พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์ส สเตป

FLYING CHARACTERISTICS OF INVERSE-STEP MAGNETIC HEAD SLIDER

เรืองยศ อารยวงษ์กุล
RUENGYOS ARAYAVONGKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1198-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์ส สเตป

FLYING CHARACTERISTICS OF INVERSE – STEP MAGNETIC HEAD SLIDER

เรืองยศ อารยวงษ์กุล
RUENGYOS ARAYAVONGKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2547

ISBN 974-15-1198-1

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 58610
วัน,เดือน,ปี 27 ส.ค 2549

b.....
i.....

FLYING CHARACTERISTICS OF INVERSE – STEP MAGNETIC HEAD SLIDER

RUENGYOS ARAYAVONGKUL

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
2004

ISBN 974-15-1198-1

COPYRIGHT 2004
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์ส สเตป

FLYING CHARACTERISTICS OF INVERSE-STEP MAGNETIC HEAD SLIDER

ชื่อนักศึกษา ว่าที่ ร.ต.เรืองยศ อารยวงษ์กุล

รหัสประจำตัว 45061176

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ดร.ณัฐวุฒิ	เดไปวา	
ผศ.มิ่ง	โลกิจแสงทอง	
ผศ.สมยศ	จันเกษม	
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 30 กันยายน 2547 เวลา 9.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 13 **เดือน** ตุลาคม **พ.ศ.** 2547

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์ส สเตป
นักศึกษา	ว่าที่ ร.ต. เรืองยศ อารยวงษ์กุล
รหัสประจำตัว	45061176
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์สสเตป โดยการจำลองพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านด้วยสมการเรย์โนลด์ดัดแปลง และ สมการการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาให้หัวอ่านมีการเคลื่อนที่เป็นอิสระในสองทิศทาง นำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและวิธีไดเวอร์เจนต์ฟอร์มูเลชันมาใช้ทำการคำนวณในสภาวะสถิตย์ และ สภาวะพลวัต คำนวณหาค่าความสูงการลอยตัว การกระจายความดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกำหนดขนาดของหัวอ่านในสภาวะสถิตย์ คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สปริง ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งในสภาวะพลวัต

Thesis Title	Flying Characteristics of Inverse – Step Magnetic Head Slider
Student	Mr. Ruengyos Arayavongkul
Student ID.	45061176
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof.Mongkol Mongkolwongrojn

ABSTRACT

This thesis presents the flying characteristics of inverse - step magnetic head slider. Modified Reynolds equation and 2-DOF equation of motion are formulated to simulate flying characteristics. Numerical solution and divergence formulation technique were used to obtain flying height and pressure distribution with varying design parameters in static condition. The stiffness coefficient and damping coefficient were also calculated numerically with varying design variables in dynamic condition .

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ การให้คำปรึกษาเกี่ยวกับหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจนการตรวจสอบผลการคำนวณ และ แนวทางในการแก้ปัญหาจาก รศ. ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ เมษา มณฑิราลัยพร พี่ ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว พี่ วลีพรรณ กันเนื่อง ตลอดจน พี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา และ ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ โครงการสำนักวิจัยเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ได้ให้การสนับสนุนการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เรืองยศ อารยวงษ์กุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VI

สารบัญรูป..... VII

รายการคำย่อและสัญลักษณ์..... XV

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 1

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2

1.4 สมมติฐานของการศึกษา..... 3

1.5 ทฤษฎีและแนวความคิดในงานวิจัย..... 3

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3

1.7 ขั้นตอนการศึกษา..... 4

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

บทที่ 2 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า..... 5

2.1 ประวัติของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า..... 5

2.2 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์..... 6

2.3 หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า..... 8

บทที่ 3 ทฤษฎี..... 10

3.1 สมการเรย์โนลด์ดัดแปลง..... 10

3.2 สมการการเคลื่อนที่..... 12

3.3 วิธีไดเวอร์เจนต์ฟอร์มูเลชัน..... 13

3.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง..... 23

3.5 ความเสถียรของหัวอ่าน..... 24

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....26

4.1 ลักษณะการแบ่งกริด..... 26

4.2 ความหนาฟิล์มของหัวอ่าน.....27

4.3 การวิเคราะห์หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะสถิตย์.....28

4.4 การวิเคราะห์หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะพลวัต.....32

บทที่ 5 ผลการคำนวณเชิงตัวเลข..... 45

5.1 ผลการคำนวณในสภาวะสถิตย์..... 46

5.2 ผลการคำนวณในสภาวะพลวัต..... 57

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....72

6.1 สรุปผลการคำนวณในสภาวะสถิตย์.....72

6.2 สรุปผลการคำนวณในสภาวะพลวัต.....73

6.3 ข้อเสนอแนะ.....74

เอกสารอ้างอิง.....75

ภาคผนวก.....78

ภาคผนวก ก. โครงสร้างของโปรแกรมการคำนวณ.....79

ภาคผนวก ข. การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนต์.....84

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....91

ประวัติผู้เขียน.....111

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

5.1 ขนาดและค่าต่างๆของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์สสเตป.....45

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์.....7
2.2 อุปกรณ์ยึดจับหัวอ่าน.....7
2.3 ลักษณะการแบ่งพื้นที่บนดิสก์.....8
2.4 ตัวอย่างของหัวอ่านแบบต่างๆ.....9
3.1 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าบนดิสก์..... 11
3.2 การจำลองขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า.....11
3.3 ลักษณะของปริมาตรควบคุมในวิธีไดเวอร์เจนต์ฟอร์มูเลชัน.....13
3.4 แสดงการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง..... 23
4.1 ลักษณะการแบ่งกริดบนตำแหน่งต่างๆของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า..... 26
4.2 ความหนาฟิล์มของหัวอ่านในรูปไร้มิติเมื่อหัวอ่านมีความลึกร่อง 2 μm..... 27
5.1 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกร่อง..... 48
5.2 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของดิสก์..... 48
5.3 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างรางหัวอ่าน..... 49
5.4 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนลาดเอียง...49
5.5 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมของส่วนลาดเอียง.....50
5.6 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของสเตป..... 50
5.7 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความตำแหน่งจุดยึดจับ...51
5.8 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระเริ่มต้น.....51
5.9 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่าน เมื่อดิสก์มีความเร็ว 20 m/s.....53
5.10 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่าน เมื่อดิสก์มีความเร็ว 25 m/s.....53
5.11 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่าน เมื่อภาระเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 mN 54
5.12 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่าน เมื่อภาระเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 50 mN 54
5.13 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางของรางหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกร่อง..... 55

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.14 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกร่อง.....55
5.15 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางของรางหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วดิสก์.....56
5.16 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วดิสก์.....56
5.17 ค่าสัมประสิทธิสปริง K11ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์.....59
5.18 ค่าสัมประสิทธิสปริง K12ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์.....59
5.19 ค่าสัมประสิทธิสปริง K21 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์....60
5.20 ค่าสัมประสิทธิสปริง K22ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์.....60
5.21 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง C11ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์.. 61
5.22 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง C12ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์.. 61
5.23 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง C21ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์.. 62
5.24 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง C22ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์.. 62
5.25 ค่าสัมประสิทธิสปริง K11 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น.....63
5.26 ค่าสัมประสิทธิสปริง K12 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น.....63
5.27 ค่าสัมประสิทธิสปริง K21 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น.....64
5.28 ค่าสัมประสิทธิสปริง K22 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น.....64
5.29 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง C11 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น...65
5.30 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง C12 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น...65
5.31 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง C21 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น...66
5.32 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง C22 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น...66
5.33 ค่าสัมประสิทธิสปริง k11 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่..... 67
5.34 ค่าสัมประสิทธิสปริง k12 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่.....67
5.35 ค่าสัมประสิทธิสปริง k21 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่..... 68
5.36 ค่าสัมประสิทธิสปริง k22 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่..... 68
5.37 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง c11 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่.....69
5.38 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง c12 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่.....69
5.39 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง c21 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่.....70
5.40 ค่าสัมประสิทธิแดมปิ้ง c22 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่.....70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.41 ความเสถียรของหัวอ่านเปรียบเทียบกับค่าการรองลื่น.....71

5.42 ความเสถียรของหัวอ่านเปรียบเทียบกับค่าความถี่.....71

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

B ความกว้างของรางหัวอ่าน

C_Z สัมประสิทธิ์แดมปิ้งของอุปกรณ์ยึดจับในทิศการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับผิวดิสก์ $(c_Z\, h_a \omega_0 / p_a\, LW)$

C_θ สัมประสิทธิ์แดมปิ้งของอุปกรณ์ยึดจับในทิศการเคลื่อนที่หมุนรอบแกนตามขวาง $(c_0\, h_a \omega_0 / p_a\, LW)$

f_0 ภาระเริ่มต้นที่กระทำกับหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุปกรณ์ยึดจับ

F_0 ภาระเริ่มต้นที่กระทำกับหัวอ่านในรูปไร้มิติ $(f_0 / p_a\, LW)$

h ความหนาของฟิล์มอากาศ

h_a ความหนาของฟิล์มอากาศอ้างอิง (ความหนาฟิล์มต่ำสุด)

h_{GR} ความลึกร่องของหัวอ่าน

h_{LD} ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำของหัวอ่าน

h_{TR} ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายของหัวอ่าน

i_θ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตามขวางของหัวอ่าน

I_θ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตามขวางของหัวอ่านในรูปไร้มิติ $(i_\theta\, h_a \omega_0^{\,2} / p_a\, L^3 W)$

Kn เคนูดเซน นัมเบอร์ (Knudsen number)

K_Z สัมประสิทธิ์สปริงของอุปกรณ์ยึดจับในทิศการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับผิวดิสก์ $(k_Z\, h_a / p_a\, LW)$

K_θ สัมประสิทธิ์สปริงของอุปกรณ์ยึดจับในทิศการเคลื่อนที่หมุนรอบแกนตามขวาง $(k_\theta h_a / p_a\, L^3 W)$

L ความยาวของหัวอ่าน

L_{TP} ความยาวของส่วนลาดเอียง

L_{ST} ความยาวของสเตป

m มวลของหัวอ่าน

m_0 โมเมนต์เริ่มต้นของอุปกรณ์ยึดจับ

M_0 โมเมนต์เริ่มต้นของอุปกรณ์ยึดจับในรูปไร้มิติ $(m_0 / p_a\, L^2 W)$

M_Z มวลของหัวอ่านในรูปไร้มิติ ($mh_a\omega_0^2 / p_a LW$)

p ความดันของแบริ่งอากาศ

p_a ความดันอากาศโดยรอบ

P ความดันไร้มิติของแบริ่งอากาศ ($P = p/p_a$)

Q อัตราการไหลของของไหล

R อัตราส่วน L / W

s ตัวแปรในการแปลงลาปลาซ

t เวลา

T เวลาในรูปไร้มิติ ($\omega_0 t$)

U ความเร็วเชิงเส้นของดิสก์ ณ ตำแหน่งของหัวอ่าน

W ความกว้างของหัวอ่าน

X_S ตำแหน่งจุดยึดจับในรูปไร้มิติ

X_G ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลในรูปไร้มิติ

X_{GS} ระยะห่างระหว่างจุดศนย์กลางมวลและจุดยึดจับในรูปไร้มิติ

x, y, z พิกัดในแบริ่งอากาศ

X, Y, Z พิกัดไร้มิติในแบริ่งอากาศ ($X = x/L$, $Y = y/W$, $Z = z/h$)

Greek symbols

ϕ ตัวประกอบการไหล (poiseuille flow factor)

η_a ความหนืดของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

λ เส้นทางการไหลของโมเลกุลอากาศ (mean free path)

μ ความหนืดของอากาศ

θ_{TP} มุมของส่วนลาดเอียง

σ ตัวเลขการกดอัด (squeeze number)

Λ ตัวเลขการรองลื่น (bearing number)

ω ความถี่

ω_0 ความถี่เริ่มต้นของดิสก์

Ω_d ความถี่ของหัวอ่านในส่วนจำนวนจริง

Ω_v ความถี่ของหัวอ่านในส่วนจำนวนจินตภาพ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การจัดเก็บข้อมูลของคอมพิวเตอร์ทำได้โดยการบันทึกข้อมูลลงบนดิสก์ภายในอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า ฮาร์ดดิสก์ ด้วยอุปกรณ์ในการอ่าน/บันทึก ข้อมูล ซึ่งติดตั้งอยู่ที่บริเวณขอบท้ายของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่ทำการอ่านและบันทึกข้อมูลลงบนดิสก์ หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะลอยอยู่เหนือผิวดิสก์ โดยมีฟิล์มอากาศเป็นสารหล่อลื่นอยู่ระหว่างผิวของหัวอ่านและผิวของดิสก์ เนื่องจากฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันจะต้องมีความจุและประสิทธิภาพในการบันทึกข้อมูลมากขึ้นจึงต้องลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ในการ อ่าน/บันทึก ข้อมูล และ ผิวของดิสก์ลง ดังนั้นหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในปัจจุบันจะมีความสูงการลอยตัวต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวน้อย นอกจากนี้หัวอ่านจะมีขนาดที่เล็กลง, ผิวหน้าของหัวอ่านมีความทนทานต่อการสึกหรอมากขึ้น และ จะต้องไม่ทำให้ผิวดิสก์เกิดความเสียหายในขณะใช้งาน

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ellis Cha และ D.B. Bogy ในปี พ.ศ. 2538 ศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด Subambient Pressure ในสภาวะสถิตย์และพลวัต โดยใช้วิธีปริมาตรควบคุม ใช้วิธีเฉลี่ยมวลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของรางในกรณีที่รางหัวอ่านมีรูปร่างซับซ้อน ศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่าน Guppy ในสภาวะสถิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของดิสก์ และ หาผลตอบสนองทางพลวัต เมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางรูปโคซายน์

J.W. White ในปี พ.ศ. 2540 แสดงพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด TPN (Transverse and Negative Pressure Contour) หัวอ่านชนิดนี้จะมีร่องด้านล่างของหัวอ่าน และ ร่องด้านนอกของรางหัวอ่าน ร่องด้านล่างของหัวอ่านจะทำให้เกิดบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศในขณะทำงาน ส่วนร่องด้านนอกของรางหัวอ่าน จะทำให้เกิดค่าความดันต่ำกว่าบรรยากาศเมื่อหัวอ่านมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวรัศมีของดิสก์ บริเวณรางหัวอ่านจะเกิดแรงยกส่วนบริเวณร่องจะเกิดแรงดึง ทำให้หัวอ่านมีการเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวน้อย หัวอ่านชนิดนี้ใช้ภาระเริ่มต้นน้อยและลอยตัวออกจากผิวดิสก์ได้เร็ว สัมผัสกับผิวดิสก์น้อยลงในขณะเริ่มทำงาน

Yong Hu และ D.B. Bogy ในปี พ.ศ. 2540 ออกแบบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสูงการลอยตัวต่ำกว่า 25 นาโนเมตร และมีความเสถียรในสภาวะพลวัตมากขึ้น ใช้หัวอ่านชนิด Subambient Pressure ทำการจำลองการเคลื่อนที่เพื่อหาผลตอบสนองจากแรงกระตุ้นภายนอก

และการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง พิจารณาผลเนื่องจากมุมเอียงของหัวอ่านเมื่อมีการเคลื่อนที่ไปยังแต่ละแทร็ก พิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวหมุนรอบแกนตามขวางของหัวอ่าน จากผลการคำนวณพบว่าเมื่อหัวอ่านมีขนาดเล็กลงและมีค่าสัมประสิทธิ์สปริงมากทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวน้อยและเคลื่อนที่ไปยังแต่ละแทร็กได้ราบเรียบยิ่งขึ้น

Yong Hu และ D.B. Bogy ในปี พ.ศ. 2541 แก้ปัญหาหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าตัวเลขการรองลื่นสูงโดยใช้วิธีปริมาตรควบคุม จัดเทอมการพาและการแพร่จากสมการเรย์โนลด์แก้ปัญหาด้วยวิธีการคำนวณแบบหลายกริด (Multi Grid) ทำการเปรียบเทียบหัวอ่านชนิด Tripad และ Headway เปรียบเทียบผลการคำนวณกับวิธีการคำนวณแบบกริดเดียว (Single Grid) เปรียบเทียบระยะเวลาในการคำนวณหาค่าการกระจายความดันของหัวอ่านชนิด Headway เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนกริดและความเร็วของดิสก์

Q.H. Zeng และ D.B. Bogy ในปี พ.ศ. 2542 วิเคราะห์คุณสมบัติของแบริ่งอากาศในพฤติกรรมพลวัต เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สปริงและสัมประสิทธิ์แดมปิ้งของหัวอ่านที่มีลักษณะต่างกัน 5 ชนิด คือ Taper Flat , H-Shape Negative Pressure , Shaped Rail , Transverse Groved , Transverse Pressure พบว่าหัวอ่านชนิด H-Shape Negative Pressure มีค่าสัมประสิทธิ์สปริงสูงแต่มีค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งต่ำออกแบบหัวอ่านแบบใหม่จากคุณสมบัติของหัวอ่านที่ทำการศึกษาทำให้ได้หัวอ่านที่มีค่าสัมประสิทธิ์สปริงและแดมปิ้งสูง

Norio Tagawa , D.B. Bogy ในปี พ.ศ. 2545 อธิบายลักษณะฟิล์มอากาศของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดTaper Flat เมื่อผิวของหัวอ่านมีลักษณะเป็นร่องในแนวตามยาวและแนวตามขวาง ทำการคำนวณหาผลการตอบสนองในสภาวะพลวัตเพื่อหาค่าความถี่และอัตราส่วนแดมปิ้ง พบว่าหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผิวเป็นร่องตามขวางจะมีค่าแดมปิ้งเพิ่มขึ้น พื้นผิวที่เป็นร่องในแนวตามยาวจะมีค่าแดมปิ้งลดลงเล็กน้อยแต่ไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์สปริง ทำการหาค่าระยะห่าง และความลึก ของร่องในแนวตามขวางที่เหมาะสมที่สุด

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด อินเวอร์ส สเตป จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกำหนดขนาดของหัวอ่านในสภาวะสถิตย์ ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งในสภาวะพลวัต เมื่อพิจารณาในรูปของโดเมนความถี่

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

ในขณะที่หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานจะใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่นระหว่างหัวอ่านและผิวของดิสก์ ความดันที่ขอบรอบนอกของหัวอ่านจะมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากสมการเรย์โนลด์ดัดแปลง เมื่อพิจารณาผลการลื่นไถลของโมเลกุลซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

1. พื้นผิวของหัวอ่านและดิสก์เป็นผิวเรียบ
2. สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นนิวทอเนียน (Newtonian)
3. การไหลของสารหล่อลื่นมีความเป็นระเบียบ
4. อุณหภูมิผิวของหัวอ่านมีค่าคงที่
5. ไม่คิดแรงเฉื่อยของสารหล่อลื่น
6. ไม่คิดผลเนื่องจากแรงตึงผิว
7. ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นมีค่าน้อยมาก
8. ไม่คิดการลื่นไถลบริเวณขอบ

1.5 ทฤษฎีและแนวความคิดในการวิจัย

ใช้ทฤษฎีการหล่อลื่นด้วยอากาศ และการคำนวณเชิงตัวเลข ประกอบด้วยความสัมพันธ์ของความดัน , ความหนาฟิล์มอากาศ , ความเร็วของดิสก์ , ความหนืดของอากาศ และ ตำแหน่งบนหัวอ่าน เนื่องจากขณะที่หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานจะมีระยะห่างระหว่างหัวอ่านและผิวดิสก์น้อยมาก ดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลจาการลื่นไถลของโมเลกุลด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีไดเวอร์เจนต์ฟอร์มูเลชันซึ่งเป็นวิธีการคำนวณด้วยปริมาตรควบคุมมาจำลองการไหลของฟิล์มอากาศ และวิธีนิวตันราฟสันเพื่อทำให้สมการมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ใช้วิธีเพอร์เทอร์เบชันเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและสัมประสิทธิ์แดมปิ้งในสภาวะพลวัต

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์ส สเตป โดยการหาค่าความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและขอบท้ายของหัวอ่าน และ ศึกษาลักษณะการกระจายความดันของแบริ่งอากาศที่กระทำต่อหัวอ่าน ในสภาวะสถิตย์ ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและ สัมประสิทธิ์แดมปิ้งในสภาวะพลวัต โดยใช้วิธีไดเวอร์เจนต์ฟอร์มูเลชันและขั้นตอนของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า
2. ศึกษาวิธีการคำนวณด้วยปริมาตรควบคุม
3. นำวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมาใช้ในการแก้สมการ
4. เขียนแผนภาพแสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม
5. เขียนโปรแกรมตามขั้นตอนที่กำหนดไว้
6. หาขนาดของหัวอ่านอย่างคร่าวๆจากการคำนวณด้วยโปรแกรม
7. ปรับขนาดของหัวอ่านให้เหมาะสมและทำการคำนวณหาผลลัพธ์
8. วิเคราะห์ผลการคำนวณ

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์และคุณค่าของงานวิจัยคือ การศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิด อินเวอร์ส สเตป อันจะทำให้เกิดความเข้าใจในลักษณะการลอยตัวของหัวอ่านชนิดนี้ และสามารถนำไปปรับปรุงใช้กับหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบันทึกข้อมูลในคอมพิวเตอร์ต่อไป

บทที่ 2
อุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 ประวัติของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า (ฮาร์ดดิสก์)

ในปี ค.ศ. 1950 วิศวกรได้สร้างอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับใช้งานภายในกองทัพเรือสหรัฐอเมริกาขึ้นเป็นเครื่องแรก อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถเก็บข้อมูลได้ 1 ล้านบิต อุปกรณ์สามารถบันทึกข้อมูลเอาไว้ในเวลา 5,000 วินาที

ในปี ค.ศ. 1956 บริษัท IBM ประดิษฐ์ระบบบันทึกข้อมูลลงบนดิสก์ และ นำมาใช้ในคอมพิวเตอร์เป็นครั้งแรก คือ 305 RAMAC (Random Access Method of Accounting and Control) ระบบบันทึกข้อมูลชนิดนี้ สามารถบันทึกข้อมูลได้ 5 เมกกะไบต์ โดยใช้แผ่นดิสก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว จำนวน 50 แผ่น

ในปี ค.ศ. 1961 บริษัท IBM ได้พัฒนาระบบบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นดิสก์ โดยให้หัวอ่านมีการรองลื่นด้วยอากาศ

ในปี ค.ศ. 1973 บริษัท IBM สร้างอุปกรณ์บันทึกข้อมูลลงแผ่นดิสก์ที่มีการหุ้มโดยรอบและเป็นต้นแบบของฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน อุปกรณ์บันทึกข้อมูลนี้มีความจุ 30 เมกกะไบต์ และมีการใช้อุปกรณ์หมุนแผ่นดิสก์ 2 ชุด

ในปี ค.ศ. 1980 บริษัท Seagate Technology พัฒนาอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่น ST506 สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กเป็นครั้งแรก มีขนาดใหญ่เป็นสองเท่าของฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันมีความจุข้อมูล 5 เมกกะไบต์ และเริ่มมีการใช้ สเตปมอเตอร์

ในปีค.ศ. 1980 บริษัท Phillip พัฒนาฮาร์ดดิสก์ ที่ประกอบด้วย วอยซ์คอยล์แอกทูเอเตอร์ (Voice Coil Actuators) ซึ่งมีใช้กันมากในปัจจุบัน และทำการลดขนาดของฮาร์ดดิสก์ลง

ในปี ค.ศ. 1986 ใช้ดิสก์ขนาด 3.5 นิ้ว และ ใช้วอยซ์คอยล์แอกทูเอเตอร์ที่มีขนาดเล็กลง

ในปี ค.ศ. 1997 บริษัท Seagate ได้พัฒนาฮาร์ดดิสก์สำหรับคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ ดิสก์มีความเร็วรอบของการหมุน 7,200 รอบต่อนาที และ ในปีเดียวกันได้สร้างฮาร์ดดิสก์ ที่มีความเร็วรอบดิสก์ 15,000 รอบต่อนาที

ในปี ค.ศ. 2000 บริษัท IBM สร้างฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาดเล็กที่สุด มีความจุข้อมูล 1 จิกกะไบต์ ในดิสก์เพียงแผ่นเดียว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับฮาร์ดดิสก์ที่มีความจุข้อมูลเท่ากันซึ่งผลิตในปี ค.ศ. 1980 ฮาร์ดดิสก์จะต้องมีขนาดที่ใหญ่มาก คือมีน้ำหนักประมาณ 250 กิโลกรัม

2.2 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์

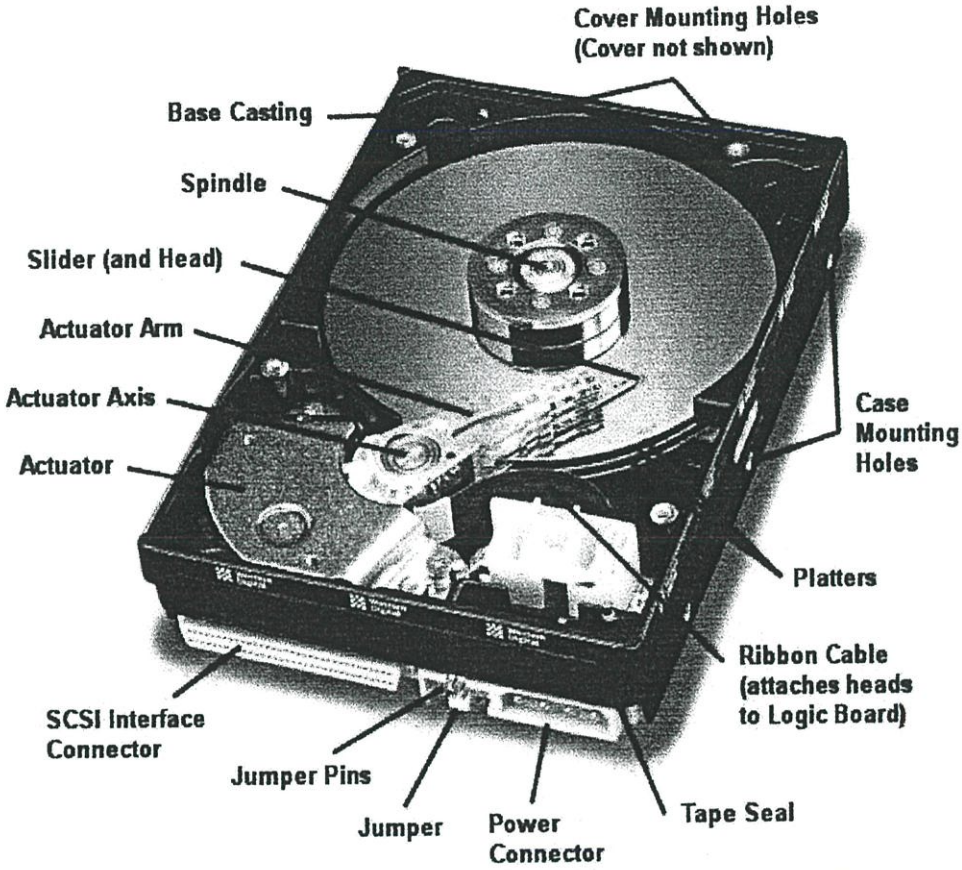
ฮาร์ดดิสก์ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ มอเตอร์ (Motor) , สปินเดิล (Spindle) , ดิสก์ (Platter) , หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า (Head) , แอกทูเอเตอร์ (Actuator) , กล่องครอบฮาร์ดดิสก์ (Frame) , กรองอากาศ (Air Filter) , อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics)

ฮาร์ดดิสก์ อาจจะมีดิสก์เพียงแผ่นเดียวหรือหลายแผ่นก็ได้ และมีหัวอ่านแมใหเล็กไฟฟ้าอยู่ที่แต่ละด้านของดิสก์ ดิสก์สมัยใหม่จะทำจากแก้วหรือเซรามิก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดผลกระทบจากความร้อนในแผ่นดิสก์ ชั้นของสารแม่เหล็กจะอยู่ที่ผิวด้านนอกของดิสก์ ดิสก์จะติดตั้งบนสปินเดิล และใช้มอเตอร์ในการหมุน ในปัจจุบันดิสก์จะหมุนด้วยความเร็วรอบ 5,400 , 7,200 หรือ 10,000 รอบต่อนาที ในขณะทำงานเมื่อดิสก์หมุนและอากาศเคลื่อนที่ผ่านด้านล่างของหัวอ่านจะทำให้หัวอ่านลอยตัวอยู่เหนือผิวดิสก์ แรงดันอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างหัวอ่านและดิสก์เรียกว่า แบริ่งอากาศ การบันทึกข้อมูลลงบนดิสก์เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์อ่าน/บันทึก ข้อมูลซึ่งอยู่บนหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า ทิศทางของกระแสและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น บริเวณช่องว่างของหัวอ่านจะมีผลต่อลักษณะทางโมเลกุลของสารแม่เหล็กบนดิสก์ในแต่ละจุดและจะยังคงสภาพที่เกิดขึ้นนี้แม้ว่าจะปิดเครื่องคอมพิวเตอร์

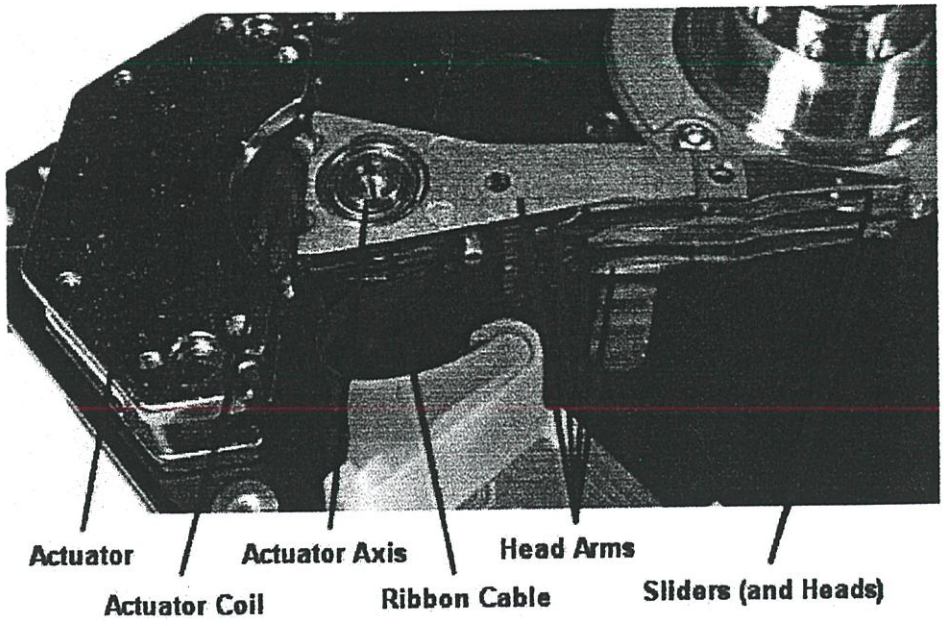
อุปกรณ์ในการยึดจับหัวอ่านมีหน้าที่ทำให้หัวอ่านเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งต่างๆบนผิวดิสก์ โดยมีแอกทูเอเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน ในปัจจุบันแอกทูเอเตอร์จะใช้ วอยซ์คอยล์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายขดลวดที่มีใช้กับลำโพง วอยซ์คอยล์ประกอบด้วยแม่เหล็กที่มีลักษณะโค้งและคอยล์ขดลวด ยึดติดกับหัวอ่านเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งกระแสไปยังขดลวด จะทำให้อุปกรณ์จับยึดหัวอ่านเคลื่อนที่ไปในทิศตรงข้ามกับการหมุนของคอยล์ ดังนั้นจึงทำให้หัวอ่านเคลื่อนที่เข้าและออกจากแนวศูนย์กลางของดิสก์ เมื่อปิดเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำให้สปริงมีแรงดึงอุปกรณ์ยึดจับไปอยู่บนตำแหน่งที่กำหนดไว้ ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า จุดพักหัวอ่าน (Landing Zone) เพื่อที่จะไม่ทำความเสียหายกับผิวของดิสก์

ดิสก์แต่ละแผ่นจะมีการแบ่งพื้นที่เป็นวงกลมตามแนวรัศมี (Track) และแบ่งพื้นที่ของดิสก์ออกเป็นส่วนที่เท่าๆกันเรียกว่า เซกเตอร์ (Sector) ในแต่ละเซกเตอร์จะเป็นพื้นที่สำหรับเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ เมื่อฮาร์ดดิสก์ผ่านขั้นตอนการผลิตมาจะมีการกำหนดโค้ดพิเศษเรียกว่า เกรย์โค้ด (Grey Code) ซึ่งจะมีจำนวน 3 บิต เกรย์โค้ดที่นิยมใช้กันมากจะมีตำแหน่งอยู่ที่มุมของเซกเตอร์แต่ละชุด และได้กำหนดค่าไว้แน่นอนไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการการเขียนข้อมูลลงบนดิสก์หรือการฟอร์แมต(Format) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะใช้สัญญาณป้อนกลับจากการอ่านเกรย์โค้ด ทำให้ทราบตำแหน่งของหัวอ่านในแนวรัศมีที่ถูกต้อง , ตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเซกเตอร์ , สามารถชดเชยตำแหน่งของหัวอ่านเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของดิสก์เนื่องจากความเค้น

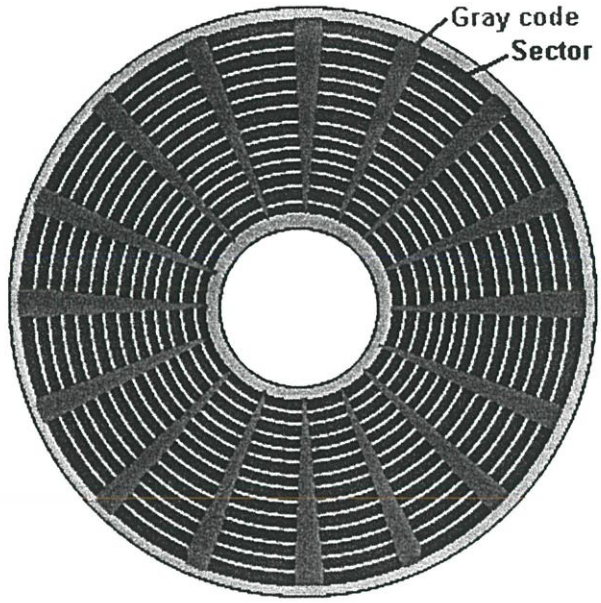
และความร้อนที่เกิดขึ้น อุปกรณ์ในการบอกตำแหน่งของหัวอ่านเรียกว่า ระบบป้อนกลับแบบปิด (Close-Loop Servo System)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ยึดจับหัวอ่าน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการแบ่งพื้นที่บนแผ่นดิสก์

2.3 หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

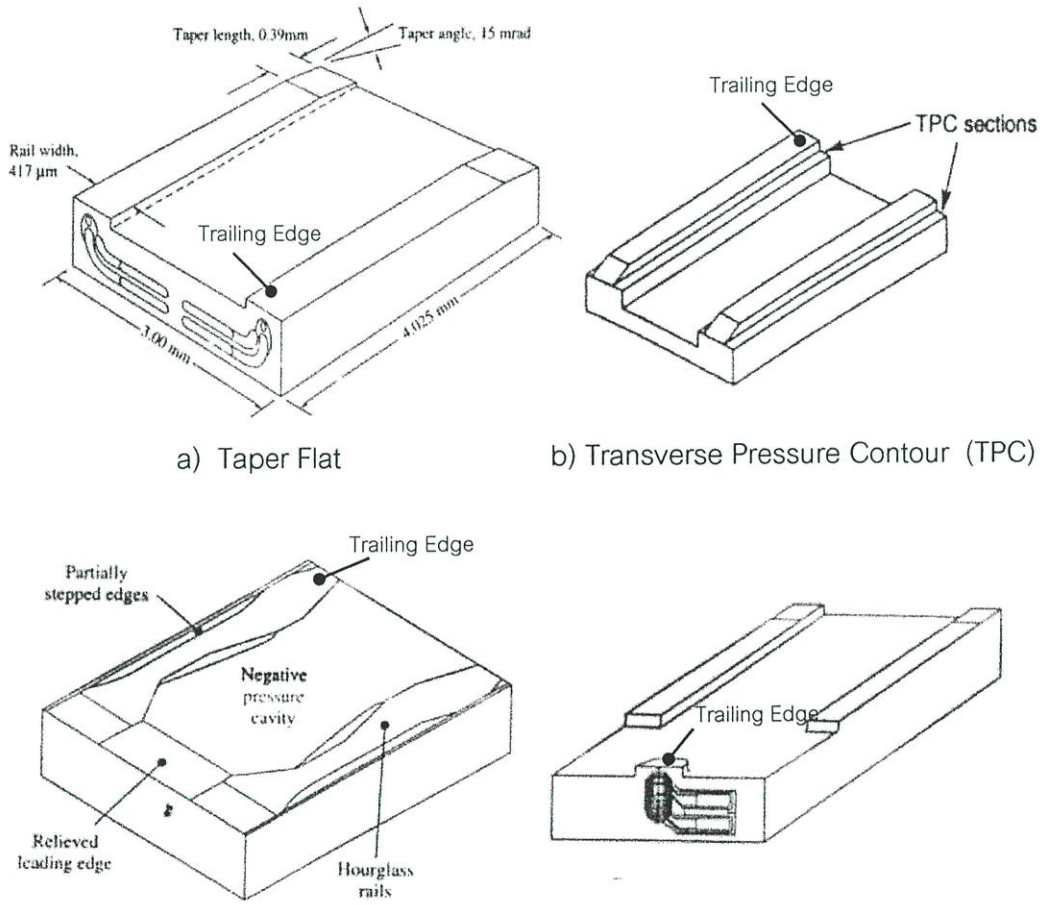
หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้ามีการพัฒนาในหลายรูปแบบเพื่อจุดมุ่งหมายต่างๆกัน เช่นการลอยตัวออกจากผิวดิสก์ได้เร็วในขณะเริ่มทำงาน , มีการเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวน้อย , มีความเสถียรในขณะทำงาน แต่จุดมุ่งหมายหลักคือการลดระยะห่างระหว่างหัวอ่านและผิวดิสก์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบันทึกข้อมูล ในที่นี้จะแสดงภาพหัวอ่านบางประเภทที่มีลักษณะต่างๆกัน ประกอบด้วย เทเปอร์แฟลต (Taper Flat Slider) , ทรานสเวอร์ส เพรสเซอร์ (Transverse Pressure Contour Slider) , หัวอ่านที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (Shape-rail Negative Pressure Slider) , หัวอ่านชนิดสามราง (Tripad Slider)

หัวอ่านเทเปอร์แฟลตพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับการรองลื่นแบบฟิล์มบางในปี ค.ศ. 1979 เริ่มมีการใช้วัสดุเซมิคอนดักเตอร์แทนการใช้คอลย์ หัวอ่านทำจากไททาเนียมไนไตรท์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ด้านหน้าของหัวอ่านจะมีลักษณะลาดเอียง รางของหัวอ่านจะมีลักษณะเป็นรางตรงเพื่อให้เกิดแรงยก

หัวอ่านทรานส์เวอร์สเพรสเซอร์ ลักษณะคล้ายหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลตแต่จะมีร่องที่ขอบด้านนอกและด้านในของหัวอ่าน ความดันที่เกิดขึ้นที่รางของหัวอ่านจะมีค่าความดันต่ำกว่าบรรยากาศในกรณีที่หัวอ่านทำมุมกับการเคลื่อนที่ของผิวดิสก์

หัวอ่านที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ มีการออกแบบพื้นผิวและรางของหัวอ่านหลายรูปแบบเพื่อทำให้เกิดค่าความดันที่มีค่าต่ำกว่าบรรยากาศทำให้หัวอ่านมีการเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวน้อยเมื่อดิสก์มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

หัวอ่านชนิดสามราง ประกอบด้วยรางด้านข้างหัวอ่านสองรางและ รางสั้นๆ (Pad) ที่ขอบท้ายของหัวอ่าน แรงยกที่เกิดขึ้นจะเกิดจากขอบด้านหน้าของรางหัวอ่าน พื้นที่บริเวณขอบท้ายของหัวอ่านมีขนาดเล็กจึงทำให้มีความสูงการลอยตัวต่ำกว่าหัวอ่านชนิดเทเปอร์แฟลต



a) Taper Flat

b) Transverse Pressure Contour (TPC)

c) Shape-rail Negative Pressure Slider

d) Tripad Slider

รูปที่ 2.4 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ

บทที่ 3
ทฤษฎี

3.1 สมการเรย์โนลด์ดัดแปลง

$$\frac{\partial}{\partial X}\left[Q\frac{\partial P}{\partial X}\right]+R^2\frac{\partial}{\partial Y}\left[Q\frac{\partial P}{\partial Y}\right]-\Lambda\frac{\partial}{\partial X}(PH)-\sigma\frac{\partial(PH)}{\partial T}=0 \qquad (3.1)$$

เมื่อจัดค่าตัวแปรที่ใช้ในสมการให้อยู่ในรูปไร้มิติจะประกอบด้วยตัวแปรต่างๆดังนี้

H คือ ค่าความหนาฟิล์ม (h / h_a)

P คือ ค่าความดัน (p / p_a)

Λ คือ ค่าตัวเลขการรองลื่น (Bearing number) ($6\eta_a UL/ p_a h^2_a$)

σ คือ ค่าตัวเลขการกดอัด (Squeeze number) ($12\eta_a\omega_0 L^2/ p_a h^2_a$)

R คือ อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของหัวอ่าน (L / W)

X คือ ความยาวของหัวอ่าน (x / L)

Y คือ ความกว้างของหัวอ่าน (y / W)

T คือ เวลาในรูปไร้มิติ ($\omega_0 t$)

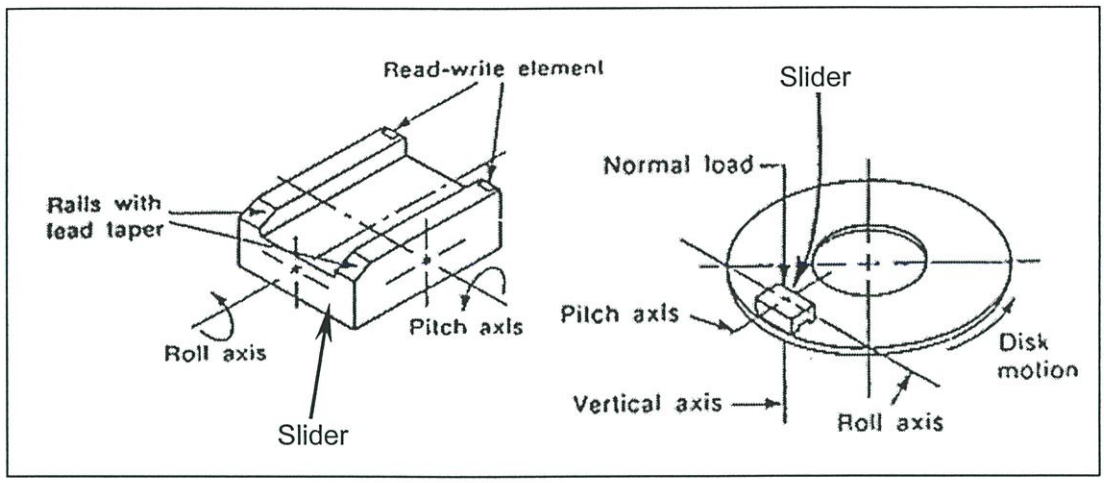
เมื่อ $Q(P,H)=\phi(P,H)PH^3$ และ $\phi(P,H)$ คือตัวประกอบการไหล (Poiseulille flow factor) ซึ่งจะมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของการไหล

1. การไหลแบบต่อเนื่องสม่ำเสมอ $\phi(P,H)=1$ (3.2)

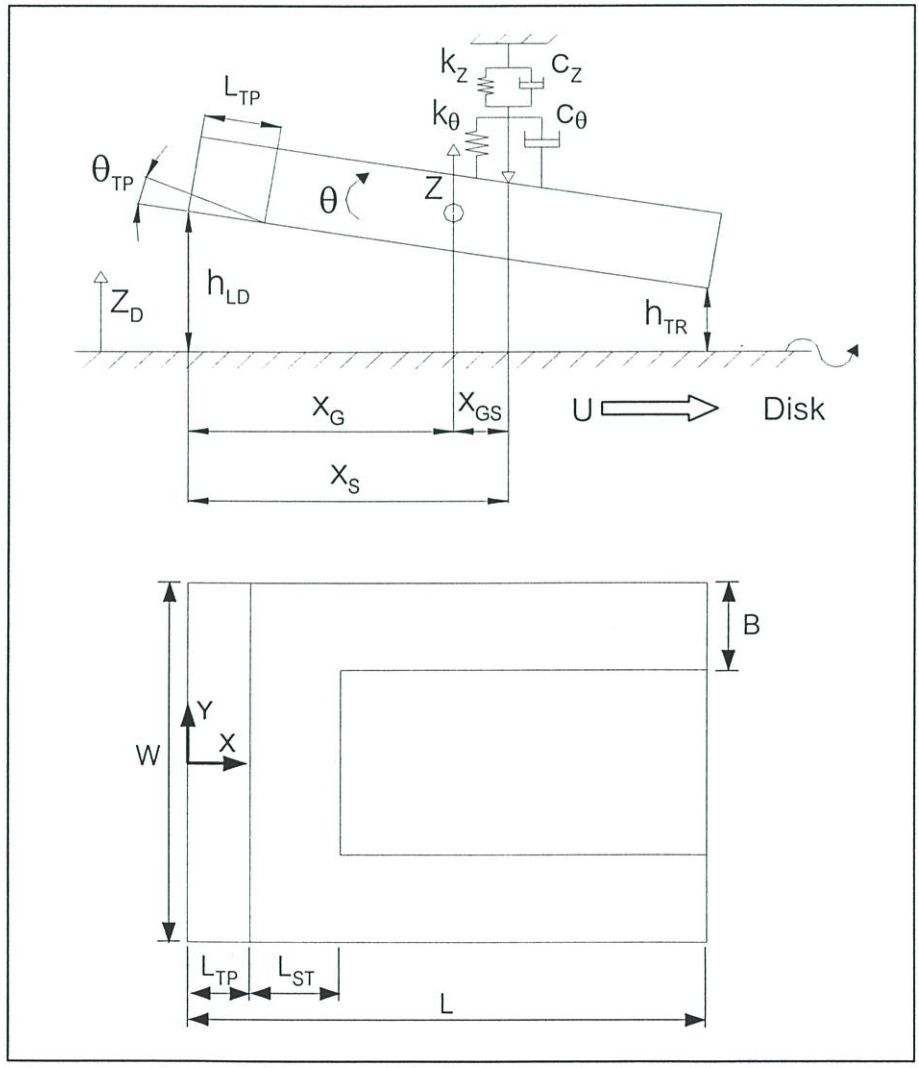
2. การลื่นไถลอันดับหนึ่ง $\phi(P,H)=a_0+a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right)$ (3.3)

3. การลื่นไถลอันดับสอง $\phi(P,H)=a_0+a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right)+a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2$ (3.4)

4. การลื่นไถลอันดับสาม $\phi(P,H)=a_0+a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right)+a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2+a_3\left(\frac{Kn}{PH}\right)^3$ (3.5)



รูปที่ 3.1 ลักษณะของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าบนดิสก์



รูปที่ 3.2 การจำลองขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2 สมการการเคลื่อนที่

เมื่อสมมุติให้หัวอ่านเคลื่อนที่เป็นอิสระในสองทิศทาง จากรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมการสมดุลย์แรงและสมการสมดุลโมเมนต์ในรูปไร้มิติได้ดังนี้

สมการสมดุลแรงในรูปไร้มิติ

$$M_Z\ddot{Z} + F_S = 2\int_0^{1/2}\int_0^1 (P-1)\,dX\,dY \tag{3.6}$$

สมการสมดุลโมเมนต์ในรูปไร้มิติ

$$I_\theta\ddot{\Theta} + M_S - F_S X_{GS} = 2\int_0^{1/2}\int_0^1 (P-1)(X_G - X)\,dX\,dY \tag{3.7}$$

เมื่อกำหนดให้

$$F_S = F_0 + K_Z(Z - X_{GS}\Theta) + C_Z(\dot{Z} - X_{GS}\dot{\Theta}) \tag{3.8}$$

$$M_S = M_0 + K_\theta\Theta + C_\theta\dot{\Theta} \tag{3.9}$$

ตัวแปรในสมการประกอบด้วยตัวแปรในรูปไร้มิติดังนี้

M_Z คือ มวลของหัวอ่าน ($mh_a\omega_0^2 / p_a LW$)

Z คือ ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นลงของหัวอ่าน (z / h_a)

F_0 คือ ภาระเริ่มต้นที่กระทำกับหัวอ่าน ($f_0 / p_a LW$)

M_0 คือ โมเมนต์เริ่มต้นของอุปกรณ์ยึดจับหัวอ่าน ($m_0 / p_a L^2 W$)

Θ คือ มุมพิตช์ในรูปไร้มิติ ($\theta L / h_a$)

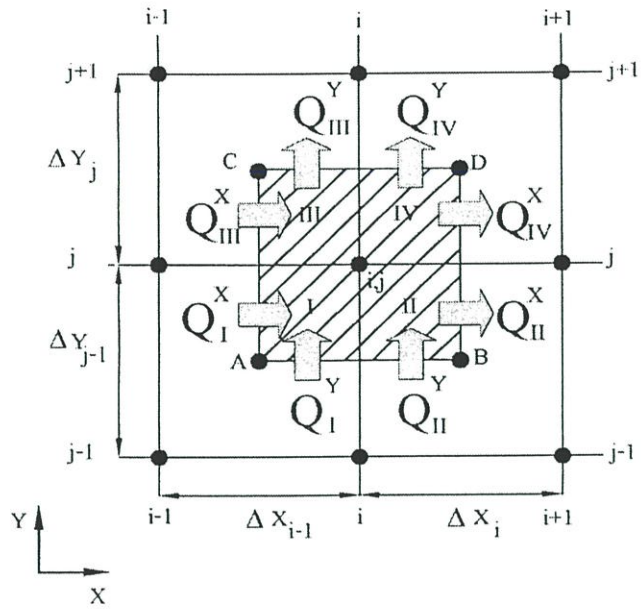
K_Z คือ ค่าสัมประสิทธิ์สปริงของอุปกรณ์ยึดจับหัวอ่านในทิศทางเคลื่อนที่ขึ้นลงตั้งฉากกับดิสก์ ($k_Z h_a / p_a LW$)

K_θ คือ ค่าสัมประสิทธิ์สปริงของอุปกรณ์ยึดจับหัวอ่านในทิศทางเคลื่อนที่หมุนรอบแกนตามขวางของหัวอ่าน ($k_\theta h_a / p_a L^3 W$)

C_Z คือ ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งของอุปกรณ์ยึดจับหัวอ่านในทิศทางเคลื่อนที่ขึ้นลงตั้งฉากกับดิสก์ ($c_Z h_a\omega_0 / p_a LW$)

C_θ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งของอุปกรณ์ยึดจับหัวอ่านในทิศทางเคลื่อนที่หมุนรอบแกนตามขวางของหัวอ่าน ($c_\theta h_a\omega_0 / p_a LW$)

3.3 วิธีไดเวอร์เจนต์ฟอร์มูเลชัน



รูปที่ 3.3 ลักษณะของปริมาตรควบคุมในวิธีไดเวอร์เจนต์ฟอร์มูเลชัน

สมการสมดุลการไหลในปริมาตรควบคุม

$$\left(Q_I^X + Q_{III}^X + Q_{II}^X + Q_{IV}^X\right) + \left(Q_I^Y + Q_{II}^Y + Q_{III}^Y + Q_{IV}^Y\right) = Q_{i,j}^V \tag{3.10}$$

เมื่อ สมการการไหลแสดงได้ดังนี้

$$Q^X = \int_{Y1}^{Y2} \left(\phi PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda(PH) \right) dY \tag{3.11}$$

$$Q^Y = \int_{X1}^{X2} \left(\phi PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) dX \tag{3.12}$$

$$Q^V = \int_{X1}^{X2} \int_{Y1}^{Y2} \left(\sigma \frac{\partial (PH)}{\partial T} \right) dX dY \tag{3.13}$$

ϕ(P,H) คือค่าตัวประกอบการไหล (Poiseulille flow factor) มีค่าต่างกันตามลักษณะของการไหล

$$\phi(P,H) = a_0 + a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right) + a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2 + a_3\left(\frac{Kn}{PH}\right)^3 \tag{3.14}$$

เมื่อพิจารณาสมดุลการไหลในสภาวะสถิตย์

$$F(P_0)=Q_{I0}^{X}+Q_{III0}^{X}-Q_{II0}^{X}-Q_{IV0}^{X}+Q_{I0}^{Y}+Q_{II0}^{Y}-Q_{III0}^{Y}-Q_{IV0}^{Y}=0 \tag{3.15}$$

สมการการไหลในสภาวะสถิตย์แสดงได้ดังนี้

$$Q_0^X = \int_{Y1}^{Y2}\left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial X} - \Lambda(P_0 H_0) \right) dY \tag{3.16}$$

$$Q_0^Y = \int_{X1}^{X2} R^2 \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_0}{\partial Y} \right) dX \tag{3.17}$$

ใช้วิธีการทำซ้ำของนิวตันราฟสันทำให้สมการเป็นเชิงเส้น

$$F\left(P_0^{(k)}\right) + \left.\frac{\partial F\left(P_0^{(k)}\right)}{\partial P_0}\right|_{P_0 = P_0^{(k)}} \delta P_0 = 0 \tag{3.18}$$

$$\delta P_0 = P_0^{(k+1)} - P_0^{(k)} \tag{3.19}$$

แทนลงในสมการที่ 3.15

$$\begin{aligned} F\left(P_0^{(k+1)}\right) = &\left(Q_{I0}^{X}\right)^{(k+1)} + \left(Q_{III0}^{X}\right)^{(k+1)} - \left(Q_{II0}^{X}\right)^{(k+1)} - \left(Q_{IV0}^{X}\right)^{(k+1)} \\ &+ \left(Q_{I0}^{Y}\right)^{(k+1)} + \left(Q_{II0}^{Y}\right)^{(k+1)} - \left(Q_{III0}^{Y}\right)^{(k+1)} - \left(Q_{IV0}^{Y}\right)^{(k+1)} = 0 \end{aligned} \tag{3.20}$$

เมื่อ $\left(Q_0^X\right)^{(k+1)}$ และ $\left(Q_0^Y\right)^{(k+1)}$ เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \left(Q_0^X\right)^{(k+1)} = \int_{Y1}^{Y2} \Bigg[&\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right) \right\}^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X} \delta P_0 \\ &+ \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial X} - \Lambda\left(P_0^{(k)} H_0 + H_0^{(k)} \delta P_0\right) \Bigg] dY \end{aligned} \tag{3.21}$$

$$\left(Q_0^Y\right)^{(k+1)} = \int_{X1}^{X2} R^2 \left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}^{(k)} \frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y} \delta P_0 \right.$$

$$\left. + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)} \frac{\partial \delta P_0}{\partial Y} \right] dX \qquad (3.22)$$

เมื่อพิจารณาที่จุด A,B,C,D ในปริมาตรควบคุมจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\left(Q_{I0}^X\right)^{(k+1)} = \left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_A + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_A^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_A \delta P_0\big|_A \right.$$

$$\left. + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A^{(k)} \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A - \Lambda\left(P_0^{(k)} H_0\big|_A + H_0^{(k)} \delta P_0\big|_A\right) \right] \frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \qquad (3.23)$$

$$\left(Q_{II0}^X\right)^{(k+1)} = \left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_B + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_B^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_B \delta P_0\big|_B \right.$$

$$\left. + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B^{(k)} \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B - \Lambda\left(P_0^{(k)} H_0\big|_B + H_0^{(k)} \delta P_0\big|_B\right) \right] \frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \qquad (3.24)$$

$$\left(Q_{III0}^X\right)^{(k+1)} = \left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_C + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_C^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_C \delta P_0\big|_C \right.$$

$$\left. + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C^{(k)} \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C - \Lambda\left(P_0^{(k)} H_0\big|_C + H_0^{(k)} \delta P_0\big|_C\right) \right] \frac{\Delta Y_j}{2} \qquad (3.25)$$

$$\left(Q_{IV0}^X\right)^{(k+1)} = \left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_D + \left\{ \frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_D^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_D \delta P_0\big|_D \right.$$

$$\left. + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D^{(k)} \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D - \Lambda\left(P_0^{(k)} H_0\big|_D + H_0^{(k)} \delta P_0\big|_D\right) \right] \frac{\Delta Y_j}{2} \qquad (3.26)$$

$$\left(Q_{I0}^{Y}\right)^{(k+1)} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_A + \left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_A^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_A \delta P_0|_A + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A^{(k)} \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_A\right] \frac{\Delta X_{i-1}}{2} \tag{3.27}$$

$$\left(Q_{II0}^{Y}\right)^{(k+1)} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_B + \left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_B^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_B \delta P_0|_B + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B^{(k)} \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_B\right] \frac{\Delta X_i}{2} \tag{3.28}$$

$$\left(Q_{III0}^{Y}\right)^{(k+1)} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_C + \left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_C^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_C \delta P_0|_C + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C^{(k)} \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_C\right] \frac{\Delta X_{i-1}}{2} \tag{3.29}$$

$$\left(Q_{IV0}^{Y}\right)^{(k+1)} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_D + \left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_D^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_D \delta P_0|_D + \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D^{(k)} \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_D\right] \frac{\Delta X_i}{2} \tag{3.30}$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อพิจารณาสมดุลการไหลในสภาวะพลวัต

$$G(P_T)=Q_{IT}^{X}+Q_{IIIT}^{X}-Q_{IIT}^{X}-Q_{IVT}^{X}+Q_{IT}^{Y}+Q_{IIT}^{Y}-Q_{IIIT}^{Y}-Q_{IVT}^{Y}-Q_{i,jT}^{V}=0 \qquad (3.31)$$

สมมติให้หัวอ่านมีการสั่นสะเทือนเล็กน้อยในทิศทางตั้งฉากกับผิวดิสก์ (Perturbation Method)

$$P=P_0+\Delta P(T) \qquad (3.32)$$

$$H=H_0+\Delta H(T) \qquad (3.33)$$

สมการการไหลในสภาวะพลวัตเป็นดังนี้

$$Q_T^X=\int_{Y1}^{Y2}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\frac{\partial \Delta P}{\partial X}+\left\{\left.\frac{\partial(\phi PH^3)}{\partial P}\right|_0\Delta P+\left.\frac{\partial(\phi PH^3)}{\partial H}\right|_0\Delta H\right\}\frac{\partial P_0}{\partial X}\right.$$

$$\left.-\Lambda(P_0\Delta H+\Delta PH_0)\right)dY \qquad (3.34)$$

$$Q_T^Y=\int_{X1}^{X2}R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\frac{\partial \Delta P}{\partial Y}+\left\{\left.\frac{\partial(\phi PH^3)}{\partial P}\right|_0\Delta P+\left.\frac{\partial(\phi PH^3)}{\partial H}\right|_0\Delta H\right\}\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right)dY \qquad (3.35)$$

$$Q_T^V=\int_{X1}^{X2}\int_{Y1}^{Y2}\sigma\frac{\partial}{\partial T}(P_0\Delta H+\Delta PH_0)dXdY \qquad (3.36)$$

การเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มและความดันของหัวอ่านเป็นดังนี้

$$\Delta H(X,T)=\Delta Z(T)-\Delta Z_D(T)+\Delta\Theta(T)(X_G-X) \qquad (3.37)$$

$$\Delta P(X,Y,T)=P_1(\Delta Z(T)-\Delta Z_D(T))+P_2(\Delta\Theta(T)) \qquad (3.38)$$

เมื่อแทนสมการที่ 3.37 และ 3.38 ลงในสมการที่ 3.34 ,3.35 และ 3.36 จะทำให้สามารถแยกสมการออกเป็นสองชุดในเทอมที่เกี่ยวข้องกับ P_1 และเทอมที่เกี่ยวข้องกับ P_2 และทำการแปลงลาปลาซจะได้ดังต่อไปนี้

58610

สมการชุดที่1

$$Q_{1T}^{X*} = \int_{Y1}^{Y2} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_1}{\partial X} + \left\{ \left. \frac{\partial \left(\phi P H^3 \right)}{\partial P} \right|_0 P_1 + \left. \frac{\partial \left(\phi P H^3 \right)}{\partial H} \right|_0 \right\} \frac{\partial P_0}{\partial X} \right.$$

$$\left. - \Lambda \left(P_0 + P_1 H_0 \right) \right) dY \tag{3.39}$$

$$Q_{1T}^{Y*} = \int_{X1}^{X2} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_1}{\partial Y} + \left\{ \left. \frac{\partial \left(\phi P H^3 \right)}{\partial P} \right|_0 P_1 + \left. \frac{\partial \left(\phi P H^3 \right)}{\partial H} \right|_0 \right\} \frac{\partial P_0}{\partial Y} \right) dX \tag{3.40}$$

$$Q_{1T}^{V*} = \int_{X1}^{X2} \int_{Y1}^{Y2} \sigma_S \left(P_0 + P_1 H_0 \right) dX dY \tag{3.41}$$

สมการชุดที่2

$$Q_{2T}^{X*} = \int_{Y1}^{Y2} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_2}{\partial X} + \left\{ \left. \frac{\partial \left(\phi P H^3 \right)}{\partial P} \right|_0 P_2 + \left. \frac{\partial \left(\phi P H^3 \right)}{\partial H} \right|_0 \left[X_G - X \right] \right\} \frac{\partial P_0}{\partial X} \right.$$

$$\left. - \Lambda \left(P_0 \left[X_G - X \right] + P_2 H_0 \right) \right) dY \tag{3.42}$$

$$Q_{2T}^{Y*} = \int_{X1}^{X2} \left(\phi_0 P_0 H_0^3 \frac{\partial P_2}{\partial Y} + \left\{ \left. \frac{\partial \left(\phi P H^3 \right)}{\partial P} \right|_0 P_2 + \left. \frac{\partial \left(\phi P H^3 \right)}{\partial H} \right|_0 \left[X_G - X \right] \right\} \frac{\partial P_0}{\partial Y} \right) dX \tag{3.43}$$

$$Q_{2T}^{V*} = \int_{X1}^{X2} \int_{Y1}^{Y2} \sigma_S \left(P_0 \left[X_G - X \right] + P_2 H_0 \right) dX dY \tag{3.44}$$

จัดรูปสมการการไหลชุดที่ 1 ตามทิศทางแกน X

$$Q_{I1T}^{X*}=\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A \left.\frac{\partial P_1}{\partial X}\right|_A+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A P_1|_A\right.$$

$$\left.+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A -\Lambda\left(P_0|_A+H_0 P_1|_A\right)\right]\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \qquad (3.45)$$

$$Q_{III1T}^{X*}=\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B \left.\frac{\partial P_1}{\partial X}\right|_B+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B P_1|_B\right.$$

$$\left.+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B -\Lambda\left(P_0|_B+H_0 P_1|_B\right)\right]\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \qquad (3.46)$$

$$Q_{III1T}^{X*}=\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C \left.\frac{\partial P_1}{\partial X}\right|_C+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C P_1|_C\right.$$

$$\left.+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C -\Lambda\left(P_0|_C+H_0 P_1|_C\right)\right]\frac{\Delta Y_j}{2} \qquad (3.47)$$

$$Q_{IV1T}^{X*}=\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D \left.\frac{\partial P_1}{\partial X}\right|_D+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D P_1|_D\right.$$

$$\left.+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D -\Lambda\left(P_0|_D+H_0 P_1|_D\right)\right]\frac{\Delta Y_j}{2} \qquad (3.48)$$

จัดรูปสมการการไหลชุดที่ 1 ตามทิศทางแกน Y

$$Q_{I1T}^{Y*} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A \left.\frac{\partial P_1}{\partial Y}\right|_A + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A P_1|_A + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_A\right]\frac{\Delta X_{i-1}}{2} \tag{3.49}$$

$$Q_{III1T}^{Y*} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B \left.\frac{\partial P_1}{\partial Y}\right|_B + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B P_1|_B + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_B\right]\frac{\Delta X_i}{2} \tag{3.50}$$

$$Q_{III1T}^{Y*} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C \left.\frac{\partial P_1}{\partial Y}\right|_C + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C P_1|_C + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_C\right]\frac{\Delta X_{i-1}}{2} \tag{3.51}$$

$$Q_{IV1T}^{Y*} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D \left.\frac{\partial P_1}{\partial Y}\right|_D + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D P_1|_D + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_D\right]\frac{\Delta X_i}{2} \tag{3.52}$$

เทอมการกดอัดของสมการชุดที่ 1

$$Q_{I1T}^{V*} = \sigma S\left[P_0|_A + H_0 P_1|_A\right]\frac{\Delta X_{i-1}}{2}\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \tag{3.53}$$

$$Q_{III1T}^{V*} = \sigma S\left[P_0|_B + H_0 P_1|_B\right]\frac{\Delta X_i}{2}\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \tag{3.54}$$

$$Q_{III1T}^{V*} = \sigma S\left[P_0|_C + H_0 P_1|_C\right]\frac{\Delta X_{i-1}}{2}\frac{\Delta Y_j}{2} \tag{3.55}$$

$$Q_{IV1T}^{V*} = \sigma S\left[P_0|_D + H_0 P_1|_D\right]\frac{\Delta X_i}{2}\frac{\Delta Y_j}{2} \tag{3.56}$$

จัดรูปสมการการไหลชุดที่ 2 ตามทิศทางแกน X

$$Q_{I2T}^{X*}=\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A \left.\frac{\partial P_2}{\partial X}\right|_A+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A P_2|_A\right.$$

$$\left.+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_A \left[X_G-X\right]_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A -\Lambda\left(P_0|_A\left[X_G-X\right]_A+H_0 P_2|_A\right)\right]\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \qquad (3.57)$$

$$Q_{II2T}^{X*}=\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B \left.\frac{\partial P_2}{\partial X}\right|_B+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B P_2|_B$$

$$\left.+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_B \left[X_G-X\right]_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B -\Lambda\left(P_0|_B\left[X_G-X\right]_B+H_0 P_2|_B\right)\right]\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \qquad (3.58)$$

$$Q_{III2T}^{X*}=\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C \left.\frac{\partial P_2}{\partial X}\right|_C+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C P_2|_C$$

$$\left.+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_C \left[X_G-X\right]_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C -\Lambda\left(P_0|_C\left[X_G-X\right]_C+H_0 P_2|_C\right)\right]\frac{\Delta Y_j}{2} \qquad (3.59)$$

$$Q_{IV2T}^{X*}=\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D \left.\frac{\partial P_2}{\partial X}\right|_D+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D P_2|_D$$

$$\left.+\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_D \left[X_G-X\right]_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D -\Lambda\left(P_0|_D\left[X_G-X\right]_D+H_0 P_2|_D\right)\right]\frac{\Delta Y_j}{2} \qquad (3.60)$$

จัดรูปสมการการไหลชุดที่ 2 ตามทิศทางแกน Y

$$Q_{I2T}^{Y*} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A \left.\frac{\partial P_2}{\partial Y}\right|_A + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_A P_2|_A + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_A \left[X_G - X\right]_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_A \left]\frac{\Delta X_{i-1}}{2}\right.\right. \tag{3.61}$$

$$Q_{II2T}^{Y*} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B \left.\frac{\partial P_2}{\partial Y}\right|_B + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_B P_2|_B + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_B \left[X_G - X\right]_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_B \left]\frac{\Delta X_i}{2}\right.\right. \tag{3.62}$$

$$Q_{III2T}^{Y*} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C \left.\frac{\partial P_2}{\partial Y}\right|_C + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_C P_2|_C + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_C \left[X_G - X\right]_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_C \left]\frac{\Delta X_{i-1}}{2}\right.\right. \tag{3.63}$$

$$Q_{IV2T}^{Y*} = R^2\left[\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D \left.\frac{\partial P_2}{\partial Y}\right|_D + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_D P_2|_D + \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_D \left[X_G - X\right]_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_D \left]\frac{\Delta X_i}{2}\right.\right. \tag{3.64}$$

เทอมการกดอัดของสมการชุดที่ 2

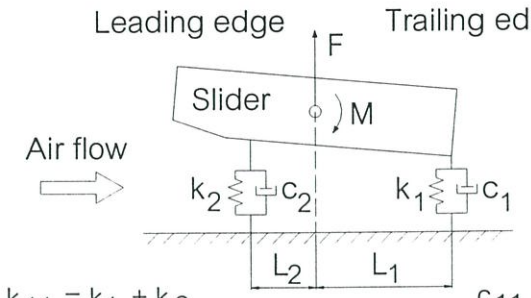
$$Q_{I2T}^{V*} = \sigma S\left[P_0|_A \left[X_G - X\right]_A + H_0 P_2|_A\right]\frac{\Delta X_{i-1}}{2}\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \tag{3.65}$$

$$Q_{II2T}^{V*} = \sigma S\left[P_0|_B \left[X_G - X\right]_B + H_0 P_2|_B\right]\frac{\Delta X_i}{2}\frac{\Delta Y_{j-1}}{2} \tag{3.66}$$

$$Q_{III2T}^{V*} = \sigma S\left[P_0|_C \left[X_G - X\right]_C + H_0 P_2|_C\right]\frac{\Delta X_{i-1}}{2}\frac{\Delta Y_j}{2} \tag{3.67}$$

$$Q_{IV2T}^{V*} = \sigma S\left[P_0|_D \left[X_G - X\right]_D + H_0 P_2|_D\right]\frac{\Delta X_i}{2}\frac{\Delta Y_j}{2} \tag{3.68}$$

3.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง



$$k_{11} = k_1 + k_2 \qquad c_{11} = c_1 + c_2$$

$$k_{12} = k_1 L_1 - k_2 L_2 \qquad c_{12} = c_1 L_1 - c_2 L_2$$

$$k_{22} = k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2 \qquad c_{22} = c_1 L_1^2 + c_2 L_2^2$$

รูปที่ 3.4 แสดงการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สปริงและสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง

จากความสัมพันธ์ของแรงและโมเมนต์สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงในเทอมของจำนวนจริงและสัมประสิทธิ์ของแดมปิ้งในเทอมของจำนวนจินตภาพได้ดังนี้

$$K_{11} = -2\int_0^{1/2}\int_0^1 \mathrm{Re}\left(\Delta P_1\right)dXdY \tag{3.69}$$

$$K_{12} = -2\int_0^{1/2}\int_0^1 \mathrm{Re}\left(\Delta P_2\right)dXdY \tag{3.70}$$

$$K_{21} = -2\int_0^{1/2}\int_0^1 \mathrm{Re}\left(\Delta P_1\right)\left(X_G - X\right)dXdY \tag{3.71}$$

$$K_{22} = -2\int_0^{1/2}\int_0^1 \mathrm{Re}\left(\Delta P_2\right)\left(X_G - X\right)dXdY \tag{3.72}$$

$$C_{11} = -\frac{2\omega_0}{\omega}\int_0^{1/2}\int_0^1 \mathrm{Img}\left(\Delta P_1\right)dXdY \tag{3.73}$$

$$C_{12} = -\frac{2\omega_0}{\omega}\int_0^{1/2}\int_0^1 \mathrm{Img}\left(\Delta P_2\right)dXdY \tag{3.74}$$

$$C_{21} = -\frac{2\omega_0}{\omega}\int_0^{1/2}\int_0^1 \mathrm{Img}\left(\Delta P_1\right)\left(X_G - X\right)dXdY \tag{3.75}$$

$$C_{22} = -\frac{2\omega_0}{\omega}\int_0^{1/2}\int_0^1 \mathrm{Img}\left(\Delta P_2\right)\left(X_G - X\right)dXdY \tag{3.76}$$

3.5 ความเสถียรของหัวอ่าน

$$\begin{bmatrix} M_Z & 0 \\ 0 & I_\theta \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\ddot{Z} \\ \Delta\ddot{\theta} \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta\dot{Z} \\ \Delta\dot{\theta} \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta Z \\ \Delta\theta \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (3.77)$$

สมมติให้ $\begin{Bmatrix} \Delta Z \\ \Delta\theta \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} Z_0 \\ \theta_0 \end{Bmatrix}e^{\Omega t}$

$$\begin{bmatrix} K_{11}+\Omega C_{11}+M_Z\Omega^2 & K_{12}+\Omega C_{12} \\ K_{21}+\Omega C_{21} & K_{22}+\Omega C_{22}+I_\theta\Omega^2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta Z \\ \Delta\theta \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (3.78)$$

$$\left(\left(K_{11}+\Omega C_{11}+M_Z\Omega^2\right)\left(K_{22}+\Omega C_{22}+I_\theta\Omega^2\right)\right)$$
$$-\left(\left(K_{21}+\Omega C_{21}\right)\left(K_{12}+\Omega C_{12}\right)\right)=0 \qquad (3.79)$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\left(M_Z I_\theta\right)\Omega^4+\left(C_{11}I_\theta+M_Z C_{22}\right)\Omega^3+\left(K_{11}I_\theta+C_{11}C_{12}+M_Z K_{22}-C_{21}C_{12}\right)\Omega^2$$
$$+\left(K_{11}C_{22}+C_{11}K_{22}-K_{21}C_{12}-C_{21}K_{12}\right)\Omega+\left(K_{11}K_{22}-K_{21}K_{12}\right)=0 \qquad (3.80)$$

กำหนดให้

$$a=\left(M_Z I_\theta\right),\ b=\left(C_{11}I_\theta+M_Z C_{22}\right),\ c=\left(K_{11}I_\theta+C_{11}C_{22}+M_Z K_{22}-C_{21}C_{12}\right)$$

$$d=\left(K_{11}C_{22}+C_{11}K_{22}-K_{21}C_{12}-C_{21}K_{12}\right),\ e=\left(K_{11}K_{22}-K_{21}K_{12}\right)$$

สมการที่ได้จะอยู่ในรูปแบบโพลิโนเมียล

$$a\Omega^4+b\Omega^3+c\Omega^2+d\Omega+e=0 \qquad (3.81)$$

สมมติให้ $\Omega=-\Omega_d+i\Omega_v$ นำไปแทนค่าในสมการที่ 3.81 จะได้ดังนี้

$$a\left(-\Omega_d + i\,\Omega_v\right)^4 + b\left(-\Omega_d + i\,\Omega_v\right)^3 + c\left(-\Omega_d + i\,\Omega_v\right)^2 + d\left(-\Omega_d + i\,\Omega_v\right) + e = 0 \qquad (3.82)$$

พิจารณาเทอมจำนวนจริง

$$a\Omega_v^4 + \left(-6a\Omega_d^2 + 3b\Omega_d - c\right)\Omega_v^2 = -a\Omega_d^4 + b\Omega_d^3 - c\Omega_d^2 + d\Omega_d - e \qquad (3.83)$$

หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่เสถียร $\left(\Omega_d \le 0\right)$

เมื่อ $\left(\Omega_v^2 \ge \dfrac{c + \sqrt{c^2 - 4ae}}{2a}\right)$ หรือ $\left(\Omega_v^2 \le \dfrac{c - \sqrt{c^2 - 4ae}}{2a}\right)$

พิจารณาเทอมจำนวนจินตภาพ

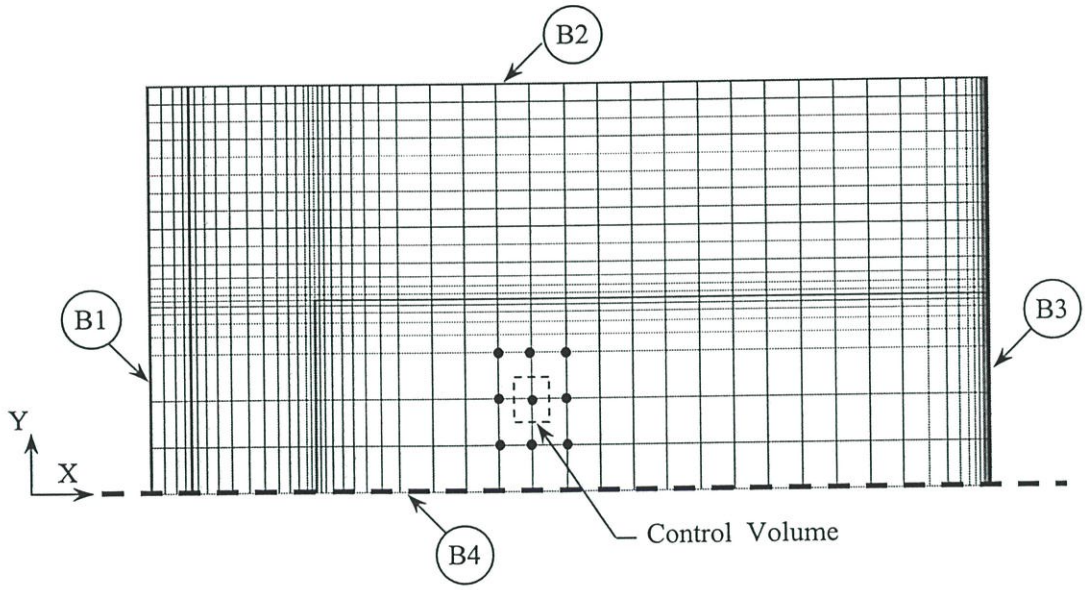
$$b\Omega_v^2 - 4a\Omega_d\Omega_v^2 = a\left(-4\Omega_d^3\right) + b\left(3\Omega_d^2\right) + c\left(-2\Omega_d\right) + d \qquad (3.84)$$

หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่เสถียร $\left(\Omega_d \le 0\right)$ เมื่อ $\left(\Omega_v^2 \ge \dfrac{d}{b}\right)$

บทที่ 4
การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

4.1 ลักษณะการแบ่งกริด

เนื่องจากหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์มีความสมมาตรตามแนวแกน X ในการคำนวณจึงทำการพิจารณาหัวอ่านเพียงครึ่งหนึ่ง เมื่อทำการแบ่งกริดในขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขจะใช้กริดขนาดเล็กในบริเวณรอยต่อที่เกิดความไม่ต่อเนื่องสูง กำหนดให้แกน X อยู่บนแนวกึ่งกลางของหัวอ่าน และ แกน Y อยู่บนขอบนำของหัวอ่านจะได้ดังรูป



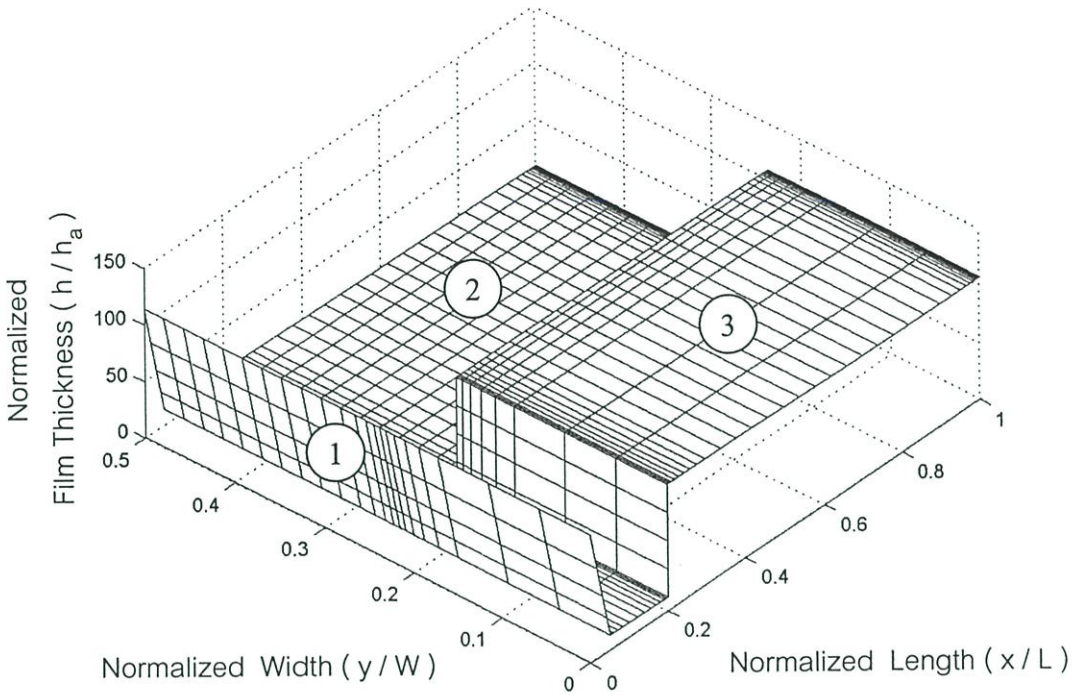
รูปที่ 4.1 ลักษณะการแบ่งกริดบนตำแหน่งต่างๆของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

กำหนดเงื่อนไขที่ขอบของหัวอ่านดังต่อไปนี้

บริเวณขอบที่1 (B1) , บริเวณขอบที่2 (B2) และ บริเวณขอบที่3 (B3) มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ($p = p_a$)

บริเวณขอบที่4 (B4) ไม่มีการไหลในทิศทางตามแนวแกน Y ผ่านขอบที่ 4 เนื่องจากความสมมาตร ($Q_I^Y = Q_{II}^Y = 0$)

4.2 ความหนาฟิล์มของหัวอ่าน



รูปที่ 4.2 ความหนาฟิล์มของหัวอ่านในรูปไร้มิติเมื่อหัวอ่านมีความลึกของร่อง 2 μm

สมการกำหนดค่าความหนาฟิล์มอากาศที่อยู่ระหว่างผิวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าและผิวของดิสก์แสดงดังต่อไปนี้

บริเวณส่วนลาดเอียง (1) $$h = h_{TR} + (L - x)\tan\theta + (L_{TP} - x)\tan\theta_{TP} \quad (4.1)$$

บริเวณรางหัวอ่าน (2) $$h = h_{TR} + (L - x)\tan\theta \quad (4.2)$$

บริเวณร่องของหัวอ่าน (3) $$h = h_{TR} + (L - x)\tan\theta + h_{GR}/\cos\theta \quad (4.3)$$

เมื่อกำหนดให้

θ คือ มุมพิตช์ของหัวอ่าน

θ_{TP} คือ มุมของส่วนลาดเอียง

h_{GR} คือ ความลึกของร่อง

h_{TR} คือ ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้าย

L คือ ความยาวของหัวอ่าน

x คือ ระยะของกริดตามแนวแกน x

4.3 การวิเคราะห์หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะสถิตย์

$$A_0\delta P_{i,j} + A_1\delta P_{i-1,j} + A_2\delta P_{i+1,j} + A_3\delta P_{i,j-1} + A_4\delta P_{i,j+1}$$
$$+ A_5\delta P_{i-1,j-1} + A_6\delta P_{i+1,j-1} + A_7\delta P_{i-1,j+1} + A_8\delta P_{i+1,j+1} + A_9 = 0 \qquad (4.4)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\left.\begin{aligned}
A_0 = {} & \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(A_{X2} + \frac{2A_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - A_{X5}\right) + \frac{\Delta Y_j}{8}\left(C_{X2} + \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5}\right) \\
& - \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(B_{X2} - \frac{2B_{X3}}{\Delta X_i} - B_{X5}\right) - \frac{\Delta Y_j}{8}\left(D_{X2} - \frac{2D_{X3}}{\Delta X_i} - D_{X5}\right) \cdot \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(A_{Y2} + \frac{2A_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}}\right) + \frac{\Delta X_i}{8}\left(B_{Y2} + \frac{2B_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}}\right) \\
& - \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(C_{Y2} - \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_j}\right) - \frac{\Delta X_i}{8}\left(D_{Y2} - \frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_j}\right) \\
A_1 = {} & \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(A_{X2} - \frac{2A_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - A_{X5}\right) + \frac{\Delta Y_j}{8}\left(C_{X2} - \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(A_{Y2} + \frac{2A_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}}\right) \\
& - \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(C_{Y2} - \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_j}\right) \\
A_2 = {} & -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(B_{X2} + \frac{2B_{X3}}{\Delta X_i} - B_{X5}\right) - \frac{\Delta Y_j}{8}\left(D_{X2} + \frac{2D_{X3}}{\Delta X_i} - D_{X5}\right) \\
& + \frac{\Delta X_i}{8}\left(B_{Y2} + \frac{2B_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}}\right) \\
& - \frac{\Delta X_i}{8}\left(D_{Y2} - \frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_j}\right)
\end{aligned}\right\} \qquad (4.5)$$

$$
\begin{aligned}
A_3 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(A_{X2} + \frac{2A_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - A_{X5}\right) \\
&\quad -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(B_{X2} - \frac{2B_{X3}}{\Delta X_i} - B_{X5}\right) \\
&\quad +\frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(A_{Y2} - \frac{2A_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}}\right) \qquad +\frac{\Delta X_i}{8}\left(B_{Y2} - \frac{2B_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}}\right) \\
A_4 &= \frac{\Delta Y_j}{8}\left(C_{X2} + \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5}\right) \\
&\quad -\frac{\Delta Y_j}{8}\left(D_{X2} - \frac{2D_{X3}}{\Delta X_i} - D_{X5}\right) \\
&\quad -\frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(C_{Y2} + \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_j}\right) \qquad -\frac{\Delta X_i}{8}\left(D_{Y2} + \frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_j}\right) \\
A_5 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(A_{X2} - \frac{2A_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - A_{X5}\right) \\
&\quad +\frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(A_{Y2} - \frac{2A_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}}\right) \\
A_6 &= -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(B_{X2} + \frac{2B_{X3}}{\Delta X_i} - B_{X5}\right) \\
&\quad +\frac{\Delta X_i}{8}\left(B_{Y2} - \frac{2B_{Y3}}{\Delta Y_{j-1}}\right) \\
A_7 &= \frac{\Delta Y_j}{8}\left(C_{X2} - \frac{2C_{X3}}{\Delta X_{i-1}} - C_{X5}\right) \\
&\quad -\frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(C_{Y2} + \frac{2C_{Y3}}{\Delta Y_j}\right)
\end{aligned}
\qquad (4.5)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
A_8 &= -\frac{\Delta Y_j}{8}\left(D_{X2}+\frac{2D_{X3}}{\Delta X_i}-D_{X5}\right) \\
&\quad -\frac{\Delta X_i}{8}\left(D_{Y2}+\frac{2D_{Y3}}{\Delta Y_j}\right) \\
A_9 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(A_{X1}-A_{X4}\right)+\frac{\Delta Y_j}{2}\left(C_{X1}-C_{X4}\right) \\
&\quad -\frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(B_{X1}-B_{X4}\right)-\frac{\Delta Y_j}{2}\left(D_{X1}-D_{X4}\right) \\
&\quad +\frac{\Delta X_{i-1}}{2}\left(A_{Y1}\right)+\frac{\Delta X_i}{2}\left(B_{Y1}\right) \\
&\quad -\frac{\Delta X_{i-1}}{2}\left(C_{Y1}\right)-\frac{\Delta X_i}{2}\left(D_{Y2}\right)
\end{aligned}
\right\} \quad (4.5)
$$

เมื่อกำหนดตัวแปรดังนี้

$$
\left.
\begin{aligned}
&A_{X1}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_A, \quad A_{X2}=\left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_A^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_A \\
&A_{X3}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A^{(k)}, \quad A_{X4}=\Lambda\left(\left.P^{(k)}H_0\right|_A\right), \quad A_{X5}=\Lambda H_0|_A \\
&B_{X1}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_B, \quad B_{X2}=\left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_B^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_B \\
&B_{X3}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B^{(k)}, \quad B_{X4}=\Lambda\left(\left.P^{(k)}H_0\right|_B\right), \quad B_{X5}=\Lambda H_0|_B \\
&C_{X1}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_C, \quad C_{X2}=\left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_C^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_C \\
&C_{X3}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C^{(k)}, \quad C_{X4}=\Lambda\left(\left.P^{(k)}H_0\right|_C\right), \quad C_{X5}=\Lambda H_0|_C \\
&D_{X1}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_D, \quad D_{X2}=\left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_D^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_D \\
&D_{X3}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D^{(k)}, \quad D_{X4}=\Lambda\left(\left.P^{(k)}H_0\right|_D\right), \quad D_{X5}=\Lambda H_0|_D
\end{aligned}
\right\} \quad (4.6)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
A_{Y1} &= R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_A, \quad A_{Y2} = R^2\left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_A^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_A \\
A_{Y3} &= R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A^{(k)} \\
B_{Y1} &= R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_B, \quad B_{Y2} = R^2\left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_B^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_B \\
B_{Y3} &= R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B^{(k)} \\
C_{Y1} &= R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_C, \quad C_{Y2} = \left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_C^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_C \\
C_{Y3} &= R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C^{(k)} \\
D_{Y1} &= R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_D, \quad D_{Y2} = R^2\left\{\frac{\partial}{\partial P_0}\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)\right\}_D^{(k)} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_D \\
D_{Y3} &= R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D^{(k)}
\end{aligned}
\right\} \quad (4.6)
$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่ขอบดังรูปที่ 4.1 จะพบว่า

1. บริเวณขอบที่ 1, 2 ,3

$$p = p_a \quad \text{และ} \quad \delta P = 0 \tag{4.7}$$

2. บริเวณขอบที่ 4 เนื่องจากความสมมาตร

$$A_3 = A_5 = A_6 = 0 \tag{4.8}$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ขอบที่ 4 สมการที่ 4.4 จะเป็นดังนี้

$$
\begin{aligned}
&A_0 \delta P_{i,j} + A_1 \delta P_{i-1,j} + A_2 \delta P_{i+1,j} + 0 + A_4 \delta P_{i,j+1} \\
&+ 0 + 0 + A_7 \delta P_{i-1,j+1} + A_8 \delta P_{i+1,j+1} + A_9 = 0
\end{aligned} \tag{4.9}
$$

4.4 การวิเคราะห์หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะพลวัต

จัดรูปสมการในเทอมของ P_1 แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$A_0P1_{i,j} + A_1P1_{i-1,j} + A_2P1_{i+1,j} + A_3P1_{i,j-1} + A_4P1_{i,j+1}$$

$$+ A_5P1_{i-1,j-1} + A_6P1_{i+1,j-1} + A_7P1_{i-1,j+1} + A_8P1_{i+1,j+1} + A_9 = 0 \qquad (4.10)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\left.\begin{aligned}
A_0 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(\frac{2A_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + A_{X2} - A_{X5}\right) + \frac{\Delta Y_j}{8}\left(\frac{2C_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + C_{X2} - C_{X5}\right) \\
&\quad - \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(-\frac{2B_{X1}}{\Delta X_i} + B_{X2} - B_{X5}\right) - \frac{\Delta Y_j}{8}\left(-\frac{2D_{X1}}{\Delta X_i} + D_{X2} - D_{X5}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(\frac{2A_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + A_{Y2}\right) + \frac{\Delta X_i}{8}\left(\frac{2B_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + B_{Y2}\right) \\
&\quad - \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(-\frac{2C_{Y1}}{\Delta Y_j} + C_{Y2}\right) - \frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2D_{Y1}}{\Delta Y_j} + D_{Y2}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(A_{V2}\right) + \frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(B_{V2}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(C_{V2}\right) + \frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(D_{V2}\right) \\
A_1 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(-\frac{2A_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + A_{X2} - A_{X5}\right) + \frac{\Delta Y_j}{8}\left(-\frac{2C_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + C_{X2} - C_{X5}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(\frac{2A_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + A_{Y2}\right) \\
&\quad - \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(-\frac{2C_{Y1}}{\Delta Y_j} + C_{Y2}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(A_{V2}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(C_{V2}\right)
\end{aligned}\right\} \qquad (4.11)$$

$$
\begin{aligned}
A_2 = & -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(\frac{2B_{X1}}{\Delta X_i}+B_{X2}-B_{X5}\right)-\frac{\Delta Y_j}{8}\left(\frac{2D_{X1}}{\Delta X_i}+D_{X2}-D_{X5}\right) \\
& +\frac{\Delta X_i}{8}\left(\frac{2B_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}}+B_{Y2}\right) \\
& -\frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2D_{Y1}}{\Delta Y_j}+D_{Y2}\right) \\
& +\frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(B_{V2}\right) \\
& +\frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(D_{V2}\right) \\
A_3 = & \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(\frac{2A_{X1}}{\Delta X_{i-1}}+A_{X2}-A_{X5}\right) \\
& -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(-\frac{2B_{X1}}{\Delta X_i}+B_{X2}-B_{X5}\right) \\
& +\frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(-\frac{2A_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}}+A_{Y2}\right)+\frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2B_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}}+B_{Y2}\right) \\
& +\frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(A_{V2}\right)+\frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(B_{V2}\right) \\
A_4 = & \frac{\Delta Y_j}{8}\left(\frac{2C_{X1}}{\Delta X_{i-1}}+C_{X2}-C_{X5}\right) \\
& -\frac{\Delta Y_j}{8}\left(-\frac{2D_{X1}}{\Delta X_i}+D_{X2}-D_{X5}\right) \\
& -\frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(\frac{2C_{Y1}}{\Delta Y_j}+C_{Y2}\right)-\frac{\Delta X_i}{8}\left(\frac{2D_{Y1}}{\Delta Y_j}+D_{Y2}\right) \\
& +\frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(C_{V2}\right)+\frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(D_{V2}\right)
\end{aligned}
\qquad (4.11)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
A_5 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(-\frac{2A_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + A_{X2} - A_{X5}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(-\frac{2A_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + A_{Y2}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(A_{V2}\right) \\
A_6 &= -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(\frac{2B_{X1}}{\Delta X_i} + B_{X2} - B_{X5}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2B_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + B_{Y2}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(B_{V2}\right) \\
A_7 &= \frac{\Delta Y_j}{8}\left(-\frac{2C_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + C_{X2} - C_{X5}\right) \\
&\quad - \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(\frac{2C_{Y1}}{\Delta Y_j} + C_{Y2}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(C_{V2}\right) \\
A_8 &= -\frac{\Delta Y_j}{8}\left(\frac{2D_{X1}}{\Delta X_i} + D_{X2} - D_{X5}\right) \\
&\quad - \frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2D_{Y1}}{\Delta Y_j} + D_{Y2}\right) \\
&\quad + \frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(D_{V2}\right)
\end{aligned}
\right\} \quad (4.11)
$$

$$
\begin{aligned}
A_9 = {} & \frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(A_{X3} - A_{X4}\right) + \frac{\Delta Y_j}{2}\left(C_{X3} - C_{X4}\right) \\
& - \frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(B_{X3} - B_{X4}\right) - \frac{\Delta Y_j}{2}\left(D_{X3} - D_{X4}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{2}\left(A_{Y3}\right) + \frac{\Delta X_i}{2}\left(B_{Y3}\right) \\
& - \frac{\Delta X_{i-1}}{2}\left(C_{Y3}\right) - \frac{\Delta X_i}{2}\left(D_{Y3}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{2}\frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(A_{V1}\right) + \frac{\Delta X_i}{2}\frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(B_{V1}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{2}\frac{\Delta Y_j}{2}\left(C_{V1}\right) + \frac{\Delta X_i}{2}\frac{\Delta Y_j}{2}\left(D_{V1}\right)
\end{aligned}
\qquad (4.11)
$$

เมื่อกำหนดตัวแปรดังนี้

$$
\begin{aligned}
& A_{X1} = \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A, A_{X2} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A, A_{X3} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A \\
& A_{X4} = \Lambda\left(P_0|_A\right),\ A_{X5} = \Lambda\left(H_0|_A\right) \\
& B_{X1} = \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B, B_{X2} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B, B_{X3} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B \\
& B_{X4} = \Lambda\left(P_0|_A\right),\ B_{X5} = \Lambda\left(H_0|_A\right) \\
& C_{X1} = \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C, C_{X2} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C, C_{X3} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C \\
& C_{X4} = \Lambda\left(P_0|_C\right),\ C_{X5} = \Lambda\left(H_0|_C\right) \\
& D_{X1} = \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D, D_{X2} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D, D_{X3} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D \\
& D_{X4} = \Lambda\left(P_0|_D\right),\ D_{X5} = \Lambda\left(H_0|_D\right)
\end{aligned}
\qquad (4.12)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
&A_{Y1} = R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A ,\ A_{Y2} = R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_A ,\\
&A_{Y3} = R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_A \\
&B_{Y1} = R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B ,\ B_{Y2} = R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_B ,\\
&B_{Y3} = R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_B \\
&C_{Y1} = R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C ,\ C_{Y2} = R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_C ,\\
&C_{Y3} = R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_C \\
&D_{Y1} = R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D ,\ D_{Y2} = R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_D ,\\
&D_{Y3} = R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_D \\
&A_{V1} = \sigma S\left(P_0|_A\right)\quad A_{V2} = \sigma S\left(H_0|_A\right)\\
&B_{V1} = \sigma S\left(P_0|_B\right)\quad B_{V2} = \sigma S\left(H_0|_B\right)\\
&C_{V1} = \sigma S\left(P_0|_C\right)\quad C_{V2} = \sigma S\left(H_0|_C\right)\\
&D_{V1} = \sigma S\left(P_0|_D\right)\quad D_{V2} = \sigma S\left(H_0|_D\right)
\end{aligned}
\right\} \quad (4.12)
$$

จัดรูปสมการในเทอมของ P_2 แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$A_0P_{2i,j} + A_1P_{2i-1,j} + A_2P_{2i+1,j} + A_3P_{2i,j-1} + A_4P_{2i,j+1}$$

$$+ A_5P_{2i-1,j-1} + A_6P_{2i+1,j-1} + A_7P_{2i-1,j+1} + A_8P_{2i+1,j+1} + A_9 = 0 \qquad (4.13)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\left.\begin{aligned}
A_0 = {} & \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(\frac{2A_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + A_{X2} - A_{X5}\right) + \frac{\Delta Y_j}{8}\left(\frac{2C_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + C_{X2} - C_{X5}\right) \\
& - \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(-\frac{2B_{X1}}{\Delta X_i} + B_{X2} - B_{X5}\right) - \frac{\Delta Y_j}{8}\left(-\frac{2D_{X1}}{\Delta X_i} + D_{X2} - D_{X5}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(\frac{2A_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + A_{Y2}\right) + \frac{\Delta X_i}{8}\left(\frac{2B_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + B_{Y2}\right) \\
& - \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(-\frac{2C_{Y1}}{\Delta Y_j} + C_{Y2}\right) - \frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2D_{Y1}}{\Delta Y_j} + D_{Y2}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(A_{V2}\right) + \frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(B_{V2}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(C_{V2}\right) + \frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(D_{V2}\right) \\
A_1 = {} & \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(-\frac{2A_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + A_{X2} - A_{X5}\right) + \frac{\Delta Y_j}{8}\left(-\frac{2C_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + C_{X2} - C_{X5}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(\frac{2A_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + A_{Y2}\right) \\
& - \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(-\frac{2C_{Y1}}{\Delta Y_j} + C_{Y2}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(A_{V2}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(C_{V2}\right)
\end{aligned}\right\} \qquad (4.14)$$

$$
\begin{aligned}
A_2 = & -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(\frac{2B_{X1}}{\Delta X_i}+B_{X2}-B_{X5}\right)-\frac{\Delta Y_j}{8}\left(\frac{2D_{X1}}{\Delta X_i}+D_{X2}-D_{X5}\right) \\
& +\frac{\Delta X_i}{8}\left(\frac{2B_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}}+B_{Y2}\right) \\
& -\frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2D_{Y1}}{\Delta Y_j}+D_{Y2}\right) \\
& +\frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(B_{V2}\right) \\
& +\frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(D_{V2}\right) \\
A_3 = & \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(\frac{2A_{X1}}{\Delta X_{i-1}}+A_{X2}-A_{X5}\right) \\
& -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(-\frac{2B_{X1}}{\Delta X_i}+B_{X2}-B_{X5}\right) \\
& +\frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(-\frac{2A_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}}+A_{Y2}\right)+\frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2B_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}}+B_{Y2}\right) \\
& +\frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(A_{V2}\right)+\frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(B_{V2}\right) \\
A_4 = & \frac{\Delta Y_j}{8}\left(\frac{2C_{X1}}{\Delta X_{i-1}}+C_{X2}-C_{X5}\right) \\
& -\frac{\Delta Y_j}{8}\left(-\frac{2D_{X1}}{\Delta X_i}+D_{X2}-D_{X5}\right) \\
& -\frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(\frac{2C_{Y1}}{\Delta Y_j}+C_{Y2}\right)-\frac{\Delta X_i}{8}\left(\frac{2D_{Y1}}{\Delta Y_j}+D_{Y2}\right) \\
& +\frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(C_{V2}\right)+\frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(D_{V2}\right)
\end{aligned}
\qquad (4.14)
$$

$$
\begin{aligned}
A_5 &= \frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(-\frac{2A_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + A_{X2} - A_{X5}\right) \\
&+ \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(-\frac{2A_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + A_{Y2}\right) \\
&+ \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(A_{V2}\right) \\
A_6 &= -\frac{\Delta Y_{j-1}}{8}\left(\frac{2B_{X1}}{\Delta X_i} + B_{X2} - B_{X5}\right) \\
&+ \frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2B_{Y1}}{\Delta Y_{j-1}} + B_{Y2}\right) \\
&+ \frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_{j-1}}{4}\left(B_{V2}\right) \\
A_7 &= \frac{\Delta Y_j}{8}\left(-\frac{2C_{X1}}{\Delta X_{i-1}} + C_{X2} - C_{X5}\right) \\
&- \frac{\Delta X_{i-1}}{8}\left(\frac{2C_{Y1}}{\Delta Y_j} + C_{Y2}\right) \\
&+ \frac{\Delta X_{i-1}}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(C_{V2}\right) \\
A_8 &= -\frac{\Delta Y_j}{8}\left(\frac{2D_{X1}}{\Delta X_i} + D_{X2} - D_{X5}\right) \\
&- \frac{\Delta X_i}{8}\left(-\frac{2D_{Y1}}{\Delta Y_j} + D_{Y2}\right) \\
&+ \frac{\Delta X_i}{4}\frac{\Delta Y_j}{4}\left(D_{V2}\right)
\end{aligned}
\qquad (4.14)
$$

$$
\begin{aligned}
A_9 = {} & \frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(A_{X3} - A_{X4}\right) + \frac{\Delta Y_j}{2}\left(C_{X3} - C_{X4}\right) \\
& - \frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(B_{X3} - B_{X4}\right) - \frac{\Delta Y_j}{2}\left(D_{X3} - D_{X4}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{2}\left(A_{Y3}\right) + \frac{\Delta X_i}{2}\left(B_{Y3}\right) \\
& - \frac{\Delta X_{i-1}}{2}\left(C_{Y3}\right) - \frac{\Delta X_i}{2}\left(D_{Y3}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{2}\frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(A_{V1}\right) + \frac{\Delta X_i}{2}\frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\left(B_{V1}\right) \\
& + \frac{\Delta X_{i-1}}{2}\frac{\Delta Y_j}{2}\left(C_{V1}\right) + \frac{\Delta X_i}{2}\frac{\Delta Y_j}{2}\left(D_{V1}\right)
\end{aligned}
\qquad (4.14)
$$

เมื่อกำหนดตัวแปรดังนี้

$$
A_{X1} = \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A \,,\; A_{X2} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A
$$

$$
A_{X3} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_A \left[X_G - X\right]_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_A
$$

$$
A_{X4} = \Lambda\left(P_0|_A \left[X_G - X\right]_A\right) \,,\; A_{X5} = \Lambda\left(H_0|_A\right)
$$

$$
B_{X1} = \left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B \,,\; B_{X2} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B
$$

$$
B_{X3} = \left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_B \left[X_G - X\right]_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_B
$$

$$
B_{X4} = \Lambda\left(P_0|_B \left[X_G - X\right]_B\right) \,,\; B_{X5} = \Lambda\left(H_0|_B\right)
\qquad (4.15)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
&C_{X1}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C \ , \ C_{X2}=\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C \\
&C_{X3}=\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_C \left[X_G-X\right]_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_C \\
&C_{X4}=\Lambda\left(P_0|_C\left[X_G-X\right]_C\right) \ , \ C_{X5}=\Lambda\left(H_0|_C\right) \\
&D_{X1}=\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D \ , \ D_{X2}=\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D \\
&D_{X3}=\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_D \left[X_G-X\right]_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial X}\right|_D \\
&D_{X4}=\Lambda\left(P_0|_D\left[X_G-X\right]_D\right) \ , \ D_{X5}=\Lambda\left(H_0|_D\right) \\
&A_{Y1}=R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_A \ , \ A_{Y2}=R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_A \\
&A_{Y3}=R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_A \left[X_G-X\right]_A \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_A \\
&B_{Y1}=R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_B \ , \ B_{Y2}=R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_B \\
&B_{Y3}=R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi P H^3\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_B \left[X_G-X\right]_B \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_B
\end{aligned}
\right\} \quad (4.15)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
&C_{Y1}=R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_C \;,\; C_{Y2}=R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^{\,3}\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_C \\
&C_{Y3}=R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^{\,3}\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_C \left[X_G-X\right]_C \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_C \\
&D_{Y1}=R^2\left(\phi_0 P_0 H_0^3\right)_D \;,\; D_{Y2}=R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^{\,3}\right)}{\partial P}\right|_0\right\}_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_D \\
&D_{Y3}=R^2\left\{\left.\frac{\partial\left(\phi PH^{\,3}\right)}{\partial H}\right|_0\right\}_D \left[X_G-X\right]_D \left.\frac{\partial P_0}{\partial Y}\right|_D \\
&A_{V1}=\sigma S\left(\left.P_0\right|_A\left[X_G-X\right]_A\right) \quad A_{V2}=\sigma S\left(\left.H_0\right|_A\right) \\
&B_{V1}=\sigma S\left(\left.P_0\right|_B\left[X_G-X\right]_B\right) \quad B_{V2}=\sigma S\left(\left.H_0\right|_B\right) \\
&C_{V1}=\sigma S\left(\left.P_0\right|_C\left[X_G-X\right]_C\right) \quad C_{V2}=\sigma S\left(\left.H_0\right|_C\right) \\
&D_{V1}=\sigma S\left(\left.P_0\right|_D\left[X_G-X\right]_D\right) \quad D_{V2}=\sigma S\left(\left.H_0\right|_D\right)
\end{aligned}
\right\} \quad (4.15)
$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่ขอบดังรูปที่ 4.1 ในสภาวะพลวัตเป็นดังนี้

1. บริเวณขอบที่ 1,2,3

$$P_1=P_2=0 \quad (4.16)$$

2. บริเวณขอบที่ 4

$$A_3=A_5=A_6=0 \quad (4.17)$$

ดังนั้นสมการที่ 4.10 จะเป็นดังนี้

$$A_0 P_{1_{i,j}}+A_1 P_{1_{i-1,j}}+A_2 P_{1_{i+1,j}}+0+A_4 P_{1_{i,j+1}}$$

$$+0+0+A_7 P_{1_{i-1,j+1}}+A_8 P_{1_{i+1,j+1}}+A_9=0 \quad (4.18)$$

ดังนั้นสมการที่ 4.13 จะเป็นดังนี้

$$A_0P_{2i,j}+A_1P_{2i-1,j}+A_2P_{2i+1,j}+0+A_4P_{2i,j+1}$$

$$+0+0+A_7P_{2i-1,j+1}+A_8P_{2i+1,j+1}+A_9=0 \tag{4.19}$$

การคำนวณหาค่า $\left(\phi PH^3\right)$ ในสภาวะสถิตย์และสภาวะพลวัตเป็นดังนี้

$$\left(\phi PH^3\right)=PH^3\left(a_0+a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right)+a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2+a_3\left(\frac{Kn}{PH}\right)^3\right) \tag{4.20}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial P}\left(\phi PH^3\right)=H^3\left(a_0-a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2-2a_3\left(\frac{Kn}{PH}\right)^3\right) \tag{4.21}$$

$$\frac{\partial}{\partial H}\left(\phi PH^3\right)=PH^2\left(3a_0+2a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2+a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2\right) \tag{4.22}$$

การหาค่าที่จุด A,B,C,D หาได้ดังนี้

ค่าที่จุด A

$$F\big|_A=\frac{F_{i-1,j-1}+F_{i-1,j}+F_{i,j}+F_{i,j-1}}{4} \tag{4.23}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial X}\right|_A=\frac{F_{i,j}-F_{i-1,j}+F_{i,j-1}-F_{i-1,j-1}}{2\Delta X_{i-1}} \tag{4.24}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial Y}\right|_A=\frac{F_{i,j}-F_{i,j-1}+F_{i-1,j}-F_{i-1,j-1}}{2\Delta Y_{j-1}} \tag{4.25}$$

ค่าที่จุด B

$$F|_B = \frac{F_{i,j} + F_{i+1,j} + F_{i+1,j-1} + F_{i,j-1}}{4} \tag{4.26}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial X}\right|_B = \frac{F_{i+1,j} - F_{i,j} + F_{i+1,j-1} - F_{i,j-1}}{2\Delta X_i} \tag{4.27}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial Y}\right|_B = \frac{F_{i+1,j} - F_{i+1,j-1} + F_{i,j} - F_{i,j-1}}{2\Delta Y_{j-1}} \tag{4.28}$$

ค่าที่จุด C

$$F|_C = \frac{F_{i-1,j} + F_{i-1,j+1} + F_{i,j+1} + F_{i,j}}{4} \tag{4.29}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial X}\right|_C = \frac{F_{i,j+1} - F_{i-1,j+1} + F_{i,j} - F_{i-1,j}}{2\Delta X_{i-1}} \tag{4.30}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial Y}\right|_C = \frac{F_{i,j+1} - F_{i,j} + F_{i-1,j+1} - F_{i-1,j}}{2\Delta Y_j} \tag{4.31}$$

ค่าที่จุด D

$$F|_D = \frac{F_{i,j} + F_{i,j+1} + F_{i+1,j+1} + F_{i+1,j}}{4} \tag{4.32}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial X}\right|_D = \frac{F_{i+1,j+1} - F_{i,j+1} + F_{i+1,j} - F_{i,j}}{2\Delta X_i} \tag{4.33}$$

$$\left.\frac{\partial F}{\partial Y}\right|_D = \frac{F_{i+1,j+1} - F_{i+1,j} + F_{i,j+1} - F_{i,j}}{2\Delta Y_j} \tag{4.34}$$

เมื่อตัวแปร F แทนด้วยค่าที่ต้องการหาที่จุด A,B,C,D เช่น P , H , $\frac{\partial}{\partial P}\left(\phi PH^3\right)$ และ $\frac{\partial}{\partial H}\left(\phi PH^3\right)$

บทที่ 5
ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

ในบทนี้แสดงพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด อินเวอร์ส สเตป ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข เมื่อขนาดและค่าต่างๆของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาเป็นดังตารางที่ 5.1 การคำนวณในสภาวะสถิตย์จะทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรทีละค่าโดยให้ค่าอื่นๆมีค่าคงที่ ส่วนการหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งในสภาวะพลวัตจะนำขนาดของหัวอ่านที่พิจารณาในสภาวะสถิตย์มาใช้ในการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของดิสก์

ตารางที่ 5.1 ขนาดและค่าต่างๆของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์ส สเตป

สัญลักษณ์	ค่าที่กำหนด
L	2.025×10^{-3} m
W	1.525×10^{-3} m
B	4.0×10^{-4} m
L_{TP}	1.0×10^{-4} m
θ_{TP}	2.0×10^{-2} rad
L_{ST}	3.0×10^{-3} m
x_S	1.1×10^{-3} m
x_G	1.0125×10^{-3} m
f_0	4.0×10^{-2} N
h_{GR}	3.0×10^{-6} m
m	9.2496×10^{-6} Kg
i_θ	8.3098×10^{-12} Kg.m^2
ω_0	5400 RPM

5.1 ผลการคำนวณในสภาวะสถิตย์

รูปที่ 5.1 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกร่องและความเร็วดิสก์มีค่า 15 m/s , 20 m/s และ 25 m/s พบว่า เมื่อกำหนดให้ความเร็วดิสก์เท่ากับ 15 m/s ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่าต่ำเมื่อความลึกของร่องมีค่าประมาณ 3 μm. ส่วนความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะมีค่าต่ำเมื่อความลึกของร่องมีค่าประมาณ 2 μm. เมื่อกำหนดให้ความเร็วดิสก์เท่ากับ 20 m/s ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่าต่ำเมื่อความลึกของร่องมีค่าประมาณ 3.5 μm. ส่วนความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะมีค่าต่ำเมื่อความลึกของร่องมีค่าประมาณ 2.5 μm. เมื่อกำหนดให้ความเร็วดิสก์เท่ากับ 25 m/s ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่าต่ำเมื่อความลึกของร่องมีค่าประมาณ 4 μm. ส่วนความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะมีค่าต่ำ เมื่อความลึกของร่องมีค่าประมาณ 3 μm. เมื่อความเร็วของดิสก์มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น และจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วดิสก์ในกรณีที่ความลึกของร่องมีค่าน้อยๆจะมีผลต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่านมากกว่าในกรณีที่มีความลึกของร่องมากๆ

รูปที่ 5.2 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของดิสก์ พบว่าเมื่อความเร็วของดิสก์มากขึ้นความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้นโดยความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าความสูงการลอยตัวที่ขอบท้าย เมื่อความเร็วดิสก์อยู่ในช่วง 10-15 m/s ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำเมื่อความลึกร่อง 3 μm. จะมีค่าต่ำที่สุด และความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายเมื่อความลึกร่อง 2 μm. จะมีค่าต่ำที่สุด ส่วนเมื่อความเร็วดิสก์อยู่ในช่วง 20-30 m/s ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำเมื่อความลึกร่อง 4 μm. มีค่าต่ำที่สุด ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายเมื่อความลึกร่อง 3 μm. จะมีค่าต่ำที่สุด

รูปที่ 5.3 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างรางหัวอ่าน พบว่าเมื่อความกว้างของรางหัวอ่านเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น ความแตกต่างระหว่างความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความเร็วของดิสก์มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น และผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะมีมากขึ้นเมื่อรางของหัวอ่านมีขนาดใหญ่ขึ้น

รูปที่ 5.4 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนลาดเอียง พบว่าเมื่อความเร็วดิสก์มีค่าเท่ากับ 15 m/s ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความยาวของส่วนลาดเอียงเท่ากับ 1.2 mm. จึงค่อยๆลดลง ในขณะที่ความเร็วดิสก์เท่ากับ 20 m/s ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความยาวของส่วนลาดเอียง

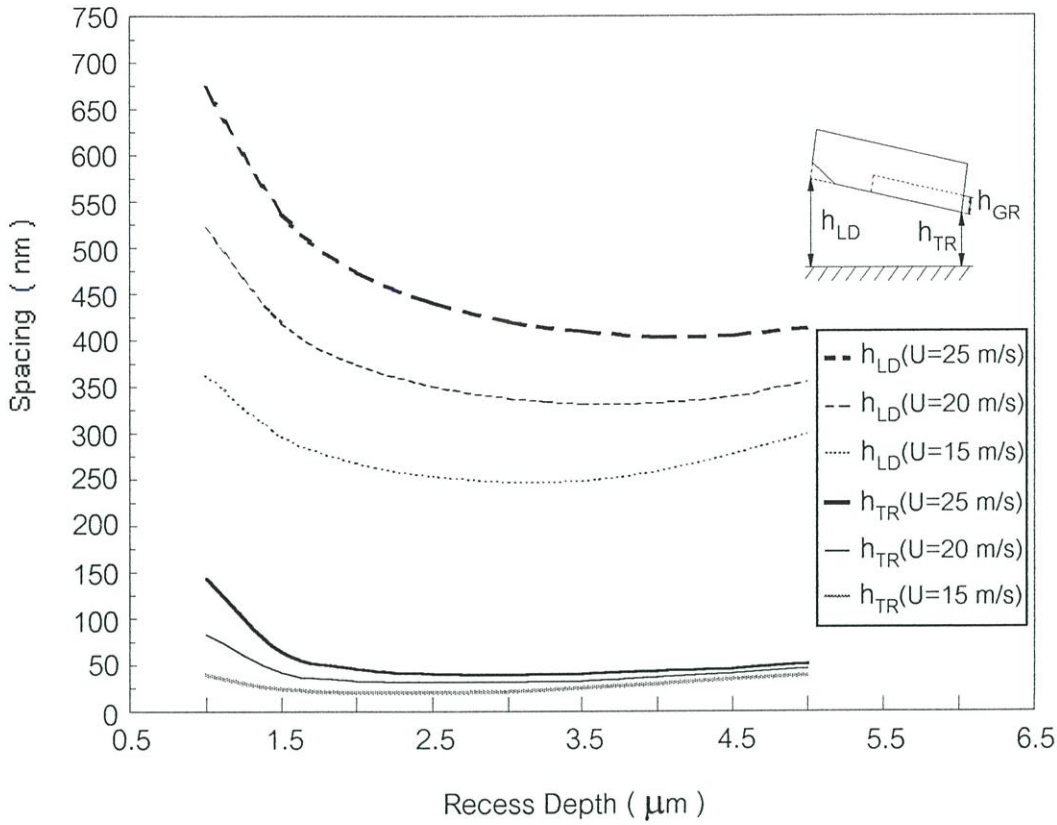
เท่ากับ 1.4 mm. จึงค่อยๆลดลง ในขณะที่ความเร็วดิสก์เท่ากับ 25 m/s ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะเพิ่มขึ้นจากนั้นจะลดลงเล็กน้อยเมื่อความยาวส่วนลาดเอียงเท่ากับ 1.6 mm. ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความยาวของส่วนลาดเอียงมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 5.5 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมของส่วนลาดเอียง พบว่าเมื่อมุมของส่วนลาดเอียงเพิ่มขึ้นค่าความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่าลดลงและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าลดลงเล็กน้อย จึงพบว่าความแตกต่างระหว่างความสูงการลอยตัวที่ขอบนำกับความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะมีค่าลดลงเมื่อมุมของส่วนลาดเอียงมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีความแตกต่างของค่าความสูงการลอยตัวระหว่างขอบนำและขอบท้ายลดลงเมื่อความเร็วของดิสก์มีค่าน้อยลง เมื่อเพิ่มความเร็วของดิสก์จะทำให้ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น

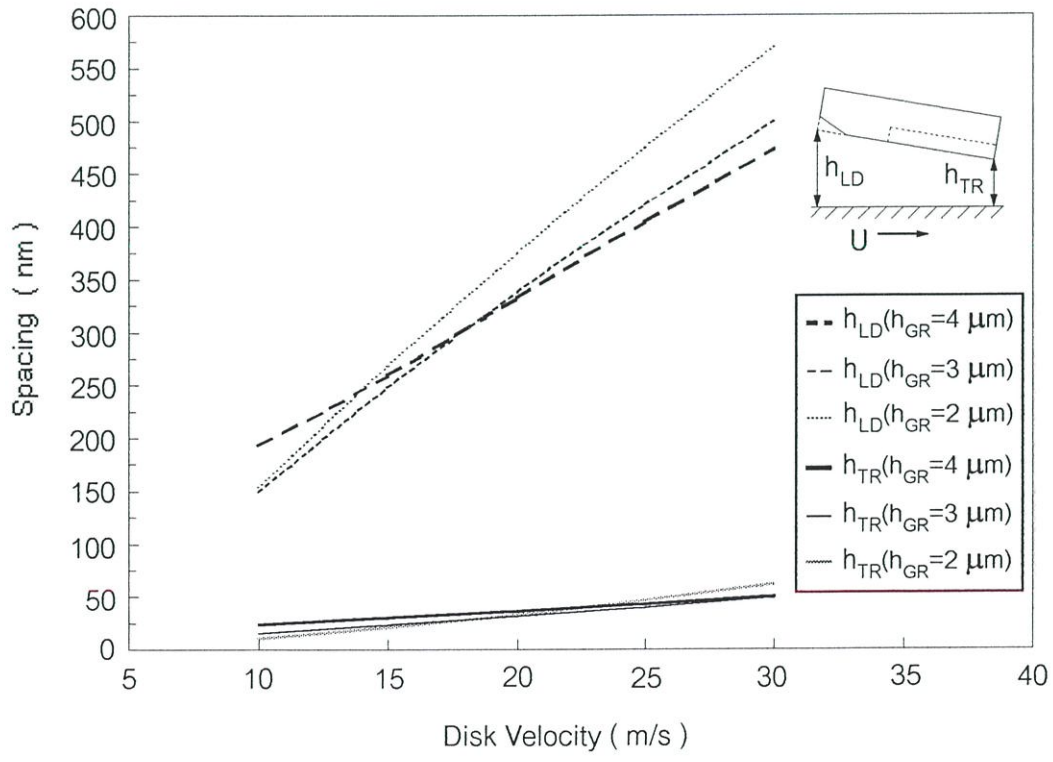
รูปที่ 5.6 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของสเตป พบว่าเมื่อความยาวของสเตปเพิ่มขึ้นทำให้ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำเพิ่มขึ้น แต่ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วดิสก์ทำให้ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงการลอยตัวที่ขอบนำ ดังนั้นหัวอ่านจะมีความแตกต่างระหว่างความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวสเตปหรือความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้น

รูปที่ 5.7 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดยึดจับหัวอ่าน พบว่าเมื่อระยะของจุดยึดจับเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวที่ขอบนำมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าลดลง เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งจุดยึดจับหัวอ่านมีค่าคงที่พบว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของดิสก์มีค่าใกล้เคียงกัน

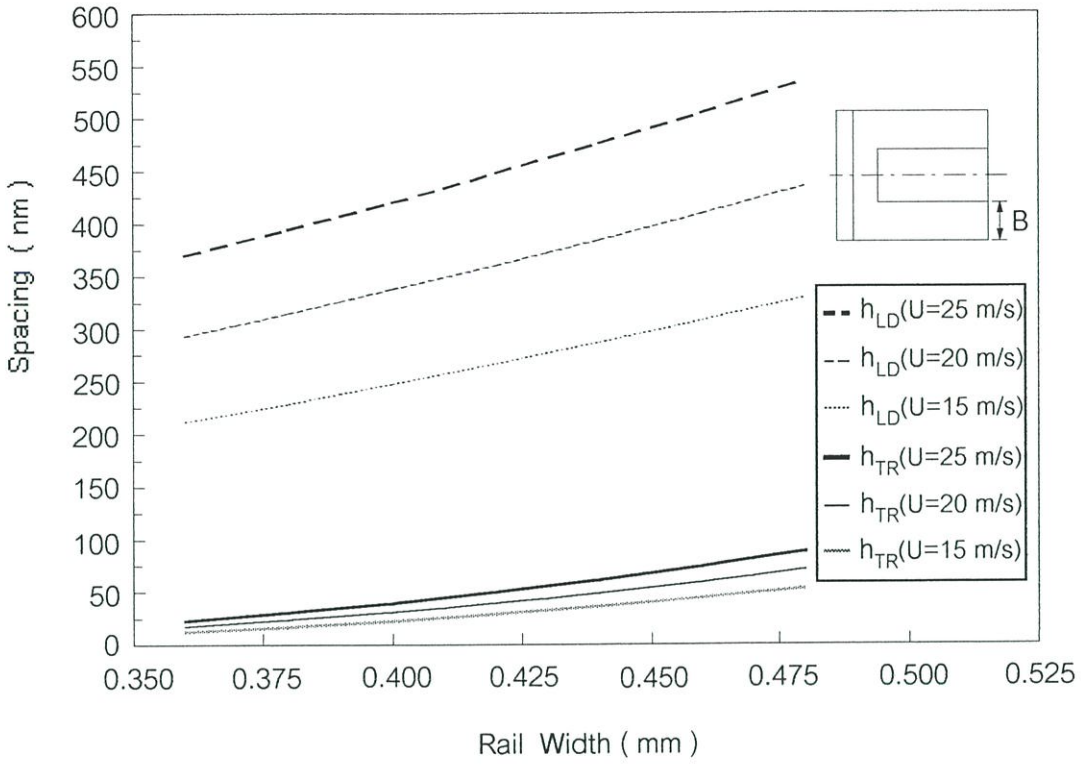
รูปที่ 5.8 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระเริ่มต้นที่กระทำกับหัวอ่าน พบว่าความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายมีค่าลดลง โดยเฉพาะความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่าลดลงมาก เมื่อความเร็วของดิสก์เพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าความสูงการลอยตัวที่ขอบท้าย และจากกราฟพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วดิสก์จะมีผลต่อความสูงการลอยตัวที่ขอบนำมาก ในกรณีที่ภาระเริ่มต้นมีค่าน้อย



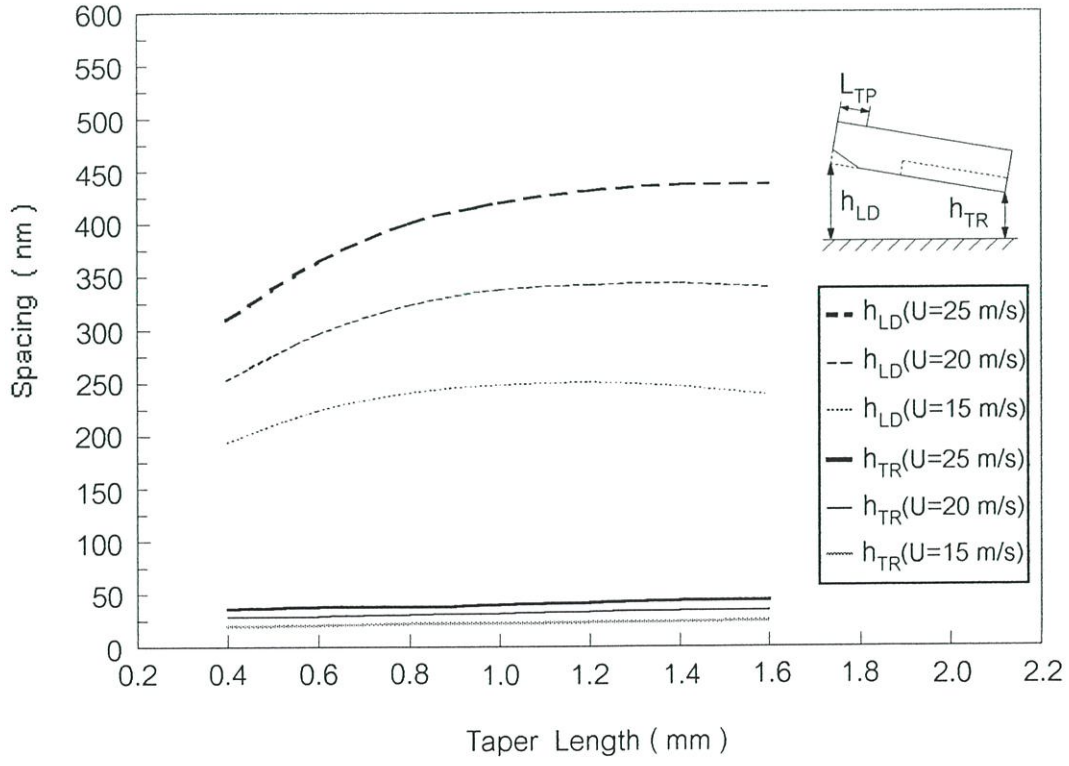
รูปที่ 5.1 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกร่อง



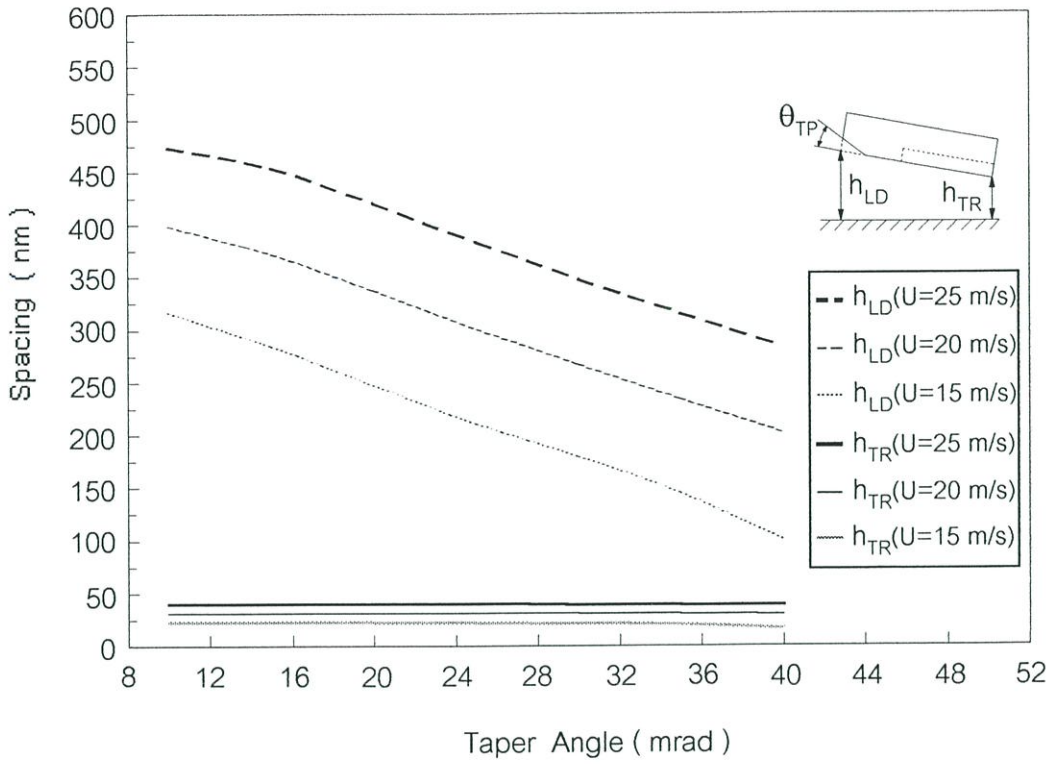
รูปที่ 5.2 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของดิสก์



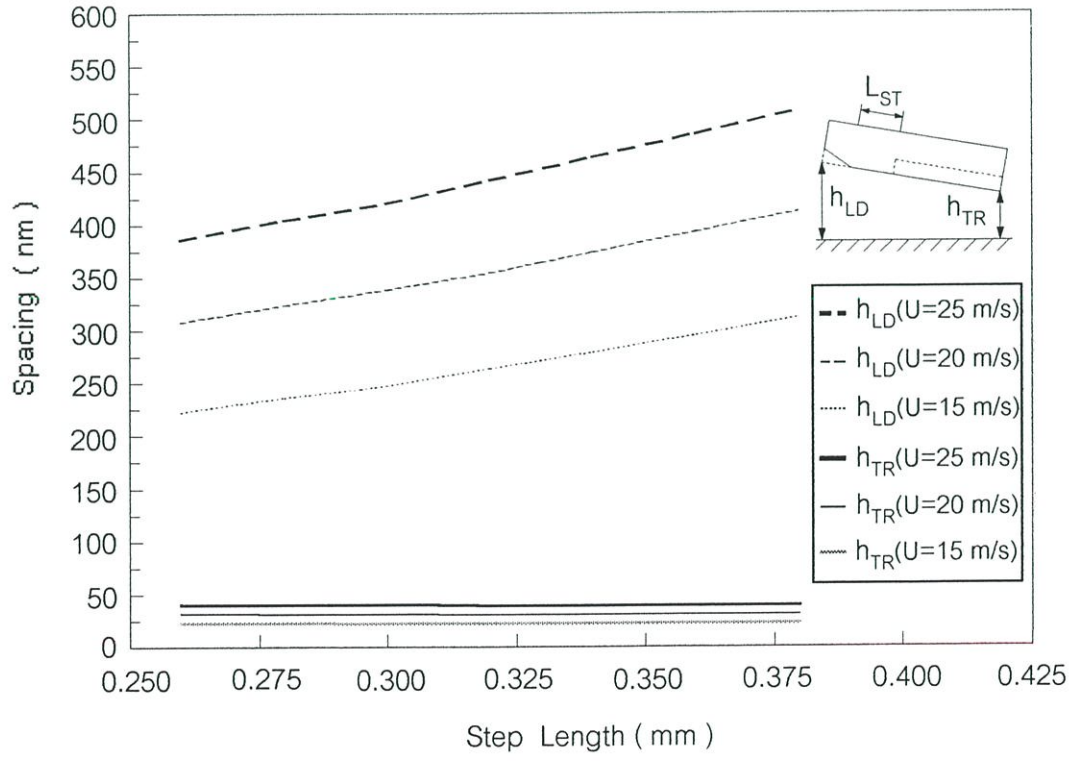
รูปที่ 5.3 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างรางหัวอ่าน



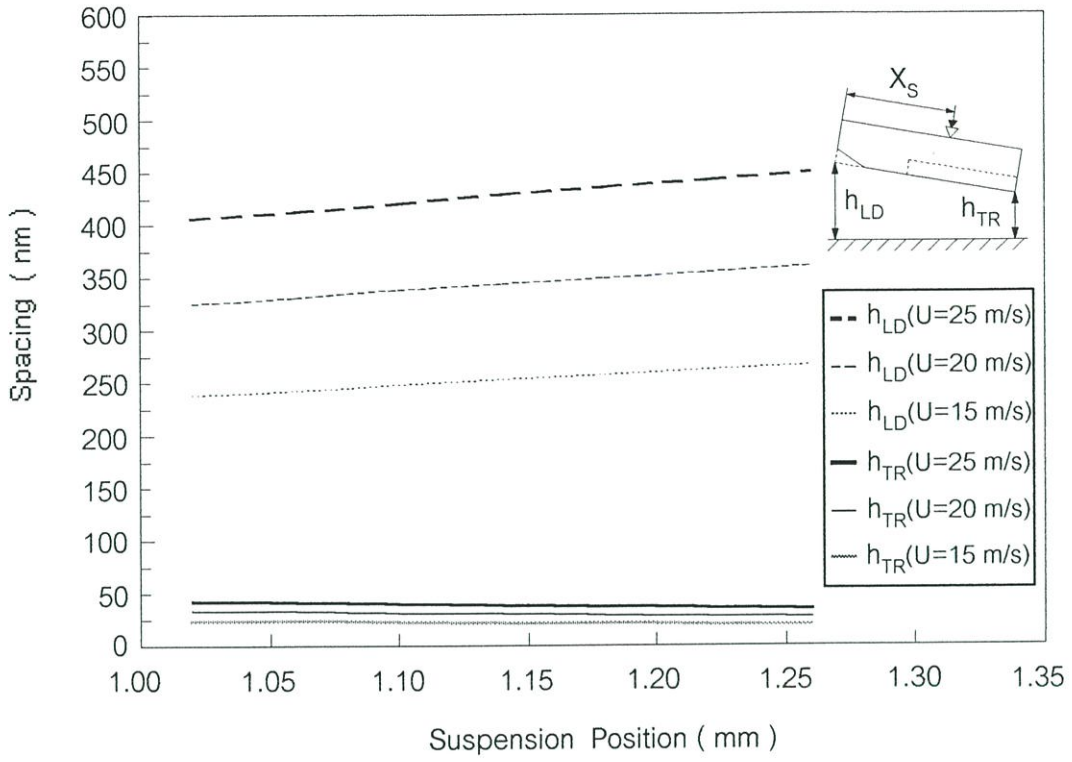
รูปที่ 5.4 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนลาดเอียง



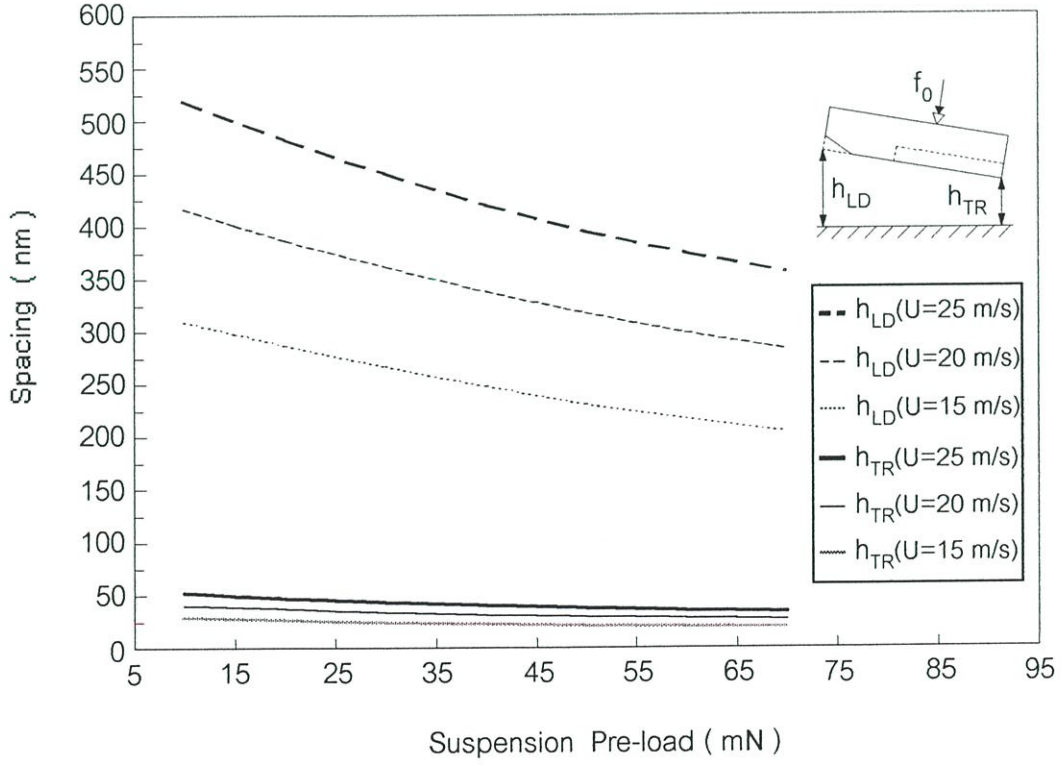
รูปที่ 5.5 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมของส่วนลาดเอียง



รูปที่ 5.6 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของสเตป



รูปที่ 5.7 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดยึดจับ



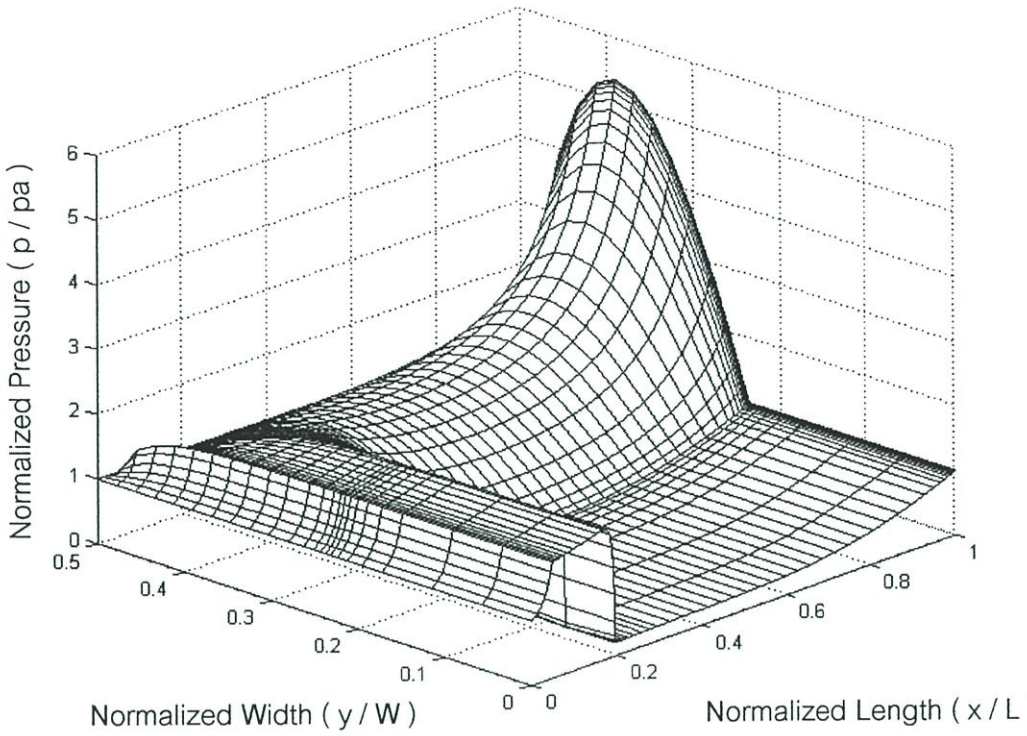
รูปที่ 5.8 แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระเริ่มต้น

ในรูปที่ 5.9 และ รูปที่ 5.10 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่านเมื่อดิสก์มีความเร็ว 20 m/s และ 25 m/s ตามลำดับ โดยพิจารณาหัวอ่านเพียงครึ่งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตรตามแนวแกน X พบว่าที่บริเวณส่วนลาดเอียง , รางหัวอ่านและสเตป จะมีความดันสูงกว่าบรรยากาศ ส่วนที่บริเวณร่องจะมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

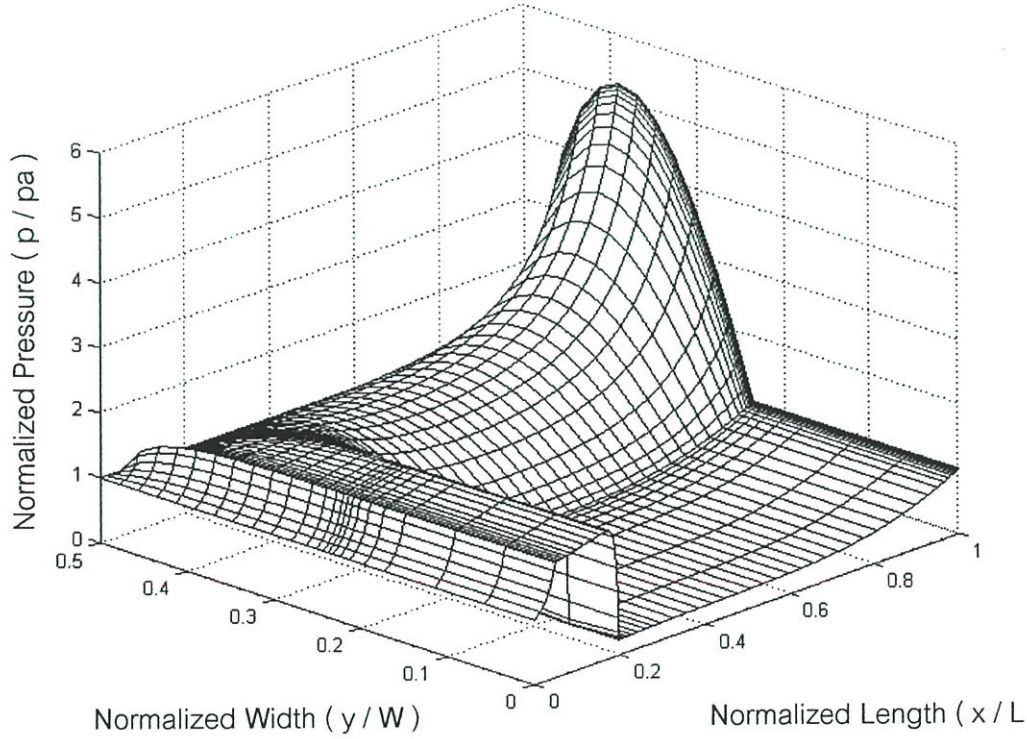
ในรูปที่ 5.11 และ รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่านเมื่อภาระเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 mN และ 50 mN ตามลำดับ โดยพิจารณาหัวอ่านเพียงครึ่งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตรตามแนวแกน X พบว่า เมื่อภาระเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 50 mN จะมีความดันที่บริเวณรางของหัวอ่านและสเตปจะสูงกว่าเมื่อภาระเริ่มต้นมีค่า 30 mN

ในรูปที่ 5.13 และ รูปที่ 5.14 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความดันที่กึ่งกลางของรางหัวอ่านและความดันที่กึ่งกลางของหัวอ่านตามลำดับ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของหัวอ่านตามแนวแกน X และความลึกร่อง 2 μm , 3 μm และ 4 μm จากรูปที่ 5.13 พบว่า ความดันที่บริเวณส่วนลาดเอียงจะเพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยบริเวณสเตป จากนั้นจะเริ่มลดลงจนกระทั่งบริเวณใกล้กับระยะกึ่งกลางของหัวอ่านความดันจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆและจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณใกล้ขอบท้ายของหัวอ่าน จากนั้นความดันจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าความดันเท่ากับบรรยากาศที่บริเวณขอบท้ายของหัวอ่าน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกของร่องพบว่าที่ความลึกของร่อง 3 μm และ 4 μm จะมีความดันใกล้เคียงกันบริเวณสเตป ส่วนที่ความลึกร่อง 2 μm และ 3 μm จะมีค่าความดันใกล้เคียงกันที่ขอบท้ายของหัวอ่าน จากรูปที่ 5.14 พบว่าความดันบริเวณส่วนลาดเอียงจะมีค่าเพิ่มขึ้นและความดันที่บริเวณสเตปมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อผ่านบริเวณสเตปแล้วความดันจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ในขณะที่ความลึกร่องมีค่าเท่ากับ 4 μm จะมีค่าความดันต่ำที่สุดจากนั้นค่าความดันอากาศจะค่อยๆเพิ่มขึ้นและจะมีการเพิ่มเร็วขึ้นจนมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศที่บริเวณขอบท้าย

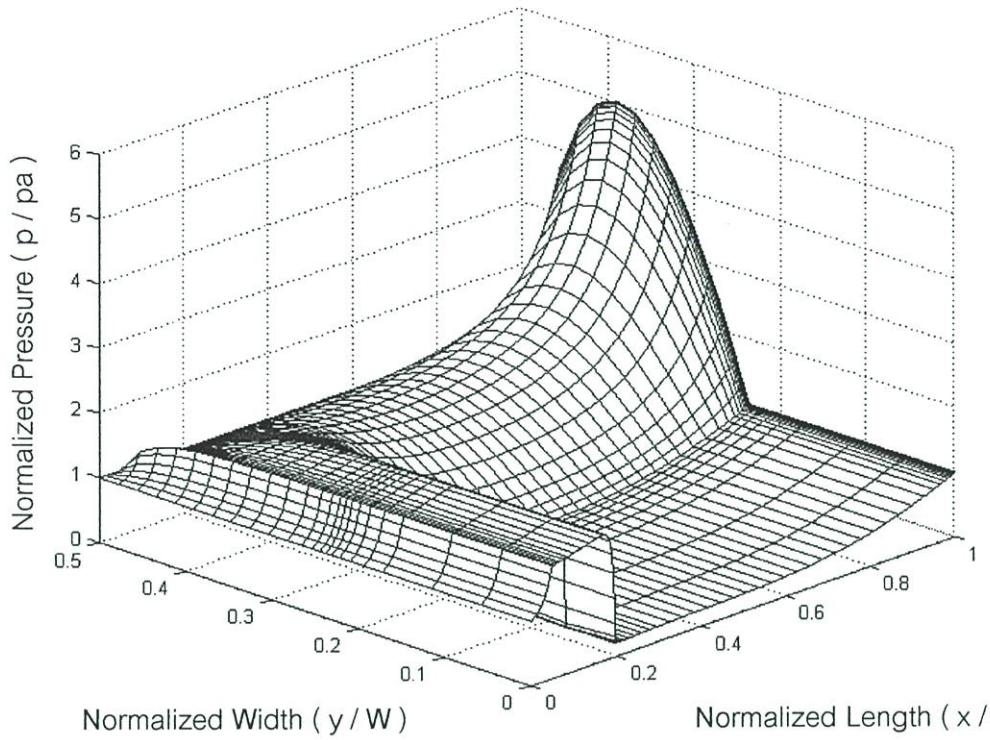
รูปที่ 5.15 และ รูปที่ 5.16 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความดันที่กึ่งกลางของรางหัวอ่านและความดันที่กึ่งกลางของหัวอ่านตามลำดับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกน X และความเร็วของดิสก์ 15 m/s , 20 m/s และ 25 m/s จากรูปที่ 5.15 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันจะคล้ายกับในรูปที่ 5.13 เมื่อความเร็วดิสก์เท่ากับ 15 m/s จะทำให้ความดันที่บริเวณสเตปมีค่าสูงกว่ากรณีที่ความเร็วดิสก์เท่ากับ 20 m/s และ 25m/s ส่วนความดันที่เกิดขึ้นบริเวณขอบท้ายมีค่าใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 5.16 พบว่าลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความดันจะคล้ายกับในรูปที่ 5.14 เมื่อความเร็วดิสก์เท่ากับ 15 m/s จะทำให้ความดันบริเวณสเตปมีค่าสูงและความดันบริเวณถัดจากสเตปมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ความเร็วดิสก์เท่ากับ 20 m/s และ 25m/s



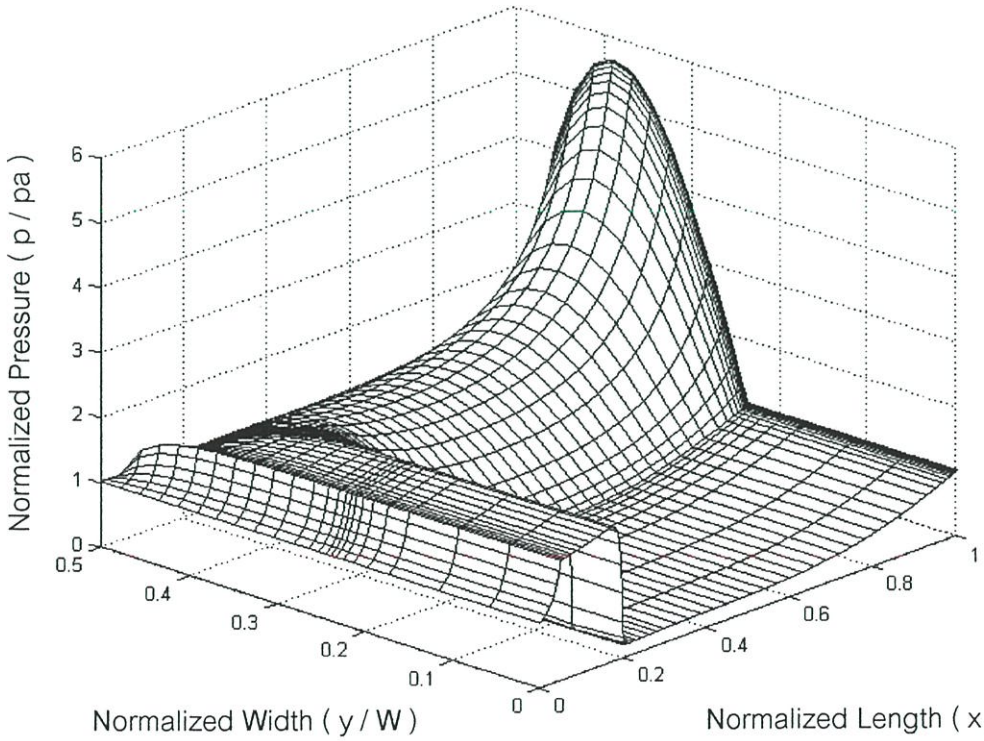
รูปที่ 5.9 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่าน เมื่อดิสก์มีความเร็ว 20 m/s



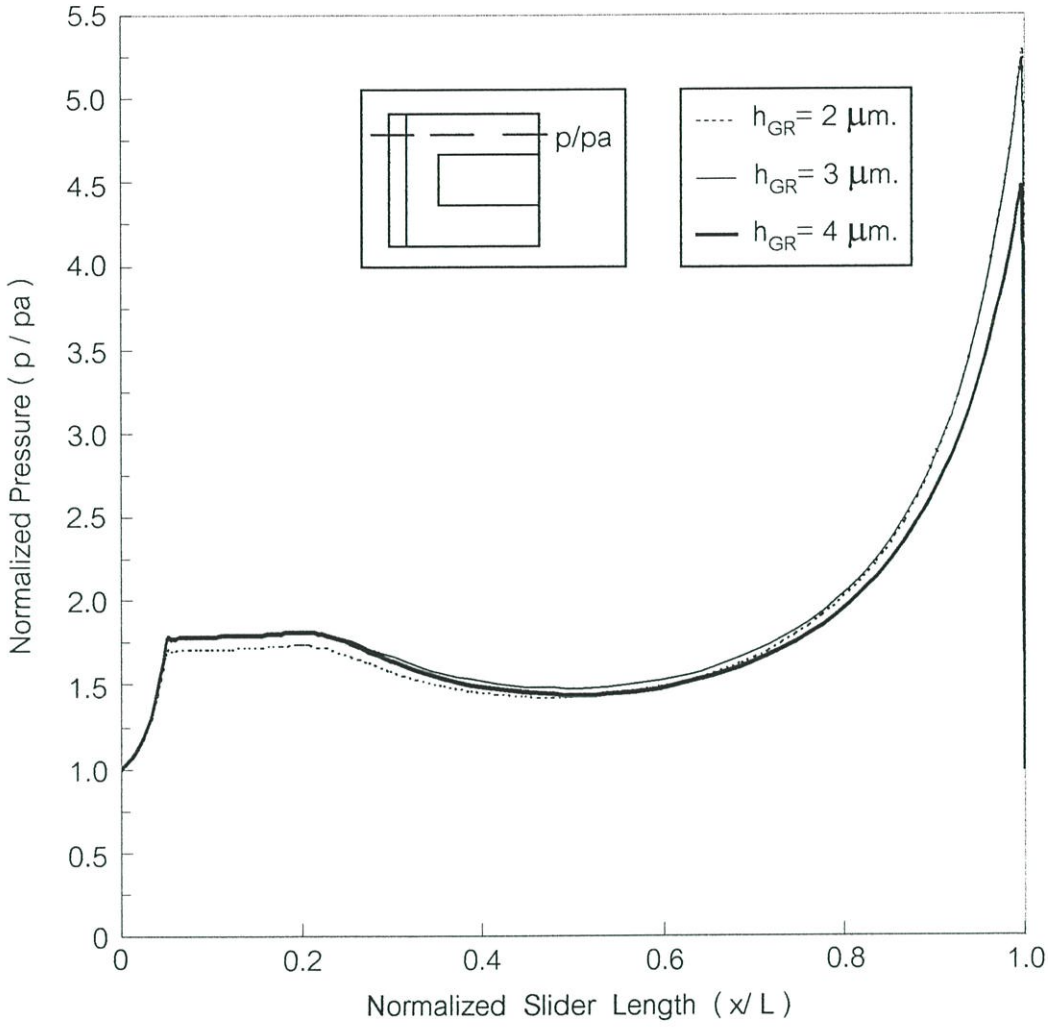
รูปที่ 5.10 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่าน เมื่อดิสก์มีความเร็ว 25 m/s



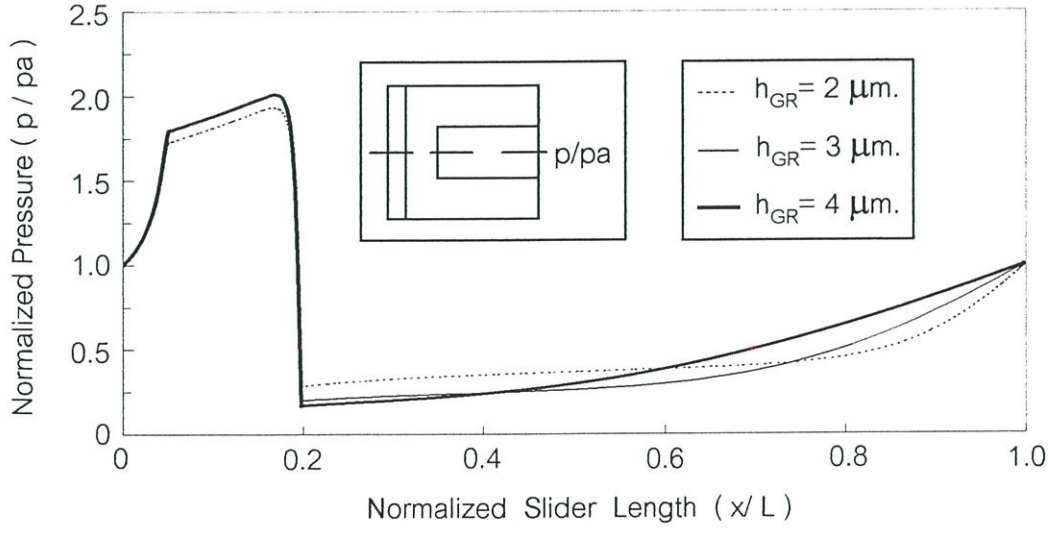
รูปที่ 5.11 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่าน เมื่อภาระเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 mN



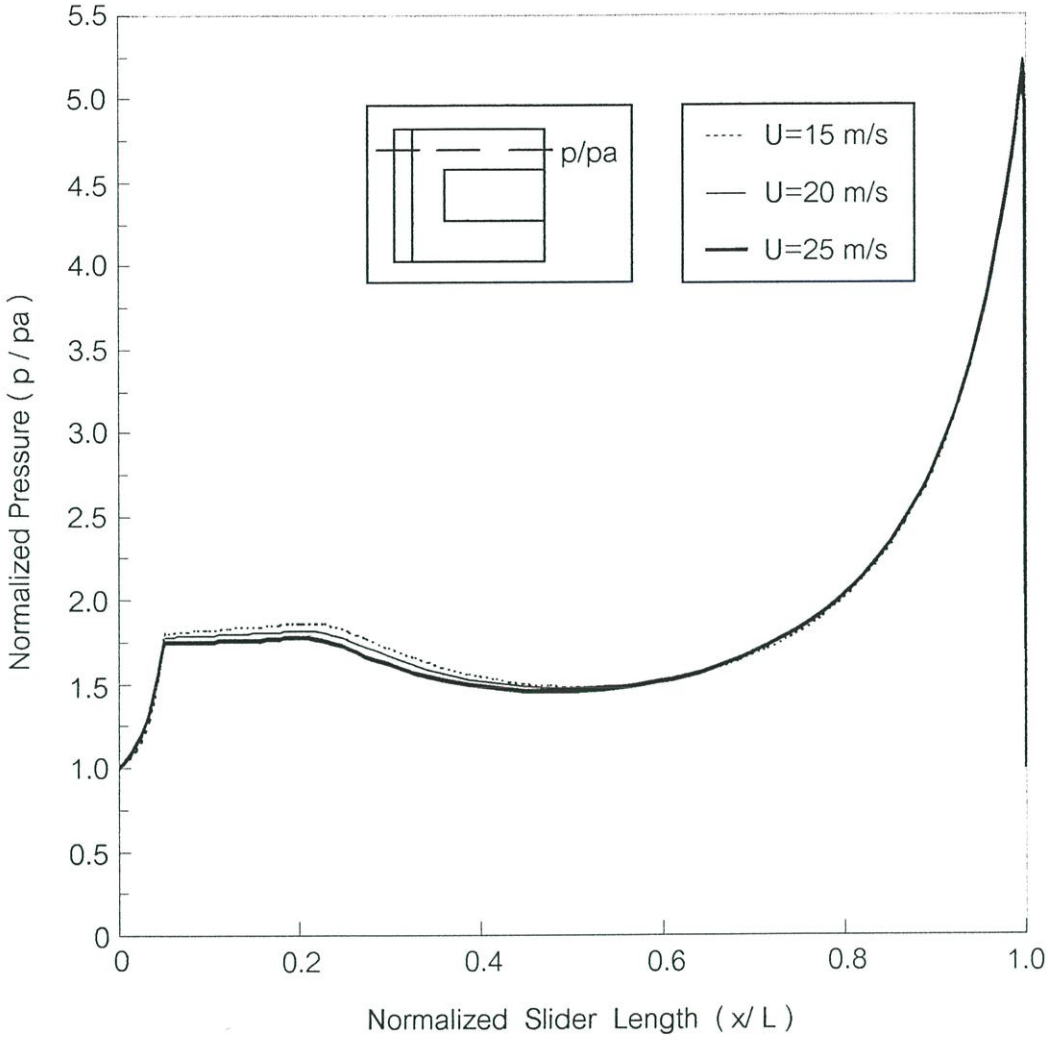
รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศในแบบไร้มิติที่กระทำกับหัวอ่าน เมื่อภาระเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 50 mN



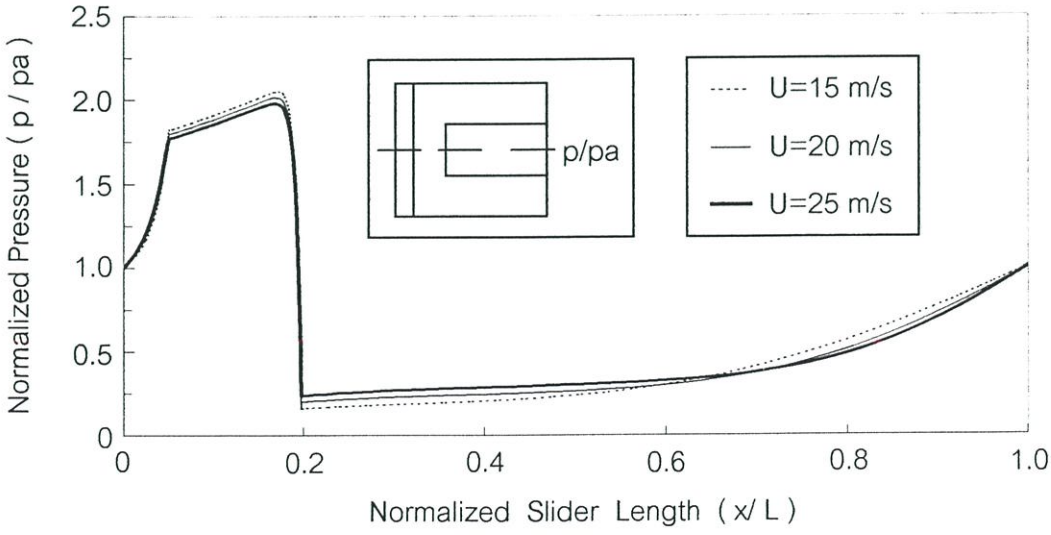
รูปที่ 5.13 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางของรางหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกร่อง



รูปที่ 5.14 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกร่อง



รูปที่ 5.15 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางของรางหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วดิสก์



รูปที่ 5.16 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วดิสก์

5.2 ผลการคำนวณในสภาวะพลวัต

ในรูปที่ 5.17-5.24 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิแดมปิ้งในรูปแบบไร้มิติ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ และความเร็วดิสก์มีค่าเท่ากับ 15 m/s , 20 m/s และ 25 m/s

ในรูปที่ 5.25-5.32 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิแดมปิ้งในรูปแบบไร้มิติ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ และภาระเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 mN ,40 mN และ 50 mN

รูปที่ 5.17 และ รูปที่ 5.25 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K11 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงจะลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.17 เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สปริง K11 จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.25 เมื่อภาระเริ่มต้นเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สปริง K11 จะมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 5.18 และ รูปที่ 5.26 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K12 มีค่าเป็นลบ และจะมีค่าน้อยลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงจะน้อยลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.18 เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สปริง K12 จะมีค่าลดลง แต่ผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์สปริง K12 จะมีค่าน้อยลง ในรูปที่ 5.26 เมื่อภาระเริ่มต้นมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สปริง K12 จะมีค่าน้อยลง

รูปที่ 5.19 และ รูปที่ 5.27 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K21 มีค่าเป็นลบ และจะมีค่าน้อยลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงจะน้อยลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยรูปที่ 5.19 จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับรูปที่ 5.18 ส่วนรูปที่ 5.27 จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับรูปที่ 5.26

รูปที่ 5.20 และ รูปที่ 5.28 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K22 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงจะน้อยลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.20 เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สปริง K22 จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์สปริง K22 จะมีค่าน้อยลง ในรูปที่ 5.28 เมื่อภาระเริ่มต้นมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สปริง K22 จะมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 5.21 และ รูปที่ 5.29 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C11 จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.21 เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C11 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในรูปที่ 5.29 เมื่อภาระเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C11จะมีค่าลดลงเล็กน้อย

รูปที่ 5.22 และ รูปที่ 5.30 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C12 จะมีการลดและเพิ่ม เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.22 เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C12 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในรูปที่ 5.30 เมื่อภาระเริ่มต้นเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C12 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

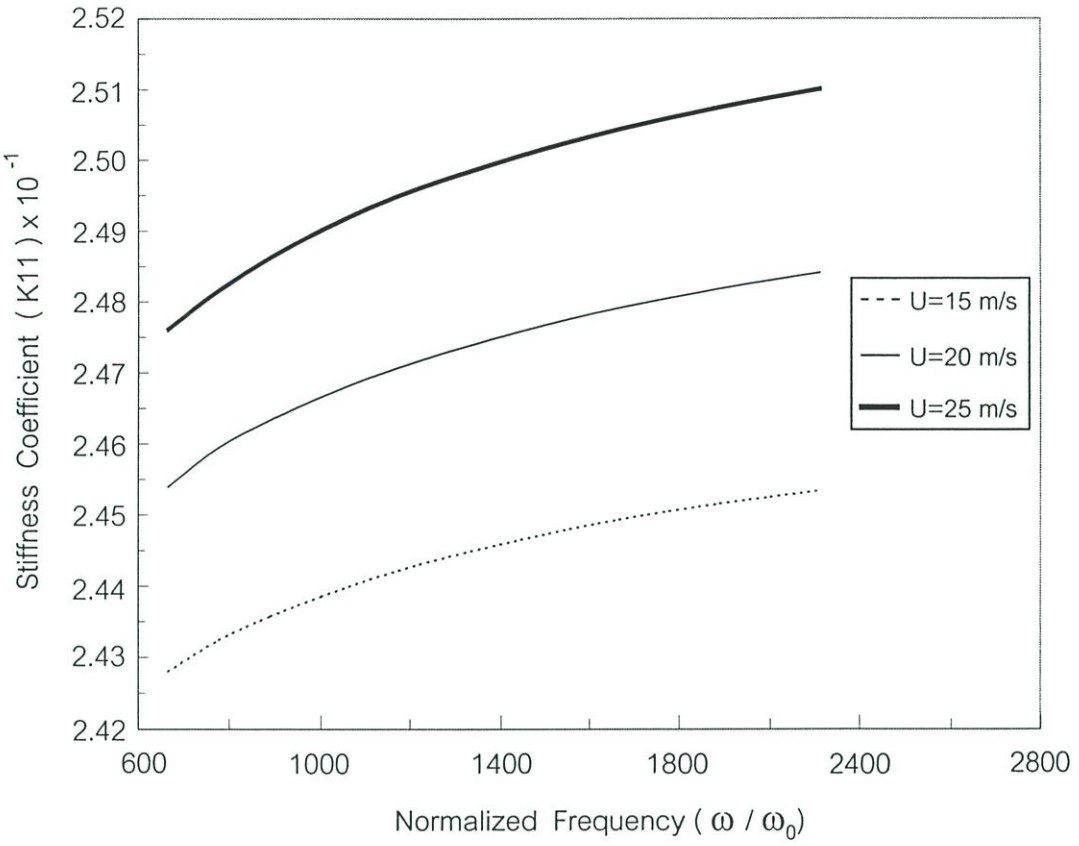
รูปที่ 5.23 และ รูปที่ 5.31 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C21 จะมีการลดและเพิ่ม เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยที่รูปที่ 5.23 จะมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับรูปที่ 5.22 ส่วน รูปที่ 5.31 จะมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับรูปที่ 5.30

รูปที่ 5.24 และ รูปที่ 5.32 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C22 มีค่าลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.24 เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C22 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในรูปที่ 5.32 เมื่อภาระเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C22 มีค่าลดลงเล็กน้อย

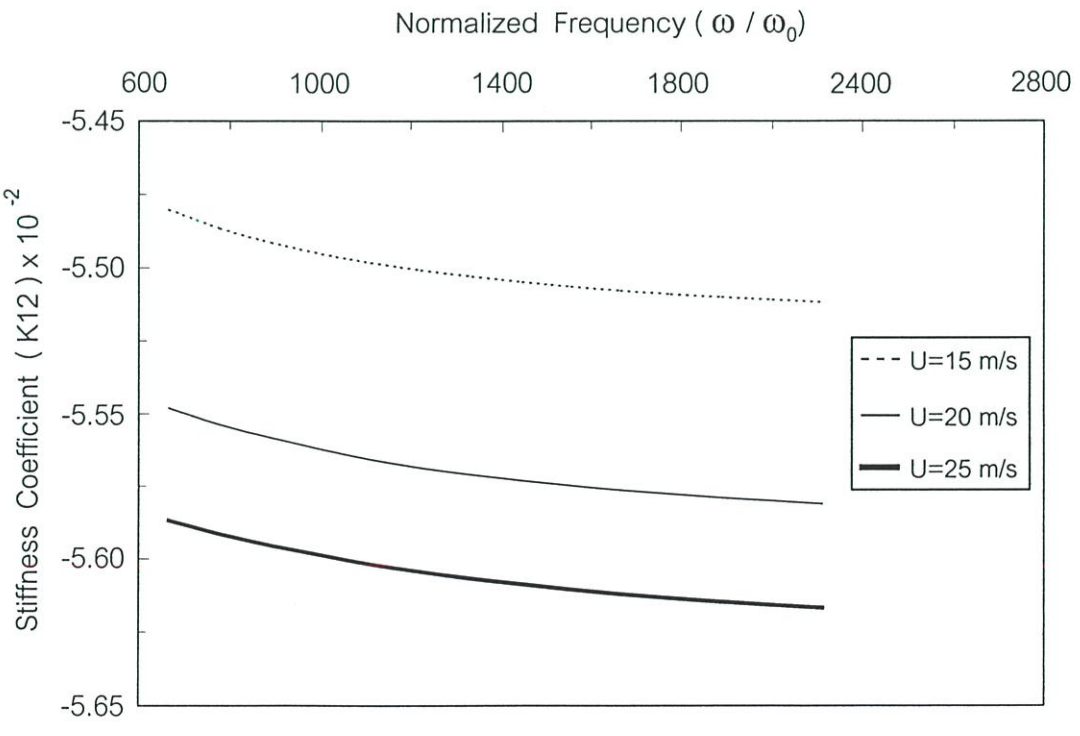
พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งจะน้อยลงจนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สปริงเข้าใกล้ค่าหนึ่ง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งจะเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น

รูปที่ 5.33-5.40 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งแบบมีหน่วย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของดิสก์และความเร็วของดิสก์มีค่าเท่ากับ 20 m/s จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สปริงจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นจนค่าสัมประสิทธิ์สปริงลู่เข้าสู่ค่าหนึ่งและจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สปริง K12 และ ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K21 จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความถี่มีค่าสูง ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อความถี่สูงขึ้นจนเข้าสู่ศูนย์ และจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์สปริง

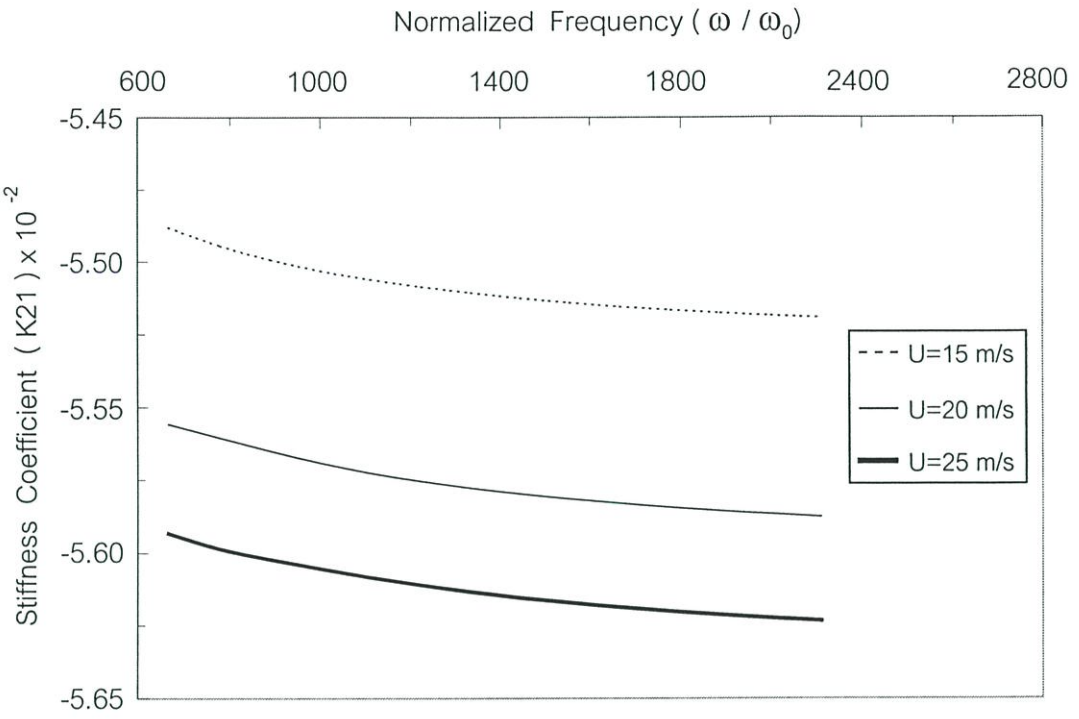
เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งแบบมีหน่วยมาทำการหาค่าความเสถียรของหัวอ่านดังในรูปที่ 5.41และ รูปที่ 5.42 โดยนำขนาดของหัวอ่านที่ได้กำหนดไว้ในสภาวะสถิตย์มาพิจารณา รูปที่ 5.41 หาค่าความเสถียรของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขการรองลื่นหัวอ่านมีความเสถียรเมื่อค่าอยู่ในขอบเขต $\frac{c+\sqrt{c^2-4ae}}{2a} \le \Omega_v^2 \le \frac{c-\sqrt{c^2-4ae}}{2a}$ ผลการคำนวณหาค่าΩ_v^2 ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์กากบาทแสดงว่าหัวอ่านที่นำมาพิจารณามีความเสถียรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขการรองลื่น กราฟของค่า $\frac{c+\sqrt{c^2-4ae}}{2a}$ มีลักษณะเพิ่มขึ้นดังนั้นเมื่อตัวเลขการรองลื่นมากขึ้นหัวอ่านจะมีโอกาสที่เสถียรมากขึ้น รูปที่ 5.42 หาค่าความเสถียรของหัวอ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของดิสก์หัวอ่านจะมีความเสถียรเมื่อ $\frac{c+\sqrt{c^2-4ae}}{2a} \le \Omega_v^2 \le \frac{c-\sqrt{c^2-4ae}}{2a}$ ซึ่งจะมีค่าในช่วงระหว่าง 0.18 x10^{11} ถึง 2.0 x10^{11} ผลการคำนวณหาค่าΩ_v^2 ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์กากบาทแสดงว่าเมื่อความถี่ของดิสก์เปลี่ยนแปลงหัวอ่านที่นำมาพิจารณาจะยังคงมีความเสถียร



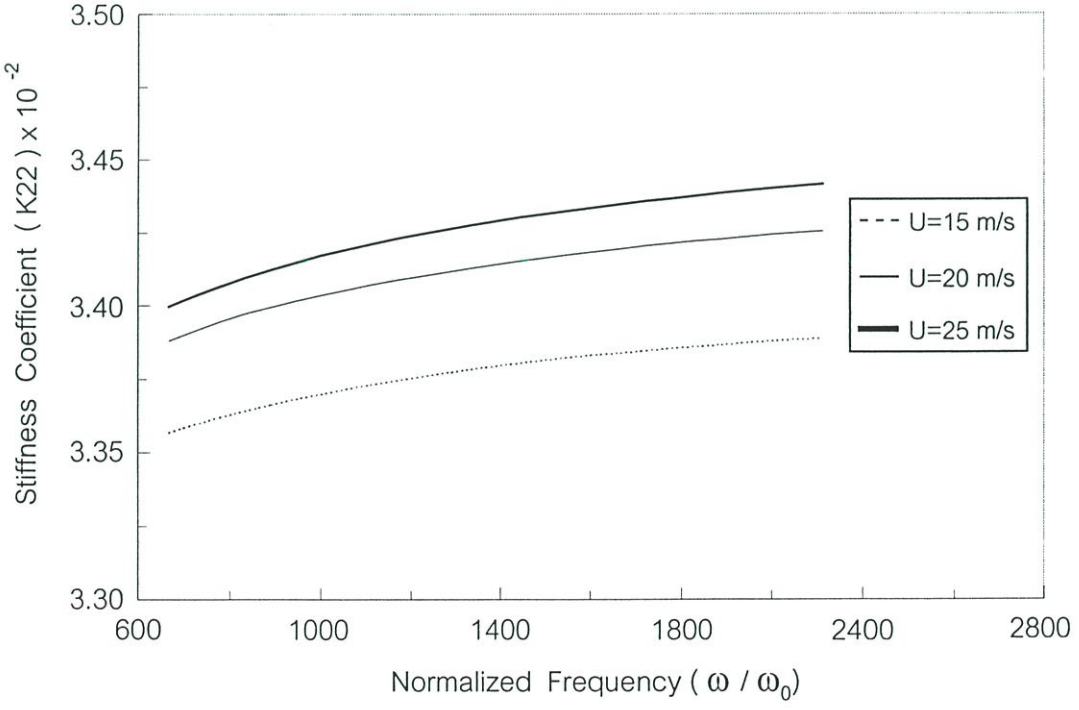
รูปที่ 5.17 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K11 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์



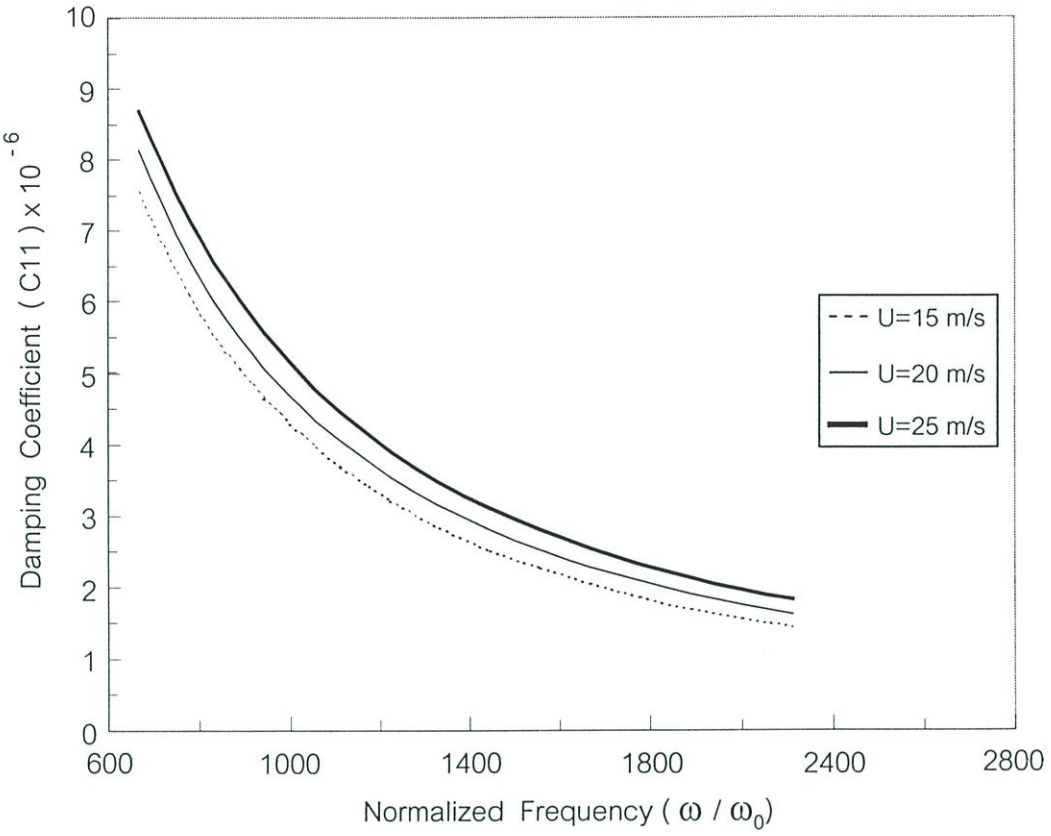
รูปที่ 5.18 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K12 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์



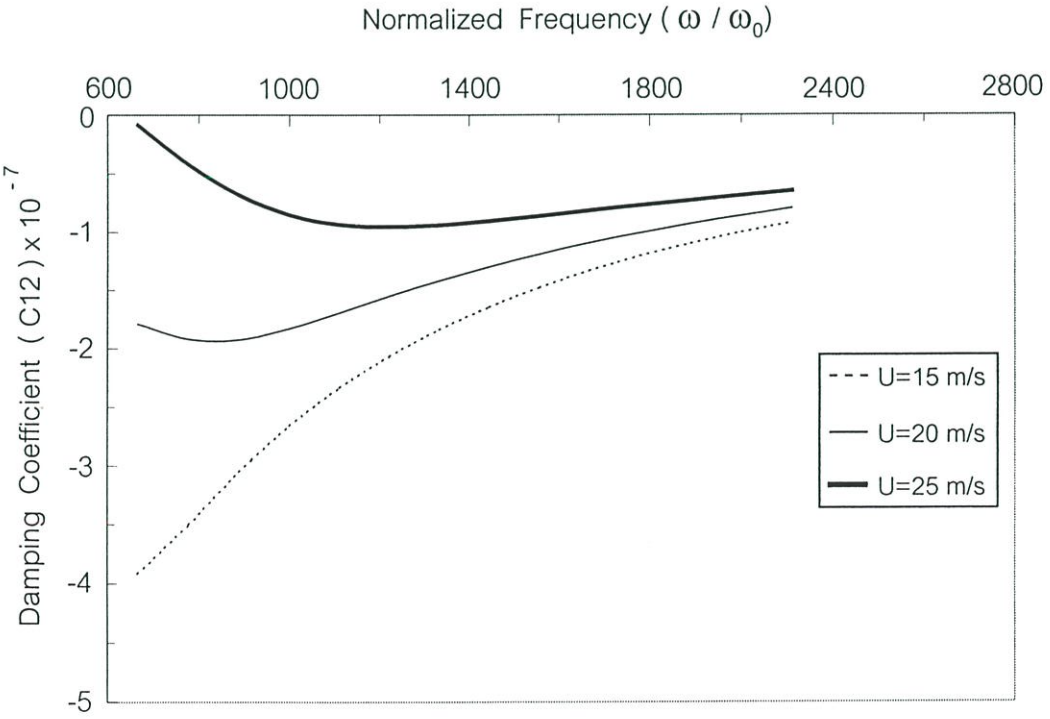
รูปที่ 5.19 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K21 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์



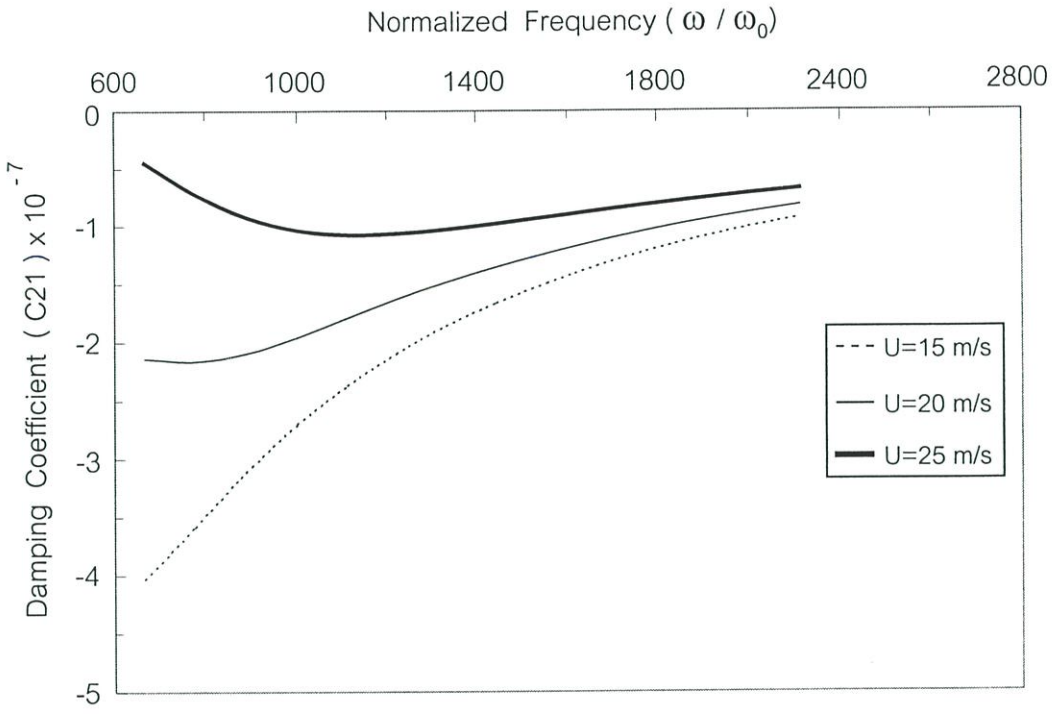
รูปที่ 5.20 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K22 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์



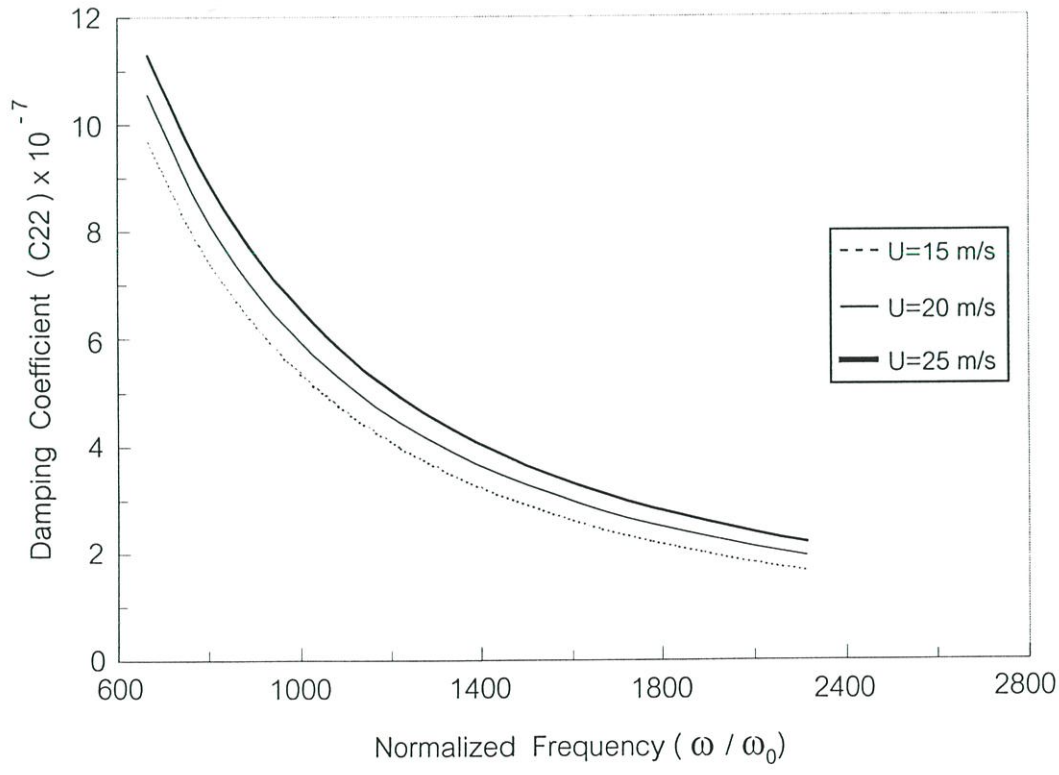
รูปที่ 5.21 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C11 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์



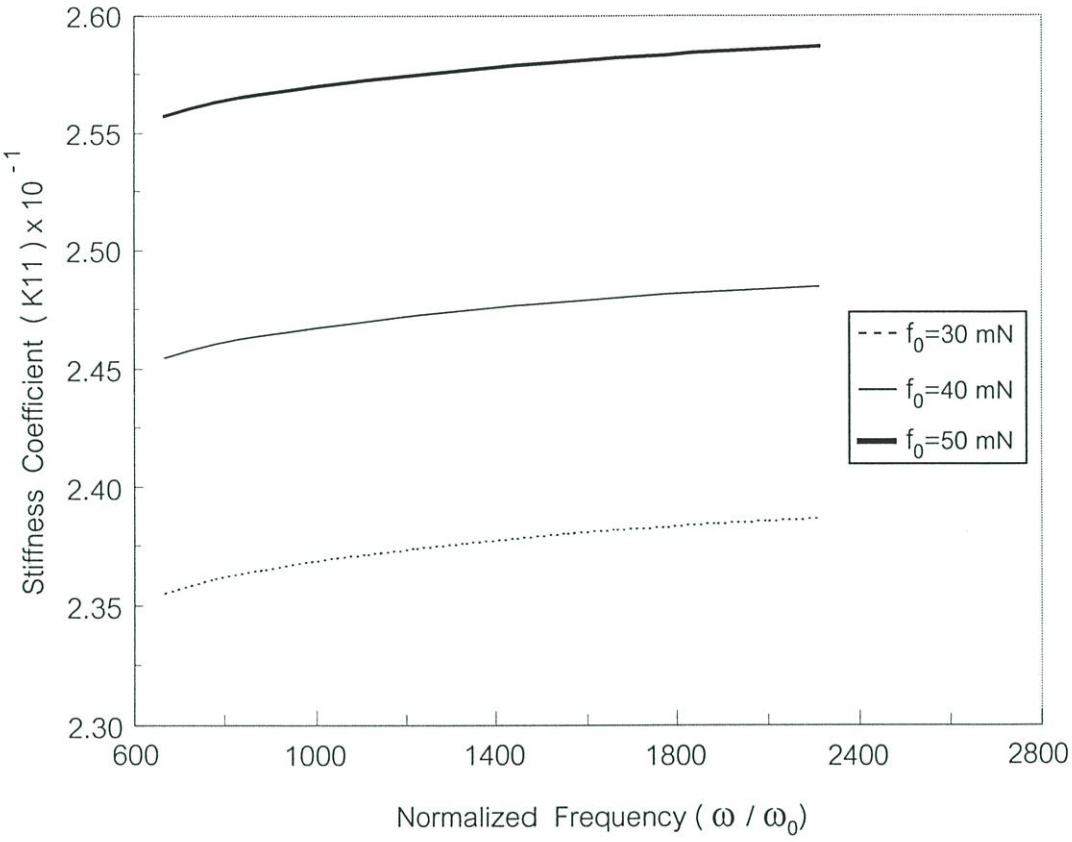
รูปที่ 5.22 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C12 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์



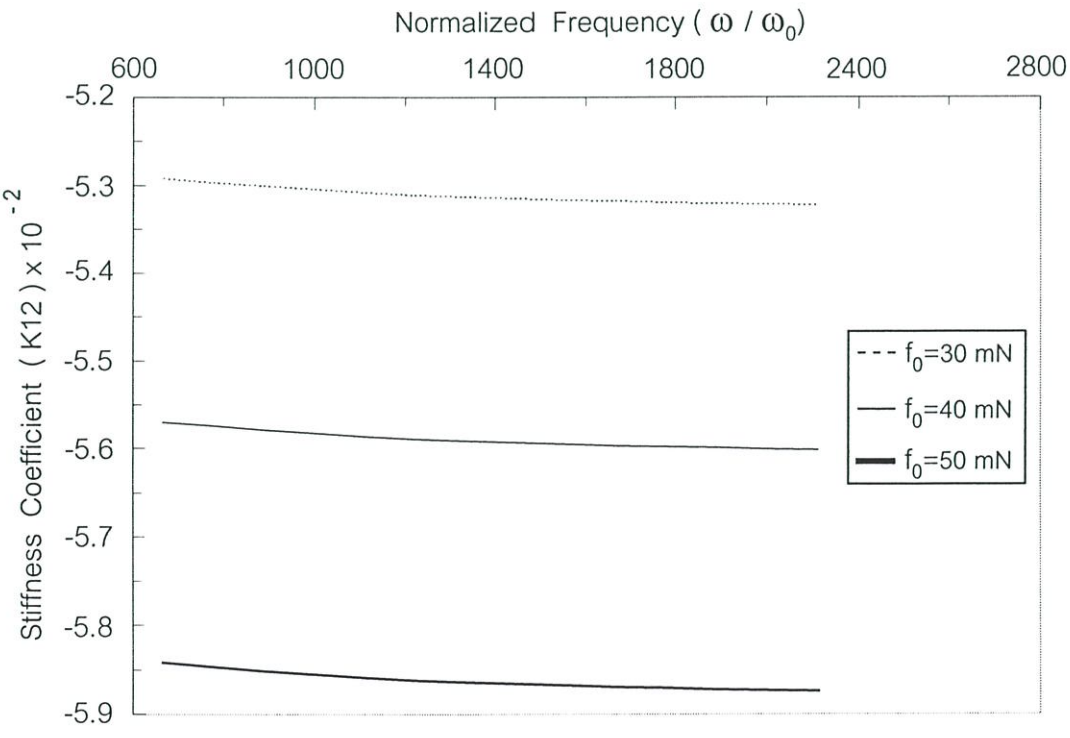
รูปที่ 5.23 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C21 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์



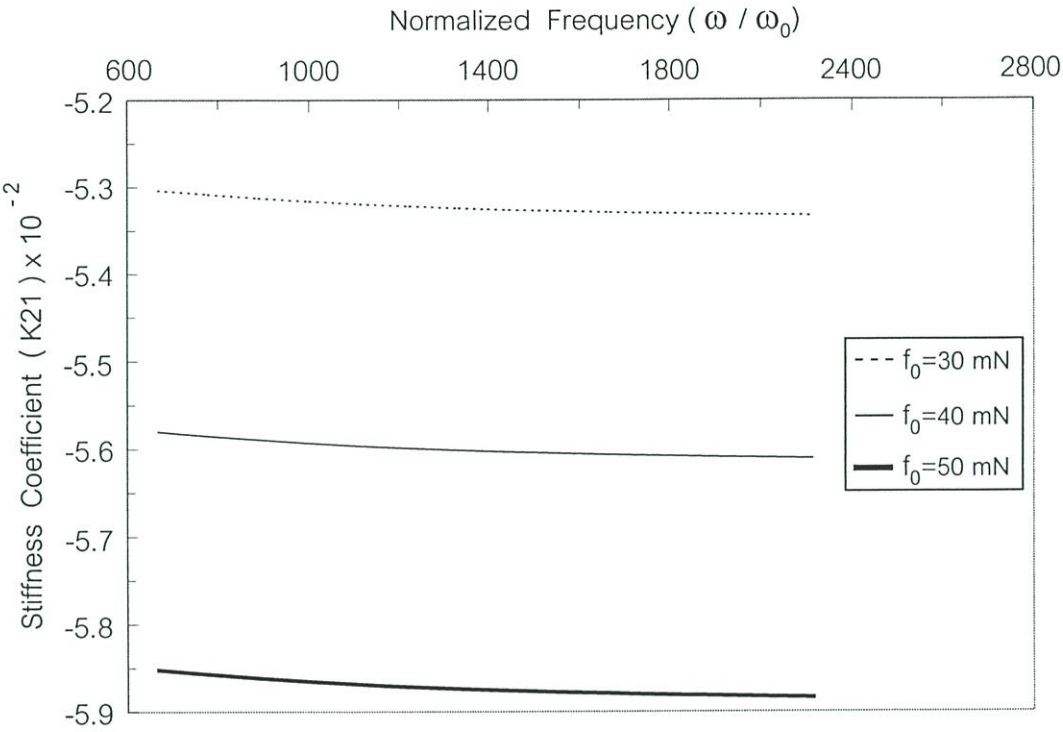
รูปที่ 5.24 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C22 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความเร็วดิสก์



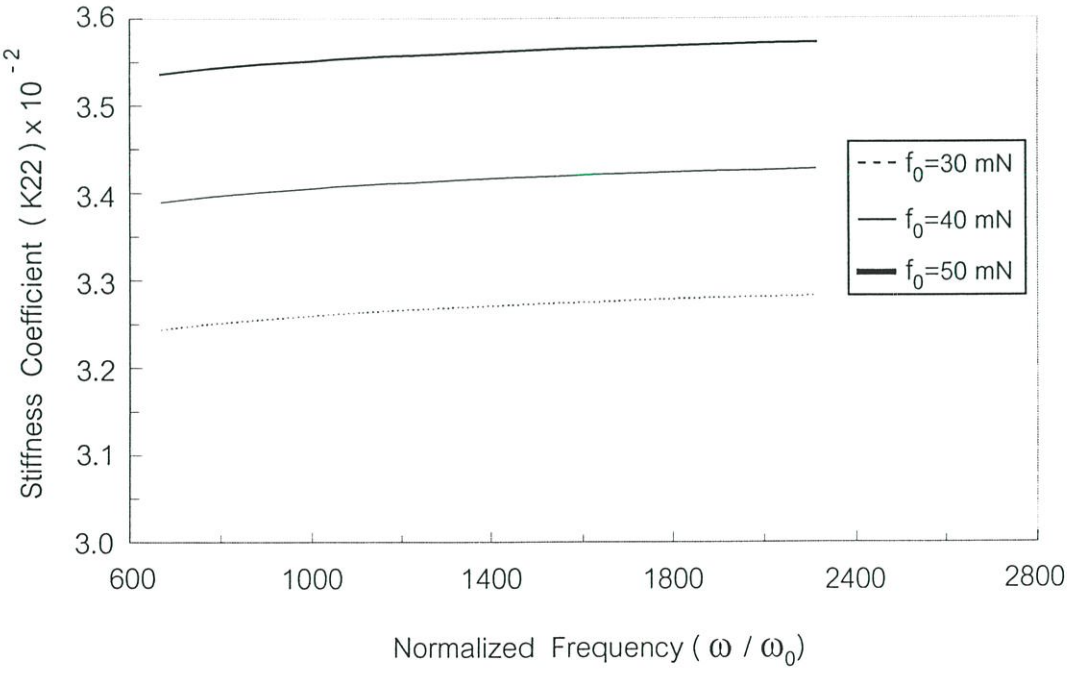
รูปที่ 5.25 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K11 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น



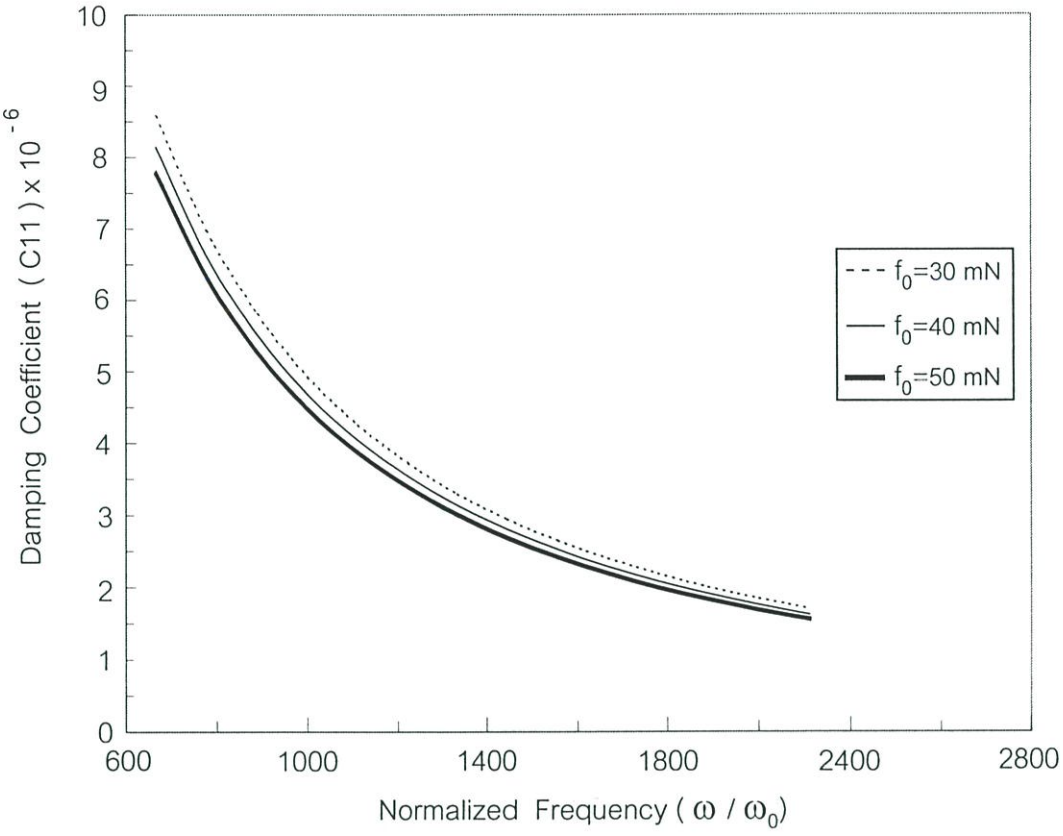
รูปที่ 5.26 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K12 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น



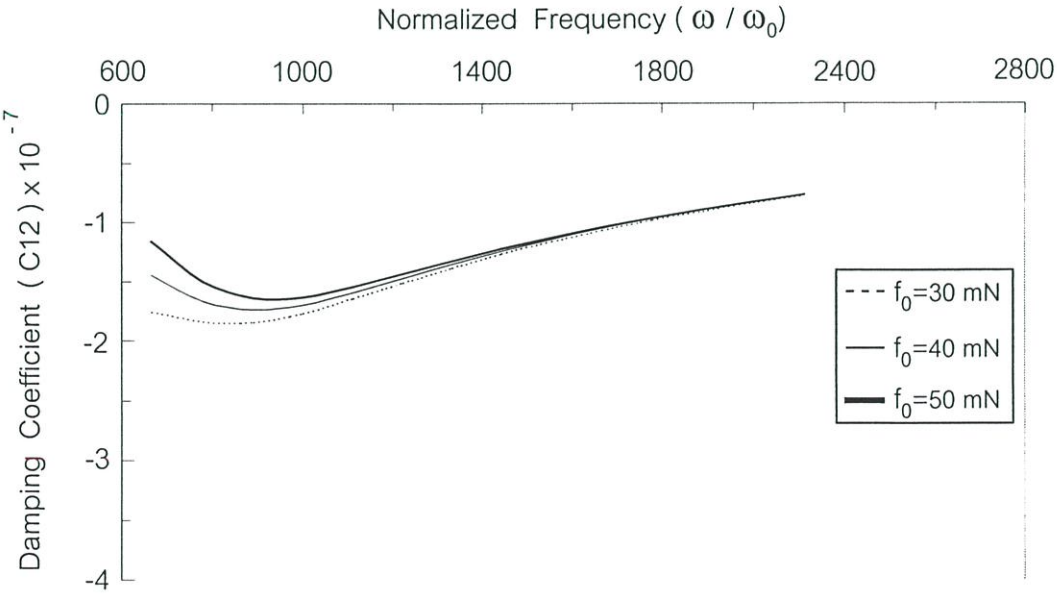
รูปที่ 5.27 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K21 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น



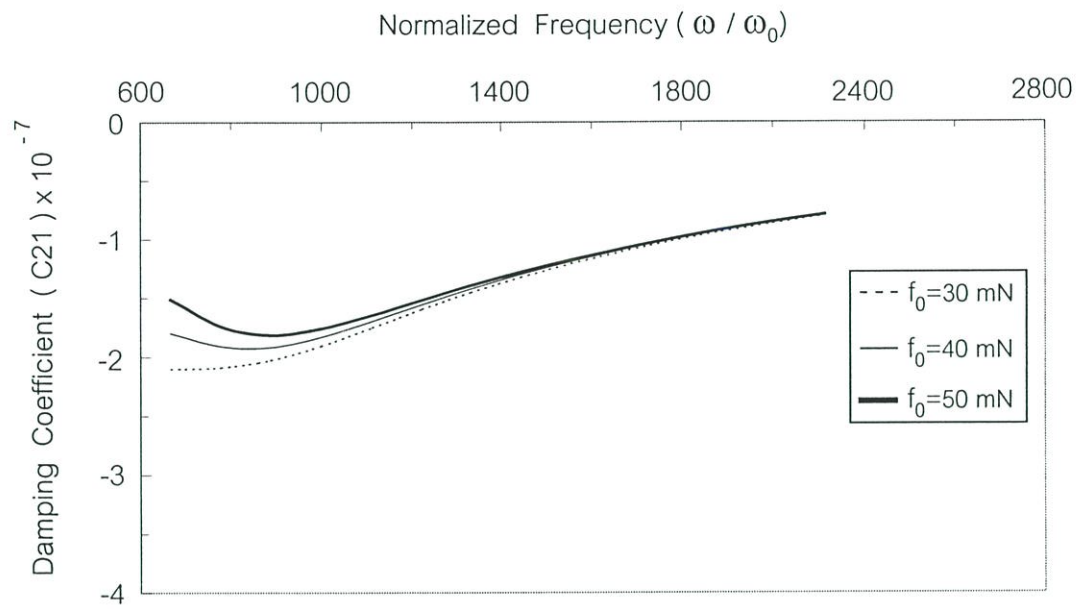
รูปที่ 5.28 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง K22 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น



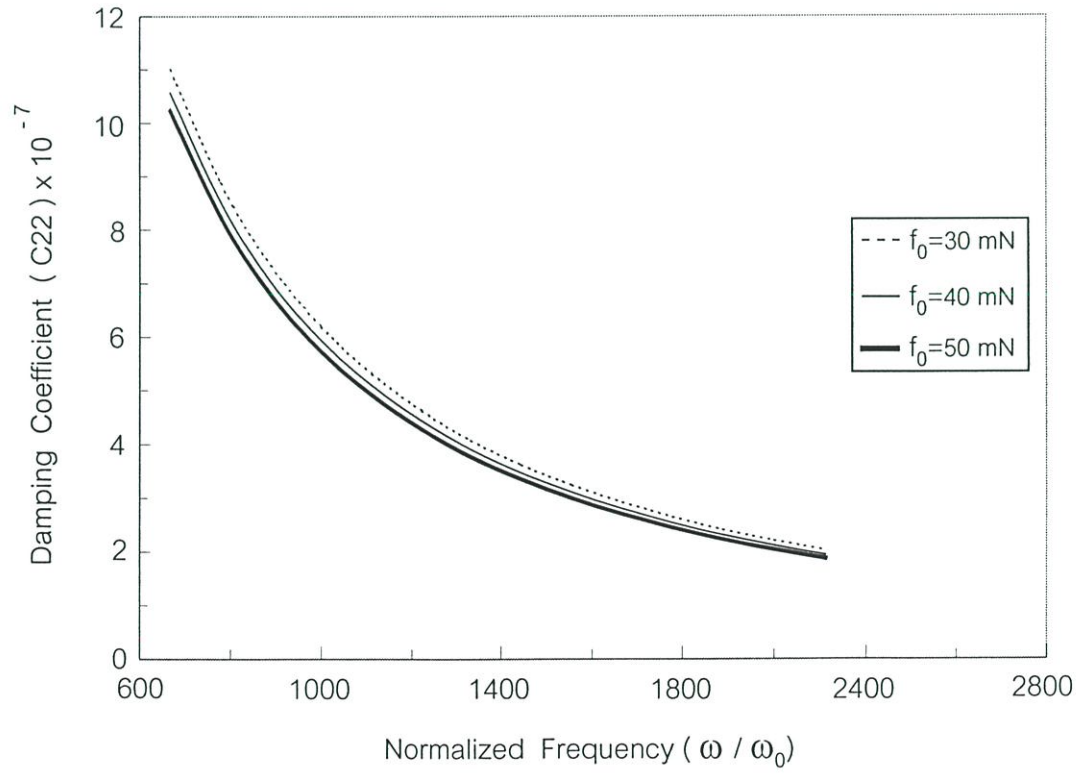
รูปที่ 5.29 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C11 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น



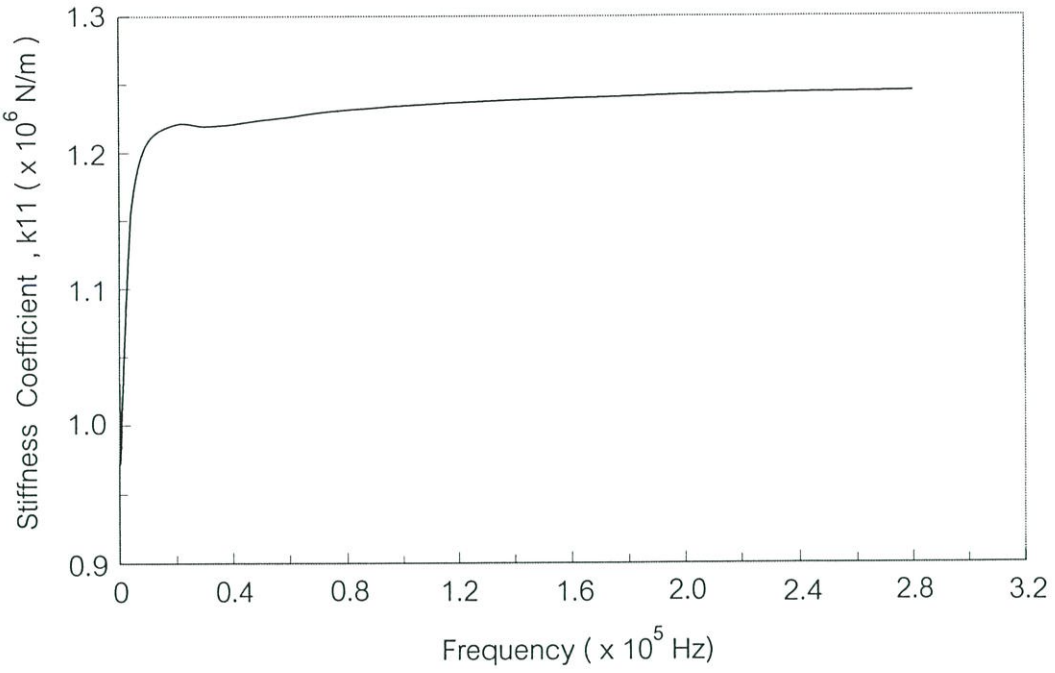
รูปที่ 5.30 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C12 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น



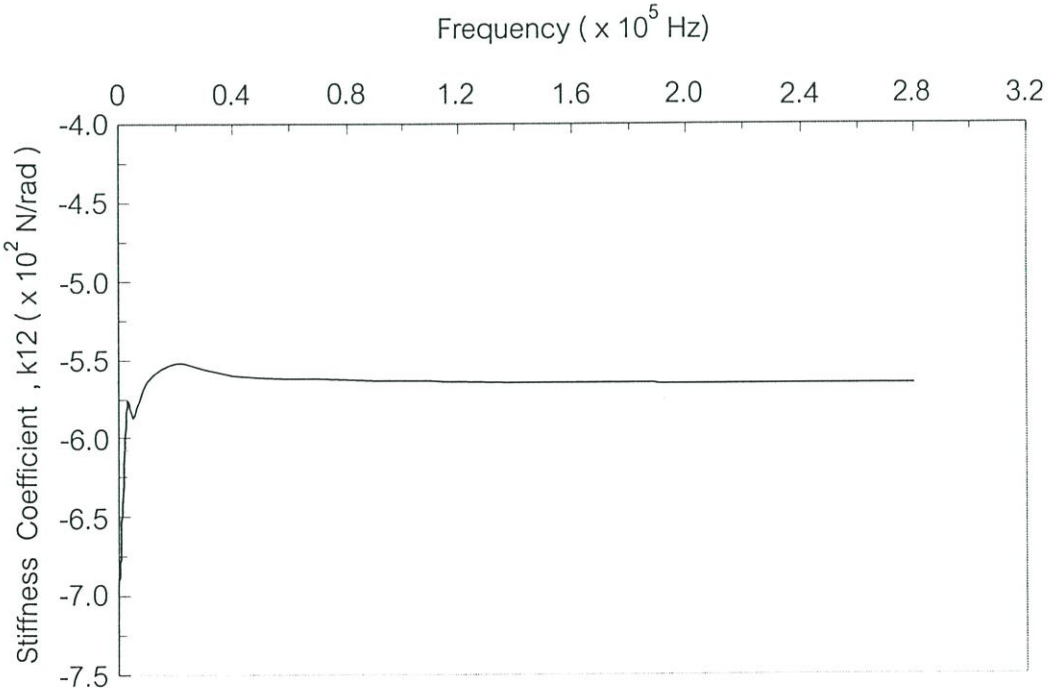
รูปที่ 5.31 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C21 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น



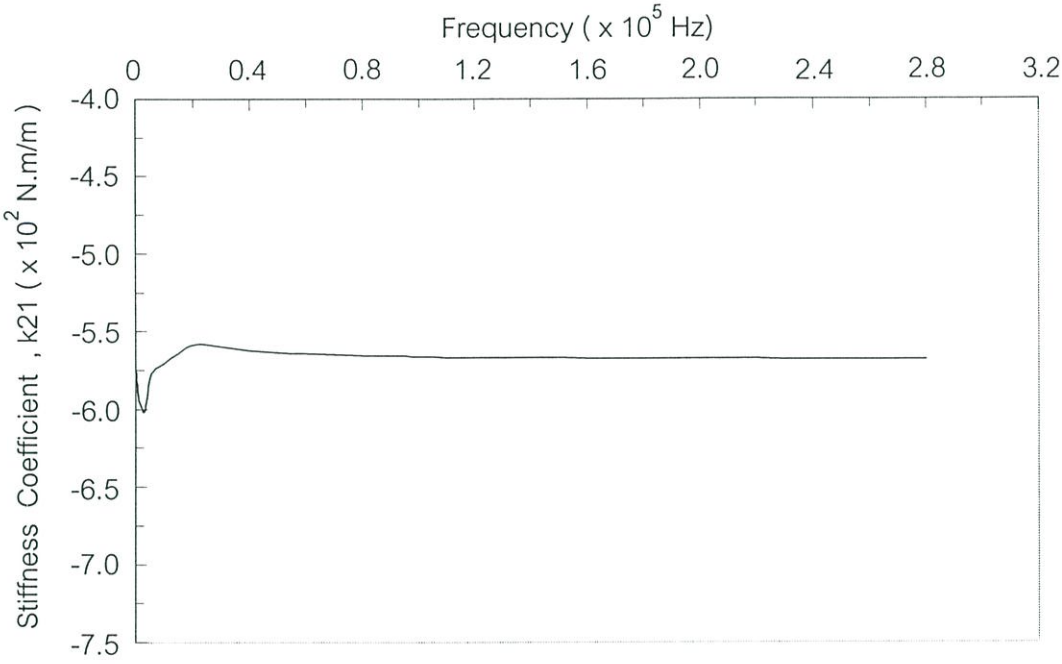
รูปที่ 5.32 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง C22 ในรูปไร้มิติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และภาระเริ่มต้น



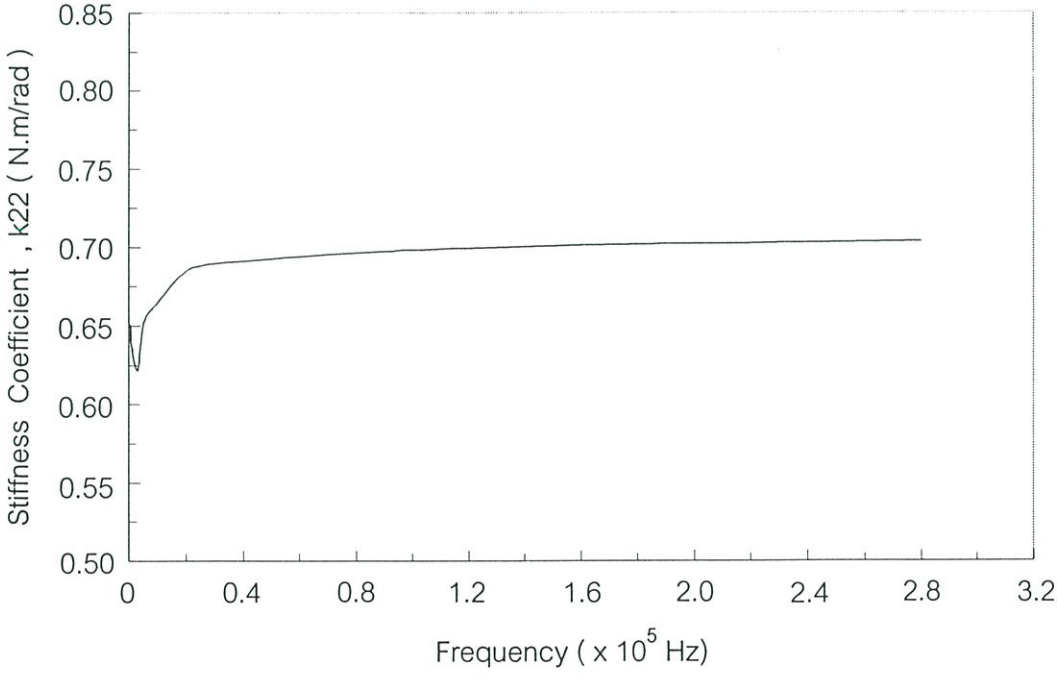
รูปที่ 5.33 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง k11 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่



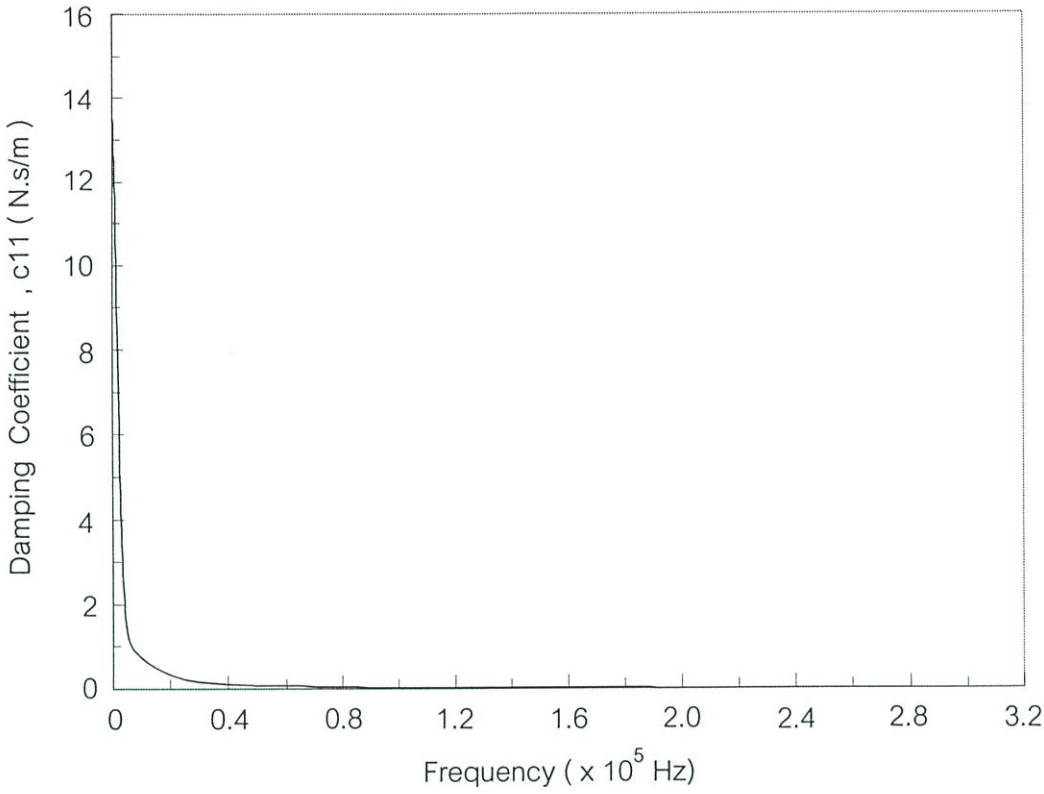
รูปที่ 5.34 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง k12 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่



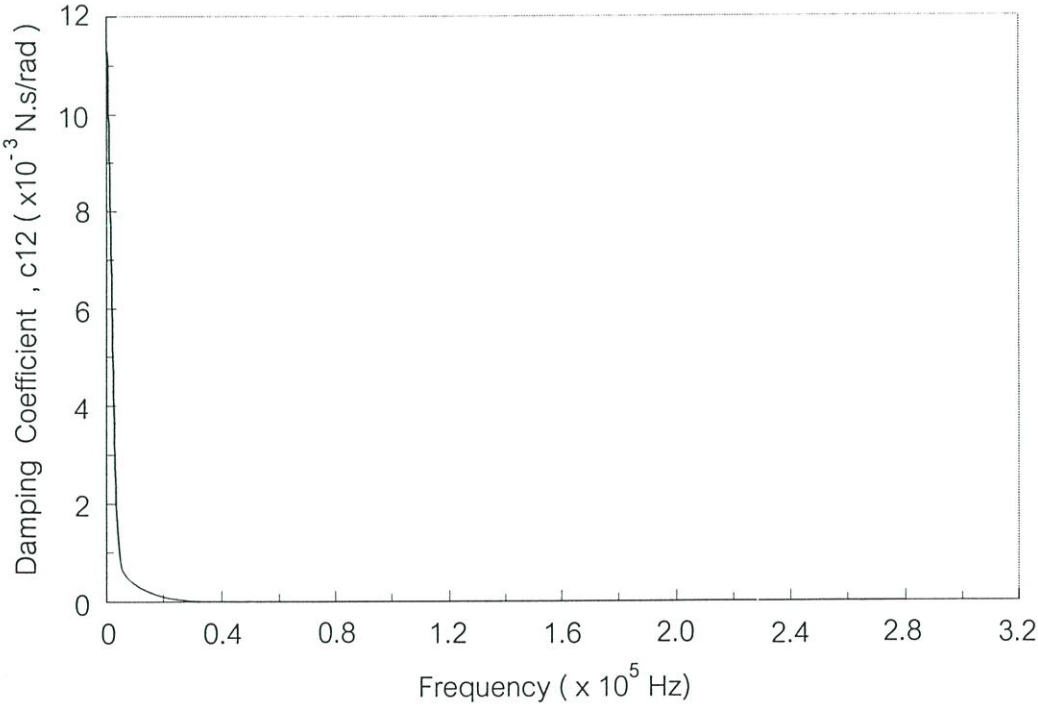
รูปที่ 5.35 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง k21 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่



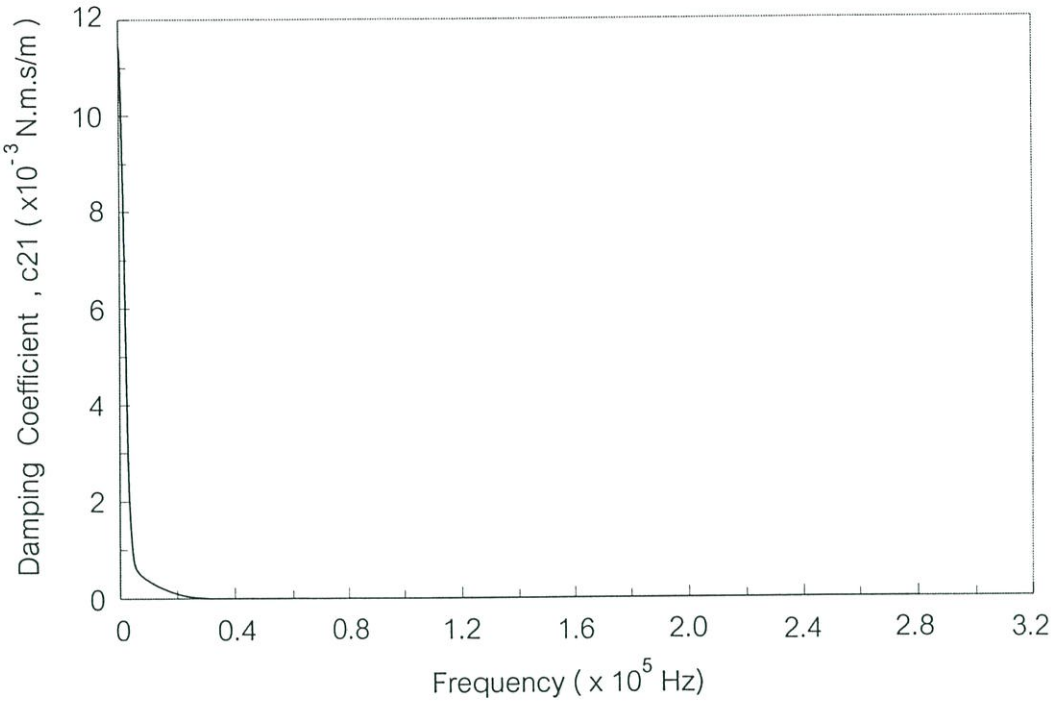
รูปที่ 5.36 ค่าสัมประสิทธิ์สปริง k22 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่



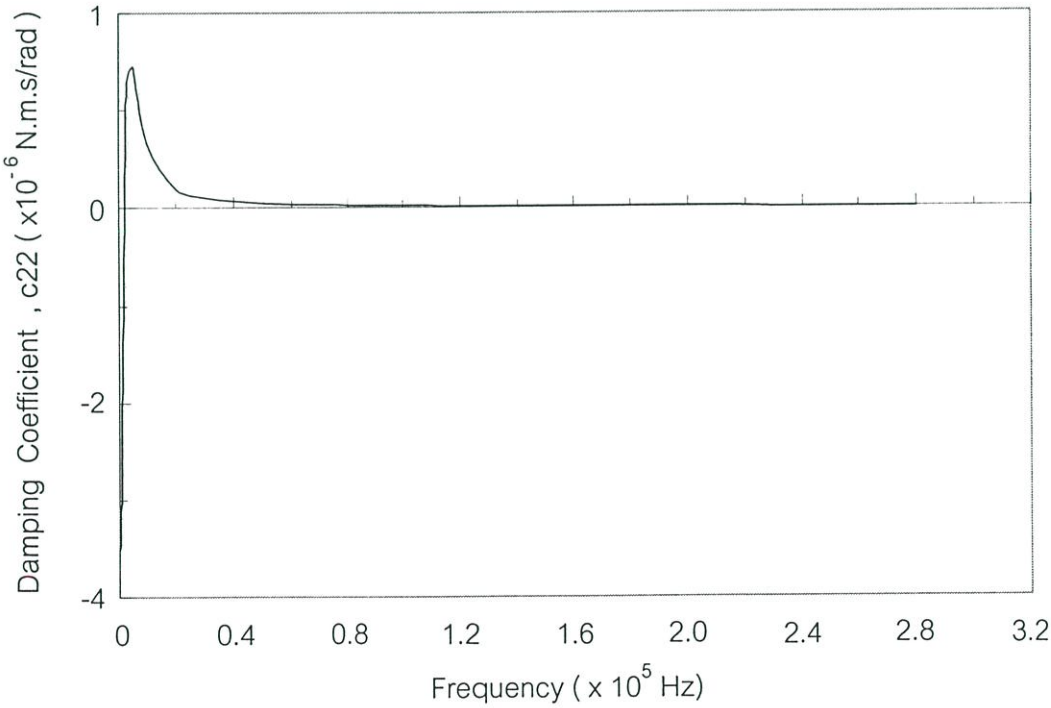
รูปที่ 5.37 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง c11 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่



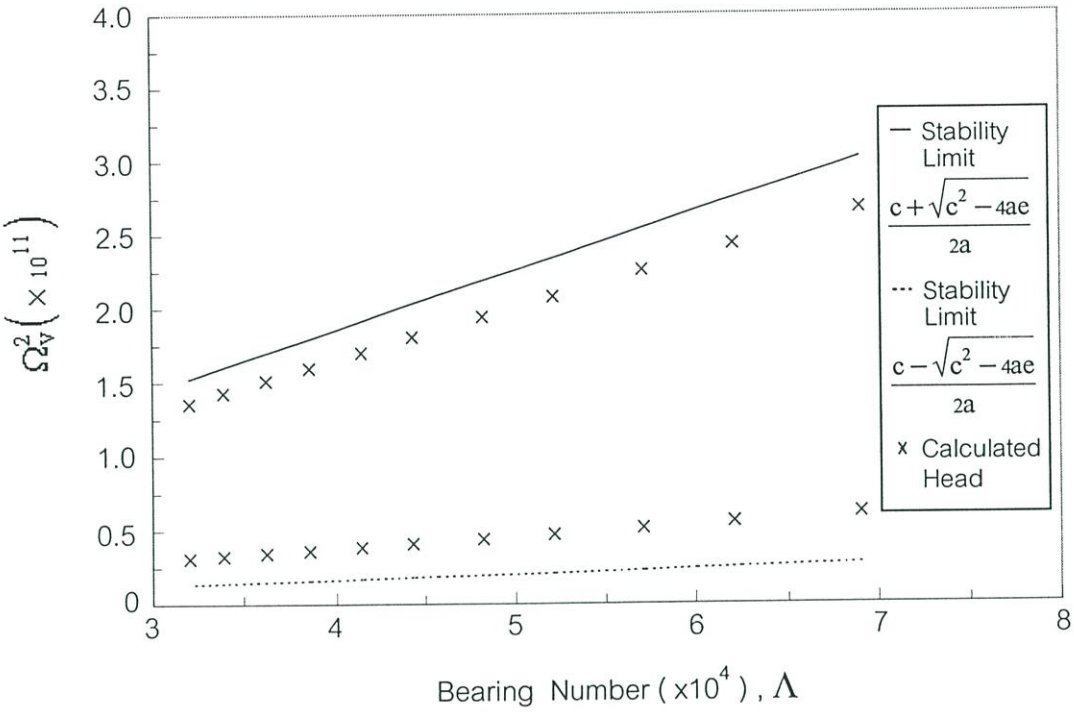
รูปที่ 5.38 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง c12 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่



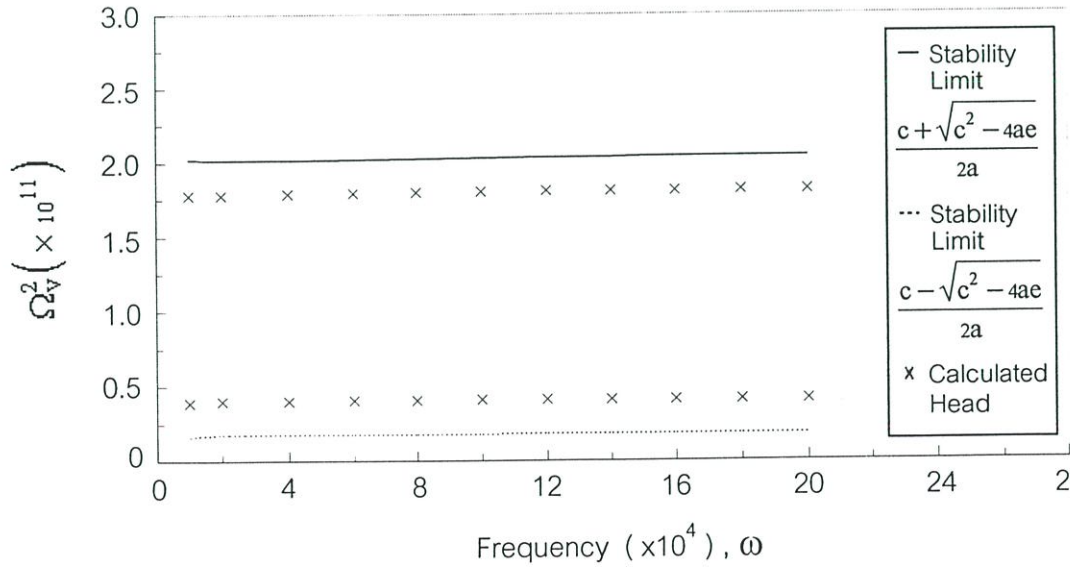
รูปที่ 5.39 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง c21 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่



รูปที่ 5.40 ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง c22 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่



รูปที่ 5.41 ความเสถียรของหัวอ่านเปรียบเทียบกับค่าการรองลื่น



รูปที่ 5.42 ความเสถียรของหัวอ่านเปรียบเทียบกับค่าความถี่

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอินเวอร์ส สเตป การคำนวณเชิงตัวเลขทำได้โดยอาศัยวิธีไดเวอร์เจนต์ฟอร์มูเลชันซึ่งเป็นวิธีปริมาตรควบคุมมาใช้คำนวณพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะสถิตย์ ส่วนการคำนวณในสภาวะพลวัตจะพิจารณาในลักษณะของโดเมนความถี่เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งเมื่อสมมติให้ผิวของดิสก์ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นซายน์ การคำนวณในสภาวะสถิตย์และสภาวะพลวัตสามารถสรุปผลการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการคำนวณในสภาวะสถิตย์

ในสภาวะสถิตย์ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพิจารณาค่าความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้าย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย ความลึกร่องของหัวอ่าน , ความเร็วของดิสก์ , ความกว้างของรางหัวอ่าน , ความยาวของส่วนลาดเอียง , มุมของส่วนลาดเอียง , ความยาวสเตป , ตำแหน่งจุดยึดจับหัวอ่าน และ ภาระเริ่มต้นที่กระทำกับหัวอ่าน สรุปได้ดังนี้

1. เมื่อความลึกของร่องเปลี่ยนแปลงจะทำให้ลักษณะการกระจายความดันและความสูงการลอยตัวเปลี่ยนแปลงไป จากกราฟความสูงการลอยตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกร่องและกราฟความสูงการลอยตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วดิสก์ ควรพิจารณาค่าความลึกร่อง 3 ไมโครเมตร เนื่องจากบริเวณนี้ทำให้ค่าความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายต่ำและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำก็มีค่าต่ำด้วย

2. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของดิสก์พบว่าหัวอ่านมีความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและขอบท้ายสูงขึ้น หัวอ่านที่มีความลึกของร่องต่างกันจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวต่างกัน โดยผลกระทบเนื่องจากความเร็วของดิสก์ที่มีต่อค่าความสูงการลอยตัวจะมีผลมากขึ้นเมื่อหัวอ่านมีความลึกร่องน้อย

3. การเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่านและการเปลี่ยนแปลงความเร็วดิสก์มีผลต่อค่าความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรอื่นๆ เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้นผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะสูงขึ้น

4. การเปลี่ยนแปลงความยาวของส่วนลาดเอียง , มุมของส่วนลาดเอียง และ ความยาวของสเตปมีผลต่อค่าความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายน้อยแต่จะมีผลต่อค่าความสูงการลอยตัวที่ขอบนำ โดยเฉพาะเมื่อมุมของส่วนลาดเอียงเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะมีค่า

ลดลงมากดังนั้นหัวอ่านจะมีความแตกต่างระหว่างความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงจึงทำให้มุมพิตช์ของหัวอ่านมีค่าน้อยลง

5. เมื่อตำแหน่งของจุดยึดจับหัวอ่านเลื่อนเข้าสู่ขอบท้ายมากขึ้น ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะลดลงส่วนความสูงการลอยตัวที่ขอบนำจะเพิ่มขึ้น หัวอ่านจะมีมุมพิตช์มากขึ้นแต่เมื่อเพิ่มภาระเริ่มต้นที่กระทำกับหัวอ่านพบว่าความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายจะมีค่าลดลง

6. กราฟการกระจายความดันบริเวณรางของหัวอ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อหัวอ่านลอยตัวต่ำลง และ ค่าความดันที่บริเวณใกล้กับขอบท้ายจะมีค่าสูงที่สุด

7. การกระจายความดันที่บริเวณร่องของหัวอ่านจะมีค่าความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ลักษณะของการกระจายความดันขึ้นอยู่กับขนาดของหัวอ่าน และจะพบว่าเมื่อความดันบริเวณร่องของหัวอ่านมีค่าความดันต่ำกว่าบรรยากาศมากขึ้นจะทำให้ความดันที่รางของหัวอ่านจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อกำหนดให้ภาระเริ่มต้นมีค่าคงที่

6.2 สรุปผลการคำนวณในสภาวะพลวัต

การคำนวณในสภาวะพลวัตจะมีเทอมของการกดอัด (Squeeze Number) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเนื่องจากเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับ เวลา , ความถี่ , ความเร็วของดิสก์ และค่าความสูงการลอยตัวต่ำที่สุด ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งจะพิจารณาให้หัวอ่านมีการเคลื่อนที่เป็นอิสระในสองทิศทาง โดยการเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับผิวของดิสก์แทนด้วยเลข 1 และ การเคลื่อนที่ในแนวหมุนรอบแกนตามขวางแทนด้วยเลข 2 ค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งในการคำนวณประกอบด้วย k11, k12, k21, k22, c11, c12, c21 และ c22 ค่าสภาวะเริ่มต้นจะนำค่าที่คำนวณได้จากการคำนวณในสภาวะสถิตย์มาพิจารณา กราฟแสดงผลการคำนวณจะทำการพิจารณาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในรูปแบบไร้มิติและรูปแบบมีหน่วย จากผลการคำนวณพบว่า

1. เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สปริงเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่ค่าค่าหนึ่งส่วนค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งจะมีการเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่ศูนย์

2. ค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งมีค่าน้อยและมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ เมื่อความเร็วดิสก์เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง c11 และ c22 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่เมื่อภาระเริ่มต้นเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง c11 และ c22 จะลดลงเล็กน้อย

3. ค่าสัมประสิทธิ์สปริงk11และ k22 จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วดิสก์หรือภาระเริ่มต้นเพิ่มขึ้น

4. เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สปริง k11 พบว่าจะมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่นๆ ดังนั้นหัวอ่านจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตั้งฉากกับผิวดิสก์น้อย

5. เมื่อความถี่มีค่าต่ำๆฟิล์มอากาศจะมีค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งสูงกว่าในกรณีที่ความถี่สูง

6. หัวอ่านจะมีความเสถียรเมื่อ Ω_v^2 ที่คำนวณได้จากสมการหาค่าความเสถียรมีค่าอยู่ภายในขอบเขต $\frac{c+\sqrt{c^2-4ae}}{2a} \leq \Omega_v^2 \leq \frac{c-\sqrt{c^2-4ae}}{2a}$ จะพบว่าหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาพิจารณามีความเสถียรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขการรองลื่นหรือค่าความถี่ของดิสก์

6.3 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ใช้การคำนวณโดยอาศัยปริมาตรควบคุมซึ่งเหมาะกับหัวอ่านที่นำมาศึกษาเนื่องจากยังคงมีความซับซ้อนไม่มากนัก แต่เนื่องจากลักษณะของการแบ่งกริดเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมและจะต้องใช้กริดจำนวนมากขึ้นเมื่อหัวอ่านมีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำวิธีปริมาตรควบคุมไปใช้กับหัวอ่านที่มีความซับซ้อนมากๆควรหาวิธีการแบ่งกริดให้เหมาะสม ส่วนการศึกษาวิจัยต่อควรศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจากสภาวะแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ , ความดัน , ความชื้น , ความหยาบ เพื่อให้การจำลองพฤติกรรมของหัวอ่านใกล้เคียงกับสภาวะการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

[1] Bhushan B. **Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices.** Springer – Verlag.

[2] Cha E. 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.

[3] Hu Y. and Bogy D.B. "Solution of the Rarefied Gas Lubrication Equation Using an Additive Correction Based Multigrid Control Volume Method." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 120, April 1998. pp. 280 – 288.

[4] 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.

[5] Tagawa N. and Bogy D.B. "Air Film Dynamics for Micro-Textured Flying Head Slider Bearings in Magnetic Hard Disk Drives." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 124, July 2002. pp. 568 – 574.

[6] Zeng Q.H. and Bogy D.B. "Stiffness and Damping Evaluation of Air Bearings With High Damping." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 121, April 1999. pp. 341 – 347.

[7] Hu Y. Jones P.M. and Li K."Air Bearing Dynamics of Sub-Ambient Pressure Sliders During Dynamic Unload." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 121, July 1999. pp. 553 – 559.

[8] Tagawa N. Mori A. Kajitani H. and Hashimoto M."Dynamics for Micromachined Mother Ship Negative Pressure Slider Bearings With an Integrated Microsuspension Mechanism in Proximity Magnetic Recording." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 121, October 1999. pp. 989 – 994.

[9] White J.W. "Flying Characteristics of the Transverse and Negative Pressure Contour ("TNP") Slider Air Bearing ." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 119, April 1997. pp. 241 – 249.

[10] Hu Y. and Bogy D.B. "Dynamic Stability and Spacing Modulation of Sub-25 nm Fly Height Sliders." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 119, October 1997. pp. 646 – 652.

[11] Zeng Q.H. Chen L.S. and Bogy D.B. "A Modal Analysis Method for Slider-Air Bearings in Hard Disk Drives." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 33, September 1997. pp. 3124 – 3126.

[12] Hardie C. Menon A. Crane P. and Egbert D. "Analysis and Performance Characteristics of the Seagate Advanced Air Bearing Slider." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 30, March 1994. pp. 424 – 432.

[13] Jayson E.M. Murphy J. Smith P.W. and Talke F.E."Effects of Air Bearing Stiffness on a Hard Disk Drive Subject to Shock and Vibration." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 125, April 2003. pp. 343 – 349.

[14] Chapin M. and Bogy D.B. "Air Bearing Force Measurement of Pico Negative Pressure Sliders During Dynamic Unload ." Tran. ASME Journal of Tribology, vol. 122, October 2000. pp. 771 – 775.

[15] White J.W. "Dynamic Simulation of the Zero-Load Slider Bearing." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 19 ,No. 5, September 1983. pp. 1668 – 1670.

[16] Tanaka K. Takeuchi Y. Terashima S. Odaka T. and Saitoh Y."Measurements of Transient motion of Magnetic Disk Slider." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 20, No. 5, September 1984. pp. 924 – 926.

[17] Iida K. Ono K. and Yamane M. "Dynamic Characteristics and Design Consideration of a Tripad Slider in the Near-Contact Regime." Tran. ASME Journal of Tribology, vol. 124, July 2002. pp. 600 – 606.

[18] Ono K. and Takahashi K. "Analysis of Bouncing Vibrations of a 2-DOF Tripad Contact Slider Model With Air Bearing Pads Over a Harmonic Wavy Disk Surface." Tran. ASME. Journal of Tribology, vol. 121, October 1999. pp. 939 – 947.

[19] Lu S. Hu. Y. O'Hara M. and Bogy D.B. "Air Bearing Design, Optimization, Stability Analysis and Verification for Sub-25 nm Flying." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 32,No. 1, January 1996. pp. 103 –109.

[20] Yoneoka S. Katayama M. Ohwe T. Mizoshita Y. and Yamada T."A Negative Pressure Microhead Slider for Ultralow Spacing With Uniform Flying Height." IEEE. Transaction on Magnetics, vol. 27,No. 6, November 1991. pp. 5085 –5087.

[21] Kanu G. Ashar **Magnetic Disk Drive Technology Heads, Media, Chanel, Interfaces, and Integration** IEEE. Press.

[22] Singiresu S. Rao **Mechanical Vibrations** Addison-Wesley.

[23] Bernard J. Hamrock **Fundamental of Fluid Film Lubrication** McGraw – Hill.

[24] สุดารัตน์ แคว้นเขาเม็ง "การจำลองพฤติกรรมของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้า" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543.

[25] เมษา มณฑิราลัยพร "แบบจำลองทางความร้อนของหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม เครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546.

[26] วลีพรรณ กันเนื่อง "พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านชนิดฟิล์มบางมาก" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม เครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

โครงสร้างโปรแกรมการคำนวณ

โปรแกรมหลัก (Main Program) ประกอบด้วยโปรแกรมย่อย (Subroutine) ทำหน้าที่ต่างๆดังนี้

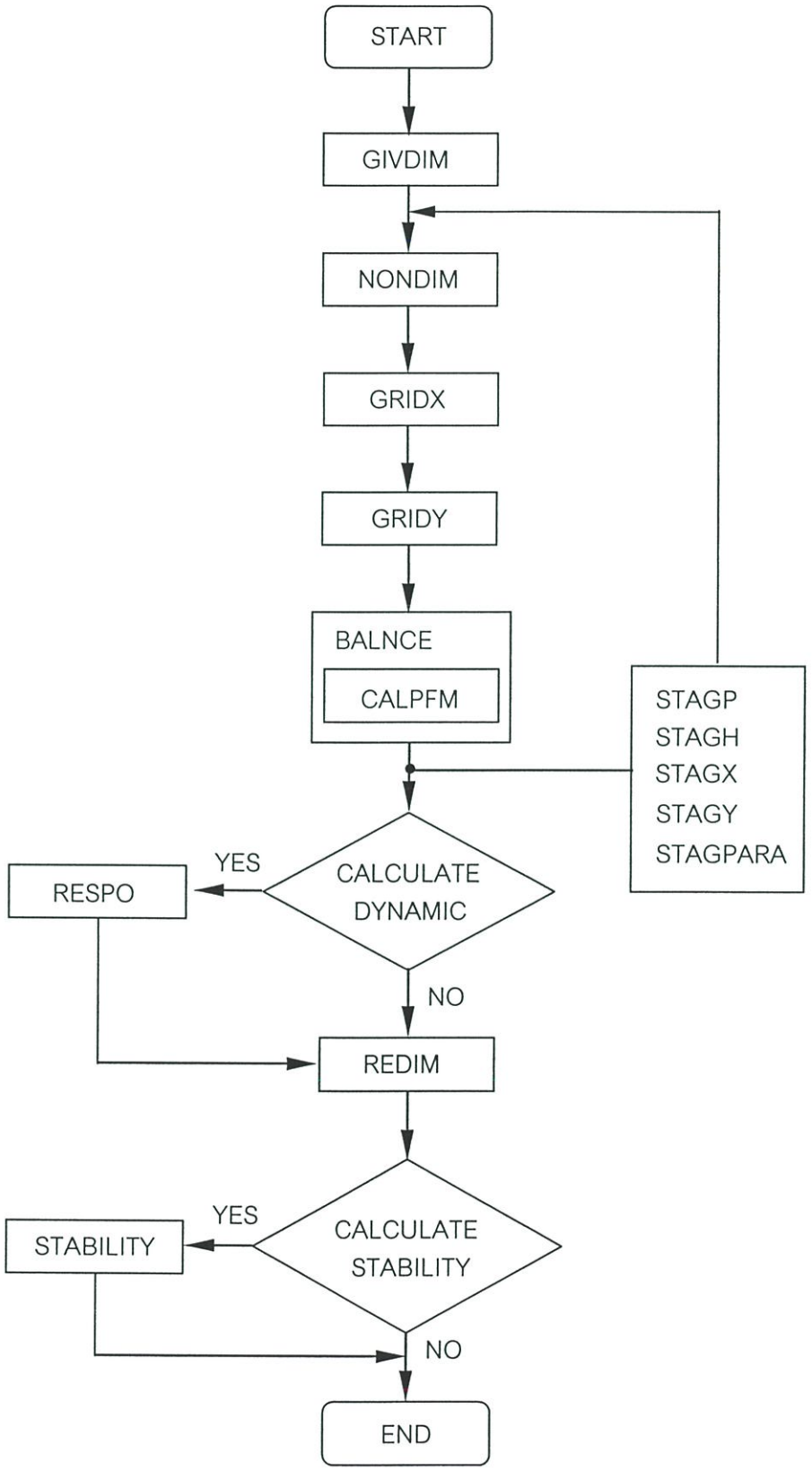
GIVDIM	กำหนดขนาดและค่าเริ่มต้นในการคำนวณ
NONDIM	จัดตัวแปรให้อยู่ในรูปไร้มิติ
GRIDX	แบ่งกริดตามแนวยาวของหัวอ่าน
GRIDY	แบ่งกริดตามแนวขวางของหัวอ่าน
BALNCE	หาสมดุลการเคลื่อนที่ในพฤติกรรมสถิตย์
REDIM	จัดค่าที่คำนวณได้ให้อยู่ในรูปมีหน่วย
CALPFM	คำนวณพฤติกรรมสถิตย์ของหัวอ่าน
RESPO	หาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งในสภาวะพลวัต
STABILITY	หาค่าความเสถียรของหัวอ่าน
STAGP	เก็บค่าความดัน
STAGH	เก็บค่าความสูงการลอยตัว
STAGX	เก็บค่าตำแหน่งกริดตามแนวยาวของหัวอ่าน
STAGY	เก็บค่าตำแหน่งกริดตามแนวขวางของหัวอ่าน
STAGPARA	เก็บค่าพารามิเตอร์ของหัวอ่าน

โปรแกรมย่อย CALPFM คำนวณพฤติกรรมสถิตย์ของหัวอ่านประกอบด้วยโปรแกรมย่อยๆดังนี้

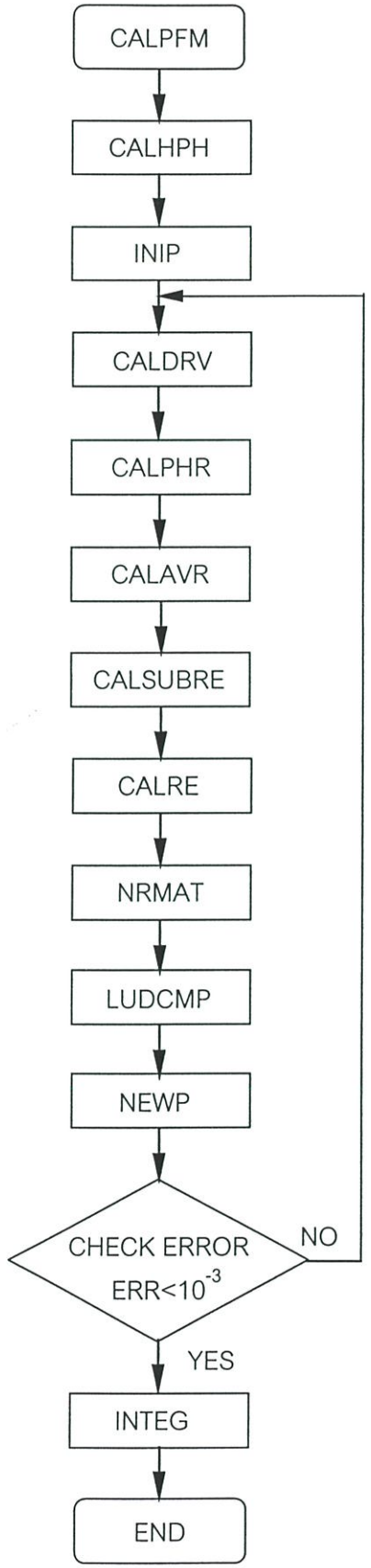
CALHPH	กำหนดค่าความหนาฟิล์มเริ่มต้น
INIP	กำหนดค่าความดันเริ่มต้น
CALDRV	หาค่าอนุพันธ์ต่างๆ
CALPHR	หาค่าตัวประกอบการไหล(∅)
CALAVR	หาค่าเฉลี่ยที่จุด A,B,C,D
CALSUBRE	หาค่าเทอมย่อยของสัมประสิทธิ์(A0-A9)
CALRE	จัดรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์ (A0-A9)
NRMAT	จัดค่าสัมประสิทธิ์ของสมการในรูปเมตริก
LUDCMP	แก้เมตริกหาค่าด้วยวิธีแอลยู
NEWP	เปรียบเทียบค่าความดันเก่ากับความดันใหม่
INTEG	คำนวณหาแรงและโมเมนต์

โปรแกรมย่อย RESPO คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์แดมปิ้งของหัวอ่านประกอบด้วยโปรแกรมย่อยๆดังนี้

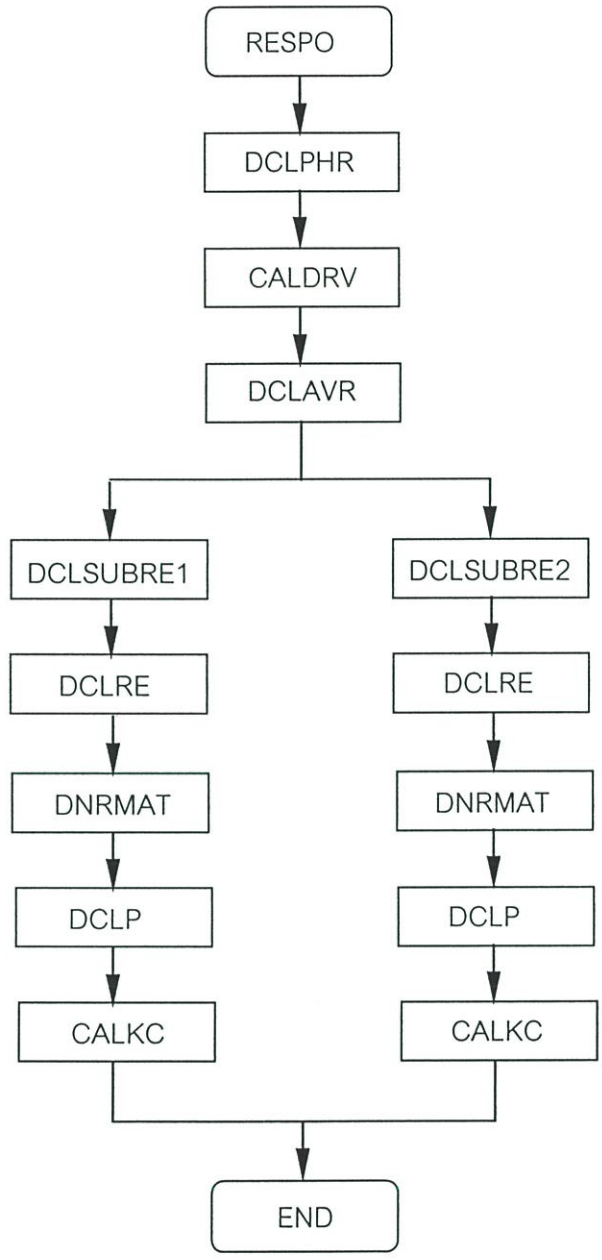
DCLPHR	คำนวณค่าที่เกี่ยวของกับตัวประกอบการไหล(∅)
CALDRV	หาค่าอนุพันธ์ต่างๆ
DCLAVR	หาค่าเฉลี่ยที่จุด A,B,C,D
DCLSUBRE1	หาค่าเทอมย่อยของสัมประสิทธิ์(A0-A9)ที่เกี่ยวข้องกับP1
DCLSUBRE2	หาค่าเทอมย่อยของสัมประสิทธิ์(A0-A9)ที่เกี่ยวข้องกับP2
DCLRE	จัดรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์ (A0-A9)
DNRMAT	จัดค่าสัมประสิทธิ์(A0-A9)ของสมการในรูปเมตริก
DCLP	คำนวณหาค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของความดัน
CALKC	คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและสัมประสิทธิ์แดมปิ้ง



รูปที่ ก.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมหลัก



รูปที่ ก.2 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมย่อย CALPFM ในสภาวะสถิตย์



รูปที่ ก.3 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมย่อย RESPO ในสภาวะพลวัต

ภาคผนวก ข.

การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนต์

สมการเรย์โนลด์ดัดแปลงในสภาวะสถิตย์ของหัวอ่านเป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial X}\left[\left(\phi PH^3\right)\frac{\partial P}{\partial X}\right]+\left(\frac{L}{W}\right)^2\frac{\partial}{\partial Y}\left[\left(\phi PH^3\right)\frac{\partial P}{\partial Y}\right]-\Lambda\frac{\partial}{\partial X}\left(PH\right)=0 \qquad (ข.1)$$

ใช้วิธีการทำซ้ำของนิวตันราฟสันทำให้สมการมีลักษณะเป็นเชิงเส้น

$$F\left(P^{(k)}\right)+\left.\frac{\partial F\left(P^{(k)}\right)}{\partial P}\right|_{P=P^{(k)}}\delta P=0 \qquad (ข.2)$$

$$\delta P = P^{(k+1)} - P^{(k)} \qquad (ข.3)$$

สมการเรย์โนลด์ดัดแปลงที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial X}\left[\left(\phi PH^3\right)^k\frac{\partial P^k}{\partial X}+\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\frac{\partial P^k}{\partial X}\delta P^k+\left(\phi PH^3\right)^k\frac{\partial\delta P^k}{\partial X}\right]$$

$$+\left(\frac{L}{W}\right)^2\frac{\partial}{\partial Y}\left[\left(\phi PH^3\right)^k\frac{\partial P^k}{\partial Y}+\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\frac{\partial P^k}{\partial Y}\delta P^k+\left(\phi PH^3\right)^k\frac{\partial\delta P^k}{\partial Y}\right]$$

$$-\Lambda\frac{\partial}{\partial X}\left[\left(PH\right)^k+\left(\delta PH\right)^k\right]=0 \qquad (ข.4)$$

เมื่อ

$$\left(\phi PH^3\right)=PH^3\left(a_0+a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right)+a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2+a_3\left(\frac{Kn}{PH}\right)^3\right) \qquad (ข.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial P}\left(\phi PH^3\right)=H^3\left(a_0-a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2-2a_3\left(\frac{Kn}{PH}\right)^3\right) \qquad (ข.6)$$

กระจายเทอมอนุพันธ์ เมื่อกำหนดให้ $\delta P = P^{(k+1)} - P^{(k)}$ จะได้ดังนี้

$$\left\{\left(\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\right]\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^k\left(P^{k+1}\right)\right)+\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left[\frac{\partial^2 P}{\partial X^2}\right]^k\left(P^{k+1}\right)\right)\right.$$

$$+\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^k\left[\frac{\partial P}{\partial X}\right]^{k+1}\right)+\left(\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\phi PH^3\right)^k\right]\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^{k+1}\right)$$

$$+\left(\left(\phi PH^3\right)^k\left[\frac{\partial^2 P}{\partial X^2}\right]^{k+1}\right)-\left(\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\right]\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^k\left(P^k\right)\right)$$

$$\left.-\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left[\frac{\partial P}{\partial X}\right]^k\left(P^k\right)\right)-\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^k\left[\frac{\partial P}{\partial X}\right]^k\right)\right\}$$

$$+\left(\frac{L}{W}\right)^2\left\{\left(\left[\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\right]\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^k\left(P^{k+1}\right)\right)+\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left[\frac{\partial^2 P}{\partial Y^2}\right]^k\left(P^{k+1}\right)\right)\right.$$

$$+\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^k\left[\frac{\partial P}{\partial Y}\right]^{k+1}\right)+\left(\left[\frac{\partial}{\partial Y}\left(\phi PH^3\right)^k\right]\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^{k+1}\right)$$

$$+\left(\left(\phi PH^3\right)^k\left[\frac{\partial^2 P}{\partial Y^2}\right]^{k+1}\right)-\left(\left[\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\right]\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^k\left(P^k\right)\right)$$

$$\left.-\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left[\frac{\partial P}{\partial Y}\right]^k\left(P^k\right)\right)-\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^k\left[\frac{\partial P}{\partial Y}\right]^k\right)\right\}$$

$$-\Lambda\left\{\left(\left[\frac{\partial P}{\partial X}\right]^{k+1}\left(H^K\right)\right)+\left(\left(P^{k+1}\right)\left[\frac{\partial H}{\partial X}\right]^k\right)\right\}=0 \qquad (ข.7)$$

หาค่าเทอมอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X^2} = AX_1 P_{i+1,j} + AX_2 P_{i,j} + AX_3 P_{i-1,j} \qquad (ข.8)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial Y^2} = AY_1 P_{i,j+1} + AY_2 P_{i,j} + AY_3 P_{i,j-1} \qquad (ข.9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial X} = BX_1 P_{i+1,j} + BX_2 P_{i,j} + BX_3 P_{i-1,j} \qquad (ข.10)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y} = BY_1 P_{i,j+1} + BY_2 P_{i,j} + BY_3 P_{i,j-1} \qquad (ข.11)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\left.\begin{aligned}
AX_1 &= \frac{2}{\Delta X_i\left[\Delta X_{i-1} + \Delta X_i\right]} \quad , \quad BX_1 = \frac{\Delta X_{i-1}}{\Delta X_i\left[\Delta X_{i-1} + \Delta X_i\right]} \\
AX_2 &= \frac{-2}{\left[\Delta X_{i-1}\Delta X_i\right]} \quad , \quad BX_2 = \frac{\Delta X_i - \Delta X_{i-1}}{\left[\Delta X_{i-1}\Delta X_i\right]} \\
AX_3 &= \frac{2}{\Delta X_{i-1}\left[\Delta X_{i-1} + \Delta X_i\right]} \quad , \quad BX_3 = \frac{-\Delta X_i}{\Delta X_{i-1}\left[\Delta X_{i-1} + \Delta X_i\right]} \\
AY_1 &= \frac{2}{\Delta Y_j\left[\Delta Y_{j-1} + \Delta Y_j\right]} \quad , \quad BY_1 = \frac{\Delta Y_{j-1}}{\Delta Y_j\left[\Delta Y_{j-1} + \Delta Y_j\right]} \\
AY_2 &= \frac{-2}{\left[\Delta Y_{j-1}\Delta Y_j\right]} \quad , \quad BY_2 = \frac{\Delta Y_j - \Delta Y_{j-1}}{\left[\Delta Y_{j-1}\Delta Y_j\right]} \\
AY_3 &= \frac{2}{\Delta Y_{j-1}\left[\Delta Y_{j-1} + \Delta Y_j\right]} \quad , \quad BY_3 = \frac{-\Delta Y_j}{\Delta Y_{j-1}\left[\Delta Y_{j-1} + \Delta Y_j\right]}
\end{aligned}\right\} \qquad (ข.12)$$

แทนค่าลงในสมการเพื่อจัดเทอม $P^{(k+1)}$

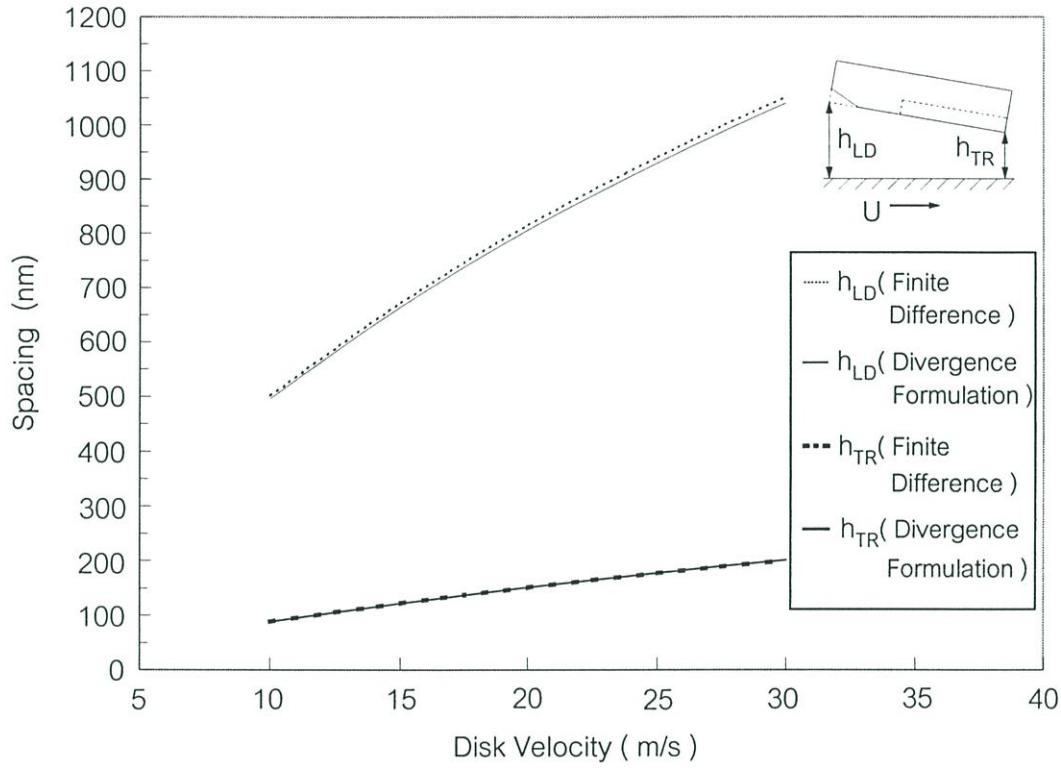
$$WP_{i-1,j}^{k+1} + CP_{i,j}^{k+1} + EP_{i+1,j}^{k+1} + SP_{i,j-1}^{k+1} + NP_{i,j+1}^{k+1} = V \qquad \text{(ข.13)}$$

เมื่อกำหนดให้

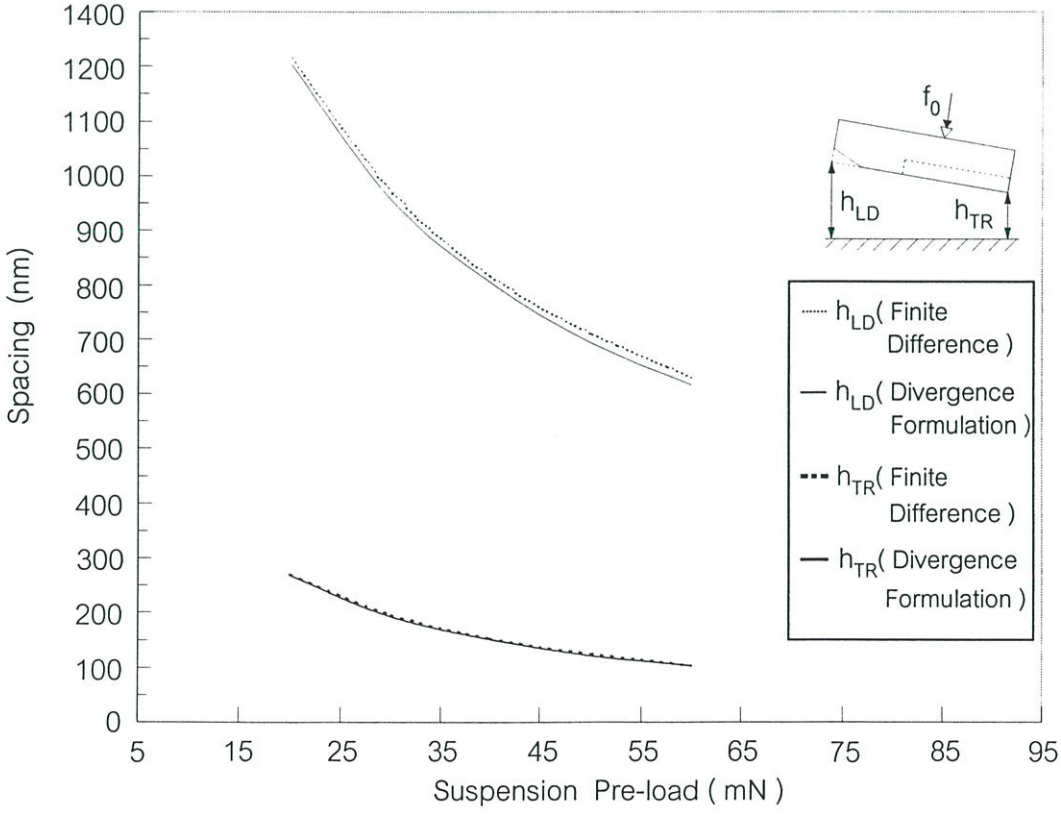
$$\left.\begin{aligned}
W &= \left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^k\left(BX_3\right)\right) + \left(\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\phi PH^3\right)\right]^k\left(BX_3\right)\right) \\
&\quad + \left(\left(\phi PH^3\right)^k\left(AX_3\right)\right) - \Lambda\left\{\left(\left(H^k\right)\left(BX_3\right)\right)\right\} \\
C &= \left(\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\right]\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^k\right) + \left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left[\frac{\partial^2 P}{\partial X^2}\right]^k\right) \\
&\quad + \left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^k\left(BX_2\right)\right) + \left(\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\phi PH^3\right)^k\right]\left(BX_2\right)\right) \\
&\quad + \left(\left(\phi PH^3\right)^k\left(AX_2\right)\right) - \Lambda\left\{\left(\left(H^k\right)\left(BX_2\right)\right) + \left(\frac{\partial H}{\partial X}\right)^k\right\} \\
&\quad + \left(\frac{L}{W}\right)^2\left\{\left(\left[\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\right]\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^k\right) + \left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left[\frac{\partial^2 P}{\partial Y^2}\right]^k\right)\right. \\
&\quad + \left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^3\right)}{\partial P}\right)^k\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^k\left(BY_2\right)\right) + \left(\left[\frac{\partial}{\partial Y}\left(\phi PH^3\right)^k\right]\left(BY_2\right)\right) \\
&\quad \left. + \left(\left(\phi PH^3\right)^k\left(AY_2\right)\right)\right\}
\end{aligned}\right\} \qquad \text{(ข.14)}$$

$$
\begin{aligned}
E &= \left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^{k}\left(BX_{1}\right)\right)+\left(\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\phi PH^{3}\right)\right]^{k}\left(BX_{1}\right)\right)\\
&\quad+\left(\left(\phi PH^{3}\right)^{k}\left(AX_{1}\right)\right)-\Lambda\left\{\left(\left(H^{k}\right)\left(BX_{1}\right)\right)\right\}\\
S &= \left(\frac{L}{W}\right)^{2}\left\{\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^{k}\left(BY_{3}\right)\right)+\left(\left[\frac{\partial}{\partial Y}\left(\phi PH^{3}\right)\right]^{k}\left(BY_{3}\right)\right)\right.\\
&\quad\left.+\left(\left(\phi PH^{3}\right)^{k}\left(AY_{3}\right)\right)\right\}\\
N &= \left(\frac{L}{W}\right)^{2}\left\{\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^{k}\left(BY_{1}\right)\right)+\left(\left[\frac{\partial}{\partial Y}\left(\phi PH^{3}\right)\right]^{k}\left(BY_{1}\right)\right)\right.\\
&\quad\left.+\left(\left(\phi PH^{3}\right)^{k}\left(AY_{1}\right)\right)\right\}\\
V &= \left(\left[\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\right]\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^{k}\left(P^{k}\right)\right)+\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\left[\frac{\partial P}{\partial X}\right]^{k}\left(P^{k}\right)\right)\\
&\quad+\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^{k}\left[\frac{\partial P}{\partial X}\right]^{k}\right)\\
&\quad+\left(\frac{L}{W}\right)^{2}\left\{\left(\left[\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\right]\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^{k}\left(P^{k}\right)\right)\right.\\
&\quad\left.+\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\left[\frac{\partial P}{\partial Y}\right]^{k}\left(P^{k}\right)\right)+\left(\left(\frac{\partial\left(\phi PH^{3}\right)}{\partial P}\right)^{k}\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)^{k}\left[\frac{\partial P}{\partial Y}\right]^{k}\right)\right\}
\end{aligned}
\qquad \text{(ป.14)}
$$

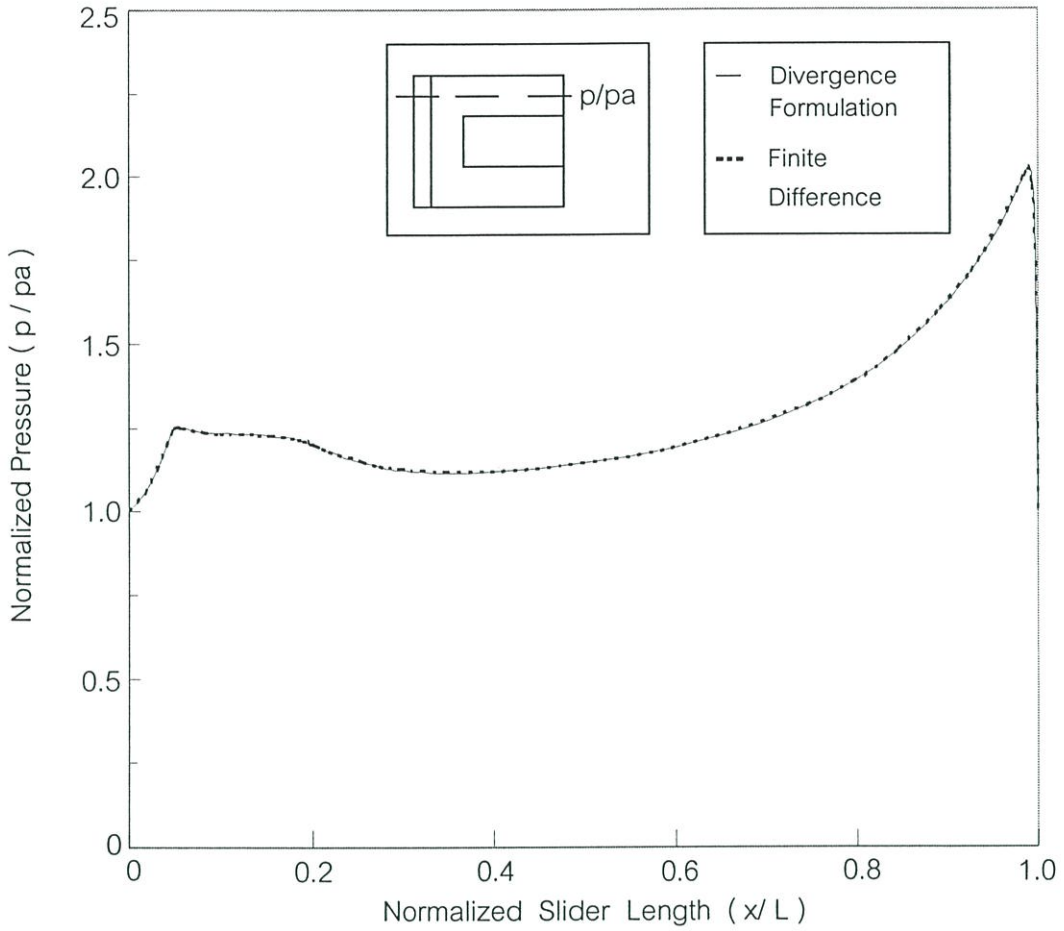
ผลจากการคำนวณเมื่อพิจารณาหัวอ่านที่มีความลึกร่องมากและความดันบริเวณร่องมีค่าเท่ากับความดันอากาศโดยรอบ แสดงได้ดังนี้



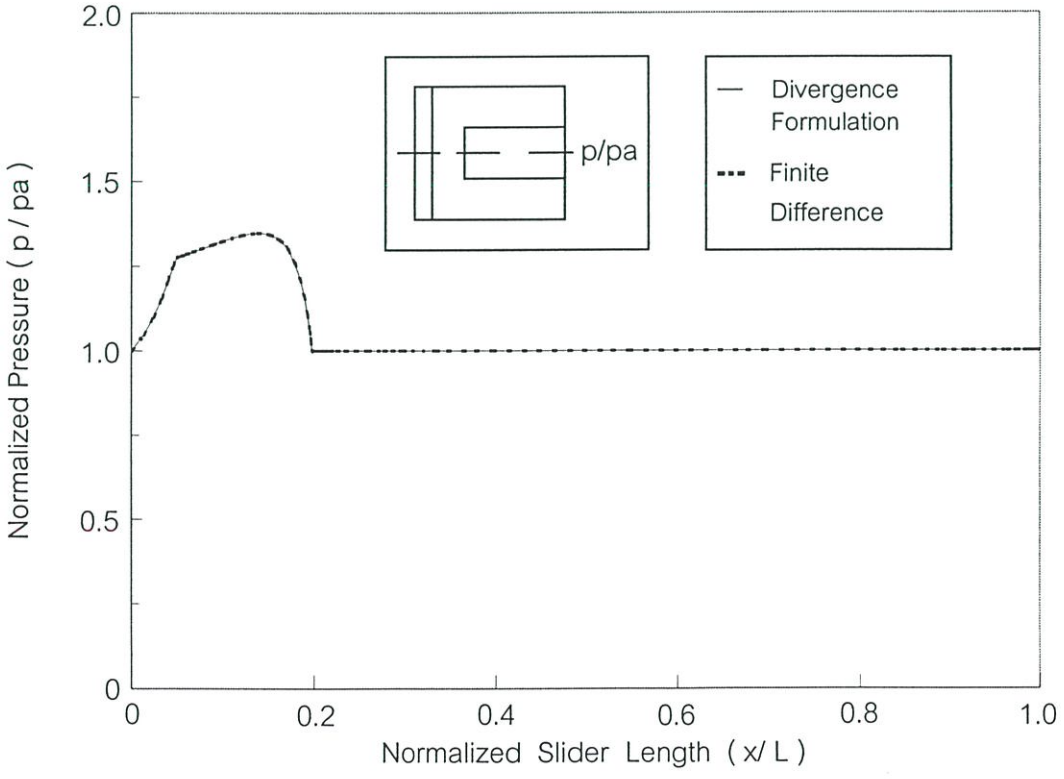
รูปที่ ข.1 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านร่องลึกเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของดิสก์



รูปที่ ข.2 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านร่องลึกเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระเริ่มต้น



รูปที่ ข.3 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางของรางหัวอ่านร่องลึกเมื่อความเร็วดิสก์ 20 m/s



รูปที่ ข.4 แสดงค่าความดันที่กึ่งกลางหัวอ่านร่องลึกเมื่อความเร็วดิสก์ 20 m/s

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

http://www.me-nett.com
การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๑๗
The 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand
ME-NETT 17
๑๕-๑๗ ตุลาคม ๒๕๔๖
October 15-17, 2003
กรุงเทพฯ - ปราจีนบุรี
KMITNB Bangkok - Prachinburi
บทคัดย่อ
Abstract

DC041
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบที่มีต่อพฤติกรรมของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

มงคล มงคลางศ์โรจน์[1] เรืองยศ อารยวงษ์กุล[2]

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนน ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-23269987 ต่อ 103 โทรสาร 0-2326-9053 E-mail: kmmongko@kmitl.ac.th[1] ,
E-mail: s5061176@kmitl.ac.th[2]

บทคัดย่อ

การออกแบบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องพยายามรักษาระดับความสูงของการลอยตัวระหว่างหัวอ่านและผิวของดิสก์ให้มีค่าน้อยและมีความเสถียรเท่าที่จะเป็นไปได้ รายงานที่ทำการศึกษาผลกระทบของความดันอากาศโดยรอบที่มีต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่านมีจำนวนน้อย การเปลี่ยนแปลงความดันอากาศจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงจากระดับน้ำทะเลหรือบนเครื่องบินซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่าน ในรายงานนี้จะทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบที่มีต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่านในขณะที่หัวอ่านทำงานในสภาวะสถิตย์ ความสูงการลอยตัวระหว่างหัวอ่านหัวอ่านและผิวดิสก์หาค่าได้โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานจากแบบจำลองของ Fukui & Kaneko ในที่นี้จะใช้หัวอ่านแบบเทเปอร์ แฟลท จะพบว่าเมื่อความดันอากาศลดลงจะส่งผลให้ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าลดลง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15 – 17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบที่มีต่อพฤติกรรมของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า

Effects of Ambient Pressure Change on Flying Characteristics of Magnetic Head Slider

มงคล มงคลวงศ์โรจน์[1] เรืองยศ อารยางษ์กุล[2]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนน ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-9987 ต่อ 103 โทรสาร 0-2326-9053 E-mail: kmmongko@kmitl.ac.th[1] , Email: s5061176@kmitl.ac.th[2]

Mongkol Mongkkolwongrojn[1] Ruengyos Arayavongkul
Electro-Mechanical Engineering Laboratory ReCCIT , Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.
King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Rd, Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
Tel : (662) 0-2326-9987 ext.103 Fax : 0-2326-9053 E-mail: kmmongko@kmitl.ac.th[1] , Email: s5061176@kmitl.ac.th[2]

บทคัดย่อ

การออกแบบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องพยายามรักษาระดับความสูงของการลอยตัวระหว่างหัวอ่านและผิวของดิสก์ให้มีค่าน้อยและมีความเสถียรเท่าที่จะเป็นไปได้ รายงานที่ทำการศึกษาผลกระทบของความดันอากาศโดยรอบที่มีต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่านมีจำนวนน้อย การเปลี่ยนแปลงความดันอากาศจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงจากระดับน้ำทะเลหรือบนเครื่องบินซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่าน ในรายงานนี้จะทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบที่มีต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่านในขณะที่หัวอ่านทำงานในสภาวะสถิตย์ ความสูงการลอยตัวระหว่างหัวอ่านหัวอ่านและผิวดิสก์หาค่าได้โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานจากแบบจำลองของ Fukui & Kaneko ในที่นี้จะใช้หัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลท จะพบว่าเมื่อความดันอากาศลดลงจะส่งผลให้ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าลดลง

Abstract

In designing a magnetic head slider of hard disk drive , it is important to keep the spacing between the head and the disk surface as small and stable as possible. There are few papers treating the effect if ambient pressure change on the spacing. Ambient pressure change , which occurs at location at high altitude or in air planes , may have signification influence on the spacing. In this paper , effects of the ambient pressure change on the spacing during the magnetic head operated in static condition. The spacing between the head and the disk was investigated theoretically base on Fukui & Kaneko model , taking the taper-flat type slider as and example . It is found from the result that the spacing decrease with a decrease in the ambient pressure.

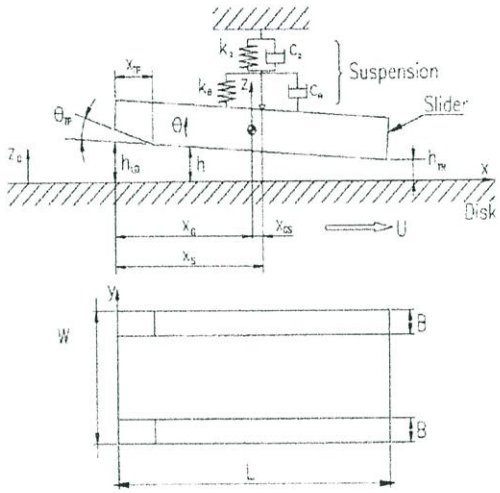
1. บทนำ

การออกแบบหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบันทึกข้อมูลสูงที่สุดจะต้องออกแบบให้ความสูงการลอยตัวที่เกิดขึ้นระหว่างหัวอ่านและผิวดิสก์มีค่าน้อย,หัวอ่านมีความเสถียรในขณะทำงานและเปลี่ยนแปลงความสูงการลอยตัวน้อยเมื่อแผ่นดิสก์มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ งานวิจัยที่ทำลองพฤติกรรมของหัวอ่าน เช่น Ono (1975) ; Kogure et. al. (1983); White(1983,1984,1986); Nishihara et. al. (1988) ; Bogy(1995) รายงานที่มีการพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบที่มีต่อความสูงการลอยตัวของหัวอ่านยังมีจำนวนน้อย ดังนั้นรายงานนี้จึงทำการพิจารณาผลของความดันอากาศที่มีต่อพฤติกรรมสถิตย์ของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าโดยทำการศึกษาหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเทเปอร์แฟลท ชนิด IBM - 3380 ด้วยสมการเรย์โนลด์ดัดแปลงและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

2. ทฤษฎี

ภาพของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 1 เมื่ออุปกรณ์ในการอ่านและเขียนข้อมูลอยู่ที่บริเวณขอบท้ายของหัวอ่าน ภาพแสดงระบบ

พิกัดฉาก เมื่อแกน X เป็นทิศทางตามแนวความยาวของหัวอ่าน และแกนY เป็นทิศทางตามแนวความกว้างของหัวอ่าน สมมติให้หัวอ่านสามารถเคลื่อนที่เป็นอิสระได้ในสองทิศทาง คือ ทิศการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับผิวดิสก์ และ ทิศหมุนรอบแกนตามขวางของหัวอ่าน รายงานนี้จะใช้การคำนวณเชิงตัวเลขเมื่อหัวอ่านอยู่ในสภาวะสถิตย์



รูปที่ 1 ภาพของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเทเปอร์แฟลท

สมการเรย์โนลด์ดัดแปลงแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(Q\frac{\partial P}{\partial X}\right)+R^2\frac{\partial}{\partial Y}\left(Q\frac{\partial P}{\partial Y}\right)-\Lambda\frac{\partial}{\partial X}(PH)-\sigma\frac{\partial(PH)}{\partial T}=0 \qquad (1)$$

เมื่อ

$$Q(P,H)=\varphi(P,H)\,PH^3 \qquad (2)$$

Q (P,H) เป็นตัวประกอบการไหลเมื่อพิจารณาผลจากการลื่นไถล เมื่อพิจารณาตามสมการโบลทซ์มานน์

$$\varphi(P,H)=a_0+a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right)+a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2+a_3\left(\frac{Kn}{PH}\right)^3 \qquad (3)$$

เงื่อนไขที่ขอบคือ

$$P(0,Y,T)=P(1,Y,T)=P\left(X,-\frac{1}{2},T\right)=P\left(X,-\frac{1}{2},T\right)=1 \qquad (4)$$

พฤติกรรมสถิตย์ของหัวอ่านสามารถจำลองได้โดยสมการเรย์โนลด์ดัดแปลงและสมการการเคลื่อนที่ เมื่อสมการการเคลื่อนที่ประกอบด้วยสมการสมดุลแรงและสมการสมดุลโมเมนต์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$M\ddot{Z}+F_S=2\int_{-1/2}^{1/2}\int_{0}^{1}(P-1)\,dXdY \qquad (5)$$

$$I_\theta\ddot{\Theta}+M_S-F_S X_{GS}=2\int_{-1/2}^{1/2}\int_{0}^{1}(P-1)\left(X_G-X\right)dXdY \qquad (6)$$

เมื่อ

$$F_S=F_0+K_Z\left(Z-X_{GS}\Theta\right)+C_Z\left(\dot{Z}-X_{GS}\dot{\Theta}\right) \qquad (7)$$

$$M_S=M_0+K_\theta\Theta+C_\theta\dot{\Theta} \qquad (8)$$

3. พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่าน

ในหัวข้อนี้แสดงค่าความสูงการลอยตัวของหัวอ่านแบบเทเปอร์แฟลทชนิดIBM-3380เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบ, เปลี่ยนแปลงรูปร่างของหัวอ่านและมีความร้อนจากอุปกรณ์อ่าน/เขียน

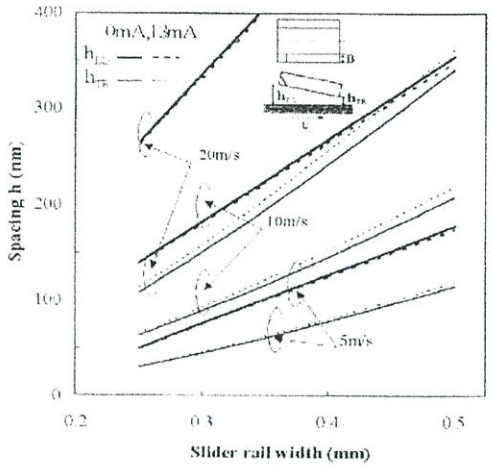
รูปที่ 2,3,4 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำและท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างของรางหัวอ่านด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วแผ่นดิสก์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน (0และ13 มิลิแอมแปร์) ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายของหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงด้วยอัตราคงที่ตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างรางหัวอ่าน เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

รูปที่ 5,6,7 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะส่วนลาดเอียงยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วแผ่นดิสก์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน (0และ13 มิลิแอมแปร์) ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงเป็นอัตราส่วนค่อนข้างคงที่ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

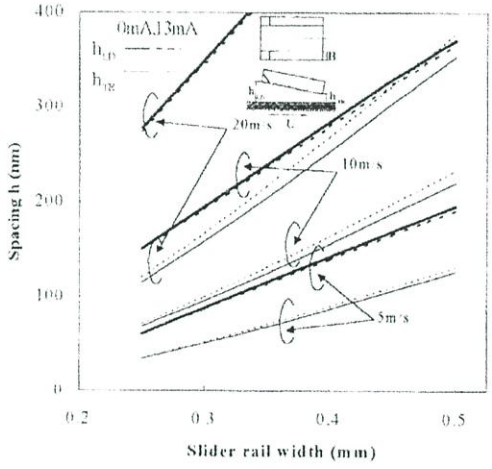
รูปที่ 8,9,10 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมของส่วนลาดเอียงด้วยอัตราคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วแผ่นดิสก์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน(0และ13มิลิแอมแปร์) ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุมของส่วนลาดเอียงด้วยอัตราคงที่ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

รูปที่ 11,12,13 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับยกเว้นที่ความเร็วต่ำความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านค่อนข้างคงที่และความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วแผ่นดิสก์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน(0และ13 มิลิแอมแปร์) ความสูงการลอยตัวที่ขอบท้ายของหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจุดยึดจับด้วยอัตราคงที่ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น

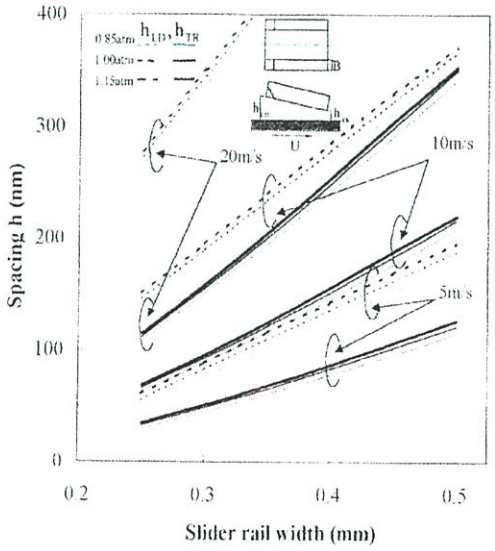
รูปที่ 14,15,16 ความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงและความสูงการลอยตัวที่ท้ายหัวอ่านลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำและความสูงการลอยตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วแผ่นดิสก์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อ่าน/เขียน(0และ13 มิลิแอมแปร์) ความสูงการลอยตัวท้ายหัวอ่านเพิ่มขึ้นและความสูงการลอยตัวที่ขอบนำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระกระทำ เมื่อความดันของอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้นความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเพิ่มขึ้น



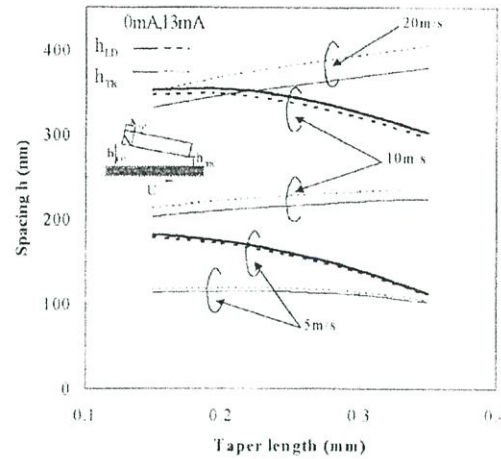
รูปที่ 2 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่าน ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ



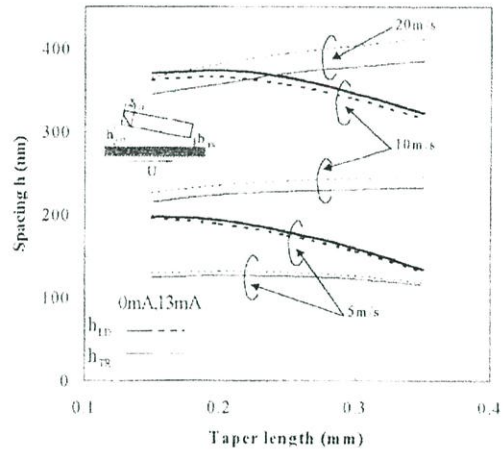
รูปที่ 3 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่าน ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



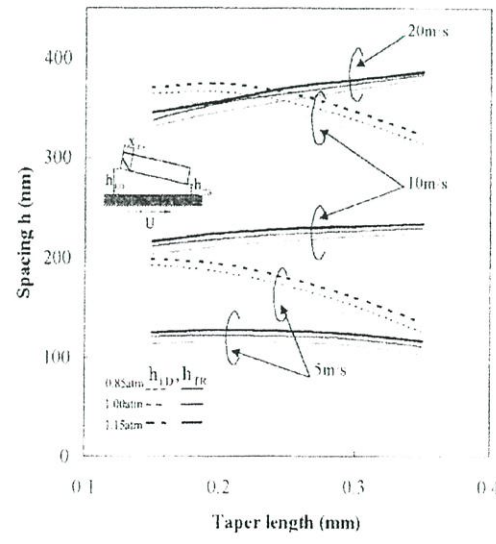
รูปที่ 4 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของรางหัวอ่าน และ ความดันบรรยากาศ



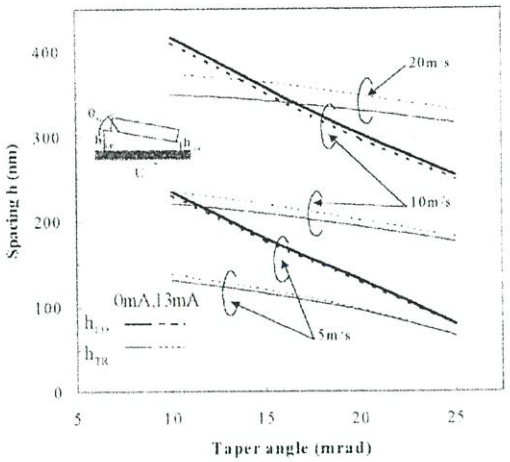
รูปที่ 5 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะของส่วนลาดเอียงที่ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ



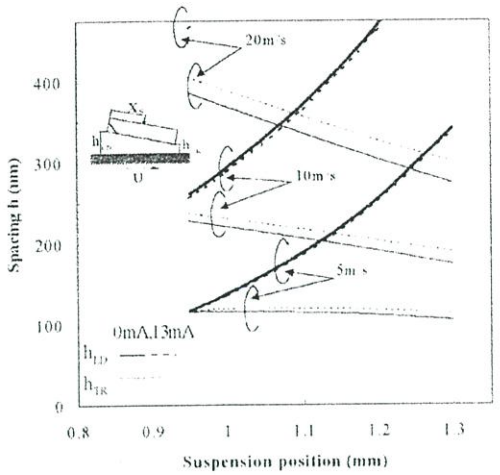
รูปที่ 6 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะของส่วนลาดเอียงที่ ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



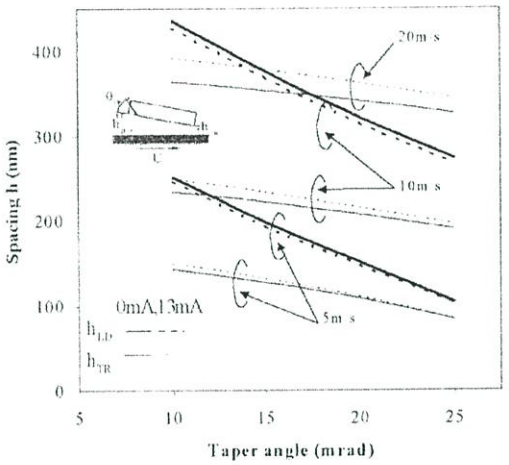
รูปที่ 7 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนลาดเอียงหัวอ่าน และ ความดันบรรยากาศ



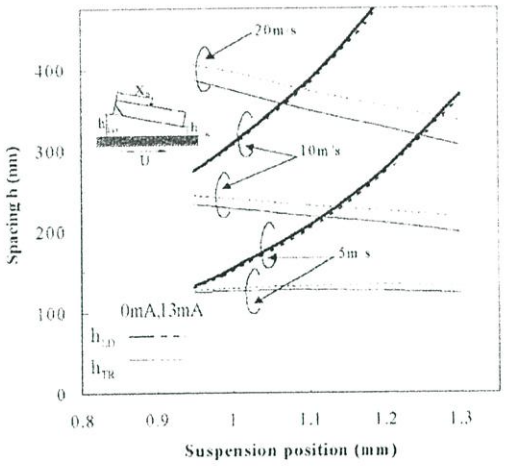
รูปที่ 8 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมของส่วนลาดเอียง ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ



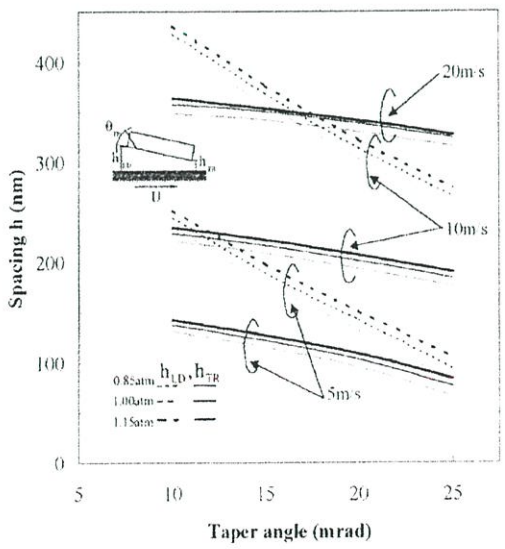
รูปที่ 11 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับหัวอ่าน ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ



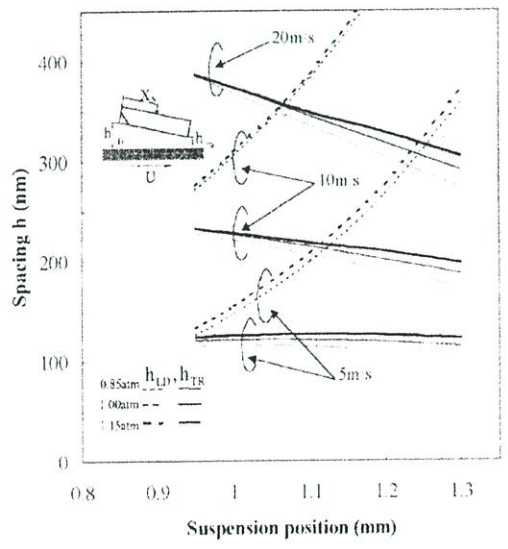
รูปที่ 9 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมของส่วนลาดเอียงที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



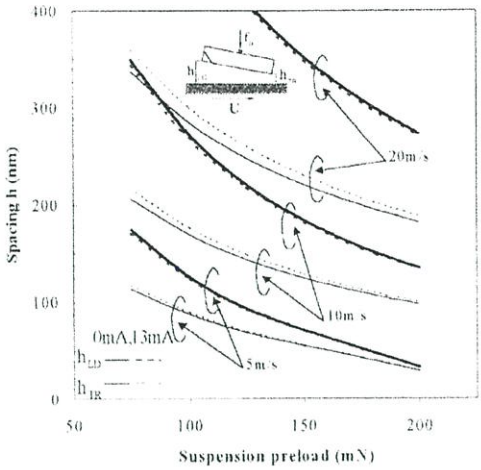
รูปที่ 12 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับหัวอ่านที่ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



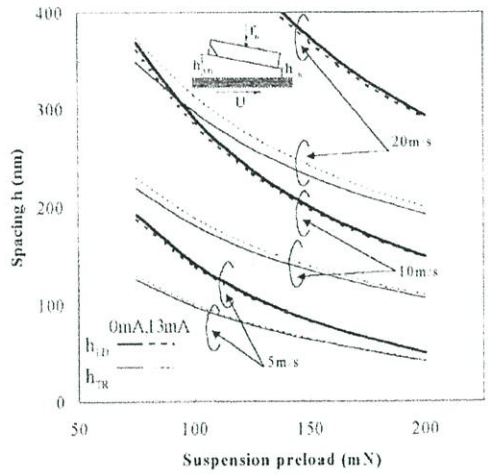
รูปที่ 10 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมของส่วนลาดเอียง และ ความดันบรรยากาศ



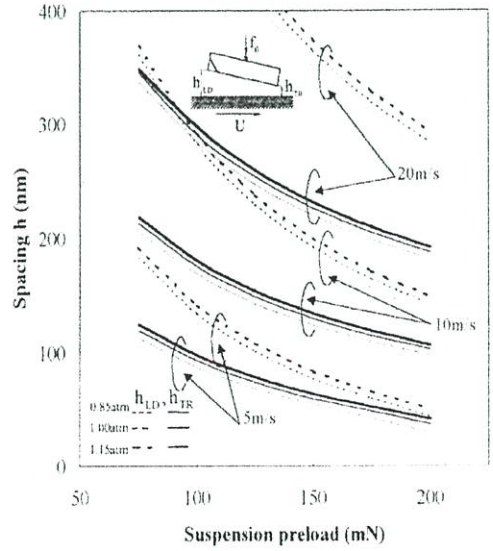
รูปที่ 13 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะจุดยึดจับหัวอ่าน และ ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 14 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำ ความดันอากาศโดยรอบ 0.85 บรรยากาศ



รูปที่ 15 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำ ความดันอากาศโดยรอบ 1.15 บรรยากาศ



รูปที่ 16 ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระกระทำ และ ความดันอากาศ

4. สรุป

ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศโดยรอบที่มีต่อพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเทเปอร์แฟลตชนิด IBM-3380 คือ

- ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านจะค่อย ๆลดลงเมื่อความดันอากาศโดยรอบลดลง
- ความสูงการลอยตัวของหัวอ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันอากาศโดยรอบเพิ่มขึ้น
- ค่าความสูงการลอยตัวที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่จะเกิดความไม่เสถียรในการคำนวณเชิงตัวเลขเมื่อความดันอากาศโดยรอบมีค่าลดลง

รายการสัญลักษณ์

B = ความกว้างของรางหัวอ่าน

C_Z = สัมประสิทธิแดมปิ้งของการจับยึดหัวอ่านในแนวการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับผิวดิสก์ในรูปไร้มิติ ($C_Z = c_Z h_a \Omega_0 / p_a L B$)

C_0 = สัมประสิทธิแดมปิ้งของการจับยึดหัวอ่านในแนวการเคลื่อนที่รอบแกนตามขวางในรูปไร้มิติ ($C_0 = c_0 h_a \Omega_0 / p_a L B$)

F_0 = แรงที่กระทำกับหัวอ่านในรูปไร้มิติ ($F_0 = f_0 / p_a L B$)

H = ค่าความหนาของฟิล์มอากาศในรูปไร้มิติ ($H = h / h_a$)

h_a = ความสูงการลอยตัวต่ำที่สุดที่ยอมรับได้

h_{LD} = ความสูงการลอยตัวของขอบนำ

h_{TR} = ความสูงการลอยตัวของขอบท้าย

I_θ = โมเมนต์ความเฉื่อยในทิศการเคลื่อนที่หมุนรอบแกนตามขางในรูปไร้มิติ ($I_0 = i_\theta h_a \Omega_0^2 / p_a L^3 B$)

K_Z = ค่าสัมประสิทธิสปริงในทิศการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับผิวดิสก์ ($K_Z = k_Z h_a / p_a L B$)

K_Z = ค่าสัมประสิทธิสปริงในทิศการเคลื่อนที่หมุนรอบแกนตามขวาง ($K_Z = k_0 h_a / p_a L^3 B$)

Kn = ค่าเคนูดเซนนัมเบอร์ ($Kn = \lambda_a / h_a$)

L = ความยาวของหัวอ่าน

M_Z = น้ำหนักของหัวอ่านในรูปไร้มิติ ($M_Z = m h_a \Omega_0^2 / p_a L^2 B$)

P = ความดันอากาศในรูปไร้มิติ ($P = p / p_a$)

P_a = ความดันบรรยากาศ

R = อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของหัวอ่าน ($R = L / B$)

U = ความเร็วในการหมุนของดิสก์ ($U = r \Omega_0$)

X_G = ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของหัวอ่านในรูปไร้มิติ ($X_G = x_G / L$)

X_{GS} = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลและจุดยึดจับหัวอ่านในรูปไร้มิติ ($X_{GS} = x_{GS} / L$)

X_S = ระยะจุดยึดจับหัวอ่านในรูปไร้มิติ ($X_S = x_S / L$)

X_{TP} = ความยาวของส่วนลาดเอียงในรูปไร้มิติ ($X_{TP} = x_{TP} / L$)

θ = มุมพิตช์ของหัวอ่านในรูปไร้มิติ ($\theta = \theta L / h_a$)

Λ = ค่าตัวเลขการรองลื่น ($\Lambda = 6\eta_a U L / p_a h_a^2$)

σ = ค่าตัวเลขการกดอัด ($\sigma = 12\eta_a \omega_0 L^2 / p_a h_a^2$)

η_a = ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

ω_0 = ค่าความถี่ที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ของดิสก์

เอกสารอ้างอิง

[1] H.Hashimoto and Y.Hattori,Proc.STLE/ASME. Tribolo. conf.,Orlando,Fh(1999).

[2] D.B.Bogy,S.Lu,M.A. O'Hara and S.Zhang, Trans. ASME, 120,3 (1998) 566-570.

[3] S.Fukui and R.Kaneko,Trans.ASME,112,1(1990) 78-83.

[4] H.S.Nishihara,L.K.Dorius,S.A. Bolasna and G.L. Best, STLE SP - 25,97,(1988) 117-123.

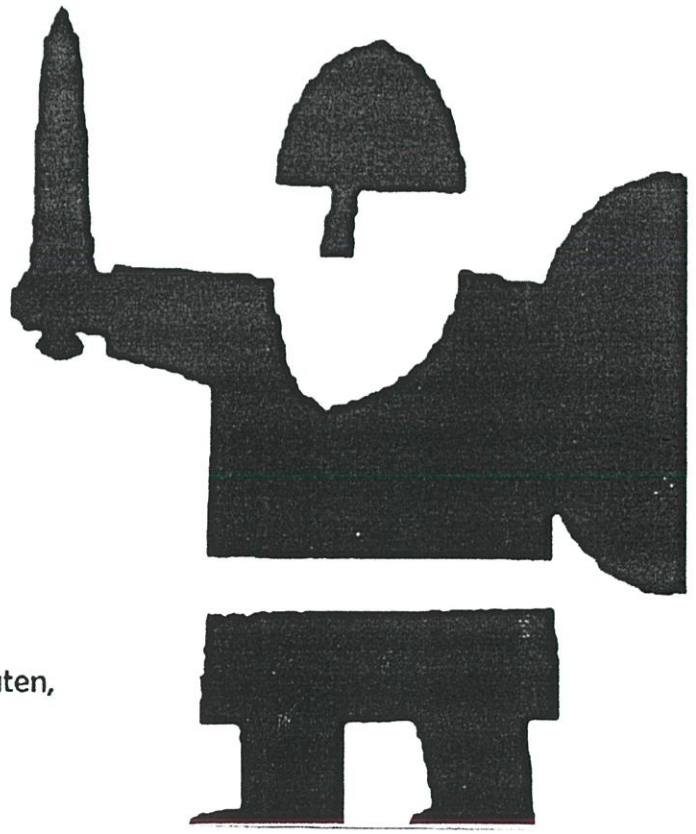
[5] E.Cha and D.B. Bogy,Trans.ASME,117,(1995) 36-46.

[6] J.W.White,Trans.ASME,105,3(1983) 484-490.

[7] J.W.White,ASLE SP-16,1,(1984) 72-76.

Proceedings of the 11th
Nordic Symposium on Tribology

NORDTRIB 2004



Tromsø, Harstad, Hurtigruten,
Norway, June 2004

INDEX

M. Mongkolwongrojn and R. Arayavongkul 1
S.E. Franklin and R.W.M. Severt 11
I.M. Sivebaek and J. Jakobsen 21
Y.C. Tasan, M.B. de Rooij and D.J. Schipper 33
M. Wisniewski 45
J. Hedlund and A. Lehtovaara 55
S.E. Fewell and C. Allen 65
A. Ramalho, A. Merstallinger and A. Cavaleiro 75
V.G. Novytskyy 85
M.E. Benzon, S.S. Eskildsen, J.W. Fogh and S.B. Jakobsen 93
R. Nilsson, F. Svahn and U. Olofsson 105
J. Landa, I. Illarramendi, J.M. Montalban, A. Igartua and G. Mendoza 115
J.M. Carrapichano, F.J. Oliveira, J.R. Gomes and R.F. Silva 129
Z.N. Ovchar, Y.K. Mashkov, A.A. Gladenko, M.Y. Baybaratskaya and N.A. Prokudina 139
D. Shen and R.F. Salant 147
D.J. Hargreaves and M. Fillon 157
D.M.C. McCarthy, S.B. Glavatskih and I. Sherrington 167
S. Strzelecki 177
M. Hanson, K. Larsson, L. Vitos, B. Johansson and S. Hogmark 187
J. Suchanek, F. Cerny, J. Gurovic, D. Palamarchuk, S. Semenko, D. Tischler and E. Zdravecka 189
Y. Iwai, T. Miyajima, T. Honda, T. Matsubara, K. Kanda and S. Hogmark 197
M. Carlsson and U. Wiklund 207
J. Suchanek, P. Jurci and P. Panjan 219
D. Mulliah, S.D. Kenny and R. Smith 229
H. Wang, Y. Hu and T. Zhang 239
G.J. Molina, M.J. Furey and C. Kajdas 249
T. Imran and B. Jacobson 259
S. Maruyama, B. Stoimenov, K. Adachi and K. Kato 269
K. Liu, X. Liu, W. Wang and B. Zhang 279

EFFECTS OF THE RECESS DEPTH ON STATIC CHARACTERISTIC OF SUBAMBIENT PRESSURE SLIDERS

M.MONGKOLWONGROJN, Associate Professor
R.ARAYAVONGKUL, Graduated Student
Electro-Mechanical Engineering Lab.
Mechanical Engineering Department
ReCCIT Faculty of Engineering
King Mongkut ' Institute of Technology
Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
E-mail kmmongko@kmitl.ac.th

ABSTRACT

The conventional magnetic head sliders have flying heights approximately around 20 nm in the high capacity hard disk drive today . This paper presents the effect of the recess depth on the static characteristic in subambient pressure head sliders with straight rails. The control volume was formulated using the momentum and continuity equations in the air bearing . Numerical scheme based on the finite volume technique was developed to suppress the numerical difficulties caused by the clearance discontinuities in the subambient pressure sliders. The static characteristic of the subambient pressure sliders are calculated numerically to obtain the pressure distribution and the flying height with varying the recess depth and the other parameters such as rail width, taper length , taper angle , suspension position , preloads and disk velocity. The numerical results show that the recess depth is the significant effect on the static characteristic of the subambient pressure head sliders .

Keyword Subambient pressure slider, Static characteristic, Finite volume technique

INTRODUCTION

The design and development of hard disk drives for obtaining the highest capacity is to keep the minimum spacing at trailing edge of the slider. Subambient pressure can be generated at the recess region by changing the design parameters of the head slider or varying recess depth. E. Cha and D.B. Bogy (1995) developed numerical scheme using control volume formulation to simulate static flying condition and dynamic response of subambient pressure slider with straight rail and Guppy slider. J.W. White (1997) presented flying height and air bearing force of transverse and negative pressure contour (TNP) . Y. Hu , P. M. Jones, K. Li (1999) shows air bearing suction force , air bearing lifting force and flying height of subambient pressure slider during dynamic unload.

THEORETICAL ANALYSIS

The schematic diagram of the magnetic head slider considered in this paper is shown in Figure1. The read/write device is located at the trailing edge of the slider. The slider was assumed to have two degree of freedom motion , translation perpendicular to the disk surface and rotation around the transverse axis.

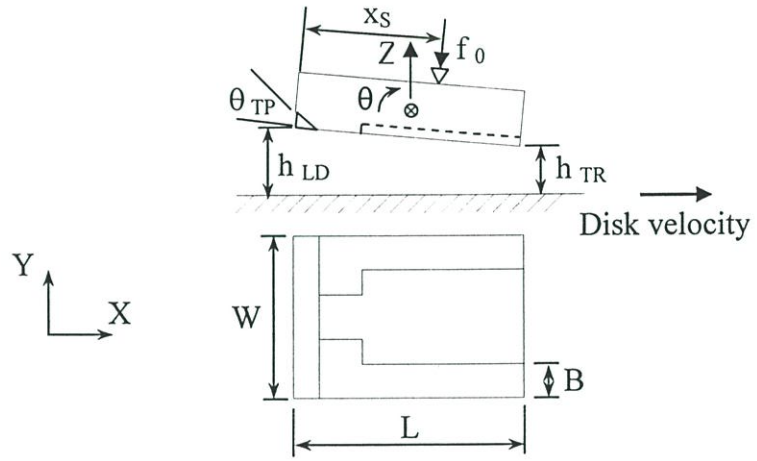


Figure 1. The model of magnetic head slider

Applied the control volume as shown in Figure 2. to obtain the continuity equations for air film between head slider and disk surface can be expressed in steady state condition as :

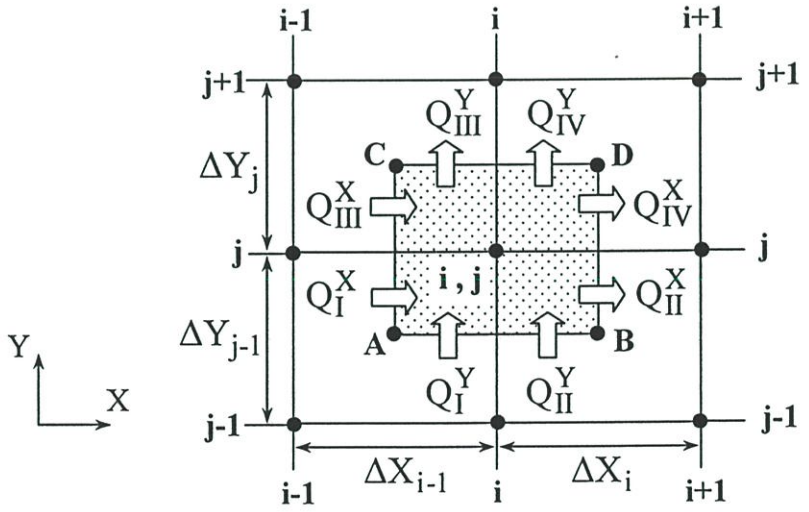


Figure 2. Control volume

$$\left(Q_I^X + Q_{II}^X + Q_{III}^X + Q_{IV}^X\right) + \left(Q_I^Y + Q_{II}^Y + Q_{III}^Y + Q_{IV}^Y\right) = 0 \qquad (1)$$

$$Q^X = \int_{Y1}^{Y2} \left(\varphi PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda(PH) \right) dY \qquad (2)$$

$$Q^Y = \int_{X1}^{X2} R^2 \left(\varphi PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) dX \qquad (3)$$

$$F\left(P_0^k\right)+\left.\frac{\partial F\left(P_0^k\right)}{\partial P_0}\right|_{P0=p_0^{(k)}}\delta P_0=0 \tag{4}$$

$$\delta P_0=P_0^{(k+1)}-P_0^{(k)} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}F\left(P_0^{(k+1)}\right)&=\left(Q_{I0}^X\right)^{(k+1)}+\left(Q_{II0}^X\right)^{(k+1)}-\left(Q_{III0}^X\right)^{(k+1)}-\left(Q_{IV0}^X\right)^{(k+1)}\\&+\left(Q_{I0}^Y\right)^{(k+1)}+\left(Q_{II0}^Y\right)^{(k+1)}-\left(Q_{III0}^Y\right)^{(k+1)}-\left(Q_{IV0}^Y\right)^{(k+1)}=0\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\left(Q_0^X\right)^{(k+1)}=\int_{Y1}^{Y2}\Bigg[&\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)^{(k)}\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}+\left\{\frac{\partial\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}^{(k)}\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\delta P_0\\&+\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)^{(k)}\frac{\partial\delta P_0}{\partial X}-\Lambda\left(P_0^{(k)}H_0+H_0^{(k)}\delta P_0\right)\Bigg]dY\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\left(Q_0^Y\right)^{(k+1)}=\int_{X1}^{X2}R^2\Bigg[&\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)^{(k)}\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}+\left\{\frac{\partial\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}^{(k)}\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\delta P_0\\&+\left(\phi_0P_0H_0^3\right)^{(k)}\frac{\partial\delta P_0}{\partial Y}\Bigg]dX\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}\left(Q_{I0}^X\right)^{(k+1)}=\Bigg[&\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)_A^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_A+\left\{\frac{\partial\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}_A^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_A\delta P_0|_A\\&+\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)_A^{(k)}\left.\frac{\partial\delta P_0}{\partial X}\right|_A-\Lambda\left(P_0^{(k)}H_0|_A+H_0^{(k)}\delta P_0|_A\right)\Bigg]\frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}\left(Q_{II0}^X\right)^{(k+1)}=\Bigg[&\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)_B^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_B+\left\{\frac{\partial\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}_B^{(k)}\left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_B\delta P_0|_B\\&+\left(\varphi_0P_0H_0^3\right)_B^{(k)}\left.\frac{\partial\delta P_0}{\partial X}\right|_B-\Lambda\left(P_0^{(k)}H_0|_B+H_0^{(k)}\delta P_0|_B\right)\Bigg]\frac{\Delta Y_{j-1}}{2}\end{aligned} \tag{10}$$

$$\left(Q^{X}_{III0}\right)^{(k+1)} = \left[\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{C} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_{C} + \left\{\frac{\partial\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}^{(k)}_{C} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_{C} \delta P_0|_{C} + \left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{C} \left.\frac{\partial \delta P_0}{\partial X}\right|_{C} - \Lambda\left(P_0^{(k)} H_0|_{C} + H_0^{(k)} \delta P_0|_{C}\right)\right] \frac{\Delta Y_j}{2} \quad (11)$$

$$\left(Q^{X}_{IV0}\right)^{(k+1)} = \left[\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{D} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_{D} + \left\{\frac{\partial\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}^{(k)}_{D} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial X}\right|_{D} \delta P_0|_{D} + \left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{D} \left.\frac{\partial \delta P_0}{\partial X}\right|_{D} - \Lambda\left(P_0^{(k)} H_0|_{D} + H_0^{(k)} \delta P_0|_{D}\right)\right] \frac{\Delta Y_j}{2} \quad (12)$$

$$\left(Q^{Y}_{I0}\right)^{(k+1)} = R^2\left[\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{A} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_{A} + \left\{\frac{\partial\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}^{(k)}_{A} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_{A} \delta P_0|_{A} + \left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{A} \left.\frac{\partial \delta P_0}{\partial Y}\right|_{A}\right] \frac{\Delta X_{i-1}}{2} \quad (13)$$

$$\left(Q^{Y}_{II0}\right)^{(k+1)} = R^2\left[\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{B} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_{B} + \left\{\frac{\partial\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}^{(k)}_{B} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_{B} \delta P_0|_{B} + \left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{B} \left.\frac{\partial \delta P_0}{\partial Y}\right|_{B}\right] \frac{\Delta X_i}{2} \quad (14)$$

$$\left(Q^{Y}_{III0}\right)^{(k+1)} = R^2\left[\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{C} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_{C} + \left\{\frac{\partial\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}^{(k)}_{C} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_{C} \delta P_0|_{C} + \left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{C} \left.\frac{\partial \delta P_0}{\partial Y}\right|_{C}\right] \frac{\Delta X_{i-1}}{2} \quad (15)$$

$$\left(Q^{Y}_{IV0}\right)^{(k+1)} = R^2\left[\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{D} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_{D} + \left\{\frac{\partial\left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)}{\partial P_0}\right\}^{(k)}_{D} \left.\frac{\partial P_0^{(k)}}{\partial Y}\right|_{D} \delta P_0|_{D} + \left(\varphi_0 P_0 H_0^3\right)^{(k)}_{D} \left.\frac{\partial \delta P_0}{\partial Y}\right|_{D}\right] \frac{\Delta X_j}{2} \quad (16)$$

Where $\varphi(P,H)$ is the Poiseullie flow factor based on linearized Boltzmann equation

$$\varphi(P,H) = a_0 + a_1\left(\frac{Kn}{PH}\right) + a_2\left(\frac{Kn}{PH}\right)^2 + a_3\left(\frac{Kn}{PH}\right)^3 \qquad (17)$$

The boundary conditions are given as

$$P(0,Y) = P(1,Y) = P\left(X,\frac{1}{2}\right) = P\left(X,-\frac{1}{2}\right) = 1 \qquad (18)$$

Force balance and moment balance equations can be written as

$$F_0 = 2\int_{-1/2}^{1/2}\int_{0}^{1}(P-1)dXdY \qquad (19)$$

$$M_0 - F_0 X_{GS} = 2\int_{-1/2}^{1/2}\int_{0}^{1}(P-1)(X_G - X)dXdY \qquad (20)$$

Air film thickness of magnetic head slider is shown below

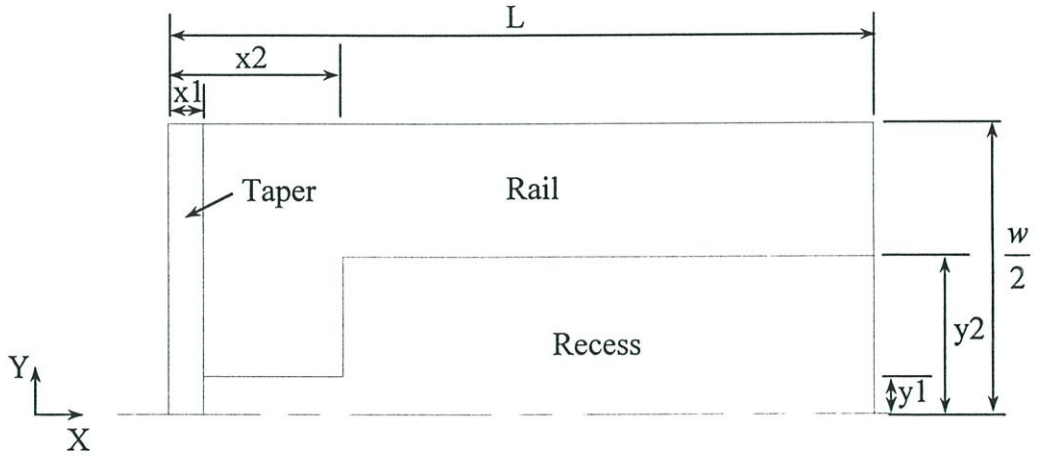


Fig.3 Air bearing surface considered half of the slider

$$h = h_{TR} + (L-x)\tan\theta + (L_{TP}-x)\tan\theta_{TP} \quad ; \ (0 \le x \le x1) \text{ and } \left(0 \le y \le \frac{w}{2}\right) \qquad (21)$$

$$h = h_{TR} + (L-x)\tan\theta \quad ; \left((x1 \le x \le x2) \text{and} \left(y1 \le y \le \frac{w}{2}\right)\right)$$

$$\text{or} \left((x2 \le x \le L) \text{and} \left(y2 \le y \le \frac{w}{2}\right)\right) \qquad (22)$$

$$h = h_{TR} + (L-x)\tan\theta + h_{GR}/\cos\theta \quad ; ((x1 \le x \le x2) \text{and} (0 \le y \le y1))$$

$$\text{or} ((x2 \le x \le L) \text{and} (0 \le y \le y2)) \qquad (23)$$

RESULTS AND DISCUSSIONS

Pressure distribution of subambient pressure slider is shown in Figure 4. for recess depth 2.5 μm and disk velocity 20 m/s. Figure 5 and Figure 6 showed the pressure profile along the middle of slider and along the middle of rail for the recess depth 1.5 μm , 2.5μm , 3.5μm respectively. In Figure 5, the pressure increase suddenly from ambient pressure at the taper region along the center of the slider in longitudinal direction and the pressure decrease rapidly to subambient pressure at normalized slider length around 0.1. The pressure in the recess region keep near constant and then increase to ambient pressure at trailing edge. For higher recess depth the lower pressure can be obtained at leading edge as shown in Figure 5. and Figure 6. respectively. The highest pressure occur near trailing edge at recess depth 0.25 μm.

Figures 7 to Figure11 show the spacing at the leading edge and trailing edge , h_{LD} and h_{TR} , at various recess depth. Leading edge spacing , h_{LD}, decrease drastically with increase in recess depth. Trailing edge spacing , h_{TR}, decrease gradually and then going up slowly. As the recess depth increase ,pitch angle trend to decrease . In Figure 7 , trailing edge spacing decrease slightly to the minimum spacing at recess depth 2.5 μm and 2.75 μm with disk velocity 20 m/s and 25 m/s respectively. In Figure 8 , trailing edge spacing decrease gradually to the minimum spacing at recess depth 2.5 μm for slider rail width 0.32 and 0.35 mm , therefore the recess depth and rail width have significant effect on the trailing edge spacing. In Figure 9 , for taper angle change from 15 mrad to 20 mrad, the leading edge spacing decrease but trailing edge spacing and pitch angle have little effects. In Figure 10, for suspension position change from 1.05 mm. to 1.1 mm. then the leading edge spacing increase , trailing edge spacing decrease and pitch angle slightly increase. Trailing edge spacing decrease gradually to the minimum trailing edge spacing 2.5 μm. For suspension preload increase change from 60 mN to 80 mN then leading edge spacing ,trailing edge spacing and pitch angle decrease a little as shown in Figure 11.

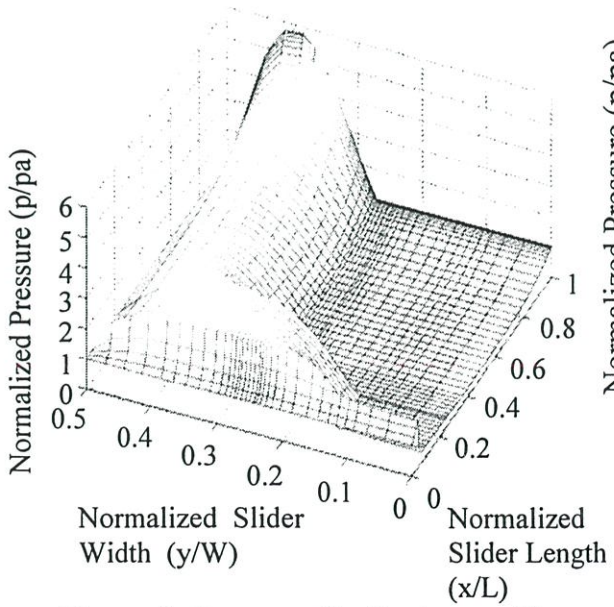


Figure 4. Pressure distribution profile

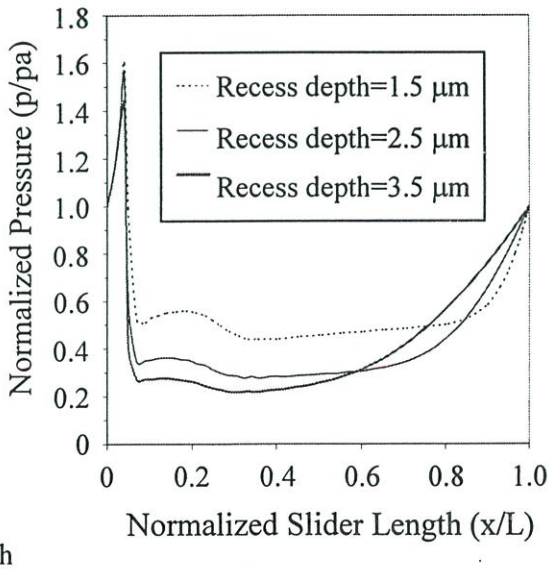


Figure 5. Pressure profile along the middle of the slider

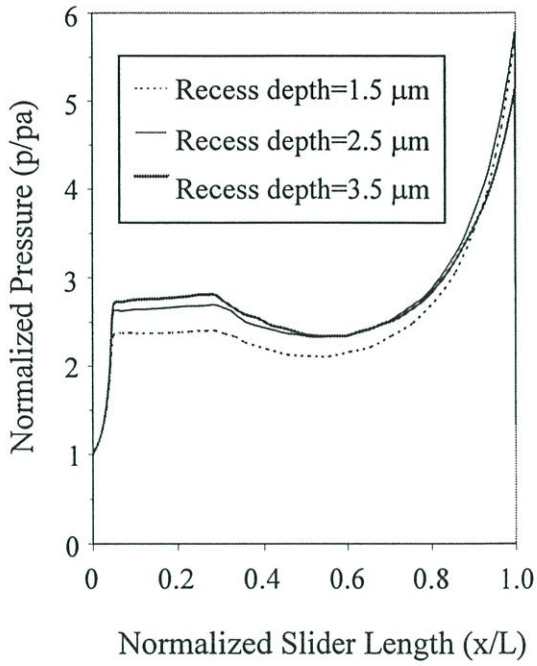


Figure 6. Pressure profile along the middle of the rail

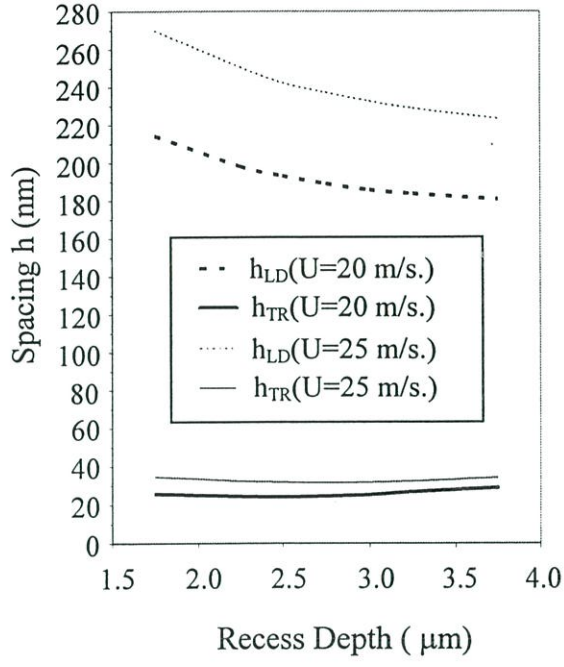


Figure 7. Variation of spacing with recess depth and disk velocity

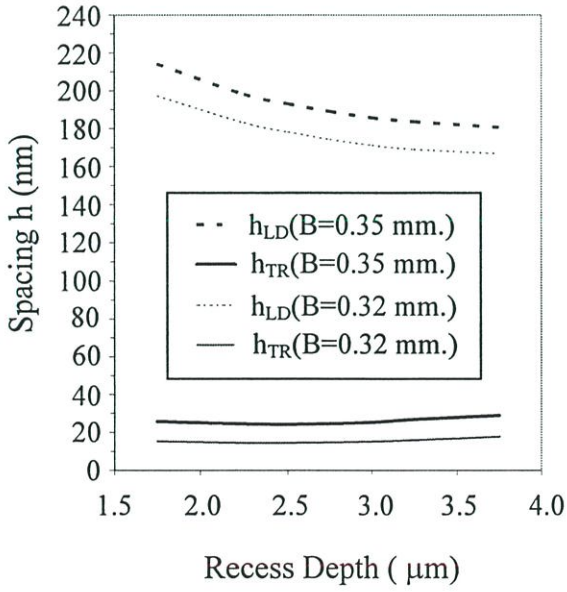


Figure 8. Variation of spacing with recess depth and rail width

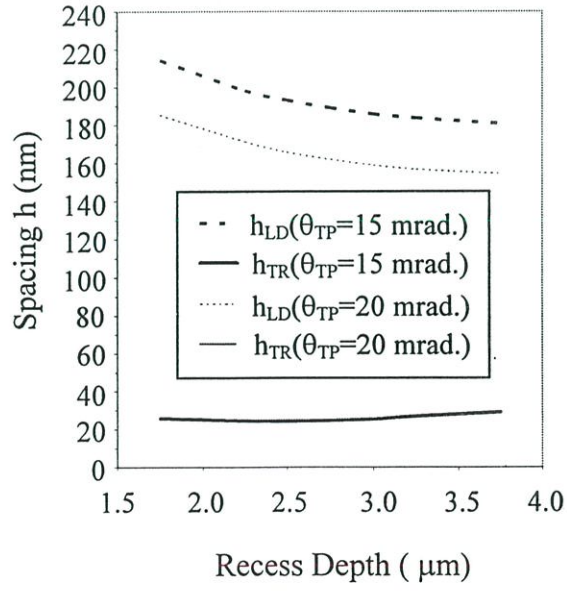


Figure 9. Variation of spacing with recess depth and taper angle

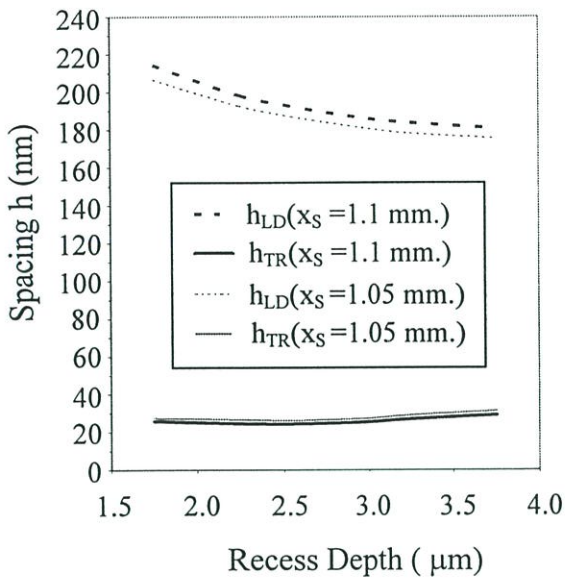


Figure10. Variation of spacing with recess depth and suspension position

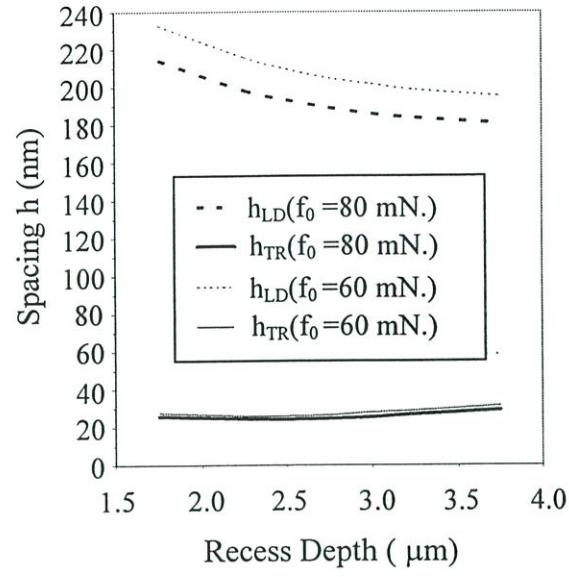


Figure11. Variation of spacing with recess depth and preload

CONCLUSIONS

The simulation of subambient pressure sliders using finite volume technique are clarified and can be concluded as :

(i) The minimum trailing edge spacing is equal to 18 nm for subambient pressure slider with recess depth 2.75 μm and rail width 0.32 mm.
(ii) Recess depth and disk velocity have significant effect on trailing edge spacing.
(iii) Recess depth has significant effect on the leading edge spacing.
(iv) The pitch angle of the subambient pressure slider decrease with the increase in the recess depth. The leading edge spacing increases with the decrease in recess depth.

NOMENCLATURE

B= slider rail width
f_0=suspension preload
F_0= normalized suspension preload (=f_0/p_aLW)
h_a=reference spacing
H= normalized spacing (=h/h_a)
h_{LD}=leading edge spacing
h_{TR}=trailing edge spacing
h_{GR}= recess depth
Kn=Knudsen number (=λ_a/h_a)
L= slider length
L_{TP}=taper length

W=slider width
M_0=normalized moment (=m_0/p_aLW)
P=normalized pressure (=p/p_a)
p_a=ambient pressure
R=length to width ratio (=L/W)
U=disk velocity
X_G=normalized location of center of gravity (=x_G/L)
X_{GS}=normalized distance between center of gravity (=x_{GS}/L)
x_S= suspension position
X_S=normalized location of support position (=x_S/L)
Z=normalized translation displacement from disk surface (=z/ha)
θ = pitch angle
Θ = normalized pitch angle (=$\theta L/h_a$)
Λ= bearing number (=$6\eta_a UL/p_a h_a^2$)
θ_{TP}=taper angle
λ_a= mean free path of the gas molecules
φ = Poiseullie flow factor

REFERENCES

[1] J.W. White., Trans. ASME Jour. Lubrication Technology ,(1983) , 484-490.
[2] K. Kogure , Trans. ASME Jour. Lubrication Technology,105,(1983) 484-490.
[3] S. Fukui and R. Kaneko , Trans. ASME Jour.Tribology , (1988) , 335-341.
[4] E. Cha. and D.B.Bogy , Trans. ASME Jour.Tribology.,117,(1995) 36-46.
[5] J.W. White., Trans. ASME Jour.Tribology.,119,(1997) 241-249.
[6] Y. Hu. and D.B. Bogy , Trans. ASME Jour.Tribology, 120,(1998) 280-288.
[7] Y. Hu., P.M. Jones and K. Li , Trans. ASME Jour.Tribology., 121,(1999) 553-559.
[8] Q. H. Zeng and D.B. Bogy , Trans. ASME Jour.Tribology,121,(1999) 341-347.
[9] H. Hashimoto and Y. Hattori , Trans. ASME Jour.Tribology, 122,(2000) 280-287.

ประวัติผู้เขียน

ว่าที่ ร.ต. เรืองยศ อารยวงษ์กุล เกิดเมื่อ วันที่ 8 มีนาคม 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 1. "Effects of Ambient Pressure Change on Flying Characteristics of Magnetic Head Slider " สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, ตุลาคม 2546 2."Effects of the Recess Depth on Static Characteristic of Subambient Pressure Sliders" The 11th Nordic Symposium on Tribology,June 2004 ประสบการณ์การทำงาน 2546 – 2547 ผู้ช่วยวิจัยใน Electro – Mechanical Engineering Laboratory โครงการ ReCCIT.