

การลดความเร็วการไหลของก๊าซฮีเลียม ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้สปอยเลอร์

Decreasing of Helium Flow Velocity inside Hard Disk Drive by Using Spoiler

สุพิชชา ถวิลไพร จารุพล สุริยวนากุล เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

การติดตั้งอุปกรณ์ลดความเร็วที่ปะทะบริเวณหัวอ่านเขียน (Head Gimbals Assembly) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive) ที่เรียกว่า สปอยเลอร์ (Spoiler) จะช่วยลดการไหลที่ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียน ซึ่งก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่หัวอ่านเขียนจนเป็นผลให้การส่งผ่านข้อมูลผิดพลาด (Positioning Errors) ได้ ต่อมาได้มีการเติมก๊าซฮีเลียมเข้าไปในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อลดแรงปะทะระหว่างอุปกรณ์ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาการไหลของก๊าซฮีเลียม (Helium Flow) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้วและมีความเร็วการหมุน 7,200 รอบต่อนาที โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS เวอร์ชัน 14.5 ผลการจำลองแสดงให้เห็นรูปแบบการกระจายความเร็ว (Velocity Profile) ของสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 มิลลิเมตรและความยาว 30 มิลลิเมตร สามารถลดการกระจายความเร็วของก๊าซฮีเลียมบริเวณหลังสปอยเลอร์ได้ดีที่สุดจากสปอยเลอร์ทั้งหมด 12 โมเดล เนื่องจากสปอยเลอร์ขนาดดังกล่าวสามารถเบี่ยงเบนการไหลที่มีความเร็วสูงไม่ให้ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียนโดยตรงได้ดีกว่าสปอยเลอร์ขนาดอื่น และเมื่อลดการไหลที่ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียนได้ ส่งผลให้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่านเขียนลดลง

คำสำคัญ : ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การไหลของก๊าซฮีเลียม

Abstract

The installation of spoiler that strikes the (Head Gimbals Assembly: HGA) in hard disk drive, that causes a vibration on the HGA and also causes the positioning errors. Filling helium gas in the hard disk drive is helpful for reducing the strikes force on the parts in hard disk drive. In this research, Helium flow in hard disk drive (3.5 inch with 7,200 rpm) is simulated by using ANSYS fluent v.14.5 software. The results show that the velocity profile of the width 25 and length 30 millimeters spoiler is the most suitable one that reduces and divert the helium flow which strikes the HGA. When the flow of the HGA reduces, therefore the vibration will reduce as well.

Keywords : Hard Disk Drive, Computational Fluid Dynamics, Helium Flow

1. บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ถือเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่สำคัญของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้มีการพัฒนาความจุข้อมูลให้เพิ่มมากขึ้นและเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงข้อมูล (Access Time) ให้เร็วขึ้น ดังนั้นอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จึงพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยออกแบบหัวอ่านเขียนให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้เขียนข้อมูลได้มากขึ้น และออกแบบใบให้แผ่นดิสก์หมุนด้วยความเร็วที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล เพราะเหตุนี้จึงทำให้การไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เกิดจากการเพิ่มความเร็วการหมุนนั้น ส่งผลให้แขนหัวอ่านเขียนสั่นสะเทือนได้ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยลดการสั่นสะเทือนของอุปกรณ์ภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ได้แก่ การติดตั้งสปอยเลอร์ (Spoiler) เพื่อลดความเร็วของอากาศที่ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียน ซึ่งสปอยเลอร์นี้ยังมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไป เช่น ดิสก์เซพาราเตอร์ (Disk Separator), แดมเปอร์ (Damper) และแอร์ชราวด์ (Air Shroud) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวิธีการอื่นเพื่อลดการสั่นสะเทือนได้แก่ การเติมก๊าซฮีเลียมเข้าไปในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เนื่องจากก๊าซฮีเลียมมีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศ และที่สำคัญเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ

ในการออกแบบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการไหลของก๊าซนั้น ปัจจุบันนิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือที่เรียกว่า วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการลดความเร็วการไหลภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์พบว่า Hirono และคณะ [1] ทำการติดตั้งสปอยเลอร์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เพื่อศึกษาผลของความหนาและความยาวของสปอยเลอร์ที่มีผลต่อความเร็วลมที่กระทบบริเวณแขนหัวอ่านเขียน พบว่าสปอยเลอร์สามารถลดความเร็วลมที่ปะทะได้ แต่การเพิ่มความหนาและความยาวของสปอยเลอร์ที่มากเกินไปจะไม่มีผลต่อการลดความเร็วลมปะทะ จากนั้น จารุพล สุริยวนากุล และเกียรติฟ้า ตั้งใจจิต [2]

ทำการศึกษาผลของการลดความเร็วลมในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์พบว่า เมื่อความหนาของสปอยเลอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเร็วลมบริเวณขอบนอกของแผ่นดิสก์ลดลง แต่จะทำให้ลมเบี่ยงเบนเข้าสู่บริเวณขอบในของแผ่นดิสก์เพิ่มขึ้น ต่อมา วรรณญา กันแก้ว และเกียรติฟ้า ตั้งใจจิต [3] ได้ศึกษารูปร่างของสปอยเลอร์ที่มีผลต่อการลดความเร็วลมพบว่า สปอยเลอร์ที่มีความยาวมากกว่าจะสามารถลดความเร็วลมปะทะได้มากกว่า ต่อมา Sato และคณะ [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของก๊าซฮีเลียมที่มีผลต่อการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์พบว่าก๊าซฮีเลียมสามารถถ่ายเทความร้อนจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ได้อีกทั้งยังลดพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความต้านการไหลของอากาศ เมื่อพิจารณาการทำงานภายใต้การไหลของอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับก๊าซฮีเลียม [5], [6] โดยใช้ ANSYS/CFX Software ในการจำลองการไหลของอากาศและก๊าซฮีเลียม โดยใช้โมเดล Direct Numerical Simulation (DNS) โดยพิจารณาถึงความหนาแน่นของลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผลต่อแขนหัวอ่านเขียน พบว่าที่ความเร็วการหมุนเท่ากันในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เติมก๊าซฮีเลียมจะสามารถกระจายความเร็วได้ดีกว่าอากาศ และเมื่อความเร็วการหมุนของแผ่นดิสก์เพิ่มขึ้น [7] จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนในก๊าซฮีเลียมมากกว่าในอากาศ แต่เนื่องจากฮีเลียมที่มีความหนืดสูงกว่าอากาศ และมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศจึงทำให้การไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นกระทบต่อบริเวณแขนหัวอ่านเขียนน้อยมาก เป็นที่น่าสนใจว่าแม้ความเร็วการหมุนของแผ่นดิสก์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เติมก๊าซฮีเลียมเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่สามารถลดความปั่นป่วนที่อาจกระทบต่อบริเวณแขนหัวอ่านเขียนได้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการติดตั้งสปอยเลอร์เพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่เติมก๊าซฮีเลียม

2. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ขอบเขตการไหลของก๊าซฮีเลียมในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์สมมติให้การไหลดังกล่าวเกิดจากของไหลที่บีบอัดไม่ได้

และมีความหนาแน่นคงที่ จะได้สมการอนุรักษ์มวล (1)
และสมการโมเมนตัม (2) ดังนี้ [8]

$$\nabla \cdot \underline{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \underline{U}}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \cdot \underline{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \underline{U} \quad (2)$$

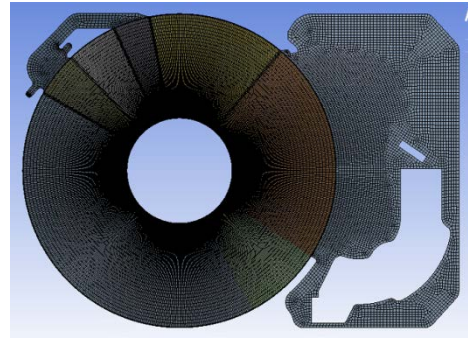
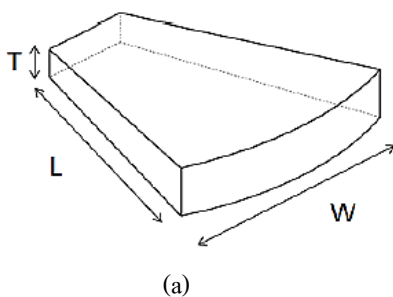
เมื่อ $\underline{U}$ คือความเร็วการไหล, ρ คือความหนาแน่น และ P คือความดันของก๊าซฮีเลียมในขณะที่ทำการทดลอง

สมการความปั่นป่วนที่นิยมใช้ในการจำลองการไหลของก๊าซภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้แก่ โมเดล Realizable k-epsilon เนื่องจากเป็นโมเดลที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยและสามารถให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) อีกด้วย [9]

3. ระเบียบวิธีการแก้ปัญหา

3.1 แบบจำลองของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้ในการจำลองการไหลจะมีขนาด 3.5 นิ้วซึ่งมีความเร็วการหมุน 7,200 รอบต่อนาที หมุนในทิศทางเข็มนาฬิกา ซึ่งค่าคุณสมบัติของก๊าซฮีเลียมที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ อุณหภูมิเมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน 50 องศาเซลเซียส [10], ความหนาแน่น 0.1512 kg/m^3 [11] และติดตั้งสปอยเลอร์ทั้งหมด 12 โมเดล โดยกำหนดให้ค่าความหนาของสปอยเลอร์อยู่ที่ 1.3 มิลลิเมตร แบ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวเป็น 4 ขนาดได้แก่ 15, 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร ส่วนความกว้างของสปอยเลอร์นั้น แบ่งเป็น 3 ขนาดได้แก่ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1

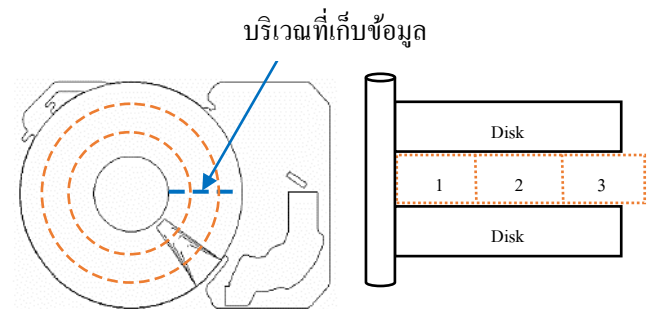


(b)

รูปที่ 1: (a) รูปร่างของสปอยเลอร์โดยกำหนดให้ตัวแปร T คือ ความหนา, W คือ ความกว้าง, L คือ ความยาว และ (b) แบบจำลองเมช

3.2 แบบจำลองการไหลของก๊าซฮีเลียม

ในการสร้างแบบจำลองการไหลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS เวอร์ชัน 14.5 ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้กำหนดให้การคำนวณเป็นแบบสถานะคงที่ (Steady State) โดยจะกำหนดบริเวณที่เก็บข้อมูลความเร็วการไหลอยู่ด้านหลังของสปอยเลอร์แสดงดังรูปที่ 2 โดยที่ขอบเขตของบริเวณที่เก็บข้อมูลจะอยู่กึ่งกลางระหว่างแผ่นดิสก์ทั้งสองแผ่น



รูปที่ 2: บริเวณที่เก็บข้อมูลความเร็วการไหลหลังสปอยเลอร์โดยตำแหน่งที่ 1,2,3 คือบริเวณขอบใน (ID), กึ่งกลาง (MD) และบริเวณขอบนอก (OD) ของช่องว่างก๊าซระหว่างแผ่นดิสก์

4. ผลการคำนวณและการอภิปราย

จากการคำนวณพบว่า เมื่อติดตั้งสปอยเลอร์จะทำให้การไหลของก๊าซเบี่ยงเบนเข้าสู่บริเวณ ID เนื่องจากสปอยเลอร์นั้นได้ขวางกั้นการไหลไว้ จึงทำให้ความเร็ว

การไหลในบริเวณ ID มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฮาร์ดดิสก์ที่ไม่ได้ติดตั้งสปอยเลอร์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : ความเร็วการไหลที่ลดลง (m/s) เมื่อติดตั้งสปอยเลอร์

โมเดล	ID	MD	OD	ความเร็ว ลดลง เฉลี่ย
W5L15	28.567	19.983	3.802	-9%
W15L15	33.650	6.079	3.931	-6%
W25L15	37.676	7.544	3.885	4%
W5L20	37.571	8.457	4.937	-3%
W15L20	24.471	25.975	3.869	17%
W25L20	26.554	5.067	3.869	45%
W5L25	27.134	4.773	4.113	-16%
W15L25	35.842	5.959	3.969	16%
W25L25	17.296	29.514	6.424	59%
W5L30	14.108	9.686	3.384	-18%
W15L30	11.219	3.725	4.679	-9%
W25L30	28.392	4.899	4.080	12%
No spoiler	12.569	23.919	25.115	-

โดยที่ความเร็วการไหลที่ลดลงและความเร็วการไหลที่ลดลงเฉลี่ยสามารถหาได้จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ

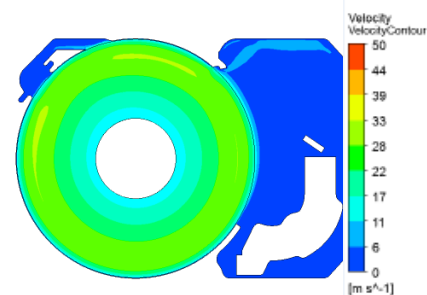
$$DV = \frac{V_{Nospoiler} - V_{spoiler}}{V_{Nospoiler}} \quad (3)$$

$$ADV = \frac{DV_{ID} + DV_{MD} + DV_{OD}}{3} \times 100\% \quad (4)$$

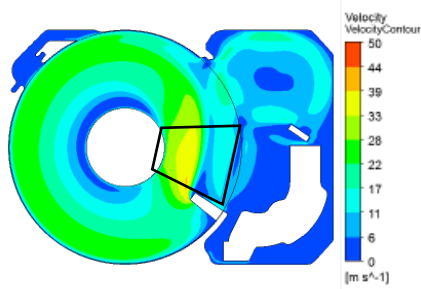
เมื่อ DV คือความเร็วการไหลที่ลดลง(m/s), $V_{Nospoiler}$ คือความเร็วการไหลก่อนติดตั้งสปอยเลอร์(m/s), $V_{spoiler}$ คือความเร็วการไหลเมื่อติดตั้งสปอยเลอร์(m/s), ADV คือความเร็วการไหลที่ลดลงเฉลี่ยและ DV_{ID} , DV_{MD} , DV_{OD} คือความเร็วการไหลที่ลดลง (m/s) ในบริเวณ ID, MD และ OD ตามลำดับ

จากผลการจำลองการไหลของก๊าซฮีเลียมในฮาร์ดดิสก์ได้พบว่า เมื่อความยาวของสปอยเลอร์เพิ่มขึ้นความเร็วการไหลที่เข้าสู่บริเวณ ID จะมีค่าสูงขึ้น แต่ในส่วนของบริเวณ MD และ OD จะมีความเร็วลดลง

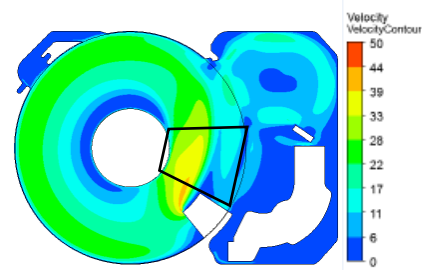
เนื่องมาจากสปอยเลอร์ได้ขวางกั้นการไหลไว้และเมื่อพิจารณาที่ความกว้างของสปอยเลอร์พบว่าความกว้างมีผลต่อความเร็วการไหลที่เข้าสู่บริเวณ ID เช่นกัน จากตารางที่ 1 จะพบว่า สปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 มิลลิเมตรและความยาว 25 มิลลิเมตรจะสามารถลดความเร็วเฉลี่ยที่ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียนได้มากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาที่รูปแบบการกระจายความเร็ว (Velocity profile) ดังแสดงในรูปที่ 4(a) ถึงรูปที่ 4(d) ประกอบกันพบว่า สปอยเลอร์ขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตรและความยาว 25 มิลลิเมตรนั้น มีการกระจายความเร็วสูงเป็นบริเวณที่กว้างกว่าสปอยเลอร์ขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร สังเกตได้จากสีของคอนทัวร์ที่มีความเร็วต่ำ (บริเวณสีน้ำเงิน) ซึ่งอยู่ในพื้นที่รอบสัปดาห์ด้านหลังสปอยเลอร์ ซึ่งสปอยเลอร์ขนาดความกว้าง 25 ความยาว 30 มิลลิเมตรมีพื้นที่ของคอนทัวร์สีน้ำเงินเป็นบริเวณที่กว้างกว่า ซึ่งแสดงถึงการกระจายความเร็วต่ำที่กว้างกว่าสปอยเลอร์ขนาดอื่น แสดงว่าสปอยเลอร์ขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตรนั้นสามารถลดการกระจายความเร็วบริเวณหลังสปอยเลอร์ได้ดีกว่าขนาดอื่น ซึ่งการลดการกระจายความเร็วบริเวณหลังสปอยเลอร์นั้นมีความสำคัญกว่าค่าความเร็วลดลงเฉลี่ยที่ได้จากจุดเก็บข้อมูลทั้ง 9 จุด เนื่องจากจุดดังกล่าวนี้เป็นจุดที่สุ่มเลือกขึ้นมา จึงไม่สามารถบอกตำแหน่งของแขนหัวอ่านเขียนขณะที่ฮาร์ดดิสก์ได้ทำงานได้ จึงจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายความเร็วบริเวณที่แขนหัวอ่านเขียนทำงานประกอบด้วยเพื่อวิเคราะห์การไหลที่กระทบแขนหัวอ่านเขียนให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



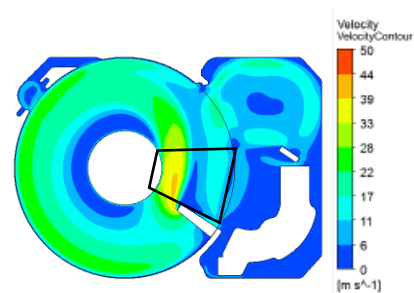
รูปที่ 3: รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กรณีที่ไม่ได้ติดตั้งสปอยเลอร์



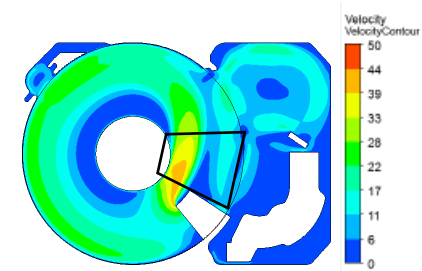
รูปที่ 4(a): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดร์ฟที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 5 และ
ความยาว 15 มิลลิเมตร



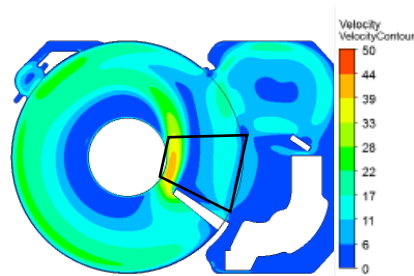
รูปที่ 4(e): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดร์ฟที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 15 และ
ความยาว 15 มิลลิเมตร



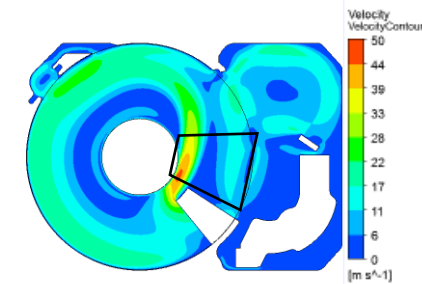
รูปที่ 4(b): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดร์ฟที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 5
และความยาว 20 มิลลิเมตร



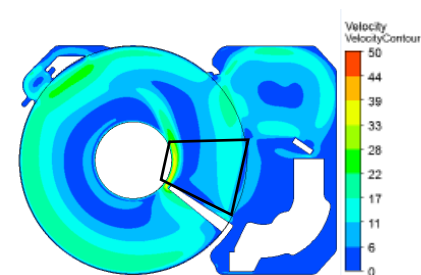
รูปที่ 4(f): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดร์ฟที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 15 และ
ความยาว 20 มิลลิเมตร



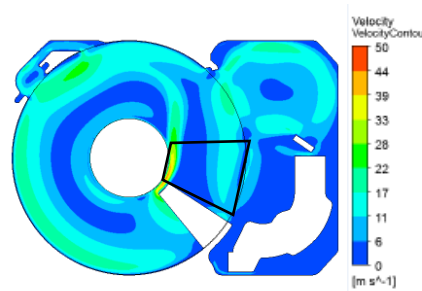
รูปที่ 4(c): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดร์ฟที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 5 และ
ความยาว 25 มิลลิเมตร



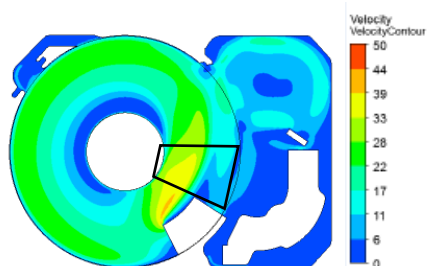
รูปที่ 4(g): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดร์ฟที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 15 และ
ความยาว 25 มิลลิเมตร



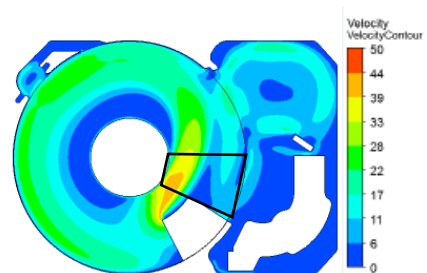
รูปที่ 4(d): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดร์ฟที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 5 และ
ความยาว 30 มิลลิเมตร



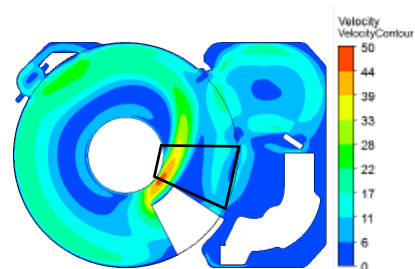
รูปที่ 4(h): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดร์ฟที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 15 และ
ความยาว 30 มิลลิเมตร



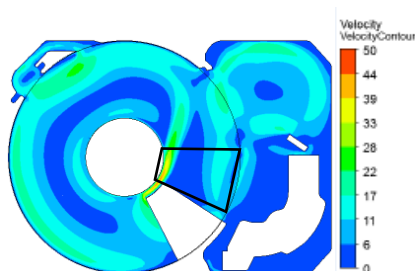
รูปที่ 4(i): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดรฟ์ที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 และ
ความยาว 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 4(j): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดรฟ์ที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25
และความยาว 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 4(k): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดรฟ์ที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 และ
ความยาว 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 4(l): รูปแบบการกระจายความเร็วของฮาร์ดดิสก์
ไดรฟ์ที่ติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีความกว้าง 25 และ
ความยาว 30 มิลลิเมตร

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการไหลของก๊าซฮีเลียมในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่าเมื่อติดตั้งสปอยเลอร์ที่มีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตรและมีความยาว 30 มิลลิเมตรรูปแบบการกระจายความเร็วบริเวณหลังสปอยเลอร์จะมีความเร็วต่ำเป็นบริเวณที่กว้างกว่าสปอยเลอร์ขนาดอื่นแสดงว่าสปอยเลอร์ขนาดดังกล่าวสามารถลดความเร็วการไหลที่ปะทะบริเวณแขนหัวอ่านเขียน ทำให้หัวอ่านเขียนทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Hirono, T. Arisaka, N. Nishijima, T. Shimizu, S. Nakamura and H. Masuda, "Flow-Induced Vibration Reduction in HDD by Using a Spoiler." IEEE Transactions on magnetics, Vol.4, No. 4, pp. 756-763, 2004.
- [2] J. Suriyawanakul and K. Tangchaichit, "CFD Investigation of Damper Plate Effect on Air Flow in High Speed Rotation Hard Disk Drive by Using K-E with a Partial Model", Applied Mechanics and materials, Vol. 392, pp. 85-89, 2013.
- [3] W. Kankaew and K. Tangchaichit, "Decreasing Airflow Velocity in High Speed Hard Disk Drive by Using Spoiler", Advanced Materials Research, Vol. 1061-1062, pp. 862-865, 2015.
- [4] I. Sato, K. Otani, S. Oguchi and K. Hoshiya, "Characteristics of heat transfer in a helium-filled disk enclosure." IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 11, pp. 571-575, 1988.

- [5] S. W. Kil, J. A. C. Humphrey, H. Haj-Hariri, "Experimental study of the flow-structure interactions in an air- or helium-filled hard disk drive geometry.", *Microsyst Technol*, Vol.18, pp. 43–56, 2012.
- [6] S. W. Kil, J. A. C. Humphrey, H. Haj-Hariri, "Numerical study of the flow-structure interactions in an air- or helium-filled simulated hard disk drive.", *Microsyst Technol*, vol.18, pp. 57–75, 2012.
- [7] S. W. Kil, J. A. C. Humphrey, H. Haj-Hariri, "Turbulence intensity inversion induced by the mass-reducing hole in an air or helium filled hard disk drive", *Microsyst Technol* , Vol.19, pp.31–42, 2013.
- [8] S. W. Kil, J. A. C. Humphrey, H. Haj-Hariri, "Numerical study of the flow-structure interactions in an air- or helium-filled simulated hard disk drive", *Microsystem Technologies*, Vol. 18, Issue 1, pp 57–75, January 2012.
- [9] Ansys Fluent 14.5, User's guide, Chapter 4, 2012
Turbulence, October 2012.
- [10] Seagate Technology LLC, What is the normal operating temperature for Seagate disk drives?
http://knowledge.seagate.com/articles/en_US/FAQ/193771en. (2016) Accessed 16 February 2016
- [11] Microelectronics Heat Transfer Laboratory, Fluid Properties Calculator. <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>. (2016) Accessed 8 February 2016