{x_3} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)}, C_{x_4} = \Lambda(P^{(k)} H_0|_C), C_{x_5} = \Lambda H_0|_C \\
 \\
 D_{x_1} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D, D_{x_2} = \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D, \\
 D_{x_3} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)}, D_{x_4} = \Lambda(P^{(k)} H_0|_D), D_{x_5} = \Lambda H_0|_D \\
 \\
 C_{y_1} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C, C_{y_2} = \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_C^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_C, \\
 C_{y_3} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_C^{(k)} \\
 \\
 D_{y_1} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D, D_{y_2} = \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0 H_0^3) \right\}_D^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D, \\
 D_{y_3} &= (\phi_0 P_0 H_0^3)_D^{(k)}
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

ที่ซึ่ง $\phi(P, H)$ มีค่าคงต่อไปนี้

$$\phi(P, H) = a_0 + a_1 \left(\frac{1}{PH} \right) + a_2 \left(\frac{1}{PH} \right)^2 + a_3 \left(\frac{1}{PH} \right)^3 \quad (4.17)$$

แล้ว

$$\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi P_0 H^3) = H^3 \left(a_0 - a_2 \left(\frac{Kn}{P_0 H_0} \right)^2 - 2a_3 \left(\frac{Kn}{P_0 H_0} \right)^3 \right) \quad (4.18)$$

ค่าของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่จุด A, B, C และ D ควรถูกคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (4.13)

บริเวณ C :

$$\left. \begin{aligned} P_0^{(k)} \Big|_C &= \frac{P_{0i-1,j}^{(k)} + P_{0i-1,j+1}^{(k)} + P_{0i,j+1}^{(k)} + P_{0i,j}^{(k)}}{4} \\ H_0 \Big|_C &= \frac{H_{0i-1,j} + H_{0i-1,j+1} + H_{0i,j+1} + H_{0i,j}}{4} \\ \phi_0^{(k)} \Big|_C &= \frac{\phi_{0i-1,j}^{(k)} + \phi_{0i-1,j+1}^{(k)} + \phi_{0i,j+1}^{(k)} + \phi_{0i,j}^{(k)}}{4} \\ \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_C &= \frac{\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i-1,j}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i-1,j+1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j+1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j}^{(k)}}{4} \\ \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_C &= \frac{P_{0i,j+1}^{(k)} - P_{0i-1,j+1}^{(k)} + P_{0i,j}^{(k)} - P_{0i-1,j}^{(k)}}{2\Delta X_{i-1}} \\ \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial y} \Big|_C &= \frac{P_{0i,j+1}^{(k)} - P_{0i,j}^{(k)} + P_{0i-1,j+1}^{(k)} - P_{0i-1,j}^{(k)}}{2\Delta Y_j} \end{aligned} \right\} 4.32.a$$

บริเวณ D:

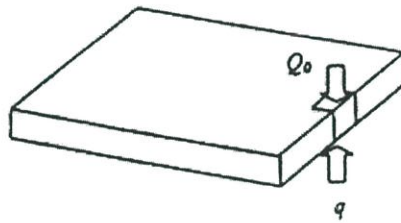
$$\begin{aligned}
 P_0^{(k)} \Big|_D &= \frac{P_{0i,j}^{(k)} + P_{0i,j+1}^{(k)} + P_{0i+1,j+1}^{(k)} + P_{0i+1,j}^{(k)}}{4} \\
 H_0 \Big|_D &= \frac{H_{0i,j} + H_{0i,j+1} + H_{0i+1,j+1} + H_{0i+1,j}}{4} \\
 \phi_0^{(k)} \Big|_D &= \frac{\phi_{0i,j}^{(k)} + \phi_{0i,j+1}^{(k)} + \phi_{0i+1,j+1}^{(k)} + \phi_{0i+1,j}^{(k)}}{4} \\
 \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_D &= \frac{\frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i,j+1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i+1,j+1}^{(k)} + \frac{\partial}{\partial P_0} (\phi_0 P_0) \Big|_{i+1,j}^{(k)}}{4} \\
 \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \Big|_D &= \frac{P_{0i+1,j+1}^{(k)} - P_{0i,j+1}^{(k)} + P_{0i+1,j}^{(k)} - P_{0i,j}^{(k)}}{2\Delta X_i} \\
 \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \Big|_D &= \frac{P_{0i+1,j+1}^{(k)} - P_{0i+1,j}^{(k)} + P_{0i,j+1}^{(k)} - P_{0i,j}^{(k)}}{2\Delta Y_j}
 \end{aligned}
 \tag{4.32.b}$$

บทที่ 5

ทฤษฎีทางความร้อน

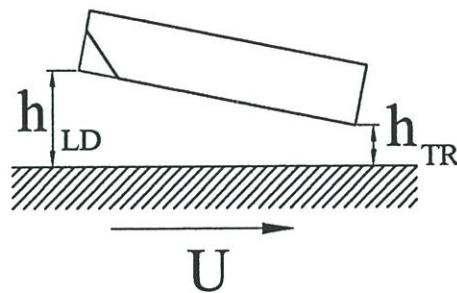
5.1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและแบร์ริงอากาศ

ขณะเครื่องบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานหัวอ่านจะลอยอยู่บนจานแข็งบันทึกข้อมูลซึ่งหมุนอยู่ด้วยความเร็วเชิงเส้นคงที่โดยหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะยึดติดกับแขนจับ เมื่อหัวอ่านทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล กระแสไฟฟ้าจะถูกจ่ายสู่อุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูลซึ่งทำให้เกิดความร้อนในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทสู่แบร์ริงอากาศ นอกจากนี้ยังมีความร้อนอีกส่วนหนึ่งเกิดขึ้นในแบร์ริงอากาศอันเป็นผลมาจากแรงเสียด



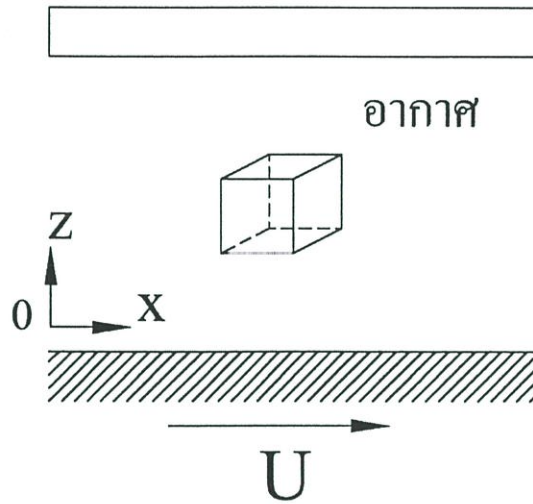
รูปที่ 5.1 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับหัวอ่านตอนนี้เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเป็น 2 มิติ เราต้องการพิจารณาแค่ 4 ขอบของ slider plate เพราะว่า slider plate นั้นบางมาก ($\approx 3\mu\text{m}$) และหัวอ่าน MR ไกลจากขอบด้านหน้าและด้านข้าง เพราะฉะนั้นความร้อนถ่ายเทสู่ทั้ง 3 ด้านน้อยมาก เราสมมติว่า boundary condition ของมันเป็น adiabatic ขณะที่ขอบหลังของ slider plate อากาศค่อนข้างนิ่ง เราจึงไม่คิดการถ่ายเทความร้อนจากขอบหลังของ slider body และคิดเงื่อนไขเป็น adiabatic ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจาก slider plate สู่ air bearing พฤติกรรมเหมือน sink ในปัญหา 2 มิติ



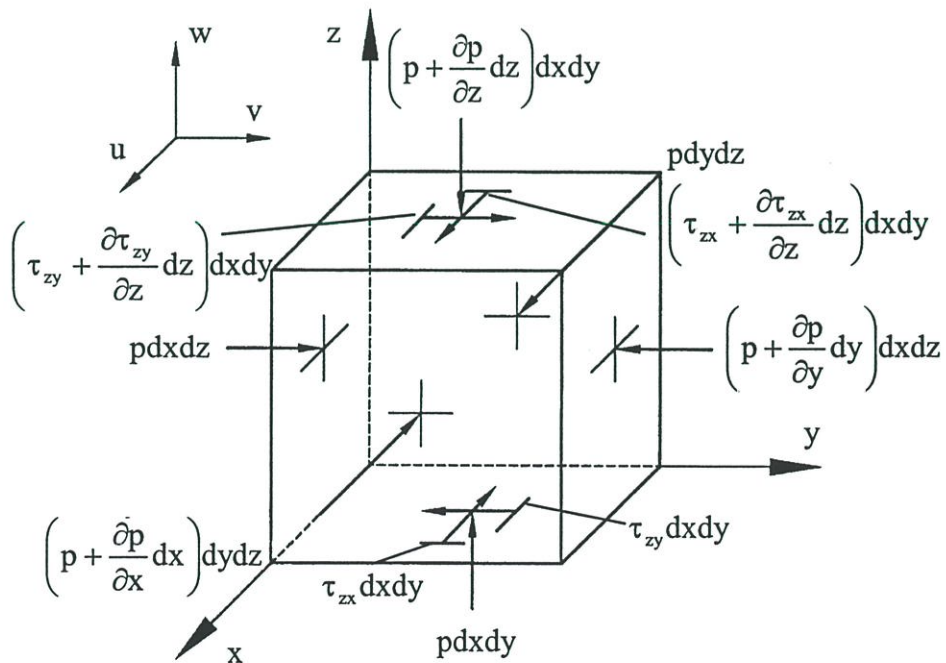
รูปที่ 5.2 ลักษณะการทำงานของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

พิจารณารูปที่ 5.2 เมื่องานแข็งบันทึกข้อมูลหมุนตัวอากาศจะไหลผ่านระหว่างงานแข็งและหัวอ่าน



รูปที่ 5.3 การไหลของอากาศระหว่างหัวอ่านและงานแข็งบันทึกข้อมูล

จากรูปที่ 5.3 เราวิเคราะห์การไหลของอากาศโดยพิจารณาก่อนของไหลในรูปที่ 5.3 เริ่มแรกเราจะพิจารณาแรงกระทำสำหรับกรณีของแบร์ริงอากาศโดยทั่วไปดังที่เห็นในรูปที่ 5.2 เราสามารถพิจารณาแรงกระทำได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แรงกระทำกับก้อนของไหลของแบร์ริง

จากรูปที่ 5.4 แรงที่กระทำกับก้อนของไหลของแบร์ริงในแนวแกน x โดยแรงลัพธ์จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$F_x = \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dydz + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \quad (5.1)$$

จะได้

$$F_x = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (5.2)$$

โดย $F_x = 0$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (5.3)$$

ของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน แล้ว

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5.4a)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (5.4b)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (5.4c)$$

จากสมการที่ 5.3 แทนสมการที่ 5.4b ลงไป

$$\left. \begin{aligned} 0 &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ 0 &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} (5.5)$$

จากรูปที่ 5.4 แรงที่กระทำกับก้อนของไหลของแบร์ริงในแนวแกน y โดยแรงลัพธ์จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$F_y = \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial y} dy \right) \right] dx dz + \left[\left(\tau_{zy} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zy} \right] dx dy \quad (5.6)$$

จะได้

$$F_y = \left(-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (5.7)$$

โดย $F_y = 0$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (5.8)$$

จากสมการ 4.c แทนลงในสมการ 8)

$$\left. \begin{aligned} 0 &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ 0 &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

จากรูปที่ 5.4 แรงที่กระทำกับก้อนของไหลของแบร์ริงในแนวแกน z โดยแรงลัพธ์จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$F_z = \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) \right] dx dy \quad (5.10)$$

จะได้

$$F_z = -\frac{\partial p}{\partial z} dx dy \quad (5.11)$$

โดย $F_z = 0$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (5.12)$$

จากสมการ 5.3), 5.8) และ 5.12) จะได้สมการนาเวียร์-สโตคสำหรับแบร์ริง

5.1.1 สมการนาเวียร์-สโตค

สมการนาเวียร์-สโตคสำหรับแบร์ริงอากาศ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (3.12)$$

ที่ซึ่ง u, v เป็นความเร็วในทิศทาง x และ y p คือ ความดัน μ คือ ความหนืดของอากาศ องค์ประกอบความเร็ว w ในทิศทาง z ประมาณเท่ากับศูนย์ ชัดเจนว่าความดัน p คงที่ตลอดความหนาของแบร์ริงอากาศ

5.1.1.1 การกระจายความเร็วในแนวแกน x

จากสมการ Navier – Stoke (3.10)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} dz \quad (5.13)$$

อินทิเกรตสมการ (5.13)

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z + c \quad (5.14)$$

อินทิเกรตสมการ (5.14)

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z^2 + cz + d \quad (5.15)$$

เงื่อนไขขอบเขต กำหนดให้ $a = \frac{2-6M}{6M}$

$$u(0) = U + \frac{2-6M}{6M} \lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad \left. \vphantom{u(0)} \right\} \quad 5.16)$$

$$u(0) = U + a\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0}$$

$$u(h) = -\frac{2-6M}{6M} \lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad \left. \vphantom{u(h)} \right\} \quad 5.17)$$

$$u(h) = -a\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h}$$

แทนเงื่อนไขขอบเขตที่ (5.16) ลงใน u

$$U + a\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = d \quad \left. \vphantom{U} \right\} \quad 5.18)$$

$$U + a\lambda c = d$$

แทนเงื่อนไขขอบเขตที่ (5.17) ลงใน u

$$-a\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h} = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^2 + ch + U + a\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad \left. \vphantom{-a\lambda} \right\} \quad 5.19)$$

$$-a\lambda \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^2 + U + ch + 2a\lambda c$$

พิจารณา

$$\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^2 + \frac{a\lambda}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h^2 + 2a\lambda h) \quad \left. \vphantom{\frac{1}{2\mu}} \right\} \quad 5.20)$$

$$= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h^2 + 2a\lambda h + 2a\lambda h + (2a\lambda)^2 - (2a\lambda)^2 - 2a\lambda h)$$

$$= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h^2 + 2a\lambda h)^2 - \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h + 2a\lambda)$$

จากสมการ (5.19)

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^2 + a\lambda \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U + ch + 2a\lambda c \\
 &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h^2 + 2a\lambda h) - \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h + 2a\lambda) + U + c(h + 2a\lambda) \\
 c &= -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h + 2a\lambda) + \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{U}{(h + 2a\lambda)}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} 0 \\ = \\ c \end{aligned}} \right\} 5.21)$$

จาก u

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z^2 + \left(-\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h + 2a\lambda) + \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{U}{(h + 2a\lambda)} \right) z \\
 &+ U + a\lambda \left(-\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h + 2a\lambda) + \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{U}{(h + 2a\lambda)} \right) \\
 u &= -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (a\lambda h + hz - z^2) + U \left(1 - \frac{(z + a\lambda)}{(h + 2a\lambda)} \right)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} u \\ = \\ u \end{aligned}} \right\} 5.22)$$

5.1.1.2 การกระจายความเร็วในแนวแกน y

จากสมการ Navier – Stoke (3.11)

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} dz \quad 5.23)$$

อินทิเกรตสมการ (5.23)

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z + c \quad 5.24)$$

อินทิเกรตสมการ (5.24)

$$v = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z^2 + cz + d \quad 5.25)$$

เงื่อนไขขอบเขต กำหนดให้ $a = \frac{2-6M}{6M}$

$$v(0) = a\lambda \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} \quad 5.26)$$

$$v(h) = -a\lambda \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=h} \quad 5.27)$$

แทนเงื่อนไขขอบเขตที่ (5.26) ลงใน v

$$\left. \begin{aligned} a\lambda \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} &= d \\ a\lambda c &= d \end{aligned} \right\} \quad 5.28)$$

แทนเงื่อนไขขอบเขตที่ (5.27) ลงใน u

$$\left. \begin{aligned} -a\lambda \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=h} &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} h^2 + ch + a\lambda \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} \\ -a\lambda \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} h &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} h^2 + ch + 2a\lambda c \end{aligned} \right\} \quad 5.29)$$

จากสมการ (5.29)

$$\left. \begin{aligned} &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} h^2 + \frac{a\lambda}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} h + ch + 2a\lambda c \\ &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (h + 2a\lambda)^2 - \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (h + 2a\lambda) + c(h + 2a\lambda) \end{aligned} \right\} \quad 5.30)$$

จะได้

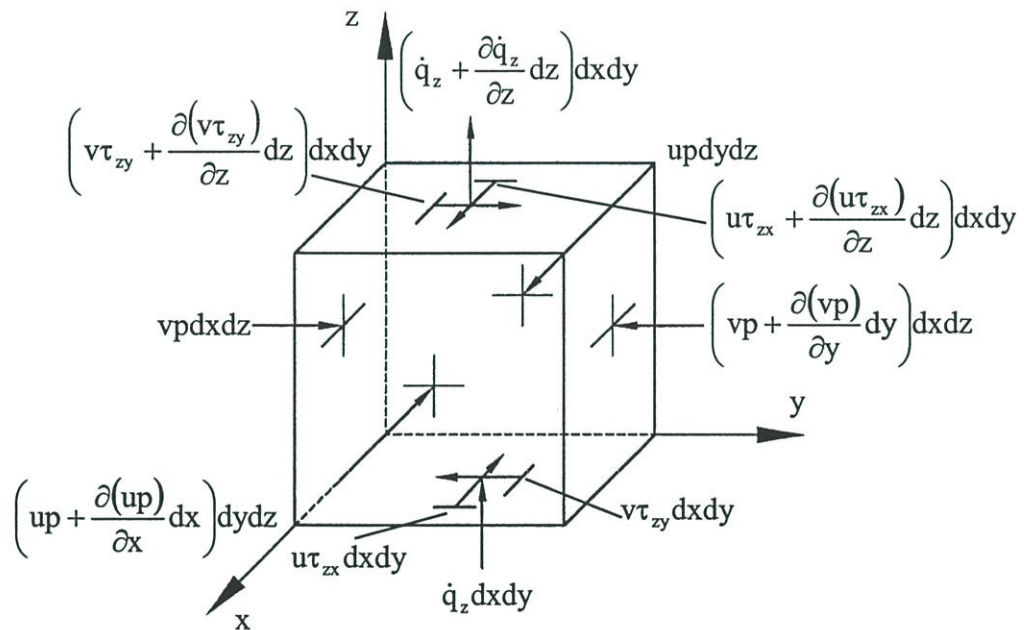
$$c = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (h + 2a\lambda) + \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \quad 5.31)$$

$$d = a\lambda \left(-\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (h + 2a\lambda) + \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad 5.32)$$

จะได้การกระจายความเร็ว

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z^2 - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} hz - \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z + \frac{2a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z \\
 &- \frac{a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} h - \frac{a\lambda}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (2a\lambda) + \frac{2(a\lambda)^2}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \\
 v &= -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (a\lambda h + hz - z^2)
 \end{aligned}
 \tag{5.33}$$

ตามรายงานของ Tian Hong และคณะ [17] ในปี พ.ศ.2540 ได้ระบุถึงการเกิดการรบกวนสัญญาณของ MR เซนเซอร์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่าง MR เซนเซอร์และผิวงานแข็งบนที่ก ข้อมูลแม้ไม่เกิดการสัมผัสกันระหว่างหัวอ่านและงานแข็ง



รูปที่ 5.5 พลังงานเข้าออกก้อนของไหลของเบริง

จากรูปที่ 5.3 และตามรายงาน [17] เราพิจารณาพลังงานเข้าออกก้อนของไหลในรูปที่ 5.3 เราสามารถพิจารณาพลังงานตามแนวแกน x ได้ดังรูปที่ 5.5 จากกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\left[\begin{array}{l} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{พลังงานภายในก้อน} \\ \text{ของไหล} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{การถ่ายเทความ} \\ \text{ร้อนสุทธิเข้าสู่} \\ \text{ก้อนของไหล} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{อัตราการทำงานบนก้อน} \\ \text{ของไหลอันเนื่องมาจาก} \\ \text{body force และ surface force} \end{array} \right]
 \tag{5.34}$$

หรือ

$$A = B + C \quad (5.35)$$

เทอม c

งานจากแรงดันและแรงเฉือน

แนวแกน x จากรูปที่ 5.5

จากแรงดัน

$$\left[up - \left(up + \frac{\partial(up)}{\partial x} dx \right) \right] dydz = -\frac{\partial(up)}{\partial x} dx dy dz \quad (5.36)$$

จากแรงเฉือน

$$\left[\left(u\tau_{zx} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} dz \right) - u\tau_{zx} \right] dx dy = \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} dx dy dz \quad (5.37)$$

แนวแกน y จากรูปที่ 5.5

จากแรงดัน

$$\left[vp - \left(vp + \frac{\partial(vp)}{\partial y} dy \right) \right] dx dz = -\frac{\partial(vp)}{\partial y} dx dz \quad (5.38)$$

จากแรงเฉือน

$$\left[\left(v\tau_{zy} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} dz \right) - v\tau_{zy} \right] dx dy = \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} dx dy dz \quad (5.39)$$

แนวแกน z จากรูปที่ 5.5

จากแรงดัน

ไม่มี

จากแรงเฉือน

ไม่มี

จะได้

$$c = \left[\left(-\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (5.40)$$

เทอม c

จากรูปที่ 5.5

$$\left[\dot{q}_z - \left(\dot{q}_z + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} dz \right) \right] dy dz = -\frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} dx dy dz \quad (5.41)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{การถ่ายเทความร้อน} \\ \text{จากก้อนของไหล} \\ \text{โดยการนำความร้อน} \end{array} \right] = -\frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} dx dy dz \quad (5.42)$$

จาก

$$\dot{q}_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5.43)$$

จะได้

$$B = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (5.44)$$

เทอม A

$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dx dy dz \quad (5.45)$$

จากสมการที่ 5.3, 5.8 และ 5.12 คูณตลอดด้วยความเร็ว u , v และ w ตามลำดับจะได้

$$0 = -u \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (5.46)$$

$$0 = -v \frac{\partial p}{\partial y} + v \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (5.47)$$

$$0 = -w \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5.48)$$

รวมสมการ 5.46, 5.47 และ 5.48 จะได้

$$0 = \left(-u \frac{\partial p}{\partial x} - v \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \left(u \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + v \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad (5.49)$$

จาก

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt}(e) dx dy dz &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dz \\ &+ \left[\left(-\frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \end{aligned} \quad (5.50)$$

ลบสมการ 5.49 จากสมการ 5.50 จะได้

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt}(e) dx dy dz &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dz \\ &+ \left[\left(-p \frac{\partial u}{\partial x} - p \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \end{aligned} \quad (5.51)$$

ไม่มีพลังงานภายในและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกน x และ y

$$0 = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (5.52)$$

แทนค่าแรงเฉือนลงไปนสมการจะได้สมการพลังงานสำหรับแบร์ริง

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad 5.53)$$

5.1.2 สมการพลังงาน

สมการพลังงานสำหรับแบร์ริงอากาศ

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 = 0 \quad 3.26)$$

โดยปกติเทอมเนื่องจากแรงเฉือน (viscous dissipation term) มีขนาดเล็กกว่าเทอมการนำความร้อนในสมการ 3.26 แต่เมื่อความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและผิวตีสก์เข้าใกล้หรือมีค่าเท่ากับศูนย์ “ผลการอุ่น” (“warming effect”) จากแรงเฉือนไม่สามารถถูกตัดทิ้งได้ เพราะฉะนั้นเราให้ความสนใจเทอมนี้ในสมการ 3.26 ในการวิเคราะห์ต่อไป

แทนค่า u, v จากสมการ 5.22 และ 5.33 ตามลำดับ

$$u = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (a\lambda h + hz - z^2) + U \left(1 - \frac{z + a\lambda}{h + 2a\lambda} \right)$$

$$v = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (a\lambda h + hz - z^2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h - 2z) + U \left(\frac{-1}{h + 2a\lambda} \right) \quad 5.53)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (h - 2z) \quad 5.54)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = \frac{1}{4\mu^2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 (h^2 - 4hz + 4z^2) + \frac{U}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{(h - 2z)}{(h + 2a\lambda)} + \frac{U^2}{(h + 2a\lambda)^2} \quad 5.55)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 = \frac{1}{4\mu^2} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 (h^2 - 4hz + 4z^2) \quad 5.56)$$

จะได้

$$\begin{aligned}
 & k \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{1}{4\mu^2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 (h^2 - 4hz + 4z^2) \right. \\
 & \left. + \frac{U}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{(h-2z)}{(h+2a\lambda)} + \frac{\mu U^2}{(h+2a\lambda)^2} \right) \\
 & + \mu \left(\frac{1}{4\mu^2} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 (h^2 - 4hz + 4z^2) \right) = 0
 \end{aligned} \tag{5.57}$$

$$\begin{aligned}
 k \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} = & -\frac{1}{4\mu} (h^2 - 4hz + 4z^2) \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \\
 & - \frac{U}{(h+2a\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) (h-2z) - \frac{\mu U^2}{(h+2a\lambda)^2}
 \end{aligned}$$

อินทิเกรตสมการ (5.57)

$$\begin{aligned}
 k \frac{\partial \Gamma}{\partial z} = & -\frac{1}{4\mu} \left(h^2 z - \frac{4}{2} hz^2 + \frac{4}{3} z^3 \right) \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \\
 & - \frac{U}{(h+2a\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left(hz - \frac{2}{2} z^2 \right) - \frac{\mu U^2 z}{(h+2a\lambda)^2} + g
 \end{aligned} \tag{5.58}$$

อินทิเกรตสมการ (5.58)

$$\begin{aligned}
 k\Gamma = & -\frac{1}{4\mu} \left(\frac{h^2}{2} z^2 - \frac{2}{3} hz^3 + \frac{1}{3} z^4 \right) \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \\
 & - \frac{U}{(h+2a\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left(\frac{h}{2} z^2 - \frac{1}{3} z^3 \right) \\
 & - \frac{\mu U^2}{2(h+2a\lambda)^2} z^2 + Gz + H
 \end{aligned} \tag{5.59}$$

กำหนด Jump Condition $\left(b = 2 \frac{2-\sigma_T}{\sigma_T} \frac{\gamma}{(\gamma+1)Pr} \right)$

$$T(0) = T_d + b\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad 5.60)$$

$$T(h) = T_s - b\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h} \quad 5.61)$$

จากสมการ (5.59) แทน $T(0)$

$$k \left(T_d + b\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \right) = H \quad 5.62)$$

โดย

$$kb\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = kb\lambda \frac{G}{k} \quad 5.63)$$

ได้

$$H = kT_d + kb\lambda \frac{G}{k} \quad 5.64)$$

จากสมการ (5.59) แทน $T(h)$

$$\begin{aligned} k \left(T_s - b\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h} \right) &= -\frac{1}{4\mu} \left(\frac{1}{2}h^4 - \frac{2}{3}h^4 + \frac{1}{3}h^4 \right) \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \\ &- \frac{U}{(h+2a\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left(\frac{h^3}{2} - \frac{h^3}{3} \right) \\ &- \frac{\mu U^2 h^2}{2(h+2a\lambda)^2} + Gh + k \left(T_d + b\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \right) \end{aligned} \quad 5.65)$$

จากสมการ (5.60)

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} &= -\frac{1}{4\mu k} \left(h^2 h - \frac{4}{2} h h^2 + \frac{4}{3} h^3 \right) \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \\
 &- \frac{U}{k(h+2a\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left(h h - \frac{2}{2} h^2 \right) \\
 &- \frac{\mu U^2 h}{k(h+2a\lambda)^2} + \frac{G}{k}
 \end{aligned} \right\} 5.66) \\
 \\
 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} &= -\frac{1}{4\mu k} \left(\frac{h^3}{3} \right) \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{\mu U^2 h}{k(h+2a\lambda)^2} + \frac{G}{k}
 \end{aligned}$$

จะได้จากสมการ (5.65)

$$\begin{aligned}
 &k \left(T_s - b\lambda \left[-\frac{1}{4\mu k} \left(\frac{h^3}{3} \right) \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{\mu U^2 h}{k(h+2a\lambda)^2} + \frac{G}{k} \right] \right) \\
 &= -\frac{1}{4\mu} \frac{h^4}{6} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{U}{(h+2a\lambda)} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{h^3}{6} \\
 &- \frac{\mu U^2 h^2}{2(h+2a\lambda)^2} + Gh + kT_d + kb\lambda \frac{G}{k} \\
 &k(T_s - T_d) = -\frac{1}{4\mu} \frac{h^4}{6} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] (h+2b\lambda) - \frac{U}{(h+2a\lambda)} \frac{h^3}{6} \frac{\partial p}{\partial x} \\
 &- \frac{\mu U^2 h(h+2b\lambda)}{2(h+2a\lambda)^2} + G(h+2b\lambda)
 \end{aligned} \right\} 5.67)$$

$$\begin{aligned}
 G &= k \frac{(T_s - T_d)}{(h+2b\lambda)} + \frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu U^2 h}{2(h+2a\lambda)^2} \\
 &+ \frac{U}{(h+2a\lambda)(h+2b\lambda)} \frac{h^3}{6} \frac{\partial p}{\partial x}
 \end{aligned} \right\} 5.68)$$

แทนค่า G, H และจัดรูปการกระจายอุณหภูมิ

จากสมการ (5.59)

$$\begin{aligned}
 kT = & -\frac{z^4}{12\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \\
 & + \frac{1}{3} \left\{ \frac{h}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{U}{(h+2a\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right\} z^3 \\
 & - \frac{\mu}{2} \left\{ \frac{h^2}{4\mu^2} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{Uh}{\mu^2(h+2a\lambda)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U^2}{(h+2a\lambda)^2} \right\} z^2 \\
 & + Gz + kT_d + kb\lambda \frac{G}{k}
 \end{aligned} \tag{5.69}$$

$$\begin{aligned}
 T = T_d - \frac{1}{k} & \left\{ \frac{1}{12\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] z^4 \right. \\
 & - \frac{1}{3} \left\{ \frac{h}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{U}{(h+2a\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right\} z^3 \\
 & + \frac{\mu}{2} \left\{ \left(\frac{h}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{U}{(h+2a\lambda)} \right)^2 + \frac{h^2}{4\mu^2} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right\} z^2 \left. \right\} \\
 & + \left\{ \frac{(T_s - T_d)}{(h+2b\lambda)} + \frac{1}{k} \left[\frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\mu U^2 h}{2(h+2a\lambda)^2} + \frac{Uh^3}{6(h+2a\lambda)(h+2b\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] \right\} (z+b\lambda)
 \end{aligned} \tag{5.70}$$

5.1.3 กฎของฟูรีเยร์

จากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law) $q = -k \partial T / \partial z$ และการกระจายอุณหภูมิ (5.70) เราได้ การถ่ายเทความร้อนสู่หัวอ่านดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Gamma}{\partial z} = & -\frac{1}{k} \left\{ \frac{4}{12\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] z^3 \right. \\
& - \frac{3}{3} \left\{ \frac{h}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{U}{h+2a\lambda} \right\} z^2 \\
& + \frac{2\mu}{2} \left\{ \left(\frac{h}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{U}{(h+2a\lambda)} \right)^2 + \frac{h^2}{4\mu^2} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right\} z \\
& + \left\{ \frac{(T_s - T_d)}{(h+2b\lambda)} + \frac{1}{k} \left[\frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\mu U^2 h}{2(h+2a\lambda)^2} + \frac{U h^3}{6(h+2a\lambda)(h+2b\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{5.71}$$

ให้

$$\begin{aligned}
\Pi = & \left\{ \frac{(T_s - T_d)}{(h+2b\lambda)} + \frac{1}{k} \left[\frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\mu U^2 h}{2(h+2a\lambda)^2} + \frac{U h^3}{6(h+2a\lambda)(h+2b\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{5.72}$$

กระจาย

$$\left(\frac{h}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U}{h+2a\lambda} \right)^2 = \frac{h^2}{4\mu^2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \frac{h}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{U}{h+2a\lambda} \right) + \frac{U^2}{(h+2a\lambda)^2} \tag{5.73}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Gamma}{\partial z} = & -\frac{1}{k} \left\{ \frac{4}{12\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] z^3 \right. \\
& - \left\{ \frac{h}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{U}{h+2a\lambda} \right\} z^2 \\
& + \left\{ \frac{h^2}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{U}{h+2a\lambda} \right) + \frac{\mu U^2}{(h+2a\lambda)^2} + \frac{h^2}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right\} z \Big\} + \Pi
\end{aligned} \tag{5.74 ต่อ)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial z} = & -\frac{1}{k} \left\{ \frac{4}{12\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] z^3 \right. \\
& - \left. \left\{ \frac{h}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{U}{h + 2a\lambda} \right\} z^2 \right. \\
& + \left. \left\{ \frac{h^2}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{U}{h + 2a\lambda} \right) + \frac{\mu U^2}{(h + 2a\lambda)^2} + \frac{h^2}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right\} z \right\} \\
& + \left\{ \frac{(T_s - T_d)}{(h + 2b\lambda)} + \frac{1}{k} \left[\frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\mu U^2 h}{2(h + 2a\lambda)^2} + \frac{U h^3}{6(h + 2a\lambda)(h + 2b\lambda)} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{5.74 ต่อ)$$

จะได้จาก Fourier's law $q = -k \partial T / \partial z$

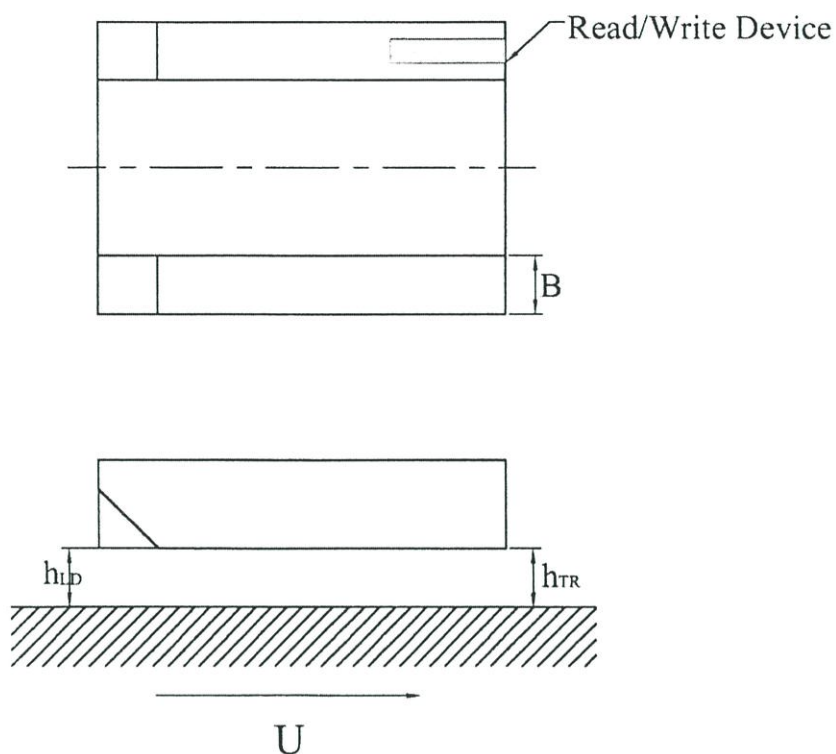
$$\begin{aligned}
q = & -k \frac{\partial T}{\partial z} \\
= & -k \left\{ \frac{(T_s - T_d)}{(h + 2b\lambda)} + \frac{4}{12\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] z^3 \right. \\
& - \left. \left\{ \frac{h}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{U}{h + 2a\lambda} \right\} z^2 \right. \\
& + \left. \left\{ \frac{h^2}{4\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{U h}{h + 2a\lambda} + \frac{\mu U^2}{(h + 2a\lambda)^2} \right\} z \right. \\
& \left. - \left\{ \frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu U^2 h}{2(h + 2a\lambda)^2} + \frac{U h^3}{6(h + 2a\lambda)(h + 2b\lambda)} \frac{\partial p}{\partial x} \right\} \right\}
\end{aligned} \tag{5.75)$$

หาการถ่ายเทความร้อนที่ความสูง h

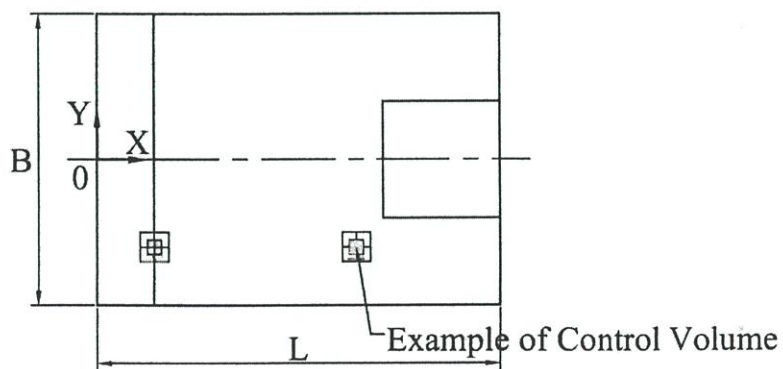
$$\begin{aligned}
q(h) = & -k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h} \\
= & -k \left\{ \frac{T_s - T_d}{h + 2b\lambda} + \frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \frac{\mu h U^2}{(h + 2a\lambda)^2} \right. \\
& \left. - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{U h^3}{6(h + 2a\lambda)(h + 2b\lambda)} \right\}
\end{aligned} \tag{5.76)$$

5.2 วิธีปริมาตรจำกัด

5.2.1 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและอุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูล

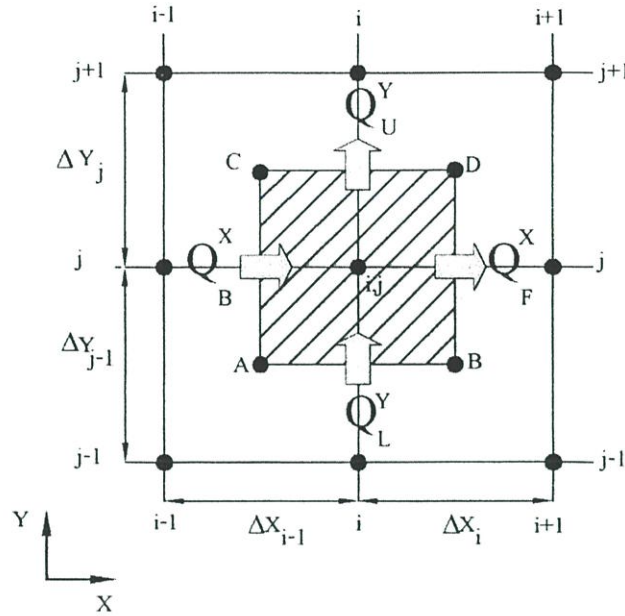


รูปที่ 5.6 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและอุปกรณ์อ่านเขียนข้อมูล



รูปที่ 5.7 รางของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและอุปกรณ์อ่านเขียนข้อมูล

5.2.2 ปริมาตรควบคุม



รูปที่ 5.8 ปริมาตรควบคุม(วิธีปริมาตรจำกัด)

5.2.3 สมการการนำความร้อน

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial X} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \bar{S} = 0 \tag{5.77}$$

ที่ซึ่ง

$$\Gamma = \frac{k_{SL} \mu_0 T_s}{h_0^3 Pa^2}, \bar{S} = \frac{\mu_0 L^2}{h_0^3 Pa^2} S \tag{5.78}$$

อินทิเกรตสมการ (5.77) ตลอดปริมาตรควบคุมจะได้

$$\int_{Y_{1X1}}^{Y_{2X2}} \int_{Y_{1X1}}^{Y_{2X2}} \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial X} \right) dXdY + R^2 \int_{Y_{1X1}}^{Y_{2X2}} \int_{Y_{1X1}}^{Y_{2X2}} \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dXdY + \int_{Y_{1X1}}^{Y_{2X2}} \int_{Y_{1X1}}^{Y_{2X2}} \bar{S} dXdY = 0 \tag{5.79}$$

เทอม

$$\int_{Y_{1X1}}^{Y_{2X2}} \int_{Y_{1X1}}^{Y_{2X2}} \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial X} \right) dXdY = \left[\Gamma_F \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\Delta X_{i+1}/2} - \Gamma_B \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\Delta X_i/2} \right] \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{2}$$

เทอม

$$\int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_1}^{X_2} \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dXdY = \left[\Gamma_U \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j})}{\Delta Y_{j+1}/2} - \Gamma_L \frac{(T_{i,j} - T_{i,j-1})}{\Delta Y_j/2} \right] \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{2}$$

เทอม

$$\int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_1}^{X_2} \bar{S} dXdY = \bar{S} \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{2} \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{2}$$

5.79 ต่อ)

จัดให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะได้เทอมต่างๆ ดังนี้

เทอม F

$$\Gamma_F \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{\Delta X_{i+1}} (T_{i+1,j})$$

เทอม B

$$\Gamma_B \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{\Delta X_i} (T_{i,j})$$

เทอม U

$$R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} (T_{i,j+1})$$

เทอม L

$$R^2 \Gamma_L \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} (T_{i,j-1})$$

5.80)

เทอม $T_{i,j}$

$$T_{i,j} \left[-R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} - R^2 \Gamma_L \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} - R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} - R^2 \Gamma_L \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} \right] \quad 5.80 \text{ ต่อ)$$

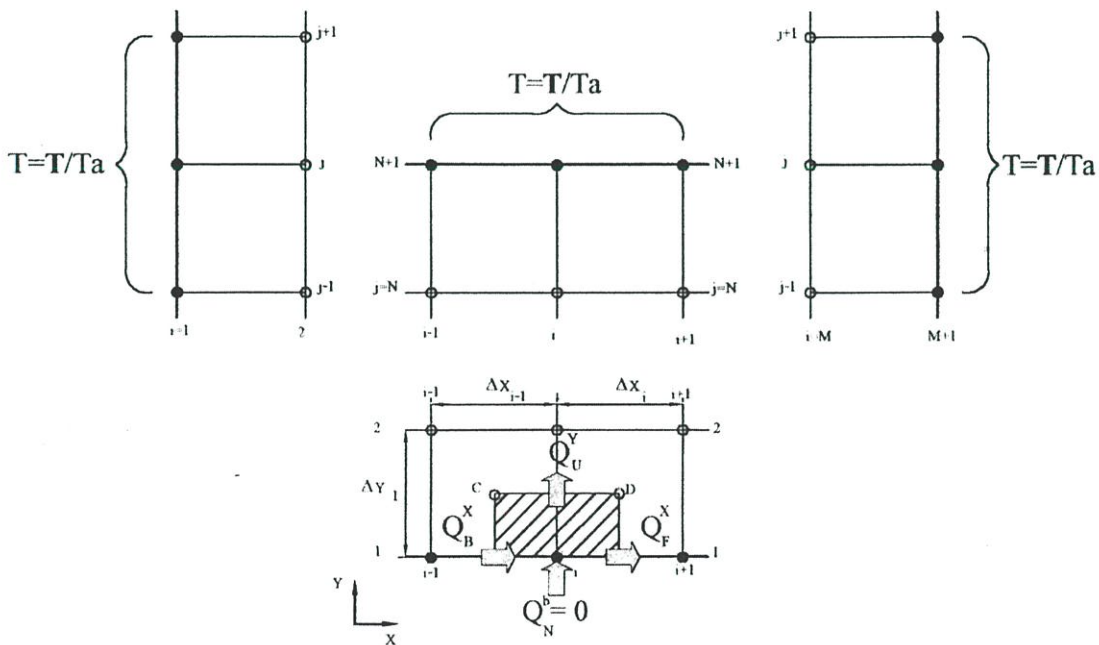
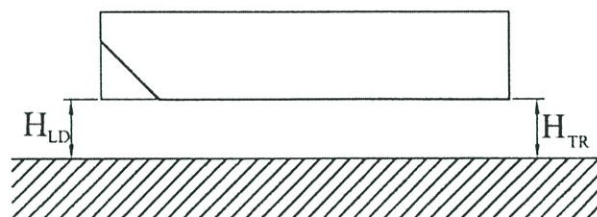
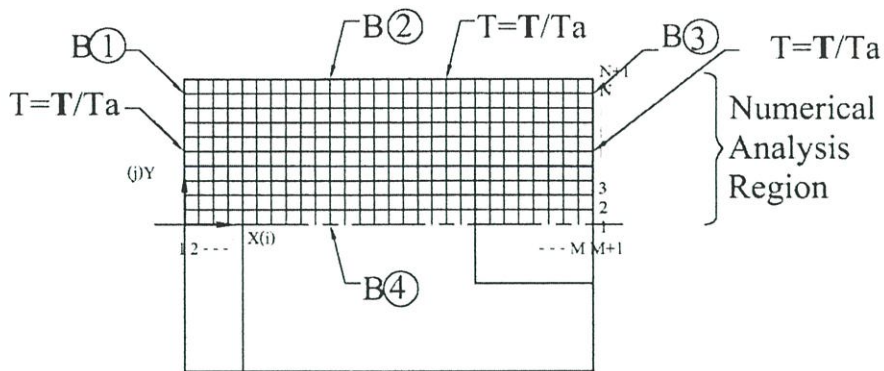
จะได้

$$A_{i,j} T_{i,j} + A_F T_{i+1,j} + A_B T_{i-1,j} + A_U T_{i,j+1} + A_L T_{i,j-1} + B = 0 \quad 5.81)$$

โดย

$$\left. \begin{aligned} A_F &= \Gamma_F \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{\Delta X_{i+1}} \\ A_B &= \Gamma_B \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{\Delta X_i} \\ A_U &= R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} \\ A_L &= R^2 \Gamma_L \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_j} \\ A_{i,j} &= \left[-\Gamma_F \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{\Delta X_{i+1}} - \Gamma_B \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{\Delta X_i} - R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} - R^2 \Gamma_L \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_j} \right] \\ B &= \bar{S} \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{2} \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{2} \end{aligned} \right\} \quad 5.82)$$

5.2.4 เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขรอยต่อ



รูปที่ 5.9 เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขรอยต่อการไหลของมวล (วิธีปริมาตรจำกัด)

เราใช้วิธีปริมาตรจำกัดมาใช้ในการแก้ปัญหา

สมการการนำความร้อน

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial X} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \bar{S} = 0 \quad (5.77)$$

ที่ซึ่ง

$$\Gamma = \frac{k_{SL} \mu_0 T_s}{h_0^3 \text{Pa}^2}, \bar{S} = \frac{\mu_0 L^2}{h_0^3 \text{Pa}^2} S \quad (5.78)$$

อินทิเกรตสมการ (5.77) ตลอดปริมาตรควบคุมจะได้

$$\int_{Y_1 X_1}^{Y_2 X_2} \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial X} \right) dXdY + R^2 \int_{Y_1 X_1}^{Y_2 X_2} \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dXdY + \int_{Y_1 X_1}^{Y_2 X_2} \bar{S} dXdY = 0$$

เทอม

$$\int_{Y_1 X_1}^{Y_2 X_2} \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial X} \right) dXdY = \left[\Gamma_F \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\Delta X_{i+1}/2} - \Gamma_B \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\Delta X_i/2} \right] \frac{(\Delta Y_{j+1})}{2}$$

เทอม

$$\int_{Y_1 X_1}^{Y_2 X_2} \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dXdY = \left[\Gamma_U \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j})}{\Delta Y_{j+1}/2} \right] \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{2}$$

เทอม

$$\int_{Y_1 X_1}^{Y_2 X_2} \bar{S} dXdY = \bar{S} \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{2} \frac{(\Delta Y_{j+1})}{2}$$

5.79)

จัดให้อยู่ในรูปไฟในตัดิฟเฟอร์เรนซ์จะได้เทอมต่างๆ ดังนี้

เทอม F

$$\Gamma_F \frac{(\Delta Y_{j+1})}{\Delta X_{i+1}} (T_{i+1,j})$$

เทอม B

$$\Gamma_B \frac{(\Delta Y_{j+1})}{\Delta X_i} (T_{i-1,j})$$

เทอม U

$$R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} (T_{i,j+1})$$

เทอม $T_{i,j}$

$$T_{i,j} \left[-\Gamma_F \frac{(\Delta Y_{j+1})}{\Delta X_{i+1}} - \Gamma_B \frac{(\Delta Y_{j+1})}{\Delta X_i} - R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} \right]$$

จะได้

$$A_{i,j} T_{i,j} + A_F T_{i+1,j} + A_B T_{i-1,j} + A_U T_{i,j+1} + A_L T_{i,j-1} + B = 0 \quad 5.84)$$

โดย

$$\begin{aligned}
 A_F &= \Gamma_F \frac{(\Delta Y_{j+1})}{\Delta X_{i+1}} \\
 A_B &= \Gamma_B \frac{(\Delta Y_{j+1})}{\Delta X_i} \\
 A_U &= R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} \\
 A_L &= 0 \\
 A_{i,j} &= \left[-\Gamma_F \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{\Delta X_{i+1}} \right. \\
 &\quad \left. -\Gamma_B \frac{(\Delta Y_j + \Delta Y_{j+1})}{\Delta X_i} - R^2 \Gamma_U \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{\Delta Y_{j+1}} \right] \\
 B &= \bar{S} \frac{(\Delta X_i + \Delta X_{i+1})}{2} \frac{(\Delta Y_{j+1})}{2}
 \end{aligned}
 \tag{5.85}$$

จาก

$$\bar{S} = \bar{Q} + \bar{q} \tag{5.86}$$

โดย

$$SR0 = \frac{h0^3 Pa^2}{\mu 0} \tag{5.87}$$

จะได้

$$\bar{Q} = i^2 r / SR0 \tag{5.88}$$

$$\begin{aligned}
\bar{q} = & -\frac{k_{ar}TaL^2}{h0SR0} \frac{T_{i,j}}{(H_{i,j} + 2bKn0)} + \frac{k_{ar}TaL^2}{h0SR0} \frac{1}{(H_{i,j} + 2bKn0)} \\
& + \frac{1}{24} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)^2 \frac{H^3}{\bar{\mu}} \right]_{i,j} + \frac{R^2}{24} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial Y} \right)^2 \frac{H^3}{\bar{\mu}} \right]_{i,j} \\
& + \frac{\mu0U^2L^2}{2h0SR0} \left(\frac{\bar{\mu}H}{(H_{i,j} + 2aKn0)^2} \right)_{i,j} \\
& - \frac{PaUh0L}{6SR0} \left(\frac{H^3}{(H + 2aKn0)(H + 2bKn0)} \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right) \right)_{i,j}
\end{aligned} \tag{5.89}$$

อุณหภูมิของอากาศ

$$\begin{aligned}
T_{i,j} = & \left(Ta + \frac{(H + bKn0)}{(H + 2bKn0)} (T_{SL} - Ta) \right)_{i,j} \\
& + \frac{Pa^2h0^4}{24\mu0k_{ar}L^2T0} \left(\frac{H^3}{\bar{\mu}} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)^2 + R^2 \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \right)^2 \right] (bKn0) \right)_{i,j} \\
& + \frac{\mu0U^2}{2k_{ar}T0} \left(\frac{\bar{\mu}H}{(H + 2aKn0)} (bKn0) \right)_{i,j} \\
& + \frac{UPah0^2}{6k_{ar}LT0} \left(\frac{H^3}{(H + 2aKn0)} \frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{(H + bKn0)}{(H + 2bKn0)} - 1 \right) \right)_{i,j}
\end{aligned} \tag{5.90}$$

บทที่ 6

ผลการคำนวณ

ในบทนี้จะแสดงถึงพฤติกรรมทางความร้อนของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทจากแบบจำลองทางความร้อนที่ทำการศึกษา โดยหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทมีขนาด 2.025 มม. X 1.525 มม. ขนาดและรายละเอียดอื่นดูได้จากตารางที่ 6.1 และอุปกรณ์อ่าน/เขียนบนหัวอ่านมีขนาด 0.2 มม. X 1.0 มม. ซึ่งเราจะทำการคำนวณหาความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่สถานะต่างๆ ดังนี้

1. เมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียน
2. เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า
4. เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและเปรียบเทียบเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน
5. เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและเปรียบเทียบเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน
6. เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของงานแข็งและเปรียบเทียบเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน
7. ผลการคำนวณสำหรับหัวอ่านที่ออกแบบโดยวิธีเหมาะสมที่สุดเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน

ตารางที่ 6.1 ขนาดและค่าต่างๆ ของหัวอ่าน

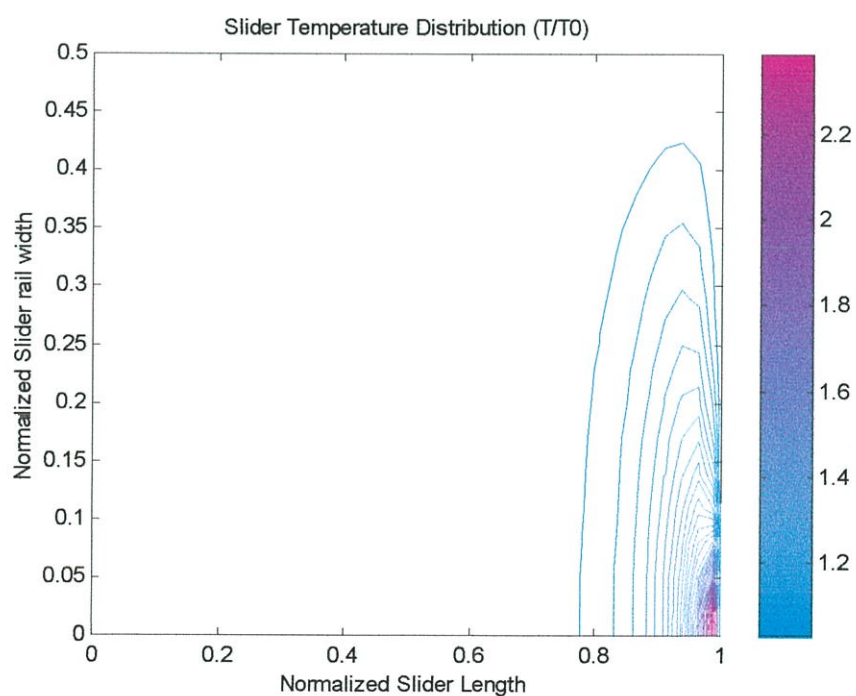
ขนาด	TAPERED - FLAT
L(mm)	2.025
B(mm)	0.5
W(mm)	1.525
θ_{TP} (mrad)	75
h_o (μ m)	0.1
h_{TP} (μ m)	2.795
L_{TP} (μ m)	0.184
f_o (mN)	73.5
x_s (mm)	1.081

6.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของหัวอ่าน

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณของ [22] ได้แสดงการกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านขนาด 2.0 มม. X 1.6 มม. โดยพิจารณาแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่านบนหัวอ่านเพียงอย่างเดียว ซึ่งจากผลการคำนวณเราสามารถหาการกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านโดยใช้หัวอ่านขนาดเท่ากัน และพิจารณาความร้อนจากอุปกรณ์อ่านเพียงอย่างเดียว โดยความต้านทานไฟฟ้าในอุปกรณ์อ่านมีค่า 30 โอห์ม โดยอุปกรณ์อ่านมีขนาด $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ (สมมติให้อุปกรณ์เขียนมีค่าความต้านทานต่อปริมาตรเท่ากับอุปกรณ์อ่าน) ทำจาก Permalloy (NiFe) ส่วนหัวอ่านทำจาก $\text{Al}_2\text{O}_3\text{TiC}$ ซึ่งมีคุณสมบัติทางความร้อนดังแสดงในตารางที่ 6.2 กระแสไฟฟ้าที่ทำการจ่ายให้แก่อุปกรณ์อ่าน 13 มิลลิแอมแปร์ ผลปรากฏว่าอุณหภูมิสูงสุดที่คำนวณได้ประมาณ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณของ [22]

ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

วัสดุ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$)	ความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
NiFe	35	460	8000
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{TiC}$	15	600	4000



รูปที่ 6.1 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลทเมื่อมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน

6.2 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านตามการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า

เราได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเทเปอร์เฟลทเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหัวอ่านและเปรียบเทียบผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน เท่ากับ 8, 13 และ 18 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทเป็นไปตามรูปที่ 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 และ 6.6

ในรูปที่ 6.2 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่

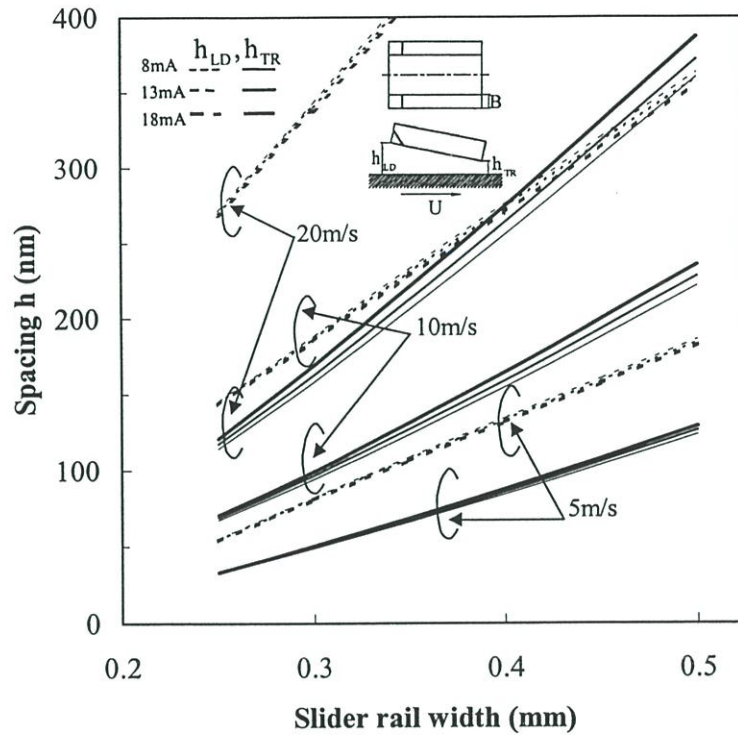
ในรูปที่ 6.3 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความยาวเทเปอร์ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่ และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงเป็นค่าคงที่

ในรูปที่ 6.4 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเทเปอร์ด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเทเปอร์ด้วยอัตราคงที่

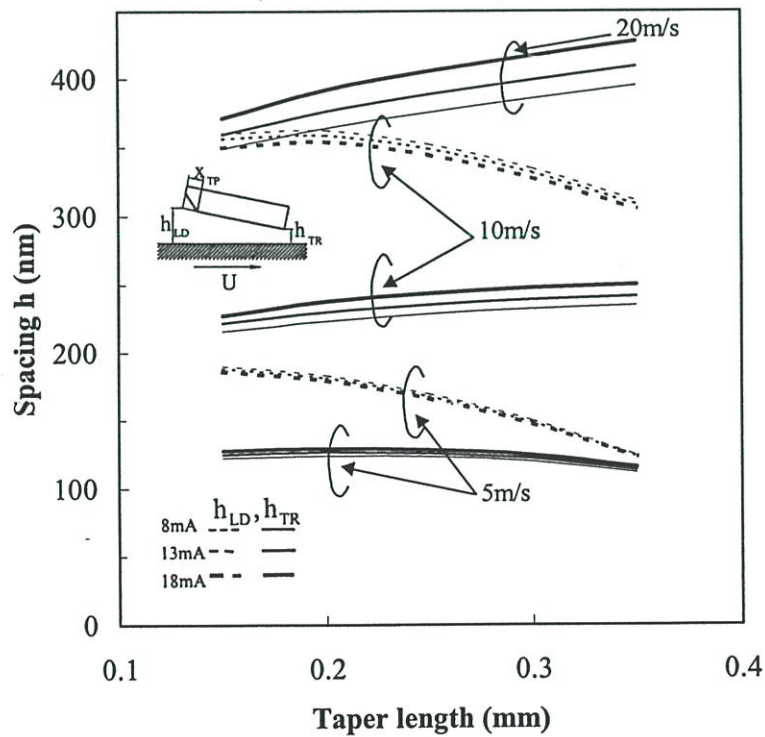
ในรูปที่ 6.5 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่ และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับด้วยอัตราคงที่

ในรูปที่ 6.6 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำและความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำ

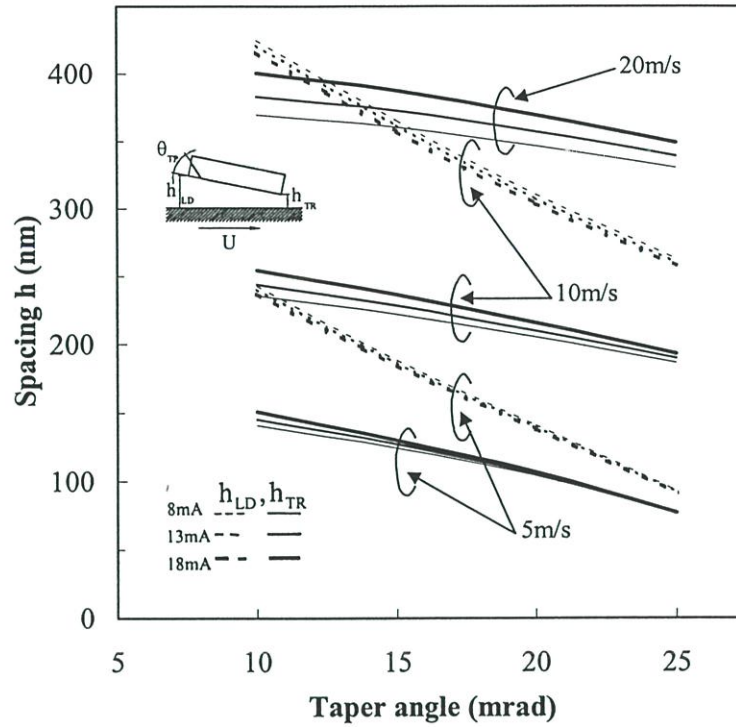
เมื่อกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์อ่าน/เขียนบนหัวอ่านเพิ่มสูงขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ท้ายหัวอ่านจะเพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน คือ 8 mA, 13 mA และ 18 mA ตามลำดับ



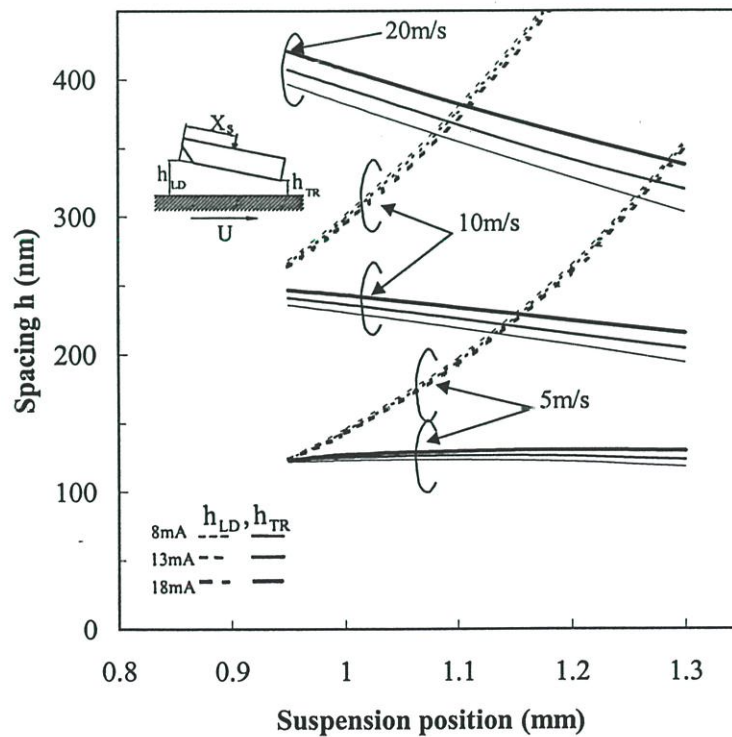
รูปที่ 6.2 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า



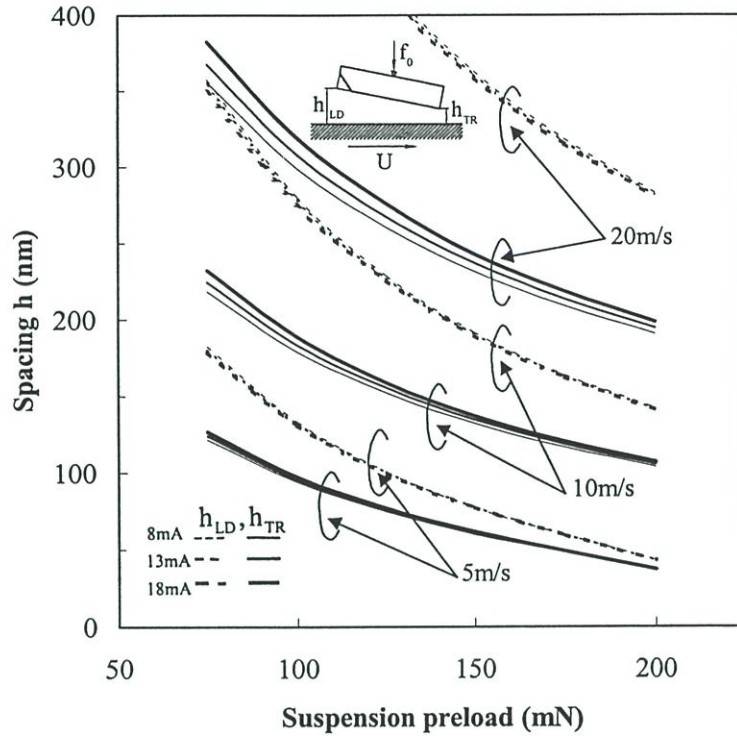
รูปที่ 6.3 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 6.4 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบกับเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 6.5 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบกับเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า

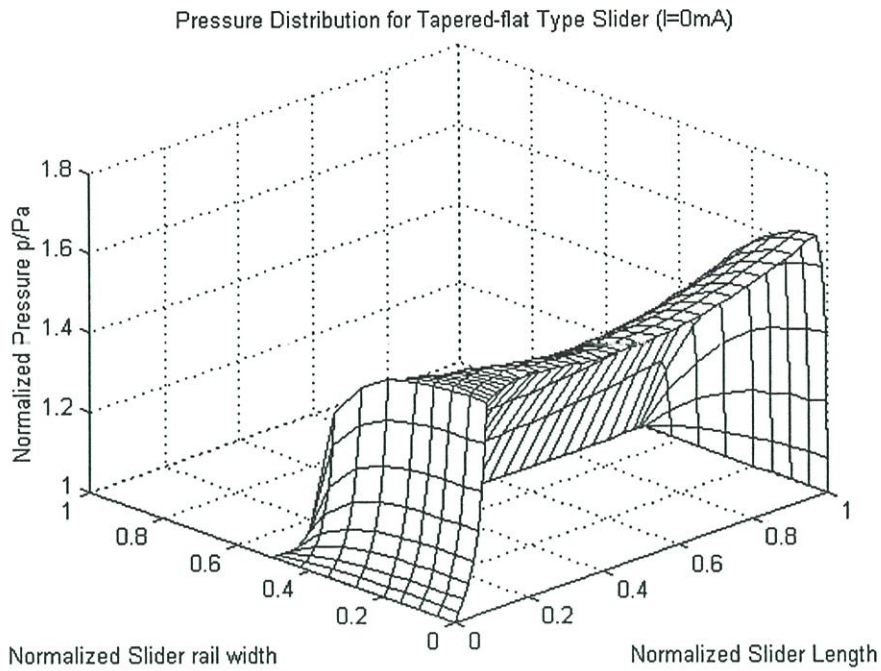


รูปที่ 6.6 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบ เมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า

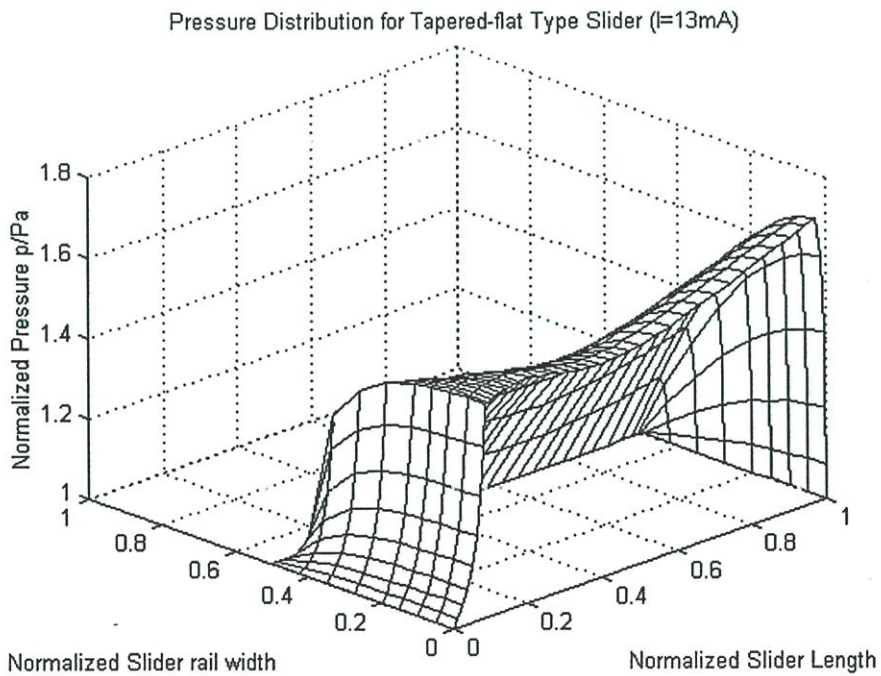
6.3 ผลการคำนวณลักษณะต่างๆ ของหัวอ่าน

ในหัวข้อนี้เราได้แสดงผลการคำนวณหาค่าการกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์ แพลทเมื่อไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์แพลทเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านแบบเทเปอร์แพลท การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศ ความหนืดของอากาศและการถ่ายเทความร้อนจากหัวอ่านชนิดเทเปอร์แพลทสู่อากาศ

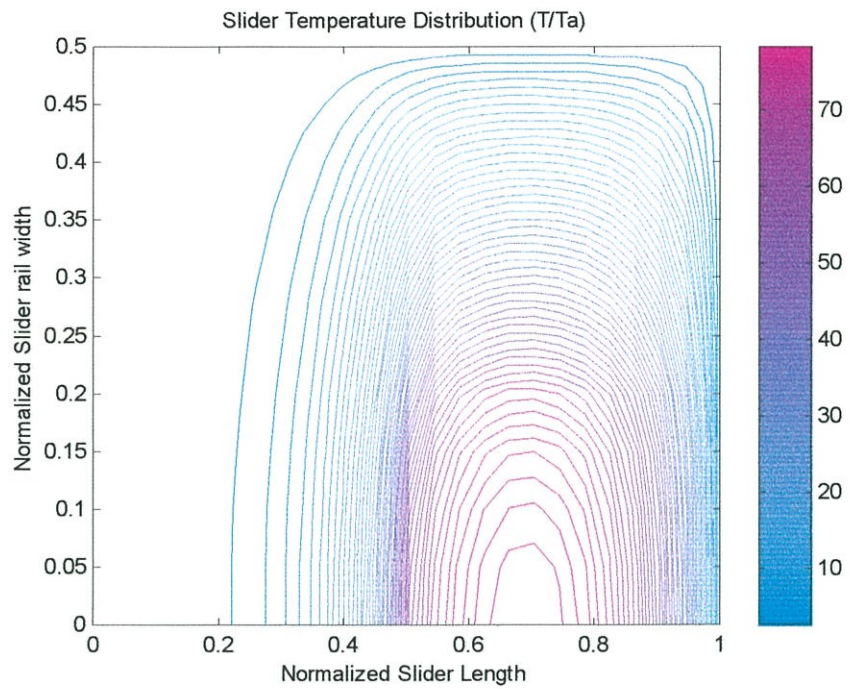
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากกระแสไฟฟ้าบนหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้ความดันอากาศสูงขึ้นและบริเวณที่ความดันอากาศสูงสุดคือบริเวณท้ายหัวอ่านซึ่งมีแหล่งความร้อนอยู่ อุณหภูมิของหัวอ่านสูงขึ้นและบริเวณที่อุณหภูมิของหัวอ่านสูงสุดอยู่ที่บริเวณท้ายหัวอ่าน อุณหภูมิของแบร์ริงอากาศสูงขึ้นและอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศจะสูงสุดที่บริเวณท้ายหัวอ่าน สำหรับการถ่ายเทความร้อนซึ่งสูงขึ้นและการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่บริเวณท้ายหัวอ่าน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากหัวอ่านสู่จานแข็งบันทึกข้อมูล



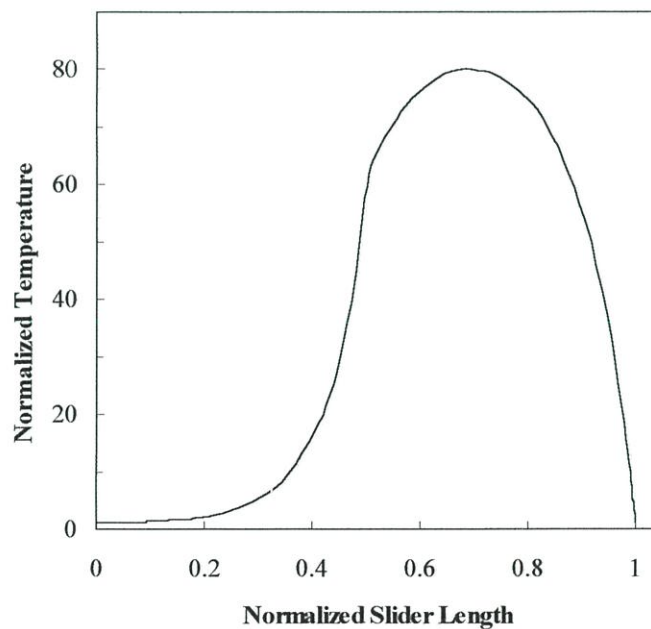
รูปที่ 6.7 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลท
เมื่อไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน



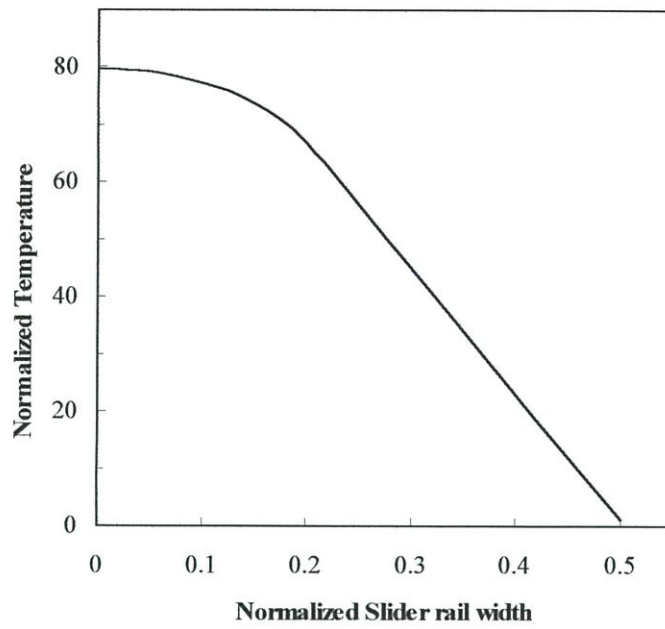
รูปที่ 6.8 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลท
เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า 13 mA แก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน



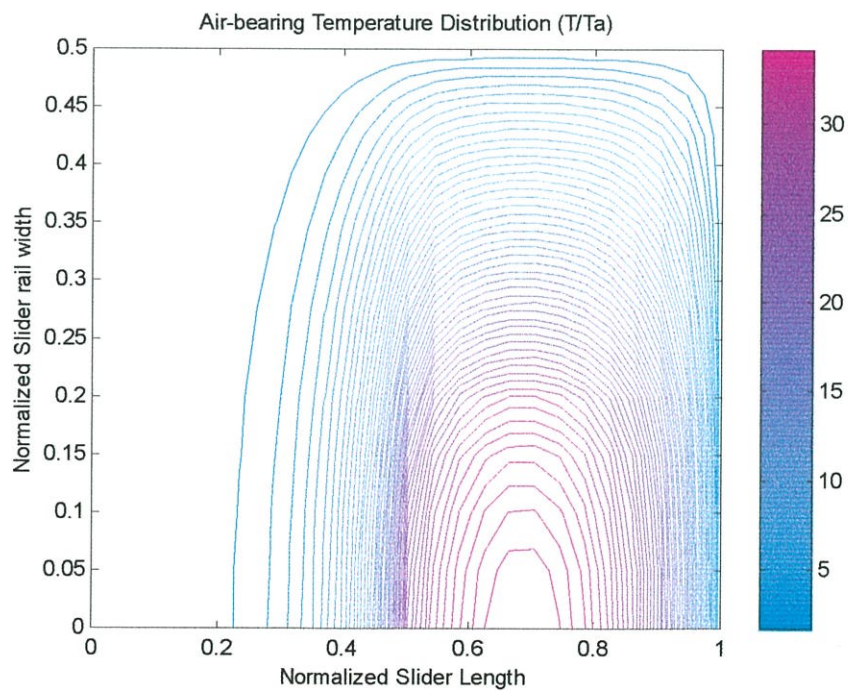
รูปที่ 6.9 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



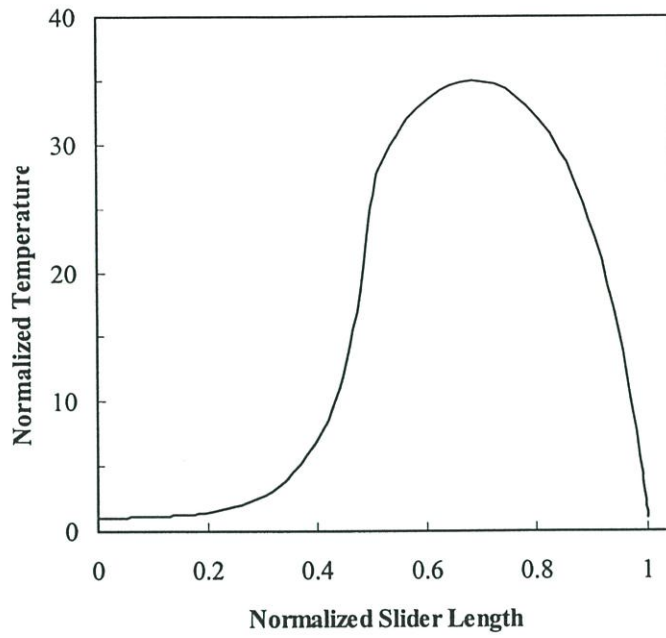
รูปที่ 6.10 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



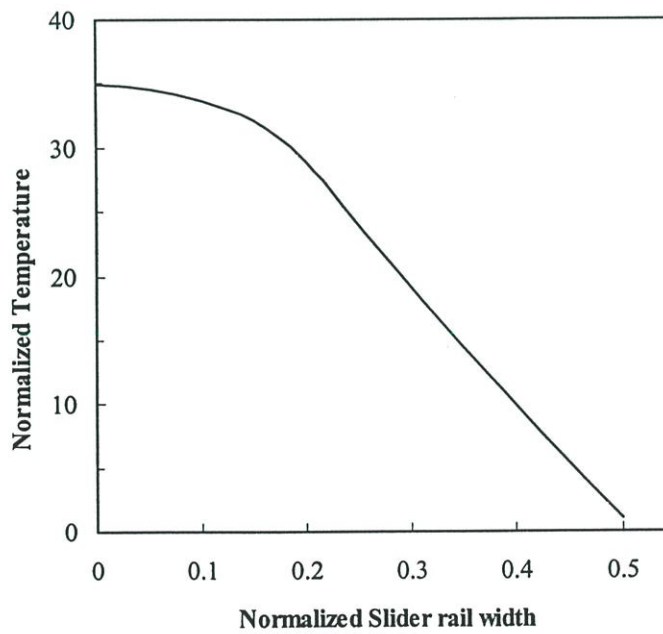
รูปที่ 6.11 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลท
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



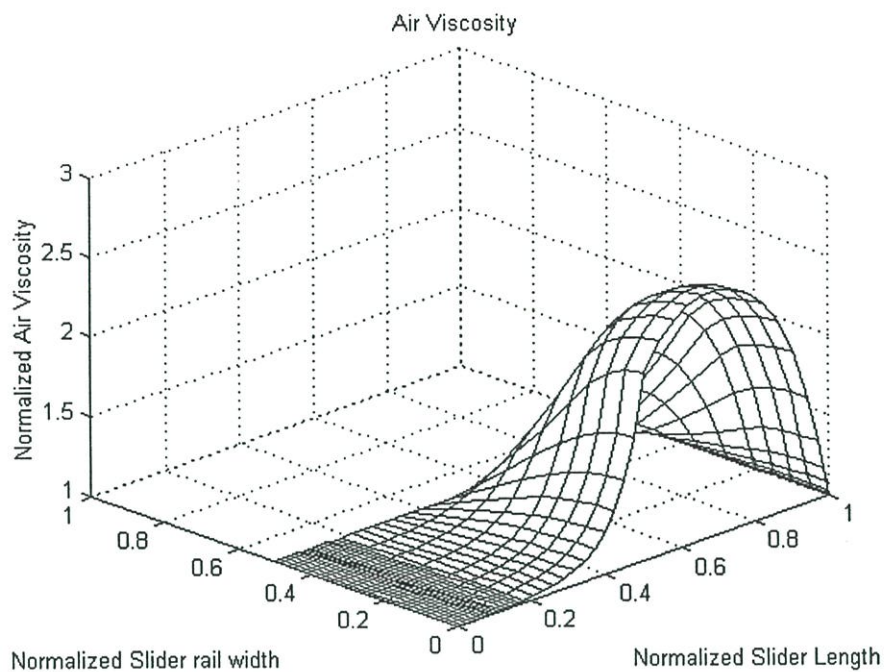
รูปที่ 6.12 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศเมื่อมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



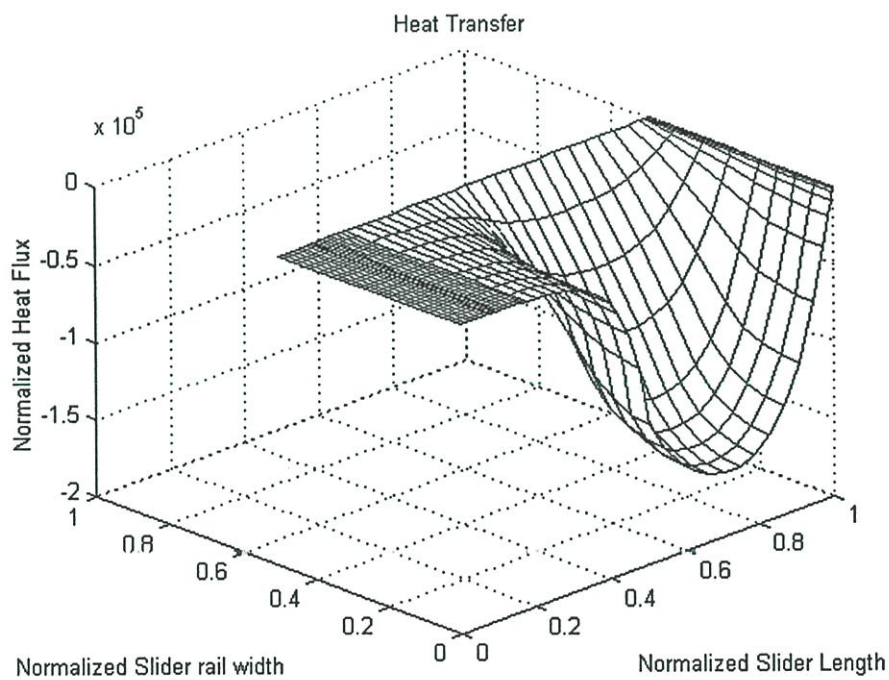
รูปที่ 6.13 การกระจายอุณหภูมิของแบริ่งอากาศตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



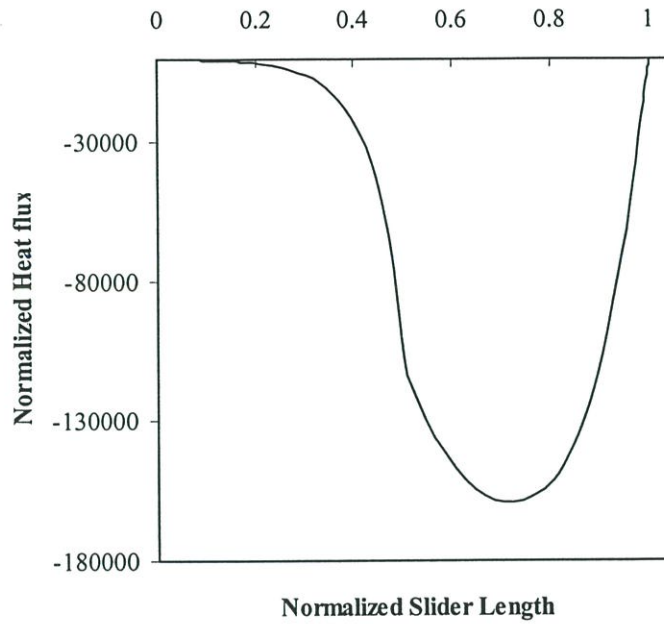
รูปที่ 6.14 การกระจายอุณหภูมิของแบริ่งอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบ
เทเปอร์เฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



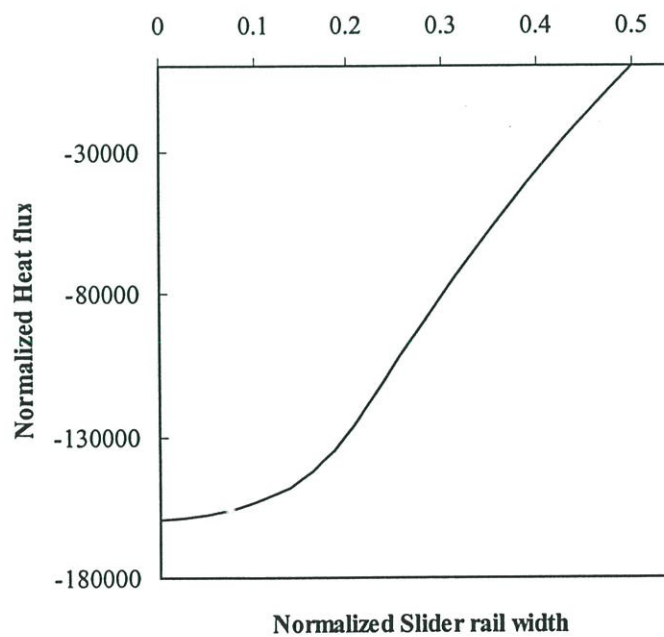
รูปที่ 6.15 ความหนืดของอากาศเมื่อมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



รูปที่ 6.16 การถ่ายเทความร้อนจากหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทสู่อากาศ
เมื่อมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



รูปที่ 6.17 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและเบร็ริงอากาศตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



รูปที่ 6.18 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและเบร็ริงอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน

6.4 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่ออุณหภูมิอากาศโดยรอบเปลี่ยนแปลงไป

ในหัวข้อนี้เราได้แสดงผลการคำนวณค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหัวอ่านและเปรียบเทียบผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบหัวอ่านเป็น 5, 25 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทเป็นไปตามรูปที่ 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 และ 6.23

ในรูปที่ 6.19 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนและท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแข่งขันที่กข้อมูลเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวของอ่านที่ขอบนเพิ่มขึ้น

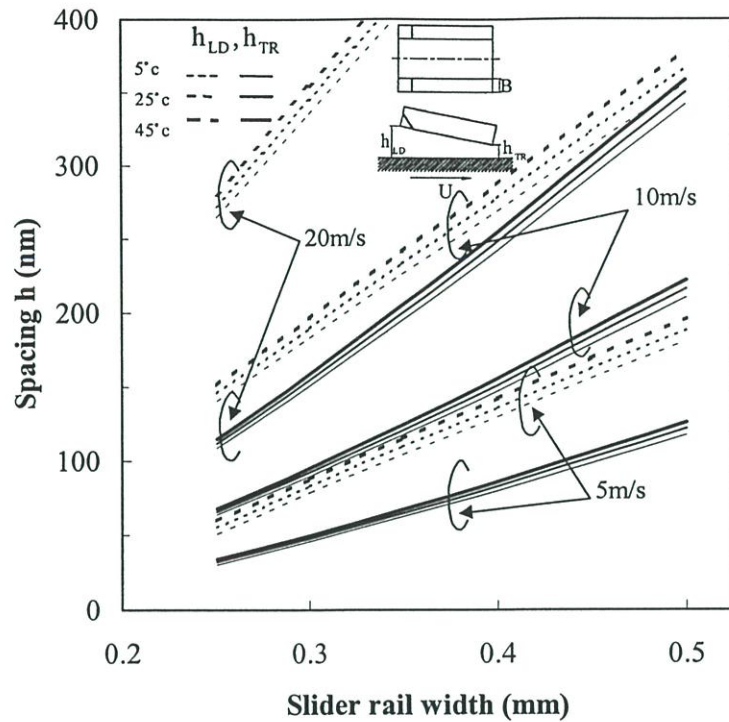
ในรูปที่ 6.20 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนลดลงและความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความยาวเทเปอร์ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแข่งขันที่กข้อมูล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบนเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.21 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนลดลงและความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเทเปอร์ด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแข่งขันที่กข้อมูล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบนเพิ่มขึ้น

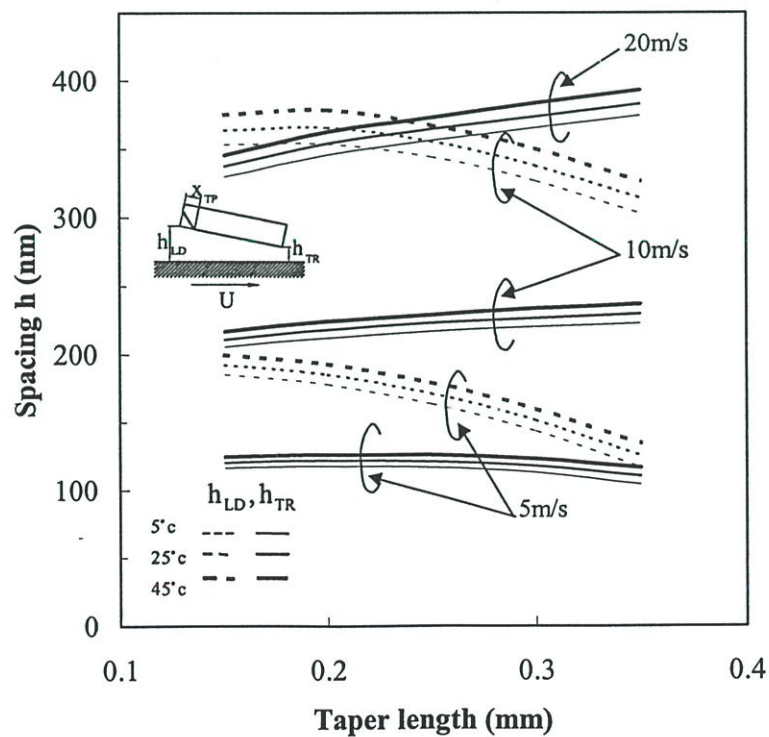
ในรูปที่ 6.22 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึด ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่ และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแข่งขันที่กข้อมูล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบนเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.23 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนลดลงและความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำและความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแข่งขันที่กข้อมูล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบนเพิ่มขึ้น

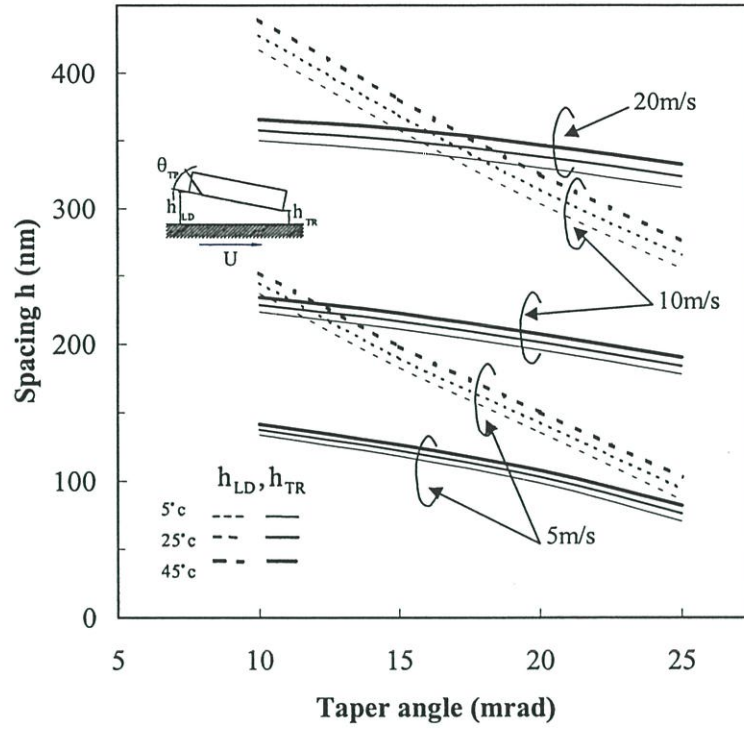
เมื่ออุณหภูมิของอากาศโดยรอบหัวอ่านเพิ่มขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบนและความสูงการลอยตัวของท้ายหัวอ่านจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นคือ 5, 25 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



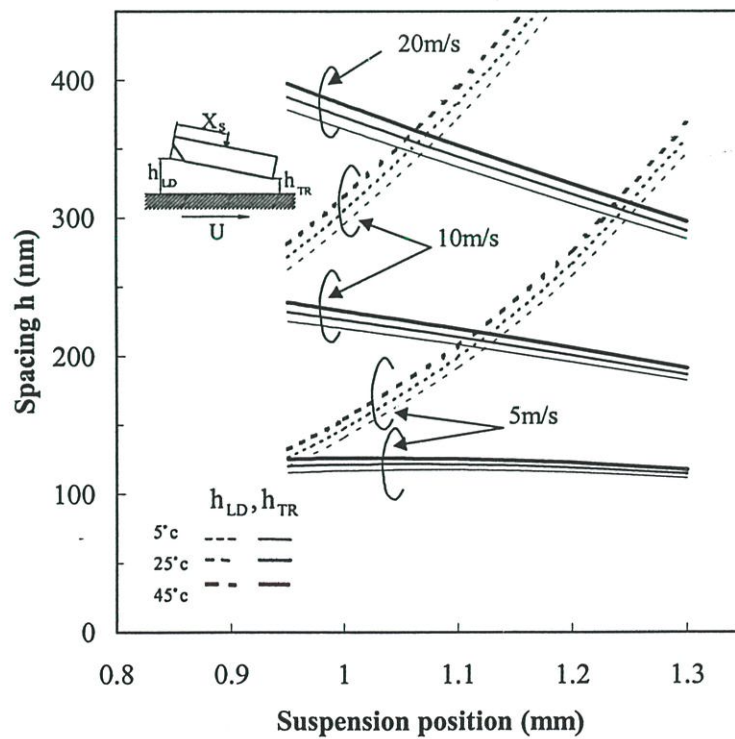
รูปที่ 6.19 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่าน
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ



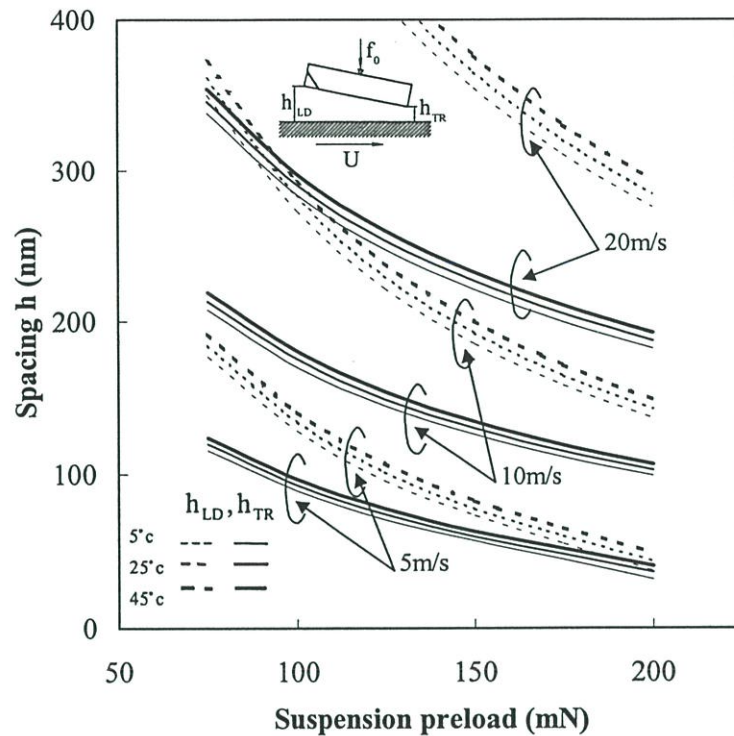
รูปที่ 6.20 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่าน
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ



รูปที่ 6.21 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่าน
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ



รูปที่ 6.22 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่าน
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ



รูปที่ 6.23 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาวะกระทำเปรียบเทียบ
เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบ

6.5 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อความดันอากาศโดยรอบเปลี่ยนแปลงไป

ในหัวข้อนี้เราได้แสดงผลการคำนวณค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหัวอ่านและเปรียบเทียบผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบเป็น 0.85, 1.00 และ 1.15 บรรยากาศ ตามลำดับ ซึ่งความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลตเป็นไปตามรูปที่ 6.24, 6.25, 6.26, 6.27 และ 6.28

ในรูปที่ 6.24 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแฉ่งบันทึกข้อมูล เมื่อลดความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านลดลง เมื่อเพิ่มความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

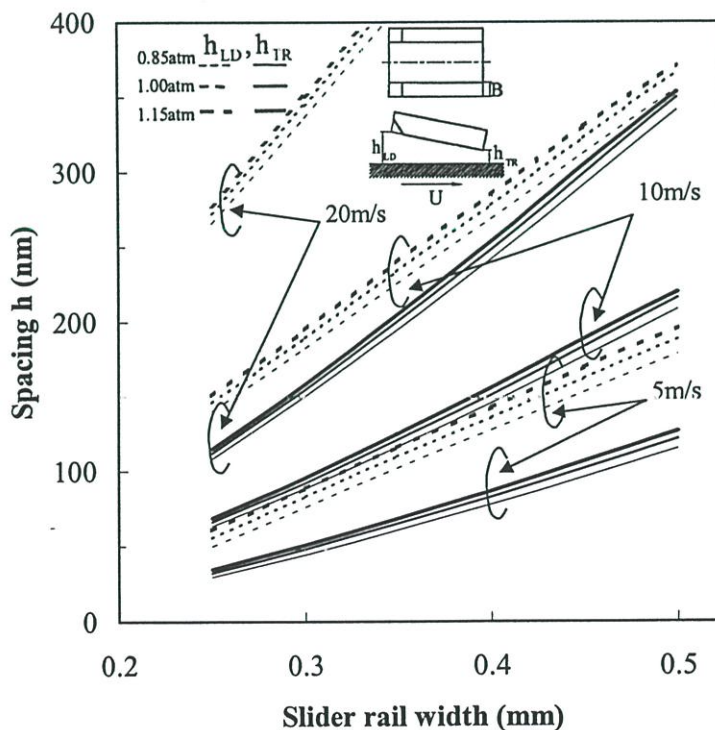
ในรูปที่ 6.25 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความยาวเทเปอร์ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านก่อนข้างคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแฉ่งบันทึกข้อมูล เมื่อลดความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านลดลง เมื่อเพิ่มความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.26 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเทเปอร์ด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแข็งบันทึกข้อมูล เมื่อลดความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านลดลง เมื่อเพิ่มความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

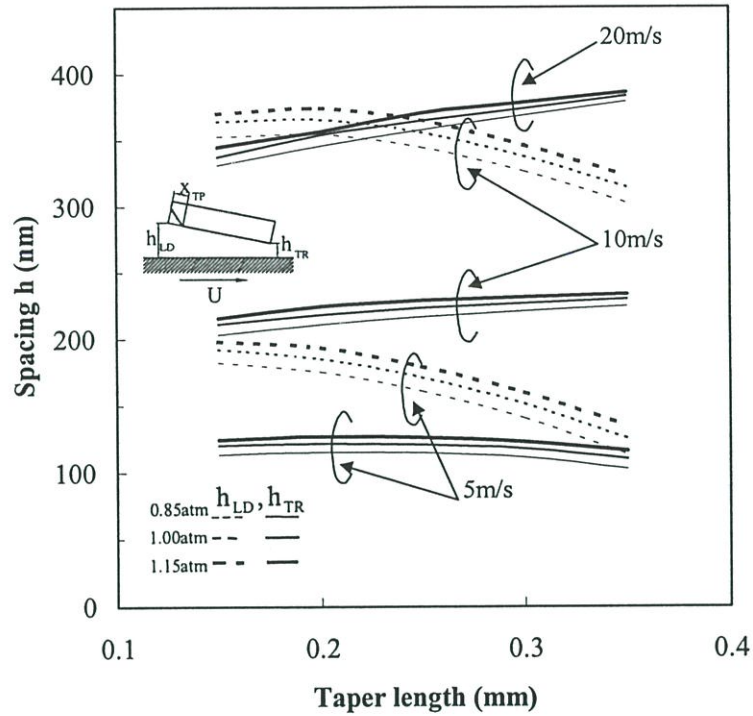
ในรูปที่ 6.27 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่ และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแข็งบันทึกข้อมูล เมื่อลดความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านลดลง เมื่อเพิ่มความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.28 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำและความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานแข็งบันทึกข้อมูล เมื่อลดความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านลดลง เมื่อเพิ่มความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

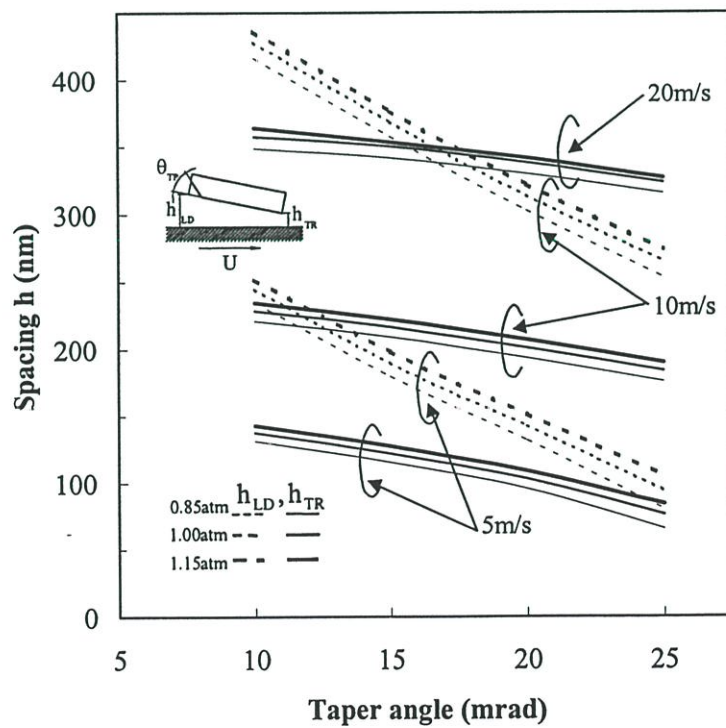
เมื่อความดันอากาศโดยรอบหัวอ่านเพิ่มขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านจะเพิ่มขึ้นตามความดันอากาศที่เพิ่มขึ้นคือ 0.85, 1.00 และ 1.15 บรรยากาศ ตามลำดับ



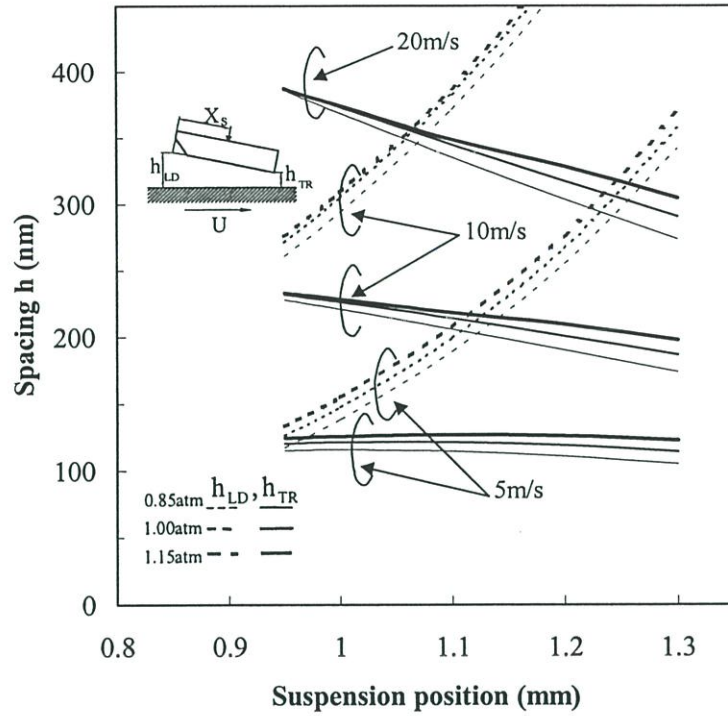
รูปที่ 6.24 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบกับเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ



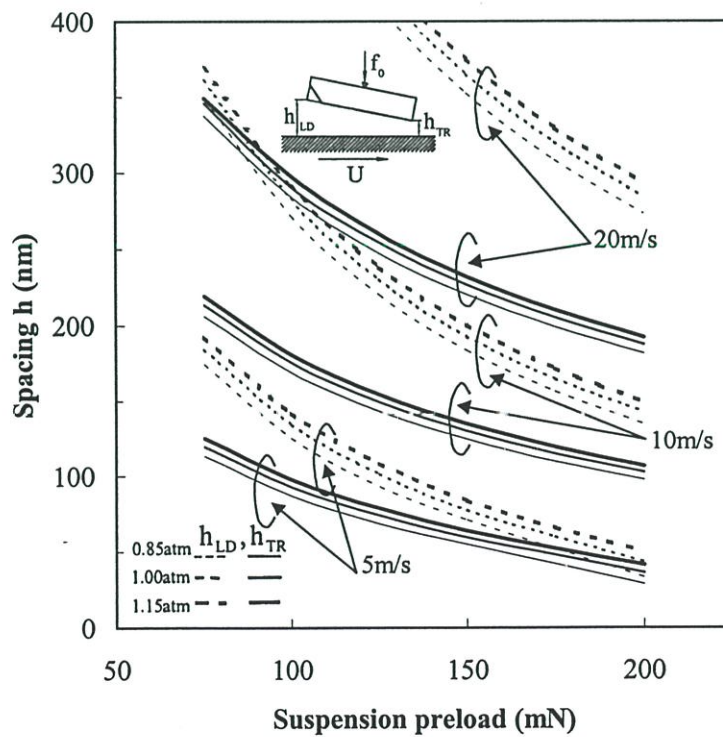
รูปที่ 6.25 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่าน
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ



รูปที่ 6.26 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่าน
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ



รูปที่ 6.27 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่าน
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ



รูปที่ 6.28 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำ
เปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ

6.6 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีแหล่งความร้อนและอุณหภูมิอากาศโดยรอบเปลี่ยนแปลงไป

ในหัวข้อนี้เราได้แสดงผลการคำนวณค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียนและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหัวอ่าน เปรียบเทียบผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบเป็น 5, 25 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทเป็นไปตามรูปที่ (6.29 – 6.33), (6.34 – 6.38) และ (6.39 – 6.43)

ในรูปที่ 6.29, 6.34 และ 6.39 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนและท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกรข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่ เมื่ออุณหภูมิอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.30, 6.35 และ 6.40 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความยาวเทเปอร์ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่ และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกรข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงเป็นค่าคงที่ เมื่ออุณหภูมิอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.31, 6.36 และ 6.41 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเทเปอร์ด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกรข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเทเปอร์ด้วยอัตราคงที่ เมื่ออุณหภูมิอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

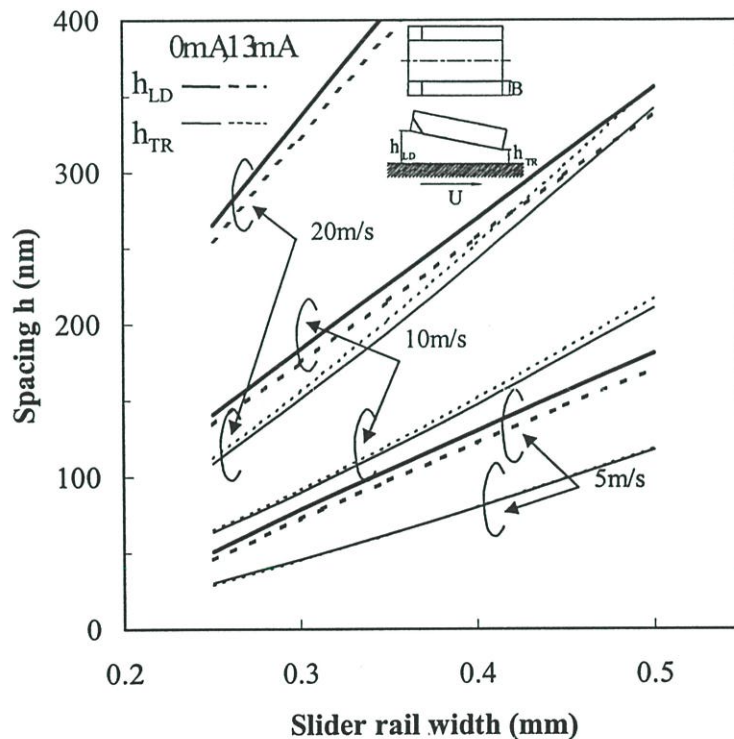
ในรูปที่ 6.32, 6.37 และ 6.42 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่ และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกรข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับด้วยอัตราคงที่ เมื่ออุณหภูมิอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.33, 6.38 และ 6.43 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำและความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงาน

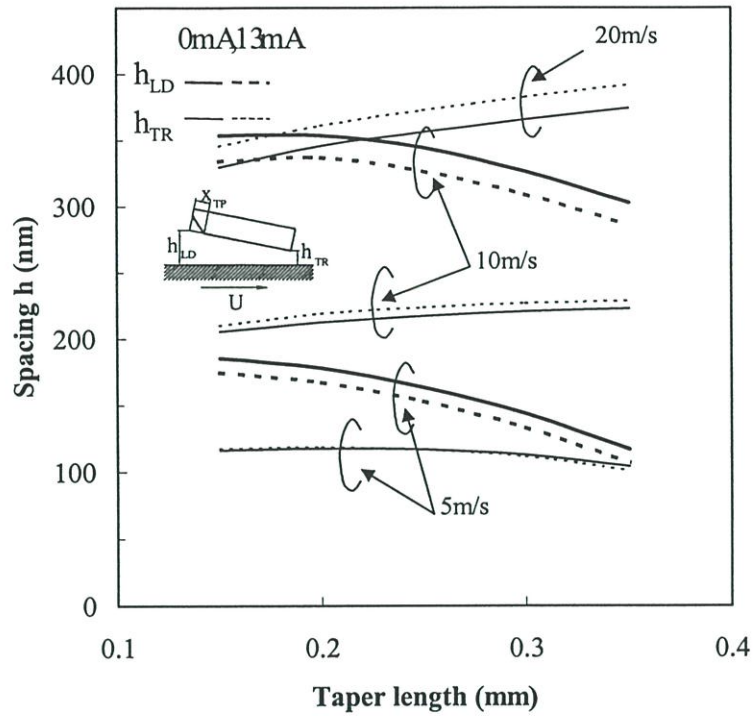
แข็งบันทึกข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้น และความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำ เมื่ออุณหภูมิอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

สำหรับหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนเมื่ออุณหภูมิอากาศโดยรอบสูงขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านจะเพิ่มขึ้น โดยขอบนำและท้ายหัวอ่านจะมีความสูงการลอยตัวเปลี่ยนแปลงในลักษณะซูเปอร์โพสิชัน ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนจะมีค่าเข้าใกล้ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ไม่มีแหล่งความร้อนเมื่ออุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นคือ 5, 25 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

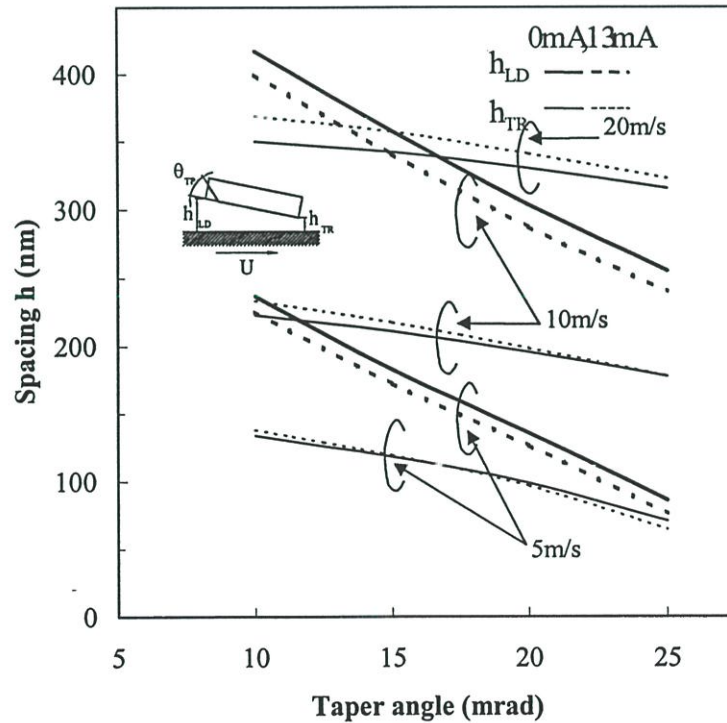
อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 5 องศาเซลเซียส



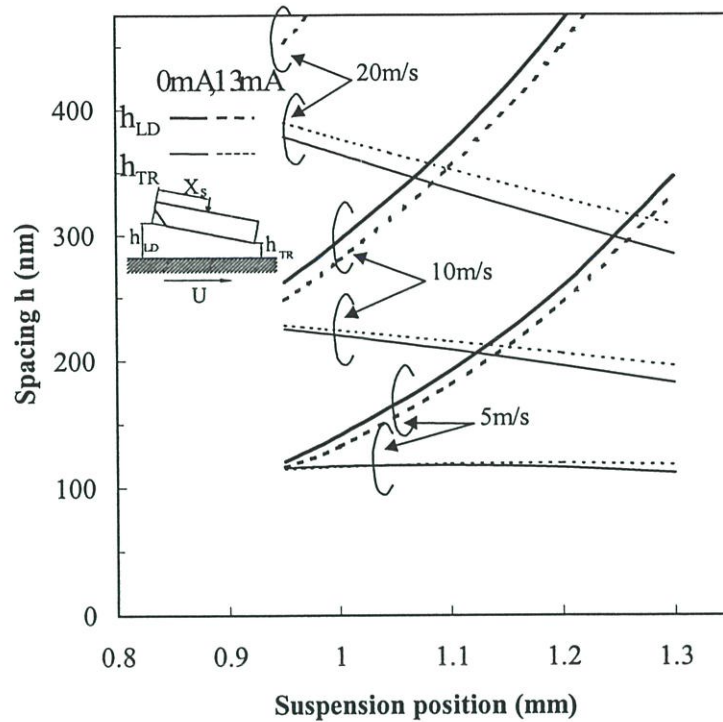
รูปที่ 6.29 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 5 องศาเซลเซียส



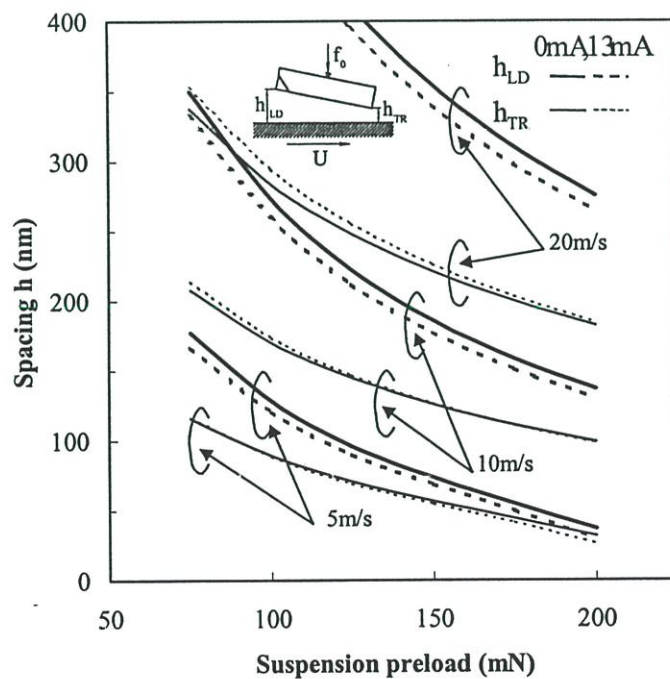
รูปที่ 6.30 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.31 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 5 องศาเซลเซียส

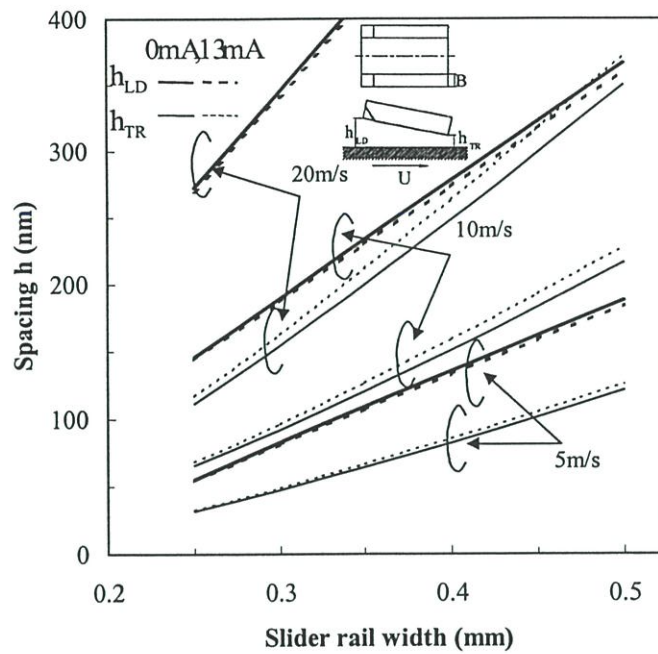


รูปที่ 6.32 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 5 องศาเซลเซียส

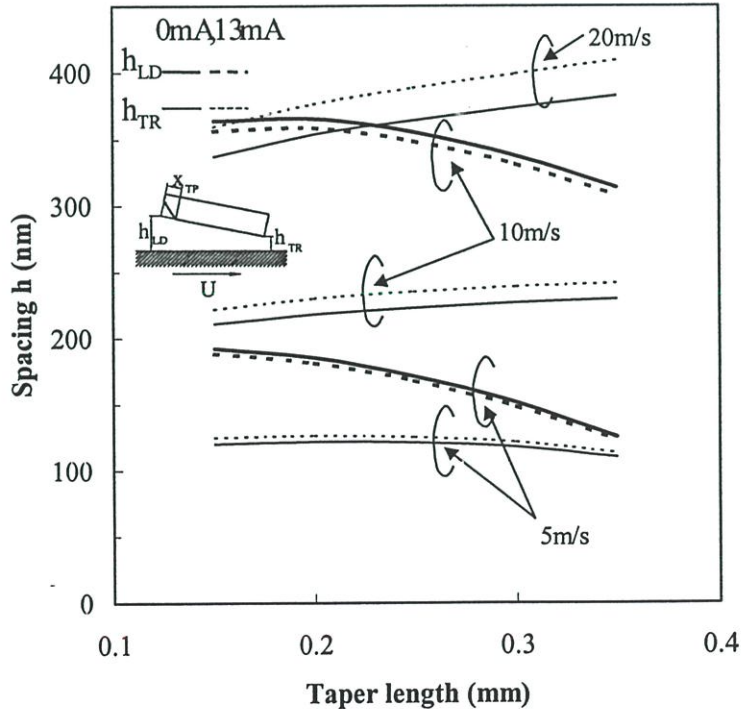


รูปที่ 6.33 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่าย กระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 5 องศาเซลเซียส

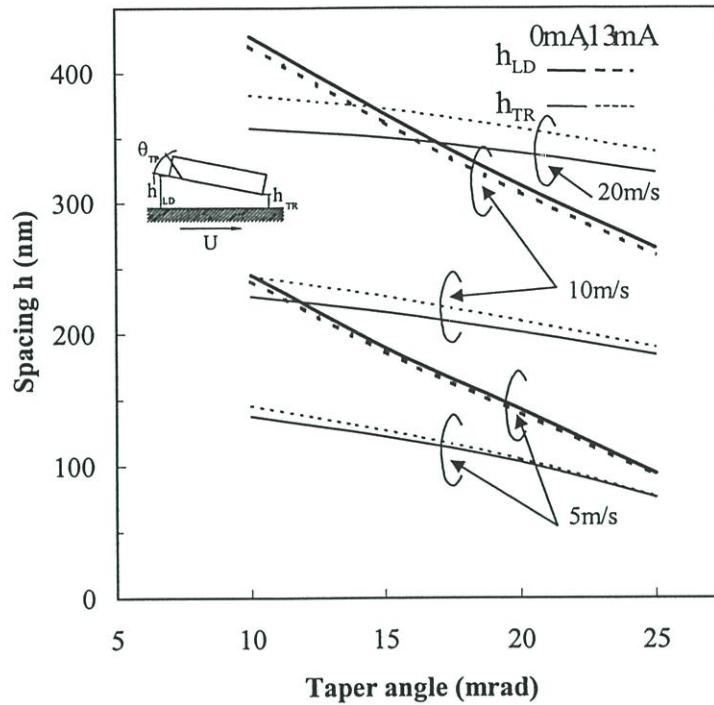
อุณหภูมิอากาศโดยรอบเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส



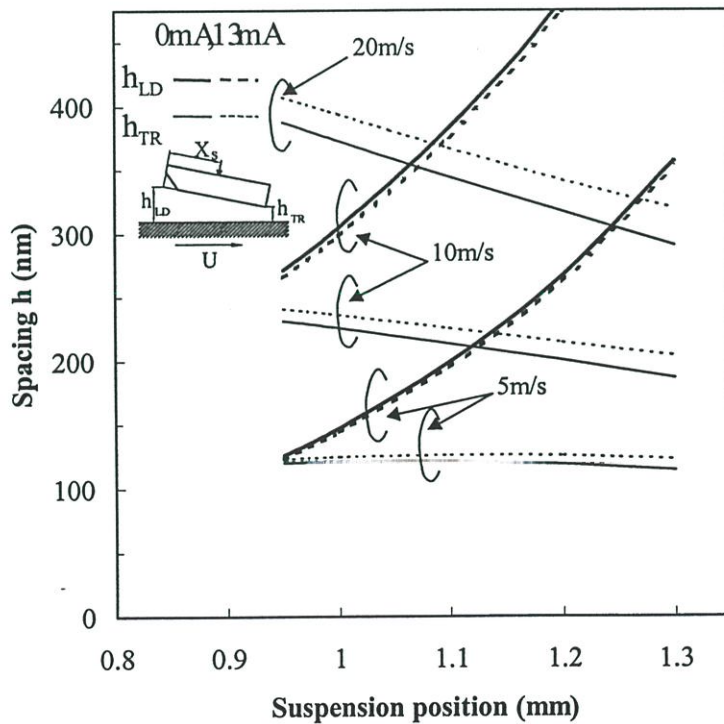
รูปที่ 6.34 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 25 องศาเซลเซียส



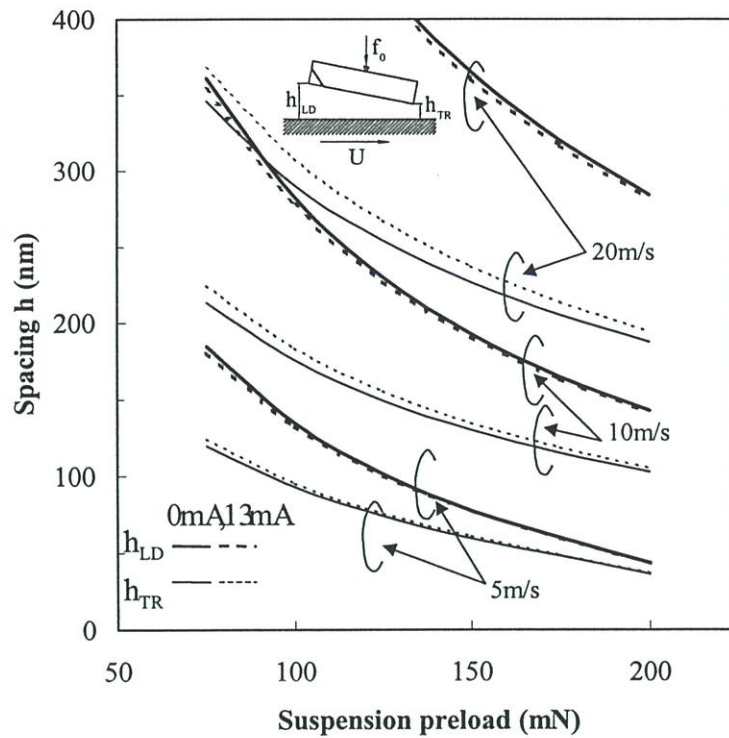
รูปที่ 6.35 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 25 องศาเซลเซียส



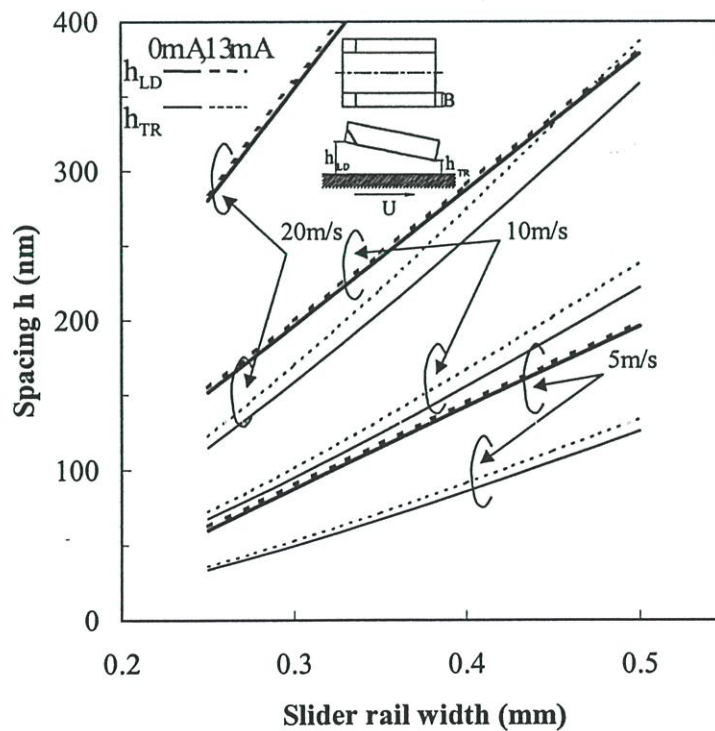
รูปที่ 6.36 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อมีจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 25 องศาเซลเซียส



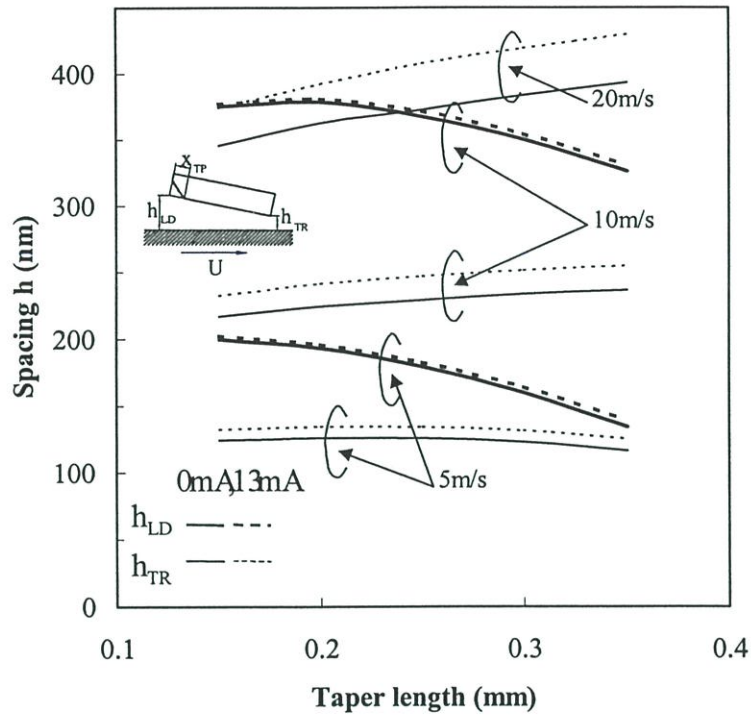
รูปที่ 6.37 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 25 องศาเซลเซียส



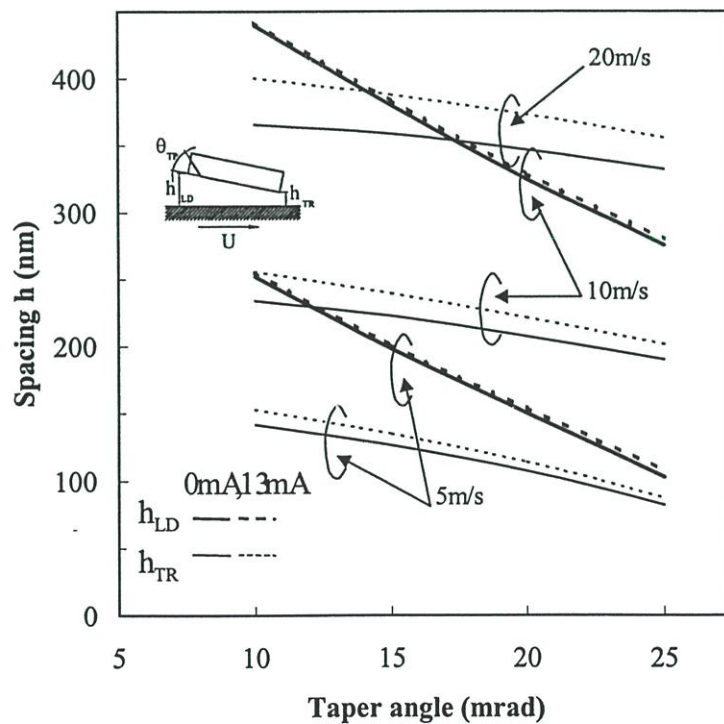
รูปที่ 6.38 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 45 องศาเซลเซียส



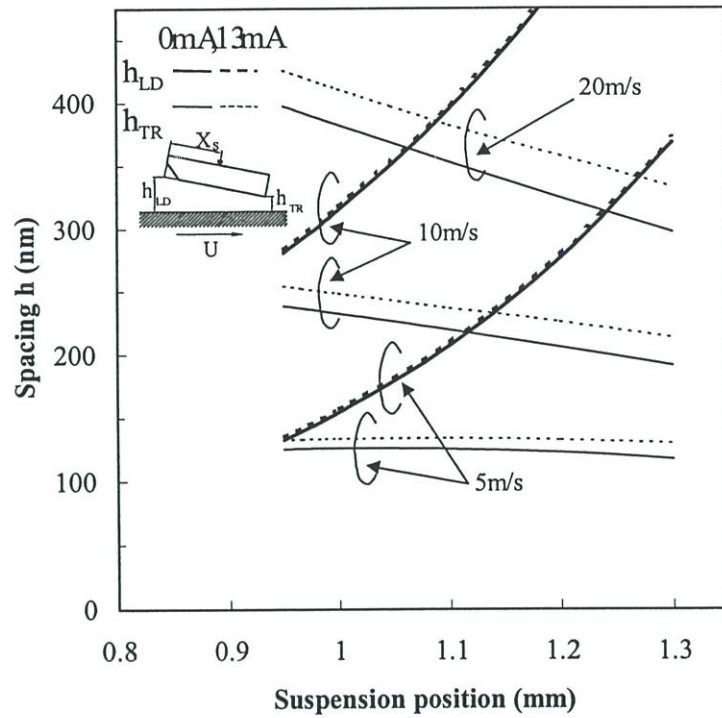
รูปที่ 6.39 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 45 องศาเซลเซียส



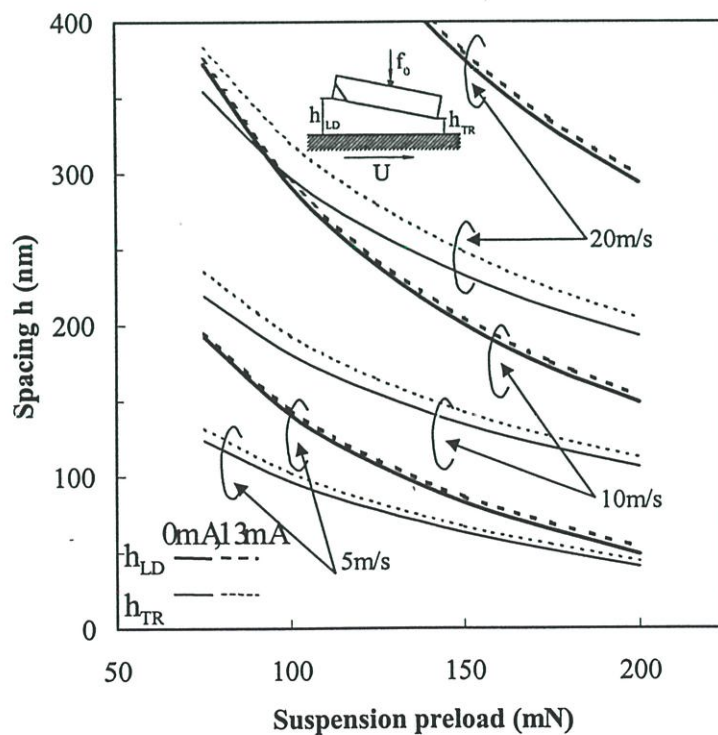
รูปที่ 6.40 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบกับเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.41 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบกับเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.42 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่าน
เปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศ
โดยรอบ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.43 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่าย
กระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่อุณหภูมิอากาศโดยรอบ 45 องศาเซลเซียส

6.7 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีแหล่งความร้อนและความดันอากาศโดยรอบเปลี่ยนแปลงไป

ในหัวข้อนี้เราได้แสดงผลการคำนวณค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียนและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหัวอ่าน เปรียบเทียบผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบเป็น 0.85, 1.15 และ 1.30 บรรยากาศ ตามลำดับ ซึ่งความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทเป็นไปตามรูปที่ (6.44 – 6.48),(6.49 – 6.53) และ(6.54 – 6.58)

ในรูปที่ 6.44, 6.49 และ 6.54 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนและท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกรข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.45, 6.50 และ 6.55 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความยาวเทเปอร์ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่ และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกรข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงเป็นค่าคงที่ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.46, 6.51 และ 6.56 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเทเปอร์ด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกรข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเทเปอร์ด้วยอัตราคงที่ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

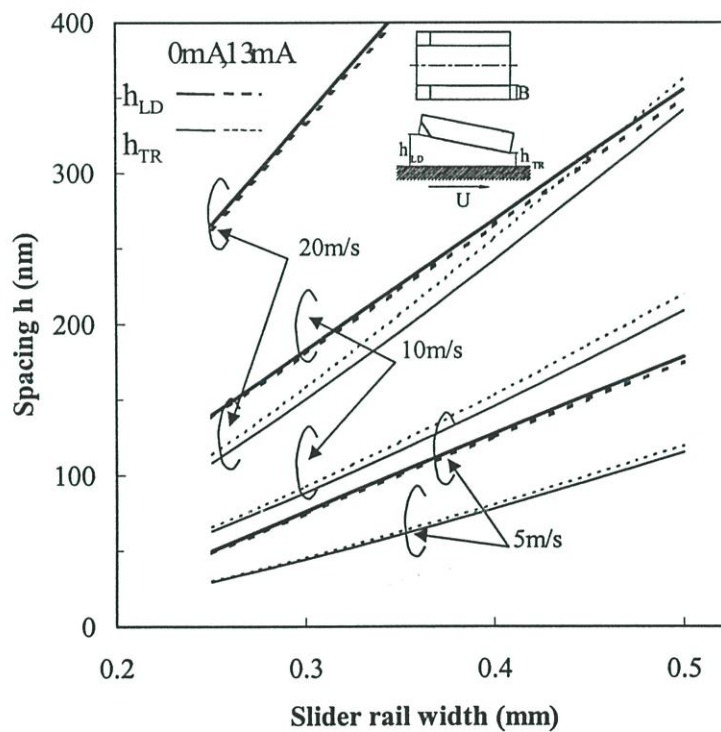
ในรูปที่ 6.47, 6.52 และ 6.57 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับ ยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่ และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงานเชิงบันทึกรข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับด้วยอัตราคงที่ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 6.48, 6.53 และ 6.58 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาวะกระทำและความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วงาน

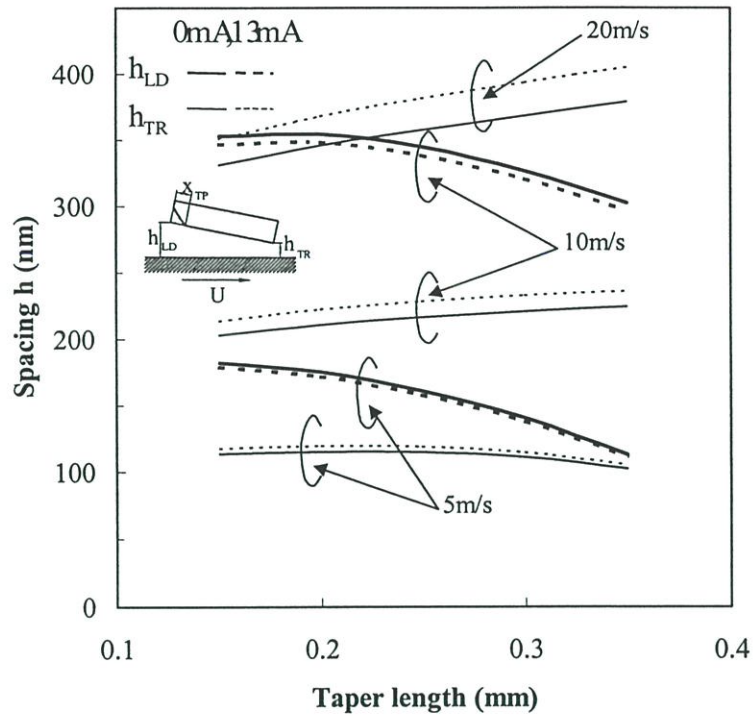
แจ้งบันทึกข้อมูล เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียนความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้น และความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

สำหรับหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนเมื่อความดันอากาศโดยรอบสูงขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันอากาศเพิ่มขึ้นคือ 0.85, 1.15 และ 1.30 บรรยากาศ ตามลำดับ

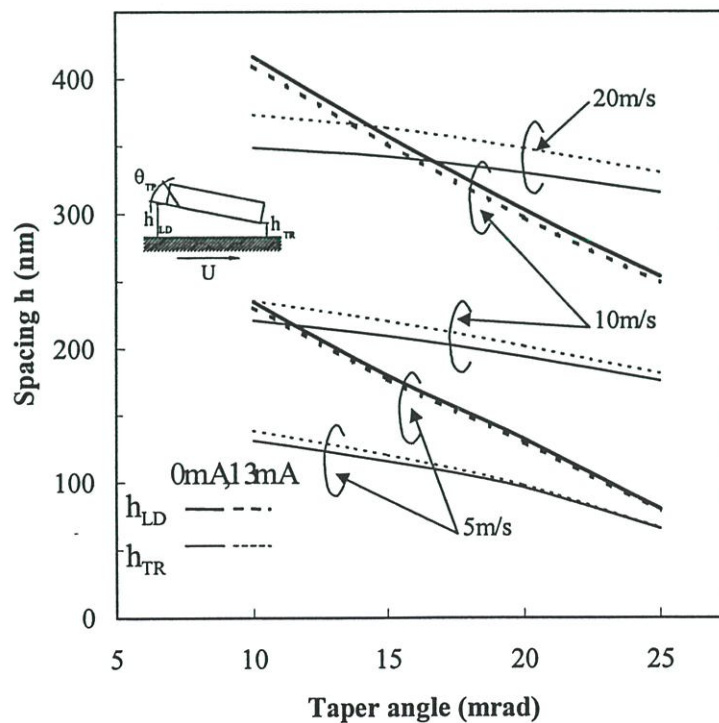
ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ



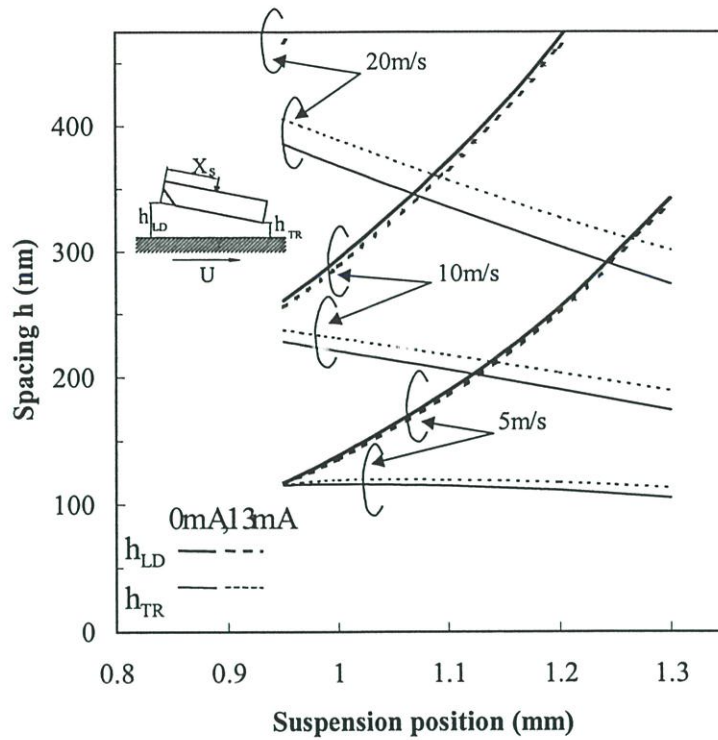
รูปที่ 6.44 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ



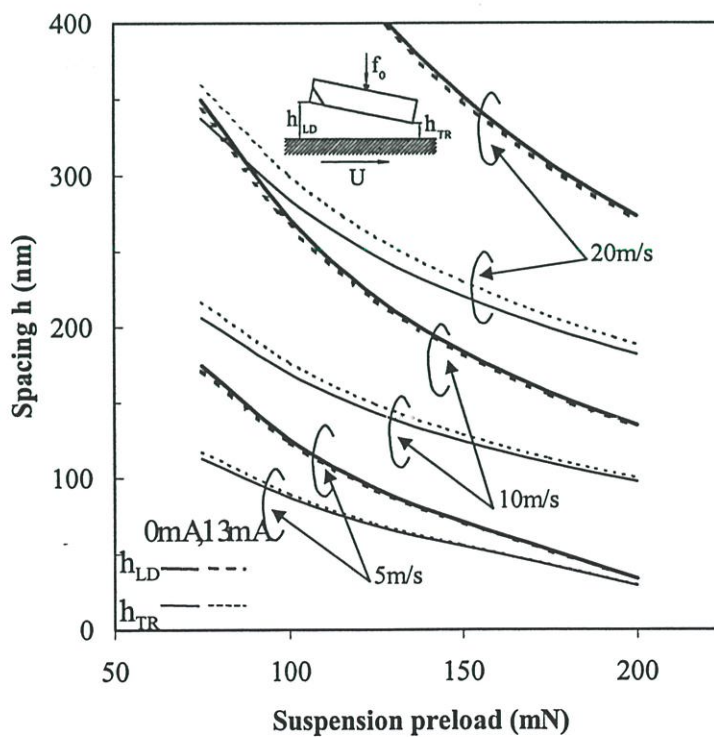
รูปที่ 6.45 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบกับมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ



รูปที่ 6.46 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบกับเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ

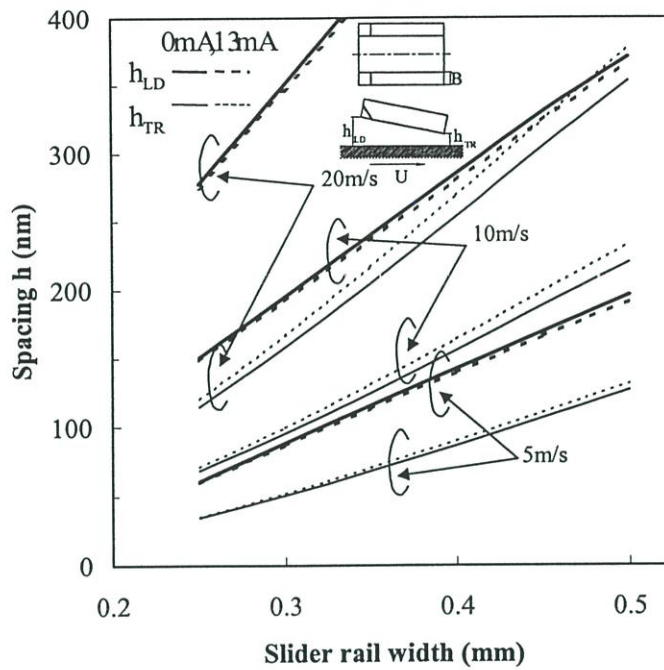


รูปที่ 6.47 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ

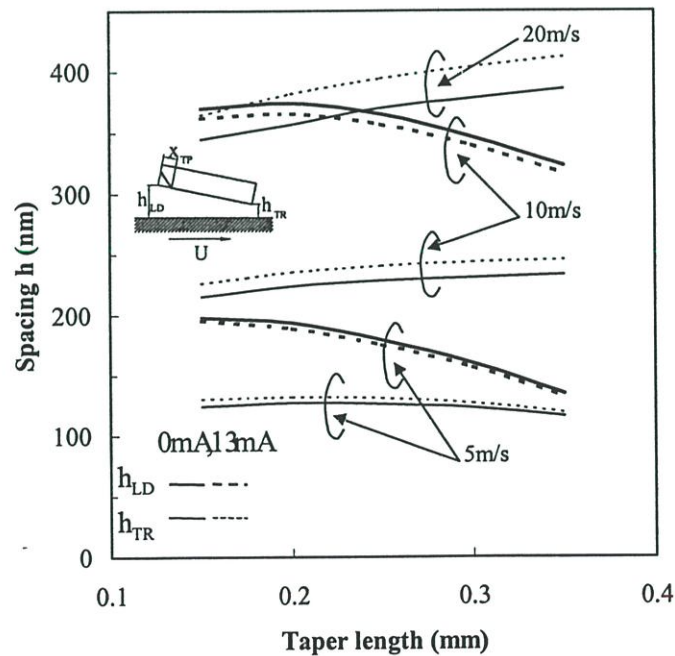


รูปที่ 6.48 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่าย กระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ

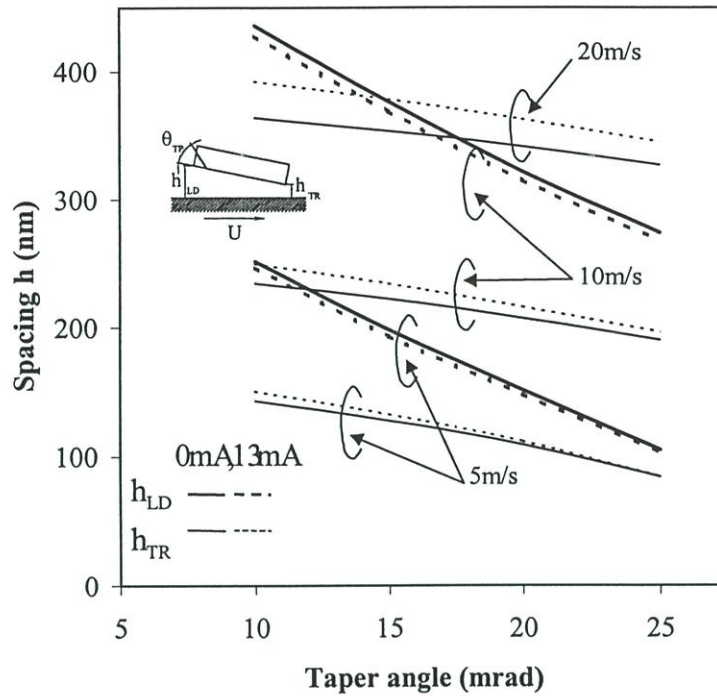
ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



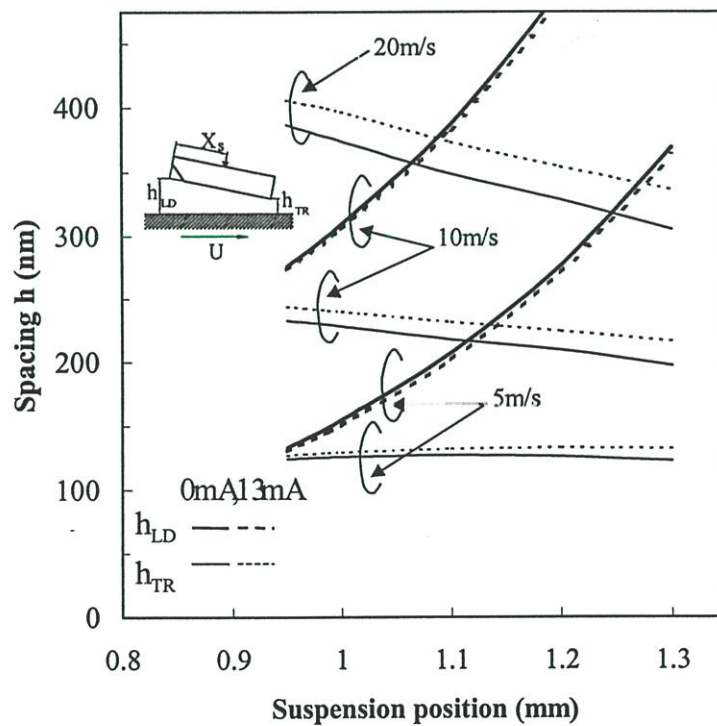
รูปที่ 6.49 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



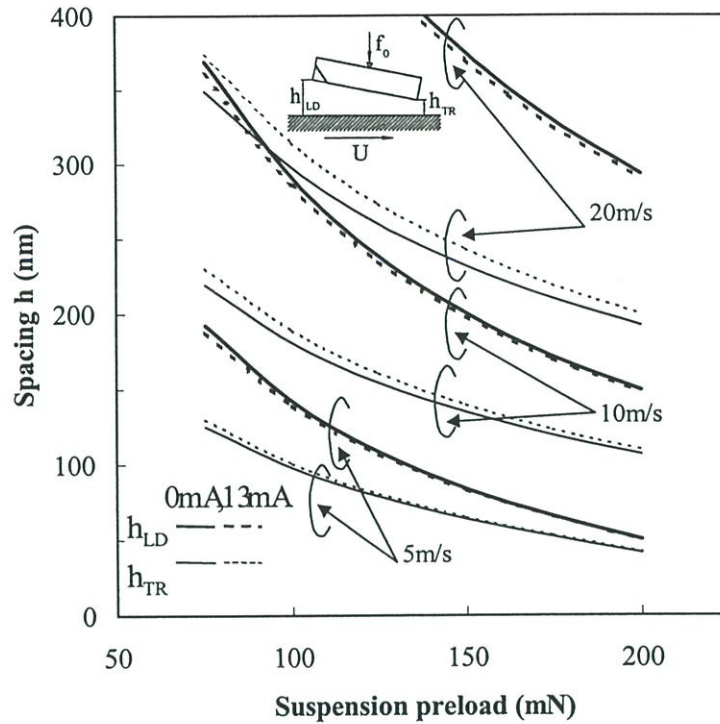
รูปที่ 6.50 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



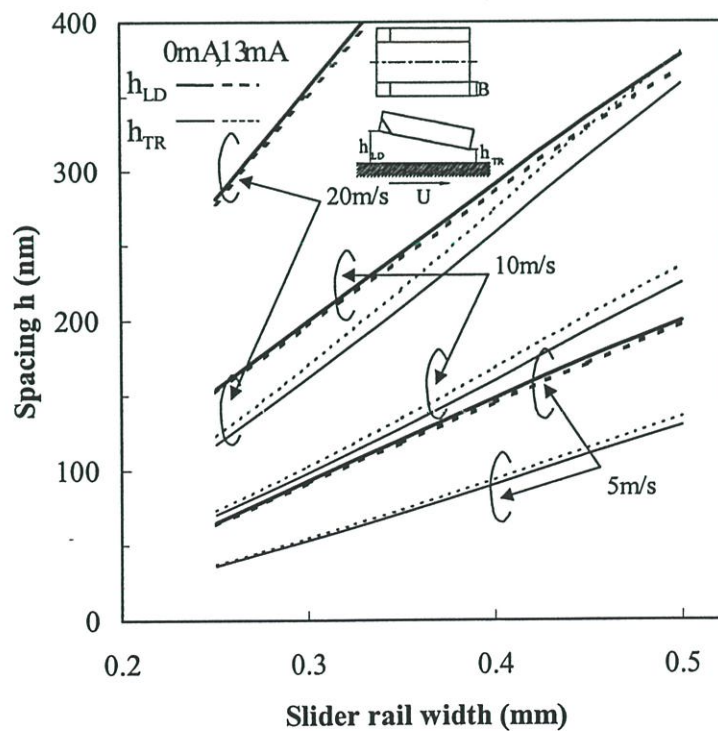
รูปที่ 6.51 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



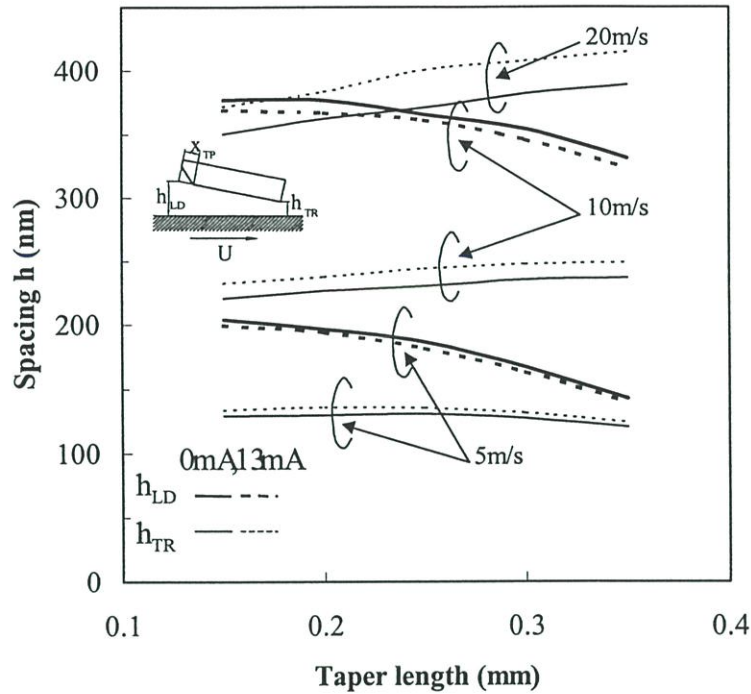
รูปที่ 6.52 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อ การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



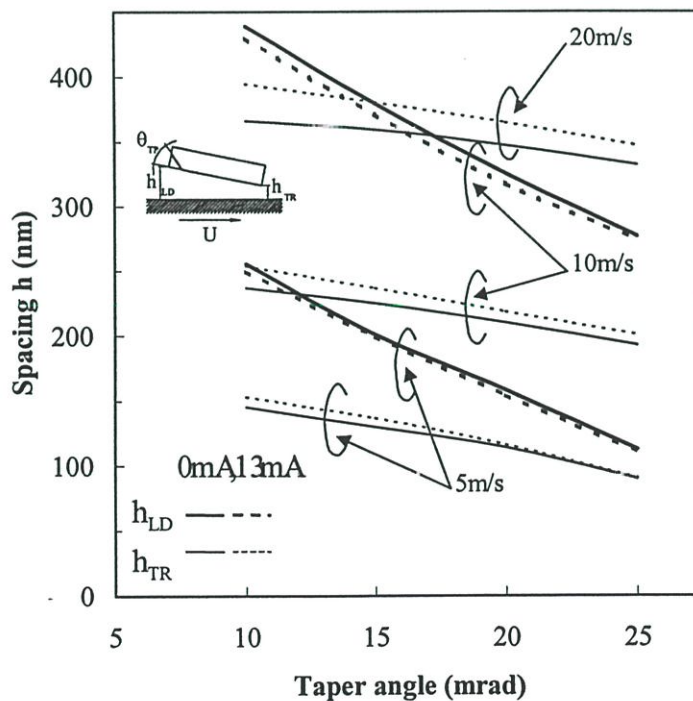
รูปที่ 6.53 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ



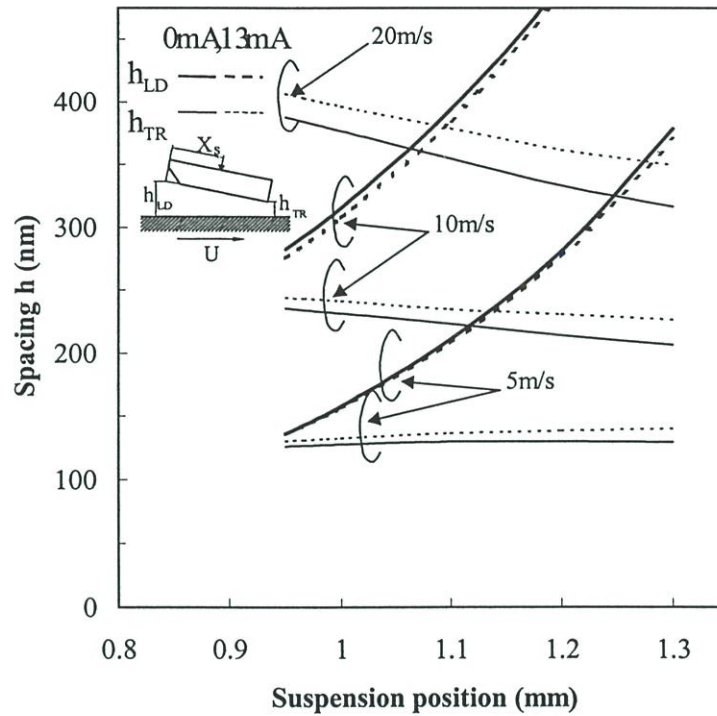
รูปที่ 6.54 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ



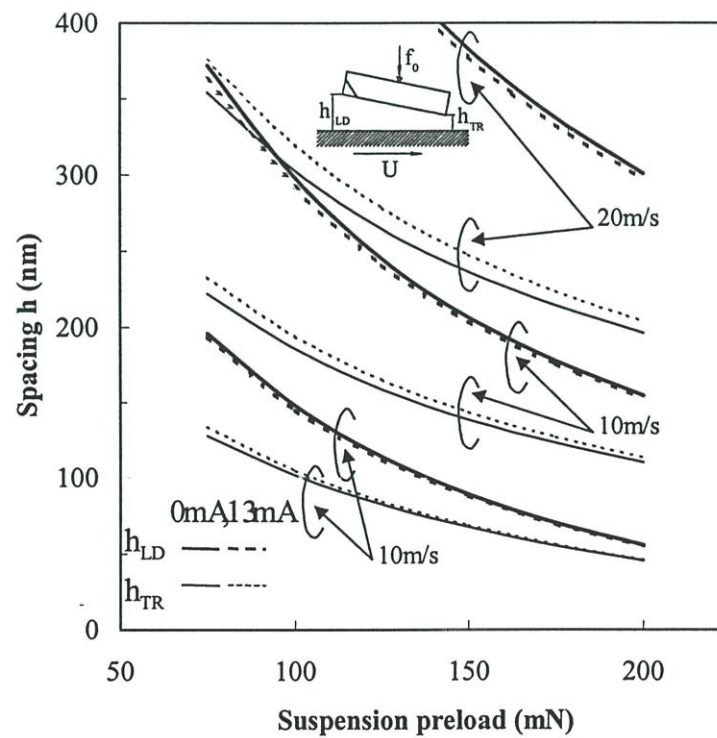
รูปที่ 6.55 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ



รูปที่ 6.56 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเทเปอร์ของรางหัวอ่านเปรียบเทียบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ



รูปที่ 6.57 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับของรางหัวอ่านเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ



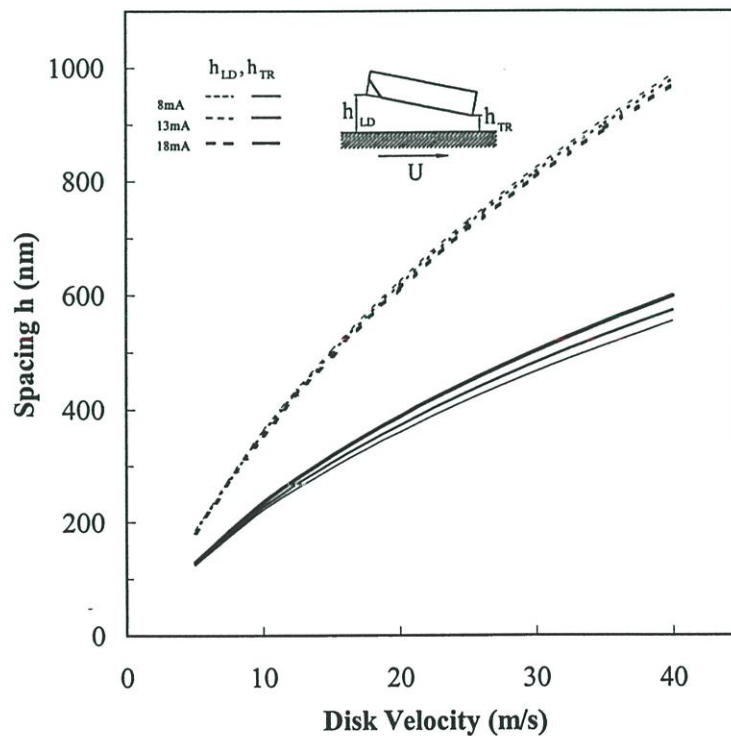
รูปที่ 6.58 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำเปรียบเทียบเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียนที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.30 บรรยากาศ

6.8 พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อความเร็วของจานแข็งเปลี่ยนแปลงไป

ในหัวข้อนี้เราได้แสดงผลการคำนวณค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดเทเปอร์แพลทเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของจานแข็งบันทึกข้อมูลและเปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูลในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

ความสูงการลอยตัวของขอบนำและขอบท้ายของหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วของจานแข็งบันทึกข้อมูลและเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน ความสูงการลอยตัวของขอบท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวของขอบนำของหัวอ่านมีค่าลดลง

ยิ่งความเร็วของจานแข็งเพิ่มขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านยิ่งเพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือความหนาของฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหัวอ่านจะสูงขึ้นส่งผลให้ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนสูงขึ้นกว่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่ไม่มีแหล่งความร้อน



รูปที่ 6.59 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของจานแข็งเปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนแปลงการจ่ายกระแสไฟฟ้า

6.9. พฤติกรรมของหัวอ่านที่ออกแบบโดยวิธีเหมาะสมที่สุดเมื่อมีแหล่งความร้อน

ในหัวข้อนี้เราได้นำเสนอพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดเทเปอร์เฟลทซึ่งออกแบบขนาดของรูปร่างหัวอ่านด้วยวิธีเหมาะสมที่สุด(โดยใช้วิธีการค้นหาทุกค่าร่วมกับโปรแกรมคณิตศาสตร์ของโบรเดน – เฟลทเซอร์ – โกลด์เฟรบ – เซนโน และวิธีค้นหาเชิงเส้น) ในงานวิจัยของขนิษฐา (2545) หัวอ่านที่ออกแบบสำหรับสภาวะทำงานสถิต ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.64$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 12.61$ มิลลิเรเดียน และ ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.66$ มิลลิเมตร และ $L_{TP} = 0.248$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 14.64$ มิลลิเรเดียน หัวอ่านที่ออกแบบสำหรับสภาวะทำงานพลวัต ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.75$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 11.31$ มิลลิเรเดียน หัวอ่านที่ออกแบบสำหรับสภาวะทำงานสถิตและพลวัตกรณี $W_1 = 5,500$ และ $W_2 = 50,000$ ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.336$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 10.0$ มิลลิเรเดียน กรณี $W_1 = 50,000$ และ $W_2 = 5,500$ ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.362$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 21.93$ มิลลิเรเดียน และหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทแบบไอบีเอ็ม 3380 ทำการคำนวณหาความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและขอบท้ายของหัวอ่าน

ตารางที่ 6.3 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตเมื่อมี

แหล่งความร้อนในหัวอ่าน (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.64$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 12.61$ มิลลิเรเดียน)

ความสูงการลอยตัว(nm)	0 mA	13 mA
h_{LD}	497.08	488.97
h_{TR}	244.24	252.83

ตารางที่ 6.4 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตเมื่อมี

แหล่งความร้อนในหัวอ่าน (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.66$ มิลลิเมตร และ $L_{TP} = 0.248$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 14.64$ มิลลิเรเดียน)

ความสูงการลอยตัว(nm)	0 mA	13 mA
h_{LD}	486.70	478.41
h_{TR}	245.93	253.73

ตารางที่ 6.5 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทสำหรับสภาวะทำงานพลวัตเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.75$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 11.31$ มิลลิเรเดียน)

ความสูงการลอยตัว(nm)	0 mA	13 mA
h_{LD}	631.98	618.43
h_{TR}	321.39	333.32

ตารางที่ 6.6 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตและพลวัตเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่านกรณี $W_1 = 5500$ และ $W_2 = 50000$ (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.336$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 10.0$ มิลลิเรเดียน)

ความสูงการลอยตัว(nm)	0 mA	13 mA
h_{LD}	225.57	223.95
h_{TR}	75.26	77.40

ตารางที่ 6.7 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตและพลวัตเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่านกรณี $W_1 = 50000$ และ $W_2 = 5500$ (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.362$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 21.93$ มิลลิเรเดียน)

ความสูงการลอยตัว(nm)	0 mA	13 mA
h_{LD}	137.85	136.00
h_{TR}	76.20	76.99

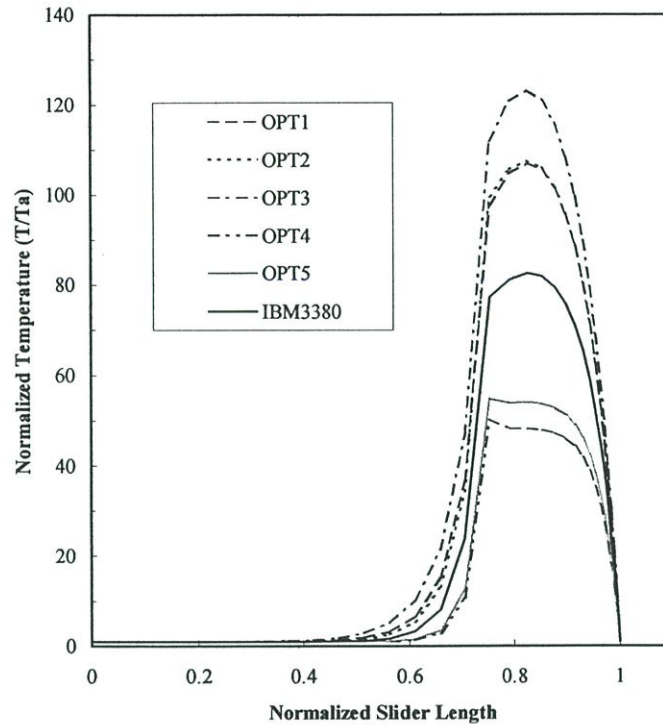
ตารางที่ 6.8 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เพลทแบบ ไอบีเอ็ม 3380 เมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน

ความสูงการลอยตัว(nm)	0 mA	13 mA
h_{LD}	329.19	325.02
h_{TR}	156.49	160.55

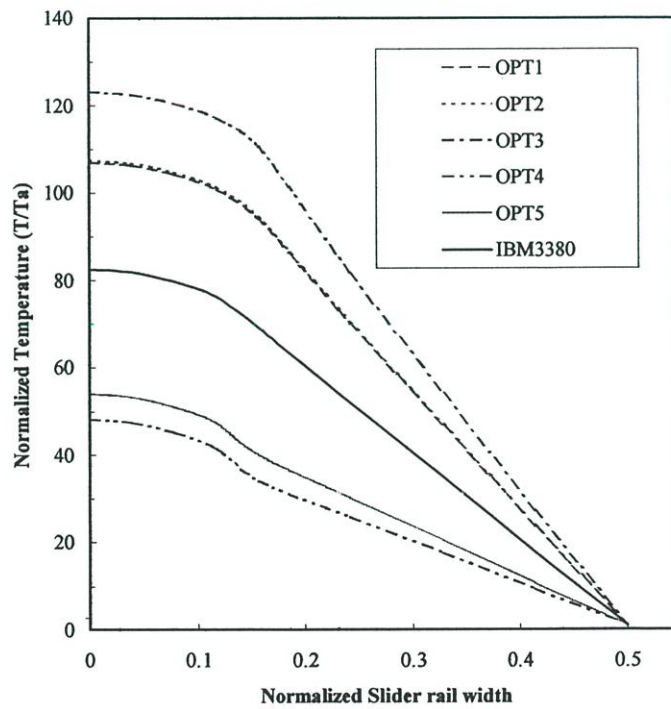
หมายเหตุ เส้นไขการคำนวณเป็นไปตามเส้นไขเดียวกันกับหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า ไอบีเอ็ม 3380 ความเร็วงานแข็งเท่ากับ 10 เมตร/วินาที

W_1 คือ ค่า Weight factor ของค่าสมการเป้าหมายที่สภาวะทำงานสถิต

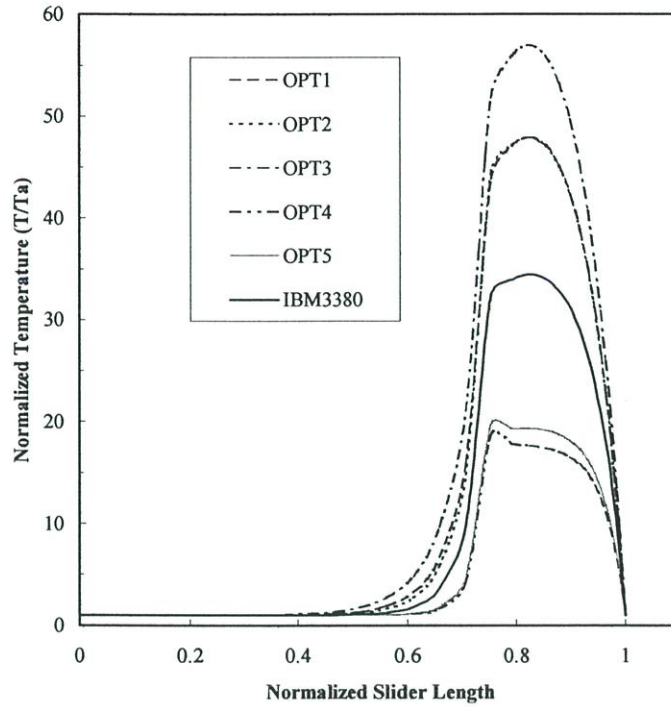
W_2 คือ ค่า Weight factor ของค่าสมการเป้าหมายที่สภาวะทำงานพลวัต



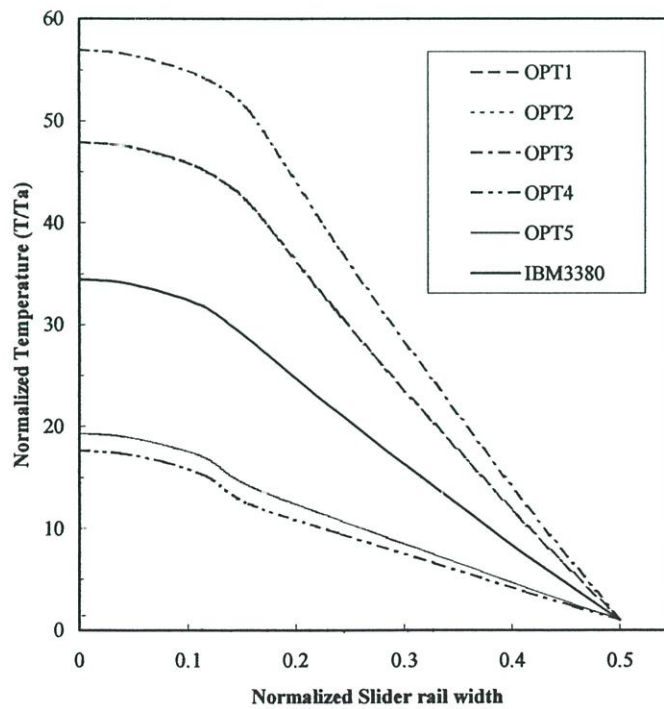
รูปที่ 6.60 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



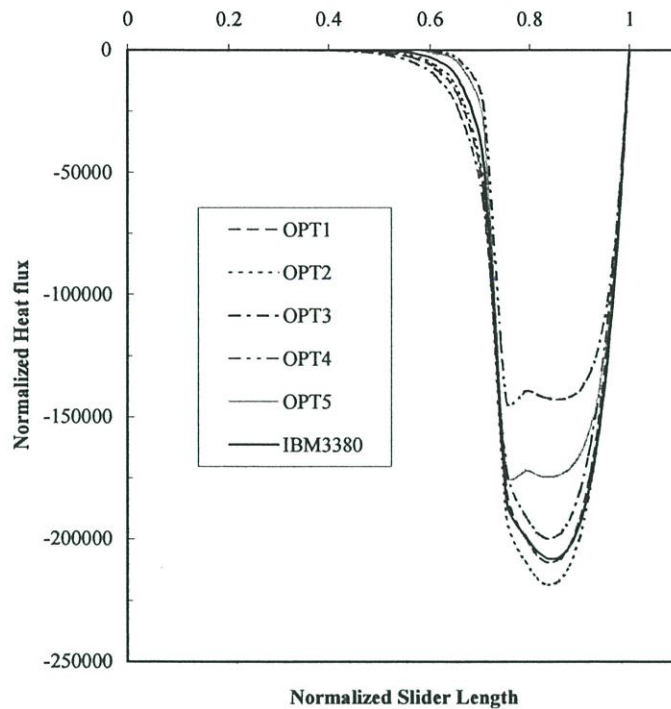
รูปที่ 6.61 การกระจายอุณหภูมิของหัวอ่านตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



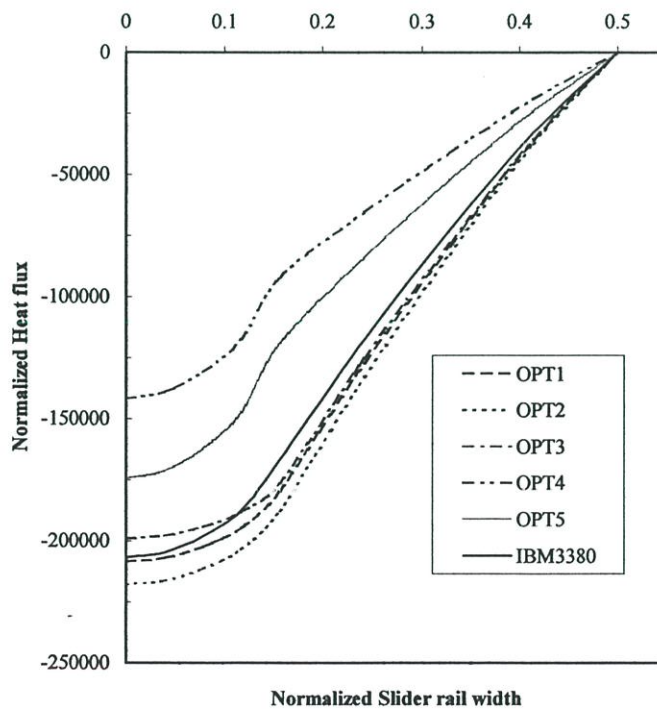
รูปที่ 6.62 การกระจายอุณหภูมิของเบร็ริงอากาศตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์เฟลท
เมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



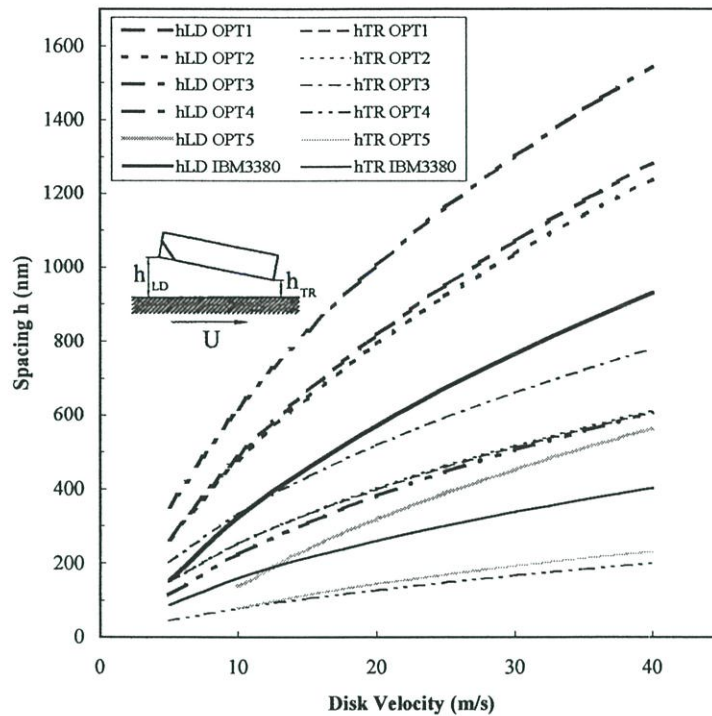
รูปที่ 6.63 การกระจายอุณหภูมิของเบร็ริงอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบ
เทเปอร์เฟลทเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



รูปที่ 6.64 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและเบร็องอากาศตามแนวยาวของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แพลตฟอร์มเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



รูปที่ 6.65 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและเบร็องอากาศตามแนวขวางของรางของหัวอ่านแบบเทเปอร์แพลตฟอร์มเมื่อมีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน



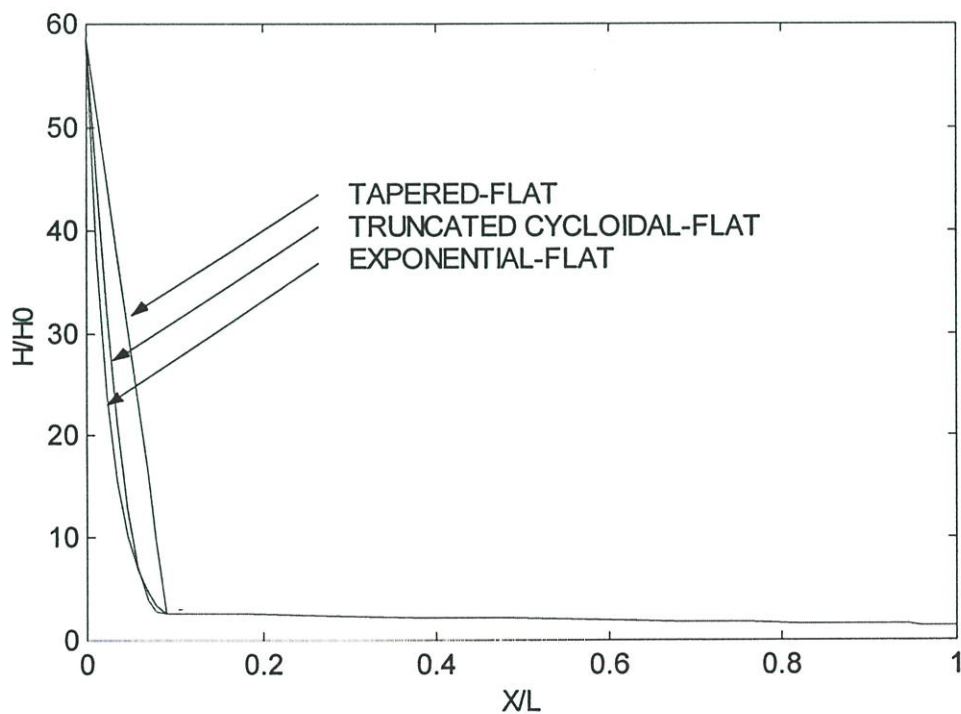
รูปที่ 6.66 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านที่มีแหล่งความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียนเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของจานแข็ง

สำหรับหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทที่ออกแบบโดยวิธีเหมาะสมที่สุดเมื่อมีแหล่งความร้อนบนหัวอ่าน เมื่อทำการคำนวณหาความสูงการลอยตัวพบว่า หัวอ่าน OPT 5 มีความสูงการลอยตัวต่ำสุดทั้งที่ขอบนำและท้ายหัวอ่าน อุณหภูมิของหัวอ่านที่มีค่าต่ำสุดเป็นของหัวอ่าน OPT 4 อุณหภูมิของแบร์ริงอากาศต่ำสุดเป็นของหัวอ่าน OPT 4 และการถ่ายเทความร้อนจากหัวอ่านสู่จานแข็งบันทึกข้อมูลต่ำสุดเป็นของหัวอ่าน OPT 4 หัวอ่าน OPT 4 เป็นหัวอ่านซึ่งเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวตามความเร็วจานแข็งด้วยอัตราที่ต่ำที่สุด

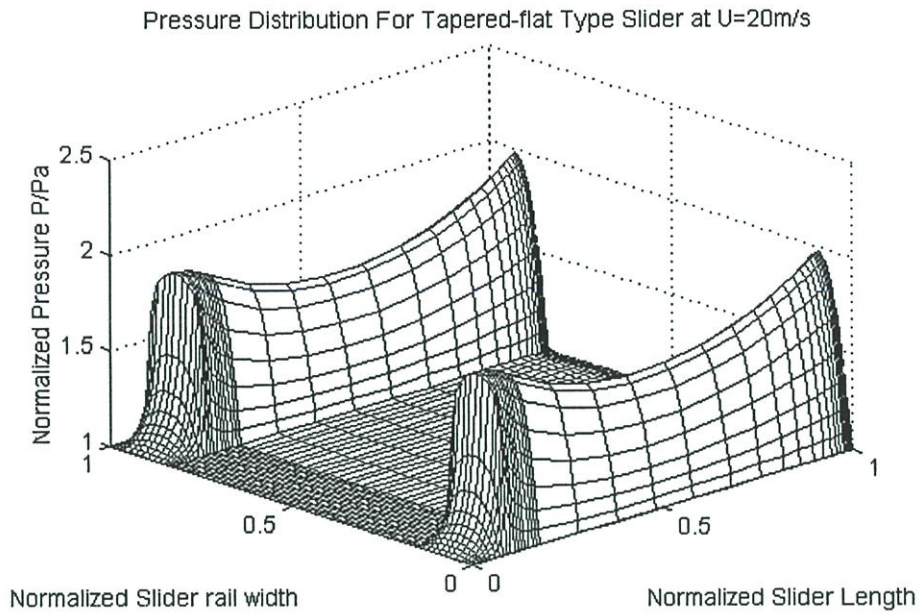
โดย OPT 1 คือ หัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทสำหรับสภาวะทำงานสถิต (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.64$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 12.61$ มิลลิเรเดียน) OPT 2 คือ หัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทสำหรับสภาวะทำงานสถิต (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.66$ มิลลิเมตร และ $L_{TP} = 0.248$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 14.64$ มิลลิเรเดียน) OPT 3 คือ หัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทสำหรับสภาวะทำงานพลวัต (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.75$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 11.31$ มิลลิเรเดียน) OPT 4 คือ หัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตและพลวัต กรณี $W_1 = 5500$ และ $W_2 = 50000$ (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.336$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 10.0$ มิลลิเรเดียน) OPT 5 คือ หัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทสำหรับสภาวะทำงานสถิตและพลวัต กรณี $W_1 = 50000$ และ $W_2 = 5500$ (ขนาดของหัวอ่าน $B = 0.362$ มิลลิเมตร และ $\theta_{TP} = 21.93$ มิลลิเรเดียน)

6.10 พฤติกรรมทางความร้อนของหัวอ่านเมื่อความหนาของฟิล์มอากาศเปลี่ยนแปลงไป

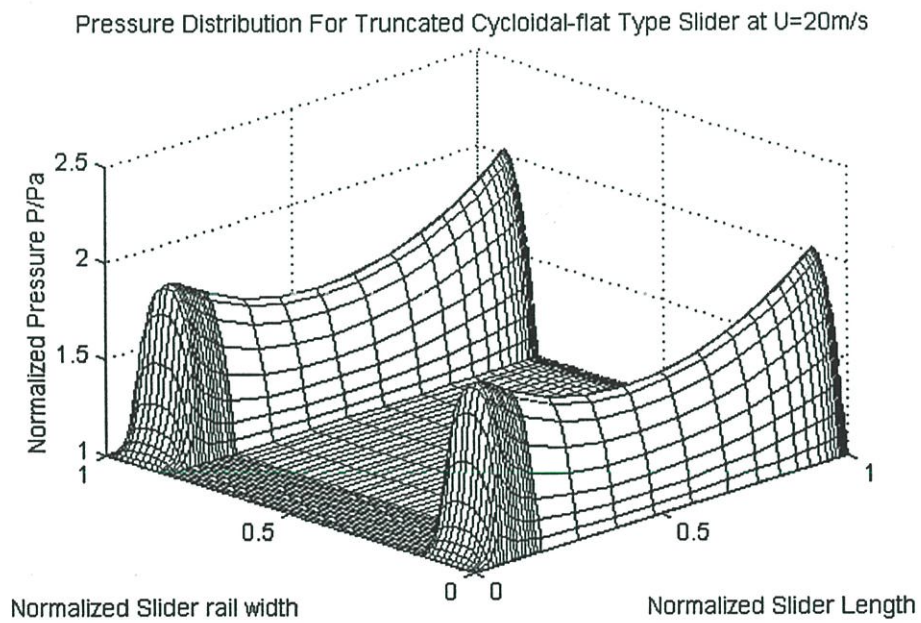
ในหัวข้อนี้เราได้นำเสนอผลการจำลองพฤติกรรมทางความร้อนของแบร์ริงอากาศซึ่งมีความเร็วงานแข็งบันทึกข้อมูล 20 เมตรต่อวินาที ความร้อนเกิดขึ้นในแบร์ริงอากาศระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและงานแข็งเนื่องจากผลของแรงเฉือน (Viscous dissipation) รูปที่ 6.67 แสดงความหนาของฟิล์มอากาศของหัวอ่านแต่ละชนิด การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลท ชนิดทรงเคทไซคอยล์คัลเฟลทและชนิดเอ็กโปเนนเชียลเฟลท แสดงในรูปที่ 6.68, 6.69, 6.70 และ 6.77 ตามลำดับ การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลท ชนิดทรงเคทไซคอยล์คัลเฟลทและชนิดเอ็กโปเนนเชียลเฟลท แสดงในรูปที่ 6.71, 6.72, 6.73 และ 6.78 ตามลำดับ อุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นในหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลท การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลท ชนิดทรงเคทไซคอยล์คัลเฟลทและชนิดเอ็กโปเนนเชียลเฟลท แสดงในรูปที่ 6.74, 6.75, 6.76 และ 6.79 ตามลำดับ การถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นในหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลท อุณหภูมิสูงสุดและการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณขอบนำของหัวอ่าน ซึ่งหัวอ่านชนิดเทเปอร์เฟลทมีค่าอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเปรียบเทียบกับหัวอ่านชนิดอื่น



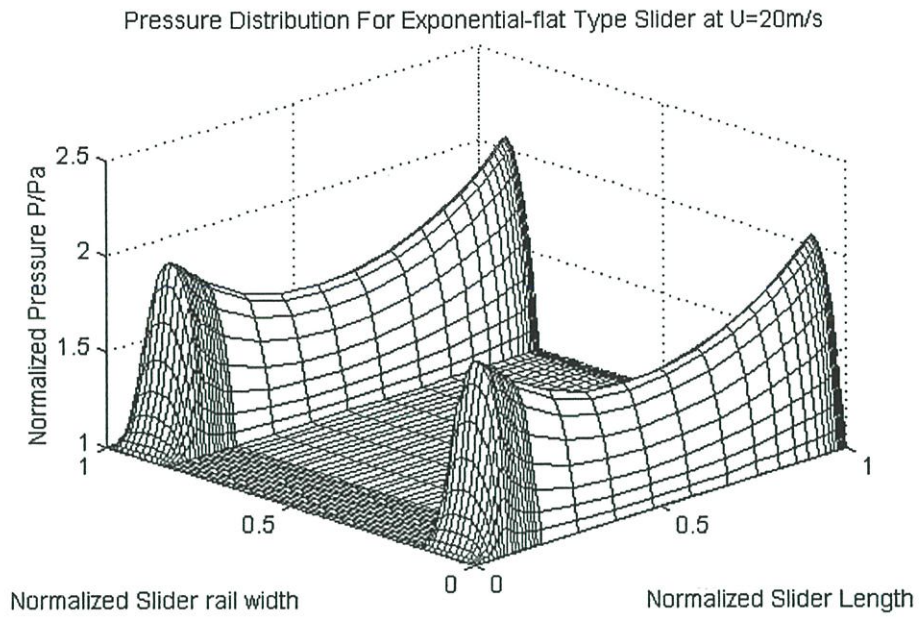
รูปที่ 6.67 ความหนาของฟิล์มอากาศ



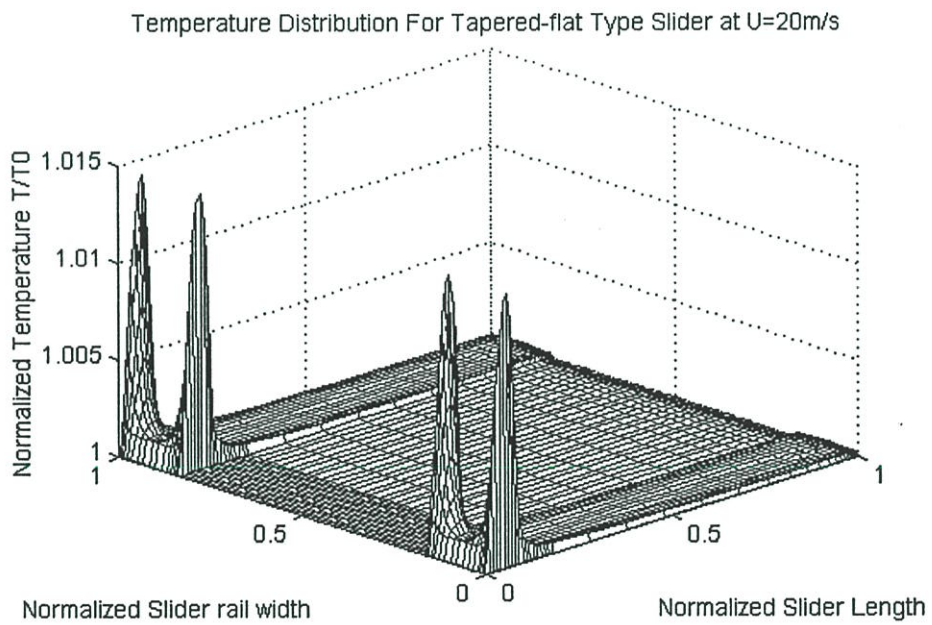
รูปที่ 6.68 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลต



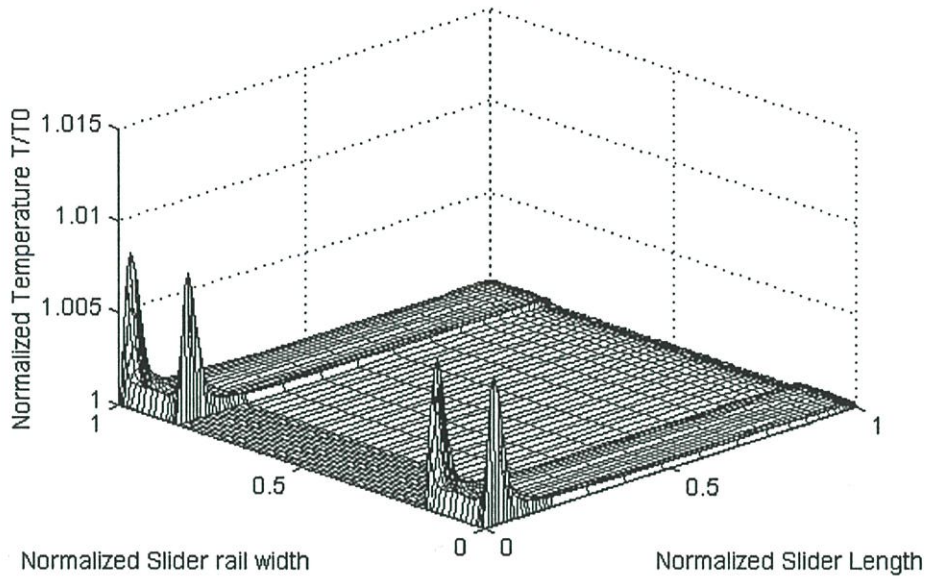
รูปที่ 6.69 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดทรงเคทไซคอยล์ตัดแฟลต



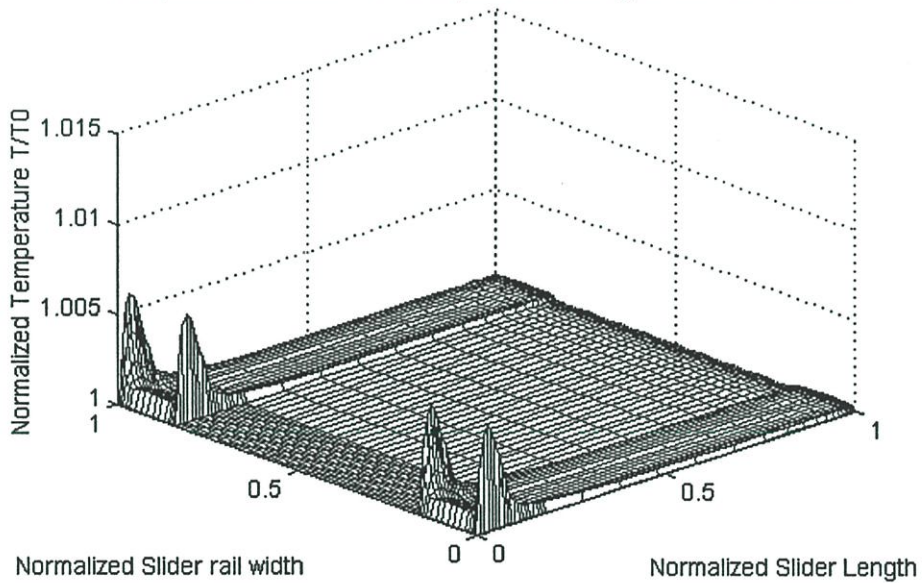
รูปที่ 6.70 การกระจายความดันของหัวอ่านชนิดเอ็กโปเนนเชียลแฟลต



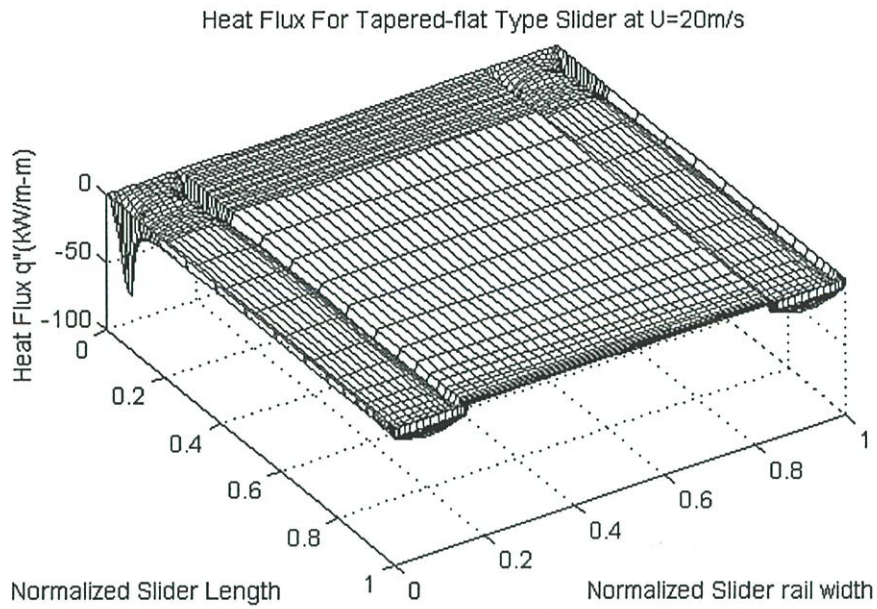
รูปที่ 6.71 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลต

Temperature Distribution For Truncated Cycloidal-flat Type Slider at $U=20\text{m/s}$ 

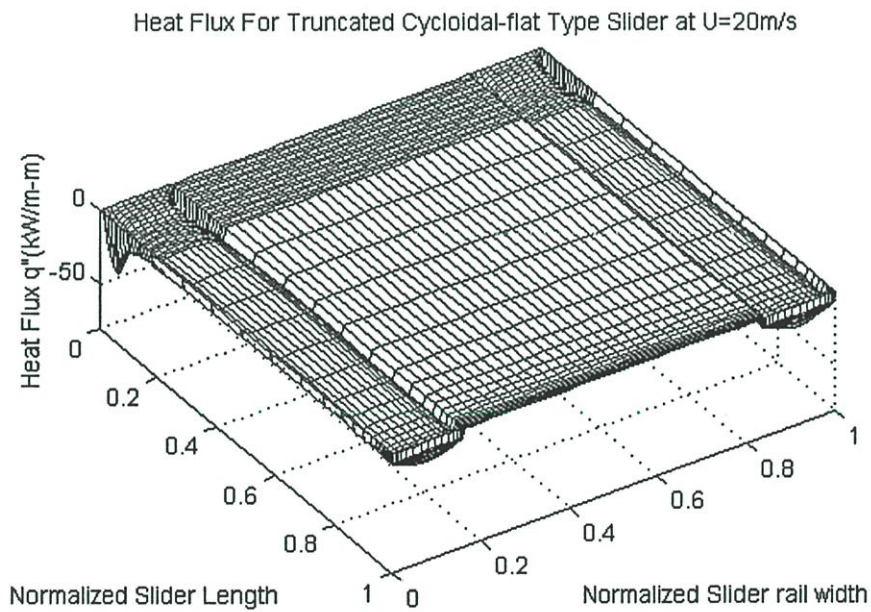
รูปที่ 6.72 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดทรงเคทไซคอยด์ตัดเฟลท

Temperature Distribution For Exponential-flat Type Slider at $U=20\text{m/s}$ 

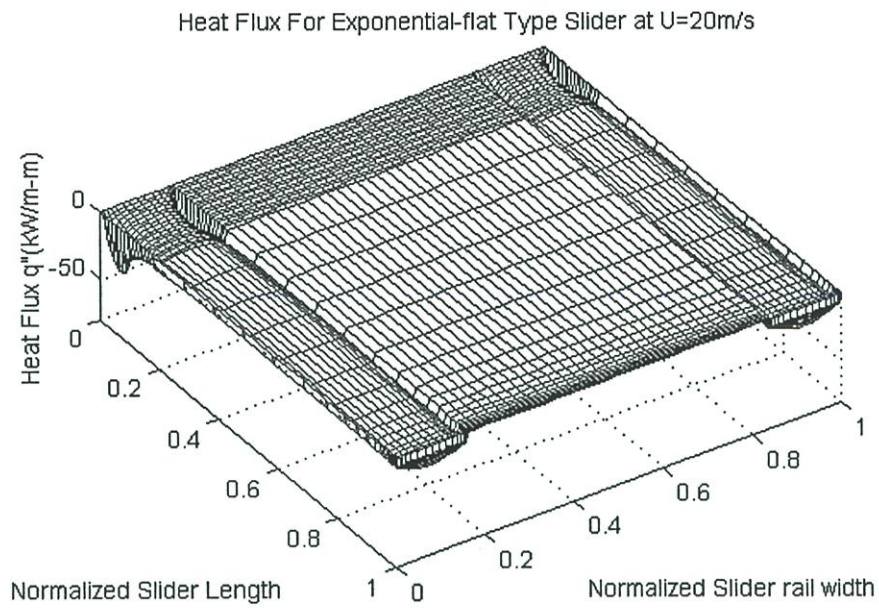
รูปที่ 6.73 การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดเอ็กโปเนนเชียลเฟลท



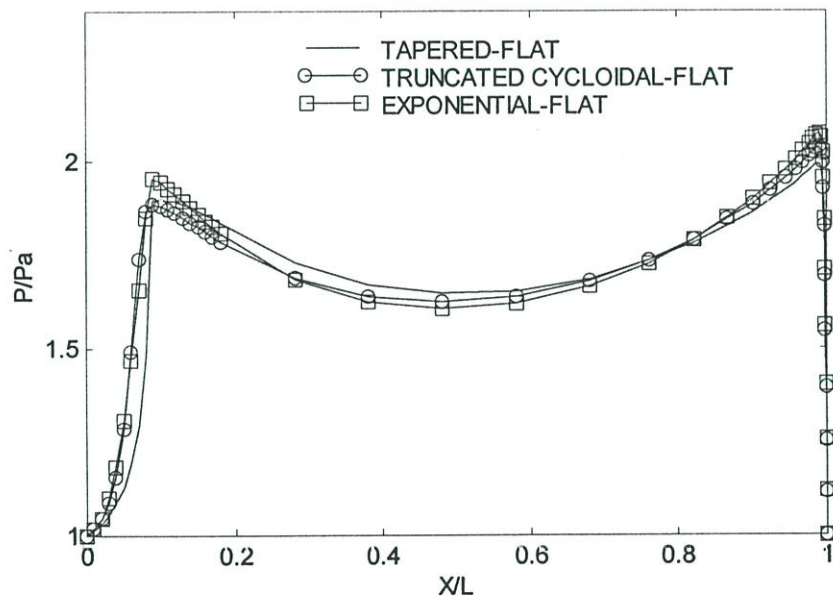
รูปที่ 6.74 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและเบริ่งอากาศของหัวอ่าน
ชนิดเทเปอร์เฟลท ($T_s - T_d = 0\text{K}$)



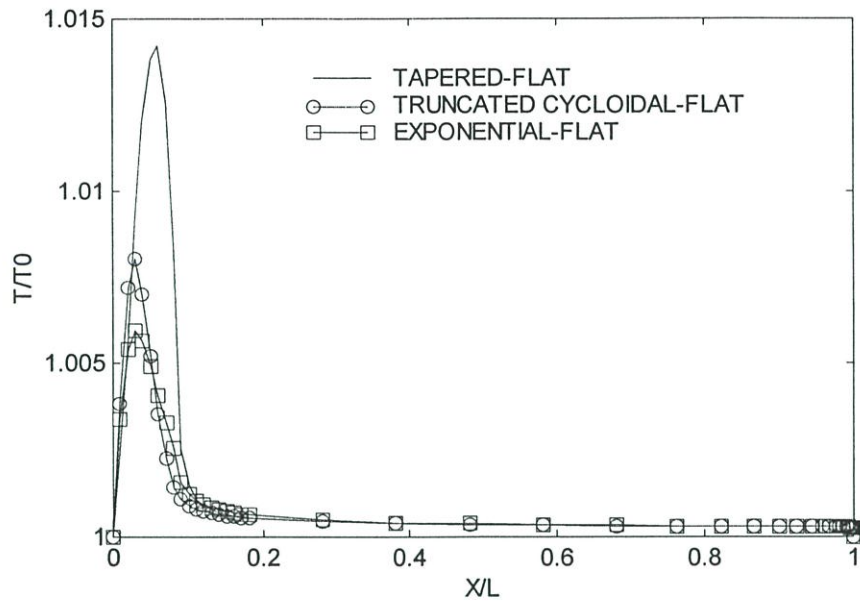
รูปที่ 6.75 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและเบริ่งอากาศของหัวอ่าน
ชนิดทรงแคไซเคออยด์คัทเฟลท ($T_s - T_d = 0\text{K}$)



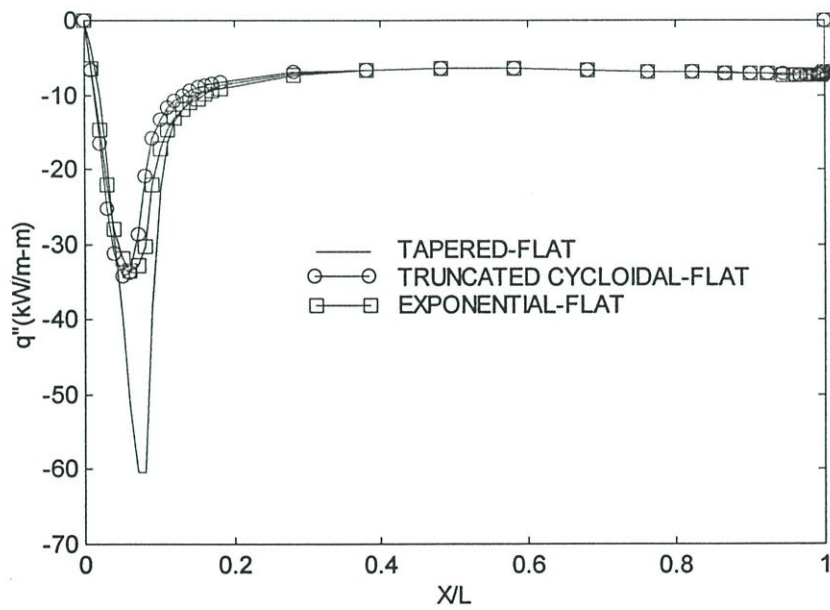
รูปที่ 6.76 การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศของหัวอ่านชนิดเอ็กโปเนนเชียลเฟลท ($T_s - T_d = 0\text{K}$)



รูปที่ 6.77 ความดันอากาศกึ่งกลางรางของหัวอ่าน



รูปที่ 6.78 อุณหภูมิอากาศด้านข้างรางของหัวอ่าน



รูปที่ 6.79 การถ่ายเทความร้อนของรางของหัวอ่านที่มีความสูง h

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาผลกระทบทางความร้อนต่อพฤติกรรมของหัวอ่านแม่เหล็กชนิดเทเปอร์แพลทในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอุปกรณ์อ่าน/เขียนข้อมูลในหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและผลของแรงเฉือนซึ่งถ่ายเทความร้อนจากแบร์ริงอากาศสู่หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์อ่าน/เขียน พบว่ายิ่งกระแสเพิ่มขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่ายิ่งอุณหภูมิอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่ายิ่งความดันอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้น ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศโดยรอบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและเปรียบเทียบกับเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน พบว่าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัวอ่าน ความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านจะเพิ่มขึ้น โดยผลของความร้อนจากแหล่งความร้อนในหัวอ่านจะลดลง

เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและเปรียบเทียบกับเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน พบว่าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัวอ่าน ความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความดันอากาศโดยรอบความสูงการลอยตัวของหัวอ่านจะเพิ่มขึ้น

เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของงานแข็งและเปรียบเทียบกับเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน พบว่าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัวอ่าน ความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านจะยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของงานแข็งเพิ่มขึ้น

ผลการคำนวณสำหรับหัวอ่านที่ออกแบบโดยวิธีเหมาะสมที่สุดเมื่อมีแหล่งความร้อนในหัวอ่าน พบว่าหัวอ่าน OPT 4 มีค่าสูงสุดของการกระจายอุณหภูมิของหัวอ่าน การกระจายอุณหภูมิของแบร์ริงอากาศ การถ่ายเทความร้อนระหว่างหัวอ่านและแบร์ริงอากาศต่ำที่สุด และมีความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและที่ท้ายหัวอ่านต่ำ

ยิ่งหัวอ่านลอยตัวใกล้งานแข็งบันทึกข้อมูลเท่าใด ความร้อนก็จะยิ่งถ่ายเทสู่งานแข็งได้มากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้หัวอ่านมีอุณหภูมิต่ำลง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือแบร์ริงอากาศจะมีลักษณะเป็นสารหล่อเย็น

จากผลการคำนวณความสูงการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีแหล่งความร้อนในสถานะต่างๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวของหัวอ่านอยู่ในช่วง 30 นาโนเมตร

7.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอในบทความนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางความร้อนซึ่งได้ทำการลดรูปสมการพลังงานให้อยู่ในรูปที่ง่ายแก่การพิจารณาดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงยังคงมีพฤติกรรมแตกต่างจากพฤติกรรมจริงอยู่มาก สำหรับแบบจำลองการนำความร้อนในหัวอ่านควรพิจารณาเป็นแบบสามมิติและสมการสมดุลย์ควรพิจารณาเป็นแบบสามแกน นอกจากนี้อาจทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของหัวอ่านที่มีรูปร่างซับซ้อนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bhushan B. **Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices**. Springer – Verlag.
- [2] Tang T. “Dynamics of Air – Lubricated Slider Bearings for Noncontact Magnetic Recording.”
Tran. ASME. Journal of Lubrication Technology, April 1971. pp. 272 – 278.
- [3] White J. W. and Nigam A. “A Factored Implicit Scheme for the Numerical Solution of the Reynolds Equation at Very Low Spacing.” Tran. ASME. Journal of Lubrication Technology, vol. 102, January 1980. pp. 80 – 85.
- [4] Hsia Y. – T. and Domoto G. A. “An Experimental Investigation of Molecular Rarefaction Effects in Gas Lubricated Bearings at Ultra – Low Clearances.” Tran. ASME. Journal of Lubrication Technology, vol. 105, January 1983. pp. 120 – 130.
- [5] White J. W. “Flying Characteristics of the “Zero – Load” Slider Bearing.” Tran. ASME. Journal of Lubrication Technology, vol. 105, July 1983. pp. 484 – 490.
- [6] Kogure K. et. al. “Design of Negative Pressure Slider for Magnetic Recording Disks.” Tran. ASME. Journal of Lubrication Technology, vol. 105, July 1983. pp. 496 – 501.
- [7] Gans R. F. “Lubrication Theory at Arbitrary Knudsen Number.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 107, July 1985. pp. 431 – 433.
- [8] Miu D. K. and Bogy D. B. “Dynamics of Gas – Lubricated Slider Bearings in Magnetic Recording Disk Files – Part I : Experimental Observation.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 108, October 1986. pp. 584 – 588.
- [9] Miu D. K. and Bogy D. B. “Dynamics of Gas – Lubricated Slider Bearings in Magnetic Recording Disk Files – Part II Numerical Simulation.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 108, October 1986. pp. 589 – 593.
- [10] Fukui S. and Kaneko R. “Analysis of Ultra – Thin Gas Film Lubrication Based on Linearized Boltzmann Equation Including Thermal Creep Flow.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 110, April 1988. pp. 253 – 262.
- [11] Ruiz O. J. and Bogy D. B. “A Numerical Simulation of the Hard – Disk Assembly in Magnetic Hard Disk Files : Part I – Component Models.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 112, October 1990. pp. 593 – 602.

- [12] Ruiz O. J. and Bogy D. B. "A Numerical Simulation of the Hard – Disk Assembly in Magnetic Hard Disk Files : Part II – Solution of the Coupled System." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 112, October 1990. pp. 603 – 613.
- [13] Mitsuya Y. "Modified Reynolds Equation for Ultra – Thin film Gas Lubrication Using 1.5 – order Slip – Flow Model and Considering Surface Accommodation Coefficient." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 115, April 1993. pp. 289 – 294.
- [14] Myllerup C. M. and Hamrock B. J. "Perturbation Approach to Hydrodynamic Lubrication Theory." Tran. ASME Journal of Tribology, vol. 116, January 1994. pp. 110 – 118.
- [15] Cha Ellis and Bogy D. B. "A Numerical Scheme for Static and Dynamic Simulation of Subambient Pressure Shaped Rail Sliders." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 117, January 1995. pp. 36 – 46.
- [16] Jander Albrecht et. al. "A Model for Predicting Heating of Magnetoresistive Heads." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 32, No. 5, September 1996. pp. 3392 – 3394.
- [17] Tian Hong et. al. "Non – Contact Induced Thermal Disturbance of MR Head Signals." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 33, No. 5, September 1997. pp. 3130 – 3132.
- [18] Hu Yong and Bogy D. B. "Solution of the Rarefied Gas Lubrication Equation Using on Additive Correction Based Multigrid Control Volume Method." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 120, April 1998. pp. 280 – 288.
- [19] Zhang Shuyu and Bogy D. B. "Variation of the Heat Flux Between a Slider and Air Bearing when the Slider Flies Over an Asperity." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 34, No. 4, July 1998. pp. 1705 – 1707.
- [20] Zeng Q. H. and Bogy D. B. "Experimental Evaluation of Stiffness and Damping of Slider – Air Bearings in Hard Disk Drive." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 121, January 1999. P pp. 102 – 107.
- [21] Zhang Shuyu and Bogy D. B. "Thermal Response of a Magneto – Resistive Head When it Flies Over an Asperity." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 121, October 1999. pp. 975 – 979.
- [22] Zhang S. and Bogy D. B. "A Heat Transfer Model for Thermal Fluctuations in a Thin Slider/Disk Air Bearing. "International Journal of Heat and Mass Transfer." 42(1999), pp. 1791 – 1800.

- [23] Hashimoto H. and Hattori Y. “Improvement of the Static and Dynamic Characteristics of Magnetic Head Sliders by Optimum Design.” Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 122 January 2000. Pp. 280 – 287.
- [24] Bernard J. Hamrock **Fundamental of Fluid Film Lubrication** McGraw – Hill.
- [25] สุภารัตน์ แคว้นเขมาเมือง “การจำลองพฤติกรรมของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้า” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543.
- [26] ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว “การออกแบบหาขนาดของหัวอ่านที่เหมาะสมที่สุดในอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้า” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

โครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

ประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (Main Program) และ โปรแกรมย่อย (Subroutine) ที่ทำหน้าที่ต่างๆ ดังต่อไปนี้

โปรแกรมหลัก

- GIVDIM ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ
- NONDIM ทำข้อมูลต่างๆ ให้อยู่ในรูปไร้มิติ
- GRIDX แบ่งกริดของพื้นผิวหัวอ่านในทิศทางตามแนวแกน X หรือตามแนวยาวของหัวอ่าน
- GRIDY แบ่งกริดของพื้นผิวหัวอ่านในทิศทางตามแนวแกน Y หรือตามแนวกว้างของหัวอ่าน

เมื่อได้ค่าต่างๆ และ โครงสร้างกริดของหัวอ่านที่เลือกคำนวณแล้วต่อไปเป็นการคำนวณหาพฤติกรรมทางสถิติ

- BALNCE คำนวณหาความสมดุลย์การเคลื่อนที่ของหัวอ่านขณะมีพฤติกรรมสถิติ
- CALPFM คำนวณหาพฤติกรรมสถิติของหัวอ่าน
- CALTSL คำนวณหาการกระจายอุณหภูมิของหัวอ่าน
- CALTAR คำนวณหาการกระจายอุณหภูมิของอากาศ
- CALETA คำนวณหาค่าความหนืดของอากาศ

ผังรูปที่ ผ.ก. 1 แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมหลัก โครงสร้างของ โปรแกรมย่อยที่คำนวณหาพฤติกรรมสถิติได้แก่

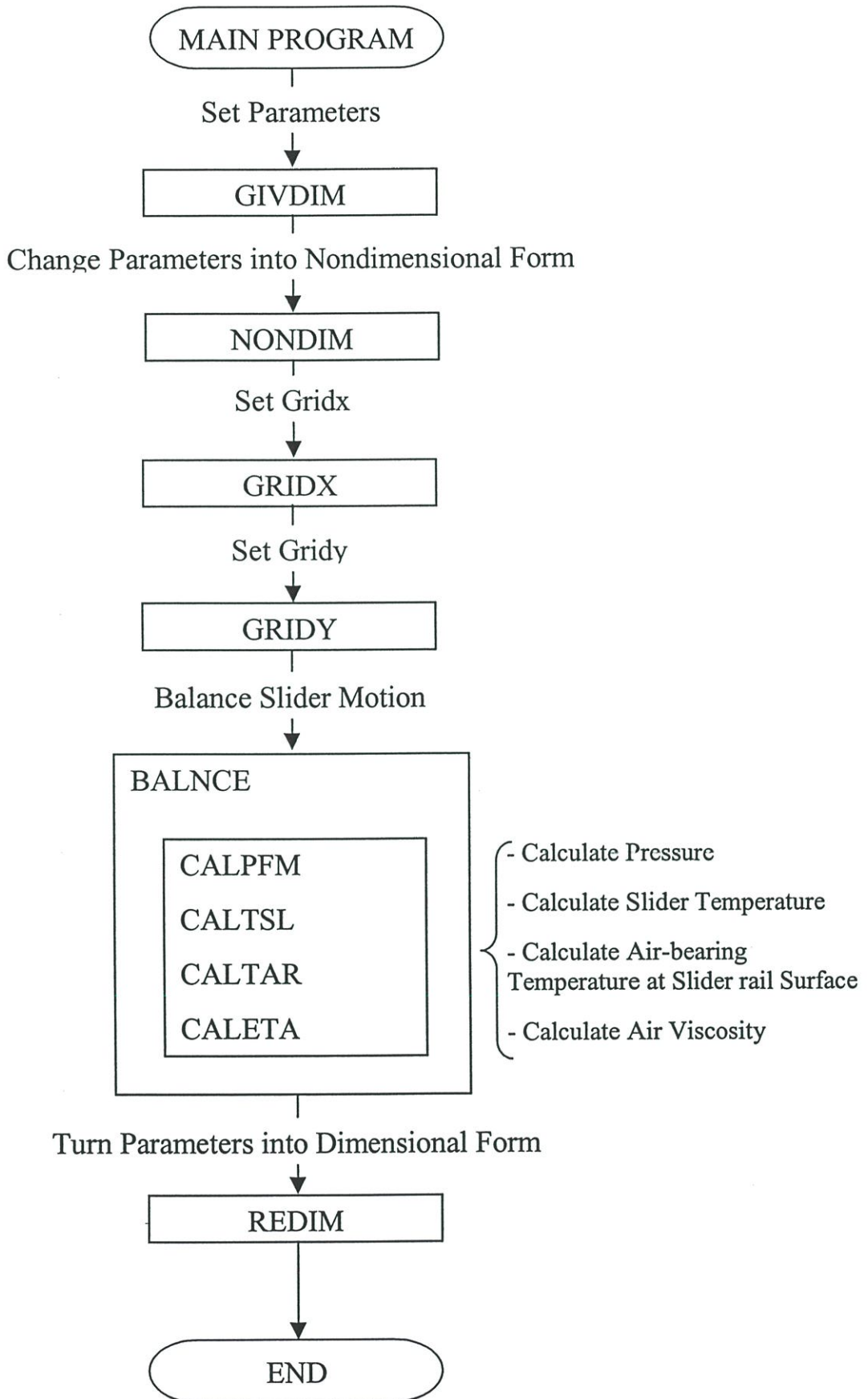
โปรแกรมย่อย CALPFM คำนวณหาความดันเมื่อหัวอ่านมีพฤติกรรมสเถียร โดยมีโปรแกรมย่อยภายในคือ

- INIP กำหนดค่าความดันเริ่มต้น
- CALHPH กำหนดค่าความหนาของฟิล์มอากาศ
- CALRE กระจายสมการสมดุลย์มวลที่ตัดเทอมขึ้นกับเวลาออก
- NRMAT จัดเทอมต่างๆ ที่ได้จากการกระจายสมการสมดุลย์มวลไว้ในรูปเมตริกซ์
- LUDCMP แก้มตริกซ์หาความดัน
- NEWP หาผลต่างความดันเก่าและใหม่แล้วจัดค่าความดันเก่าเท่ากับความดันที่คำนวณได้ใหม่แล้วทำการตรวจผลต่างระหว่างความดันเก่าและใหม่ว่ามีค่ายอมรับได้หรือยัง หากยังก็กลับทำการคำนวณใหม่โดยนำค่าความดันใหม่ที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณครั้งต่อไปจนกระทั่งค่าที่ได้จากการคำนวณสามารถยอมรับได้ ดังรูปที่ ผ.ก. 2 แสดงแผนภูมิการทำงานของ โปรแกรมย่อย CALPFM

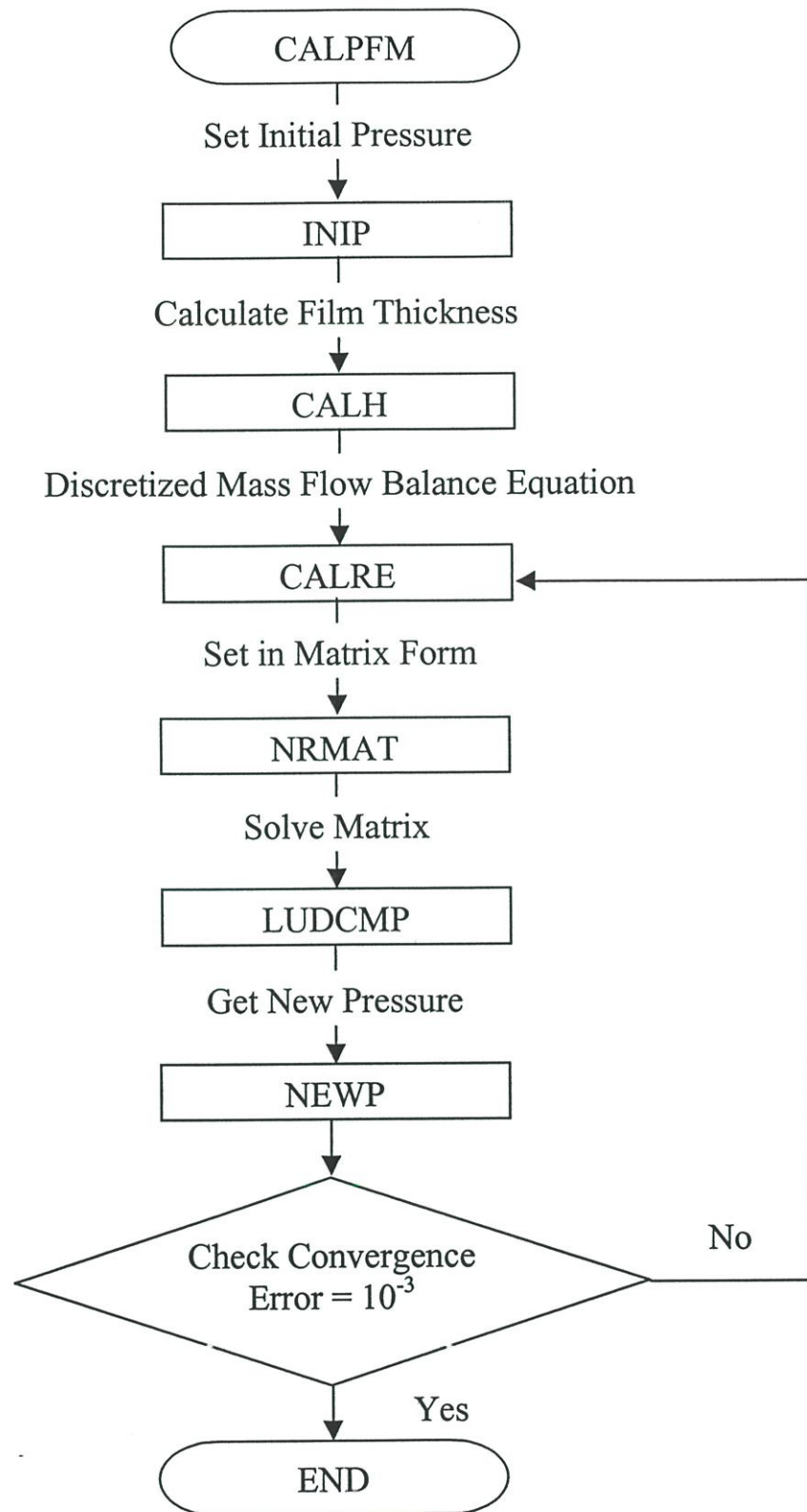
โปรแกรมย่อย CALTSL คำนวณหาอุณหภูมิของหัวอ่าน เมื่อหัวอ่านมีพฤติกรรมสเถียร โดยมี

โปรแกรมย่อยภายในคือ

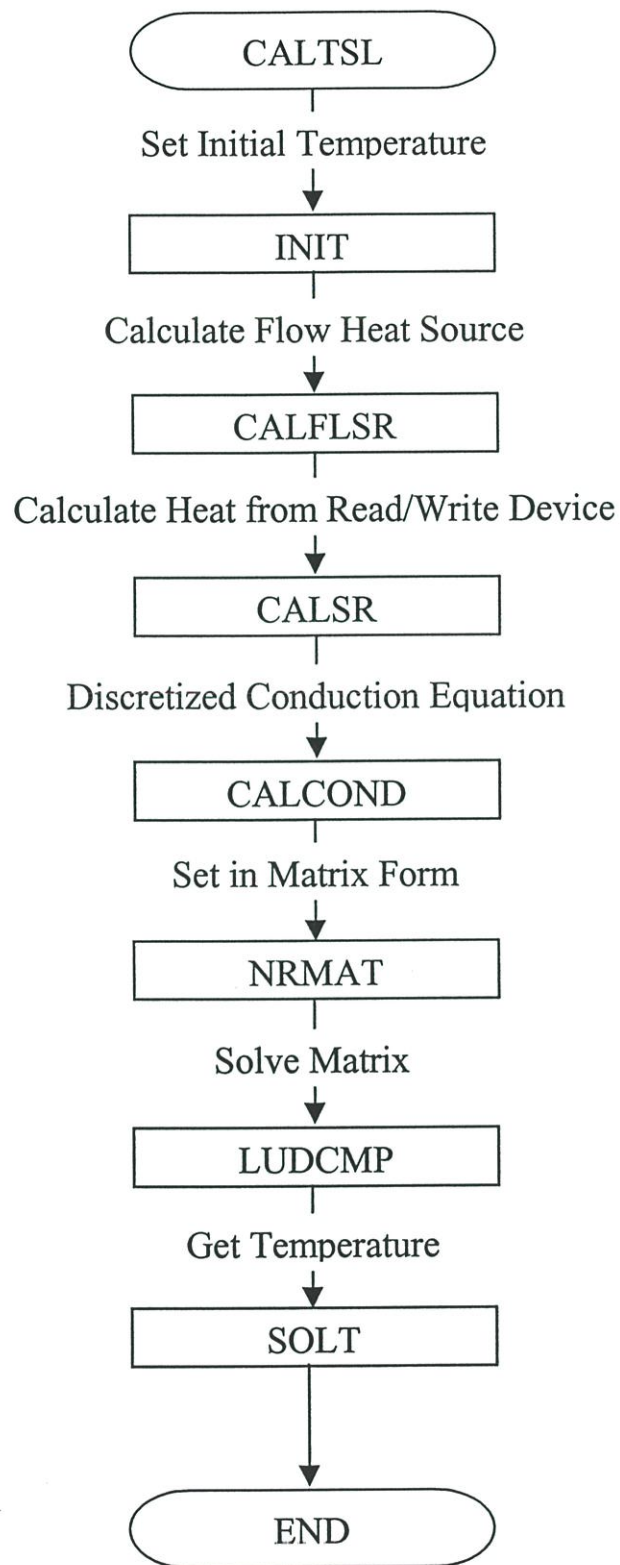
- INIT กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้น
- CALFLSR หาปริมาณความร้อนเนื่องจากการไหล
- CALSR หาปริมาณความร้อนเกิดจากอุปกรณ์อ่าน/เขียนในหัวอ่าน
- CALCOND กระจายสมการการนำความร้อนที่ตัดเทอมขึ้นกับเวลาออก
- TNRMAT จัดเทอมต่างๆ ที่ได้จากการกระจายสมการการนำความร้อนไว้ในรูปเมตริกซ์
- LUDCMP แก้มตริกซ์หาความดัน
- SOLT หาอุณหภูมิของหัวอ่านที่สภาวะสเถียร ดังรูปที่ ผ.ก. 3 แสดงแผนภูมิการทำงานของ โปรแกรมย่อย CALTSL



รูป ผ.ก. 1 โครงสร้างของโปรแกรมหลัก (Main Program)



รูป ผ.ก. 2 โครงสร้างของโปรแกรมย่อย CALPFM คำนวณหาความดันสถิต



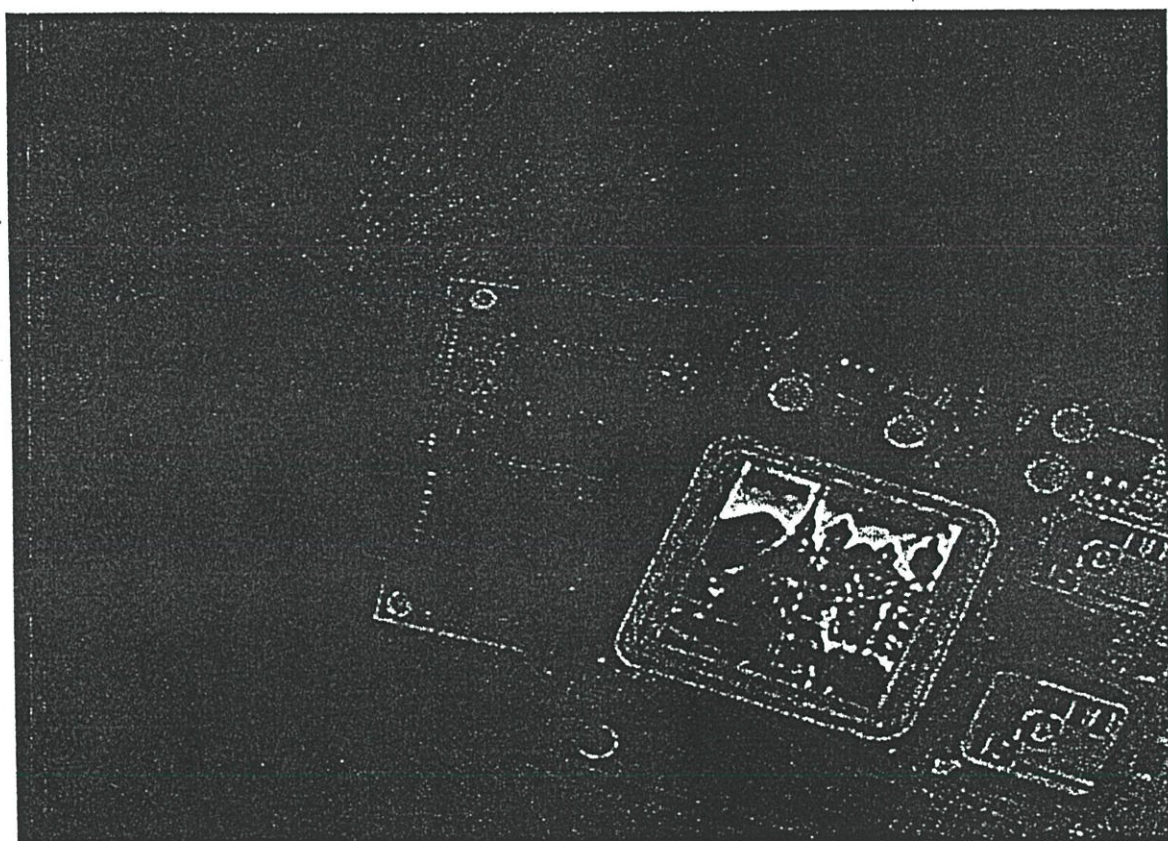
รูปผ.ก. 3 โครงสร้างของโปรแกรมย่อย CALTSL คำนวณหาคoefficient ของหัวอ่านที่สภาวะสถิต

ภาคผนวก ข.

ผลงานทางวิชาการเกี่ยวกับงานวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

PROCEEDINGS

2001 International Symposium on Communications and Information Technology ISCIT 2001



The Merging Decade of
Communication Systems and Information Technology

November 14 - 16, 2001

Chiang Mai Orchid Hotel, Chiang Mai, Thailand



EIC

JICA



HEAT DISTRIBUTION IN ULTRA-THIN FILM AIR BEARINGS OF MAGNETIC STORAGE DEVICES

M. Mongkolwongrojn and M. Montiralaiporn

Electro-Mechanical Engineering Laboratory
 ReCCIT Faculty of Engineering KMITL
 Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520,
 Thailand
 Tel. 3269987 ext. 103
 E-mail: kmmongko@kmitl.ac.th

Electro-Mechanical Engineering Laboratory
 ReCCIT Faculty of Engineering KMITL
 Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520,
 Thailand
 Tel. 7373000 ext. 3308
 E-mail: s2062038@kmitl.ac.th

ABSTRACT

This paper investigates the heat generation in ultra-thin film slider/disk air bearing of magnetic storage systems due to viscous dissipation, which transfers heat from the air bearing to the slider. Reynolds equation, Navier Stoke equation and energy equation are calculated numerically with discontinuous boundary conditions. In this study, the shape of magnetic head sliders are tapered-flat, truncated cycloidal-flat and exponential-flat are investigated. Temperature distribution and heat flux are obtained. Simulation results shows that temperature distribution and heat flux in the case of only viscous dissipation decrease with the decrease in the flying height.

1. INTRODUCTION

Thermal effects in slider/disk air bearing have previously investigated, Tian et al (1997)[1], Zhang and Bogoy (1999)[2] reported temperature variation phenomena in the air bearing. A phenomena called thermal asperities due to flash temperature that rise when a slider with the MR transducer flies close to a disk without contact. Then Zhang and Bogoy, they introduced a thermal model using discontinuous boundary conditions in a thin slider/disk air bearing and solve it numerically. They found that heat flux occurs by heat conduction mainly which transfers heat from the slider to the air bearing when the slider has higher surface temperature than the disk and viscous dissipation.

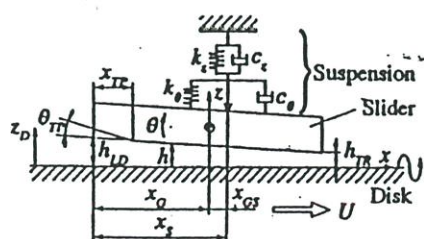


Fig. 1 Magnetic head slider.

This paper introduces theoretical investigations in heat transfer between the slider and the air bearing from Reynolds equation, Navier Stokes equation and energy equation using discontinuous boundary condition[2]. A computer program was implemented to obtain temperature distribution and

heat flux distribution in tapered-flat type slider, truncated cycloidal-flat type slider and exponential-flat type slider.

2. THEORETICAL ANALYSIS

2.1 Reynolds equation

At present, high performance magnetic head/disk requires only sub-micro flying height. Fig.1 shows magnetic head slider system for this study. Reynolds equation with the effect of molecular slip can be expressed as

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ph^3 \left(1 + \frac{6a_0 Kn P_0 h_m}{ph} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ph^3 \left(1 + \frac{6a_0 Kn P_0 h_m}{ph} \right) \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 6\eta_a \frac{\partial(Uph)}{\partial x} \tag{1}$$

which h_m is reference air film thickness p is air pressure P_0 is ambient air pressure, η_a is air viscosity at ambient air pressure, a_0 is surface factor.

2.2 Navier Stokes equations

The simplification of Navier Stokes equations for bearing has been performed by many researchers[2], can be expressed as

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{2a}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{2b}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \tag{2c}$$

where u, v are velocities in x and y directions. p is the pressure and μ is the viscosity of air. For simplification, we assume μ is uniform in the air bearing. The velocity component w in the z direction is approximated to be zero. Clearly, the pressure p is constant across the thickness of the air bearing.

2.3 Energy equation

Since the magnitudes $|\partial/\partial x| \approx |\partial/\partial y| \ll |\partial/\partial z|$ and the velocity of air in z direction is approximately zero in a lubrication problem. We neglect the small terms and rewrite the energy equation as

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 = 0 \quad (3)$$

Normally, the viscous dissipation term is smaller in magnitude than the conduction term in equation (3) but when temperature difference between slider and disk surface is close or equal to zero "warming effect" of viscous dissipation can not be neglected. Therefore, we interest this term in equation (3) for analysis.

2.4 Boundary condition

We assume disk velocity U does not equal zero in x direction and velocity v equals zero in y direction that is the case which slider flying at mid-radius of the disk. For temperature, considering that the disk is larger than the air bearing much and rotating with high speed. We assume that the disk has constant speed and uniform temperature. Introducing slip condition for the velocity and jump condition for temperature at the boundaries of the air bearing [2,3]. The boundary conditions for velocity and temperature can be written as

$$u(0) = U + \frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (4a)$$

$$u(h) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=h} \quad (4b)$$

$$v(0) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (4c)$$

$$v(h) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=h} \quad (4d)$$

$$T(0) = T_s + 2 \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{\text{Pr}} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (4e)$$

$$T(h) = T_d + 2 \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{\text{Pr}} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h} \quad (4f)$$

where σ_M is momentum accommodation coefficient and σ_T is thermal accommodation coefficient γ is ratio of C_p to C_v which are specific heats at constant pressure and constant volume respectively. T_s and T_d are the slider surface temperature and the disk surface temperature respectively. For convenience, we write $a = (2 - \sigma_M) / \sigma_M$ and $b = 2(2 - \sigma_T) \gamma / \sigma_T (\gamma + 1) \text{Pr}$ in the following analysis.

2.5 Air film thickness

The air film thickness for taper-flat type slider, truncated cycloidal-flat type slider and exponential-flat type slider can be written as

2.5.1 Tapered-flat type slider

$$h = h_{TR} + (L - L_{TP}) \tan \theta + (L_{TP} - x) \tan \theta_{TP} \quad (5a)$$

$$; 0 \leq x \leq L_{TP}$$

$$h = h_{TR} + (L - x) \tan \theta \quad (5b)$$

$$; L_{TP} \leq x \leq L$$

2.5.2 Truncated cycloidal-flat type slider

$$h = h_{TR} + (L - L_{TP}) \tan \theta + (L_{TP} - x) \tan \theta_{TP} \quad (6a)$$

$$- \frac{L_{TP}}{\pi} \tan \theta_{TP} \sin \left(\frac{\pi(L_{TP} - x)}{L_{TP}} \right); 0 \leq x \leq L_{TP}$$

$$h = h_{TR} + (L - x) \tan \theta \quad (6b)$$

$$; L_{TP} \leq x \leq L$$

2.5.3 Exponential-flat type slider

$$h = h_{TR} + (L - L_{TP}) \tan \theta + h_{TR} (e^{m(L_{TP} - x)} - 1) \quad (7a)$$

$$m = \frac{1}{L_{TP}} \ln \left(\frac{h_{TR} + \tan \theta_{TP} L_{TP}}{h_{TR}} \right); 0 \leq x \leq L_{TP}$$

$$h = h_{TR} + (L - x) \tan \theta \quad (7b)$$

$$; L_{TP} \leq x \leq L$$

3. HEAT TRANSFER IN AIR BEARING

To obtain heat transfer in the air bearing, we need to know temperature distribution by solving Navier Stoke equation and energy equation. Navier Stoke equation and energy equation with constant property approximation can be solved seperately.

3.1 Velocity distribution

Velocity distribution can be obtained by integrating Navier Stoke equation (reduced form) (2a)-(2b) using boundary condition (4a)-(4d). With straight forward procedure, the results are as follow

$$u = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (a\lambda h + hz - z^2) + U \left(1 - \frac{z + a\lambda}{h + 2a\lambda} \right) \quad (8a)$$

$$v = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (a\lambda h + hz - z^2) \quad (8b)$$

3.2 Temperature distribution

We fill velocity result (8a) and (8b) into energy equation (3) then integrate to obtain temperature distribution in non-dimensional form is

$$(T_0)T^* = T_s - \frac{1}{k} \left\{ \frac{1}{12\mu} \left[\frac{P_0^2}{L^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right)^2 + \frac{P_0^2}{B^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] h^4 (z^*)^4 \right. \\ - \frac{1}{3} \left[\frac{h}{2\mu} \left[\frac{P_0^2}{L^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right)^2 + \frac{P_0^2}{B^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] + \frac{U}{(h + 2a\lambda)} \frac{P_0}{L} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) \right] h^3 (z^*)^3 \\ + \frac{\mu}{2} \left\{ \left[\frac{h}{2\mu} \frac{P_0}{L} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) + \frac{U}{(h + 2a\lambda)} \right]^2 + \frac{h^2}{4\mu^2} \frac{P_0^2}{B^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right)^2 \right\} h^2 (z^*)^2 \\ + \left[\frac{(T_s - T_d)}{(h + 2b\lambda)} + \frac{1}{k} \left[\frac{1}{24\mu} h^3 \left[\frac{P_0^2}{L^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right)^2 + \frac{P_0^2}{B^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] + \frac{\mu U^2 h}{2(h + 2a\lambda)^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{U h^3}{6(h + 2a\lambda)(h + 2b\lambda)} \frac{P_0}{L} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right] \right\} (hz^* + b\lambda) \quad (9)$$

Similarly, equation of temperature consists both Poiseulle flow and Couette flow and the term are combined.

3.3 Heat transfer

From Fourier's law $q = -k\partial T/\partial z$ at $z = h$ and temperature distribution in equation (9), the heat

flux distribution can be written in non-dimensional form as

$$\frac{qh}{\mu U^2} = -\frac{T_s - T_d}{\left(\frac{\gamma-1}{2}\right) Pr M^2 T_0 \left(1 + 2b \frac{\lambda}{h}\right)} + \frac{1}{2 \left(1 + 2a \frac{\lambda}{h}\right)^2} + \frac{1}{24} Re^2 \left(\frac{h}{L}\right)^2 \left(\frac{P_0}{\rho U^2}\right)^2 \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*}\right)^2 + \frac{1}{24} Re^2 \left(\frac{h}{B}\right)^2 \left(\frac{P_0}{\rho U^2}\right)^2 \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*}\right)^2 - \frac{1}{6} Re \frac{h}{L} \frac{P_0}{\rho U^2} \left(1 + 2b \frac{\lambda}{h}\right) \left(1 + 2a \frac{\lambda}{h}\right) \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \quad (10)$$

4. SIMULATION RESULTS

The simulation of heat transfer in the air bearing sliders was done at disk running with linear velocity at 20 m/s. Heat is generated in the air film between the head slider and the disk due to viscous dissipation. Temperature profile in the air bearing of taper-flat slider, truncated cycloidal-flat slider and exponential-flat slider are calculated as shown in Fig.2, Fig.3, Fig.4 and Fig.8 respectively. The peak temperature occurred near leading edge of the sliders. Heat flux distribution in the air bearing of tapered-flat slider, truncated cycloidal-flat slider and exponential-flat slider are shown in Fig.5, Fig.6, Fig.7 and Fig.9 respectively. The maximum heat flux also occurred near the leading edge of the sliders. The maximum temperature and maximum heat flux are obtained in the tapered-flat slider compared with the other type of sliders.

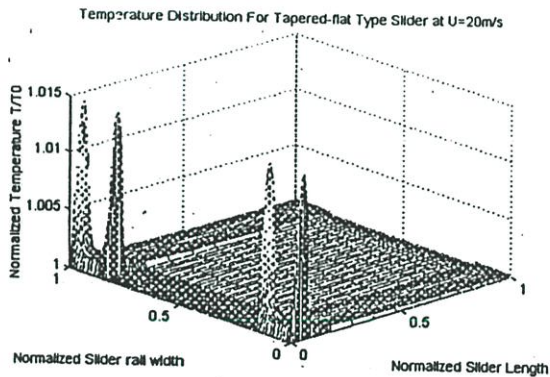


Fig. 2 Temperature profile in air bearing of tapered-flat type slider.

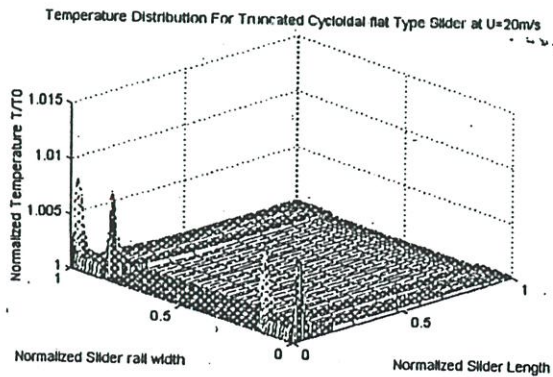


Fig. 3 Temperature profile in air bearing of truncated cycloidal-flat type slider.

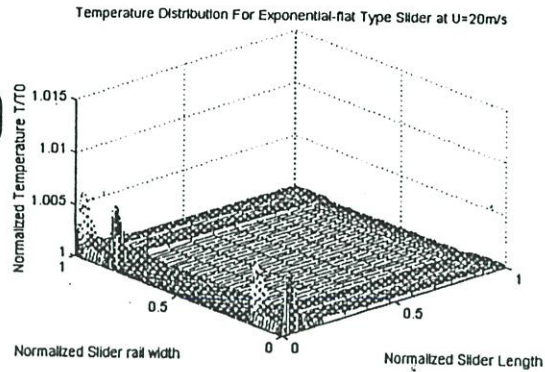


Fig. 4 Temperature profile in air bearing of exponential-flat type slider.

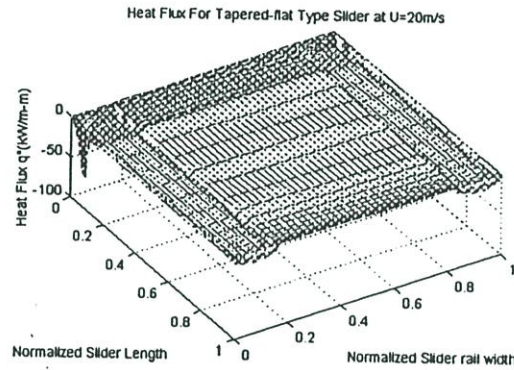


Fig. 5 Heat flux between slider and air bearing of tapered-flat type slider ($T_s - T_d = 0 K$).

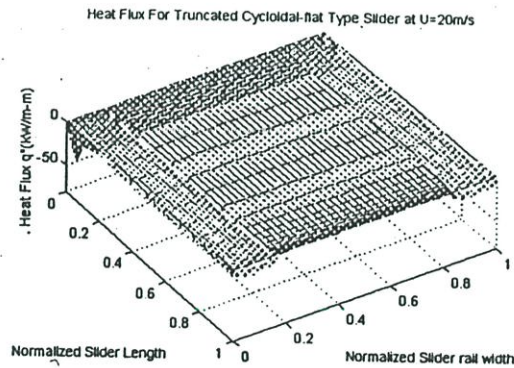


Fig. 6 Heat flux between slider and air bearing of truncated cycloidal-flat type slider ($T_s - T_d = 0 K$).

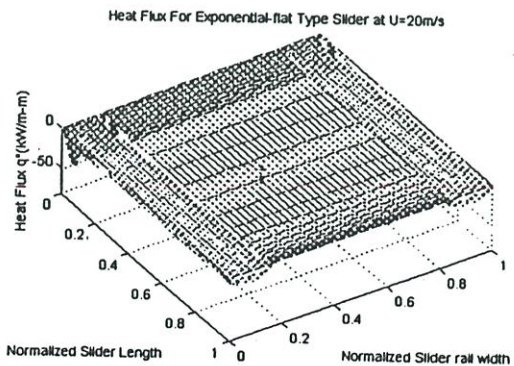


Fig. 7 Heat flux between slider and air bearing of exponential-flat type slider ($T_s - T_d = 0 K$).

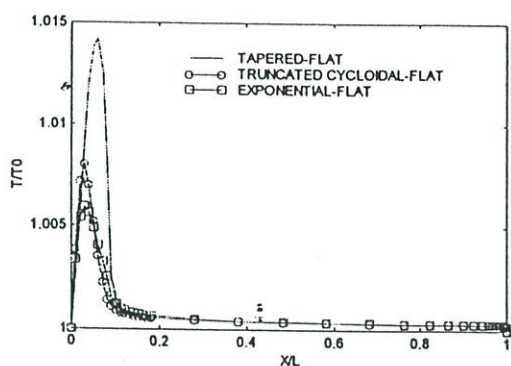


Fig. 8 Side rail width temperature vs slider-rail length.

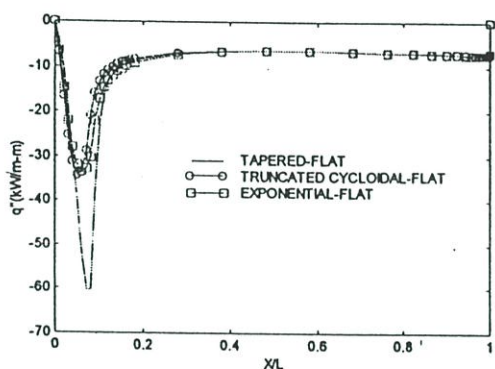


Fig. 9 Side rail width heat flux at film thickness $z=h$ vs slider-rail length.

5. CONCLUSIONS

In this study, the following conclusion can be drawn as

1. Navier Stoke equation and energy equation are solved separately to obtain temperature distribution in the air bearings. Maximum temperature occurs near leading edge along the taper length of the head sliders.
2. From Fourier's law, heat flux can be calculated and the maximum heat flux occurs near leading edge along the taper length of the head sliders.
3. When temperature difference between slider/disk is close or equal to zero, the effect of viscous dissipation make heat transfer from the air bearing to the slider.

REFERENCES

- [1] H.Tian, C.-Y.Cheung, P.-K.Wang. Non-contact induced thermal disturbance of MR head signals. IEEE Transaction on Magnetics 33 (5) (1997) 3130-3132.
- [2] S.Zhang, D.B.Bogy. A heat transfer model for thermal fluctuations in a thin slider/disk air bearing. International Journal of Heat and Mass Transfer (1999) 1790-1800.
- [3] Y.Mitsuya. Modified Reynolds equation for ultra-thin film gas lubrication using 1.5-order slip-flow model and considering surface accommodation coefficient. ASME Journal of Tribology 115 (1993) 289-294.

[4] S.Kwankaomeng. Flying characteristic simulation of the head slider and rigid disk interface in magnetic storage systems. Master thesis. KMITL. 2000, p.47.

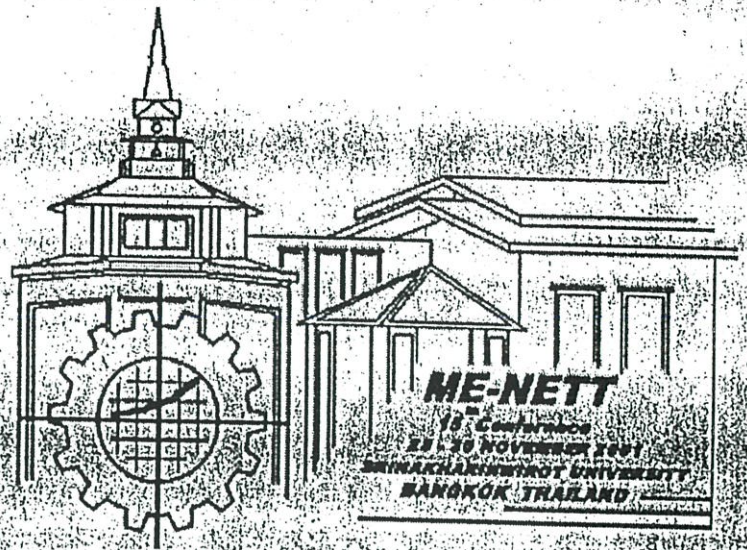
[5] C.Bagci, A.P.Singh. Hydrodynamic Lubrication of Finite Slider Bearing : Effect of One Dimension Film Shape, and Their Computer Aided Optimum Designs. ASME Journal of Tribology 105(1983) 48-66.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to express their gratitude to Prof. Dr. H. Hashimoto and Asst. Prof. Dr. Y. Hattori for useful guidance. They also wish to thank JICA for support of facilities.

NOMENCLATURE

h	air bearing space
k	thermal conductivity of the air
Kn	Knudsen number
B	width of the slider
L	length of the slider
M	Mach number
p^*	non-dimensional air bearing pressure
	$p^* = p/P_0$
Pr	Prandtl number
q	heat flux between the slider surface and the air bearing
R	gas constant
Re	Reynolds number
T_0	ambient air temperature
ΔT_0	temperature difference between the slider and disk surface
T^*	non-dimensional temperature $T^* = T/T_0$
u^*, v^*, w^*	non-dimensional velocity components
	$u^* = u/U, v^* = v/U, w^* = w/U$
x^*, y^*, z^*	non-dimensional coordinates in the air bearing
	$x^* = x/L, y^* = y/L, z^* = z/h$
α	thermal diffusivity of the air
λ	mean free path of the air
ν	dynamic viscosity of the air



บทความวิชาการ : การประชุมวิชาการ
 เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย
 ครั้งที่ 15

เล่มที่ 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
 คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Thermal model of Ultra-Thin Film Head Slider in Magnetic Storage Devices

Mongkol Mongkolwongrojn and Mesa Montiralaiporn
 Electro-Mechanical Engineering Laboratory ReCCIT Faculty of Engineering KMITL
 Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
 Tel. 3269987 ext. 103

E-mail: kmmongko@kmitl.ac.th E-mail: s2062038@kmitl.ac.th

Abstract

This paper investigates heat generation in ultra-thin film slider/disk air bearing of magnetic storage systems due to viscous dissipation, which transfers heat from the air bearing to the slider. From heat transfer model with discontinuous boundary conditions and solve it numerically. In this study, the shape of magnetic head sliders are tapered-flat, truncated, cycloidal-flat and exponential-flat are investigated. Temperature distribution and heat flux are obtained. Simulation results shows that temperature distribution and heat flux in the case of only viscous dissipation (Temperature of the slider surface equals to temperature of disk surface $T_s = T_d$) decrease with decrease in the flying height. In other words, "warming effect" decreases with decrease in the flying height.

1. Introduction

Thermal effects in slider/disk air bearing have previously investigated, Tian et al (1997)[1], Zhang and Bogy (1999)[2] reported temperature variation phenomena in the air bearing. A phenomena called thermal asperities due to flash temperature that rise when a slider contacts a disk near the MR transducer (a data reading device in magnetic head slider working on the principle of the resistance varies with the variation of surrounding magnetic field). And similar phenomena occurs when the slider flies close to the disk without contact[1]. Thus experiment results shown when the slider with MR transducer flying over an asperity which disturbs the steady flying condition. Readout signal of MR transducer varies with the flying height of the slider. They conclude that the air bearing has a cooling effect with MR transducer which is the major contribution to readout signal variation of MR transducer. Then Zhang and Bogy[2], they introduce a thermal model using discontinuous boundary conditions in a thin slider/disk air bearing and solve it numerically. They find that heat flux occurs by heat conduction mainly which transfers heat from the slider to the air bearing when the slider has higher surface temperature than the disk and viscous dissipation which transfer heat from the air bearing to the slider. Whether the air bearing acts as "coolant" or "heater" depends on which part of the heat conduction or viscous dissipation is relatively small. Generally, viscous dissipation plays a weaker role unless temperature difference between slider and disk close to zero. Simulation results shown that the conduction effect

increases with decrease in the flying height but viscous dissipation effect decreases with decrease in the flying height. In other words, cooling effect increases with decrease in the flying height.

This paper introduces theoretical investigations in heat transfer between the slider and the air bearing to study mechanism of "warming effect" of the air bearing. Solving heat transfer problem between the slider and the air bearing from Reynolds equation, Navier Stokes equation and energy equation using discontinuous boundary condition[2]. Assuming physical properties of the air are constant if temperature changes small. So we can evaluate the properties at a certain reference temperature eg. Average temperature of the two surfaces. With such an approximation, the momentum and energy equations can be solved separately. Since temperature difference between slider and disk surfaces is expected to be very small, it is reasonable to apply a constant property assumption in an air bearing. Thus we can solve the momentum and energy equations separately. In the beginning, we solve Navier Stoke equations (reduced form) and energy equation respectively by slip boundary conditions to obtain temperature distribution in the air bearing. From Fourier's law we obtain an expression for heat flux between the slider and the air bearing. A computer program was implemented to obtain temperature distribution and heat flux for several cases. In the simulation, we use three types of sliders which have differences in shape are tapered-flat type slider, truncated cycloidal-flat type slider and exponential-flat type slider.

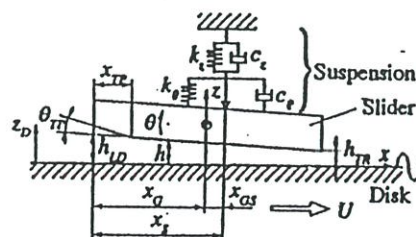


Fig. 1 Magnetic head slider.

2. Governing equations in the air bearing

In the following analysis we focus only at static condition so the time dependent terms in the governing equations are not included.

2.1. Reynolds equation

At present, high performance magnetic head/disk requires only sub-micro flying height. Fig.1 shows magnetic head slider system for this study. Reynolds equation with the effect of molecular slip can be expressed as

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ph^3 \left(1 + \frac{6a_0 Kn P_0 h_m}{ph} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ph^3 \left(1 + \frac{6a_0 Kn P_0 h_m}{ph} \right) \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 6\eta_a \frac{\partial(Uph)}{\partial x} \quad (1)$$

which h_m is reference air film thickness p is air pressure P_0 is ambient air pressure, η_a is air viscosity at ambient air pressure, a_0 is surface factor.

2.2. Navier Stokes equations

The simplification of Navier Stokes equations for bearing has been performed by many researchers[2], we only list the simplified results and do not present the detailed derivation

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2c)$$

where u, v are velocities in x and y directions. p is the pressure and μ is the viscosity of air. For simplification, we assume μ is uniform in the air bearing. The velocity component w in the z direction is approximated to be zero. Clearly, the pressure p is constant across the thickness of the air bearing.

2.3. Energy equation

Since the magnitudes $|\partial/\partial x| \approx |\partial/\partial y| \ll |\partial/\partial z|$ and the velocity of air in z direction is approximately zero in a lubrication problem. We neglect the small terms and rewrite the energy equation as

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 = 0 \quad (3)$$

Normally, the viscous dissipation term is smaller in magnitude than the conduction term in equation (3) but when temperature difference between slider and disk surface is close or equal to zero "warming effect" of viscous dissipation can not be neglected. Therefore, we interest this term in equation (3) for analysis.

2.4. Boundary condition

We assume disk velocity U does not equal zero in x direction and velocity V equals zero in y direction that is the case which slider flying at mid-radius of the disk. For temperature, considering that the disk is larger than the

air bearing much and rotating with high speed. We assume that the disk has constant speed and uniform temperature. Introducing slip condition for the velocity and jump condition for temperature at the boundaries of the air bearing [2,3]. We can write boundary conditions for velocity and temperature as

$$u(0) = U + \frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (4a)$$

$$u(h) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad (4b)$$

$$v(0) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (4c)$$

$$v(h) = -\frac{2 - \sigma_M}{\sigma_M} \lambda \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad (4d)$$

$$T(0) = T_d + 2 \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{Pr} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (4e)$$

$$T(h) = T_s + 2 \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{Pr} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad (4f)$$

Where σ_M is momentum accommodation coefficient and σ_T is thermal accommodation coefficient γ is ratio of C_p to C_v which are specific heats at constant pressure and constant volume respectively. T_s and T_d is the slider surface temperature and the disk surface temperature, respectively. For convenience, we write $a = (2 - \sigma_M)/\sigma_M$ and $b = 2(2 - \sigma_T)\gamma/(\sigma_T(\gamma + 1)Pr)$ in the following analysis.

2.5. Air film thickness expressions

2.5.1. Tapered-flat type slider

$$h = h_{TR} + (L - L_{TP}) \tan \theta + (L_{TP} - x) \tan \theta_{TP} \quad (5a)$$

$$; 0 \leq x \leq L_{TP} \quad (5b)$$

2.5.2. Truncated cycloidal-flat type slider

$$h = h_{TR} + (L - L_{TP}) \tan \theta + (L_{TP} - x) \tan \theta_{TP} - \frac{L_{TP}}{\pi} \tan \theta_{TP} \sin \left(\frac{\pi(L_{TP} - x)}{L_{TP}} \right); 0 \leq x \leq L_{TP} \quad (6a)$$

$$h = h_{TR} + (L - x) \tan \theta; \quad (6b)$$

2.5.3. Exponential-flat type slider

$$h = h_{TR} + (L - L_{TP}) \tan \theta + h_{TR} (e^{m(L_{TP} - x)} - 1) \quad (7a)$$

$$m = \frac{1}{L_{TP}} \ln \left(\frac{h_{TR} + \tan \theta_{TP} L_{TP}}{h_{TR}} \right); 0 \leq x \leq L_{TP} \quad (7b)$$

The air film thickness distributions are calculated from equations (5), (6), (7) for tapered-flat, truncated

cycloidal-flat and exponential-flat type sliders respectively as shown in Fig.2.

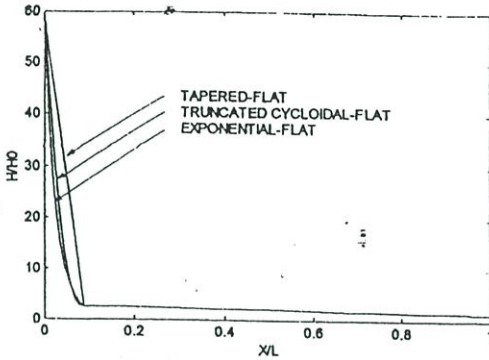


Fig. 2 Air film thickness.

3. Heat transfer between magnetic head slider and air bearing

To obtain heat transfer in the air bearing, we need to know temperature distribution by solving Navier Stoke equation and energy equation. Since the constant property approximation, Navier Stoke equation and energy equation can be solved separately.

3.1. velocity distribution

Velocity distribution can be obtained by integrating Navier Stoke equation (reduced form) (2a)-(2b) using boundary condition (4a)-(4d). With straight forward procedure, the results are as follow :

$$u = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (a\lambda h + hz - z^2) + U \left(1 - \frac{z+a\lambda}{h+2a\lambda}\right) \quad (8a)$$

$$v = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (a\lambda h + hz - z^2) \quad (8b)$$

Right terms of equation(8a), the first term is the Poiseulle flow term(see Fig. 4) and second term is Couette flow (see Fig. 3). While (8b) has only Poiseulle flow because we let the disk velocity in y direction $V=0$. From above equation found that these results have not known pressure gradient terms in x and y direction yet. To complete the results, we need to solve Reynolds equation to obtain pressure distribution. For solving this problem, numerical method needed[2,4].

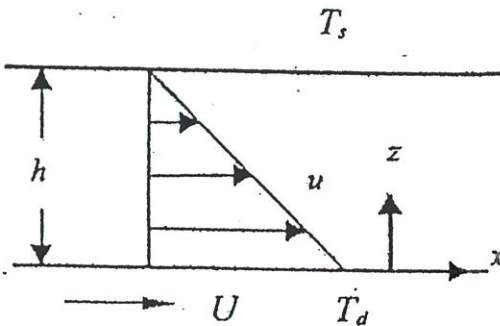


Fig. 3 Couette flow.

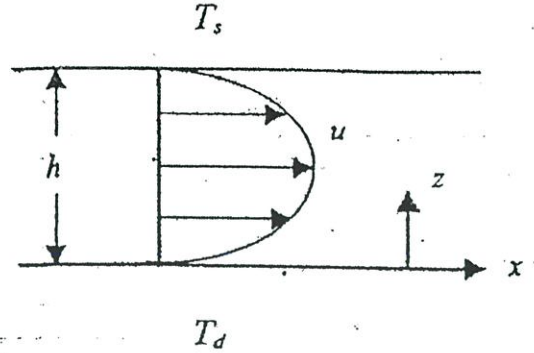


Fig. 4 Poiseulle flow.

3.2. Temperature distribution

We fill velocity result(8a) and (8b) into energy equation (3) then integrate it for temperature distribution in the air bearing.

$$T = T_d - \frac{1}{k} \left\{ \frac{1}{12\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] z^4 - \frac{1}{3} \left[\frac{h}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{U}{h+2a\lambda} \right] z^3 \right. \\ \left. + \frac{\mu}{2} \left[\left(\frac{h}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U}{h+2a\lambda} \right)^2 + \frac{h^2}{4\mu^2} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] z^2 \right\} \\ + \left[\frac{T_s - T_d}{h+2b\lambda} + \frac{1}{k} \left[\frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu U^2 h}{2(h+2a\lambda)^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{U h^3}{6(h+2a\lambda)(h+2b\lambda)} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \right] (z+b\lambda) \quad (9a)$$

we can write temperature distribution in non-dimensional form is

$$(T_0)T^* = T_d - \frac{1}{k} \left\{ \frac{1}{12\mu} \left[\frac{P_0^2}{L^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right)^2 + \frac{P_0^2}{B^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] h^4 (z^*)^4 \right. \\ \left. - \frac{1}{3} \left[\frac{h}{2\mu} \left[\frac{P_0^2}{L^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right)^2 + \frac{P_0^2}{B^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] + \frac{U}{(h+2a\lambda)} \frac{P_0}{L} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) \right] h^3 (z^*)^3 \right. \\ \left. + \frac{\mu}{2} \left[\left(\frac{h}{2\mu} \frac{P_0}{L} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) + \frac{U}{(h+2a\lambda)} \right)^2 + \frac{h^2}{4\mu^2} \frac{P_0^2}{B^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] h^2 (z^*)^2 \right\} \\ + \left[\frac{(T_s - T_d)}{(h+2b\lambda)} + \frac{1}{k} \left[\frac{1}{24\mu} h^3 \left[\frac{P_0^2}{L^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right)^2 + \frac{P_0^2}{B^2} \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right)^2 \right] + \frac{\mu U^2 h}{2(h+2a\lambda)^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{U h^3}{6(h+2a\lambda)(h+2b\lambda)} \frac{P_0}{L} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right] \right] (hz^* + b\lambda) \quad (9b)$$

Similarly, equation of temperature consists both Poiseulle flow and Couette flow and the term are combined.

3.3. Heat transfer

From Fourier's law $q = -k\partial T/\partial z$ at $z=h$ and temperature distribution (9a) we obtain heat transfer through the slider as follow

$$q = -k \frac{T_s - T_d}{h+2b\lambda} + \frac{h^3}{24\mu} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu U^2 h}{2(h+2a\lambda)^2} + \frac{U h^3}{6(h+2a\lambda)(h+2b\lambda)} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (10a)$$

Heat transfer equation(10a) can be written in non-dimensional form as

$$\frac{qh}{\mu U^2} = -\frac{T_s - T_d}{\left(\frac{\gamma-1}{2}\right) Pr M^2 T_0 \left(1 + 2b \frac{\lambda}{h}\right)} + \frac{1}{2 \left(1 + 2a \frac{\lambda}{h}\right)^2} + \frac{1}{24} Re^2 \left(\frac{h}{L}\right)^2 \left(\frac{P_0}{\rho U^2}\right)^2 \left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*}\right)^2 + \frac{1}{24} Re^2 \left(\frac{h}{B}\right)^2 \left(\frac{P_0}{\rho U^2}\right)^2 \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*}\right)^2 - \frac{1}{6} Re \frac{h}{L} \frac{P_0}{\rho U^2} \frac{1}{\left(1 + 2b \frac{\lambda}{h}\right) \left(1 + 2a \frac{\lambda}{h}\right)} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \tag{10b}$$

4. Simulation results

We simulate in case of the disk running with linear velocity 20 m/s. Using the program to obtain pressure, temperature and heat flux of the three types of the sliders. As shown in Fig.5, Fig.6, Fig.7, Fig.8, Fig.9, Fig.10, Fig.11, Fig.12, Fig.13, Fig.14, Fig.15, Fig.16, Fig.17 and Fig.18.

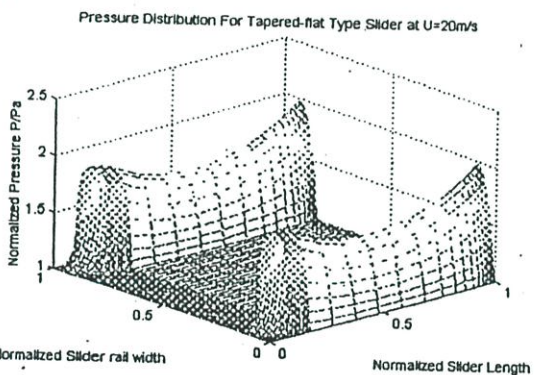


Fig. 5 Pressure profile in air bearing of tapered-flat type slider.

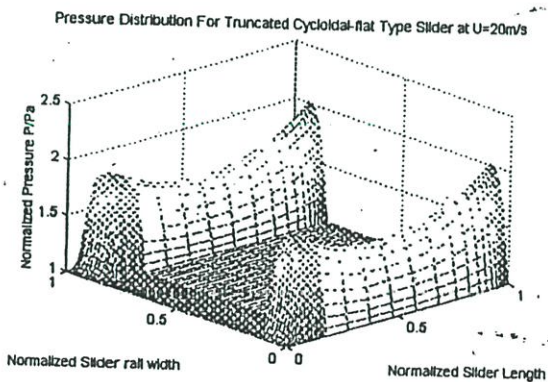


Fig. 6 Pressure profile in air bearing of truncated cycloidal-flat type slider.

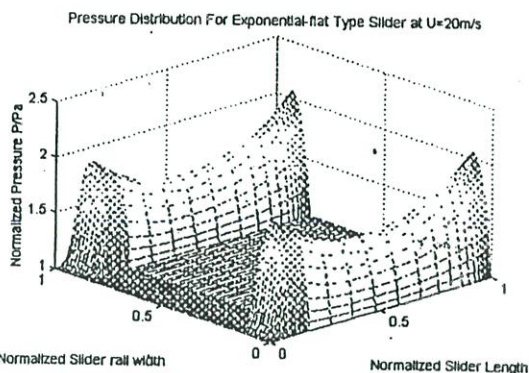


Fig. 7 Pressure profile in air bearing of exponential-flat type slider.

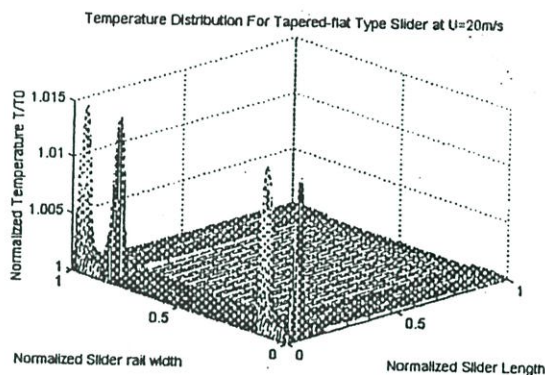


Fig. 8 Temperature profile in air bearing of tapered-flat type slider.

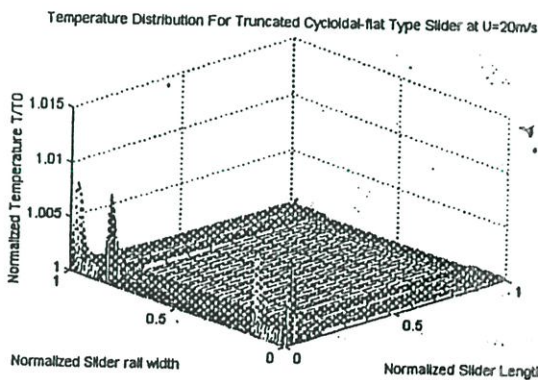


Fig. 9 Temperature profile in air bearing of truncated cycloidal-flat type slider.

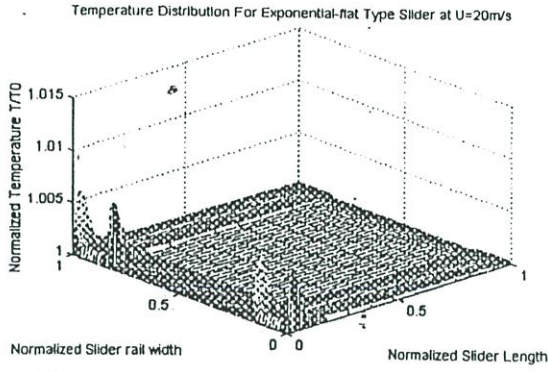


Fig. 10 Temperature profile in air bearing of exponential-flat type slider.

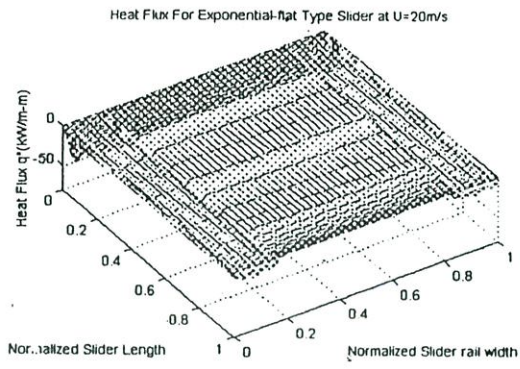


Fig. 13 Heat flux between slider and air bearing of exponential-flat type slider ($T_s - T_d = 0 K$).

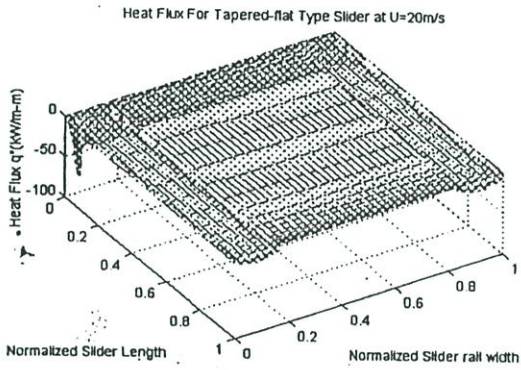


Fig. 11 Heat flux between slider and air bearing of tapered-flat type slider ($T_s - T_d = 0 K$).

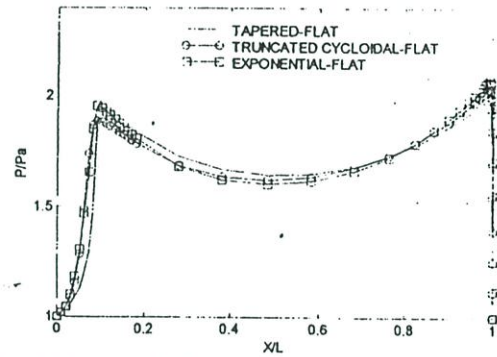


Fig. 14 Mid rail width pressure vs slider-rail length.

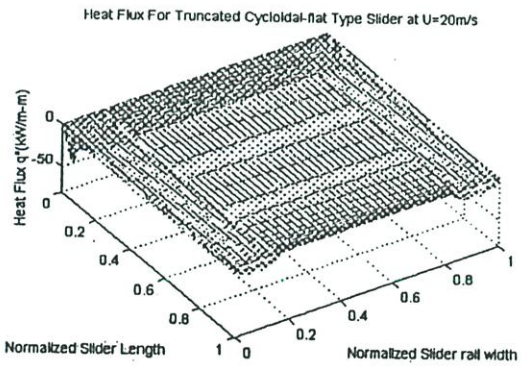


Fig. 12 Heat flux between slider and air bearing of truncated cycloidal-flat type slider ($T_s - T_d = 0 K$).

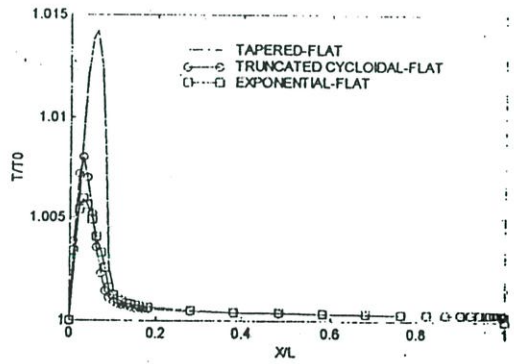


Fig. 15 Side rail width temperature vs slider-rail length.

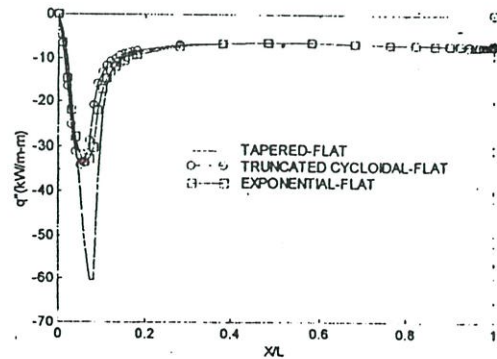


Fig. 16 Side rail width heat flux at film thickness $z=h$ vs slider-rail length.

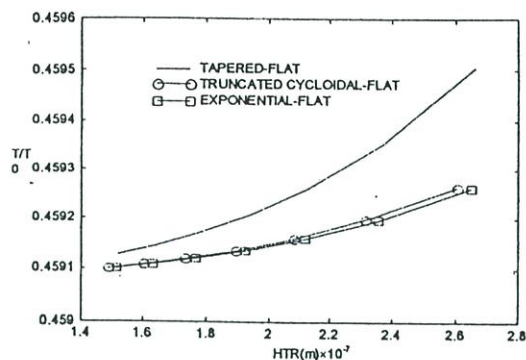


Fig. 17 Average temperature vs flying height of slider trailing edge ($T_s - T_d = 0$ K).

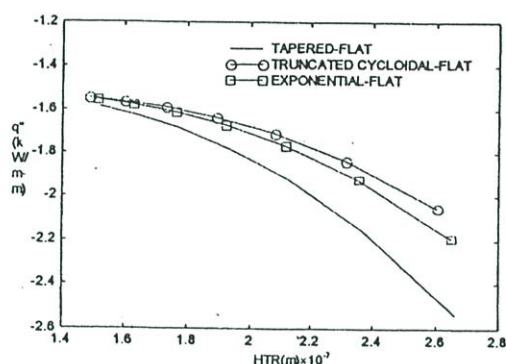


Fig. 18 Average heat flux vs flying height of slider trailing edge at ($T_s - T_d = 0$ K).

5. Conclusion

In this study, the following conclusion can be drawn as:

1. Solve Navier Stokes' equations and energy equation separately to obtain temperature distribution. Maximum temperature occurs at the taper length range of the head sliders.
2. From Fourier's law ($q = -k\partial T/\partial z$) heat flux can be calculated and maximum heat flux occurs at the taper length range of the sliders head.
3. When temperature difference between slider/disk is close or equal to zero, the effect of viscous dissipation make heat transfer from the air bearing to the slider, may be called "warming effect".
4. Heat transfer to the slider decreases with decrease in the flying height of the slider or "warming effect" decrease with decrease in the flying height.
5. Average temperature comparing among three types of the sliders from high to low value are tapered-flat type slider, truncated cycloidal-flat type slider and exponential-flat type slider respectively.
6. Average heat flux comparing among three types of the sliders from high to low value are tapered-flat type slider, exponential-flat type slider and truncated cycloidal-flat type slider respectively.

References

- [1] H. Tian, C.-Y. Cheung, P.-K. Wang. Non-contact induced thermal disturbance of MR head signals.

IEEE Transaction on Magnetics 33 (5) (1997) 3130-3132.

- [2] S.Zhang, D.B.Bogy. A heat transfer model for thermal fluctuations in a thin slider/disk air bearing. International Journal of Heat and Mass Transfer (1999) 1790-1800.
- [3] Y.Mitsuya. Modified Reynolds equation for ultra-thin film gas lubrication using 1.5-order slip-flow model and considering surface accommodation coefficient. ASME Journal of Tribology 115 (1993) 289-294.
- [4] S.Kwankaomeng. Flying characteristic simulation of the head slider and rigid disk interface in magnetic storage systems. Master dissertation. KMITL. 2000, p.47.
- [5] C.Bagci, A.P.Singh. Hydrodynamic Lubrication of Finite Slider Bearing: Effect of One Dimension Film Shape, and Their Computer Aided Optimum Designs. ASME Journal of Tribology 105(1983) 48-66.

Nomenclature

C_p	specific heat at constant pressure
C_v	specific heat at constant volume
h	air bearing space
k	thermal conductivity of the air
Kn	Knudsen number
B	width of the slider
L	length of the slider
M	Mach number
p	air bearing pressure
P_0	ambient air pressure
p^*	non-dimensional air bearing pressure $p^* = p/P_0$
Pr	Prandtl number
q	heat flux between the slider surface and the air bearing
R	gas constant
Re	Reynolds number
T	air bearing temperature
T_s	temperature of the slider surface
T_d	temperature of the disk surface
T_0	ambient air temperature
ΔT_0	temperature difference between the slider and disk surface
T^*	non-dimensional temperature $T^* = T/T_0$
u, v, w	velocity component of the air bearing
U	linear velocity of the disk at the slider location
u^*, v^*, w^*	non-dimensional velocity components
	$u^* = u/U, v^* = v/U, w^* = w/U$
x, y, z	coordinates in the air bearing
x^*, y^*, z^*	non-dimensional coordinates in the air bearing
	$x^* = x/L, y^* = y/L, z^* = z/h$
a_0	surface coefficient

Greek symbols

- α thermal diffusivity of the air
- γ ratio of the specific heats $\gamma = C_p/C_v$
- λ mean free path of the air
- μ viscosity of the air
- ν dynamic viscosity of the air
- σ_M momentum accommodation coefficient
- σ_T thermal accommodation coefficient
- η_0 viscosity at the ambient air pressure

ประวัติผู้เขียน

นายเมฆา มณชิราลัยพร เกิดวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเกษตร จากสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2539 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 1. “Heat Distribution in Ultra – Thin Film Air Bearings of Magnetic Storage Devices” Proceedings of the 2001 international symposium on communications and information technology (ISCIT 2001), พฤศจิกายน 2544 และ 2. “Thermal Model of Ultra – Thin Film Head Slider in Magnetic Storage Devices” สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15, พฤศจิกายน 2544 ประสบการณ์การทำงาน 2544 – 2545 ผู้ช่วยวิจัยใน Electro – Mechanical Engineering Laboratory โครงการ ReCCIT.