ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

ปริญญา

วิศวกรรมการบินและอวกาศ — **สาขา**

วิศวกรรมการบินและอวกาศ — **ภาควิชา**

เรื่อง การประยุกต์ใช้ CFDในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

CFD Applications in Hard Disk Drive Industry

นามผู้วิจัย นาย มงคล แก้วบำรุง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เวชพงศ์ ชุติชูเดช, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(รองศาสตราจารย์ศานติ วิริยะวิทย์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้ CFD ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

CFD Applications in Hard Disk Drive Industry

โดย

นายมงคล แก้วบำรุง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)
พ.ศ. 2551

มงคล แก้วบำรุง 2551: การประยุกต์ใช้ CFD ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ) สาขาวิศวกรรมการบินและอวกาศ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เวชพงศ์ ชุติชูเดช, Ph.D 76 หน้า

ปัญหาที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตและออกแบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของอากาศสามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะเน้นศึกษาสองเรื่องหลักๆ คือ ตำแหน่งที่เหมาะสมในการนั่งทำงานและการลดแรงเนื่องจากอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ปัญหาในห้องสะอาดจะเน้นการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งพัดลมเป่าประจุและพนักงานกับโต๊ะทำงานต่อลักษณะการไหลเพราะการหมุนวนของกระแสอากาศที่เกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ แบบมาตราฐาน พบว่าตำแหน่งของพนักงานและพัดลมเป่าประจุในตำแหน่งปัจจุบันให้ผล Circulation ต่ำสุด และยังพบอีกว่าพนักงานสามารถปรับระยะห่างระหว่างโต๊ะกับพัดลมเป่าประจุได้อีกโดยที่ไม่ทำให้ผล Circulation เพิ่มขึ้นมาก ซึ่งทำให้พนักงานทำงานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

ปัญหาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะเน้นศึกษาผลกระทบจากการติดตั้ง Blocking plate ต่อการสั่นของหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้วที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที ด้วยการจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ เพื่อหาขนาดของ Blocking plate ที่สามารถลดแรงได้มากที่สุดและการจำลองความปั่นป่วนแบบ LES เพื่อศึกษาย่านความถี่ของแรงที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านและโครงสร้างของการไหล จากผลการศึกษาด้วยการจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ พบว่า Blocking plate ที่ใหญ่ที่สุดทำให้แรงต้านลดลงมากที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของความเร็วเฉลี่ย และการจำลองความปั่นป่วนแบบ LES พบว่า Blocking plate เปลี่ยนโครงสร้างของการไหลและเพิ่มพลังงานในการหมุนแผ่นจานแม่เหล็กขึ้น 15%

____________________ ______________________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Mongkol Kaewbumrung, 2008: CFD Applications in Hard Disk Drive Industry. Master of Engineering (Aerospace Engineering), Major Field: Aerospace Engineering, Department of Aerospace Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Vejapong Juttijudata, Ph.D. 76 pages.

There are many problems in hard disk drive industries that will be beneficial from CFD. This work focuses on two main problems – an operator working position at the workbench in a clean room and a reduction of an aerodynamic force on HSA in HDD.

The effect of air ionizer and operator positions at the workbench on air recirculation is investigated by standard $k-\varepsilon$ model. The result suggests that the current position of the air ionizer and the operator produces the least amount of circulation. Furthermore it also suggests that the distances between the operator and the workbench, and the operator and the air ionizer are not sensitive to the amount of circulation but the vertical distance between the air ionizer and the workbench affects the amount of circulation significantly. Therefore the operator is suggested to maintain the current working position at the workbench with more flexibility in the distances between the operator and the workbench, and the operator and the air ionizer.

The effect of blocking plate geometry (the thickness, angular and radial dimension) to the aerodynamic force on head stack assembly in a 2.5 inch HDD with a magnetic media spinning at 15,000 rpm is studied by RNG $k-\varepsilon$ model and LES. Result from RNG $k-\varepsilon$ model suggests that the largest blocking plate reduces the largest amount of drag force on HAS and average velocity inside the HDD. LES confirms the finding from RNG $k-\varepsilon$ model and indicates that the blocking plate reduces the amount of drag on HSA by means of velocity reduction. The result also suggests flow structure changed significantly, and power consumption increases by 15%.

____________________ ______________________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้เลย ถ้าหากไม่ได้ผู้มีพระคุณดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ ที่อบรมเลี้ยงดูด้วยความรักและความอบอุ่นตลอดจนคอยเป็นที่ปรึกษาและให้กำลังใจยามที่ท้อแท้ และหมดหวังมิเคยขาด

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.เวชพงศ์ ชุติชูเดช ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ชี้แนะแนวทางและถ่ายทอดความรู้ การคิดอย่างเป็นระบบ รวมถึงถ่ายทอดประสบการการณ์ทำงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการตรวจแก้ไขจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ โรงเรียนนายเรืออากาศทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบคุณ คุณน้ำอ้อย ชินวงศ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ และเจ้าหน้าที่ศูนย์ไทยกริดแห่งชาติทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดีตลอดของการทำงานวิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

มงคล แก้วบำรุง

กันยายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	8
การตรวจเอกสาร	9
อุปกรณ์และวิธีการ	19
อุปกรณ์	19
ขั้นตอนการศึกษาโดยรวม	19
ผลและวิจารณ์	21
สรุปผลการศึกษา	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	61
ภาคผนวก	65
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	76

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	ตำแหน่งการนั่งของพนักงานแต่ละกรณีศึกษา	23
2	ส่วนประกอบและของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้ศึกษา	31
3	ขนาดของ Blocking Plate ที่ใช้ศึกษาด้วยแบบจำลองแบบปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$	32
4	เปอร์เซ็นการลดลงของแรงลาก แรงยก และความเร็วเฉลี่ยในแนวสัมผัสจากการศึกษาด้วย RNG $k-\varepsilon$	40
5	ย่านความถี่ของการไหลที่เกิดขึ้นจากการศึกษาด้วย Large-Eddy Simulation	44

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ห้องสะอาดแบบทั่วไป	2
2	ห้องสะอาดแบบแนวนอน	2
3	ห้องสะอาดแบบแนวดิ่ง	3
4	ห้องสะอาดที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	4
5	ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	6
6	หัวอ่านและเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	7
7	ห้องสะอาดแบบ Unidirectional Flow Clean room	9
8	ผลการเสียรูปของหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว	11
9	ขั้นตอนการกรองเพื่อแบ่งแยกตัวแปร	16
10	รูปร่างและค่าขอบของห้องสะอาดที่ใช้ศึกษา	21
11	ตำแหน่ง, กริด และ พื้นที่สำหรับคำนวณ Circulation	22
12	กราฟแสดงข้อมูลความเร็วจากการวัดเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของกรณีศึกษาที่ 1 บนระนาบ A-A ในภาพที่ 10	24
13	กราฟแสดงข้อมูลความเร็วจากการวัดเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของกรณีศึกษาที่ 5 บนระนาบ A-A ในภาพที่ 10	24
14	เส้นทางการไหล ความเร็วที่ Y= 1.7 เมตร สำหรับ กรณีที่ 1	27
15	เส้นทางการไหล ความเร็วที่ Y= 1.7 เมตร สำหรับ กรณีที่ 10	27
16	ขนาดของ Circulation ที่บริเวณด้านหน้าของพนักงานเมื่อเปลี่ยนความสูงของพัดลมเป่าประจุ	28
17	ขนาดของ Circulation ที่บริเวณด้านหน้าของพนักงานเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการนั่งของพนักงาน	28
18	ขนาดของ Circulation ที่บริเวณด้านหน้าของพนักงานเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ	29
19	ส่วนประกอบพื้นฐานของ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่ใช้ศึกษา	30
20	ทิศทางของการพิจารณาแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน	32
21	โดเมนของการศึกษาหลังจากสร้างกริดตามทฤษฎีของ Kolmogorov’s Hypothesis	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ระนาบ Z=3.68 และเส้นระยะในแนวรัศมี ($\mathbf{r_0}$) สำหรับพิจารณาความเร็วของอากาศ	35
23	การทดสอบความเป็นอิสระของกริดสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ กรณีไม่มี Blocking plate	36
24	การทดสอบความเป็นอิสระของกริดสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ กรณีมี Blocking plate	36
25	การทดสอบความเป็นอิสระของกริดสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation กรณีไม่มี Blocking plate	38
26	แรงลากและแรงยกเมื่อ 5< r <17 มม, 40< θ <220^0 และ 0.6< t < 1.2 มม.	39
27	ความเร็วเฉลี่ยในแนวสัมผัส (v/v_{max})	39
28	ความถี่ของแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน	41
29	ความถี่ของแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน	42
30	ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ 1	45
31	เส้นการไหลของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ 1	46
32	ความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 2	47
33	เส้นการไหลของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ ที่ 2	58
34	ความดันเฉลี่ยของระนาบที่ 2	59
35	ความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 4	50
36	เส้นการไหลของความเร็วบนระนาบที่ 4	51
37	เส้นการไหลของอากาศ ที่ระนาบที่ 4	52
38	สัมประสิทธ์ความดันที่ด้านหน้าหัวอ่าน	53
39	พลังงานที่ใช้สำหรับการหมุนแผ่นจานแม่เหล็กของกรณีไม่มี Blocking plateและกรณีมี Blocking plate	54
40	ช่องทางเบี่ยงที่นิยมใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 2.5 นิ้ว	59
41	ช่องทางเบี่ยงที่นิยมใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 3.5 นิ้ว	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

1	ข้อมูลของแรงต้านที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านสำหรับกรณีไม่มี Blocking plate รอบที่ 18 ถึง 20	67
2	ข้อมูลของแรงต้านที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านสำหรับกรณีไม่มี Blocking plate รอบที่ 21 ถึง 23	67
3	ข้อมูลของแรงต้านที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านสำหรับกรณีมี Blocking plate รอบที่ 18 ถึง 20	68
4	ข้อมูลของแรงต้านที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านสำหรับกรณีมี Blocking plate รอบที่ 21 ถึง 23	68
5	การเปลี่ยนแปลงทางสถิติของสัมประสิทธ์แรงต้านที่เวลา 0.072 วินาที สำหรับกรณีไม่มีBlocking plate	69
6	การเปลี่ยนแปลงทางสถิติของสัมประสิทธ์แรงต้านที่เวลา 0.072 วินาที สำหรับกรณีมี Blocking plate	69
7	Variance hypothesis test ของ C_d กรณีมี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่ 19	70
8	Variance hypothesis test ของ C_d กรณีมี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับรอบที่ 20	70
9	Variance hypothesis test ของ C_d กรณีไม่มี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับรอบที่ 19	71
10	Variance hypothesis test ของ C_d กรณีไม่มี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่ 20	71
11	2 sample t-test ของ C_d กรณีไม่มี Blocking plateระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่19	72
12	2 sample t-test ของ C_d กรณีไม่มี Blocking plateระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่20	72
13	2 sample t-test ของ C_d กรณีมี Blocking plateระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่19	74
14	2 sample t-test ของ C_d กรณีมี Blocking plateระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่20	74

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_d	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_l	=	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_μ	=	ค่าคงที่ของแบบจำลองความหนืดหมุนวนชนิดเชิงเส้น
G_k	=	ค่าพจน์การผลิตของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
G_ω	=	ค่าพจน์การผลิตของอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ความปั่นป่วนจำเพาะ
k	=	ค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
LES	=	การจำลองการไหลโดยวิธี Large-Eddy Simulation
P	=	ค่าความดัน
u_i	=	ค่าความเร็วเฉลี่ย
$u_i^{'}$	=	ค่าความเร็วเนื่องจากความปั่นป่วน
x_i	=	ค่าพิกัดแกน
ρ	=	ความหนาแน่น
ε	=	อัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
σ_k	=	ค่า turbulent Prandtl number ของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
σ_ε	=	ค่า turbulent Prandtl number ของสมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
μ	=	ค่าความหนืดพลศาสตร์
δ_{ij}	=	ค่า Kronecker’s delta
τ_w	=	ค่าความเค้นเฉือนที่ผิว
μ_t	=	ค่าความหนืดหมุนวน
Γ	=	ค่าการหมุนวนของกระแสอากาศ
Δt	=	ขั้นของเวลา
ϕ	=	ขนาดของกริด

การประยุกต์ใช้ CFD ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

CFD Applications in Hard Disk Drive Industry

คำนำ

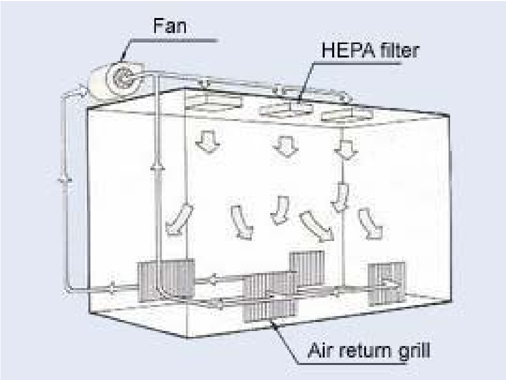
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD (Computational Fluid Dynamics) เป็นวิชาที่ว่าด้วยการแก้ปัญหาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในหลายๆสาขาวิชาและสามารถแก้ปัญหาได้อย่างคลอบคลุมเช่น ปัญหาทางด้านการไหลของของไหล ทั้งที่เป็นแบบความเร็วต่ำกว่าเสียงหรือสูงกว่าเสียง, ปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อน, การเผาไหม้ เป็นต้น ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับอากาศพลศาสตร์นั้นมีความซับซ้อนของสมการทางคณิตศาสตร์ และเกี่ยวข้องกับปัญหาค่าขอบจึงได้มีการประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเพื่อช่วยแก้ปัญหาด้านการไหลของของไหลซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนแบบไม่เชิงเส้นและยากต่อการหาคำตอบแบบแม่นตรง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาช่วยแก้ปัญหา โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้มุ่งเน้นถึงการนำความรู้เรื่องพลศาสตร์ศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาและการออกแบบในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดิส์กไดรฟ์เพื่อเพิ่มคุณภาพและลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ การศึกษาทางด้านสภาวะแวดล้อมและการจัดวางอุปกรณ์บนโต๊ะทำงานในห้องสะอาดเพื่อใช้ประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และ การหาแนวทางเพื่อปรับปรุงการสั่นของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อันเนื่องมาจากแรงจากอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการไหลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ห้องสะอาด

ห้องสะอาด หมายถึง ห้องหรือบริเวณปิดที่ได้รับการควบคุมคุณสมบัติของสภาวะแวดล้อมภายในอย่างเคร่งครัด (สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย, 2549) เช่น ปริมาณและขนาดของฝุ่นละออง ความชื้น ความดัน รูปแบบการไหลของอากาศ ความเป็นกลางทางไฟฟ้า เป็นต้น ดังภาพที่ 4 ซึ่งมีการใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เซมิคอนดักส์เตอร์ อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ และอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีห้องสะอาดเป็นองค์ประกอบพื้นฐานในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงและมีชิ้นงานเสียน้อยที่สุด ซึ่งแต่ละอุตสาหกรรมต้องการมาตรฐานความสะอาดและชนิดของห้องแตกต่าง

กันขึ้นอยู่กับขนาด ความแม่นยำและวิธีในการผลิตชิ้นงาน โดยห้องสะอาดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการไหลของอากาศคือ

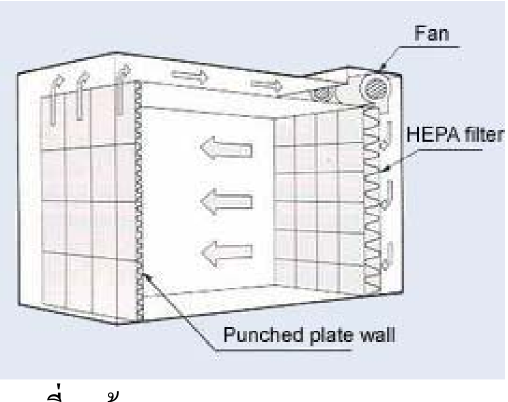
1. ห้องสะอาดแบบทั่วไป (Conventional type) หมายถึง การไหลของอากาศภายในห้องสะอาดเหมือนระบบปรับอากาศที่ใช้ทั่วไป โดยอากาศจะผ่านแผ่นกรองที่ติดตั้งบนเพดานและถูกดูดผ่านตะแกรงบริเวณมุมห้องใกล้พื้น เพื่อให้อากาศภายในห้องเกิดการหมุนวน ซึ่งใช้ได้สำหรับห้องสะอาดระดับ 10,000 – 100,000 และเป็นแบบที่ประหยัดที่สุด



ภาพที่ 1 ห้องสะอาดแบบทั่วไป

ที่มา : Clean Air Product (2008)

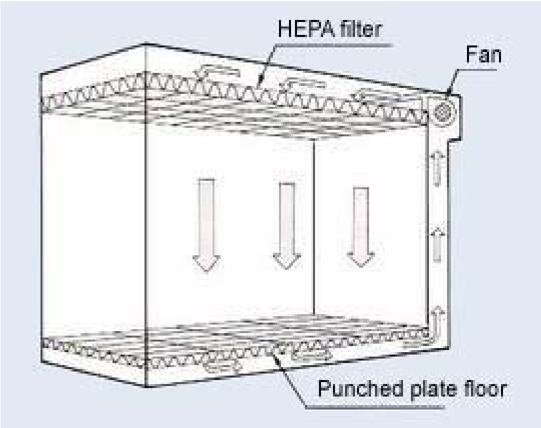
2. ห้องสะอาดแบบแนวนอน (Cross flow type) หมายถึง อากาศที่ผ่านแผ่นกรองซึ่งติดตั้งบริเวณผนังห้องด้านหนึ่งจะถูกเป่าให้เคลื่อนที่ในทิศทางขนานแนวราบด้วยความเร็วคงที่ผ่านบริเวณห้องไปยังผนังอีกด้านแล้วถูกดูดกลับผ่านเพดานกลับไปยังเครื่องเป่าซึ่งใช้ได้สำหรับห้องสะอาดระดับ 10,000 – 100,000



ภาพที่ 2 ห้องสะอาดแบบแนวนอน

ที่มา : Clean Air Product (2008)

3. ห้องสะอาดแบบแนวดิ่ง (Down flow type) หมายถึง อากาศที่ผ่านแผ่นกรองซึ่งติดตั้งบริเวณเพดานจะถูกเป่าให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ผ่านพื้นที่โปร่งเป็นตารางแล้วถูกดูดกลับไปยังเครื่องเป่า ถ้าไม่มีแบคทีเรียหรือฝุ่นเกิดในส่วนบนของห้องจะมีความสะอาดถึง ระดับ 100 ได้ และเป็นแบบที่เสียค่าใช้จ่ายมากที่สุด



ภาพที่ 3 ห้องสะอาดแบบแนวดิ่ง

ที่มา : Clean Air Product (2008)

ห้องสะอาดแบบที่มีความสะอาดระดับ 100 เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ส่วนมาตรฐานความสะอาดของของห้องสะอาดที่นิยมใช้มีอยู่ 3 มาตรฐานคือ

1. U.S. Federal Standard 209e

2. VDI 2083 (Germany)

3. British Standard BS 295 (1989)

ในการศึกษาครั้งนี้จะแบ่งมาตรฐานความสะอาดตาม U.S Federal Standard 209e ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีระดับความสะอาดอยู่ใน ระดับ 100 (จำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอน ขึ้นไปต้องมีไม่เกิน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต) นอกจากนี้แล้วสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะต้องติดตั้งพัดลมเป่าประจุ เพื่อทำให้บริเวณพื้นที่ทำงานมีค่าของกระแสไฟฟ้าสถิตย์เป็นกลางซึ่งเป็นอีกสาเหตุหลักที่ทำให้ชิ้นงานเสียและลดความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ได้

กระบวนการการผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นต้องทำการผลิตภายใต้ห้องสะอาดระดับ 100 และรูปแบบการไหลภายในห้องเป็นแบบราบเรียบ (สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย, 2549) แต่ที่ผ่านมาพบว่าบางพื้นที่ภายในห้องสะอาดไม่ผ่านมาตรฐานความสะอาดหลังจากติดตั้งเครื่องมือทำงาน พัดลมเป่าประจุ รวมถึงพนักงานที่นั่งทำงาน เป็นต้น ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าสิ่งต่างๆ เหล่านี้ได้ส่งผลกระทบให้รูปแบบการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปจากแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วนและอาจก่อให้เกิดบริเวณที่เรียกว่า การหมุนวนของกระแสอากาศ (Recirculation zone) มากขึ้นซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นส่วนที่กักเก็บฝุ่นละออง ดังนั้นหากมีการจัดบริเวณการทำงานไม่เหมาะสมหรือขัดกับหลักอากาศพลศาสตร์จะส่งผลให้เกิดจำนวนชิ้นงานเสียเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดอุปกรณ์ เพราะลักษณะการทำงานของพนักงานจะนั่งแล้วประกอบชิ้นงานบนโต๊ะ เพื่อให้เห็นถึงลักษณะหรือเส้นทางการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการทำงาน ผู้ออกแบบจำเป็นต้องนำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้เพื่อทำนายลักษณะการไหลของกระแสอากาศที่เกิดขึ้นก่อนการติดตั้งซึ่งก็จะสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาพที่ 4 ห้องสะอาดที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ที่มา : AMD (2008)

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive , HDD , ภาพที่ 5) คืออุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีความจุสูงและมีความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลสูง มีลักษณะเป็นจานหลายแผ่นซ้อนกันบนแกนเดียวติดตรึงอยู่ใน

กล่องโลหะมิดชิดกันฝุ่นละอองเข้า โดยมีหัวอ่าน (Head Stack Assembly : HSA , ภาพที่ 6) คอยทำหน้าที่อ่านและเขียนข้อมูลลงบนแผ่นจานแม่เหล็ก (Media) ส่วนการจำแนกขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานแม่เหล็ก เช่น 0.85 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว, 1.8 นิ้ว, 2.5 นิ้ว และ 3.5 นิ้ว โดยขนาดความจุนั้นก็มีตั้งแต่ 6 Gb ถึง 2,000 Gb ซึ่งปัจจุบันได้นำไปใช้เป็นตัวบันทึกข้อมูลอย่างแพร่หลายเช่น โทรศัพท์มือถือ, กล้องถ่ายรูปดิจิตอล, กล้องวีดิโอ, คอมพิวเตอร์แบบพกพา (Note Book) , คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ (PC), คอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Computer Sever), รถยนต์ และเครื่องบิน เป็นต้น นอกจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเก็บข้อมูลได้เป็นจำนวนมากแล้ว ยังมีอัตราการใช้พลังงานน้อย และมีขนาดเล็กอีกด้วย

เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้สามารถจัดเก็บข้อมูลได้มากขึ้น การพัฒนาและวิจัยให้แผ่นจานแม่เหล็กเพียงหนึ่งแผ่นสามารถเก็บข้อมูลได้มากขึ้นเป็น 1 Tb ต่อแผ่นนั้นหมายความว่า จำนวนความหนาแน่นของแกนข้อมูล (Track) ต่อความยาวหนึ่งนิ้วบนจานแม่เหล็กต้องสามารถเก็บข้อมูลได้ 500,000 แกนข้อมูลและขนาดของแกนข้อมูลมีขนาดประมาณ 13x50 นาโนเมตร ซึ่งภายใต้ข้อกำหนดของขนาดของแกนข้อมูล ดังกล่าวทำให้การอ่านหรือเขียนข้อมูลความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (Tolerance) ประมาณ 1.5 นาโนเมตร ดังนั้นถ้าหัวอ่านมีการสั่นเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อการอ่านหรือเขียนข้อมูลได้

การเพิ่มความเร็วรอบของการหมุนแผ่นจานแม่เหล็กก็เป็นอีกวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้าถึงข้อมูลให้มีความเร็วมากยิ่งขึ้น โดยจากเดิม ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 2.5 นิ้ว มีความเร็วรอบเพียง 4,200 รอบต่อนาที ที่ความจุ 4 Gb ไปเป็น 10,000 รอบต่อนาทีที่ความจุมากกว่า 320 Gb และมีแนวโน้มว่าในอนาคตจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 15,000 รอบต่อนาที ที่ความจุมากกว่า 1,000 Gb ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบและความจุดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงกับความผิดพลาดของการอ่านและเขียนข้อมูล (Track mis-registration (TMR)) ของหัวอ่าน อันเนื่องมาจากภาระโหลดของอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการไหลแบบปั่นป่วนไม่คงตัวในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ที่ความเร็วแผ่นจานแม่เหล็ก 5,400 – 10,000 รอบต่อนาที สามารถลดความผิดพลาดของการอ่านและเขียนข้อมูลได้โดย ปรับเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของ กล่อง, มอเตอร์, ติดตั้ง Spoiler ที่บริเวณด้านหน้าหรือด้านหลังของหัวอ่าน, ลดระยะห่างระหว่างแผ่นจานแม่เหล็ก หรือ ลดระยะห่างระหว่างแผ่นจานแม่เหล็กกับผนังของกล่อง และ การเปลี่ยนของไหลที่อยู่ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไปเป็นก๊าซอย่างอื่นที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศ และไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน เช่น ฮีเลียม เป็นต้น

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาของ Kirpekar and Bogy (2006) ด้วยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว พบว่าการติดตั้ง Blocking Plate สามารถลดการสั่นของหัวอ่านได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากการออกแบบ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 3.5 นิ้ว กับ 2.5 นิ้ว นั้นมีความแตกต่างกันทั้งในเรื่องของขนาด, จำนวน และรูปร่างของหัวอ่าน พอสมควร จึงเป็นสาเหตุให้การปรับปรุงการสั่นของหัวอ่านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 3.5 นิ้ว อาจจะไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 2.5 นิ้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วมากกว่า 10,000 รอบต่อนาที จากการสืบค้นเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการออกแบบและพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีค่อนข้างหลากหลายและส่วนมากจะศึกษาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว ที่ความเร็วรอบอยู่ระหว่าง 7,200-15,000 รอบต่อนาที ส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้วนั้นมีค่อนข้างน้อยทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในช่วงที่ผ่านมาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว ไม่เป็นที่นิยมเพราะจะใช้กับคอมพิวเตอร์แบบพกพาเท่านั้น แต่ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว มีการนำมาใช้แทนที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว มากขึ้นเพื่อลดพื้นที่การติดตั้งและการใช้พลังงาน ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงต้องการวิจัยเพื่อหาวิธีการใหม่ๆหรือเทคโนโลยีใหม่ๆเพื่อลดการสั่นของหัวอ่านอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของแรงจากอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น โดยเน้นการศึกษาการสั่นของหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 2.5 นิ้ว ที่มีความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที

ภาพที่ 5 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ที่มา : Western Digital (2008)

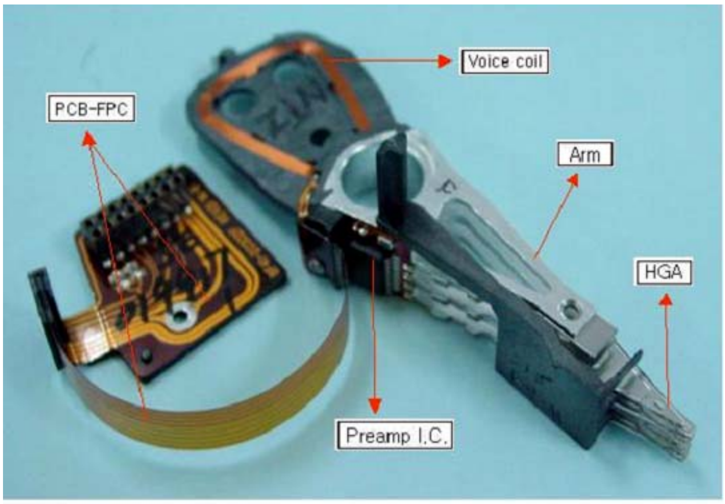


Figure2-2. HSA(Head Stack Assembly) picture

ภาพที่ 6 หัวอ่านและเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ที่มา : HTECH (2008)

วัตถุประสงค์

เนื่องจากอุตสาหกรรมผลิตและออกแบบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำและความสะอาดสูงอีกทั้งในกระบวนการผลิตและออกแบบนั้นยังเกี่ยวของกับการไหลของอากาศโดยตรง ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบนั้นต้องมีความละเอียดมากเป็นพิเศษเพราะค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้นั้นอยู่ในระดับนาโนเมตร เช่นเดียวกับขั้นตอนการผลิตและประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะต้องทำภายในห้องสะอาดเท่านั้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นในบริเวณการผลิตหรือภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพียงเล็กน้อยจะส่งผลโดยตรงกับคุณภาพของชิ้นงานทันที เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มความน่าเชื่อถือและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยครั้งนี้ได้นำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาประยุกต์เพื่อแก้ไขและป้องกันปัญหาอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นโดยแบ่งเป็นสองส่วนคือ

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องสะอาดเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของพัดลมเป่าประจุและตำแหน่งการนั่งของพนักงานโดยพิจารณาจากการเกิดการหมุนวนของกระแสอากาศ และค่า Circulation ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าของพนักงาน

2. ศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศรอบหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 2.5 นิ้ว ที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที เมื่อมีการติดตั้งและเปลี่ยนแปลงขนาดของ Blocking plate โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ที่กระทำบนหัวอ่านและการเปลี่ยนแปลงย่านความถี่ของแรงที่เกิดขึ้นหลังจากมีการติดตั้ง Blocking plate

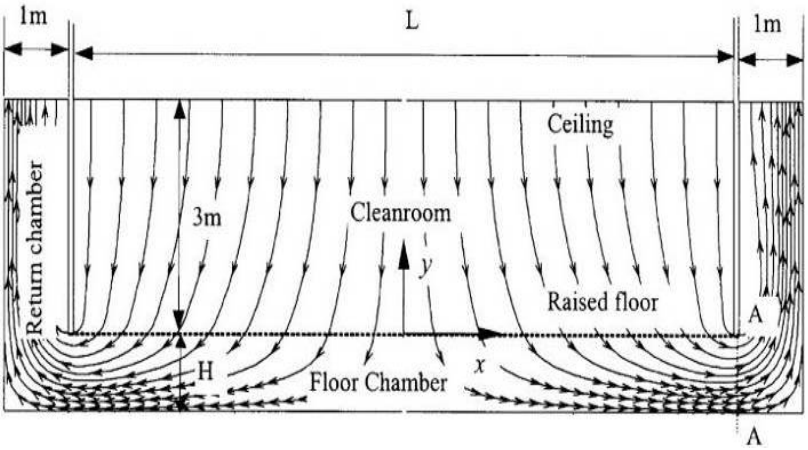
การตรวจเอกสาร

1. เอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา (Literature Review)

ห้องสะอาด

ห้องสะอาดเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความแม่นยำและความสะอาดสูงเป็นพิเศษและเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของห้องสะอาดรวมถึงการทำนายพฤติกรรมทางด้านอากาศพลศาสตร์การไหลและการแพร่กระจายของฝุ่นละออง (Contamination) ภายในห้องซึ่งจากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีหลายปัจจัยที่มีผลกับคุณสมบัติทางด้านอากาศพลศาสตร์และการกระจายตัวของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด

Cheng *et al.* (1999) ศึกษาการออกแบบ Unidirectional Flow Clean room (ภาพที่ 7) พบว่าถ้าความเร็วขาเข้าที่ฝ้าเพดานเป็นแบบไม่คงที่ตลอดทั้งฝ้าเพดาน (Step inlet velocity distribution) จะทำให้การไหลในห้องสะอาดมีความเป็นเอกรูปมากยิ่งขึ้นซึ่งเช่นเดียวกับความสูงของพื้นห้อง และความพรุนของพื้นห้องที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การไหลในห้องสะอาดมีความเป็นเอกรูปสูงขึ้นแต่ถ้าเพิ่มความกว้างของห้องสะอาดมากขึ้นจะส่งผลให้ความเป็นเอกรูปลดลง



ภาพที่ 7 ห้องสะอาดแบบ Unidirectional Flow Clean room

ที่มา : Cheng *et al.* (1999)

Chul *et al.* (2005) ได้ศึกษาพฤติกรรรมการไหลของอากาศและการกระจายตัวของสิ่งแปลกปลอมในกระบวนการ Photolithography พบว่าถ้าปรับความพรุนของแผ่นกรองที่อากาศขาเข้า (Porosity of access panel) ให้สอดคล้องกับค่าความหน่วงของแผ่นหน่วงอากาศ (Damper) ที่ขาออกจะส่งผลให้กระแสอากาศมีความเป็นเอกรูปมากยิ่งขึ้น

Suh and Wu (2002) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของการเคลื่อนที่ของพนักงานภายในห้องสะอาด โดยได้ชี้ให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของพนักงานที่ความเร็วคงที่แต่ที่เวลาต่างๆกันนั้นทำให้เกิดการหมุนวนของกระแสอากาศบริเวณรอบๆตัวของพนักงานและบริเวณที่ทำงานซึ่งบริเวณที่เกิดการหมุนวนของกระแสอากาศนี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นอย่างยิ่งในห้องสะอาดเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความปั่นป่วนสูงและจะเป็นบริเวณที่สามารถกักเก็บฝุ่นได้ ดังนั้นถ้าต้องการลดการหมุนวนของกระแสอากาศบริเวณที่ทำงานอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้ม่าน (Curtain) มากั้นระหว่างบริเวณที่ทำงานกับพนักงานก็จะสามารถป้องกันปัญหาดังกล่าวได้

จากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าได้มีการศึกษาสำหรับการไหลของอากาศทั้งห้องสะอาดเพื่อดูลักษณะการไหลในระดับมหภาคแต่ยังไม่มีการศึกษาหรือวิเคราะห์การไหลของอากาศที่บริเวณโต๊ะทำงานอย่างชัดเจนมากนักดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้คือการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยน ตำแหน่งของพัดลมเป่าประจุและตำแหน่งการนั่งของพนักงาน เพื่อประโยชน์ในการจัดวางพื้นที่การทำงานให้ถูกต้องตามหลักอากาศพลศาสตร์และเหมาะสมต่อกระบวนการผลิต

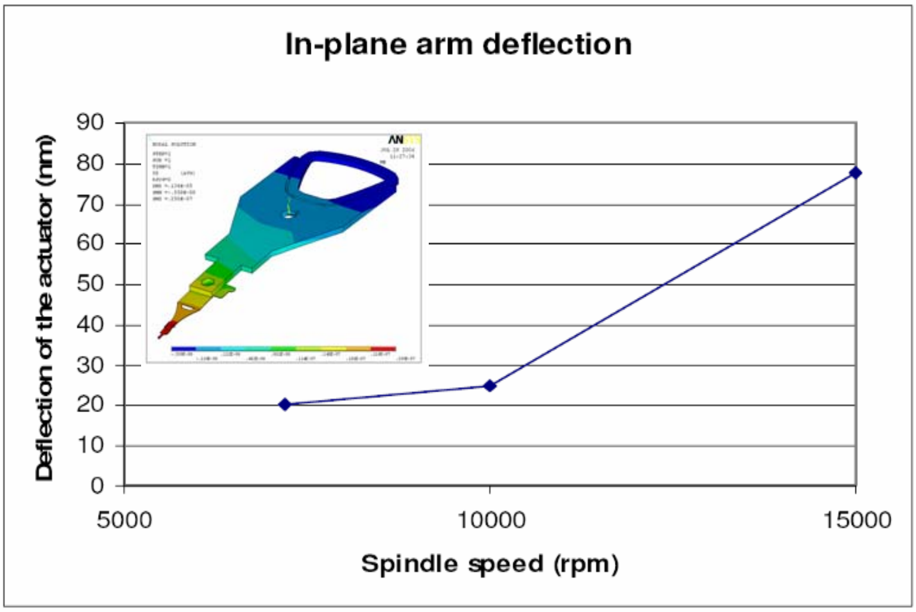
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คืออุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีความจุสูง มีความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลสูงแต่ยังมีอัตราการใช้พลังงานน้อย และมีขนาดเล็กอีกด้วย ซึ่งปัจจุบันได้นำไปใช้เป็นตัวบันทึกข้อมูลอย่างแพร่หลายเช่น โทรศัพท์มือถือ, กล้องถ่ายรูปดิจิตอล, กล้องวีดิโอ, รถยนต์ และเครื่องบิน เป็นต้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้สามารถจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลได้มากขึ้นการพัฒนาและวิจัยให้แผ่นจานแม่เหล็กเพียงหนึ่งแผ่นสามารถเก็บข้อมูลได้มากขึ้นเป็น 1 Tb ต่อแผ่นจึงได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องควบคู่ไปกับการเพิ่มความเร็วรอบของการหมุนแผ่นจานแม่เหล็กซึ่งก็เป็นอีกวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้าถึงข้อมูลให้มีความเร็วมากยิ่งขึ้นแต่ผลที่ตามมาคือการสั่นของหัวอ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งด้วยเหตุผล

ดังกล่าวทำให้นักวิจัยและวิศวกรทำการวิจัยและพัฒนาเพื่อหาแนวทางการลดการสั่นของหัวอ่านอย่างต่อเนื่อง

Tan *et al.* (2006) ศึกษาโดยใช้วิธี Large-Eddy Simulation (LES) พบว่าการสั่นของแรงจากอากาศพลศาสตร์มีความสัมพันธ์กันกับค่าขนาดของการสั่นของแผ่นจานแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลให้การอ่านและเขียน ข้อมูลลงบนแผ่นจานแม่เหล็กผิดพลาด และที่ความเร็วรอบสูงๆ การใช้พลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอากาศกับแผ่นจานแม่เหล็กเพิ่มขึ้น และ Imai (2001) พบว่า ขนาดของการกระพือและการสั่นของความดันแปรผันตามระยะห่างระหว่างแผ่นจานแม่เหล็กกับขอบของกล่อง และ ความเร็วรอบ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของความดันที่เกิดจากการไหลแบบหมุนของอากาศจากแผ่นจานแม่เหล็ก

นอกจากนี้แล้ว Shimizu *et al.*(2001) ยังได้ศึกษาถึงการเสียรูปของหัวอ่านโดยใช้ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ชนิด 1 แผ่นจานแม่เหล็ก พบว่าการเสียรูปของหัวอ่านจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบการหมุนของแผ่นจานแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นและจะเกิดการเพิ่มแบบก้าวกระโดดที่ความเร็วรอบของแผ่นจานแม่เหล็ก 15,000 รอบต่อนาที เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการแกว่งของความดัน (Pressure Fluctuation) ที่เกิดจากการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ผลการเสียรูปของหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว

ที่มา : Shimizu *et al.*(2001)

ต่อมาได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงการไหลของอากาศและลดการสั่นของหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาทีด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation ของ Ikegawa *et al.* (2006) พบว่าการติดตั้ง Spoiler ควบคู่กับช่องทางเบี่ยง (Bypass) สามารถลดการสั่นของหัวอ่านได้โดย Spoiler จะทำหน้าที่ลดความเร็วของอากาศก่อนเข้ามาปะทะกับหัวอ่าน, เปลี่ยนทิศทางของกระแสอากาศให้เข้าสู่ช่องทางเบี่ยง (Bypass) มากขึ้น และเปลี่ยนเส้นการไหลของอากาศที่มีความเร็วสูงไปบริเวณด้านในของแผ่นจานแม่เหล็ก ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องจากการวัดด้วย LDV ว่าการติดตั้ง Spoiler ควบคู่กับช่องทางเบี่ยงสามารถลดการสั่นของหัวอ่านได้ดีกว่าแบบมีช่องทางเบี่ยงอย่างเดียวถึง 30%

นอกจากนี้ Kirpekar and Bogy. (2006) ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว โดยมีอุปกรณ์ลดความเร็วของอากาศแบบต่างๆ พบว่า Blocking plate สามารถลดการสั่นของ Suspension ได้ดีกว่า Downstream Spoiler และ Upstream Spoiler โดย Blocking plate สามารถลดความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential velocity) ก่อนเข้าปะทะกับหัวอ่านลง 35% และสามารถลดการแกว่งของความเร็ว (Velocity fluctuation) ที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านได้ถึง 50% แต่การติดตั้ง Blocking plate ทำให้การใช้พลังงานเพื่อหมุนแผ่นจานแม่เหล็กเพิ่มขึ้น

จากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าได้มีการศึกษาเฉพาะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ที่มีความเร็วรอบระหว่าง 7,200 ถึง 10,000 รอบต่อนาทีเท่านั้น แต่ในอนาคตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว ที่มีความเร็วรอบมากกว่า 10, 000 รอบต่อนาทีจะเข้ามาแทนที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว เพื่อหาวิธีการและแนวทางใหม่ๆสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของการอ่านและเขียนข้อมูลสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้วที่ความเร็วรอบ 15, 000 รอบต่อนาทีให้มากยิ่งขึ้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้จึงเน้นการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศรอบหัวอ่านและย่านความถี่ของแรงที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้ง Blocking plate

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้จะนำแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิตและออกแบบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งพฤกติกรรมการไหลของอากาศโดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) นั้นคือความเร็วของอากาศจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนที่เป็นค่าการแกว่ง (Fluctuation) ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นจึงต้องใช้การไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าสมการนาเวียร์-สโตรกส์สามารถนำมาวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนได้โดยตรง แต่เนื่องจากการวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบโดยตรงจากสมการนั้นจำเป็นต้องใช้ขนาดของกริดที่มีขนาดเล็กมากและต้องทำการวิเคราะห์ด้วยขั้นของเวลา (Time step) ที่สั้นมากอีกทั้งสมการสมการนาเวียร์-สโตรกส์ยังอยู่ในรูปแบบสมการที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) และซับซ้อนเป็นอย่างมาก ซึ่งด้วยเหตุผลดังกล่าวการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยสมการนาเวียร์-สโตรกส์ จึงต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเข้ามาช่วย เช่น การคำนวณแบบขนาน (Parallel computing) เป็นต้น

การเรียบเรียงทฤษฎีของการศึกษาครั้งนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองการไหลด้วยกันสามแบบจำลองที่ใช้เป็นหลักคือ การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ แบบมาตรฐาน, RNG $k-\varepsilon$, Standard Wall functions และ Large-Eddy Simulation

2.1 ทฤษฎีการจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ แบบมาตรฐาน (Fluent Inc, 2001)

ค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน μ_t พิจารณาจาก

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1}$$

โดยที่ k คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{2}$$

และ ε คือ อัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy Dissipation Rate) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \qquad (3)$$

เมื่อ $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ และ $\sigma_\varepsilon = 1.3$ เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง ตามลำดับ

สำหรับ k และ ε ให้นิยามตามนี้

$$k \equiv \frac{1}{2}\overline{u_i^{'}u_i^{'}} \qquad (4)$$

$$\varepsilon \equiv 2\mu S_{ij}S_{ij} \qquad (5)$$

สมการของ $k-\varepsilon$ ตามสมการที่ (1-3) นี้เป็นสมการที่ใช้ประกอบกับสมการเรย์โนลด์ในการคำนวณหาค่าความดันเฉลี่ย ($\overline{p}$) และความเร็วเฉลี่ย $\overline{u},\overline{v},\overline{w}$ ตามลำดับ

2.2 ทฤษฎีการจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ (Fluent Inc, 2001)

พิจารณาค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน μ_t เช่นเดียวกันกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ดังนี้

$$\mu_t = C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (6)$$

โดยใช้สมการพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (k) สมการที่ (2) และสมการอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (ε) สมการที่ (3) เช่นเดียวกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ แต่ค่าคงที่ $C_{1\varepsilon}$ ของสมการ ε จะคำนวณจาก

$$C_{1\varepsilon} = 1.42 - \frac{\eta\left(1-\frac{\eta}{\eta_\infty}\right)}{1+\beta\eta^3} \qquad (7)$$

โดยที่

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon}\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \text{ (โดยที่ i=1 ถึง j)} \tag{8}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(U_{i,j} + U_{j,i}\right) \tag{9}$$

S_{ij} คือการเปลี่ยนรูปแบบสมมาตร (Symmetric Deformation Tensor) และ η คือค่า Invariants ที่คำนวณจาก S_{ij} นั้นเอง

2.3 แบบจำลองของของไหลที่อยู่ติดกับผิวแบบมาตราฐาน (Fluent Inc, 2001)

แบบจำลองของของไหลที่อยู่ติดกับผิวแบบมาตราฐาน ในโปรแกรม Fluent นั้นใช้เป็นไปตามกฎของ law-of-the-wall จะได้ความเร็วเฉลี่ยคือ

$$U^* = \frac{1}{k}\ln\left(Ey^*\right) \tag{10}$$

เมื่อ

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{1}{2}}}{\tau_w / \rho} \tag{11}$$

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{1}{2}} y_P}{\mu} \tag{12}$$

เมื่อ

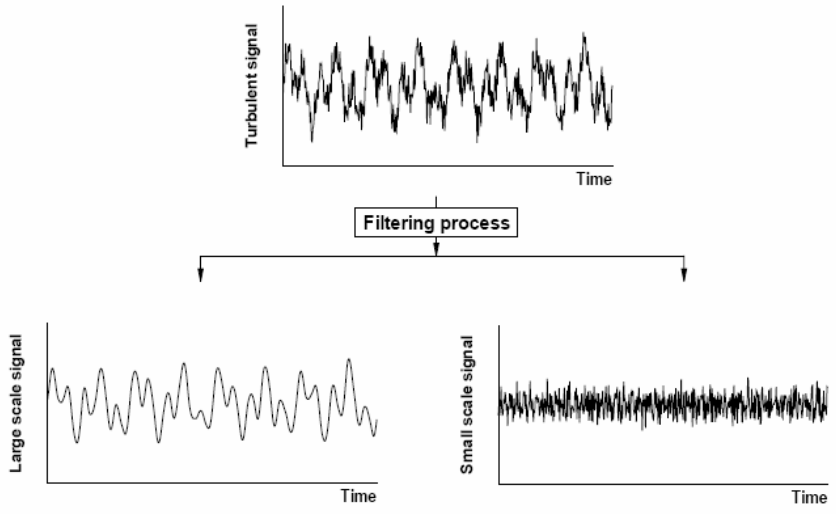
E	=	ค่าคงที่จากการทดลอง (9.793)
U_P	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่จุดใดๆ
k_P	=	ค่าพลังงานจลน์ที่จุดใดๆ
y_P	=	ระยะทางจากจุดใดๆถึงผนัง
μ	=	ค่าความหนืดพลศาสตร์

ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จากคู่มือของโปรแกรม Fluent 6.3.26

2.4 ทฤษฎีการจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation (Fluent Inc, 2001)

เนื่องจากธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะประกอบไปด้วยกระแสไหลวนขนาดใหญ่ (Large-Eddy Motion) กับกระแสไหลวนขนาดเล็ก (Small Eddy Motion) ซึ่งจากการอนุมานทฤษฎีของ Kolmogorov (Ferziger and Peric, 2002) ว่ากระแสไหลวนขนาดใหญ่นั้นจะมีรูปร่างตามลักษณะของการไหลในขณะที่กระแสไหลวนขนาดเล็กนั้นจะมีรูปร่างที่เหมือนกันแม้ว่าจะอยู่ในการไหลที่มีลักษณะต่างกัน อีกทั้งจากธรรมชาติของการไหลที่กระแสไหลวนขนาดใหญ่นั้นจะมีผลกระทบต่อกระแสการไหลทั้งหมดมากกว่ากระแสไหลวนขนาดเล็ก (Ferziger and Peric 2002) อีกทั้งพลังงานส่วนมากในการไหลแบบปั่นป่วนจะถูกแฝงอยู่ที่สเกลขนาดใหญ่ ดังนั้น Large-Eddy Simulation จึงทำการคำนวณการไหลเฉพาะการไหลของกระแสไหลวนขนาดใหญ่ ในขณะที่จะทำการใช้แบบจำลองการไหลสำหรับผลกระทบของกระแสไหลวนขนาดเล็กที่มีต่อการไหลทั้งหมด (Ferziger and Peric, 2002) ซึ่งแบบจำลองการไหลที่ใช้นี้จะถูกเรียกว่าแบบจำลองสับกริดสเกล (Sub-Grid Scale, SGS, Model)

สำหรับการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน สมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมจะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการกรอง (filtering process) เพื่อทำการแยกตัวแปรใดๆที่สนใจออกเป็นองค์ประกอบของสเกลขนาดใหญ่ (large scale) และองค์ประกอบของสเกลขนาดเล็ก (small scale) ดังสมการที่ 13 ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยค่าสัญญาณของตัวแปรใดๆในการไหลแบบปั่นป่วนดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการกรองเพื่อแบ่งแยกตัวแปร

ที่มา : Fluent Inc. (2001)

2.5 แบบจำลองสเกลขนาดใหญ่ (Large-scale models) (Fluent Inc, 2001)

สมการอนุรักษ์มวลหลังจากผ่านกระบวนการกรอง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho \overline{u_i}\right)=0 \tag{13}$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมหลังจากผ่านกระบวนการกรอง

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \overline{u_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \overline{u_i}\,\overline{u_j}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{14}$$

เมื่อ σ_{ij} คือ Stress tensor เนื่องจาก molecular viscosity ซึ่งหาได้จาก

$$\sigma_{ij} \equiv \left[\mu\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right)+\left(\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial \overline{u_I}}{\partial x_I}\right)\delta_{ij} \tag{15}$$

เมื่อ τ_{ij} คือ subgrid-scale stress ซึ่งหาได้จาก

$$\tau_{ij} \equiv \rho \overline{u_i u_j}-\rho \overline{u_i}\;\overline{u_j} \tag{16}$$

2.6 แบบจำลองสเกลขนาดเล็ก (Subgrid scale models) (Fluent Inc, 2001)

เนื่องจาก subgrid-scale stress เป็นผลมาจากกระบวนการกรองซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า และต้องการแบบจำลองมาแก้เพื่อหาค่าตัวแปรดังกล่าว สำหรับในโปรแกรม Fluent 6.3.26 ที่ใช้ศึกษานั้น subgrid-scale turbulence ใช้หลักสมมติฐานจาก Boussinesq เช่นเดียวกันกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RANS ซึ่งคำนวณ subgrid-scale turbulent จาก

$$\tau_{ij}-\frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij}=-2\mu_t \overline{S_{ij}} \tag{17}$$

ในการศึกษานี้ค่า eddy-viscosity (μ_t) สามารถหาได้จากหลายแบบจำลอง สำหรับโปรแกรม Fluent นี้แบบจำลองที่ใช้คือแบบจำลองของ Smagororinaky-Lilly คือ

$$\mu_t = \rho L_s^2 \left|\overline{S}\right| \tag{18}$$

$$\left|\overline{S}\right| \equiv \sqrt{2\overline{S_{ij}}\,\overline{S_{ij}}} \tag{19}$$

โดยที่

$$\overline{S_{ij} \equiv \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j}\right)} \tag{20}$$

และ

$$L_s = \min\left(kd, C_s V^{\frac{1}{3}}\right) \tag{21}$$

เมื่อ	Ls	คือ	ค่าเฉลี่ยความกว้างของการกรอง
	Cs	คือ	ค่าคงที่ของ Smagorinsky = 0.1
	K	คือ	von Kármán constant,
	D	คือ	ระยะที่ใกล้ผนังมากที่สุด
	V	คือ	ปริมาตรของเซลที่ใช้คำนวณ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ TERA บนระบบปฏิบัติการ LINUX ของศูนย์ไทยกริดแห่งชาติ ซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้ การกำกับดูแลของสำนักงานส่งเสริมอุตสาหกรรมซอฟต์แวร์ (องค์การมหาชน) หรือ SIPA ศูนย์ไทยกริดแห่งชาตินี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการกริดแห่งชาติ หรือ ThaiGrid ประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel(R) Xeon(TM) ความเร็ว 3000 MHz จำนวน 64 processors หน่วยความจำ (RAM) 64 GB พื้นที่การจัดเก็บข้อมูล 100 GB จำนวน 1 ตัว

2. เครื่องคอมพิวเตอร์คลัสเตอร์ WIN HPC บนระบบปฏิบัติการ Windows Server 2003 Compute Cluster Edition ของศูนย์ไทยกริดแห่งชาติ ซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้ การกำกับดูแลของสำนักงานส่งเสริมอุตสาหกรรมซอฟต์แวร์ (องค์การมหาชน) หรือ SIPA ศูนย์ไทยกริดแห่งชาตินี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการกริดแห่งชาติ หรือ ThaiGrid ประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel(R) Xeon(TM) ความเร็ว 3000 MHz จำนวน 64 processors หน่วยความจำ (RAM) 64 GB พื้นที่การจัดเก็บข้อมูล 50 GB จำนวน 1 ตัว

3. ซอฟต์แวร์ Gambit และ Fluent สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows และ LINUX

ขั้นตอนการศึกษาโดยรวม

1. ศึกษาทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
   - 1.1 ห้องสะอาด
     - 1.1.1 การทำงานและประเภทของห้องสะอาด
     - 1.1.2 การออกแบบและการดูแลรักษา
     - 1.1.3 ศึกษาทฤษฎีการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ แบบมาตรฐาน, Standard Wall functions
   - 1.2 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
     - 1.2.1 การออกแบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และกระบวนการผลิต
     - 1.2.2 อนาคตของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และการออกแบบที่มีความเร็วรอบของแผ่นจานแม่เหล็กมากกว่า 10,000 รอบต่อนาที
     - 1.2.3 เทคโนโลยีของหัวอ่านและการออกแบบ

1.2.4 ศึกษาทฤษฎีการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ และแบบLarge-Eddy Simulation

2. ขอบเขตของการศึกษา

2.1 ห้องสะอาด

2.1.1 พิจารณาห้องสะอาดแบบแนวดิ่งซึ่งมีความสะอาด ระดับ 100 ตลอดทั้งห้องและบริเวณที่ทำการศึกษาจะพิจารณาแบบสองมิติ ไม่คิดผลกระทบอันเนื่องมาจากความชื้นและอุณหภูมิ และเน้นศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างพนักงานกับโต๊ะ ระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุกับพื้นโต๊ะ และ ระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ (ตารางที่ 1)

2.2 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.2.1 พิจารณาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว หมุนด้วยความเร็ว 15,000 รอบต่อนาที โดยมีส่วนประกอบพื้นฐานดังภาพที่ 19 ซึ่งจะมุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Blocking plate ต่อการไหลของอากาศและแรงที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ ไม่ขึ้นกับเวลา

2.2.2 เมื่อทราบถึงขนาดของ Blocking plate ที่สามารถลดแรงที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านได้มากที่สุดแล้วก็จะนำขนาดดังกล่าวมาศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation โดยจะเน้นศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความความถี่ของสัมประสิทธ์แรงต้านต่อโครงสร้างการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังติดตั้ง Blocking plate

3. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการศึกษา

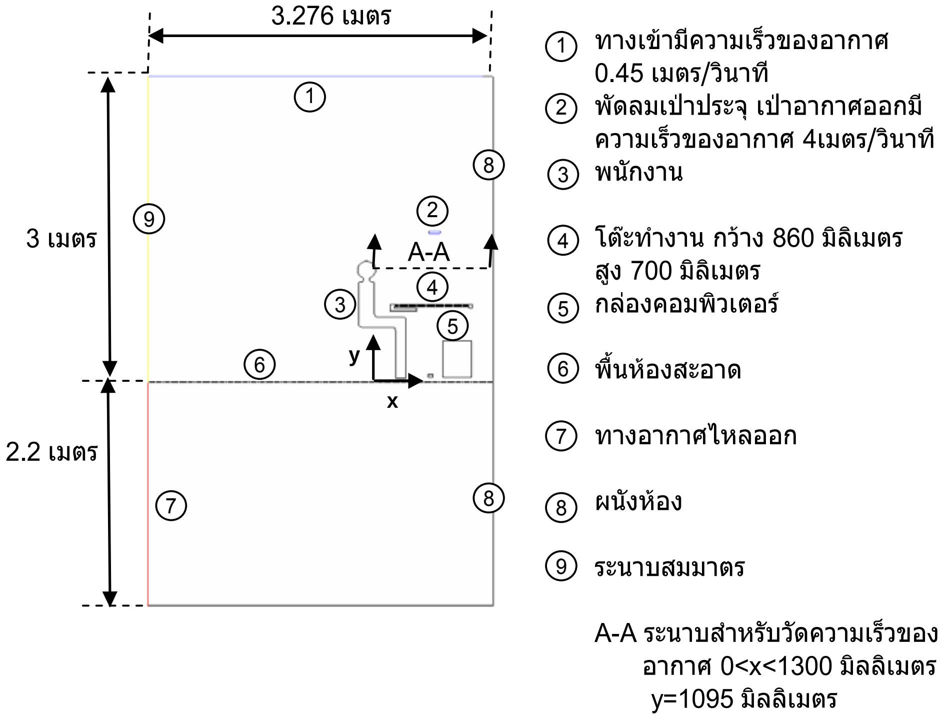
4. จัดทำวิทยานิพนธ์ ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องและเผยแพร่ผลงานวิจัย

ผลและวิจารณ์

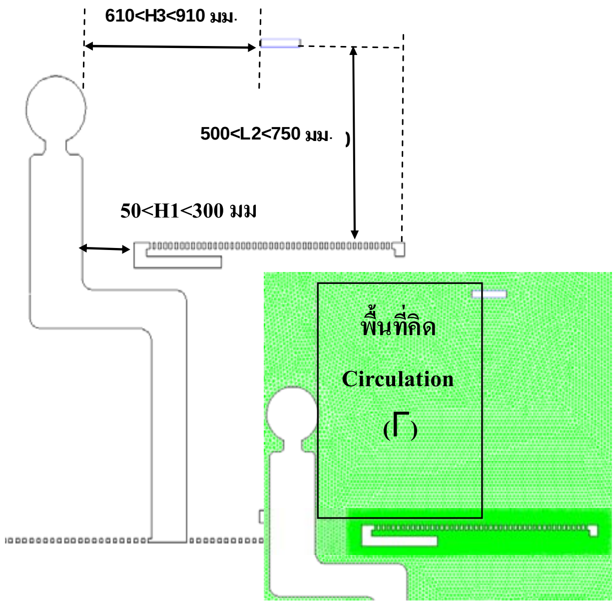
ห้องสะอาด

1. รูปร่างของปัญหา

ห้องที่ใช้ในการศึกษาเป็นห้องสะอาดแบบแนวดิ่งสำหรับบริษัทผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีความสะอาด ระดับ 100 ตลอดทั้งห้องและบริเวณที่ทำการศึกษาพิจารณาแบบสองมิติดังภาพที่ 10 และ 11



ภาพที่ 10 รูปร่างและค่าขอบของห้องสะอาดที่ใช้ศึกษา



ภาพที่ 11 ตำแหน่ง, กริด และ พื้นที่สำหรับคำนวณ Circulation

ในการศึกษาครั้งนี้สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 10 กรณีดังตารางที่ 1 ซึ่งจำนวณและบริเวณที่เกิดการหมุนวนของกระแสอากาศ (Recirculation zone) ที่ด้านหน้าของพนักงานจะได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษเพราะเป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงที่จะนำฝุ่นละอองจากใบหน้าของพนักงานไปสู่ชิ้นงานได้ถ้ามีการหมุนวนของกระแสอากาศที่แรงพอเกิดขึ้นซึ่งค่าความรุนแรงของการหมุนวนของกระแสอากาศที่เกิดขึ้นในที่นี้จะใช้ค่า Circulation (Γ) (White, 1999) ซึ่งหมายถึงอัตราการไหลวนของของไหลที่ไหลไปรอบๆ เส้นปิดใดๆ โดยกำหนดว่า Circulation เป็นบวก ถ้าไหลทวนเข็มนาฬิกา และเป็นลบ ถ้าไหลตามเข็มนาฬิกาเป็นตัวชี้วัด ซึ่งหาได้จาก

$$\Gamma = -\oint_C \vec{V} \cdot d\vec{s} \qquad (22)$$

เมื่อ $\vec{V}$ คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของเส้นปิดใดๆ

$d\vec{s}$ คือ พื้นที่เส้นรอบรูปที่คิด Circulation

กรณีศึกษาทั้ง 10 กรณีจะเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างพนักงานกับโต๊ะ ระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุกับพื้นโต๊ะ และ ระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ

ส่วนในกรณีศึกษาที่ 10 เป็นการนำตำแหน่งที่ให้ค่า Circulation และจำนวนบริเวณการหมุนวนของกระแสอากาศน้อยที่สุดพร้อมทั้งพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้จุดดังกล่าวในการปฏิบัติงานมารวมกันเพื่อพิจาณาถึงตำแหน่งที่ดีที่สุดของการทำงานโดยตำแหน่งที่พนักงานนั่งทำงานอยู่ปัจจุบันคือกรณีที่ 1

ตารางที่ 1 ตำแหน่งของแต่ละกรณีศึกษา

กรณี	H1	L2	H3	Circulation
1	150	700	710	3.12
2	150	500	710	2.24
3	150	750	710	3.31
4	50	700	710	2.91
5	200	700	710	3.27
6	300	700	710	3.42
7	150	700	910	3.24
8	150	700	810	3.16
9	150	700	610	3.11
10	200	700	610	3.20

H1 ระยะห่างระหว่างพนักงานกับโต๊ะ (มิลลิเมตร)

L2 ระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุกับพื้นโต๊ะ (มิลลิเมตร)

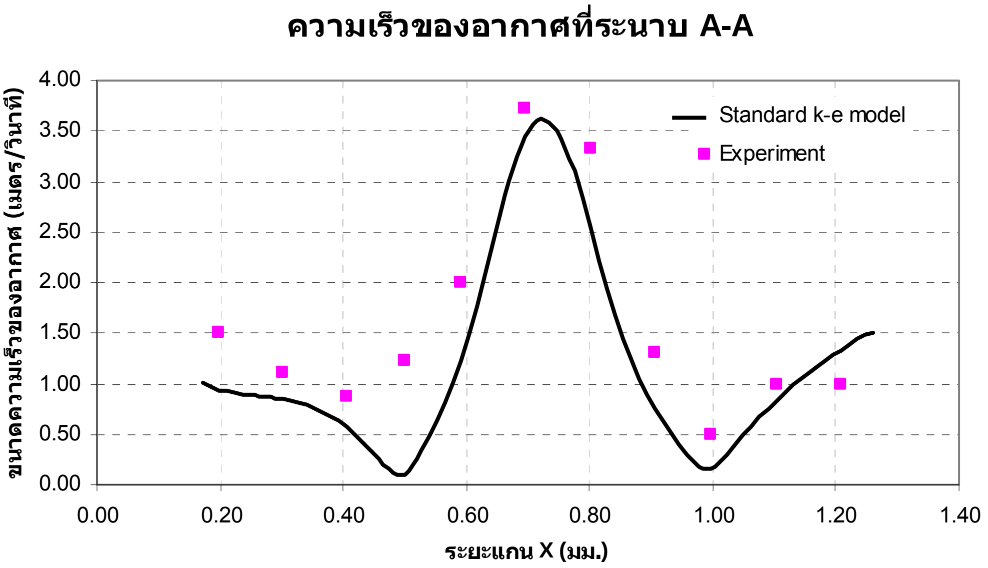
H3 ระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ (มิลลิเมตร)

Γ Circulation (เมตร^{2}ต่อวินาที)

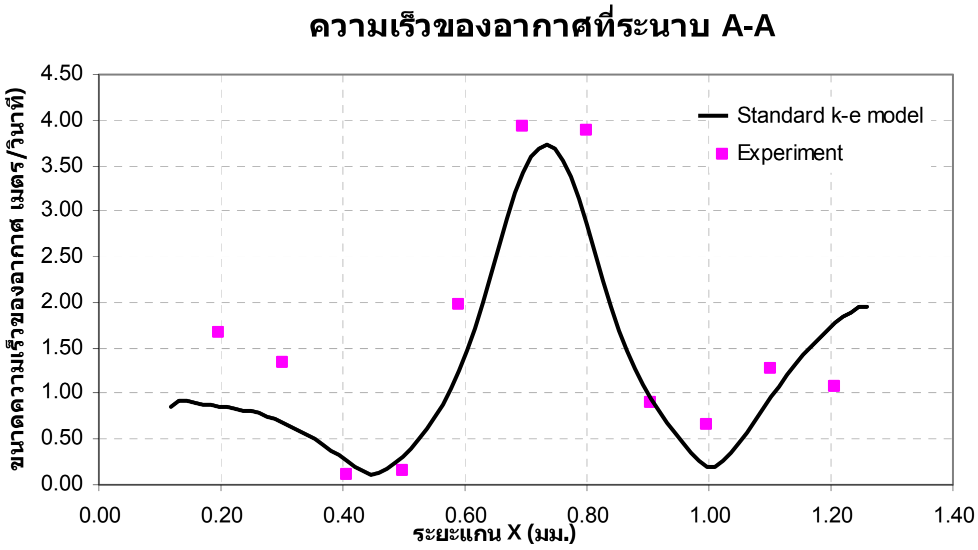
2. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษานี้จะพิจารณาการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ที่สภาวะคงตัวสองมิติ คุณสมบัติของอากาศคงที่ และเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ แบบมาตรฐาน, Standard Wall functions และไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Fluent ซึ่งใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด ในการคำนวณเชิง

ตัวเลข วิธีการผลต่างที่ใช้หาค่าความดันคือ SIMPLEC และ Discretization แบบ Second Order Upwind โดเมนในการคำนวณของแต่ละกรณีมีขนาดระหว่าง 730,000 -900,000 ปริมาตรควบคุม เมื่อนำผลความเร็วของอากาศที่ระนาบ A-A (ภาพที่ 10) ซึ่งได้จากการศึกษากรณีที่ 1 (ตำแหน่งการทำงานปัจจุบัน) กับกรณีที่ 5 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดเพื่อตรวจสอบถึงความถูกต้องของการศึกษา พบว่าการจำลองโดยใช้วิธีการคำนวณดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลการวัดดังรูป ที่ 12 และ 13



ภาพที่ 12 กราฟแสดงข้อมูลความเร็วจากการวัดเทียบกับข้อมูลทีได้จากการคำนวณของกรณีศึกษาที่ 1 บนระนาบ A-A ในภาพที่ 10



ภาพที่ 13 กราฟแสดงข้อมูลความเร็วจากการวัดเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของ กรณีศึกษาที่ 5 บนระนาบ A-A ในภาพที่ 10

3. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

ผลการคำนวณที่ได้จากการศึกษาดังภาพที่ 14 แสดงเส้นทางการไหลของกรณีที่ 1 และภาพที่ 15 แสดงเส้นทางการไหลของกรณีที่ 10 พบว่าบริเวณที่เกิดการหมุนของกระแสอากาศหลังจากมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการนั่งทำงานของพนักงานเกิดขึ้นหลักๆ อยู่สามจุด คือ ใต้เก้าอี้ที่พนักงานนั่ง, ด้านหลังของพัดลมเป่าประจุ และ บริเวณที่ด้านหน้าของพนักงาน (ด้านหน้าของพัดลมเป่าประจุ) แต่กรณีที่ 10 มี บริเวณการหมุนวนของกระแสอากาศเกิดขึ้นที่ขาของพนักงานอีกหนึ่งตำแหน่งและจากกราฟภาพที่ 16-18 แสดงค่า Circulation ที่เกิดขึ้นของแต่ละกรณี โดยจุดวงกลมบนกราฟแทนค่าที่ได้จากการคำนวณจากตำแหน่งทำงานปัจจุบัน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้สนใจเฉพาะบริเวณการหมุนวนของอากาศที่บริเวณด้านหน้าของพนักงานเท่านั้นและใช้ค่าของ Circulation ที่ได้จากการคำนวณเป็นตัวบอกถึงความแรงของการหมุนวนของอากาศ จากการศึกษาตัวแปรทั้งสามได้ผลสรุปดังนี้

การลดระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุกับพื้นโต๊ะ

จากภาพที่ 16 แสดงผลที่ได้จากการศึกษากรณีการลดระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุกับพื้นโต๊ะทำให้ลักษณะและขนาดของการหมุนวนของกระแสอากาศมีค่าลดลง จากผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าระยะที่ดีที่สุด คือ L2=500 มิลลิเมตรโดยมี Circulation = 2.24 เมตร^{2}ต่อวินาที เมื่อเทียบกับตำแหน่งปัจจุบัน ที่ L2=700 มม.โดยมี Circulation = 3.12 เมตร^{2}ต่อวินาที แต่ไม่สามารถปรับระยะของพัดลมเป่าประจุลงมาที่ตำแหน่งนี้ได้เนื่องจากจะไปขัดขวางการทำงานของ Real Time Particle Sensor Monitoring ซึ่งต้องการรัศมีหวังผลการวัดอยู่ที่ 200 มิลลิเมตร จากจุดติดตั้งเครื่องมือ ดังนั้น ระยะที่เหมาะสมและเป็นไปได้มากที่สุดคือ L2=700 มิลลิเมตร นอกจากนี้แล้วพบว่าถ้าปรับตำแหน่งพัดลมเป่าประจุจากตำแหน่งเดิมไปเพียง 100 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ค่า Circulation เปลี่ยนแปลงถึง 16.38% ดังนั้นพนักงานต้องระมัดระวังเป็นพิเศษในการปรับตำแหน่งความสูงของพัดลมเป่าประจุ

กรณีการปรับตำแหน่งการนั่งของพนักงาน

จากภาพที่ 17 แสดงผลที่ได้จากการศึกษากรณีการปรับตำแหน่งการนั่งของพนักงานพบว่าจะเกิด Circulation น้อยเมื่อพนักงานนั่งชิดกับโต๊ะทำงาน จากผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าระยะที่ดีที่สุด คือ H1=50 มิลลิเมตร โดยมี Circulation = 2.91 เมตร^{2}ต่อวินาที เมื่อเทียบกับ

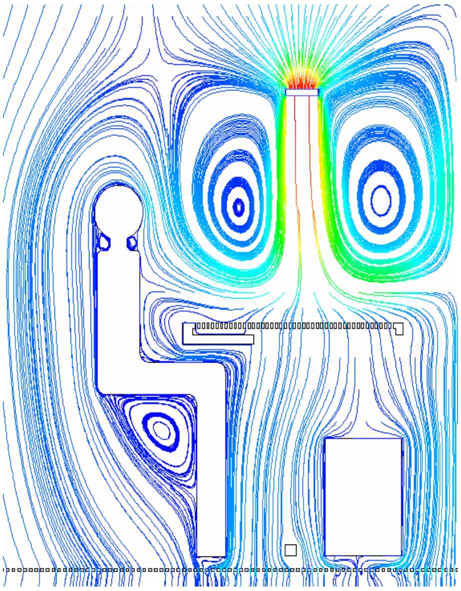
ตำแหน่งปัจจุบัน ที่ H1=150 มิลลิเมตร โดยมี Circulation = 3.12 เมตร^{2}ต่อวินาที แต่จากการพิจารณาถึงวิธีการทำงานและการจับวางชิ้นงานพบว่าระยะที่พนักงานสะดวกในการทำงานมากที่สุดจะอยู่ในช่วงระหว่าง 150<H1<250 มิลลิเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับสรีระของพนักงานด้วย และนอกจากนี้แล้ว ช่วงระหว่าง 150<H1<250 มิลลิเมตร Circulation มีการเปลี่ยนแปลงเพียง 7.40% ดังนั้นช่วงดังกล่าวนี้จึงเป็นช่วงที่สามารถนำมาพิจารณาเพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งการปฏิบัติงานให้มีความเหมาะสมขึ้นได้

กรณีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ

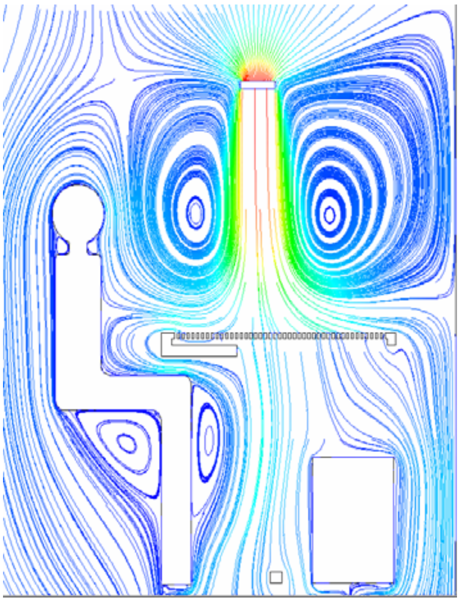
จากภาพที่ 18 แสดงผลที่ได้จากการศึกษากรณีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุจะต้องคำนึงถึงผลของการปล่อยประจุไฟฟ้าไปที่บริเวณการทำงานด้วย ซึ่งจากข้อมูลของผู้ผลิตชิ้นงานพบว่าขอบเขตของตำแหน่งที่พัดลมเป่าประจุสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดผลเสียต่อชิ้นงานอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าสถิตไม่สมดุล คือ 600<H3<800 มิลลิเมตร จากผลการคำนวณพบว่าระยะที่ดีที่สุด คือ H3=610 มิลลิเมตร โดยมี Circulation = 3.11 เมตร^{2}ต่อวินาที เมื่อเทียบกับตำแหน่งปัจจุบัน ที่ H3=710 มิลลิเมตร โดยมี Circulation = 3.12 เมตร^{2}ต่อวินาที แสดงดังตารางที่ 1 และช่วงระหว่าง 610<H3<800 มิลลิเมตร Circulation มีการเปลี่ยนแปลงเพียง 1.61% ดังนั้นช่วงดังกล่าวนี้จึงน่าจะเป็นช่วงที่สามารถนำมาพิจารณาเพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งการปฏิบัติงานให้มีความเหมาะสมขึ้นได้

กรณีการปรับเปลี่ยนระยะห่างของกรณีที่ 10

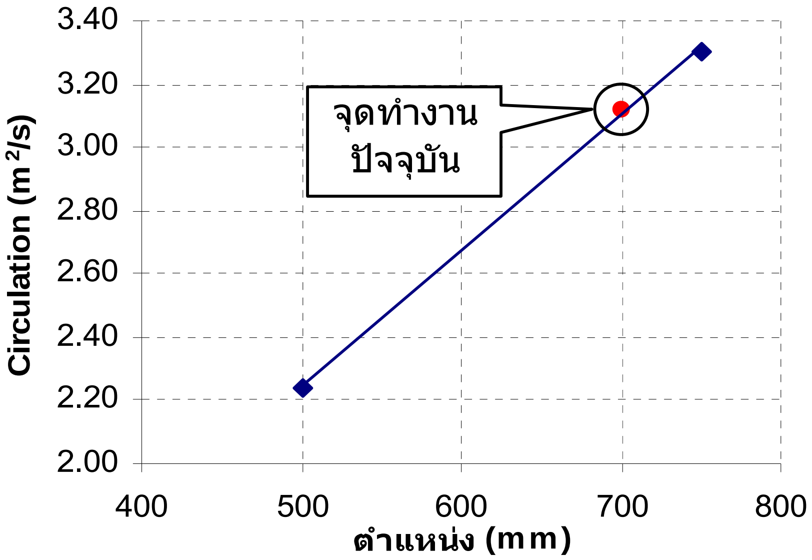
จากผลการศึกษาจะได้จุดที่ดีที่สุดที่จะนำไปศึกษาเป็นกรณีที่ 10 ประกอบด้วย L2=700 มิลลิเมตร , H3=710 มิลลิเมตร แต่สำหรับค่า H1 เมื่อทำการสำรวจจากความคิดเห็นของพนักงานถึงตำแหน่งที่ทำงานได้สะดวกที่สุดพบว่า H1 = 200 มิลลิเมตรสามารถทำงานได้สะดวกมากที่สุด ดังนั้น H1 ในการศึกษาของกรณีที่ 10 จะใช้ H1 = 200 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 15 ซึ่งพบว่าเกิดการหมุนวนของกระแสอากาศเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่งที่บริเวณหน้าขาของพนักงานทำให้พนักงานมีโอกาสที่จะสัมผัสกับฝุ่นละอองเพิ่มมากขึ้นและอาจส่งผลกระทบต่อจำนวนของเสียที่จะเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ค่า Circulation ที่บริเวณที่ด้านหน้าของพนักงาน (ด้านหน้าของพัดลมเป่าประจุ) มีค่าสูงกว่าตำแหน่งที่ใช้อยู่ปัจจุบันจึงเป็นสาเหตุให้กรณีที่ 10 ไม่เหมาะสมที่จะนำไปเป็นจุดการใช้งาน



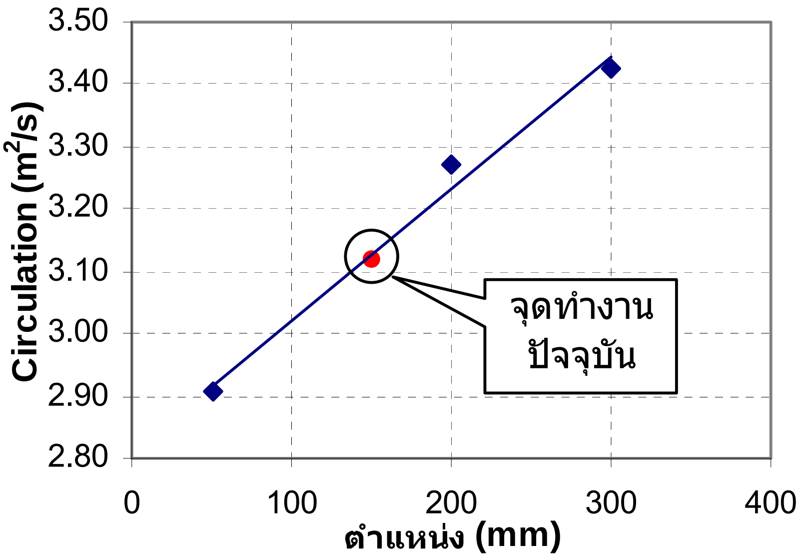
ภาพที่ 14 เส้นทางการไหล ความเร็วที่ Y= 1.7 เมตร สำหรับ กรณีที่ 1 (ตำแหน่งการทำงานปัจจุบัน)



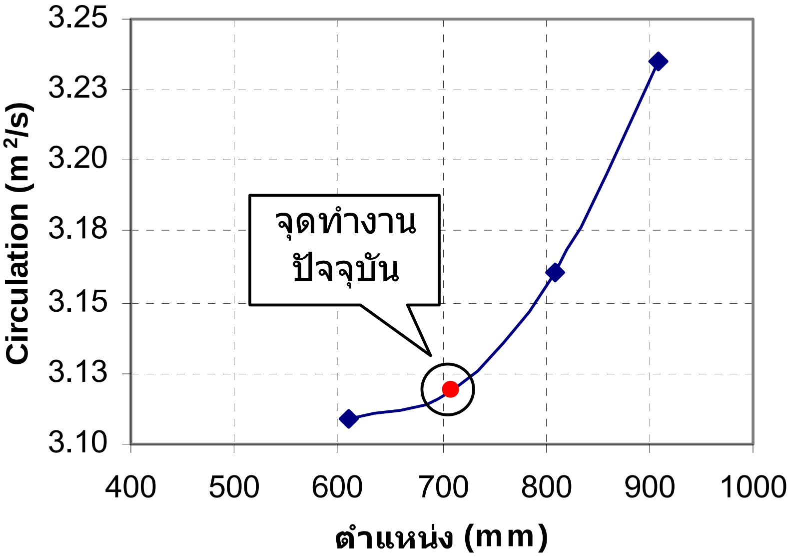
ภาพที่ 15 เส้นทางการไหล ความเร็วที่ Y= 1.7 เมตร สำหรับ กรณีที่ 10



ภาพที่ 16 ขนาดของ Circulation ที่บริเวณด้านหน้าของพนักงานเมื่อเปลี่ยนความสูงของพัดลมเป่าประจุ



ภาพที่ 17 ขนาดของ Circulation ที่บริเวณด้านหน้าของพนักงานเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการนั่งของพนักงาน



ภาพที่ 18 ขนาดของ Circulation ที่บริเวณด้านหน้าของพนักงานเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ

จากผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงระยะความสูงของ พัดลมเป่าประจุจากพื้นโต๊ะ มีผลทำให้ลักษณะและขนาดของการหมุนวนของกระแสอากาศบริเวณด้านหน้าของพนักงาน (ด้านหน้าของพัดลมเป่าประจุ) เปลี่ยนแปลงมากที่สุด และ สำหรับกรณีที่ 10 เป็นการนำจุดที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้มารวมกันเพื่อหาจุดทำงานที่ดีที่สุด พบว่าเกิดบริเวณการหมุนวนของกระแสอากาศเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่งที่บริเวณหน้าขาของพนักงานและค่า Circulation ที่ได้มากกว่าตำแหน่งการทำงานปัจจุบัน ดังนั้น กรณีที่ 10 จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นจุดในการปฏิบัติงาน

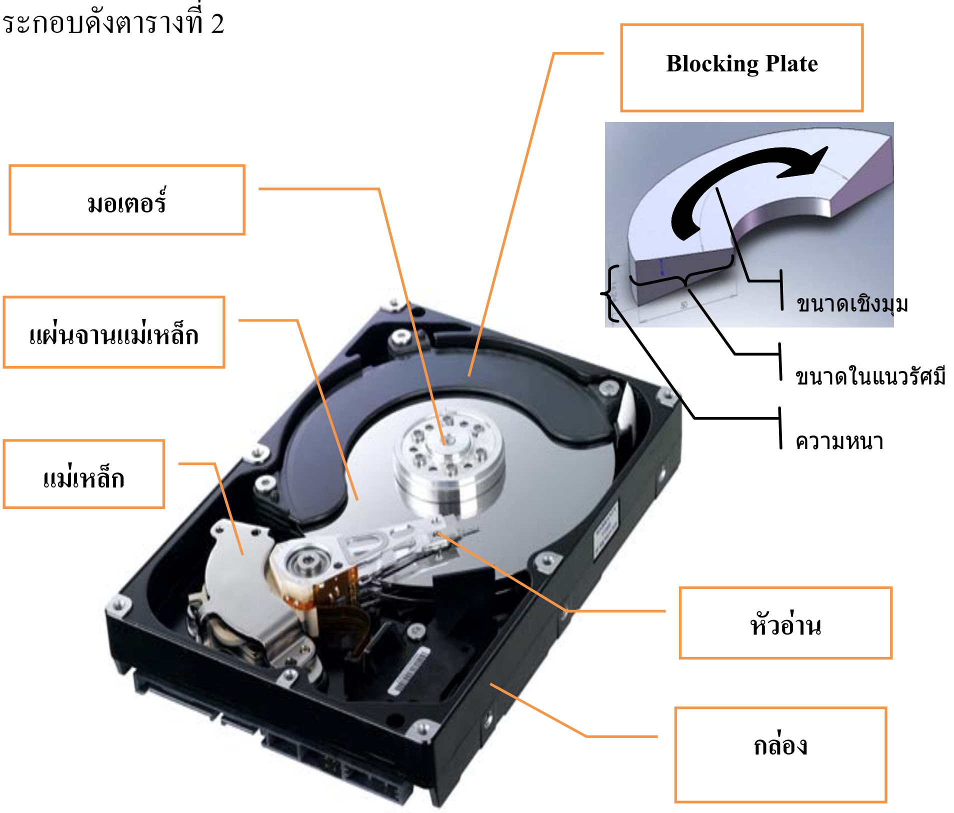
จากเดิมที่พนักงานต้องนั่งอยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งเป็นข้อกำหนดของการทำงานเพราะเกรงว่าจะทำให้การไหลของอากาศไม่เป็นไปตามหลักอากาศพลศาสตร์และมีโอกาสสูงที่ฝุ่นละอองจากใบหน้าของพนักงานจะไปติดชิ้นงานมากยิ่งขึ้น แต่จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วงที่เหมาะสมโดยไม่ได้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลมากนัก ซึ่งทำให้การทำงานของพนักงานมีความยืดหยุ่นและลดความเมื่อยหล้าได้ โดยช่วงตำแหน่งใหม่ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ คือ ความสูงของพัดลมเป่าประจุจากพื้นโต๊ะ 700 มิลลิเมตร , 150 มิลลิเมตร <ระยะห่างของพนักงานกับโต๊ะ<250 มิลลิเมตร และ 610 มิลลิเมตร <ระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ <700 มิลลิเมตร

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

1. รูปร่างของปัญหา

ในอนาคตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว ที่มีความเร็วรอบมากกว่า 10, 000 รอบต่อนาทีจะเข้ามาแทนที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว แต่จากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเฉพาะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ที่มีความเร็วรอบระหว่าง 7,200 ถึง 10,000 รอบต่อนาทีเท่านั้นดังนั้นเพื่อเป็นการเตรียมรับเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลที่มีความจุและอัตราการถ่ายโอนข้อมูลสูงให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อหาแนวทางใหม่ๆสำหรับลดการสั่นของหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้วที่ความเร็วรอบ 15, 000 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 19 แสดงชิ้นส่วนพื้นฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้ในการศึกษาซึ่งจะพิจารณาแบบ 3 มิติ ขนาด 2.5 นิ้ว แผ่นจานแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วรอบ 15, 000 รอบต่อนาที โดยมีชิ้นส่วนประกอบดังตารางที่ 2



ภาพที่ 19 ส่วนประกอบพื้นฐานของ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่ใช้ศึกษา

ที่มา : Samsung (2008)

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ชิ้นส่วน	จำนวน
จำนวนของแผ่นจานแม่เหล็ก	2 แผ่น
จำนวนของ Suspension	4 ชิ้น
จำนวนของ Slider	4 ชิ้น
ระยะห่างระหว่างแผ่นจานแม่เหล็ก	1.68 มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นจานแม่เหล็ก	64.76 มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างขอบแผ่นจานแม่เหล็กกับผนังกล่อง	0.52 มิลลิเมตร
ความยาวของหัวอ่าน	56.44 มิลลิเมตร
ความหนาของแขนหัวอ่าน	0.40 มิลลิเมตร
ความเร็วรอบของแผ่นจานแม่เหล็ก	15,000 รอบต่อนาที

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองแบบจำลองความปั่นป่วนโดยแบบแรกจะเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ เพื่อศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Blocking plate โดย แบ่งออกเป็น 9 กรณีศึกษาและ 1 กรณีสำหรับเป็นตัวเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นซึ่งไม่มี Blocking plate ดังตารางที่ 3 เมื่อทราบถึงตัวแปรและขนาดของ Blocking plate ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรง, รูปแบบการไหลของอากาศที่มีผลกับการสั่นของหัวอ่านที่เกิดขึ้นมากที่สุดแล้วผู้ทำการศึกษาจะใช้ขนาดดังกล่าวมาศึกษาอย่างละเอียดอีกครั้ง โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation ซึ่งสามารถให้ความถูกต้องของข้อมูลได้ดีกว่าแบบ RNG $k-\varepsilon$

ตารางที่ 3 ขนาดของ Blocking plate ที่ใช้ศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$

กรณีศึกษา	ขนาดของ Blocking plate		
	ขนาดเชิงมุม (θ, Degree)	ความหนา (t, มิลลิเมตร)	ขนาดในแนวรัศมี (r, มิลลิเมตร)
1	220	1.2	5
2	220	1.2	10
3	220	1.2	15
4	40	1.2	17
5	145	1.2	17
6	220	1.2	17
7	220	0.6	17
8	220	0.8	17
9	220	1.0	17
10	ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ กรณีไม่มี Blocking plate		
ค่ามากที่สุด	340	1.68	19.86

การศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation นั้นจะมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของโครงสร้างการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากติดตั้ง Blocking plate ต่อย่านความถี่ของแรงที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน เนื่องจากถ้าย่านความถี่ของแรงที่เกิดขึ้นเข้าใกล้ย่านความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของหัวอ่านแล้วอาจจะทำให้มีโอกาสสูงที่จะเกิดความสียหายต่อชิ้นงานได้ โดยทิศทางที่ใช้พิจารณาแรงที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 20

ภาพที่ 20 ทิศทางของการพิจารณาแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน

ที่มา : Samsung (2008)

2. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษานี้จะพิจารณาการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ที่สภาวะคงตัวสามมิติ คุณสมบัติของอากาศคงที่ ไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยมีสมมติฐานของการศึกษาดังนี้

1. เนื่องจากช่องว่างระหว่างหน้า Slider กับแผ่นจานแม่เหล็กมีขนาดที่เล็กมาก (5 นาโนเมตร) จึงสมมติให้ที่ช่องว่างดังกล่าวไม่มีการไหลของอากาศเกิดขึ้น เพราะถ้าหากมีการพิจาณาการไหลที่บริเวณดังกล่าวด้วยจะต้องสร้างกริดที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากซึ่งต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงและใช้ระยะเวลาในการศึกษานานมาก (Kirpekar and Bogy, 2006)

2. สมมติให้หัวอ่านที่ใช้ศึกษาเป็นวัตถุแข็งเกร็งไม่มีการสั่นเกิดขึ้น เพราะขนาดการสั่นของหัวอ่านนั้นมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดที่ใช้ศึกษาในระดับมิลลิเมตรแล้วจึงสามารถสมมติให้การสั่นดังกล่าวไม่มีผลกับการไหลที่เกิดขึ้น (Kirpekar and Bogy, 2006)

3. การสั่นของหัวอ่านที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเฉลี่ยของอากาศพลศาสตร์ (Hiroyuki *et al*., 2006)

4. สำหรับการจำลองการไหลความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ จะใช้ควบคู่กับ Standard wall function ไม่ขึ้นกับเวลาและเลือกวิธีการผลต่างที่ใช้หาค่าความดันแบบ SIMPLEC และ Discretization แบบ Second Order Upwinding

5. การศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation ค่าเริ่มต้น (Initial condition) ของแบบจำลองจะใช้คำตอบจากการจำลองการไหลความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ วิธีผลต่างที่ใช้หาค่าความดันแบบ SIMPLEC, Discretization แบบ Bounded Central Differencing, Subgrid-scal ของความปั่นป่วนแบบ Smagorinsky-Lilly

3. การสร้างกริด

การสร้างกริดจะอนุมานตามทฤษฎี Kolmogorov’s Hypothesis จาก

$$l_{EI} = \frac{1}{6} l_0 \qquad (23)$$

เมื่อ

l_{EI}	คือ	ขนาดของกริด
l_0	คือ	ขนาดของสเกลการไหลที่ใหญ่ที่สุดที่สนใจในที่นี้อยู่ในขนาดเทียบเท่ากับระยะห่างระหว่างแผ่นจานแม่เหล็ก เท่ากับ 1.68 มิลลิเมตร

ขั้นของเวลา (Time step) ในการคำนวณเท่ากับ 1x10^{-5} วินาที ซึ่งได้จากการประมาณเวลาการไหลของของไหลผ่านกริดที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ใช้ศึกษาจาก

$$\Delta t = \frac{\Phi}{V_{\max}} \qquad (24)$$

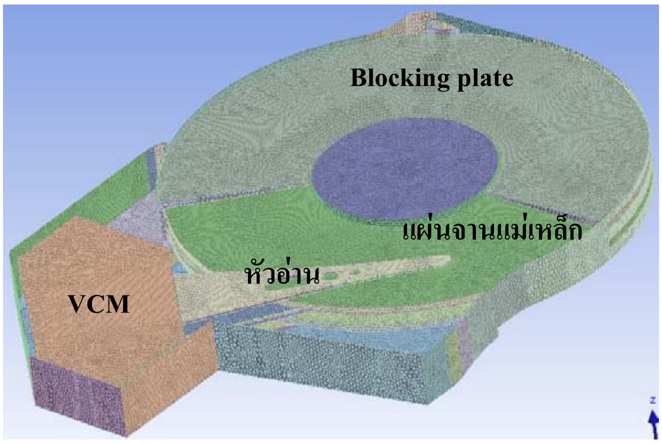
เมื่อ

Δt	คือ	ขั้นของเวลา (วินาที)
Φ	คือ	ขนาดของกริดที่เล็กที่สุดเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร
$V_{\max}$	คือ	ความเร็วที่ขอบนอกสุดของแผ่นจานแม่เหล็ก เท่ากับ 50 เมตรต่อวินาที

จากการคำนวณตามทฤษฎีของ Kolmogorov's Hypothesis จะได้ขนาดของกริดประมาณ 0.28 มิลลิเมตร ซึ่งจะใช้กริดขนาดดังกล่าวเป็นขนาดพื้นฐานในการสร้างกริด สำหรับการศึกษาด้วยความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ แต่การสร้างกริดในโดนเมนที่ศึกษาแต่ละบริเวณจะมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากบางพื้นที่มีความปั่นป่วนสูงจึงต้องการกริดที่มีความละเอียดมากกว่าบริเวณอื่นเพื่อลดระยะเวลาของการลู่เข้าสู่คำตอบเช่น บริเวณที่เก็บแม่เหล็ก (VCM) ขนาดของกริดมีค่าประมาณ 0.3 มิลลิเมตร, 0.1 มิลลิเมตร ที่บริเวณหัวอ่าน และ 0.05 มิลลิเมตร ที่บริเวณแผ่นจานแม่เหล็ก ดังภาพที่ 21 ซึ่งจะได้จำนวนกริดประมาณ 5 ล้านปริมาตรควบคุมสำหรับกรณีไม่มี Blocking plate และ 6 ล้านปริมาตรควบคุมสำหรับกรณีมี Blocking plate

สำหรับการศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation เป็นแบบจำลองที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับเวลาอีกทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นมีความปั่นป่วนของการไหลสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณหัวอ่านและแผ่นจานแม่เหล็กทำให้ต้อง

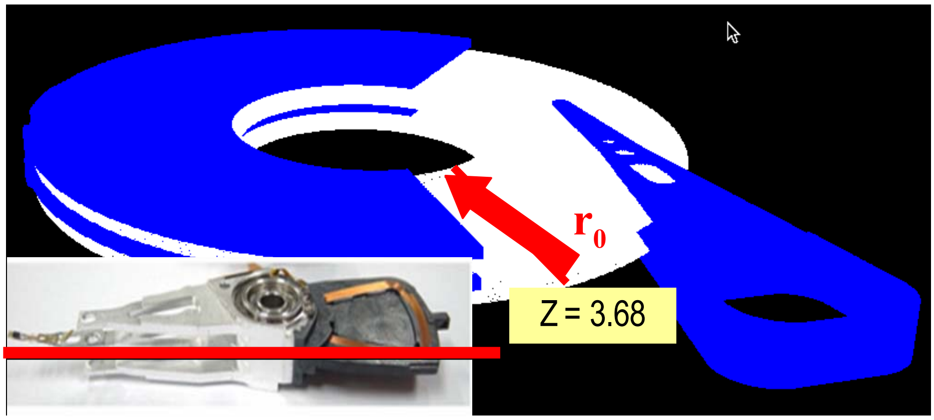
สร้างกริดที่บริเวณดังกล่าวมีขนาดเล็กกว่าบริเวณอื่นๆเพื่อความถูกต้องแม่นยำและง่ายต่อการลู่เข้าสู่คำตอบ (จะกล่าวโดยละเอียดอีกครั้งในหัวข้อถัดไป)



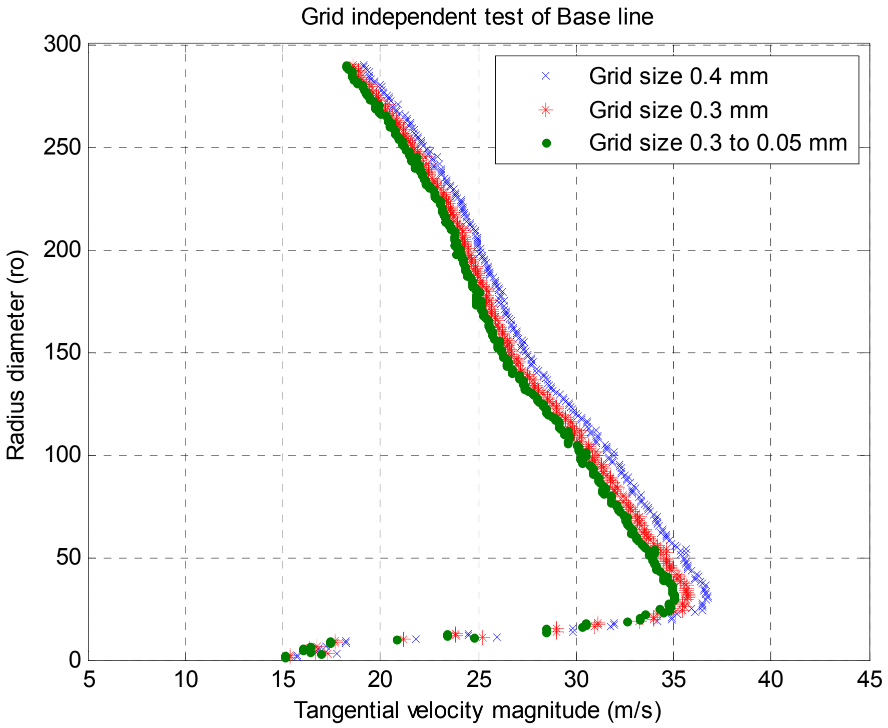
ภาพที่ 21 โดเมนของการศึกษาหลังจากสร้างกริดตามทฤษฎีของ Kolmogorov's Hypothesis

4. การศึกษาความเป็นอิสระของกริดต่อคำตอบ

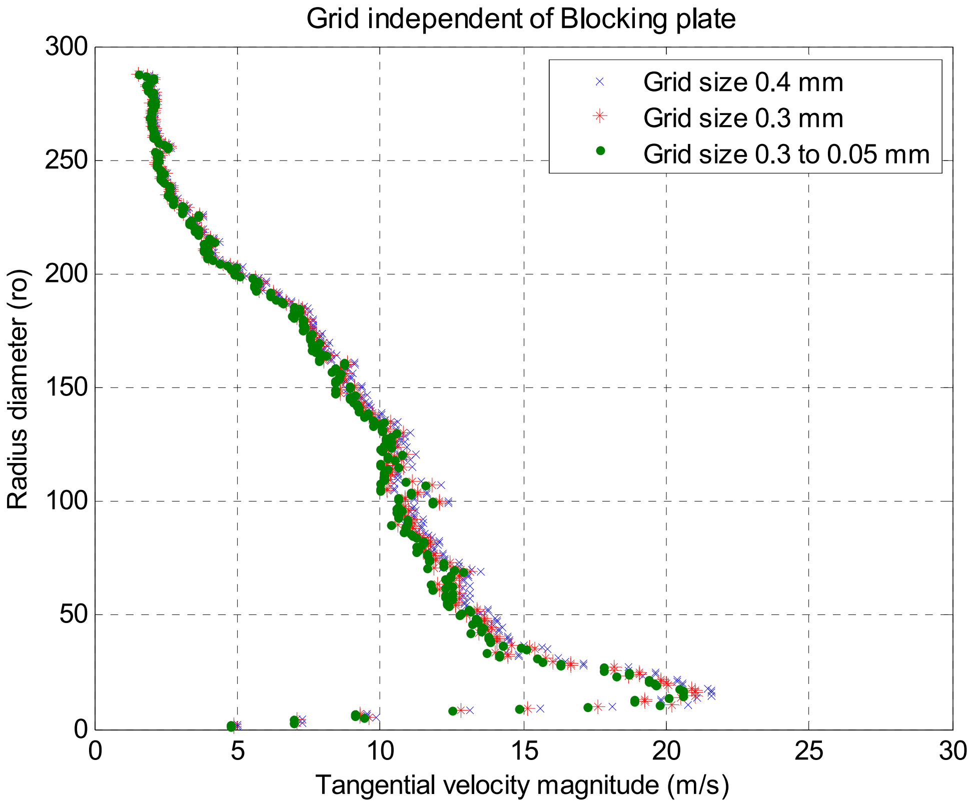
จากขนาดของกริดที่ได้จากการอนุมานจากทฤษฎีของ Kolmogorov's Hypothesis สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ โดยพิจารณาจากความเร็วในแนวสัมผัสที่ด้านหน้าก่อนเข้าปะทะกับหัวอ่านบนระนาบ Z = 3.68 โดยกำหนดให้เส้นระยะในแนวรัศมีมีจุดข้อมูล 300 จุดและจุดแรกเริ่มจากขอบแผ่นจานแม่เหล็กด้านนอกสุด ดังภาพที่ 22 พบว่ากริดที่สร้างตามทฤษฎีของ Kolmogorov's Hypothesis ให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับค่าที่ได้จากการทดลองทั้งแบบมีและไม่มี Blocking plate แสดงดังภาพที่ 23 และ 24



ภาพที่ 22 ระนาบ Z=3.68 และเส้นระยะในแนวรัศมี (r_0) สำหรับพิจารณาความเร็วของอากาศ



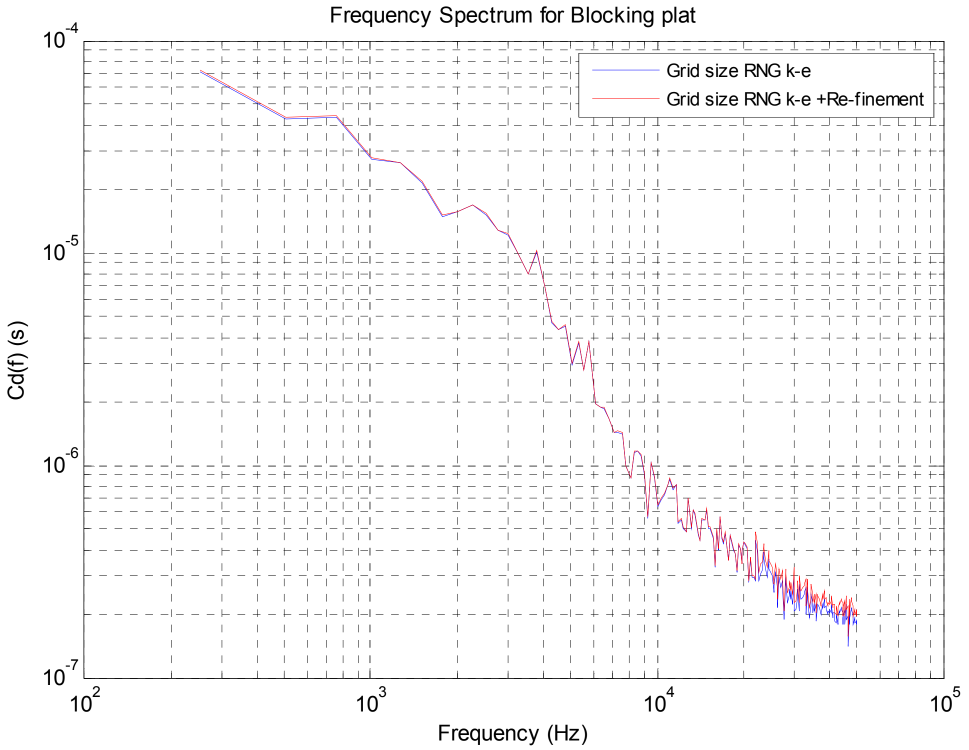
ภาพที่ 23 การทดสอบความเป็นอิสระของกริดสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ กรณีไม่มี Blocking plate



ภาพที่ 24 การทดสอบความเป็นอิสระของกริดสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ กรณีมี Blocking plate

สำหรับการศึกษาด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation เนื่องจากผู้ทำการศึกษาสนใจถึงย่านความถี่ที่เกิดขึ้นของหัวอ่านดังนั้นจะพิจารณาความเป็นอิสระของกริดต่อคำตอบจากการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d frequency spectrum) ที่เกิดขึ้นของหัวอ่าน นอกจากนี้แล้วข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์สำหรับการศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation จะใช้ข้อมูลระหว่างแผ่นจานแม่เหล็กหมุนไป 18 -32 รอบเท่านั้น เพราะจากการศึกษาทางสถิติ (ภาคผนวก) พบว่าข้อมูลหลังจากแผ่นจานแม่เหล็กหมุนได้ 18 รอบเป็นต้นไปค่าตัวแปรต่างๆจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Statistical stationary) และเมื่อนำข้อมูลระว่างรอบการหมุนที่ 18 -32 รอบ มาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าข้อมูลดังกล่าวเพียงพอ (Statistical converge) ที่จะนำมาใช้ในการศึกษา

ขนาดของกริดสำหรับการศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation จะใช้ขนาดเดียวกับการศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ ซึ่งพบว่าต้องใช้เวลานานมากกว่าคำตอบจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ (Converge) แต่เมื่อมีการปรับลดขนาดของกริด (Grid refinement) ร่วมด้วยพบว่าการลู่เข้าสู่คำตอบเร็วขึ้นประมาณ 50% และจะได้สเปกตรัมของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของกริดอยู่ในย่านความถี่ 250 – 11,500 เฮิรตซ์ ดังภาพที่ 25 ซึ่งเพียงพอต่อการศึกษาในครั้งนี้เพราะช่วงความถี่ธรรมชาติของหัวอ่านหลายๆโหมดการสั่นของหัวอ่านโดยทั่วๆไปอยู่ที่ 600 – 10,000 เฮิรตซ์ ซึ่งจำนวนกริดที่ใช้สำหรับการศึกษาด้วย Large-Eddy Simulation หลังจากลดขนาดของกริดแล้วประมาณ 5.6 ล้านปริมาตรควบคุมสำหรับกรณีไม่มี Blocking plate และ 8.5 ล้านปริมาตรควบคุมสำหรับกรณีมี Blocking plate



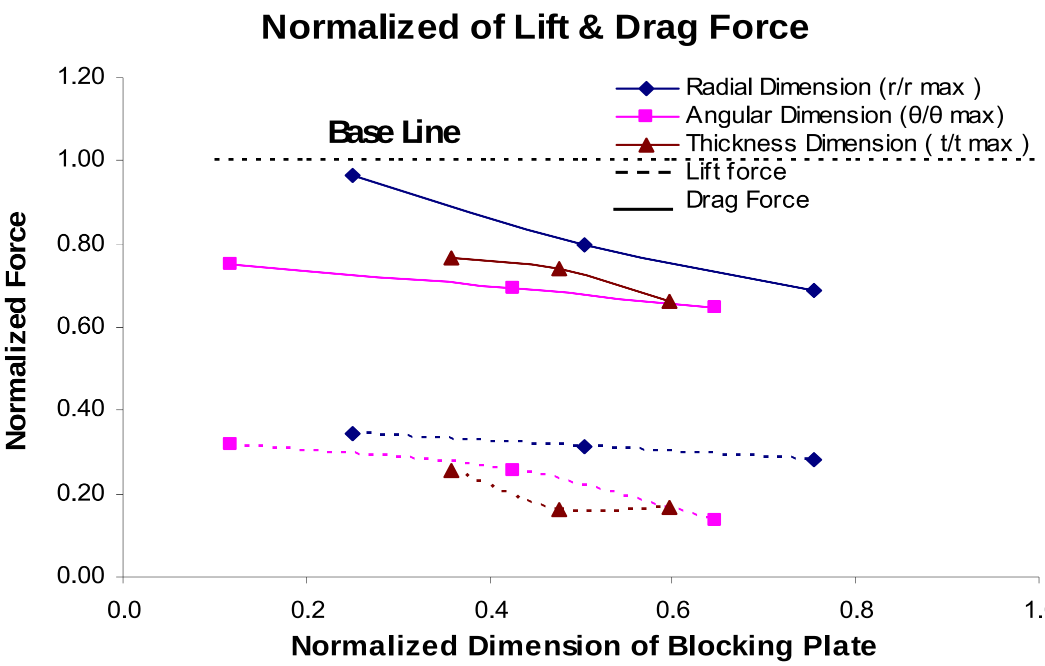
ภาพที่ 25 การทดสอบความเป็นอิสระของกริดสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation กรณีไม่มี Blocking plate

4. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

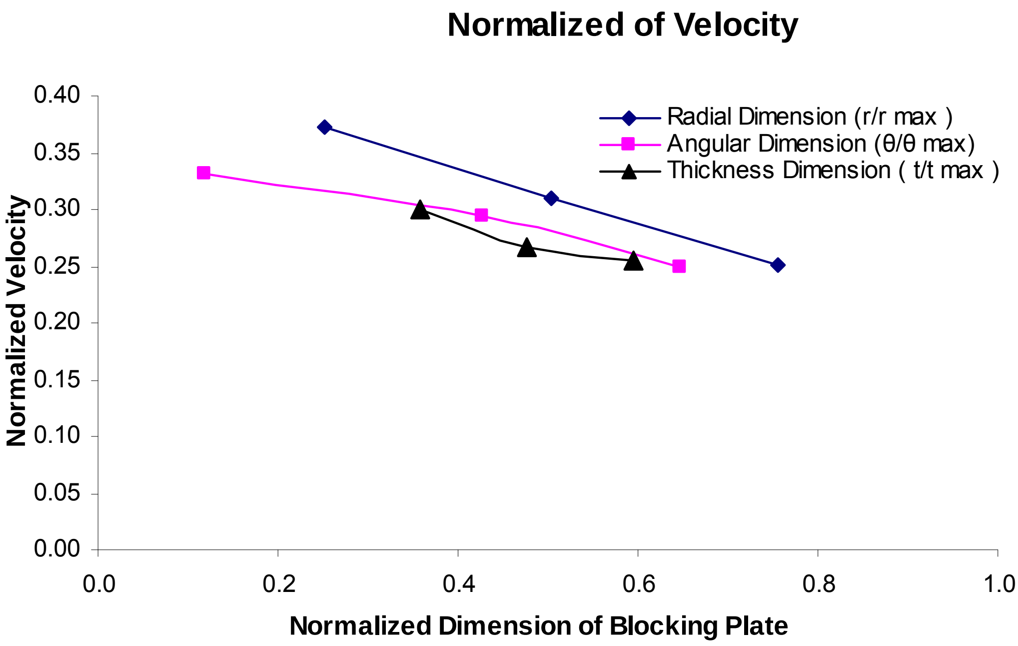
ผลของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$

ตารางที่ 4 แสดงขนาดต่างๆของ Blocking plate ซึ่งจะนำไปเทียบ (Normalized) ด้วยขนาดที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ของการศึกษา เช่น ขนาดเชิงมุม θ_{max}=340°, ความหนา t_{max}=1.68 มิลลิเมตร และขนาดในแนวรัศมี r_{max}=19.86 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์แรงต้านและแรงยกที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านจะถูกนำไปเทียบด้วยค่าที่ได้จากกรณีไม่มี Blocking plate ดังภาพที่ 26 และตารางที่ 4 แสดงผลการศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ พบว่าเมื่อขนาดเชิงมุม (Angular dimension, θ), ความหนา (Thickness, *t*) และขนาดในแนวรัศมี (Radial dimension, *r*) ของ Blocking plate เพิ่มขึ้นค่าความเร็วเฉลี่ย, แรงต้านและแรงยกจะลดลงมากที่สุด 40.2% , 35.32% และ 86.41% ตามลำดับ เมื่อ ขนาดเชิงมุม, ความหนาและขนาดในแนวรัศมีใหญ่ที่สุด (กรณีที่ 6) และจากภาพที่ 26 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดในแนวรัศมีจะส่งผลให้แรงต้านลดลงไวกว่าการลดขนาดอื่นๆ เช่นเดียวกับแรงยกมีแนวโน้มที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเชิงมุมและความหนามากกว่าการ

เปลี่ยนแปลง ขนาดในแนวรัศมี และจากภาพที่ 27 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดในแนวรัศมีจะส่งผลให้ความเร็วของอากาศลดลงไวกว่าการลดขนาดอื่นๆของ Blocking plate



ภาพที่ 26 แรงลากและแรงยกเมื่อ 5< r <17 มม, 40< θ <220^0 และ 0.6< t < 1.2 มม.



ภาพที่ 27 ความเร็วเฉลี่ยในแนวสัมผัส (v/v_{max})

ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นการลดลงของแรงต้าน แรงยก และความเร็วเฉลี่ยในแนวสัมผัสจากการศึกษาด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG k-ε

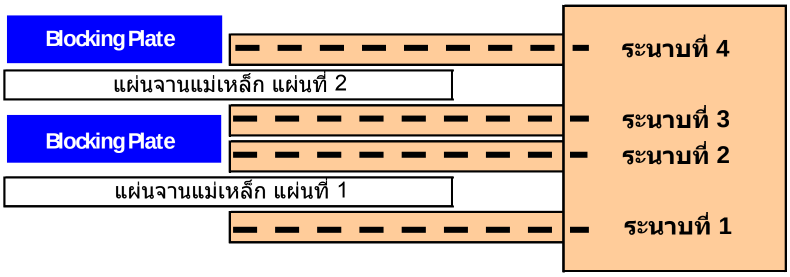
กรณีศึกษา	ขนาดของ Blocking Plate			แรงต้าน			แรงยก			ความเร็วเฉลี่ยในแนวสัมผัส	
	ขนาดเชิงมุม (θ, Degree)	ความหนา (*t*, มม.)	ขนาดในแนวรัศมี (*r*, มม)	สัมประสิทธ์แรงต้าน	นิวตัน	% การลดลง	สัมประสิทธ์แรงยก	นิวตัน	% การลดลง	เมตร/วินาที	% การลดลง
1	220	1.2	5	2.5E-03	1.2E-02	3.53%	1.9E-04	8.5E-04	65.75%	18.47	10.4%
2	220	1.2	10	2.1E-03	9.6E-03	20.29%	1.7E-04	7.8E-04	68.83%	15.37	25.4%
3	220	1.2	15	1.8E-03	8.3E-03	31.17%	1.5E-04	7.0E-04	71.71%	12.41	39.7%
4	40	1.2	17	2.0E-03	9.0E-03	24.64%	1.7E-04	8.0E-04	68.02%	16.42	20.3%
5	145	1.2	17	1.8E-03	8.4E-03	30.37%	1.4E-04	6.3E-04	74.59%	14.59	29.2%
6	220	1.2	17	1.7E-03	7.8E-03	35.32%	7.4E-05	3.4E-04	86.41%	12.33	40.2%
7	220	0.6	17	2.0E-03	9.2E-03	23.24%	1.4E-04	6.4E-04	74.24%	14.89	27.7%
8	220	0.8	17	1.9E-03	8.9E-03	26.13%	8.7E-05	4.0E-04	84.00%	13.21	35.9%
9	220	1.0	17	1.7E-03	8.0E-03	33.56%	9.0E-05	4.2E-04	83.31%	12.66	38.6%
10	ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ กรณีไม่มี Blocking plate			2.6E-03	1.2E-02	-	5.4E-04	2.5E-03	-	20.60	-
ค่ามากที่สุด	340	1.68	19.86		-	-		-	-	49.65	-

ผลของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation

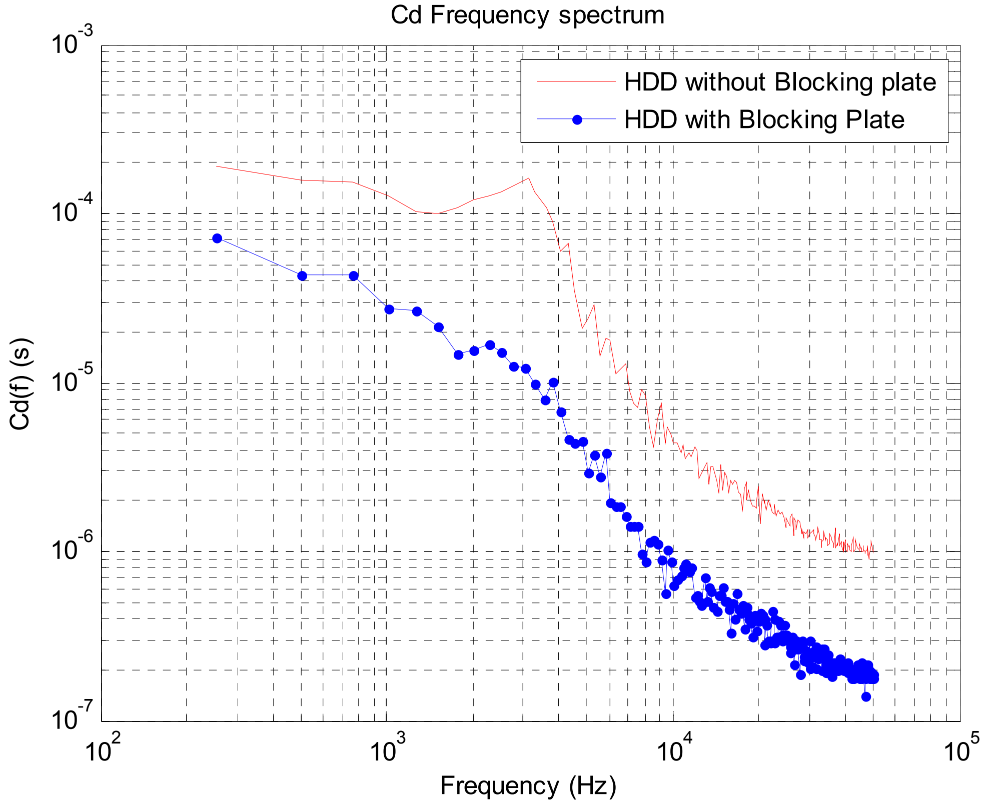
จากการศึกษาย่านความถี่ที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านดังภาพที่ 29 แสดงให้เห็นถึงย่านความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังติดตั้ง Blocking plate ซึ่งพบว่ากรณีไม่มี Blocking plate ความถี่ของสัมประสิทธ์แรงต้านเกิดขึ้นมากที่สุดที่ความถี่ 3,150 เฮิรตซ์ แต่เมื่อมีการติดตั้ง Blocking plate ความถี่ย่านดังกล่าวหายไปเนื่องจากความเร็วเฉลี่ยลดลง 38%

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธ์แรงต้านที่ได้จากการคำนวณด้วยความเร็วเฉลี่ยที่เข้าปะทะกับหัวอ่านซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้แสดงถึงพฤติกรรมของการไหลได้ดีกว่าการใช้ความเร็วที่ขอบของแผ่นจานแม่เหล็กในการคำนวณค่าสัมประสิทธ์แรงต้าน ซึ่งผลที่ได้พบว่ากรณีมี Blocking plate ให้ค่าสัมประสิทธ์แรงต้านมากกว่ากรณีไม่มี Blocking plate สองเท่าแสดงว่าการติดตั้ง Blocking plate นอกจากจะลดความเร็วเฉลี่ยที่เข้าปะทะกับหัวอ่านแล้วยังส่งผลให้โครงสร้างการไหลเปลี่ยนแปลงไปในทางที่แรงต้านเพิ่มขึ้น

เพื่อให้สามารถพิจารณาการไหลได้ชัดเจนยิ่งขึ้นผู้ทำการศึกษาจะแบ่งระนาบในแนวขนานกับแผ่นจานแม่เหล็กออกเป็น 4 ระนาบซึ่งทุกระนาบจะตัดผ่านแขนของหัวอ่านดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ความถี่ของแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน



ภาพที่ 29 ความถี่ของแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน

ภาพที่ 30 แสดงชั้นความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 1 ซึ่งอยู่ด้านล่างสุดของแผ่นจานแม่เหล็กและเป็นบริเวณที่เป็นพื้นล่างของกล่องฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 5 พบว่าความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากมีการติดตั้ง Blocking plate ลดลง 9 % และจากภาพที่ 31 แสดงเส้นการไหลของอากาศที่ระนาบที่ 1 พบว่ากรณีไม่มี Blocking plate การไหลค่อนข้างเป็นระเบียบก่อนเข้าปะทะกับหัวอ่านแต่เมื่อไหลออกจากหัวอ่านก็มีการแตกตัวออกจากกันก่อนเข้าปะทะกับผนังซึ่งบางส่วนถูกดูดกลับเข้าไปด้านในของแผ่นจานแม่เหล็กและอากาศบางส่วนถูกดูดข้ามขึ้นไปยังระนาบที่ 2 และ 3 อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นของแต่ละระนาบ ส่วนกรณีไม่มี Blocking plate (ภาพที่ 31, ขวา) ให้เส้นการไหลที่แตกต่างจากกรณีไม่มี Blocking plate คือหลังจากปะทะกับหัวอ่านแล้วเส้นการไหลบางส่วนจะถูกดูดกลับเข้ามายังบริเวณด้านในของแผ่นจานแม่เหล็กทันทีโดยมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่จะไหลต่อไปปะทะกับผนังและบางส่วนก็ไหลข้ามไปยังระนาบที่ 2 และ 3 ซึ่งการไหลข้ามชั้นระนาบดังกล่าวเมื่อนำมาประมาณความถี่ที่เกิดขึ้น (f) แสดงดังตารางที่ 5 กรณี พบว่ากรณีมี Blocking plate ความถี่ที่เกิดขึ้นประมาณ 2,600 เฮิรตซ์ และ 2,900 เฮิรตซ์ สำหรับกรณีไม่มี Blocking plate ตามลำดับ

โดยความถี่ดังกล่าวสามารถประมาณได้จาก (Fluent Inc. 2001)

$$St = \frac{fd}{V} \qquad (St \sim 1)$$

$$f = \frac{d}{V} \tag{25}$$

เมื่อ

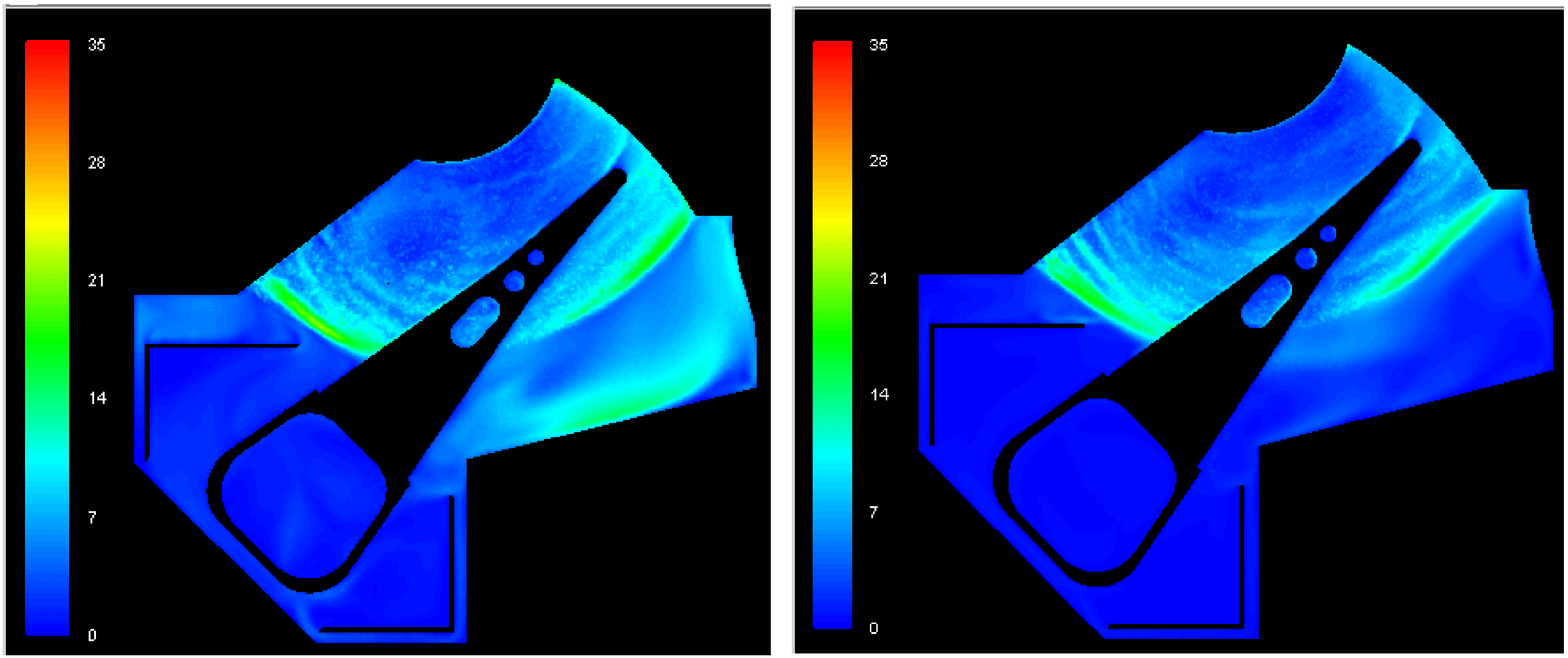
f	คือ	ความถี่ของการไหลข้ามระนาบ
V	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของการไหลข้ามระนาบ
d	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบ
St	คือ	Strouhal number

เนื่องจากระนาบที่ 2 และ 3 เป็นระนาบที่ตัดผ่านหัวอ่านทั้งสองหัวและเป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างแผ่นจานแม่เหล็กสองแผ่นที่หมุนอยู่ด้วยความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที พบว่าผลที่ได้นั้นให้ผลที่เหมือนกันดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะระนาบที่ 2 เท่านั้นซึ่งแสดงดังภาพที่ 32 แสดงชั้นความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 2 และตารางที่ 5 แสดงความเร็วและความถี่ที่เกิดขึ้นโดยพบว่าความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังจากมีการติดตั้ง Blocking plate ลดลง 31.83 % และจากภาพที่ 33 แสดงเส้นการไหลของอากาศที่ระนาบที่ 2 พบว่ากรณีไม่มี Blocking plate การไหลค่อนข้างเป็นระเบียบแต่เส้นการไหลจะเปลี่ยนทิศทางการไหลเข้าไปด้านในของแผ่นจานแม่เหล็กมากขึ้นหลังจากปะทะกับหัวอ่าน แต่ก็มีบางส่วนที่ไหลอ้อมไปบนหัวอ่านแล้วออกไปทางด้านหลังเข้าปะทะกับผนังก่อนที่จะถูกแผ่นจานแม่เหล็กดูดกลับเข้ามาอีกครั้ง (ภาพที่ 33,ซ้าย) ส่วนกรณีมี Blocking plate (ภาพที่ 33, ขวา) พบว่าเส้นการไหลเกือบทั้งหมดจะถูกบังคับโดยหัวอ่านให้เปลี่ยนทิศทางการไหลเข้าไปด้านในของแผ่นจานแม่เหล็กมากขึ้นและขนาดพื้นที่การหมุนวนของกระแสอากาศที่ด้านหน้าของหัวอ่านเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่ากรณีไม่มี Blocking plate ซึ่งการขยายตัวของพื้นที่การหมุนวนของกระแสอากาศนี้ส่งผลให้ความดันที่ระนาบ 2 ลดลงต่ำกว่าระนาบที่ 1 และ 4 ดังภาพที่ 38 แสดงความดันที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านซึ่งมีแนวโน้มแสดงให้เห็นว่าระนาบที่ 2 จะมีความดันต่ำกว่าระนาบที่ 1 และ 4 นอกจากนี้แล้ว ภาพที่ 34 แสดงชั้นความดันของระนาบที่ 2 พบว่าหลังจากมีการติดตั้ง Blocking plate ความดันที่เกิดขึ้นที่ระนาบดังกล่าวมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่มี Blocking plate ซึ่งผลดังกล่าวซึ่งก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดการไหลข้ามระนาบและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของการไหล

ภาพที่ 35 แสดงชั้นความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 4 จะเป็นระนาบที่อยู่บนสุดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้โดยหัวอ่านจะอยู่ระหว่างแผ่นจานแม่เหล็กที่หมุนด้วยความเร็วสูงอยู่ด้านล่างของหัวอ่านและพนังที่อยู่ด้านบนจะไม่มีการเคลื่อนที่ (ฝาปิด) ซึ่งค่าความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 4 แสดงดังภาพที่ 35 และตารางที่ 5 แสดงย่านความถี่และความเร็วที่เปลี่ยนแปลง พบว่าความเร็วเฉลี่ยก่อนปะทะกับหัวอ่านลดลงประมาณ 51% หลังจากติด Blocking plate และจากภาพที่ 36 แสดงเส้นการไหลของอากาศบนระนาบที่ 4 พบว่าเส้นการไหลของกรณีไม่มี Blocking plate นั้นมีความเป็นระเบียบสูงและเส้นการไหลเกือบทั้งหมดจะไหลผ่านหัวอ่านไปแล้วเข้าปะทะกับผนังซึ่งก็จะมีเส้นการไหลบางส่วนถูกดูดกลับเข้ามาที่ด้านในของหัวอ่านและบางส่วนก็จะไหลข้ามลงไปยังระนาบที่ 2 และ 3 เพราะมีความดันที่ต่ำกว่า ซึ่งการไหลข้ามชั้นดังกล่าวส่งผลให้ความถี่ของการไหลเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 2,900 เฮิรตซ์ ดังตารางที่ 5 และสำหรับกรณีมี Blocking plate พบว่าเส้นการไหลของความเร็วเฉลี่ยจะเปลี่ยนทิศทางการไหลลงไปที่ระนาบที่ 2 และ3 แล้วไหลออกไปม้วนตัวรวมกันเป็นบริเวณการหมุนวนของกระแสอากาศที่ด้านหลังของหัวอ่าน(ขอบนอกของแผ่นจานแม่เหล็ก) ก่อนถูกดูดกลับเข้าไปด้านในของแผ่นจานแม่เหล็กในระนาบที่ 2 และ 3 อีกครั้ง ซึ่งการไหลแบบเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้เกิดความถี่ของการไหลเป็น 1,600 เฮิรตซ์

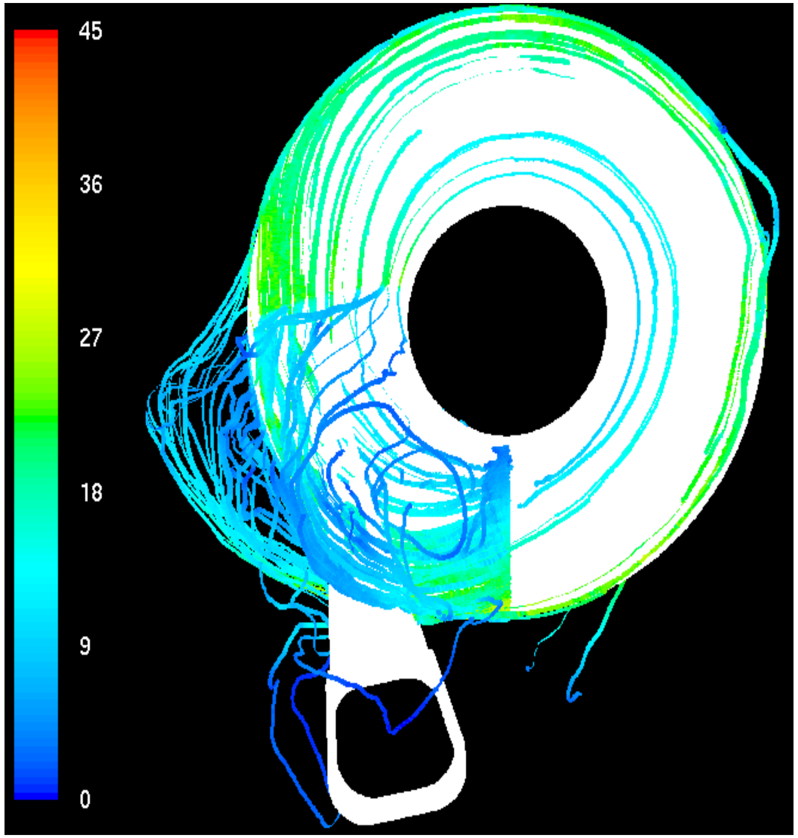
ตารางที่ 5 ย่านความถี่ของการไหลที่เกิดขึ้นจากการศึกษาด้วย Large-Eddy Simulation

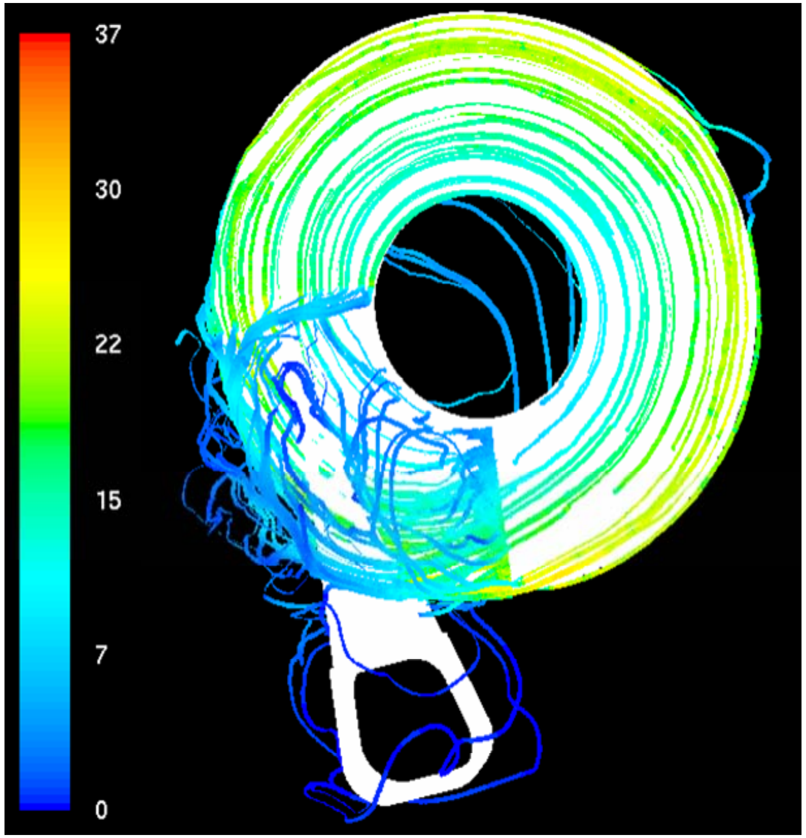
ระนาบความเร็ว	กรณีไม่มี Blocking plate		กรณีมี Blocking plate		% การลดลงของความเร็วเฉลี่ย
	ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)	ความถี่จากการเปลี่ยนระนาบการไหล (เฮิรตซ์)	ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที	ความถี่จากการเปลี่ยนระนาบการไหล (เฮิรตซ์)	
ระนาบที่ 1	4.84	2,880	4.40	2,610	9.09%
ระนาบที่ 2	13.32	-	9.08	-	31.83%
ระนาบที่ 4	8.17	2,900	3.99	1,600	51.16%
$\bar{V}$ ที่เข้าปะทะหัวอ่าน	8.30	-	5.14	-	38.07%
สัมประสิทธ์แรงต้าน	0.0992		0.199		-



ภาพที่ 30 (ซ้าย) ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ 1 ของกรณีไม่มี Blocking plate

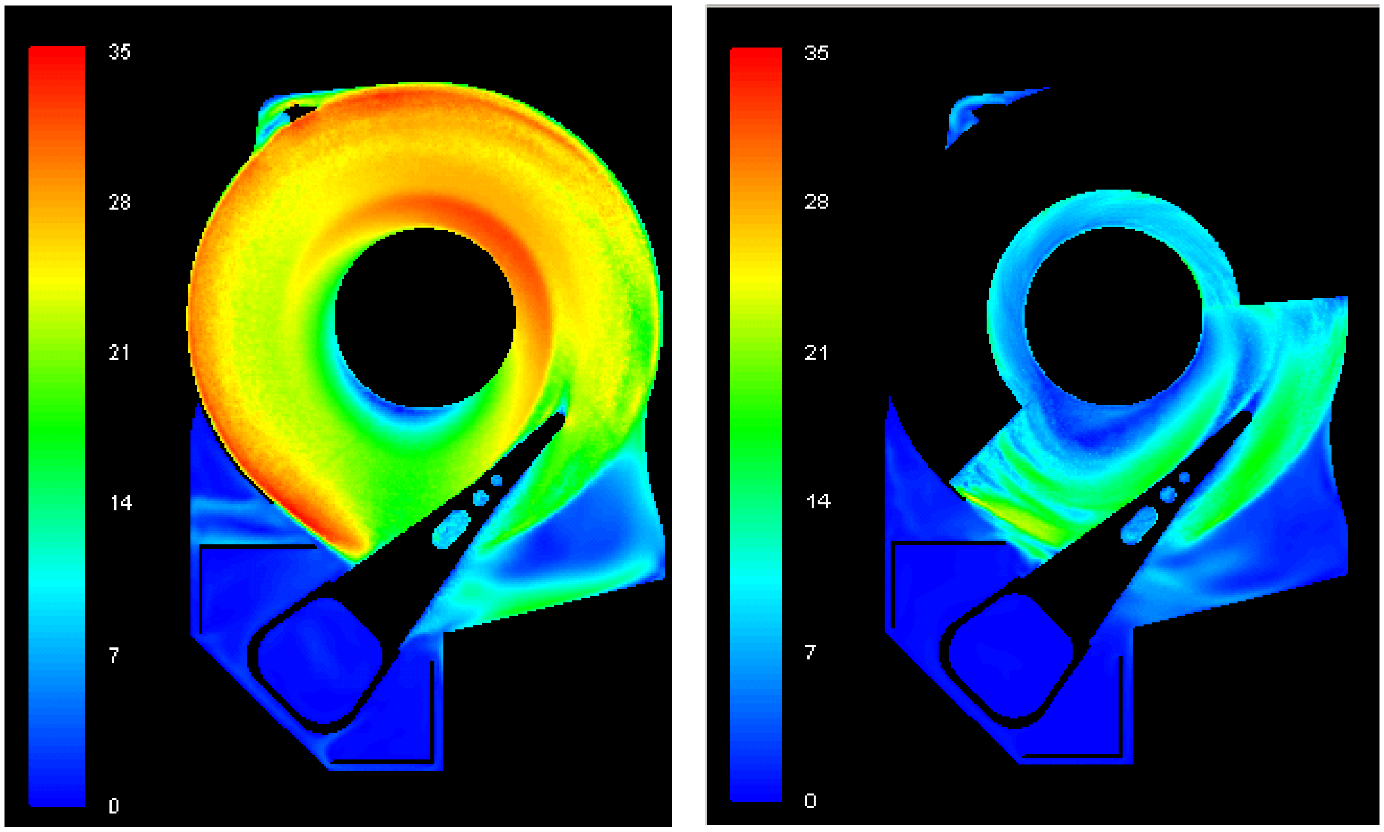
(ขวา) ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ 1 ของกรณีมี Blocking plate





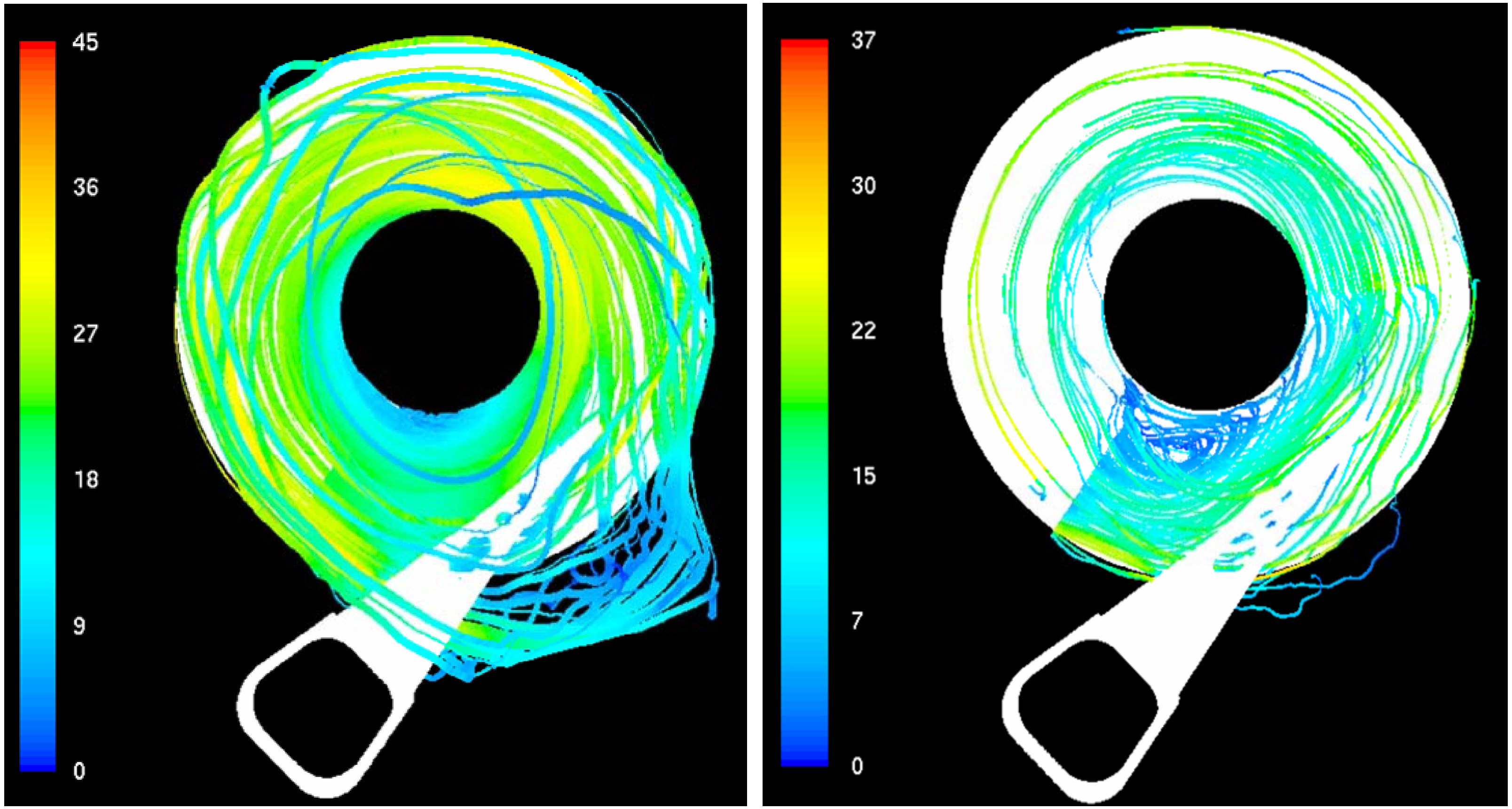
ภาพที่ 31 (ซ้าย) เส้นการไหลของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ 1 ของกรณีไม่มี Blocking plate

(ขวา) เส้นการไหลของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ 1 ของกรณีมี Blocking plate



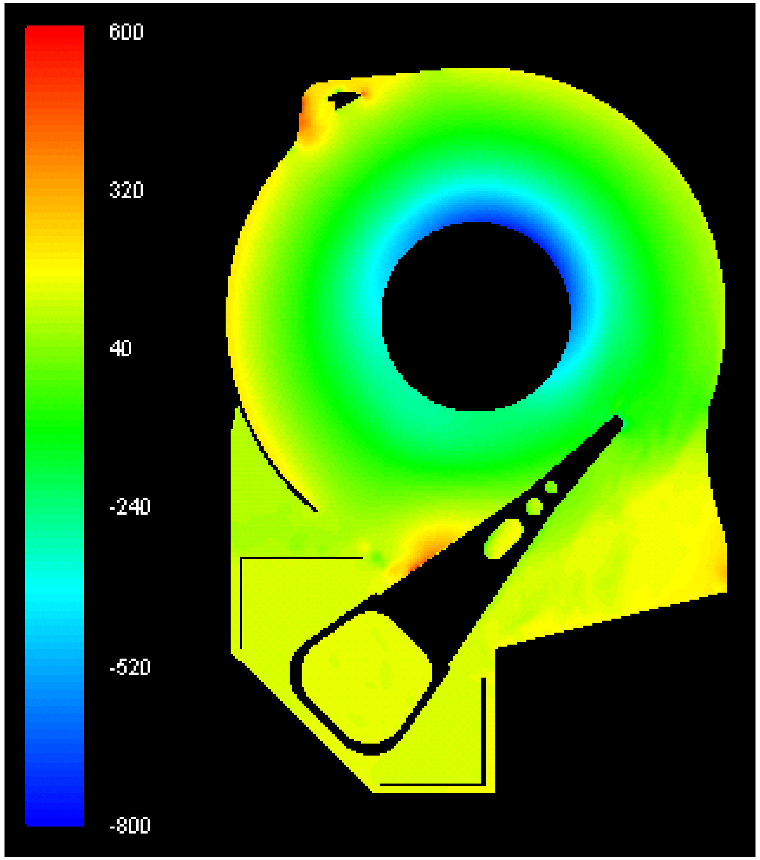
ภาพที่ 32 (ซ้าย) ความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 2 ของกรณีไม่มี Blocking plate

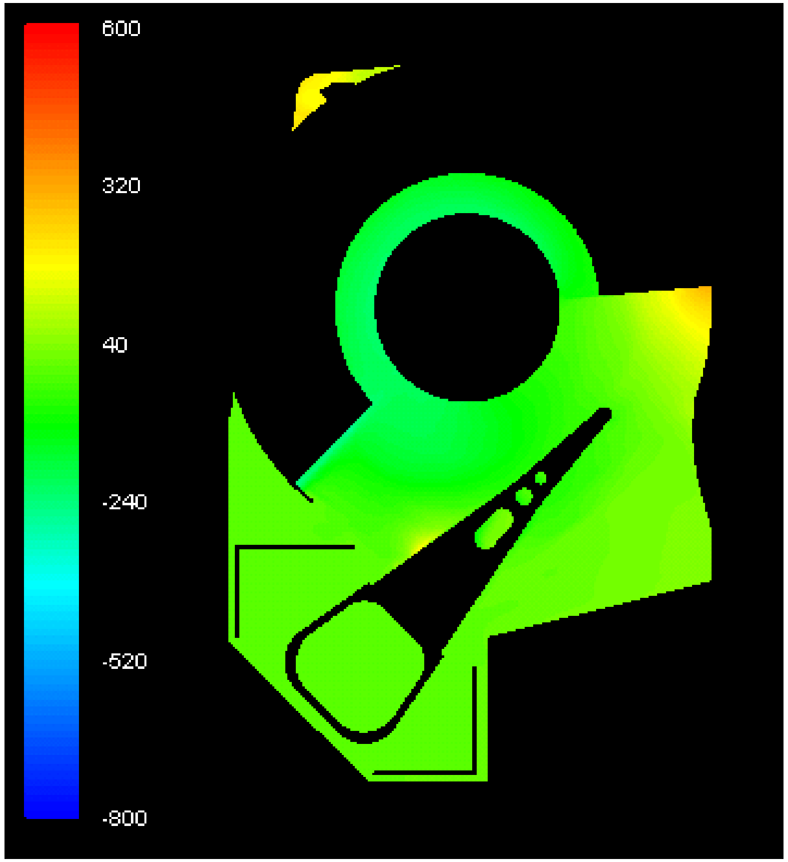
(ขวา) ความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 2 ของกรณีมี Blocking plate



ภาพที่ 33 (ซ้าย) เส้นการไหลของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ ที่ 2 ของกรณีไม่มี Blocking plate

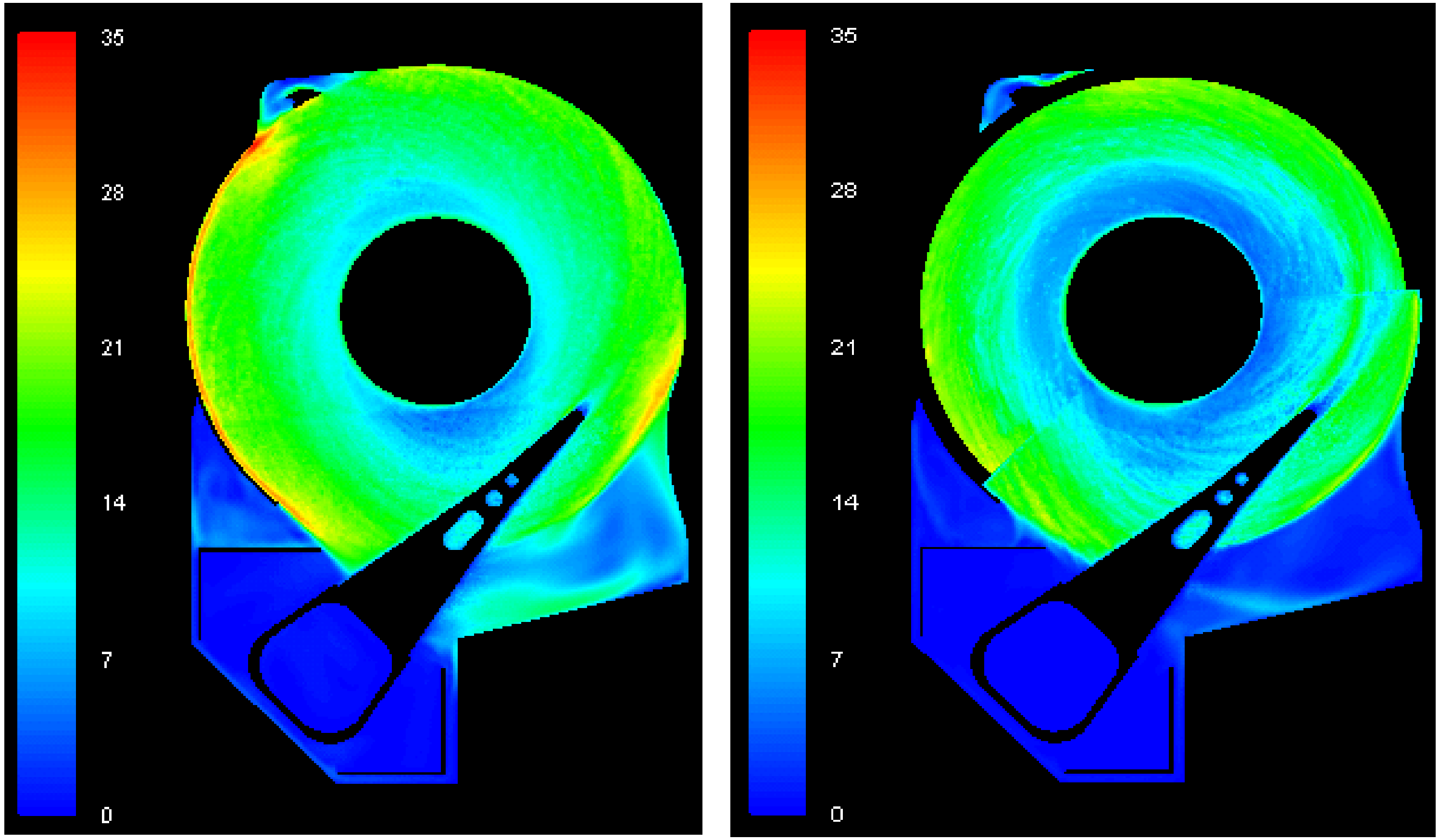
(ขวา) เส้นการไหลของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบที่ 2 ของกรณีมี Blocking plate





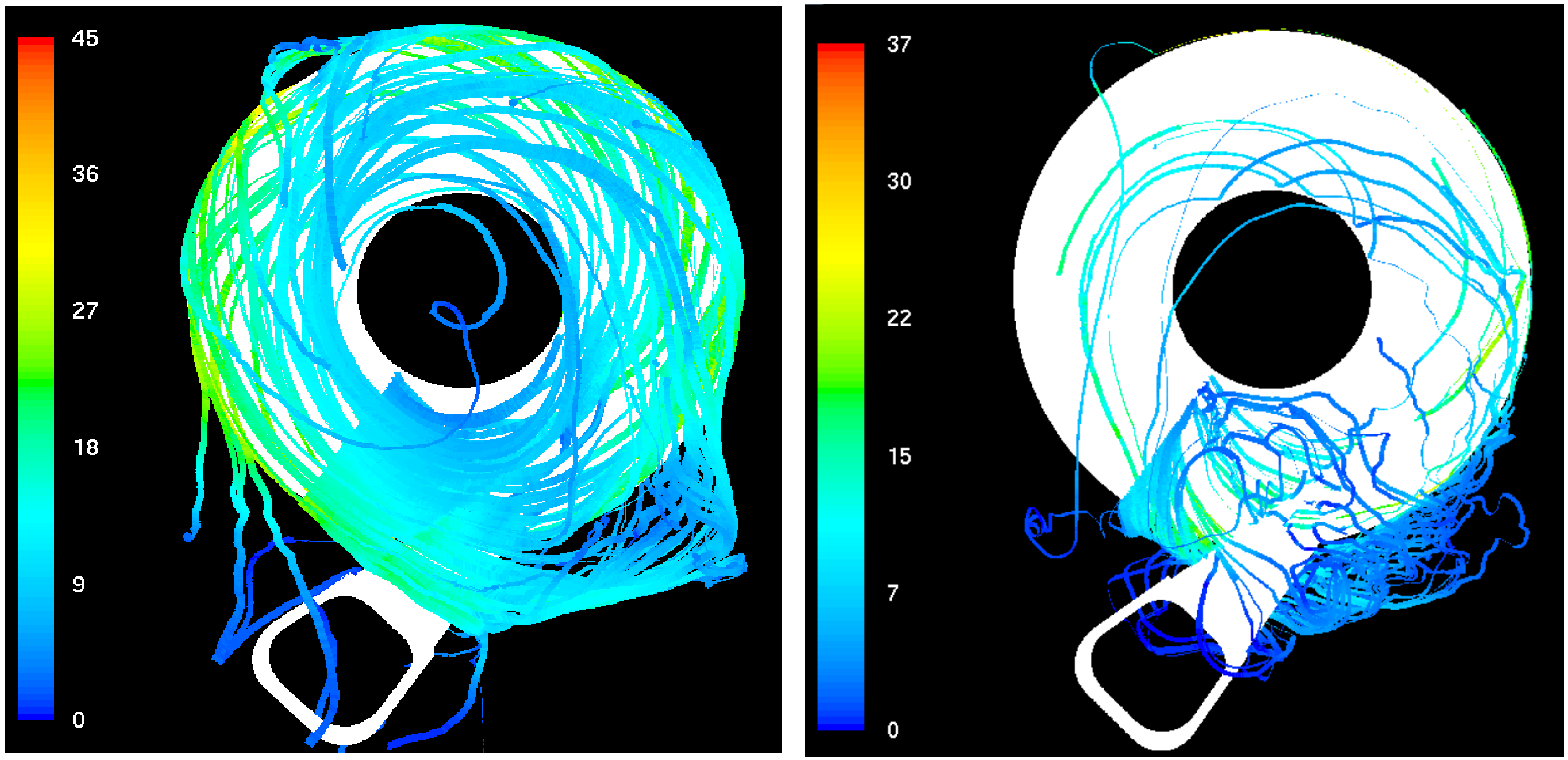
ภาพที่ 34 (ซ้าย) ความดันเฉลี่ยของระนาบที่ 2 ของกรณีไม่มี Blocking plate

(ขวา) ความดันเฉลี่ยของระนาบที่ 2 ของกรณีมี Blocking plate



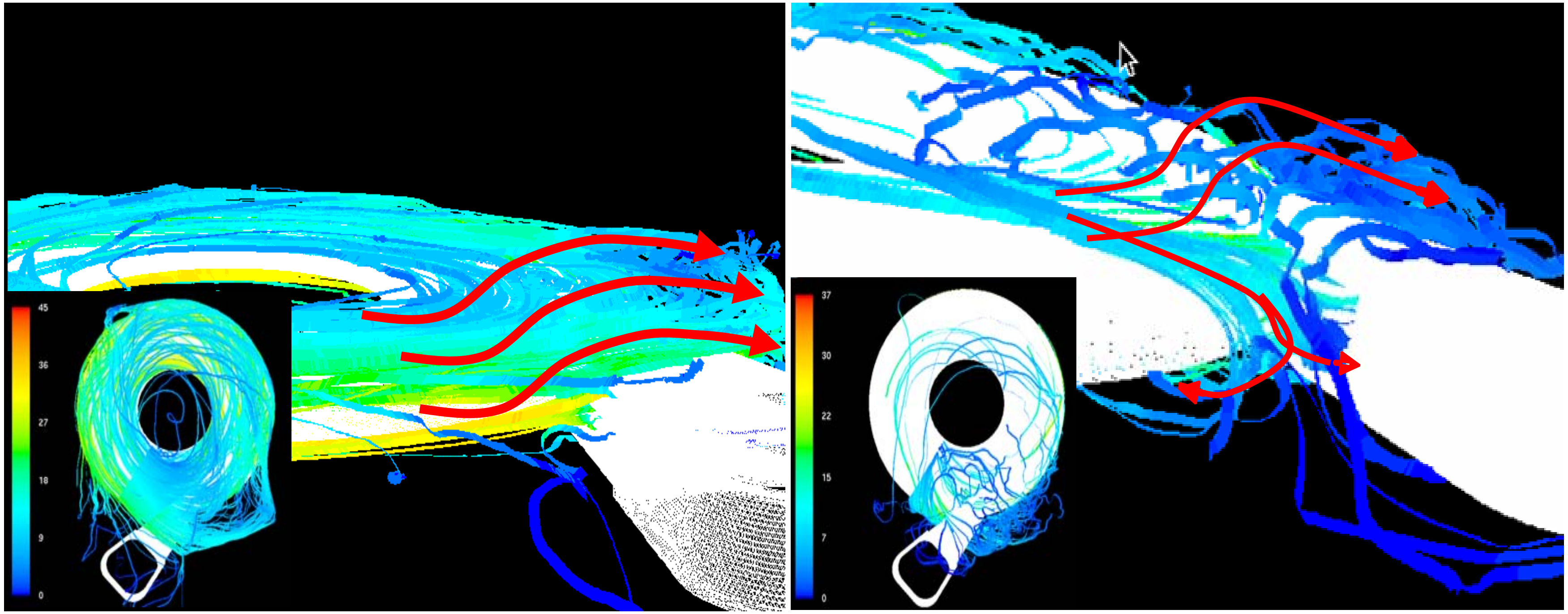
ภาพที่ 35 (ซ้าย) ความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 4 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไม่มี Blocking plate

(ขวา) ความเร็วเฉลี่ยของระนาบที่ 4 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มี Blocking plate

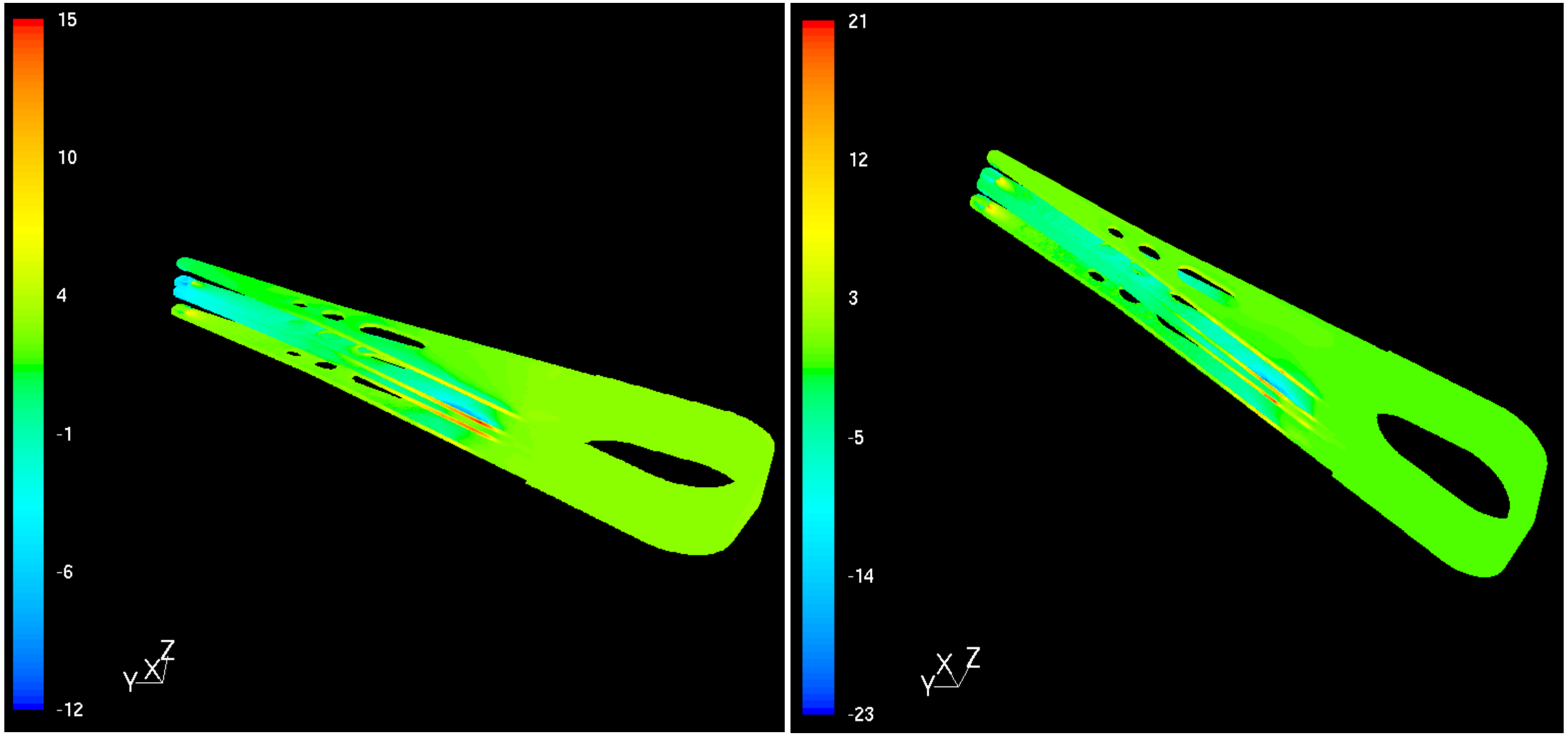


ภาพที่ 36 (ซ้าย) เส้นการไหลของความเร็วบนระนาบที่ 4 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไม่มี Blocking plate

(ขวา) เส้นการไหลของความเร็วบนระนาบที่ 4 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มี Blocking plate

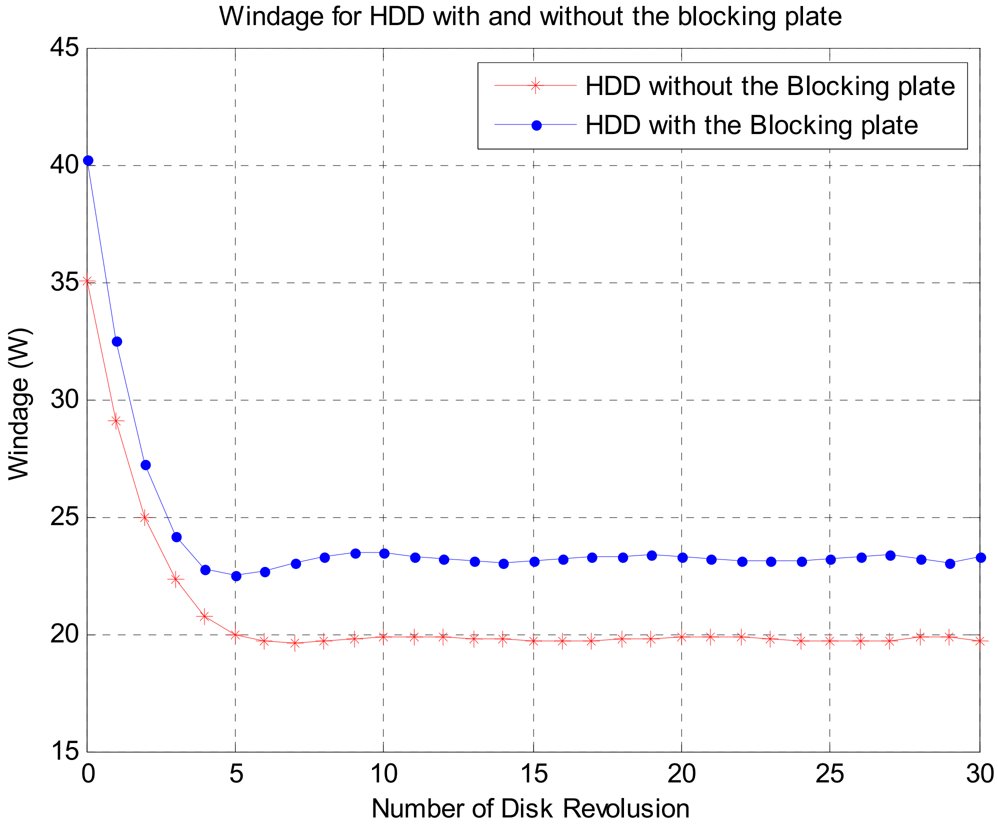


ภาพที่ 37 (ซ้าย) เส้นการไหลของอากาศ ที่ระนาบที่ 4 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไม่มี Blocking plate
(ขวา) เส้นการไหลของอากาศ ที่ระนาบที่ 4 เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มี Blocking plate



ภาพที่ 38 (ซ้าย) สัมประสิทธิ์ความดันที่ด้านหน้าหัวอ่าน เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไม่มี Blocking plate

(ขวา) สัมประสิทธิ์ความดันที่ด้านหน้าหัวอ่าน เมื่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มี Blocking plate



ภาพที่ 39 พลังงานที่ใช้สำหรับการหมุนแผ่นจานแม่เหล็กของกรณีไม่มี Blocking plateและกรณีมี Blocking plate

การติดตั้ง Blocking plate เพิ่มเข้าไปในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นเปรียบเสมือนการเพิ่มแรงต้านการไหลที่เกิดขึ้นภายในซึ่งอาจส่งผลต่ออัตราการใช้พลังงานในการหมุนแผ่นจานแม่เหล็กได้ เพื่อพิจารณาอัตราการใช้พลังงานของการหมุนแผ่นจานแม่เหล็กซึ่งสามารถหาได้จากผลรวมของโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นจานแม่เหล็กและมอเตอร์ อันเนื่องมาจากความดันและแรงจากความหนืดซึ่งคำนวณได้จาก (Fluent Inc., 2001)

$$\underbrace{\vec{M}_A}_{total_moment} = \underbrace{\vec{r}_{AB} x \vec{F}_P}_{pressure_moment} + \underbrace{\vec{r}_{AB} x \vec{F}_\upsilon}_{viscous_moment} \tag{26}$$

จากภาพที่ 39 เป็นผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Fluent โดยการรวมโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นจานแม่เหล็กและมอเตอร์พบว่าเพื่อให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความเร็วรอบคงที่ที่ 15,000 รอบต่อนาทีหลังจากติดตั้ง Blocking plate จะต้องใช้พลังงานเพื่อเอาชนะแรงต้านการหมุนเพิ่มขึ้นประมาณ 15% โดยเมื่อเริ่มต้นหมุนแผ่นจานแม่เหล็กในรอบแรกๆนั้นต้องใช้พลังงานสูงมากและจะค่อยๆลดลงจนคงที่เมื่อแผ่นจานแม่เหล็กหมุนไปได้ 6 รอบ จากข้อมูลดังกล่าวสำคัญอย่างยิ่งต่อการ

ออกแบบเรื่องของการประหยัดพลังงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 2.5 นิ้ว และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมถึงความสัมพันธ์ของอัตราการใช้พลังงานกับรูปร่างของ Blocking plate ที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้แล้วการเพิ่มแรงต้านการไหลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นอาจก่อให้เกิดความร้อนและเสียงขึ้นซึ่งต้องพิจารณาอีกครั้งในการศึกษาเรื่องเสียงที่เกิดจากกาไหล (Aero-acoustic Simulation)

สรุป

ห้องสะอาด

จากการศึกษาวิจัยการจัดวางอุปกรณ์ประกอบการทำงานภายในห้องสะอาดด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ แบบมาตราฐานของห้องสะอาดแบบแนวดิ่ง พบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุจากพื้นโต๊ะมีผลทำให้ลักษณะและขนาดของการหมุนวนของกระแสอากาศบริเวณด้านหน้าของพนักงาน (ด้านหน้าของพัดลมเป่าประจุ)เปลี่ยนแปลงมากที่สุด (ภาพที่ 16) และเมื่อนำตำแหน่งที่พนักงานนั่งทำงานได้สะดวกที่สุดมารวมกันเพื่อพิจาณาถึงตำแหน่งที่ดีที่สุด พบว่าเกิดการหมุนวนของกระแสอากาศเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่งที่บริเวณหน้าขาของพนักงาน และค่า Circulation ที่ได้มากกว่ากรณีที่ 1 (ตารางที่ 1, ภาพที่ 15) ซึ่งเป็นตำแหน่งการทำงานปัจจุบัน ดังนั้น ตำแหน่งการนั่งของพนักงานที่ดีที่สุดยังคงเป็นตำแหน่งการทำงานของจุดทำงานปัจจุบัน แต่จากผลการศึกษาทำให้ทราบว่าจุดทำงานปัจจุบันนั้นสามารถให้พนักงานขยับการนั่งเพื่อเพิ่มความสะดวกและลดความเมื่อยล้าในการทำงานได้ดียิ่งขึ้นโดยไม่กระทบกับรูปแบบการไหลมากนัก ซึ่งช่วงการทำงานใหม่ที่เหมาะสมคือ ความสูงของพัดลมเป่าประจุจากพื้นโต๊ะ 700 มิลลิเมตร, 150 มิลลิเมตร <ระยะห่างของพนักงานกับโต๊ะ<250 มิลลิเมตร และ 610 มิลลิเมตร <ระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ <700 มิลลิเมตร ตามลำดับ

หลังจากที่ได้ทราบถึงช่วงของตำแหน่งที่เหมาะสมในการทำงานดังกล่าวแล้วเมื่อนำไปใช้จริงที่บริเวณการทำงานพบว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถลดการหยุดเครื่องมือโดยอัตโนมัติอันเนื่องมาจากความสะอาดไม่ได้มาตราฐานที่กำหนดลงได้ถึง 20-30% ซึ่งสามารถลดต้นทุนการผลิตและจำนวนของเสียได้เป็นจำนวนมาก

ความแรงของบริเวณการหมุนวนของกระแสอากาศที่วัดความแรงด้วยค่า Circulation นั้นสนใจค่าที่เกิดขึ้นจริงๆเท่านั้นโดยไม่สนใจถึงขนาดพื้นที่ที่เกิดจึงทำให้ค่า Circulation ที่คำนวณได้นั้นเป็นการประมาณเบื้องต้นซึ่งอาจไม่ถูกต้องเท่าที่ควรแต่สามารถนำมาใช้ศึกษาในวงการอุตสาหกรรมได้ในระดับที่ยอมรับได้ แต่การศึกษาในเชิงลึกอาจจะใช้ตัวชี้วัดตัวอื่นที่ให้ความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สำหรับการศึกษาในอนาคตเพื่อเพิ่มความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจะทำการศึกษาการไหลแบบสามมิติรอบๆ บริเวณการทำงานและตัวของพนักงาน ซึ่งสามารถพิจารณาบริเวณการหมุนวนของกระแส

อากาศแบบสามมิติได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นและจะมีการปล่อยอนุภาคฝุ่นละอองเข้าไปในระบบการไหลเพื่อดูการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่ด้านหน้าของพนักงานเนื่องจากการหมุนของกระแสอากาศ

นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาจุดที่น่าจะสามารถเก็บฝุ่นได้อีกคือจุดที่มีความเร็วต่ำ (Stagnation point) เพราะที่บริเวณดังกล่าวฝุ่นละอองจะมีการเคลื่อนที่เกิดขึ้นน้อยมากทำให้มีโอกาสไปติดชิ้นงานได้ถ้าพนักงานไปสัมผัสหรือเกิดบริเวณดังกล่าวที่บริเวณการทำงานซึ่งจะนำมาพิจารณาสำหรับการศึกษาในอนาคต

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

จากการศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งและเปลี่ยนแปลงขนาดเชิงมุม, ความหนา และ ขนาดในแนวรัศมี ของ Blocking plate ต่อแรงที่ก่อให้เกิดการสั่นของหัวอ่านสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว ที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาทีด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $RNG \quad k-\varepsilon$ ทั้ง 10 กรณีศึกษาผลแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าเมื่อขนาดเชิงมุม, ความหนา และขนาดในแนวรัศมีของ Blocking plate มีขนาดเพิ่มขึ้นความเร็วเฉลี่ยที่เข้าปะทะกับหัวอ่าน แรงต้านและแรกยกจะมีค่าลดลง และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงขนาดในแนวรัศมีของ Blocking plate จะส่งผลต่อการลดลงของแรงและความเร็วเฉลี่ยมากที่สุด ดังภาพที่ 26 และ 27 ตามลำดับ

เมื่อนำขนาดของ Blocking plate ที่ใหญ่ที่สุดจากการศึกษาไปศึกษาต่อด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large-Eddy Simulation พิจารณาถึงย่านความถี่ของแรงที่เกิดขึ้นพบว่าก่อนการติดตั้ง Blocking plate สัมประสิทธ์แรงต้านจะมีโอกาศสั่นมากที่สุดที่ความถี่ 3,150 เฮิรตซ์ แต่เมื่อมีการติดตั้ง Blocking plate ย่านความถี่ดังกล่าวหายไป ดังรูปที่ 28 เนื่องมาจากความเร็วที่เข้าปะทะกับหัวอ่านลดลง 38% (ตารางที่ 5) และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธ์แรงลากที่เกิดขึ้นโดยใช้ความเร็วเฉลี่ยที่เข้าปะทะกับหัวอ่านพบว่า หลังจากติดตั้ง Blocking plate สัมประสิทธ์แรงลากจะมีค่าเป็นสองเท่าของกรณีไม่มี Blocking plate เนื่องจากโครงสร้างการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป จากภาพที่ 33 และ 34 แสดงโครงสร้างการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปของระนาบที่ 2 โดยพบว่า บริเวณการหมุนวนของกระแสอากาศซึ่งเป็นบริเวณที่มีความดันต่ำขยายใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความดันที่ระนาบ 2 ต่ำกว่าระนาบ 1 และ 4 ให้ความเร็วที่ระนาบ 1 และ 4 ไหลข้ามระนาบมายังระนาบที่ 2 มากขึ้น โดยเฉพาะระนาบที่ 4 (ภาพที่ 36) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเส้นการไหลจะเปลี่ยนทิศทางการไหลก่อนเข้าปะทะกับหัวอ่าน

อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการเปลี่ยนทิศทางดังกล่าวทำให้ความดันที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านต่างกันมากยิ่งขึ้น ดังภาพที่ 38

ภาพที่ 39 แสดงอัตรากการใช้พลังงานเพื่อให้แผ่นจานแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ ที่ 15,000 รอบต่อนาทีพบว่าหลังจากติดตั้ง Blocking plate จะต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 15% เพื่อหมุนแผ่นจานแม่เหล็กซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการติดตั้ง Blocking plate เป็นการเพิ่มแรงต้านการไหลให้กับระบบดังนั้นจึงต้องการพลังงานมากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงต้านที่เกิดขึ้น ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบเรื่องของการประหยัดพลังงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 2.5 นิ้ว ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมถึงความสัมพันธ์ของอัตราการใช้พลังงานกับรูปร่างของ Blocking plate ที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้แล้วการเพิ่มแรงต้านการไหลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นก่อให้เกิดความร้อนและเสียงขึ้นในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กำลังทำงาน ซึ่งต้องพิจารณาอย่างละเอียดอีกครั้งในการศึกษาเรื่องเสียงที่เกิดจากการไหล (Aero-acoustic Simulation) หรืออาจจะมีการประยุกต์ใช้ Blocking plate ร่วมกับวิธีการอื่นๆให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเช่น การใช้ Blocking plate ร่วมกับช่องทางเบี่ยงความเร็วอากาศ ดังภาพที่ 40 และ 41 น่าจะสามารถลดการสั่นของหัวอ่านได้ดีกว่าใช้ Blocking plate เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะเป็นงานวิจัยที่จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคตเพื่อให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นใหม่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ภาพที่ 40 ช่องทางเบี่ยงที่นิยมใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 2.5 นิ้ว

ที่มา : Seagate Technology (2008)

ภาพที่ 41 ช่องทางเบี่ยงที่นิยมใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 3.5 นิ้ว

ที่มา : Seagate Technology (2008)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

วรางค์รัตน์ จันทสาโร . 2005. **วิธีปริมาตรจำกัดสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย, 2546. **ห้องสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมและพานิชยกรรม**, บริษัท ออฟเซ็ท ครีเอชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.

เอกรงค์ สุขจิต, วรางค์รัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. 2006. **การศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, นครราชสีมา.

Al-Shannag, M., J. Herrero, J.C. Humphrey and F. Giralt. 2002. Effect of Radial Clearance on the Flow Between Co-rotating Disks in Fixed Cylindrical Enclosures. **Journal of Fluids Engineering**. 124: 719-727.

Cheng, M., G.R. Liu, K.Y. Lam, W. J.Cai and E.L. Lee. 1999. Approaches for improving air flow uniformity in unidirectional flow clean rooms. **Building and Environment** 34: 275-284

Yang, S. and K. Ono. 2001. Suppression of resonance amplitude of disk vibrations by squeeze air bearing plate. IEEE Trans. Magn. 37: 820–825.

Ferziger, J.H. and M. Peric. 2002. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Springer-Verlag.

Fluent Inc. 2001. **Fluent user's guide: Version 6.3**. United States of America: Fluent Inc.

Hirono, Y., T. Arisaka, N. Nishijima, T. Shimizu, S. Nakamura and H. Masuda. 2004. Flow-Induced vibration reduction in HDD by using a spoiler. **IEEE Transaction on Magnetics**. 40: 3168–3170.

Hitachi Global Storage Technology. 2008. **Hitachi Research and Development**, http://www.hgst.com/write paper/index.asp. Last modify September 2008.

Hu, S.C., Y.K. Chuah and M.C. Yen. 2002. Design and evaluation of a mini environment for semiconductor manufacturing process. **Building and Environment**. 37: 201-208.

Ikegawa, M., Y. Hirono, H. Mukai1. and M. Kaiho. 2006. Decreasing Airflow Velocity in Hard Disk Drives With a Spoiler and Bypass. **IEEE Transaction on Magnetics**. 42: 2594-2596.

Imai, S. 2001. Fluid Dynamics Mechanism of Disk Flutter by Measuring the Pressure Between Disks. **IEEE Transaction on Magnetics**. 37: 837-841.

Imai, S., M. Tokuyama, and Y. Yamaguchi. 1999. Reduction of Disk Flutter by Decreasing Disk-to-Shroud spacing. **IEEE Transaction on Magnetics**. 35: 2301-2303.

Imai, S., M. Tokuyama, and Y. Yamaguchi. 1999. Reduction of disk flutter by decreasing disk-to-shroud spacing. **IEEE Transaction on Magnetics**. 35: 2301–2303.

Kirpekar, S. and D.B. Bogy. 2006. A comparison of large eddy simulation models for numerical simulation of airflow in hard disk drives. **ASME Journal Fluids Engineering**. 124: 719-727.

Kirpekar, S. and D.B. Bogy. 2006. A Study on the Efficacy of Flow Mitigation Devices in Hard Disk Drives. **IEEE Transaction on Magnetics**. 42: 1716-1729.

Kubotera, H., N. Tsuda, M. Tatewaki and T. Maruyama. 2002. Aerodynamic Vibration Mechanism of HDD Arms Predicted by Unsteady Numerical Simulations. **IEEE Transaction on Magnetics**. 38: 2201-2203.

Kwang C.N., M.D. Oh and S.C. Lee. 2005. A numerical study on airflow and dynamics cross-contamination in the super clean room for photolithography process. **Building and Environment.** 40: 1431-1440.

Nakamura, S., S. Wakatsuki, T. Haruhide, S. Saegusa and Y. Hirono. 2004. Flow-induced vibration of head gimbal assembly. **IEEE Transaction on Magnetics**. 40: 3198–3200.

Rouaud, O. and M. Havet. 2002. Computation of the airflow in a pilot scale clean room using $k-\varepsilon$ turbulent models. **International Journal of Refrigeration**. 25: 351-361.

Rouaud, O. and M. Havet. 2005. Numerical investigation on the efficiency of transient contaminant removal from a food processing clean room using ventilation effectiveness concepts. **Journal of Food Engineering**. 68: 163-174.

Samsung Electronics. 2007. **Samsung Products**. http://www.samsung.com/global. Last modify September, 29 2007.

Seagate Technology. 2007. **Technical and Development**. http://www.seagate.com. Last modify July, 2007.

Shimizu, H., S. Imai and K. Sakai. 1983. Improvement of hard disk drives performance by applying computer aerodynamic simulation. **Proc. JSME Conference Information Intelligence and Precision Equipment**. 49: 809–817.

Shimizu, H., M.S. Tokuyama, S.N. Imai, and K. Sakai. 2001. Study of aerodynamic characteristics in hard disk drives by numerical simulation. **IEEE Transaction on Magnetics**. 37: 831–836.

Tan, K.P., K. Sundaravadivelu, Q.D. Zhang, E.H. Ong, E.T. Ong and C.K. Thum. 2006. Flow Structural Interaction of the Actuator Arm in Hard Disk Drive. **IEEE Transaction on Magnetics**. 39: 820-822.

Tatewaki, M., N. Tsuda and T. Maruyama. 2001. A numerical simulation of unsteady airflow in HDDs. **FUJITSU Set. Tech**. 37: 227–235.

Tatewaki, M., N. Tsuda and T. Maruyama. 2001. An analysis of disk flutter in hard disk in aerodynamics simulations. **IEEE Transaction on Magnetics**. 37: 842–846.

Tsuda, N., H. Kobutera, M. Tatewaki, S. Noda, M. Hashiguchi and T. Maruyama. 2003. Unsteady analysis and experimental verification of the aerodynamic vibration mechanism of HDD arms. **IEEE Transaction on Magnetics**. 39: 819–825.

Versteeg, H.K. and W. Malalasekera. 1995. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. **Longman Scientific & Technical**. Malaysia.

Western Digital Cooperation. **Technical Information**. http://support.wdc.com. Last modify September, 2007.

White, F.M. 1999. **Fluid mechanics**. McGraw-Hill Publishing Company Limited. Singapore.

Whyte, W. 1999. **Clean room Design**. John Wiley & Sons. Chichester. 2nd ed.

Whyte, W. 2001. **Clean room technology : fundamentals of design, testing and operation**. John Wiley & Sons, England.

Yang, S.J. and S. Wu. 2002. A numerical investigation of effects of a moving operator on airflow patterns in a clean room. **Building and Environment**. 37: 705-712.

ภาคผนวก

การทดสอบการเข้าสู่ค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลาของแรงต้าน (Statistical stationary)

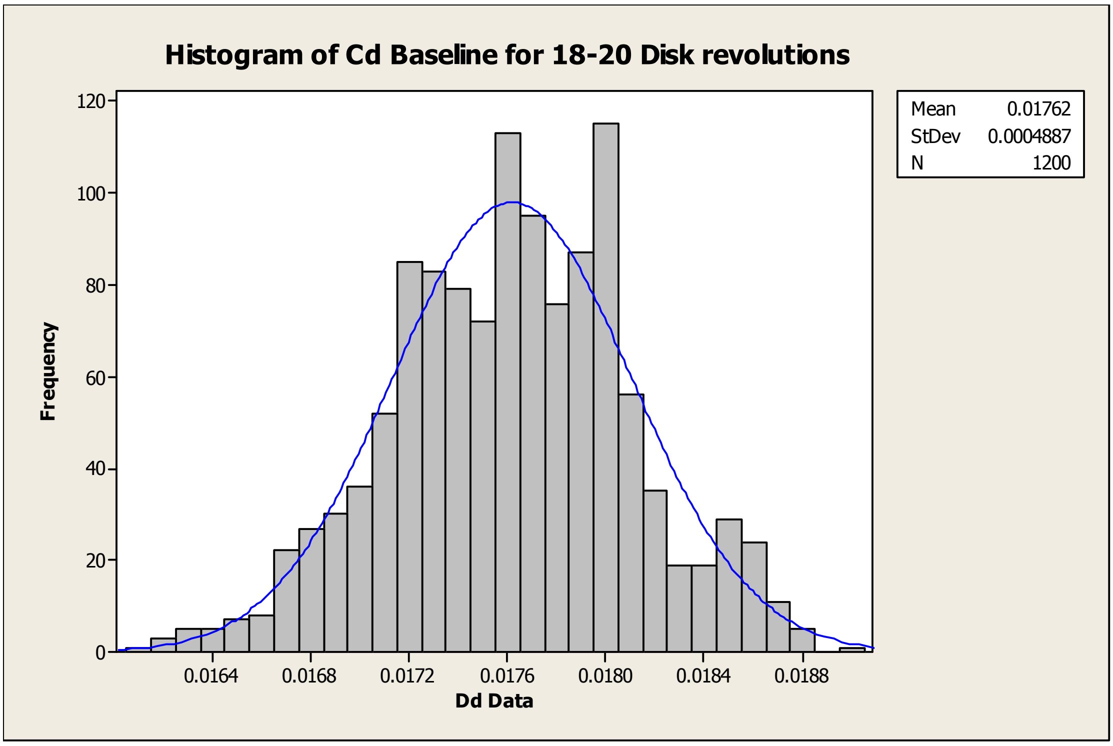
ในการศึกษาครั้งนี้ข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงลากของทั้งสองกรณีศึกษาจะนำมาพิจารณาทางสถิติด้วยโปรแกรม MINITAB 15 ถึงการเข้าสู่ค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา พบว่าที่ความเชื่อมั่น 95% ค่าทางสถิติของสัมประสิทธิ์แรงลากจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเมื่อเวลาของการหมุนของแผ่นจานแม่เหล็กมากกว่า 0.072 วินาที หรือแผ่นจานแม่เหล็กหมุนได้ 18 รอบ โดยขั้นตอนของการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. ภาพที่ 1-4 แสดงการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ยพบว่า Cd ของรอบการหมุนของแผ่นจานแม่เหล็กรอบที่ 18-30 ทั้งกรณีมีและไม่มี Blocking plate มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ดังนั้น สามารถนำไปทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ได้

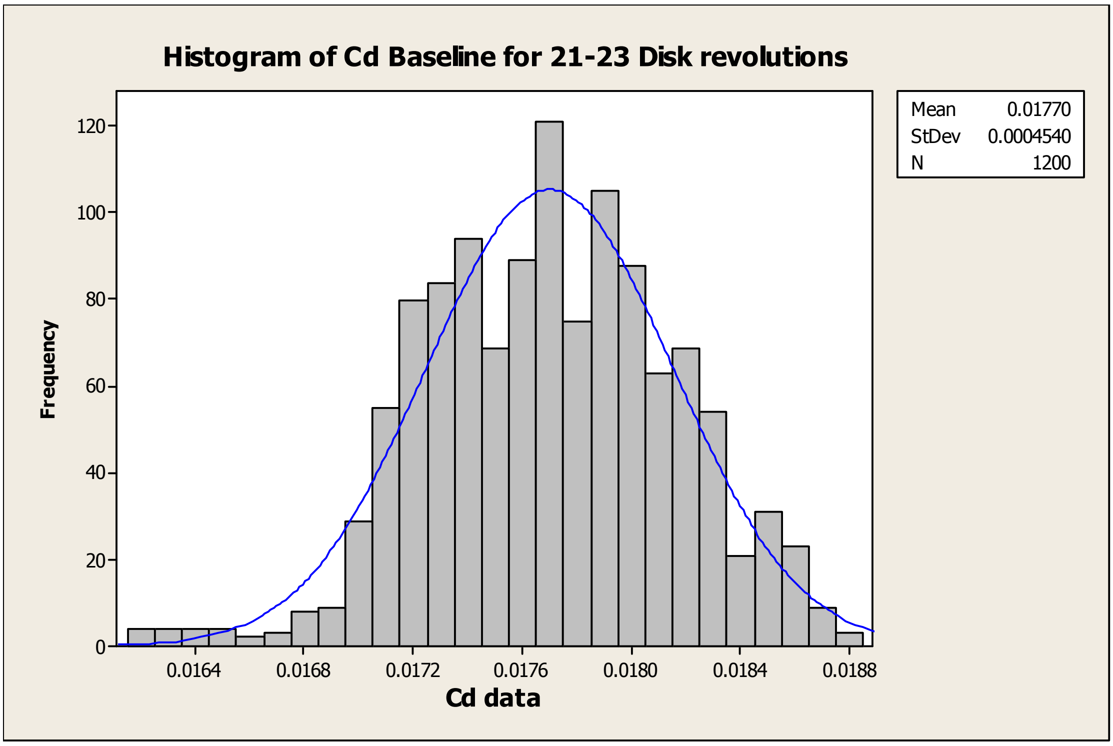
2. ภาพที่ 5-6 แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มข้อมูลทั้งภายในกลุ่มและระหว่างกลุ่มข้อมูล จากการทดสอบพบว่าทั้งกรณีมีและไม่มี Blocking plate ค่าเฉลี่ย Cd ของรอบการหมุนของแผ่นจานแม่เหล็กรอบที่ 18-30 จะไม่มีความแตกต่างกัน

3. ภาพที่ 7-10 แสดงการทดสอบความแตกต่างของค่า Variance สำหรับค่า Cd ระหว่างรอบการหมุนของแผ่นจานแม่เหล็กรอบที่ 18 กับ 19 และ 18 กับ 20 ทั้งกรณีมีและไม่มี Blocking plate พบว่า ค่า P-value มากกว่า 0.05 ทั้งการทดสอบแบบ F-Test และ Leven’s Test ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปทดสอบสมมติฐานด้วย 2 sample T-test และสามารถกำหนดให้ค่า Varience เท่ากันได้

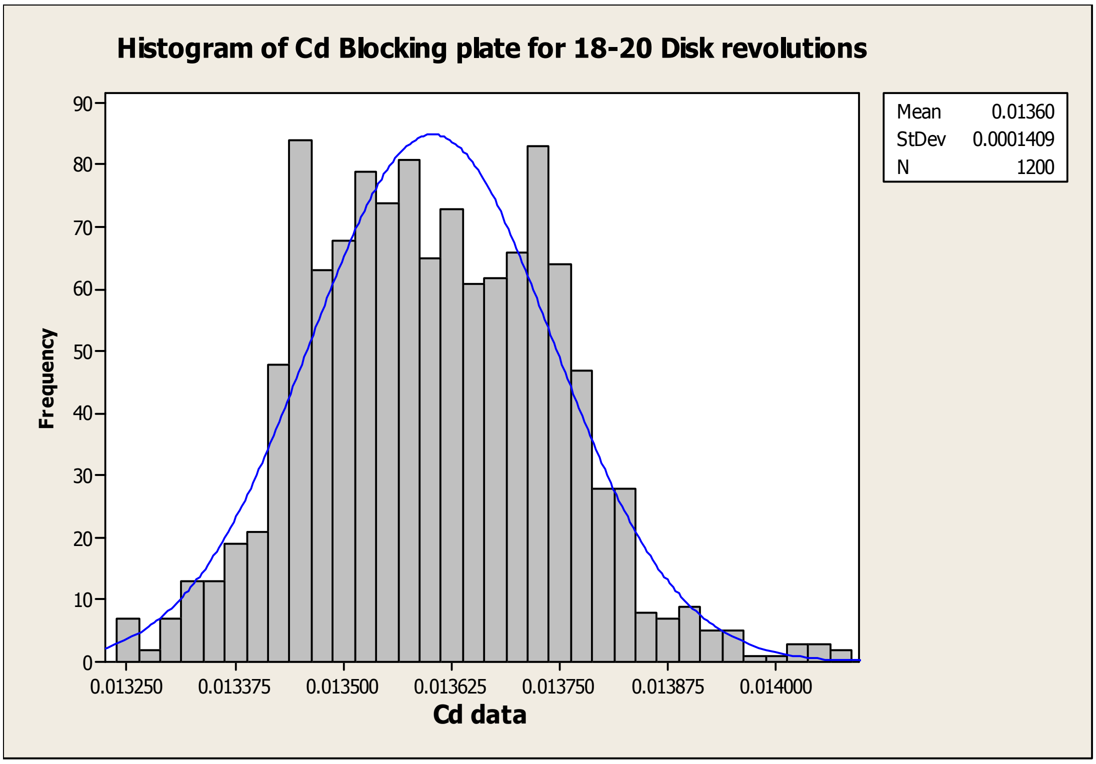
4. ภาพที่ 11-14 แสดงการทดสอบสมมติฐานด้วย 2 sample T-test สำหรับค่า Cd ระหว่างรอบการหมุนของแผ่นจานแม่เหล็กรอบที่ 18 กับ 19 และ 18 กับ 20 ทั้งกรณีมีและไม่มี Blocking plate พบว่า ค่า P-value มากกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า Cd จากรอบการหมุนตั้งแต่รอบที่ 18 เป็นต้นไปทั้งกรณีมีและไม่มี Blocking plate ไม่มีความกันในทางสถิติ



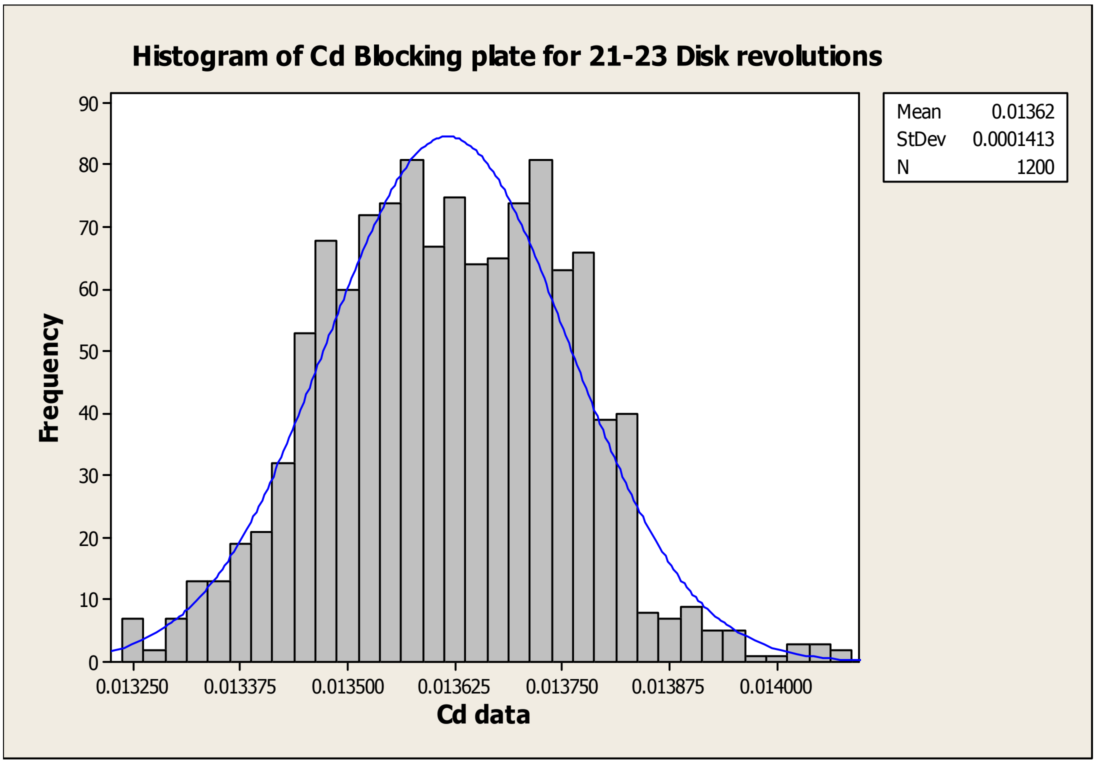
ภาพผนวกที่ 1 ข้อมูลของแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านสำหรับกรณีไม่มี Blocking plateรอบที่ 18 ถึง 20



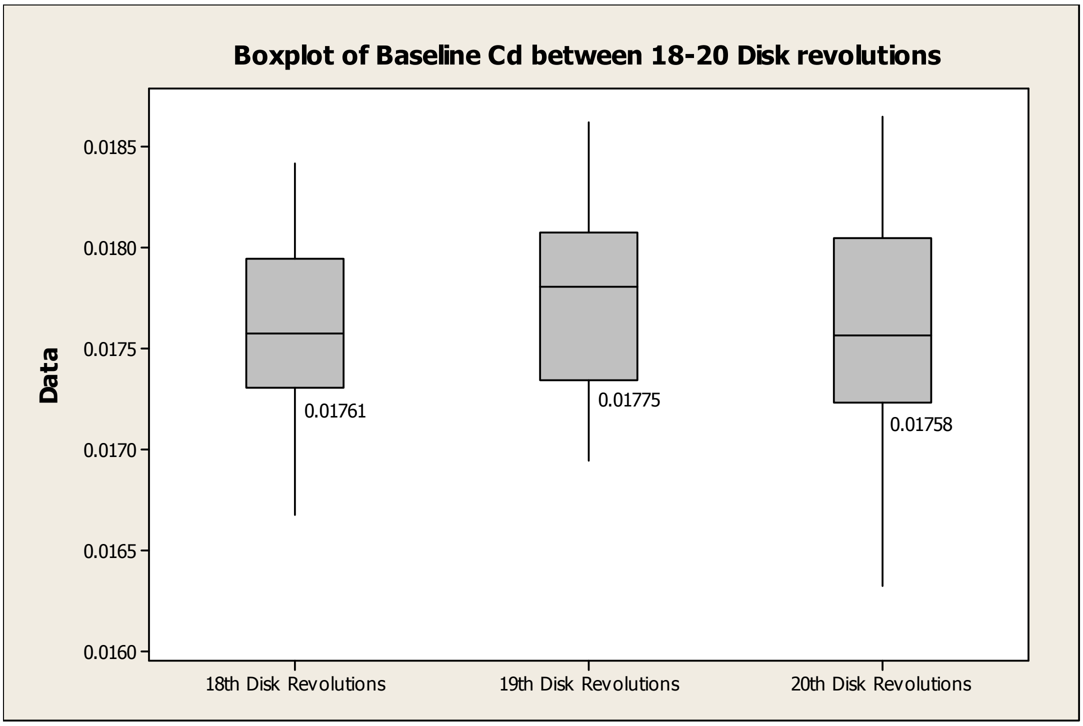
ภาพผนวกที่ 2 ข้อมูลของแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านสำหรับกรณีไม่มี Blocking plate รอบที่ 21 ถึง 23



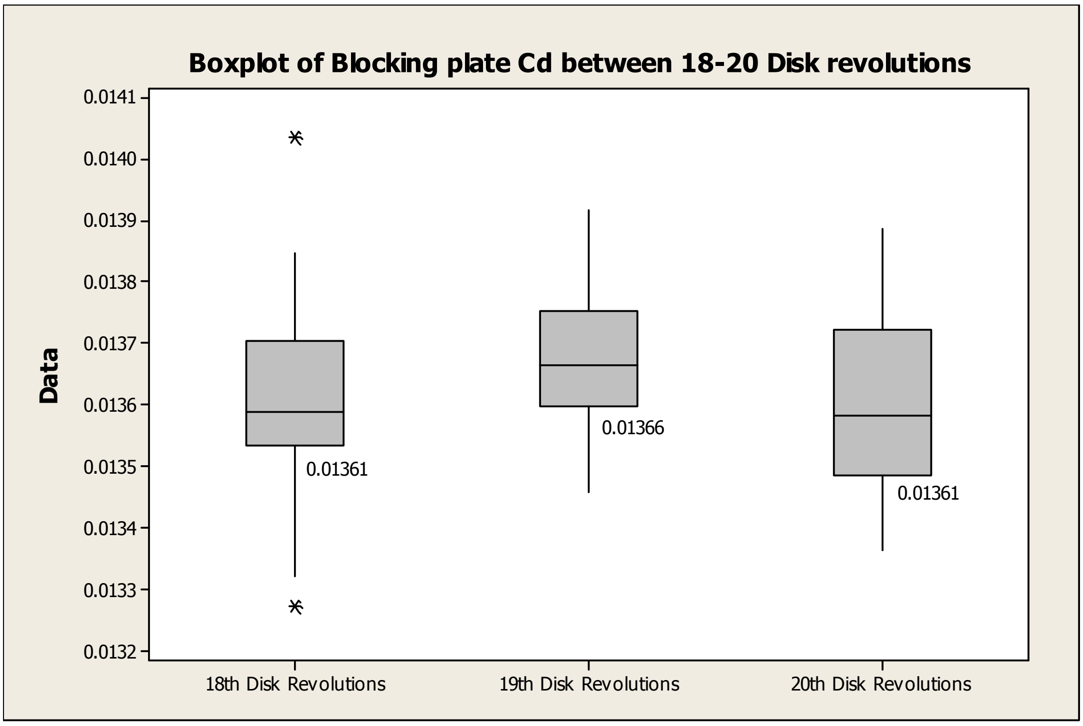
ภาพผนวกที่ 3 ข้อมูลของแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านสำหรับกรณีมี Blocking plateรอบที่ 18 ถึง 20



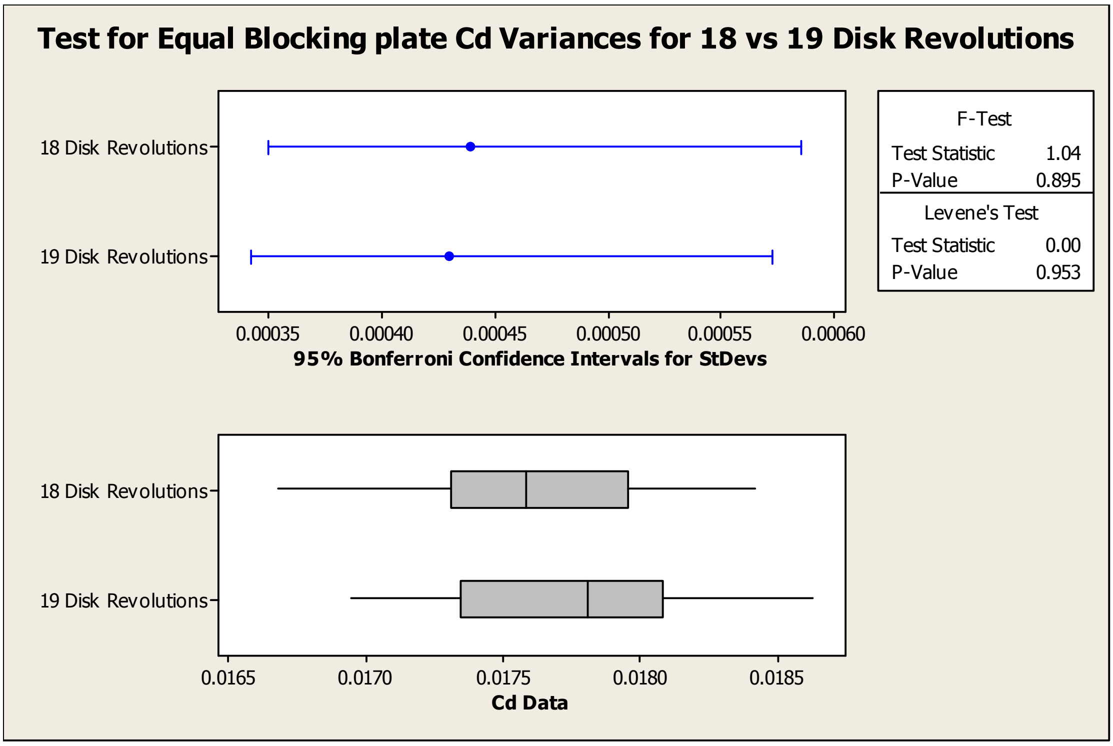
ภาพผนวกที่ 4 ข้อมูลของแรงลากที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านสำหรับกรณีมี Blocking plateรอบที่ 21 ถึง 23



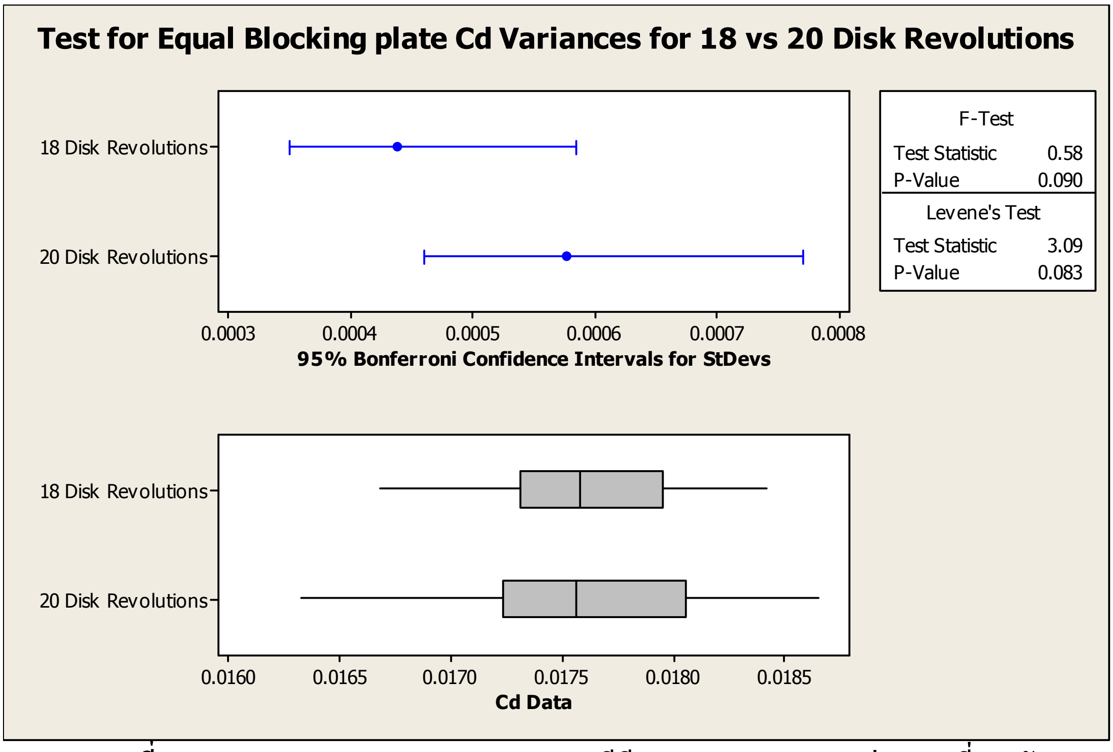
ภาพผนวกที่ 5 การเปลี่ยนแปลงทางสถิติของสัมประสิทธิ์แรงลากที่เวลา 0.072 วินาที สำหรับกรณีไม่มีBlocking plate



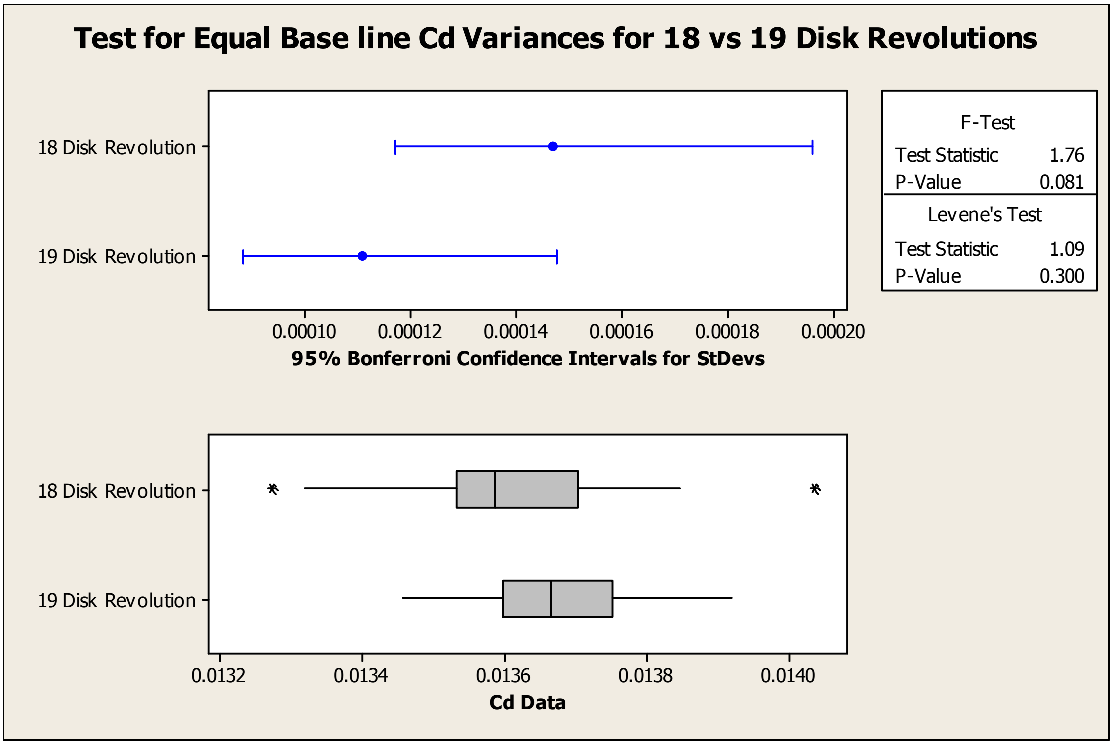
ภาพผนวกที่ 6 การเปลี่ยนแปลงทางสถิติของสัมประสิทธิ์แรงลากที่เวลา 0.072 วินาที สำหรับกรณีมีBlocking plate



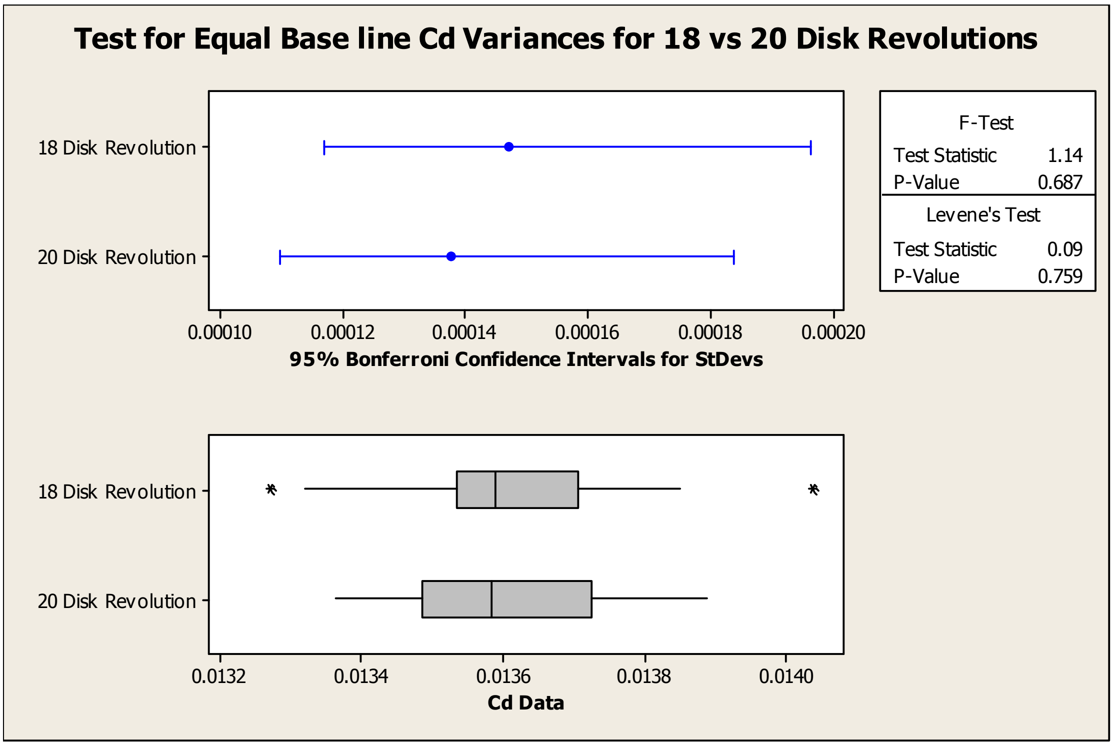
ภาพผนวกที่ 7 Variance hypothesis test ของ C_d กรณีมี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่ 19



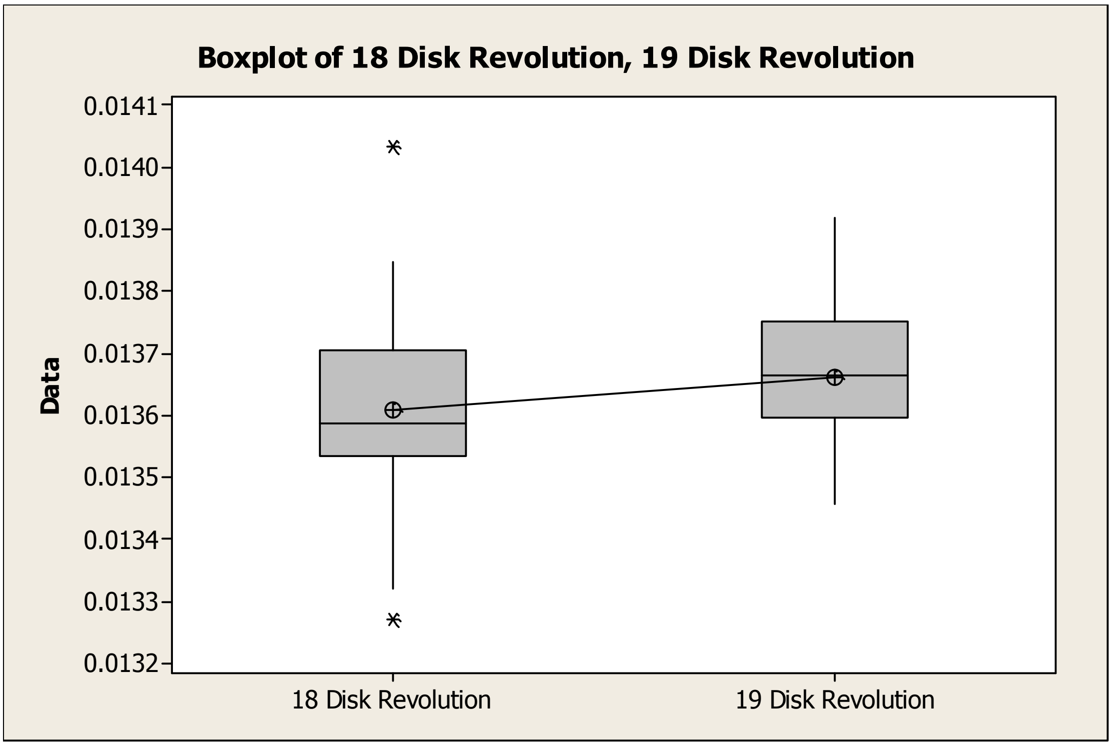
ภาพผนวกที่ 8 Variance hypothesis test ของ C_d กรณีมี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่ 20



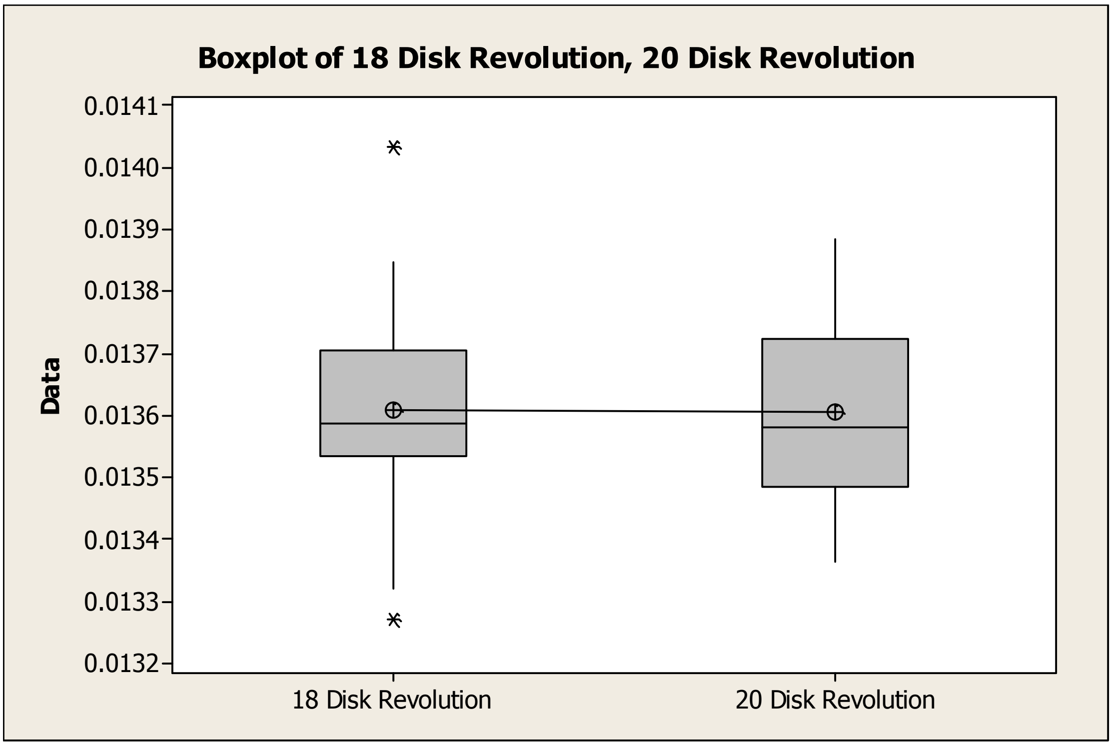
ภาพผนวกที่ 9 Variance hypothesis test ของ C_d กรณีไม่มี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับรอบที่ 19



ภาพผนวกที่ 10 Variance hypothesis test ของ C_d กรณีไม่มี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับรอบที่ 20



ภาพผนวกที่ 11 2 sample t-test hypothesis test ของ C_d กรณีไม่มี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่19



ภาพผนวกที่ 12 2 sample t-test hypothesis test ของ C_d กรณีไม่มี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่20

Two-Sample T-Test and CI: 18 Disk Revolution, 19 Disk Revolution

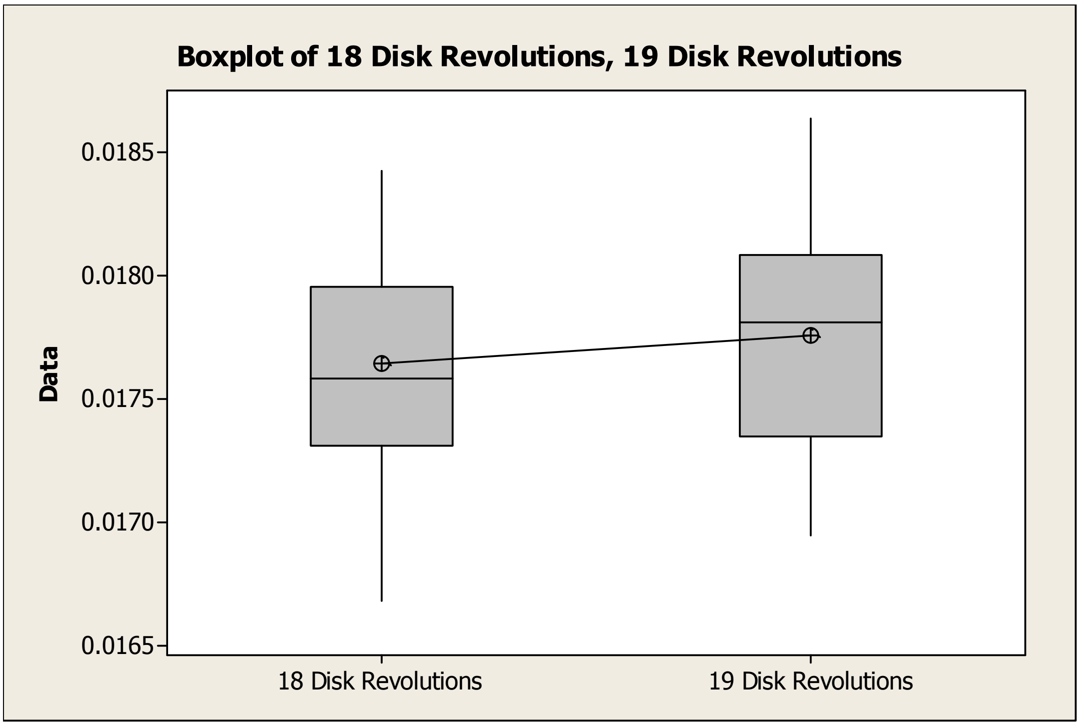
```
Two-sample T for 18 Disk Revolution vs 19 Disk Revolution

                     N      Mean     StDev   SE Mean
18 Disk Revolution  40  0.013609  0.000147  0.000023
19 Disk Revolution  40  0.013664  0.000111  0.000018


Difference = mu (18 Disk Revolution) - mu (19 Disk Revolution)
Estimate for difference:  -0.000054
95% CI for difference:  (-0.000112, 0.000004)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1.87  P-Value = 0.066  DF =
78
Both use Pooled StDev = 0.0001
```

Two-Sample T-Test and CI: 18 Disk Revolution, 20 Disk Revolution

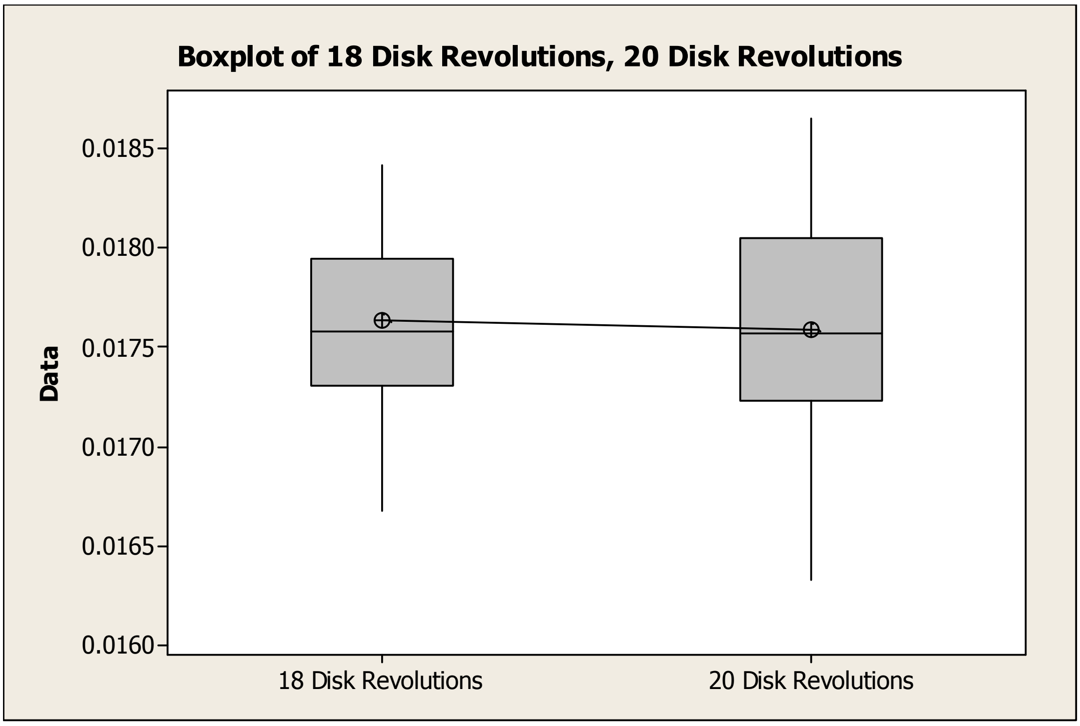
```
Two-sample T for 18 Disk Revolution vs 20 Disk Revolution

                     N      Mean     StDev   SE Mean
18 Disk Revolution  40  0.013609  0.000147  0.000023
20 Disk Revolution  40  0.013606  0.000138  0.000022


Difference = mu (18 Disk Revolution) - mu (20 Disk Revolution)
Estimate for difference:  0.000003
95% CI for difference:  (-0.000060, 0.000066)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0.10  P-Value = 0.924  DF = 78
Both use Pooled StDev = 0.0001
```

Individual Value Plot of 18 Disk Revolution, 20 Disk Revolution

Boxplot of 18 Disk Revolution, 20 Disk Revolution



ภาพผนวกที่ 13 2 sample t-test hypothesis test ของ C_d กรณีมี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่19



ภาพผนวกที่ 14 2 sample t-test hypothesis test ของ C_d กรณีมี Blocking plate ระหว่างรอบที่ 18 กับ รอบที่20

Two-Sample T-Test and CI: 18 Disk Revolutions, 19 Disk Revolutions

```
Two-sample T for 18 Disk Revolutions vs 19 Disk Revolutions

                      N      Mean     StDev   SE Mean
18 Disk Revolutions  40  0.017638  0.000439  0.000069
19 Disk Revolutions  40  0.017758  0.000429  0.000068


Difference = mu (18 Disk Revolutions) - mu (19 Disk Revolutions)
Estimate for difference:  -0.000120
95% CI for difference:  (-0.000313, 0.000073)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1.24  P-Value = 0.220  DF =
78
Both use Pooled StDev = 0.0004
```

Two-Sample T-Test and CI: 18 Disk Revolutions, 20 Disk Revolutions

```
Two-sample T for 18 Disk Revolutions vs 20 Disk Revolutions

                      N      Mean     StDev   SE Mean
18 Disk Revolutions  40  0.017638  0.000439  0.000069
20 Disk Revolutions  40  0.017586  0.000577  0.000091


Difference = mu (18 Disk Revolutions) - mu (20 Disk Revolutions)
Estimate for difference:  0.000052
95% CI for difference:  (-0.000176, 0.000280)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0.45  P-Value = 0.652  DF = 78
Both use Pooled StDev = 0.0005
```

Individual Value Plot of 18 Disk Revolutions, 20 Disk Revolutions

Boxplot of 18 Disk Revolutions, 20 Disk Revolutions

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	มงคล แก้วบำรุง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	14 พฤษภาคม 2523
สถานที่เกิด	อ.ตะกั่วทุ่ง จ.พังงา
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (เครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรประจำศูนย์ปฏิบัติการและผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท เวสเทิร์นดิจิตอล ประเทศไทย
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	ชนะเลิศผลงานสัมนาเชิงปฏิบัติการ การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในงานวิศวกรรม Workshop Seminar 2008 ครั้งที่ 2 ศูนย์บริการปรึกษาการออกแบบและวิศวกรรม สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอบรมสัมนาทางวิชาการ ณ ประเทศสิงคโปร์ โดยบริษัท เวสเทิร์นดิจิตอล ประเทศไทย