

พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์ที่ใช้อากาศผสมฮีเลียม

Characteristics of Flying Height of Air-helium Mixture Slider Head

ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว^{1*}, เจษฎา พานิชกรณ², ธีรภัฏพรณ์ เจริญ³ และ มงคล มงคลวงษ์โรจน์⁴

^{1,2,3}ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

⁴วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*ติดต่อ: khanitthaw@kmutnb.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 02-555-2000 ต่อ 6407

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์ที่ใช้อากาศผสมฮีเลียมในสภาวะคงตัว โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน - ราฟสัน และระเบียบวิธีมัลติกริด แก้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ โดยพิจารณาผลกระทบจากการเลื่อนไหลของชั้นโมเลกุลอากาศผสมฮีเลียม เพื่อหาการกระจายตัวของความดันของฟิล์มอากาศผสมฮีเลียมและระยะการลอยตัวของหัวอ่าน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอากาศผสมฮีเลียม จากการจำลองผลพบว่า เมื่อก๊าซเป็นของผสมระหว่างอากาศกับฮีเลียม ระยะการลอยตัวของหัวอ่านอากาศผสมฮีเลียมมีค่าลดลงกว่าระยะการลอยตัวของหัวอ่านอากาศ แต่ความดันของฟิล์มของหัวอ่านอากาศผสมฮีเลียมมีค่าเพิ่มขึ้น กว่าความดันของฟิล์มของหัวอ่านอากาศ การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของอากาศผสมฮีเลียม(a) เป็นผลให้ ระยะการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าลดลง แต่ความดันของฟิล์มอากาศผสมฮีเลียมมีค่าเพิ่มขึ้น

คำหลัก: หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าแบบอากาศผสมฮีเลียม, อากาศผสมฮีเลียม, สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์, ระเบียบวิธีมัลติกริด

Abstract

This paper presents the characteristics of flying height of air-helium mixtures slider head under steady state condition. The modified Reynold equation were formulated with the effect of molecular slip. Finite difference method, Newton-Raphson method and multi-grid multilevel technique was implemented to obtain air-helium pressure distribution and flying height of the slider. The simulation results shown the flying height for air-helium mixture slider is lower than the flying height for air slider but the film pressure for air-helium mixture slider is higher than the film pressure for air slider. For increasing of fraction of air helium gas mixture (a), film pressure increases but flying height of slider decreases.

Keywords: Air-helium slider, Air-helium gas mixture, modified Reynold equation, Multi-grid multilevel technique

1. บทนำ

เทคโนโลยีบันทึกข้อมูลผ่านแผ่นแม่เหล็กถูกพัฒนาตั้งแต่มีการคิดค้นฮาร์ดดิสก์ตัวแรก ในปี ค.ศ. 1956 ซึ่งในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ถูกพัฒนาให้พื้นที่ในการบันทึกข้อมูลให้มีขนาดเล็กลงในขณะที่ความจุของข้อมูลเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การสร้างฮาร์ดดิสก์ที่มีความจุสูงนั้นมีความท้าทายเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องหาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อใช้สร้างฮาร์ดดิสก์ความจุสูงขึ้นมา ด้วยการทำให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ให้น้อยลงในระดับนาโนเมตรเพื่อที่จะสามารถสร้างสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยได้มากขึ้น และเพิ่มระดับสัญญาณ โดยจะต้องควบคุมระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ให้เหมาะสม เนื่องจากระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ใกล้เกินไปจะทำให้เกิดการขีดข่วนระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ได้ ส่งผลให้เกิดข้อมูลผิดพลาดจากการอ่านหรือทำให้แผ่นดิสก์และหัวอ่านเกิดความเสียหายได้ [1]

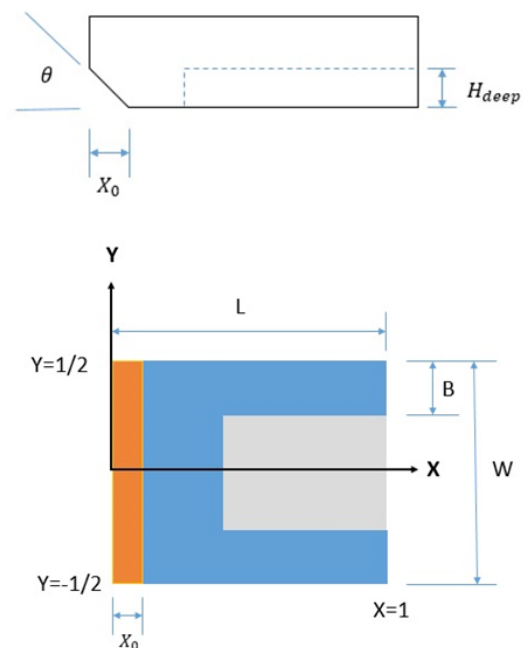
ปัจจุบันมีการใช้ก๊าซฮีเลียมในฮาร์ดดิสก์เพื่อช่วยลดระยะห่างช่องว่างระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ให้น้อยลง เนื่องจากฮีเลียมมีความหนาแน่นเพียง 1 ใน 7 ของอากาศ ซึ่งส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างก๊าซฮีเลียมกับแผ่นดิสก์ขณะหมุนจะลดลง และยังช่วยลดการสั่นของหัวอ่านทำให้สามารถอ่านเขียนข้อมูลได้ชัดเจนมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์สูงขึ้น แต่ก๊าซฮีเลียมมีอัตราการแพร่ที่สูง ดังนั้นต้องมีเทคโนโลยีการป้องกันการรั่วไหลของก๊าซฮีเลียม เพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ [2,3]

งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แบบ Sub Ambient Pressure ที่ทำงานด้วยอากาศผสมฮีเลียมเป็นสารหล่อลื่น โดยการแก้สมการโมติฟายด์เรย์โนลด์ [1,4] โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน [5,6] ร่วมกับการหาระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) และความหนืดของก๊าซผสม [7,8] เพื่อหาการกระจายของ

ความดันฟิล์มของอากาศผสมฮีเลียมที่ตำแหน่งต่างๆ และระยะการลอยตัวของหัวอ่าน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและฮีเลียม

2. ทฤษฎี

พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์ในสภาวะคงตัวตามรูปที่ 1 สามารถอธิบายด้วยสมการโมติฟายด์เรย์โนลด์โดยมีอากาศผสมฮีเลียมเป็นสารหล่อลื่นแบบอัดตัวได้ เมื่อสมมติให้อากาศผสมฮีเลียมเป็นแก๊สอุดมคติ และไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มก๊าซผสม



รูปที่ 1 ลักษณะและพิกัดของหัวอ่านที่ใช้ในการจำลองผล

2.1 สมการโมติฟายด์เรย์โนลด์แบบไร้มิติ

เมื่อคิดผลของการเลื่อนไหลของชั้นโมเลกุลอากาศผสมฮีเลียม จะได้สมการโมติฟายด์เรย์โนลด์ในรูปแบบไร้มิติสำหรับหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะคงตัว เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศผสมฮีเลียม

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[Q[P, H] \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right) \right] + k^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left[Q[P, H] \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \right) \right] = \Lambda \frac{\partial}{\partial X} (PH) \quad (1)$$

โดยที่

$$\Lambda = \frac{6\mu UL}{pa h_m^2}$$

$$k = \frac{L}{W}$$

$$Q[P, H] = \phi(P, H) PH^3$$

เมื่อ $Q[P, H]$ คือตัวประกอบกรไล

โดยที่

$$\phi[P, H] = a_0 + a_1 \left(\frac{K_N}{PH}\right) + a_2 \left(\frac{K_N}{PH}\right)^2 + a_3 \left(\frac{K_N}{PH}\right)^3$$

โดยมีเงื่อนไขขอบสมการเรย์โนลด์

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

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซผสม

การหาระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ระหว่างโมเลกุลของก๊าซผสม สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีจลน์ตามสมการของ Bird's

$$\lambda_m = \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi D_H^2 n \alpha + \pi D_{HA}^2 n (1-\alpha)} \sqrt{1 + M_H/M_A}} + \frac{1-\alpha}{\sqrt{2\pi D_A^2 n (1-\alpha) + \pi D_{HA}^2 n \alpha} \sqrt{1 + M_A/M_H}} \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } D_{HA} = \frac{D_H + D_A}{2}$$

ความหนืดของก๊าซผสมสามารถคำนวณได้จากสมการของ Reichenberg's

$$\mu_m = K_H (1 + K_{HA}^2 K_A^2) + K_A (1 + 2H_{HA} K_H + H_{HA}^2 K_H^2) \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } K_H = \frac{\alpha \mu_H}{\alpha + (1-\alpha) \mu_H H_{HA} [3 + 2(M_A/M_H)]}$$

$$K_A = \frac{(1-\alpha) \mu_A}{(1-\alpha) + \alpha \mu_A H_{HA} [3 + 2(M_H/M_A)]}$$

$$H_{HA} = \frac{\sqrt{M_H M_A / 32}}{(M_H + M_A)^{1.5}} Z_{HA} \left(\frac{M_H^{0.25}}{\sqrt{\mu_H Z_H}} + \frac{M_A^{0.25}}{\sqrt{\mu_A H_A}} \right)^2$$

$$Z_H = \frac{[1 + 0.36 T_{rH} (T_{rH} - 1)]^{1/6}}{\sqrt{T_{rH}}}$$

$$Z_A = \frac{[1 + 0.36 T_{rA} (T_{rA} - 1)]^{1/6}}{\sqrt{T_{rA}}}$$

$$Z_{HA} = \frac{[1 + 0.36 T_{rHA} (T_{rHA} - 1)]^{1/6}}{\sqrt{T_{rHA}}}$$

$$T_{rH} = \frac{T}{T_{cH}} \quad T_{rA} = \frac{T}{T_{cA}} \quad T_{rHA} = \frac{T}{(T_{cH} T_{cA})^{0.5}}$$

คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศและฮีเลียมบริสุทธิ์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณข้างต้นแสดงไว้ในตารางที่ 1 [9]

2.3 สมการความหนาฟิล์ม

ระยะการลอยตัวของหัวอ่าน (Flying height of slider) ที่ตำแหน่งต่างๆของหัวอ่าน จะขึ้นกับมุมเงยของหัวอ่าน θ (rad) ดังนั้นจากลักษณะของทางกายภาพของหัวอ่านตามรูปที่ 1 และลักษณะการทำงานหัวอ่านแสดงดังรูปที่ 2 จะได้สมการความหนาฟิล์มอากาศในรูปแบบไร้มิติ แสดงดังสมการ

$$\text{เมื่อ } 0 \leq X \leq X_0 \quad (4)$$

$$H(X, Y) = H_{TR} + (1 - X)(H_{LD} - H_{TR}) + \left(\frac{L}{h_a}\right) (X_0 - X) \tan \theta$$

$$\text{เมื่อ } X_0 < X \leq 1 \text{ ในส่วนพื้นที่สี่ฟ้ตามรูปที่ 1}$$

$$H(X, Y) = H_{TR} + (1 - X)(H_{LD} - H_{TR})$$

$$\text{เมื่อ } X_0 < X \leq 1 \text{ ในส่วนพื้นที่สี่เหลี่ยมตามรูปที่ 1}$$

$$H(X, Y) = H_{TR} + (1 - X)(H_{LD} - H_{TR}) + H_{deep}$$

2.4 สมการสมดุลแรงและโมเมนต์

ในบทความนี้ศึกษาพฤติกรรมของการลอยตัวของหัวอ่าน ในสถานะคงตัว ดังนั้นสมการสมดุลแรงของหัวอ่านในรูปแบบไร้มิติ แสดงดังสมการ

$$\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_0^1 (P - 1) dX dY = \frac{f_0}{pa LW} \quad (5)$$

สมการสมดุลของโมเมนต์ของหัวอ่านในรูปแบบไร้มิติ แสดงดังสมการ

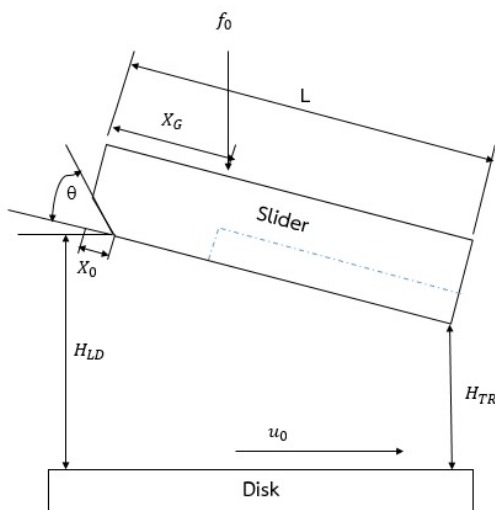
$$\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_0^1 X(P-1) dXdY = X_G \left(\frac{f_0}{p_a LW} \right) \quad (6)$$

โดยที่ X_G เป็นตำแหน่งที่หัวอ่านยึดติด Suspension

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอากาศและฮีเลียม

(อ้างอิงที่อุณหภูมิเท่ากับ 300 K, ความดันเท่ากับ 1 atm)

Physical Properties	Air	He
Molecular diameter (nm)	0.366	0.215
Molecular weight, M (g/mol)	4.003	28.96
Density, ρ (kg/m ³)	1.164	0.16
Dynamic viscosity, μ (Poise)	186	200
Critical temperature, T_c (K)	132.53	5.19
Critical pressure, P_c (bar)	37.86	2.27



รูปที่ 2 ลักษณะการลอยตัวของหัวอ่านขณะทำงาน

3. ผลการจำลองและวิจารณ์ผล

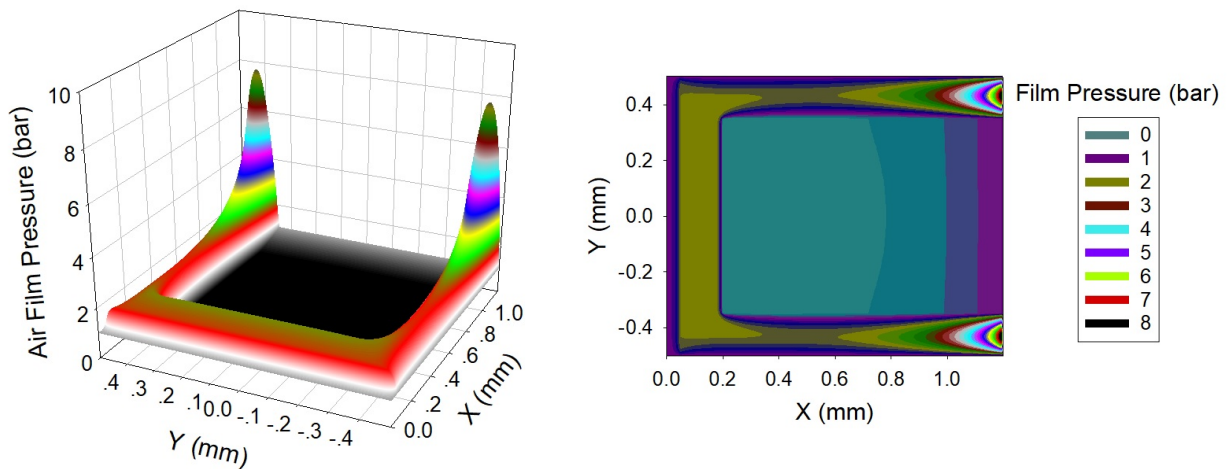
ในบทความนี้ ขนาดของหัวอ่านที่ใช้ในการจำลองผล และเงื่อนไขสภาวะในการทำงานของหัวอ่าน แสดงตาม ตารางที่ 2

จากการจำลองผล ที่ความเร็วของแผ่นดิสก์ 20 เมตร ต่อวินาที และ ภาระที่กระทำกับหัวอ่าน 10 มิลลิวัตต์ เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ พบว่า การกระจายของความ

ดันฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นบน air bearing surface มีค่า เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ในช่วงขอบหน้า (Leading Edge) และมีระยะการลอยตัวอยู่ที่ 229.13 นาโนเมตร จากนั้นความดันจะลดลงอย่างฉับพลันเนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงความลึกในบริเวณร่องหัวอ่าน ทำให้เกิดการ ขยายตัวของอากาศและเกิดบริเวณการไหลวนของอากาศ เกิดขึ้นส่งผลให้ความดันลดลงบริเวณนั้น และเพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็วที่ขอบท้าย (Trailing Edge) โดยมีระยะการ ลอยตัวอยู่ที่ 20.35 นาโนเมตร ความดันสูงสุดที่กระทำ บนหัวอ่านเกิดขึ้นที่บริเวณขอบท้าย มีค่าเท่ากับ 7.81 บาร์ แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ขนาดของหัวอ่านที่ใช้ในการจำลองผลและ เงื่อนไขสภาวะในการทำงานของหัวอ่าน

ขนาดของหัวอ่านและสภาวะในการทำงาน	ขนาด
ความยาวของหัวอ่าน, L (mm)	1.2
ความกว้างของหัวอ่าน, W (mm)	1.0
ความกว้างของรางหัวอ่าน, B (mm)	0.2
ความยาวระยะ X_0 ของหัวอ่าน (mm)	0.025
มุม θ ของระยะ X_0 ของหัวอ่าน (rad)	20×10^{-3}
ความลึก H_{deep} ของหัวอ่าน (μm)	2.0
ความเร็วของแผ่นดิสก์, U (m/s)	20.0
ภาระที่กระทำกับหัวอ่าน, f_0 (mN)	10.0

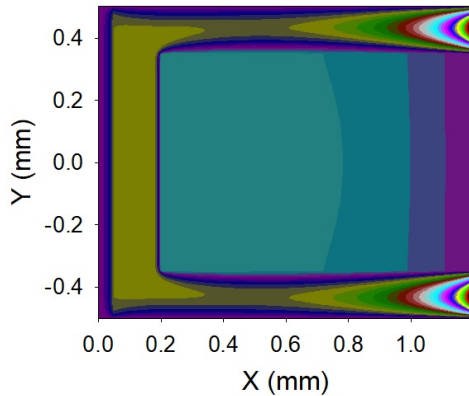


รูปที่ 3 การกระจายความดันฟิล์มอากาศที่อยู่ใต้ Air Bearing Surface ที่ความเร็วของแผ่นจาน (Disk) 20 เมตรต่อวินาที ภาระที่กระทำ 10 มิลลินิวตัน

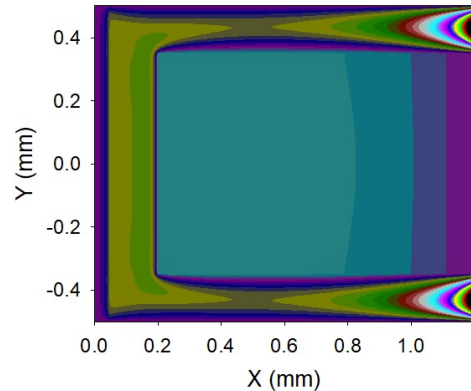
รูปที่ 4 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศผสมฮีเลียมที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface ที่มีภาระกระทำบนหัวอ่าน 10 มิลลินิวตัน ความเร็วแผ่นดิสก์ 20 เมตรต่อวินาที ที่มีอัตราส่วนผสมฮีเลียมเทียบกับอากาศมีค่า 0, 0.3, 0.6 และ 1 ตามลำดับ พบว่า ความดันฟิล์มสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ระยะการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบหน้าและขอบท้ายมีค่าลดลง โดยความดันฟิล์มสูงสุดมีค่าเท่ากับ 7.81 บาร์ 8.81 บาร์ 10.61 บาร์ และ 12.21 บาร์ และมีระยะการลอยตัวขอบหน้า (Leading Edge) มีค่าเท่ากับ 229.13 นาโนเมตร 203.41 นาโนเมตร 169.15 นาโนเมตร และ 124.06 นาโนเมตร และระยะการลอยตัวขอบท้าย (Trailing Edge) มีค่าเท่ากับ 20.35 นาโนเมตร 14.80 นาโนเมตร 9.62 นาโนเมตร และ 5.87 นาโนเมตร เมื่ออัตราส่วนผสม

ฮีเลียมเทียบกับอากาศมีค่า 0, 0.3, 0.6 และ 1 ตามลำดับ เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนฮีเลียมทำให้ความหนาแน่นลดลงส่งผลให้ลดแรงเสียดทานระหว่างก๊าซผสมกับจานดิสก์ขณะหมุน การเปลี่ยนความเร็วไปเป็นความดันของอากาศที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface มากขึ้น ทำให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่ามากขึ้น และส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความหนาฟิล์มลดลงด้วย

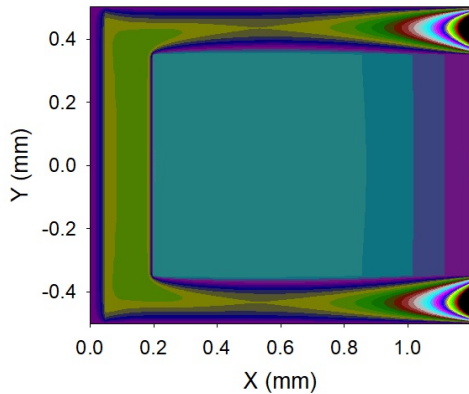
การเปลี่ยนแปลงการลอยตัวของหัวอ่านและความดันฟิล์มก๊าซผสมสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนฮีเลียมพบว่า ระยะการลอยตัวของหัวอ่านบริเวณขอบหน้า ขอบตาม และมุม Pitch Angle ลดลงแต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 5



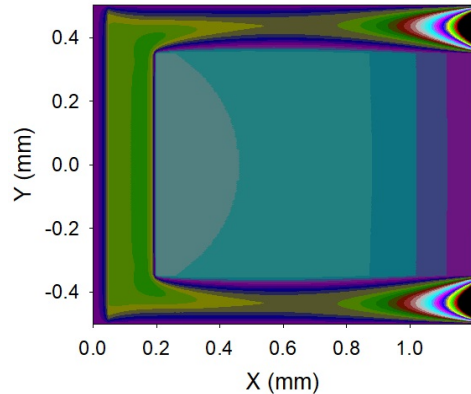
(ก) สารหล่อลื่นเป็นอากาศ ($\alpha = 0.0$)



(ข) สารหล่อลื่นเป็นอากาศผสมฮีเลียม ที่ $\alpha = 0.3$

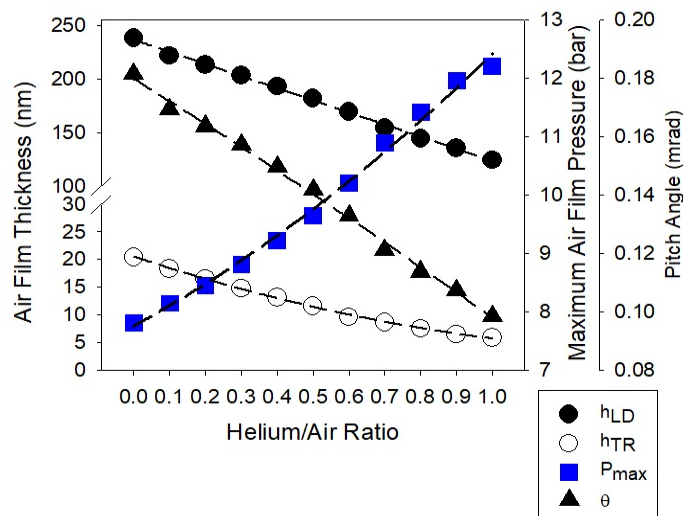


(ค) สารหล่อลื่นเป็นอากาศผสมฮีเลียม ที่ $\alpha = 0.6$



(ง) สารหล่อลื่นเป็นฮีเลียม ($\alpha = 1.0$)

รูปที่ 4 การกระจายความดันฟิล์มก๊าซผสมที่อยู่ใต้ Air Bearing Surface ภาวะที่กระทำ 10 มิลลิวัตต์ ความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที (ก) อัตราส่วนผสมฮีเลียม 0, (ข) อัตราส่วนผสมฮีเลียม 0.3, (ค) อัตราส่วนผสมฮีเลียม 0.6 และ (ง) อัตราส่วนผสมฮีเลียม 1.0



รูปที่ 5 ความดันของฟิล์มก๊าซผสมสูงสุดที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface มุม Pitch Angle ระยะการลอยตัวขอบหน้า และขอบท้าย เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างฮีเลียมกับอากาศ

4. สรุป

การจำลองพฤติกรรมการณ์การลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์แบบ Sub Ambient Pressure ในอากาศผสมฮีเลียมที่สภาวะคงตัว พบว่าเมื่ออัตราส่วนของฮีเลียมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการลอยตัวของหัวอ่านลดลงแต่ความดันฟิล์มก๊าซผสมสูงสุดเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่เอื้อเฟื้อคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองผลงานวิจัยนี้

6. สัญลักษณ์

L	ความยาวของหัวอ่าน, m
W	ความกว้างของหัวอ่าน, m
B	ความกว้างของรางหัวอ่าน, m
U	ความเร็วแผ่นดิสก์, m/s
y	ระยะทางตามความกว้างของหัวอ่าน, m
Y	ระยะทางตามความกว้างของหัวอ่านแบบไรมิติ
h	ระยะกาลลอยตัวของหัวอ่าน, m
h_a	ระยะการลอยตัวของหัวอ่านน้อยที่สุด, m
h_{TR}	ระยะการลอยตัวที่ขอบท้าย, m
H_{TR}	ระยะการลอยตัวที่ขอบท้ายแบบไรมิติ
h_{LD}	ระยะการลอยตัวที่ขอบนำ, m
H_{LD}	ระยะการลอยตัวที่ขอบท้ายแบบไรมิติ
H_{deep}	ความลึกของร่องหัวอ่าน
f_0	แรงที่กระทำที่ suspension, N
x	ระยะทางตามความยาวของหัวอ่าน, m
x_G	ระยะทางที่ suspension, m
X	ระยะทางความยาวของหัวอ่านแบบไรมิติ
X_0	ระยะที่ตำแหน่งมุมเทเปอร์, m
X_G	ระยะทางที่ suspension แบบไรมิติ

p	ความดันของฟิล์มอากาศ, Pa
P	ความดันของฟิล์มอากาศแบบไรมิติ
p_a	ความดันบรรยากาศ, Pa
K_N	Knudsen number
θ	มุมเทเปอร์, rad
α	อัตราส่วนผสมของอากาศกับฮีเลียม
T	อุณหภูมิของก๊าซผสม, K
T_A	อุณหภูมิวิกฤตของอากาศ, K
T_H	อุณหภูมิวิกฤตของฮีเลียม, K
μ_m	ความหนืดเฉลี่ยของผสมฮีเลียม, Pa-s
μ_A	ความหนืดอากาศ, Pa-s
μ_H	ความหนืดฮีเลียม, Pa-s
λ_m	ระยะทางอิสระเฉลี่ยระหว่างโมเลกุล, m
d_A	ขนาดโมเลกุลอากาศ, m
d_H	ขนาดโมเลกุลฮีเลียม, m
d_{HA}	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของอากาศผสมฮีเลียม, m
M_A	มวลโมเลกุลอากาศ, kg/kmol
M_H	มวลโมเลกุลฮีเลียม, kg/kmol

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Boonsawat, A. and Srisertpol, J. (2013). Study in Head/Disk Contact Process with Readback Signal Under Thermal Control on Variable Temperature. paper presented in The 5th International data storage technology conference DST, The Sukosol, Bangkok, Thailand.
- [2] Kyoung-Su, P., Jonghak, C., No-Cheol P. and Young-Pil, P. (2013). Effect of temperature and helium ratio for performance of thermal flying control in air-helium gas mixture, *Microsyst Technol*, vol. 19, June 2013, pp. 1679–1684.

- [3] Zhengqiang, T., Pablo, S.M. and Frank, E.T. (2014). Investigation of Head/Disk Contacts in Helium–Air Gas Mixtures, *Tribology Letters*, vol. 54(3), February 2014, pp. 279-286.
- [4] Takefumi, H., Hideyo, Y. and Yasunaga M. (2009). A Numerical Simulation Method to Evaluate the Static and Dynamic Characteristics of Flying Head Sliders on Patterned Disk Surface, *Journal of Tribology*, vol. 131, Mar 2009, pp. 155-200.
- [5] Steven, C.C. and Raymond, P.C. (2010). *Numerical Methods for Engineers*, McGraw-Hill Inc., New York.
- [6] วลีพรรณ กันเนื่อง, เกษฎา พานิชกรณั และ ฉัตรชัย เอี่ยม พรสิน (2552). พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่าน แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดเทเปอร์แพลทที่มีการเซาะร่องบนรางหัวอ่านในระบบเก็บข้อมูลทางแม่เหล็กไฟฟ้า, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, จังหวัดเชียงใหม่
- [7] Nan, L., Jinglin, Z. and David, B. (2011). Thermal Flying-Height Control Sliders in Air-Helium Gas Mixtures, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 47, January 2011, pp. 100-104.
- [8] Mongkolwongrojn, M. and Kuanon, K. (2014). Theoretical analysis of Flying Characteristics for Air-Helium Filled HDD, *Advanced Materials Research*, vol. 971-973, June 2014, pp. 844-847.
- [9] E. Poling, J. M. Prausnitz, and J. O’Connell (2001). *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill Inc., New York.