

การจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศระหว่างขั้นตอนการดูดฝุ่นละอองใน
กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

นายเอกรินทร์ จินดาพิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**SIMULATION OF AIRFLOW FOR THE PROCESS
OF PARTICLES SUCTION IN HDD
MANUFACTURING PROCESS**

Aggarin Jindaphee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechatronic
Suranaree University of Technology
Academic Year 2012**

การจำลองพฤติกรรมกรไหลของอากาศระหว่างขั้นตอนการดูดฝุ่นละอองใน
กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเจริญผล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.กิริติ สุทธิภรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เอกรินทร์ จินดาพิ : การจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศระหว่างขั้นตอนการดูดฝุ่น
ละอองในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (SIMULATION OF AIRFLOW FOR THE
PROCESS OF PARTICLES SUCTION IN HDD MANUFACTURING PROCESS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกฤษณ์, 88 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศในขั้นตอนการดูดฝุ่นละอองของเครื่องดูด
แบบอัตโนมัติตำแหน่งที่ 3 ของสายการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การศึกษาใช้การจำลองด้าน
พลศาสตร์การไหลด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ โดยเริ่มจากการจำลองพฤติกรรมการไหลของ
อากาศระหว่างการทำงานของเครื่องดูดแบบอัตโนมัติในสภาพยังไม่ปรับปรุง พบว่าความดัน
สัมพัทธ์ในห้องดูดเทียบกับความดันบรรยากาศมีค่าค่อนข้างน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดฝุ่น
มีค่าต่ำ จากนั้นได้ออกแบบรูปแบบการดูดฝุ่นโดยทำการปรับเปลี่ยนรูปร่างและสภาวะการทำงาน
ของเครื่องดูดทั้งหมด 3 แบบ โดยมุ่งเน้นที่จะเพิ่มค่าความดันสัมพัทธ์ภายในห้องดูดให้แตกต่างจาก
ความดันบรรยากาศให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง ผลการจำลองพบว่า
แบบจำลอง M1 ให้ค่าความดันสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ -0.0157 แรงปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อเทียบกับ
แบบจำลองอื่นที่ออกแบบ โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดฝุ่นได้เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์กับฝุ่น
ละอองขนาด 0.5 และ 1 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับแบบที่ยังไม่ปรับปรุง สำหรับแบบจำลองที่เหลือ
ไม่สามารถเพิ่มค่าความดันสัมพัทธ์บริเวณพื้นผิวของส่วนประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ ทำให้
ความเร็วของอากาศบริเวณพื้นผิวมีค่าที่เข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละออง
ไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

AGGARIN JINDAPHEE : SIMULATION OF AIRFLOW FOR THE
PROCESS OF PARTICLES SUCTION IN HDD MANUFACTURING
PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KEERATI SULUKSNA,
Ph.D., 88 PP.

HARD DISK DRIVE (HDD)/ COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)/
PARTICLE TRAJECTORIES/ SUCTION TOOL /SOLIDWORKS FLOW
SIMULATION

This research studies the behavior of the air flow in the process of particles suction of the Auto Vacuum 3 in the Hard Disk Drive manufacturing line using the ability of the commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) software. Starting with the simulated behavior of the air flow between the original operating conditions found that the relative pressure in the suction chamber does not quite difference to the environment pressure, effected to the particles removal efficiency, then the new vacuum system has been designed by 3 models. The objective is to increasing the different of the relative pressure to improve the particles removal efficiency. The results of the simulations found that the model M 1 gives the maximum relative pressure around -0.0157 Psi when compared to the other models with 10 percent improvement for the particles sizes 0.5 and 1 micron compared to the original model. The rest of the models unable to increase the relative pressure around the surface of components inside the Hard Disk Drive, so that the air flow velocity around the component's surface is close to zero, effected to the particles removal efficiency is not significant improvement.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ทั้งนี้ผู้ทำโครงการวิจัย ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ที่ได้ให้โอกาส ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และให้ความช่วยเหลือ อย่างดียิ่งเสมอมา ดังนี้

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ได้มอบเงินสนับสนุนในการทำโครงการวิจัย

บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด คุณ ชีรกรณ์ ตรีทิพย์บุตร หัวหน้างาน ที่ได้ให้คำแนะนำและสนับสนุนเรื่องเวลาในระหว่างทำวิจัย และบุคลากรของบริษัททุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนผู้ทำโครงการวิจัย ในการสร้างผลงานวิจัยชิ้นนี้ขึ้นมาเป็นผลสำเร็จ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้โอกาส ผู้ทำโครงการวิจัย ได้เข้ามาศึกษาหาความรู้ และได้สร้างบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ ในด้านต่างๆหลากหลายสาขาอาชีพ

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสวีรัฐผล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ ที่ได้ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ แนวทางในการดำเนินการวิจัยที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกิรติ สุกฤษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา ชี้แนะข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย และแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ ด้วยความเมตตา กรุณา เสมอมา

เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ ประสานงานและอำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้ชีวิต อบรมเลี้ยงดู สนับสนุนด้านการศึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลา จนทำให้ผู้ทำโครงการวิจัยประสบความสำเร็จได้ในวันนี้

เอกรินทร์ จินดาพิ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ	4
2.2 การเกิด Particles Contamination สะสมในตัว HDD ขณะทำงาน	4
2.3 การเกิด Particles Contamination สะสมในตัว HDD ในระหว่าง กระบวนการประกอบ	9
2.4 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล	16
2.5 สมการควบคุม.....	16
2.6 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใต้การไหลของไหล	17
2.7 สัมประสิทธิ์การดูดที่อนุภาคของแข็งอยู่อย่างกระจัดกระจาย.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 การดำเนินงานวิจัย	20
3.1 บทนำ	20
3.2 การสร้างแบบจำลองตั้งต้น โปรแกรม SolidWorks Flow Simulations	20
3.2.1 การลดความซับซ้อนของแบบจำลอง	20
3.2.2 การกำหนดขอบเขตการคำนวณ	21
3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขตั้งต้น	24
3.2.4 การกำหนดเป้าหมายของการคำนวณ	24
3.2.5 การสร้างกริดที่ใช้ในการคำนวณ	25
3.2.6 การคำนวณหาผลลัพธ์	26
3.2.7 การจำลองพฤติกรรมของฝุ่นละออง	27
3.2.8 การศึกษาแบบจำลองของการกำจัดฝุ่นละออง	28
3.3 การปรับปรุงแบบจำลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง	28
3.3.1 หลักการในการปรับปรุงแบบจำลอง	28
3.3.2 การกำหนดเงื่อนไขตั้งต้นของแต่ละแบบจำลอง	29
3.3.3 การกำหนดเป้าหมายของการคำนวณ	30
3.3.4 ข้อมูลเกี่ยวกับกริดของแต่ละแบบจำลอง	31
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	32
4.1 บทนำ	32
4.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแบบจำลองตั้งต้น	32
4.2.1 ช่วงของการพิจารณา	32
4.2.2 การกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์	32
4.2.3 การกระจายตัวของความเร็วของอากาศในห้องดูด	34
4.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของทุกแบบจำลอง	35
4.3.1 ช่วงของการพิจารณาของทุกแบบจำลอง	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 การกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ของทุกแบบจำลอง.....	37
4.3.3 ความแตกต่างของความดันบริเวณมอเตอร์	42
4.3.4 การกระจายตัวของความเร็วของอากาศในห้องดูด.....	43
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง.....	50
4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่บริเวณ Top Magnet	50
4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่บริเวณ Top Disc	51
4.4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่บริเวณ MBA.....	52
4.4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมของการกำจัดฝุ่นละออง.....	53
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุป.....	55
5.1.1 อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานของแต่ละแบบจำลอง	55
5.1.2 อิทธิพลของความแตกต่างของความดันสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น.....	55
5.1.3 อิทธิพลของการกระจายตัวของความเร็วภายในห้องดูด.....	56
5.1.4 ความสามารถในการกำจัดฝุ่นละออง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	56
5.2.1 ข้อเสนอแนะต่อการใช้โปรแกรมทางด้าน CFD ในการทำงานวิจัย	56
5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานวิจัย.....	56
5.2.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป.....	56
รายการอ้างอิง	58
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การพิสูจน์แบบจำลองก่อนทำการวิจัย	59
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	81
ประวัติผู้เขียน	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ความสามารถในการกำจัด particles ของหัวดูดแบบ Single probe ที่ระดับความสูงต่างๆ....11
2.2	ความสามารถในการกำจัด particles ของหัวดูดแบบ Castle-like probe..... 13
2.3	ความสามารถในการกำจัด particles ของหัวดูดแบบ Profile probe 15
3.1	ปริมาณของกริด จำแนกตามชนิดหลังจากการคำนวณสิ้นสุด26
3.2	รายละเอียดการกำหนดคุณสมบัติของฝุ่นละอองในแบบจำลอง.....28
3.3	แสดงการเปรียบเทียบเงื่อนไขและขอบเขตในการคำนวณของแต่ละแบบจำลอง30
3.4	แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์การเข้าสู่ของแต่ละแบบจำลอง31
3.5	แสดงการเปรียบเทียบจำนวนกริดในสภาวะเข้าสู่ของแต่ละแบบจำลอง31
ก.2.1	คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิ 30 °C.....64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	จำนวนฝุ่นละอองสะสมในขณะฮาร์ดดิสก์ทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ 5
2.2	อัตราการเพิ่มขึ้นของฝุ่นละอองในขณะฮาร์ดดิสก์ทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ 5
2.3	เปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของฝุ่นละอองที่มีชนิดของวัสดุแตกต่างกัน 6
2.4	เปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของฝุ่นละอองที่รอบความเร็วต่างๆ และผลกระทบจากอุณหภูมิการทำงาน 7
2.5	ลักษณะการหมุนวนของฝุ่นละอองสำหรับการออกแบบที่กั้นอากาศแบบเดิม 8
2.6	ลักษณะการหมุนวนของฝุ่นละอองสำหรับการออกแบบที่กั้นอากาศแบบใหม่ 8
2.7	เปรียบเทียบปริมาณของฝุ่นละอองที่ดักจับได้ของการออกแบบที่กั้นอากาศทั้ง 2 แบบ 9
2.8	ปริมาณฝุ่นละอองที่ตรวจจับได้จากเครื่องดูด AUV2 ด้วยระยะห่าง 2 mm จากผิวงาน 10
2.9	ปริมาณฝุ่นละอองที่ตรวจจับได้จากเครื่องดูด AUV2 โดยหัวดูดสัมผัสกับผิวงาน 10
2.10	Velocity Profile ของหัวดูดแบบ Single Probe ในระดับความสูงที่ต่างกัน 11
2.11	สถานะการจำลองก่อนและหลังการกำจัด Particles ของแบบจำลอง Castle-like probe กับขนาดของ Particles ที่แตกต่างกัน 12
2.12	Velocity Profile ของหัวดูดแบบ Castle-like probe 13
2.13	สถานะการจำลองก่อนและหลังการกำจัด Particles ของแบบจำลอง Profile probe 14
2.14	Velocity Profile ของหัวดูดแบบ Profile probe 15
3.1	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแบบดั้งเดิมและโมเดลที่ทำการลดความซับซ้อนแล้ว 21
3.2	ตัวอย่างของขอบเขตการคำนวณแบบภายใน 22
3.3	ตัวอย่างของขอบเขตการคำนวณแบบภายนอก 22
3.4	แสดงขอบเขตการคำนวณของแบบจำลองตั้งต้น 23
3.5	แสดงปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการคำนวณ 23
3.6	แสดงการกำหนดเงื่อนไขการคำนวณของแบบจำลองตั้งต้น 24
3.7	ชนิดของกริดในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations 25
3.8	ลักษณะของกริดในแบบจำลองตั้งต้นของเครื่อง AUV3 26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ข้อมูลการดูเข้าของตัวแปรที่สนใจในระหว่างการประมวลผล	27
3.10 แสดงลักษณะของแบบจำลอง M1	29
3.11 แสดงลักษณะของแบบจำลอง M2	29
3.12 แสดงลักษณะของแบบจำลอง M3	30
4.1 ตำแหน่งการพิจารณาทั้ง 4 ช่วง	33
4.2 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในแบบจำลอง M0	33
4.3 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทั้ง 4 ช่วง	33
4.4 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศในแบบจำลอง M0	34
4.5 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M0	34
4.6 ตำแหน่งการพิจารณาทั้ง 4 ช่วงของแบบจำลอง M0, M1 และ M3	35
4.7 ตำแหน่งการพิจารณาทั้ง 3 ช่วงของแบบจำลอง M2	36
4.8 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในช่วงที่ 1 ของทุกแบบจำลอง	36
4.9 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในช่วงที่ 2 ของทุกแบบจำลอง	37
4.10 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในช่วงที่ 3 ของทุกแบบจำลอง	38
4.11 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในช่วงที่ 4 ของทุกแบบจำลอง	38
4.12 การการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในแบบจำลอง M1	39
4.13 การการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในแบบจำลอง M2	39
4.14 การการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในแบบจำลอง M3	39
4.15 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M1	40
4.16 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M2	40
4.17 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M3	41
4.18 การกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์เฉลี่ยในทุกแบบจำลอง	42
4.19 ความแตกต่างของความดันบนผิวมอเตอร์ของทุกแบบจำลอง	43
4.20 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในช่วงที่ 1 ของทุกแบบจำลอง	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในช่วงที่ 2 ของทุกแบบจำลอง.....	44
4.22 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในช่วงที่ 3 ของทุกแบบจำลอง	45
4.23 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในช่วงที่ 4 ของทุกแบบจำลอง	46
4.24 การการกระจายตัวของความเร็วของอากาศในแบบจำลอง M1.....	46
4.25 การการกระจายตัวของความเร็วของอากาศในแบบจำลอง M2.....	47
4.26 การการกระจายตัวของความเร็วของอากาศในแบบจำลอง M3.....	47
4.27 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M1.....	47
4.28 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M2.....	48
4.29 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M3.....	48
4.30 ค่าการกระจายตัวเฉลี่ยของความเร็วของอากาศในทุกแบบจำลอง	49
4.31 ตำแหน่งการจำลองการสะสมของฝุ่นละอองในตัวฮาร์ดดิสก์ ก่อนทำการดูดด้วยเครื่อง AUV3.....	50
4.32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลองบริเวณ Top Magnet	51
4.33 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลองบริเวณ Top Disc	52
4.34 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลองบริเวณ MBA	52
4.35 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองโดยรวมจำแนกด้วยขนาดฝุ่นละออง	53
4.36 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองโดยรวมจำแนกตามพื้นที่ สะสมของฝุ่นละออง	54
ก.1.1 การไหลแบบ 2 มิติ ผ่านช่องทางที่มีการขยายตัวแบบทันทีทั้ง 2 ด้าน.....	60
ก.1.2 ขอบเขตการคำนวณแบบ 2 มิติ	61
ก.1.3 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	62
ก.1.4 แสดงผลลัพธ์การลู่เข้า.....	62
ก.1.5 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณจากโปรแกรม Flow Simulation และการ คำนวณจากสมการ	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2.1 รูปร่างและขนาดของช่องทางการไหล.....	64
ก.2.2 แสดงขอบเขตการคำนวณ.....	65
ก.2.3 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	65
ก.2.4 การสร้างกริดเพิ่มเติมบริเวณคอคอด.....	66
ก.2.5 การสร้างกริดเพิ่มเติมบริเวณมุมทางเข้า.....	66
ก.2.6 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการคำนวณ.....	67
ก.2.7 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง ความแตกต่างของความดัน และ อัตราการไหลเชิงมวล ด้วย ผลลัพธ์จาก Flow Simulation และข้อมูลจากการทดลอง.....	67
ก.3.1 แสดงทิศทางการปล่อยอนุภาคสู่การไหลแบบสม่ำเสมอ.....	69
ก.3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ.....	69
ก.3.3 ขอบเขตการคำนวณแบบ 2 มิติ.....	71
ก.3.4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	71
ก.3.5 แสดงรูปแบบของกริดที่ใช้ในการคำนวณ.....	72
ก.3.6 แสดงการลู่เข้าของเป้าหมายการคำนวณ.....	72
ก.3.7 การเคลื่อนตัวของอนุภาคทองจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations.....	73
ก.3.8 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใต้รูปแบบการไหลแบบสม่ำเสมอที่ $Re=0.1$ จากการ คำนวณด้วย Flow Simulation เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีทางด้าน Analytical.....	74
ก.3.9 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	75
ก.3.10แสดงการลู่เข้าของเป้าหมายการคำนวณ.....	76
ก.3.11การเคลื่อนตัวของอนุภาคเหล็กที่ความเร็ว V_y ที่ 1,2 และ 3 m/s จากการคำนวณด้วย โปรแกรม SolidWorks Flow Simulations.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ก.3.12 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใต้รูปแบบการไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) ที่ $Re=10e5$ จากการคำนวณด้วย Flow Simulation เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีทางด้าน Analytical.....	77
ก.3.13 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	78
ก.3.14 แสดงการดูเข้าของเป้าหมายการคำนวณ	79
ก.3.15 การเคลื่อนตัวของอนุภาคเหล็กที่ความเร็ว V_p ที่ 1.34 m/s ทำมุม 63.44 องศา กับพื้นจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations	80
ก.3.16 การเคลื่อนตัวของอนุภาคเหล็กภายใต้รูปแบบการไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) จากการคำนวณด้วย Flow Simulation เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีทางด้าน Analytical.....	80

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

HDD	=	Hard Disk Drive
HDA	=	Hard Disk Assembly
MBA	=	Motor Base Assembly
AUV	=	Auto Vacuum Machine
CSI	=	Clamp Screw Install
EDX	=	Energy Dispersive X-Ray
CFD	=	Computational Fluid Dynamics
C_d	=	สัมประสิทธิ์แรงดูด
Re	=	ตัวเลขเรย์โนลด์
P	=	แรงดัน
V	=	ความเร็ว
V_f	=	ความเร็วของของไหล
V_p	=	ความเร็วของอนุภาค
A	=	พื้นที่หน้าตัด
t	=	เวลา
ρ	=	ความหนาแน่น
μ	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
ζ_s	=	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียไฮดรอลิก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดฟ์นั้นฝุ่นละออง (Particles) ถือเป็นศัตรูที่สำคัญที่บั่นทอนประสิทธิภาพในการทำงานของฮาร์ดดิสก์เป็นอย่างมากยิ่งดั่งนั้นเราจะพบว่าบริษัทผลิตฮาร์ดดิสก์นั้นให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการลดและควบคุมปริมาณฝุ่นละอองที่จะสะสมในตัวฮาร์ดดิสก์เริ่มตั้งแต่กระบวนการออกแบบตัวฮาร์ดดิสก์ การออกแบบเครื่องจักรที่ใช้ในการประกอบ การเลือกใช้วัสดุในการผลิต หรือ กระบวนการในการผลิตล้วนแล้วแต่ให้ความสำคัญต่อการลดฝุ่นละอองเป็นสำคัญ

จากประสบการณ์ของผู้ทำวิจัยซึ่งทำงานอยู่ในบริษัทฮาร์ดดิสก์มาประมาณ 5 ปี จึงทราบว่าในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์นั้นถือเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้เกิดฝุ่นละอองสะสมในตัวฮาร์ดดิสก์ สาเหตุหลักๆก็คือในกระบวนการประกอบนั้นชิ้นส่วนต่างๆที่ใช้ในการประกอบฮาร์ดดิสก์ต้องมีการ กระทบ เสียดสี ชั๊นกันและกัน ทั้งระหว่างตัวชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ด้วยกันเองหรือระหว่างตัวชิ้นส่วนกับเครื่องจักรที่ใช้ในการประกอบชิ้นส่วนนั้นๆ ด้วยเหตุนี้ถึงแม้ว่าเราจะพยายามออกแบบหรือเลือกใช้วัสดุที่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองสะสมน้อยแค่ไหนก็ตามแต่ก็ปฏิเสธไม่ได้ว่าฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ก็ยังคงมีอยู่เสมอดังนั้นการให้ความสำคัญกับเครื่องมือที่ใช้ในการลดปริมาณฝุ่นละอองสะสมในระหว่างกระบวนการประกอบนั้นถือเป็นสิ่งสำคัญที่ไม่สามารถละเลยได้

ด้วยเหตุนี้ในไลน์การประกอบฮาร์ดดิสก์นั้นจึงต้องมีการติดตั้งเครื่องมือที่จะช่วยลดฝุ่นละอองในระหว่างขั้นตอนการประกอบอยู่หลายตำแหน่ง โดยเครื่องนี้จะใช้สูญญากาศมาทำการดูดฝุ่นละอองที่สะสมอยู่ออกไป ผู้วิจัยขอเรียกเครื่องนี้ในงานวิจัยนี้ว่า AUV (Auto Vacuum) หรือเครื่องดูดสูญญากาศแบบอัตโนมัติ ซึ่งส่วนใหญ่เครื่อง AUV นี้จะถูกติดตั้งอยู่หลังจากกระบวนการที่มีการขันสกรู เนื่องจากว่ากระบวนการการขันสกรูถือเป็นต้นกำเนิดฝุ่นละอองที่สำคัญ เครื่อง AUV นี้จะมีรูปแบบการออกแบบลักษณะของหัวดูดที่แตกต่างกันไปตามตำแหน่งของการดูดฝุ่นละอองบนตัวฮาร์ดดิสก์ มีทั้งแบบที่หัวดูดฝุ่นละอองที่ดูดเฉพาะจุดบนตำแหน่งหัวสกรูโดยตรงในแต่ละหัว หรือ แบบที่เป็นฝาครอบทั้งตัวฮาร์ดดิสก์เลย ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีผู้ใดเคยทำวิจัยของหัวดูดแบบฝาครอบเลย ซึ่งจากนี้ผู้วิจัยขอเรียกว่า AUV3 และอีกเหตุผล

นึ่งก็คือด้วยข้อมูลจากห้องแล็บของบริษัทราร์ดิสก์เองก็บ่งชี้ว่าขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ก่อนหน้าเครื่อง AUV3 นี้มีปริมาณฝุ่นละอองสะสมอยู่มากกว่าบริเวณอื่นอย่างชัดเจนนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองของเครื่อง AUV3 ให้ดียิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่าการพัฒนาความสามารถของเครื่องดูดฝุ่นละอองนี้จะเป็นเรื่องที่มีความยากลำบากเนื่องจาก การที่ผู้ที่รับผิดชอบในการออกแบบเครื่องนี้นั้นประจำอยู่ที่ประเทศไทย และอย่างที่เรารวบรวมกันว่าประเทศไทยนั้นเป็นศูนย์กลางของการประกอบ ไม่ใช่ศูนย์กลางของการออกแบบทำให้ผู้ที่ทำการออกแบบมีข้อจำกัดในการทดลองและทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของฝุ่นละอองในขณะที่เครื่องทำงานเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ไลน์การผลิตนั้นมีการเดินเครื่องผลิตอยู่ตลอดและต้นทุนที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานต้นแบบนั้นทำให้เกิดข้อจำกัดในการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดฝุ่นละออง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะช่วยลดข้อจำกัดของความมุ่งหวังที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของการกำจัดฝุ่นละอองที่สะสมในตัวฮาร์ดดิสก์ออกไป โดยการใช้ความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations เข้ามาช่วยในการสร้างแบบจำลองเพื่อที่จะศึกษาถึงพฤติกรรม การไหลของอากาศและฝุ่นละอองในขณะที่เครื่องดูดฝุ่นละอองทำงานและนำความเข้าใจนั้นมาเป็นแนวคิดในการออกแบบเครื่องดูดฝุ่นละอองให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองให้ดียิ่งขึ้น โดยที่ยังสามารถช่วยลดความยุ่งยากในเรื่องเวลาและต้นทุนการผลิตได้เช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักคือ การพัฒนาประสิทธิภาพของการกำจัดฝุ่นละอองของเครื่อง AUV3 โดยการใช้ความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ซึ่งเป็นโปรแกรมการวิเคราะห์ทางด้าน Finite Element เข้ามาช่วย เพื่อลดข้อจำกัดทางด้านเวลาและต้นทุนทางการผลิต โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

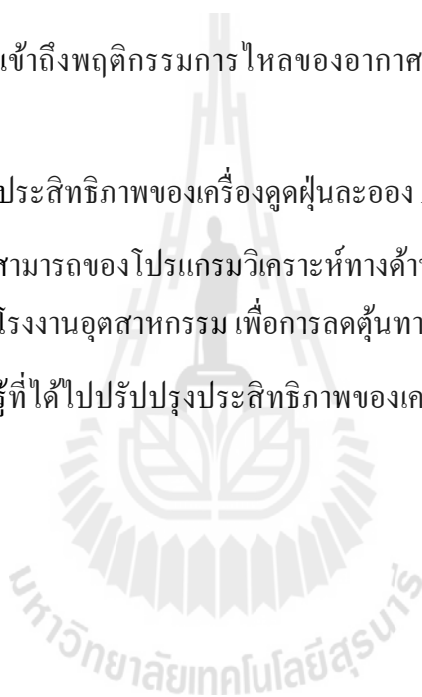
- 1) เพื่อทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศของเครื่องดูดฝุ่นละออง AUV3 ในสภาวะปัจจุบัน
- 2) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องดูดฝุ่นละออง AUV3 ให้ดียิ่งขึ้น
- 3) เพื่อลดต้นทุนและข้อจำกัดในการพัฒนาความสามารถของเครื่องดูดฝุ่นละออง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) การใช้ความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศและประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองในสถานะปัจจุบันของเครื่องดูดฝุ่นละออง AUV3 ของผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ขนาด 2.5 นิ้ว (2) การใช้ความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations เพื่อช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการไหลของอากาศและความสามารถในการกำจัดฝุ่นละออง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศในหัวดูดฝุ่นละออง AUV3 ขณะเครื่องทำงาน
- 2) สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องดูดฝุ่นละออง AUV3 ให้ดียิ่งขึ้น
- 3) สามารถนำความสามารถของโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้าน Finite Element ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อการลดต้นทุนทางด้านเวลาและการเงิน
- 4) สามารถนำความรู้ที่ได้ไปปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดฝุ่นละอองชนิดอื่นๆ มากยิ่งขึ้น



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

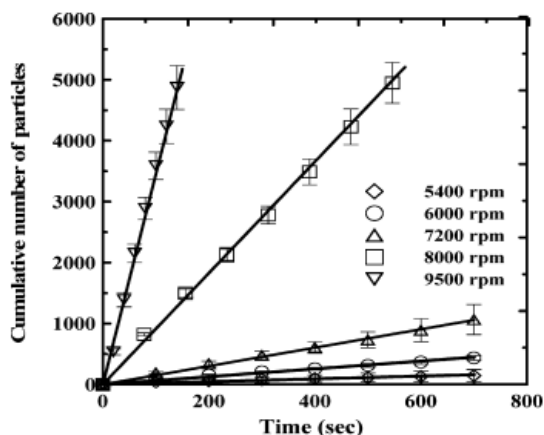
2.1 บทนำ

ฝุ่นละอองและสิ่งแปลกปลอม (Particles & Contamination) เป็นปัญหาที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมขั้นสูง เช่น Hard Disk Drive (HDD) ที่ทำให้เกิดการล้มเหลว (failure) ชนิดต่างๆต่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความหนาแน่นของเพิ่มขึ้นตามความต้องการของตลาดทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีขนาดเล็กลงและ Slider บนหัวจะอ่านจะบินที่ความสูงที่ลดลงเหลือเพียงไม่กี่สิบนานาโนเมตร ซึ่งทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีความเสี่ยงต่อการเกิด Failure เนื่องจาก Contamination ของอนุภาคมากเป็นทวีคูณ สาเหตุของการเกิด Particles Contamination สะสมในตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น อาจแบ่งมาจากสาเหตุ 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ 1) เกิดจากการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์เองขณะทำงาน 2) เกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบฮาร์ดดิสก์มีฝุ่นละอองตกค้างมาตั้งแต่เริ่มต้น 3) เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างกระบวนการประกอบ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยได้ทำการศึกษาถึงสาเหตุและความสัมพันธ์ต่อการทำให้เกิดฝุ่นละอองสะสมในตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในแต่ละสาเหตุเอาไว้พอสมควร

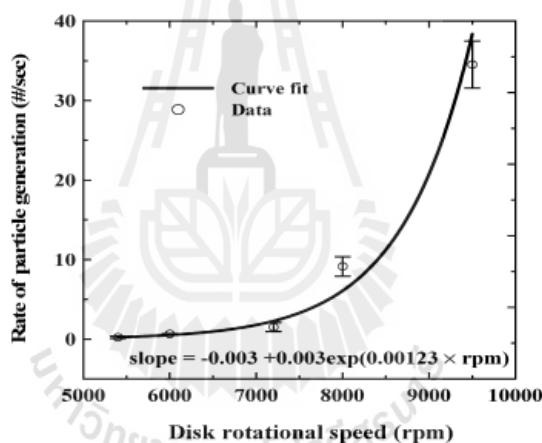
2.2 การเกิด Particles Contamination สะสมในตัว HDD ขณะทำงาน

การเคลื่อนไหวของตัวอุปกรณ์ภายในตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เองนั้นก็ก็เป็นสาเหตุสำคัญที่มีอาจหลีกเลี่ยงได้ต่อการเกิดฝุ่นละอองสะสมและกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานหรืออายุการใช้งานของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเฉพาะในปัจจุบันที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานที่ความเร็วรอบที่สูงขึ้นยิ่งมีโอกาสที่จะทำให้เกิดฝุ่นละอองสะสมในตัวฮาร์ดดิสก์มากขึ้นเป็นเงาตามตัว

D. Y. Lee, J. Hwang and G. N. Bae. (2004), ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างฝุ่นละอองขึ้นมาในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆกัน ซึ่ง ใช้วิธีติดตั้ง Sampling probe ในบริเวณที่ใกล้กับหัวอ่านทำงาน และทำการวัดจำนวนฝุ่นละอองด้วย Particle Counter หลังจากนั้นทำการปรับค่าความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่รอบ 5,400, 6,000, 7,200, 8,000 และ 9,500 รอบ ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ออกมาสรุปได้ว่า การเพิ่มความเร็วในการหมุนของฮาร์ดดิสก์มีผลกระทบโดยตรงที่ทำให้เกิดการสร้างฝุ่นละอองมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเร็วในการหมุนเกิน 8,000 รอบ จะทำให้เกิดการสร้างฝุ่นละอองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 จำนวนฝุ่นละอองสะสมในขณะฮาร์ดดิสก์ทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ

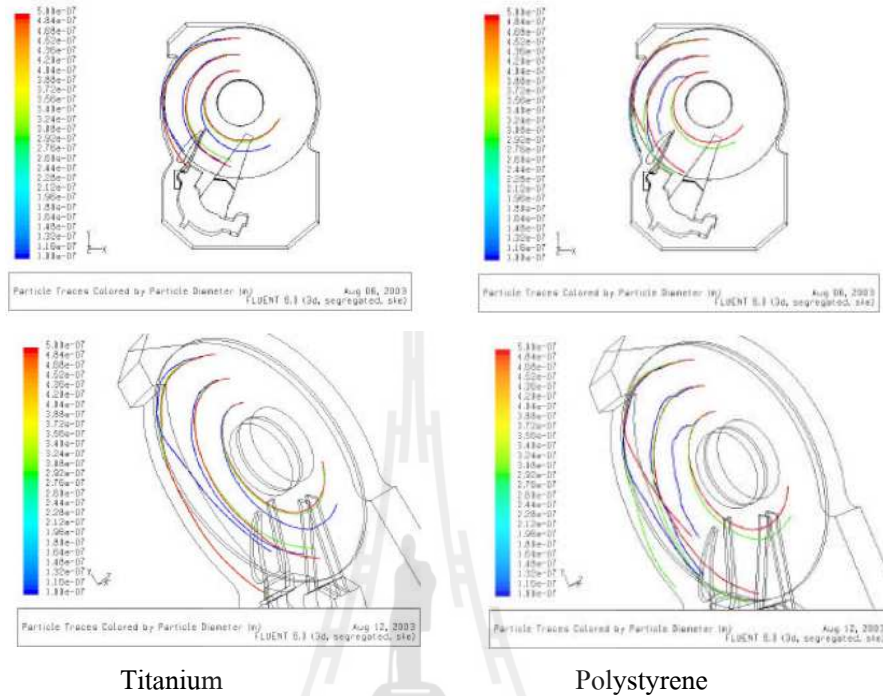


รูปที่ 2.2 อัตราการเพิ่มขึ้นของฝุ่นละอองในขณะฮาร์ดดิสก์ทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ

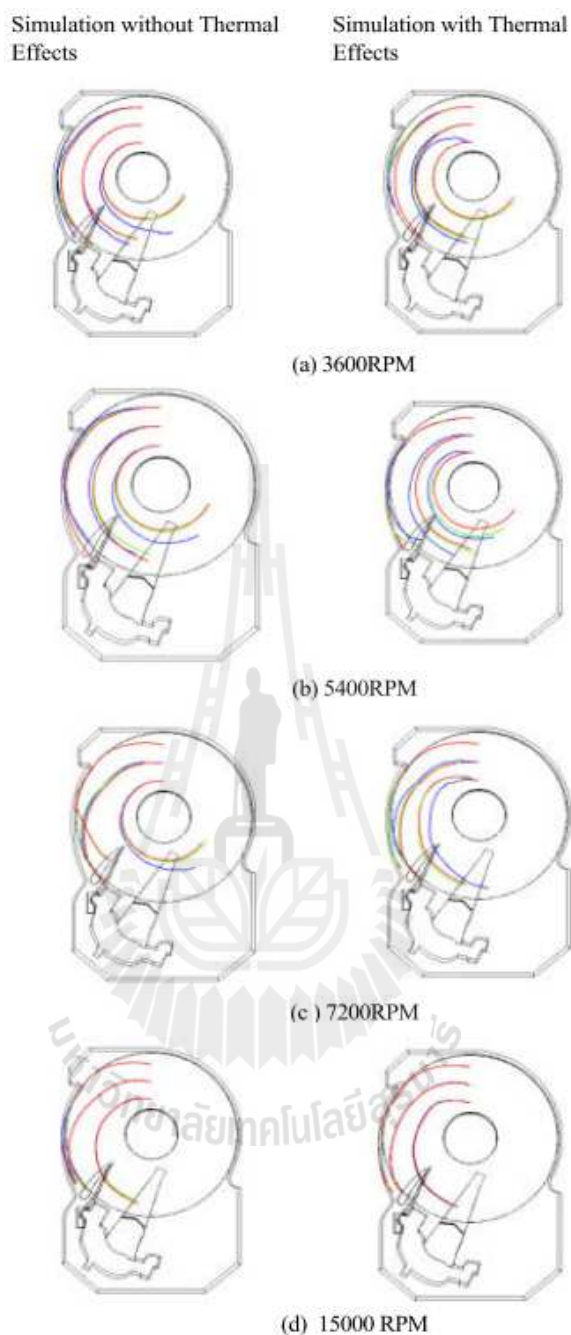
ขณะเดียวกัน หากฝุ่นละอองที่สะสมในตัวฮาร์ดดิสก์นั้น มีขนาดหรือวัสดุที่แตกต่างกัน หรือแม้แต่อุณหภูมิการทำงานแตกต่างกัน ก็ยังผลให้พฤติกรรมเคลื่อนที่ในขณะฮาร์ดดิสก์ทำงานแตกต่างกันไปด้วย

H. Song, M. Damodaran and Quock Y. Ng. (2003), ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองที่มีขนาดและวัสดุที่แตกต่างกันในขณะฮาร์ดดิสก์ทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆในขณะเดียวกันก็ยังสามารถพิจารณาถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่ในขณะที่มีตัวแปรเกี่ยวกับอุณหภูมิในขณะฮาร์ดดิสก์ทำงานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งผลของแบบจำลองแสดงให้เห็นเห็นว่า ที่ความเร็ว

รอบการหมุน, ขนาดของฝุ่นละออง, ชนิดของฝุ่นละออง, อุณหภูมิภายในฮาร์ดดิสก์ ที่แตกต่างกัน มีผลทำให้พฤติกรรมเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบพฤติกรรมเคลื่อนตัวของฝุ่นละอองที่มีชนิดของวัสดุแตกต่างกัน

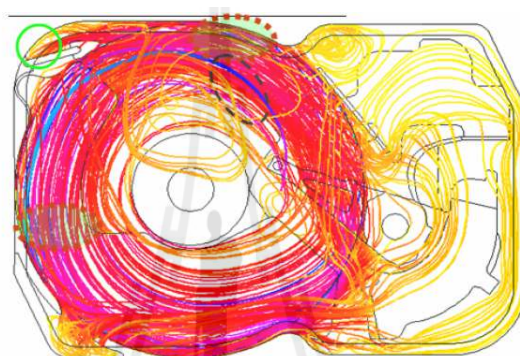


รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของฟลู่นะเองที่รอบความเร็วต่างๆ และผลกระทบจากอุณหภูมิการทำงาน

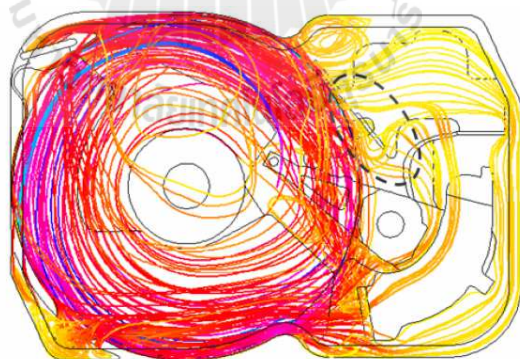
ซึ่งเราต้องยอมรับว่าการจะทำให้ไม่มีฟลู่นะเองเกิดขึ้นเลยในขณะที่ฮาร์ดดิสก์มีการทำงานนั้นคงจะเป็นเรื่องที่เป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาถึงการออกแบบชิ้นส่วนในตัวฮาร์ดดิสก์เพิ่มเติม

เพื่อที่จะมาช่วยควบคุมพฤติกรรมกรไหลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดักจับฝุ่นละอองของตัวแผ่นกรองในตัวฮาร์ดดิสก์

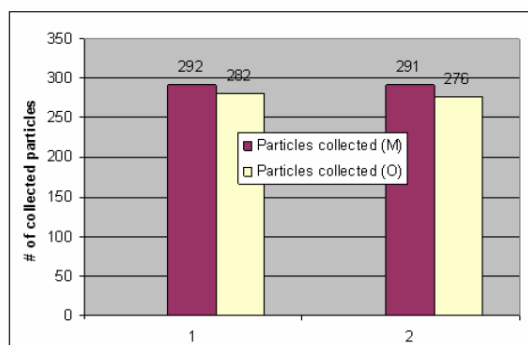
H. Kwon and H. J. Lee. (2006), ทำการศึกษาถึงลักษณะการหมุนวนของอากาศในฮาร์ดดิสก์ซึ่งมีการออกแบบที่กั้นอากาศ (Air Dams) ที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธีสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อช่วยในการเข้าใจพฤติกรรมของการหมุนวนของอากาศ ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงรูปแบบที่กั้นอากาศ สามารถปรับปรุงลักษณะการหมุนวนของอากาศให้มีลักษณะที่แคบลง ยังผลทำให้ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นละอองของตัวกรองดีขึ้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะการหมุนวนของฝุ่นละอองสำหรับการออกแบบที่กั้นอากาศแบบเดิม



รูปที่ 2.6 ลักษณะการหมุนวนของฝุ่นละอองสำหรับการออกแบบที่กั้นอากาศแบบใหม่



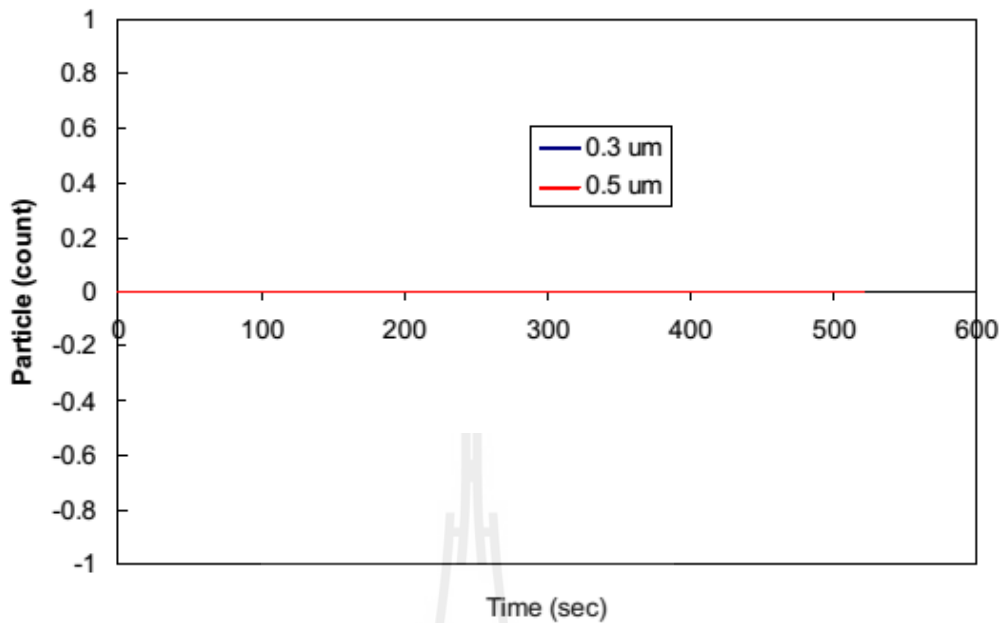
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบปริมาณของฝุ่นละอองที่ดักจับได้ของการออกแบบที่กั้นอากาศทั้ง 2 แบบ

2.3 การเกิด Particles contamination สะสมในตัว HDD ในระหว่างกระบวนการประกอบ

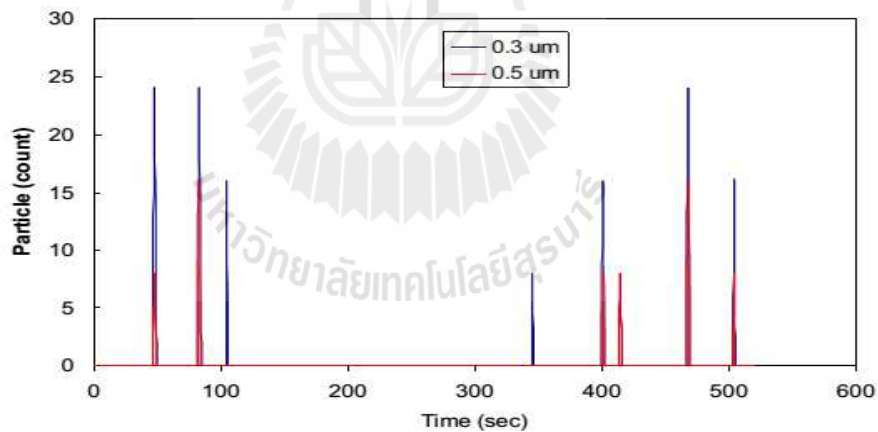
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า นักวิจัยส่วนใหญ่พยายามศึกษาและเข้าใจถึงลักษณะพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศและฝุ่นละอองในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ทำงาน โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ได้นำวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการสร้างแบบจำลอง เพื่อให้สามารถมองเห็นถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามนอกจากฝุ่นละอองสะสมที่เกิดระหว่างการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เองแล้ว ในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk Assembly, HDA) ก็เป็นอีกหนึ่งกระบวนการสำคัญที่ทำให้เกิดฝุ่นละอองขึ้น และหากสายการผลิตไม่มีเครื่องมือที่ดีพอในการกำจัดฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการประกอบนี้ ก็จะมีผลให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เช่นกัน

อนูรัตน์ วิษณุสรอรธ (2554) ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่สถานีดูด AUV2 กับ HDD ขนาด 2.5 นิ้ว หลังจากขั้นตอนการขันสกรูที่สถานีผลิต CSI (Clamp Screw Install) และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของสภาวะการทำงานปัจจุบันมีค่าที่ต่ำมาก โดยการใช้ความสามารถของเครื่อง Scanning Electron Microscopy/ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM/EDX) ทำการตรวจสอบทั้งก่อนและหลังจากการขันสกรู และก่อนและหลังการเข้าเครื่อง AUV2 พบว่าฝุ่นละอองส่วนใหญ่เป็นวัสดุ Stainless Steel ประมาณ 90% ซึ่งส่วนใหญ่น่าจะเกิดจากกระบวนการขันสกรูที่เป็นตัวสร้างขึ้นมา ซึ่งเขายังแนะนำว่า ระยะห่างของหัวดูดในปัจจุบันที่สูงประมาณ 2 mm จากผิวของของสกรู น่าจะมีความห่างเกินไป และยังแนะนำให้เพิ่มอัตราการไหลของเครื่องดูดอีกด้วย



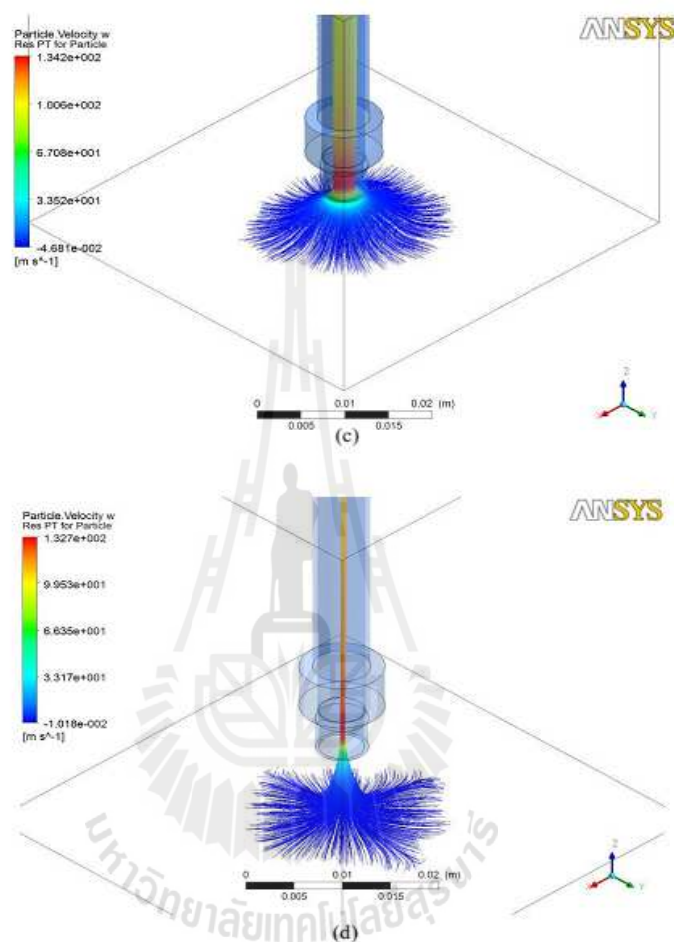
รูปที่ 2.8 ปริมาณฝุ่นละอองที่ตรวจจับได้จากเครื่องดูด AUV2 ด้วยระยะห่าง 2 mm จากผิวงาน



รูปที่ 2.9 ปริมาณฝุ่นละอองที่ตรวจจับได้จากเครื่องดูด AUV2 โดยหัวดูดสัมผัสกับผิวงาน

ณรงค์วิทย์ ยิ้มศิริวัฒนะ (2554) ได้ทำการศึกษาถึงถึงประสิทธิภาพของหัวดูดที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ แบบ Single probe, Castle-like probe และแบบ Profile probe กับ HDD ขนาด 2.5 นิ้ว ที่ตำแหน่งการดูดบริเวณ Clamp Screws และสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางด้าน CFD ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณพบว่า ความสูงของหัวดูดที่แตกต่างกันและ

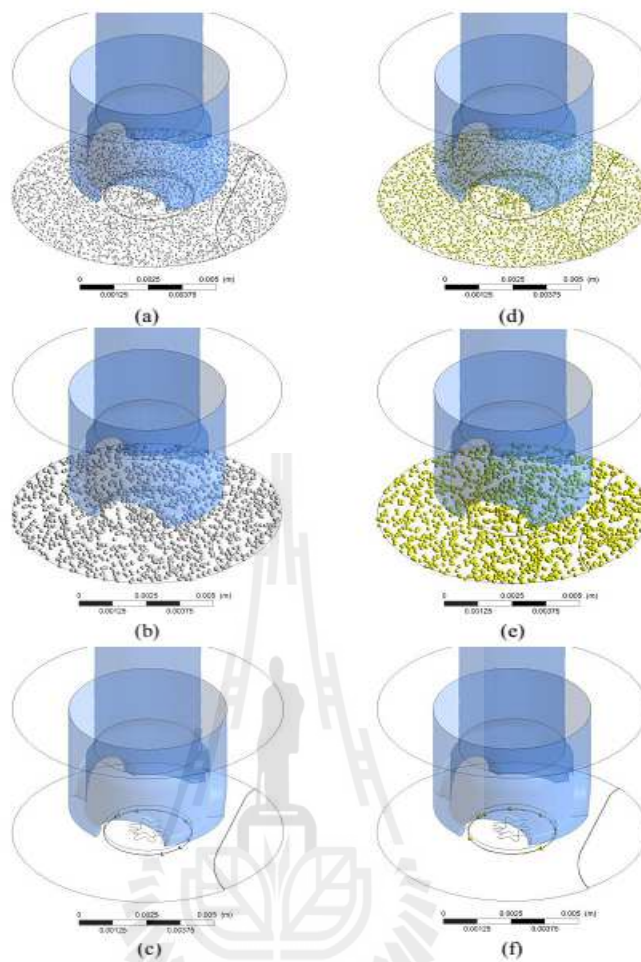
ลักษณะหัวดูดที่แตกต่างกันส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศและประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่แตกต่างกัน



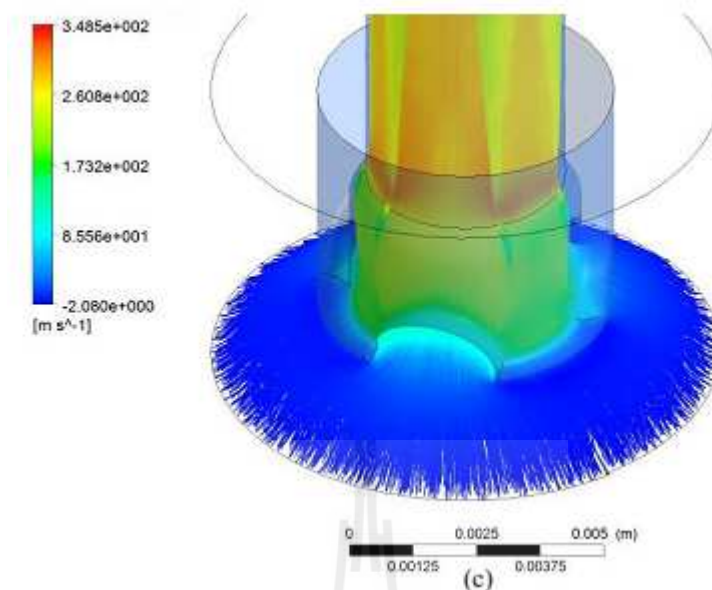
รูปที่ 2.10 Velocity Profile ของหัวดูดแบบ Single Probe ในระดับความสูงที่ต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการกำจัด particles ของหัวดูดแบบ Single probe ที่ระดับความสูงต่างๆ

Operating Height	Total Particles	Removed Particles	Percentage
1 mm	10,000	1,224	12.24
2 mm	10,000	3,095	30.95
5 mm	10,000	1,656	16.56
10 mm	10,000	1,369	13.69



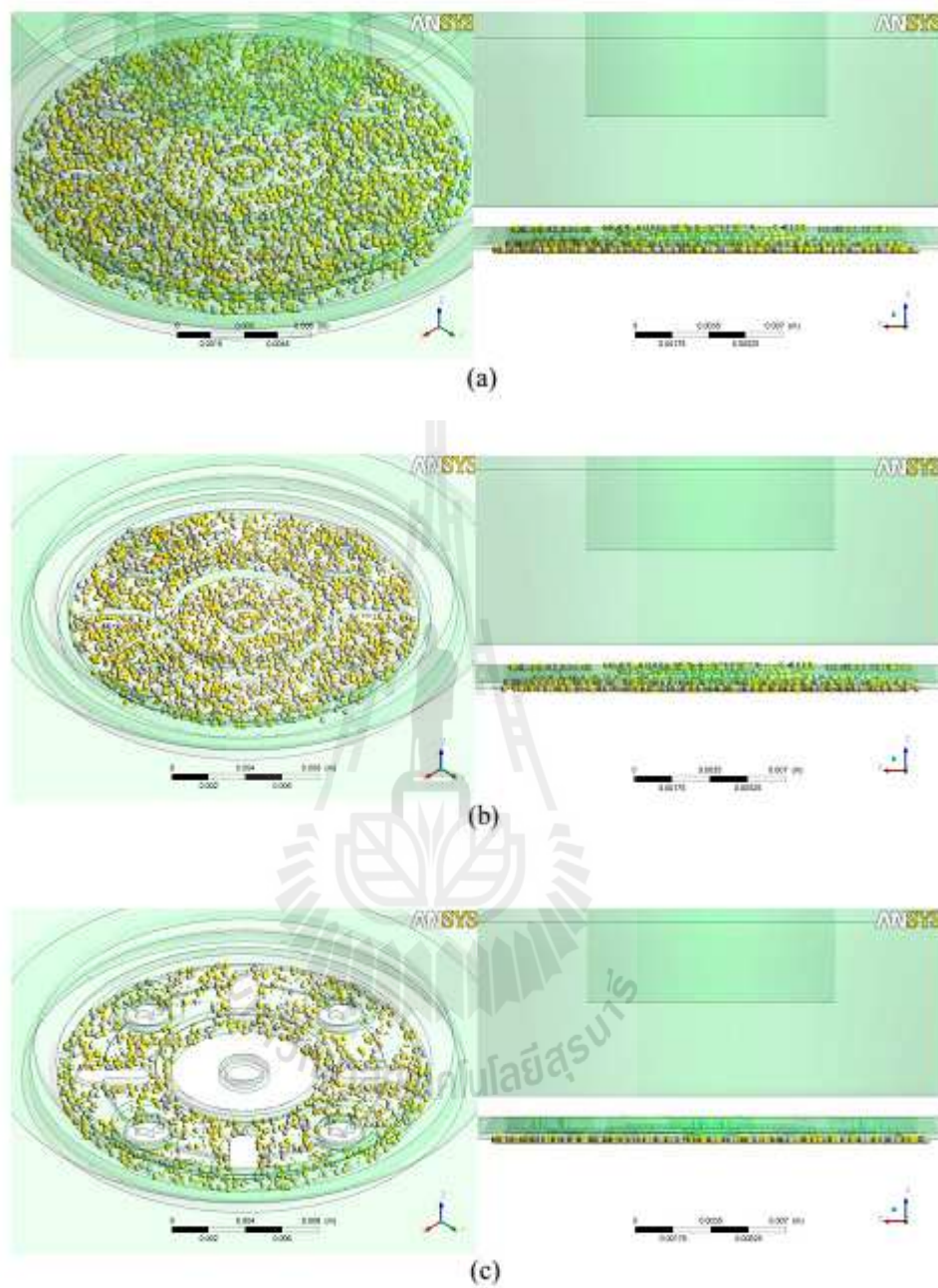
รูปที่ 2.11 สภาวะการจำลองก่อนและหลังการกำจัด Particles ของแบบจำลอง Castle-like probe กับขนาดของ Particles ที่แตกต่างกัน



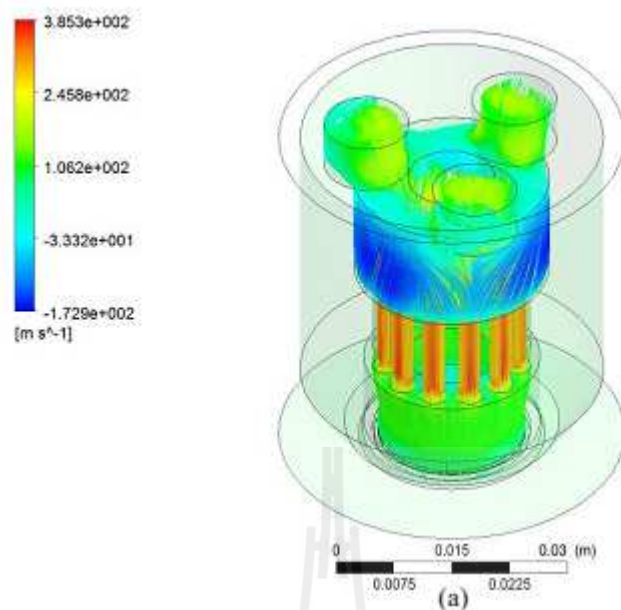
รูปที่ 2.12 Velocity Profile ของหัวดูดแบบ Castle-like probe

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการกำจัด particles ของหัวดูดแบบ Castle-like probe

Type of Particles	Total Particles	Removed Particles	Percentage
Overall	10,000	9,951	99.51
● 0.2 micron	7,000	6,966	99.51
● 0.5 micron	3,000	2,985	99.50
Aluminum	5,000	4,977	99.54
● 0.2 micron	3,500	3,484	99.54
● 0.5 micron	1,500	1,493	99.53
Stainless Steel	5,000	4,974	99.48
● 0.2 micron	3,500	3,482	99.49
● 0.5 micron	1,500	1,492	99.47



รูปที่ 2.13 สภาวะการจำลองก่อนและหลังการกำจัด Particles ของแบบจำลอง Profile probe



รูปที่ 2.14 Velocity Profile ของหัววัดแบบ Profile probe

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการกำจัด particles ของหัววัดแบบ Profile probe

Type of Particles	Total Particles	Removed Particles	Percentage
Overall	10,000	6,421	64.21
● 0.2 micron	7,000	4,493	64.19
● 0.5 micron	3,000	1,928	64.27
Aluminum	5,000	3,201	64.02
● 0.2 micron	3,500	2,246	64.17
● 0.5 micron	1,500	955	63.67
Stainless Steel	5,000	3,220	64.40
● 0.2 micron	3,500	2,247	64.20
● 0.5 micron	1,500	973	64.87

2.4 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD)

กลศาสตร์ของไหล คือวิชาที่ศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของของไหลและแรงที่เกิดขึ้น (ของไหลหมายถึงของเหลวและก๊าซ) กลศาสตร์ของไหลอาจแบ่งได้เป็นสองส่วนคือสถิตยศาสตร์ของไหล ซึ่งศึกษาของไหลในขณะที่ยุคนิ่ง และพลศาสตร์ของไหลที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหล ศาสตร์นี้นับเป็นส่วนหนึ่งของกลศาสตร์ภาวะต่อเนื่องซึ่งศึกษาแบบจำลองของวัตถุโดยไม่สนใจข้อมูลในระดับอะตอม กลศาสตร์ของไหลเป็นหนึ่งในสาขาการวิจัยที่ได้รับความสนใจและมีปรากฏการณ์มากมายที่ยังไม่ถูกค้นพบ หรือถูกค้นพบเพียงบางส่วน กลศาสตร์ของไหลประกอบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน บางครั้งวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดคือการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ วิทยาการสมัยใหม่เกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหลคือ Computational Fluid Dynamics (CFD) คือเครื่องมือที่ถูกใช้ในการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของไหลโดยเฉพาะ การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เป็นศาสตร์ของการทำนายการไหลของของไหล ความร้อนและ การถ่ายโอนมวล, ปฏิกิริยาเคมี และปรากฏการณ์ ที่เกี่ยวข้อง โดยวิธีการแก้ ชุดสมการตัวเลข ทางคณิตศาสตร์ ของ กฏอนุรักษ์มวล กฏอนุรักษ์โมเมนตัม และกฏอนุรักษ์พลังงาน

2.5 สมการควบคุม (Governing Equations)

2.5.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.1)$$

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

U คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

2.5.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2.2)$$

2.5.3 สมการพลังงาน (Energy Equation)

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (2.3)$$

เมื่อ h_{tot} แทนผลรวมเอนทัลปี, ซึ่งสัมพันธ์กับเอนทัลปีสทิตย $h(T, p)$ โดยที่:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2 \quad (2.4)$$

λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)

S_M คือ ค่าแหล่งกำเนิดโมเมนตัม ($\text{kg/m}^2\text{t}^2$)

S_E คือ ค่าแหล่งกำเนิดพลังงาน (W/m^3)

เทอม $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ แทนงานเนื่องจากความเค้นที่เกิดจากความหนืดหรือเรียกว่างานเนื่องจากความหนืด

เทอม $U \cdot S_M$ แทนงานเนื่องจากโมเมนตัมภายนอกแต่ว่าจะไม่ถูกนำมาคิด

2.6 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใต้การไหลของ ๆ ไหล

ในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations นั้นจะทำการคำนวณการเคลื่อนตัวของอนุภาคได้หลังจากทำการคำนวณในส่วนของ ๆ ไหลเรียบร้อยแล้ว ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะคงตัว หรือสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มวลของอนุภาคและอัตราการไหลเชิงปริมาตรนั้นมีปริมาณที่น้อยกว่าของ ๆ ไหล ดังนั้น อิทธิพลของการเคลื่อนที่และอุณหภูมิ ของอนุภาคนั้นจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถพิจารณาได้จากสมการที่

$$m \frac{dV_p}{dt} = - \frac{\rho_f (V_f - V_p) \cdot |V_f - V_p|}{2} C_d A + F_g \quad (2.5)$$

เมื่อ	m	คือ มวลของอนุภาค
	t	คือ เวลา
	V_p	และ V_f คือ ความเร็วของอนุภาค และ ของไหล ตามลำดับ
	ρ	คือ ความหนาแน่นของไหล,
	μ	คือ สัมประสิทธิ์แรงคืดของอนุภาค
	g	คือ แรงเนื่องจากแรงคืดของโลก

อนุภาคจะถูกพิจารณาว่า ไม่มีการหมุน และมีมวลที่คงตัว ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงคืดของอนุภาค จะสามารถหาได้จาก สมการของ Henderson's semi-empirical ที่สภาวะความเร็วต่ำมากๆ ของอนุภาค การเคลื่อนตัวของอนุภาคจะขึ้นกับของไหล ซึ่งทำให้ Mach number ของความเร็วสัมพัทธ์ มีค่าเข้าใกล้ 0 ซึ่งจะทำให้ค่า C_d มีค่าดังนี้

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4.12}{1 + 0.03 \cdot Re + 0.48 \sqrt{Re}} + 0.38 \quad (2.6)$$

เมื่อ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) หาได้จาก

$$Re = \frac{\rho_f |V_f - V_p| d}{\mu} \quad (2.7)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และ μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ของ ํไหล

2.7 สัมประสิทธิ์การลุดที่อนุภาคของแข็งอยู่อย่างกระจัดกระจาย

ที่ค่าตัวเลข Reynolds ต่ำๆ สัมประสิทธิ์การลุดสำหรับการไหลรอบอนุภาคทรงกลมสามารถคำนวณได้จาก :

$$C_D = \frac{24}{Re}, Re \ll 1 \quad (2.8)$$

สำหรับค่า Reynolds ที่มากขึ้นที่ผลของแรงเฉื่อยเอาชนะผลของความหนืดได้นั้น สัมประสิทธิ์การลุดจะเป็นอิสระจากค่าตัวเลข Reynolds ดังสมการ:

$$C_D = 0.44, 1000 \leq Re \leq 2 \times 10^4 \quad (2.9)$$

ในช่วงเปลี่ยนผ่านความหนืดและความเฉื่อย, $0.1 < Re < 1000$ สำหรับอนุภาคทรงกลม ความหนืดและความเฉื่อยจะมีความสำคัญทั้งคู่ นั่นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลุดเป็นฟังก์ชันของคอนจูเกตของตัวเลข Reynolds ซึ่งต้องทำการหาจากการทดลอง

ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการให้รายละเอียดเอาไว้แล้วสำหรับอนุภาคทรงกลม ซึ่งเขียนได้ว่า

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (2.10)$$

CFX ทำการปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ว่า

$$C_D = \max \left(\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), 0.44 \right) \quad (2.11)$$

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

จากการที่ผู้วิจัยมีความมุ่งหวังที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องดูดฝุ่นละออง AUV3 ให้ดียิ่งขึ้น พร้อมๆ ไปด้วยกับการหลีกเลี่ยงข้อจำกัดในส่วนของเวลาและต้นทุนการผลิต งานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องใช้วิธีที่สามารถลดข้อจำกัดข้างต้นให้ได้มากที่สุด ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่าปัจจุบันนี้ความสามารถของโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้าน CFD มีความสามารถที่สูงมากและในขณะเดียวกันจุดประสงค์ของการผลิตซอฟต์แวร์ชนิดนี้ออกมาก็เพื่อตอบโจทย์ข้อจำกัดของวงการอุตสาหกรรมโดยตรง คือ การลดต้นทุนทางด้านเวลาและการเงิน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ (1) การใช้ความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศและประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองในสภาวะปัจจุบันของเครื่องดูดฝุ่นละออง AUV3 ของผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ขนาด 2.5 นิ้ว (2) การใช้ความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations เพื่อช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการไหลของอากาศและความสามารถในการกำจัดฝุ่นละออง

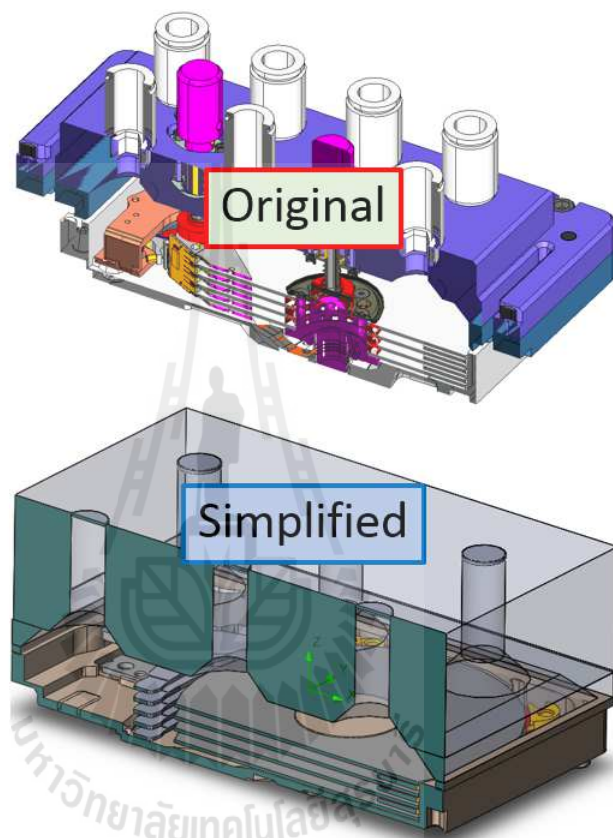
3.2 การสร้างแบบจำลองตั้งต้นในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations

การทำกรวิจัยในขั้นตอนนี้ก็เพื่อที่จะเพิ่มระดับความเข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศของเครื่องดูดฝุ่นละออง AUV3 ในสภาวะการทำงานในปัจจุบัน โดยการใช้ความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ความรู้ที่ได้จากการวิจัยในหัวข้อนี้จะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองอื่นๆต่อไป

3.2.1 การลดความซับซ้อนของแบบจำลอง (Model's Simplifications)

มีความจำเป็น เป็นอย่างยิ่งทั้งในแง่ของการลดทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์และความแม่นยำของผลลัพธ์ เนื่องจากว่าทั้งสองส่วนส่งผลกระทบซึ่งกันและกัน หากแบบจำลองมีรูปร่างที่มีความซับซ้อนจะส่งผลให้การสร้างกริดมีความยากมากขึ้นในการที่จะทำให้กริดสามารถครอบคลุมถึงรายละเอียดเล็กๆน้อยๆ ได้อย่างทั่วถึง และถ้าหากจำนวนกริดมีไม่มากพอ จะส่งผลให้ผลลัพธ์ของการคำนวณมีค่าที่ผิดพลาดที่สูงขึ้น ในขณะเดียวกัน

หากต้องการที่จะเพิ่มปริมาณกริดให้มากขึ้นก็จะส่งผลให้โปรแกรมใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์มากจนเกินไป ดังนั้น การลดความซับซ้อนของแบบจำลองจะช่วยให้เราสร้างปริมาณของกริดให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม และไม่ทำให้ผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนอีกด้วย การลดความซับซ้อนของแบบจำลองตั้งต้นนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



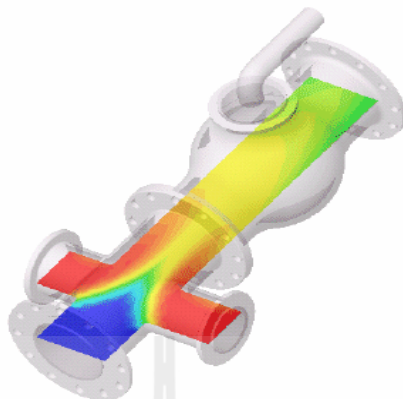
รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแบบดั้งเดิมและโมเดลที่ทำการลดความซับซ้อนแล้ว

3.2.2 การกำหนดขอบเขตการคำนวณ (Define Computational Domain)

ในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations นั้นสามารถพิจารณากำหนดได้ 2 วิธี คือ

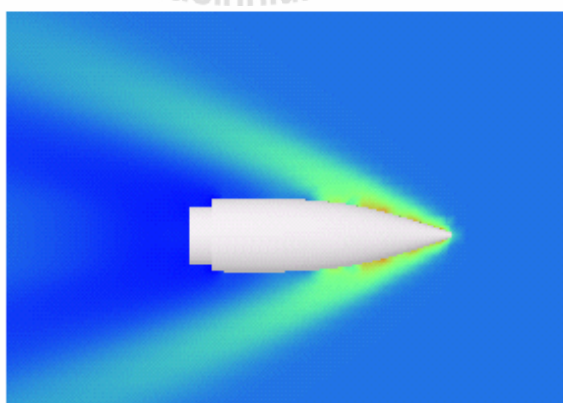
- การกำหนดให้เป็นการคำนวณแบบภายใน (Internal) จะใช้เมื่อวิเคราะห์เมื่อของเหลวอยู่ภายในรูปร่างที่ปิดสนิท ของเหลวมีไหลเข้าจากทางเข้า (Inlet) และ

ไหลออกที่ทางออก (outlet) ที่แน่นอน ดังนั้นปริมาตรภายในรูปทรงปิดจะถูกพิจารณาเป็นของไหลในระหว่างการคำนวณ



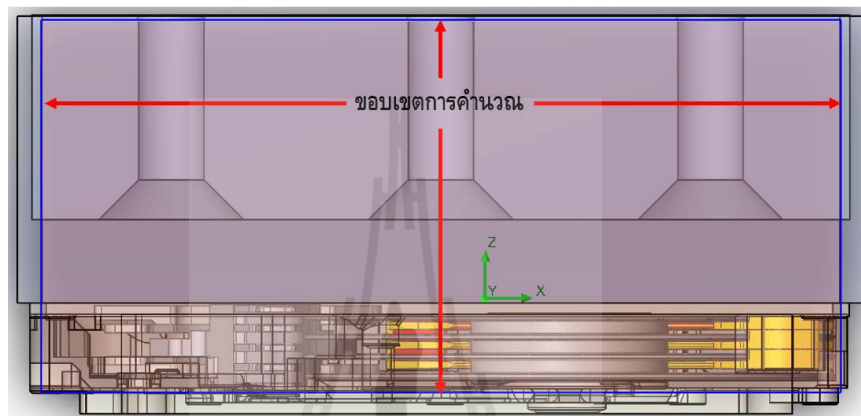
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของขอบเขตการคำนวณแบบภายใน

- การกำหนดให้คำนวณแบบภายนอก (External) จะใช้วิเคราะห์เมื่อวัตถุถูกล้อมรอบไปด้วยของเหลว และไม่สามารถระบุการไหลเข้า และไหลออกของๆเหลวได้ ตัวอย่างที่ใช้การกำหนดขอบเขตการคำนวณแบบภายนอก เช่น การวิเคราะห์ของไหลล้อมรอบเครื่องบิน การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกระสุนในอากาศ การวิเคราะห์ของไหลล้อมรอบรถยนต์ หรือ การวิเคราะห์ของไหลประทะสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างของขอบเขตการคำนวณแบบภายนอก

สำหรับการวิเคราะห์การทำงานของเครื่อง AUV3 นั้นการสร้างขอบเขตการคำนวณให้อยู่ในรูปแบบของการวิเคราะห์ภายในนั้นมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากเราสามารถระบุถึงตำแหน่งและทิศทางการเข้าและออกของอากาศได้อย่างชัดเจน ขอบเขตการคำนวณของแบบจำลองการทำงานของเครื่อง AUV3 นี้คือบริเวณรอบสี่น้ำเงิน ซึ่งได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ซึ่งขอบเขตการคำนวณนี้มีปริมาณของอากาศอยู่ที่ 0.10996 ลิตร โดยประมาณ



รูปที่ 3.4 แสดงขอบเขตการคำนวณของแบบจำลองตั้งต้น

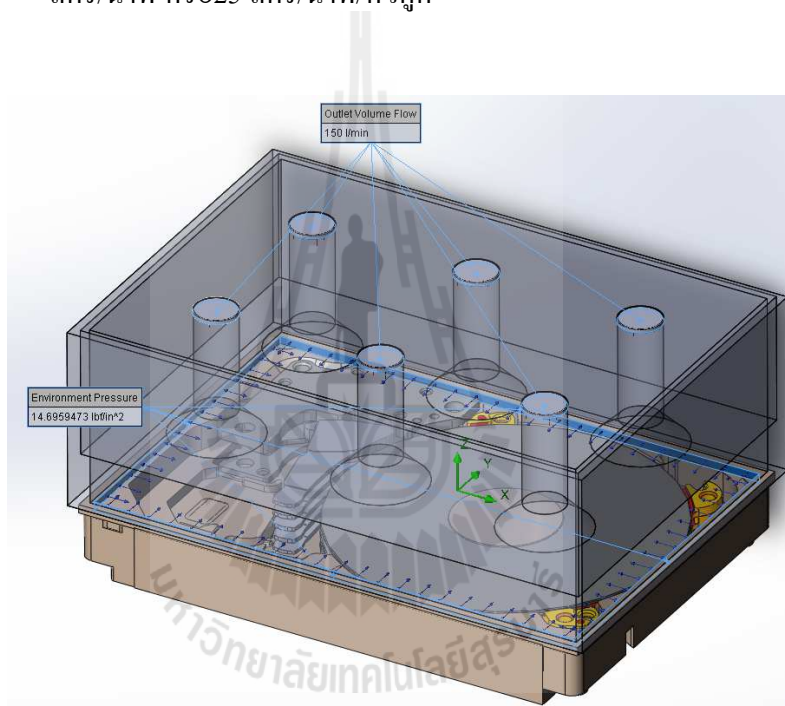


รูปที่ 3.5 แสดงปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการคำนวณ (สีฟ้า)

3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขตั้งต้น (Define Boundary Conditions)

ก็คือการระบุค่าแบบจำลองที่จะทำการวิเคราะห์นั้น มีเงื่อนไขการทำงานเช่นไรบ้าง สำหรับการกำหนดเงื่อนไขให้กับแบบจำลองนี้ได้ถูกระบุไว้ใน 2 จุดซึ่งเป็นข้อมูลที่เรารับคือ

- การระบุให้อากาศในสภาวะบรรยากาศ ที่ความดัน 14.69 Psi และอุณหภูมิ 20 °C สามารถไหลเข้ามาที่ช่องว่างทั้งสองด้านระหว่างตัว Base ของฮาร์ดดิสก์ กับ fixture ของเครื่อง AUV3
- การระบุอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ต่อร่วมทางออกของชุดหัวดูด ไร่ที่ 150 ลิตร/นาที่ หรือ 25 ลิตร/นาที่/หัวดูด



รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดเงื่อนไขการคำนวณของแบบจำลองตั้งต้น

3.2.4 การกำหนดเป้าหมายการคำนวณ (Goals)

นั่นก็คือ การระบุถึงเป้าหมายของตัวแปรทางด้านฟิสิกส์ที่เหมาะสม เช่น อัตราการไหล ความดัน ความเร็ว อุณหภูมิ แรง หรือ โมเมนต์ ให้กับแบบจำลองในจุดที่เราสนใจจะเฝ้าสังเกตการณ์การลู่เข้า การกำหนดการลู่เข้าของตัวแปรนี้ในบางครั้งเราสามารถประยุกต์เพื่อนำมาใช้สังเกตการณ์การเปลี่ยนจากสภาวะไม่คงตัวไปสู่สภาวะคงตัวได้อีกด้วย โดยไม่ต้องกำหนดว่าจะต้องใช้เพื่อสิ้นสุดการคำนวณก็ได้

สำหรับแบบจำลองตั้งต้นของเครื่อง AUV3 นี้ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดเป้าหมายการคำนวณไว้ 2 จุด คือ 1) อัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้า และ 2) ความดันสถิตที่ท่อทางออกทั้ง 6 ท่อ

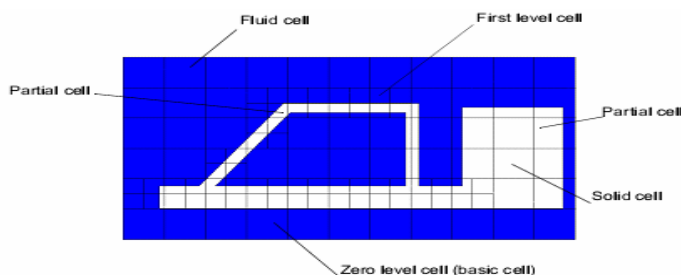
3.2.5 การสร้างกริดที่ใช้ในการคำนวณ (Meshing)

นี้มีความสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์และการบริหารทรัพยากรของคอมพิวเตอร์เป็นอย่างมาก ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.1 แล้วว่า หากเราสร้างกริดให้มีความละเอียดไม่มากพอในบริเวณที่มีความซับซ้อนหรือบริเวณที่มีความเปลี่ยนแปลงสูง ก็จะทำให้ผลลัพธ์ไม่มีความน่าเชื่อถือ ในขณะที่เดียวกันหากสร้างกริดที่มีปริมาณมากเกินไปจนความจำเป็นก็จะเป็นการสิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณและทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช่เหตุ

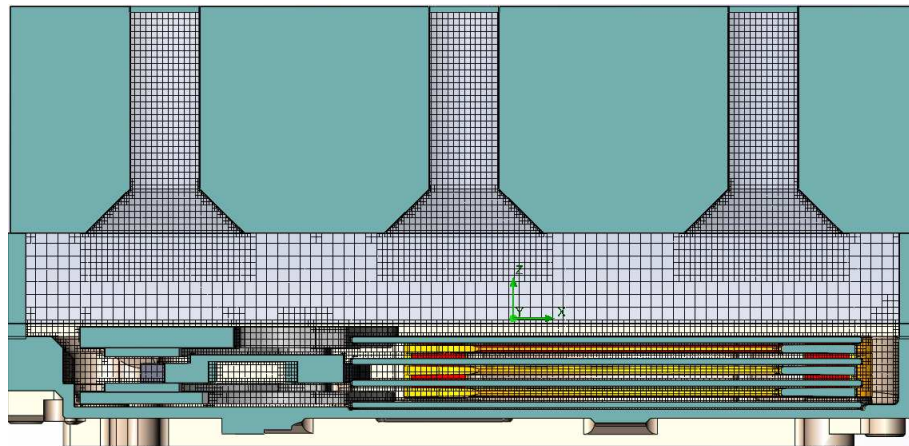
กริดในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations นี้จะถูกสร้างขึ้นภายใต้รูปร่างที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมทั้งหมดทุกบริเวณในขอบเขตการคำนวณ ดังนั้นจึงส่งผลให้เราสามารถจำแนกชนิดของ mesh ที่จะเกิดขึ้นได้ 3 ประเภท ดังรูปที่ 3.7 ดังนี้

- Fluid Cell คือ cell ที่อยู่ในพื้นที่ของๆไหลทั้งหมด
- Solid Cell คือ cell ที่อยู่ในพื้นที่ของๆแข็งทั้งหมด (ไม่ถูกนำมาคำนวณ)
- Partial Cell คือ cell ที่อยู่ที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสของๆแข็งและของไหล

สำหรับแบบจำลองตั้งต้นของ AUV3 นี้ ผู้วิจัยได้ใช้อีกหนึ่งความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations คือการปรับความละเอียดระหว่างการคำนวณ ซึ่งโปรแกรมจะทำการแบ่ง cell ให้มีขนาดเล็กลงอีกในบริเวณที่พฤติกรรมของๆไหลมีการเปลี่ยนแปลงสูง และรวม cell เข้าด้วยกันในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงต่ำ ผู้วิจัยได้ปรับระดับความละเอียดของ cell ไปเรื่อยๆจนเป้าหมาย (goals) ที่สนใจไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญ จึงได้หยุดการคำนวณ ซึ่งผลปรากฏว่าท้ายที่สุดแล้วจำนวนของ mesh ในแต่ละชนิดมีปริมาณดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.7 ชนิดของกริดในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations



รูปที่ 3.8 ลักษณะของกริดในแบบจำลองตั้งต้นของเครื่อง AUV3

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของกริด จำแนกตามชนิดหลังจากการคำนวณสิ้นสุด

ชนิดของกริด	จำนวน
Fluid cell	347545
Partial cell	497490

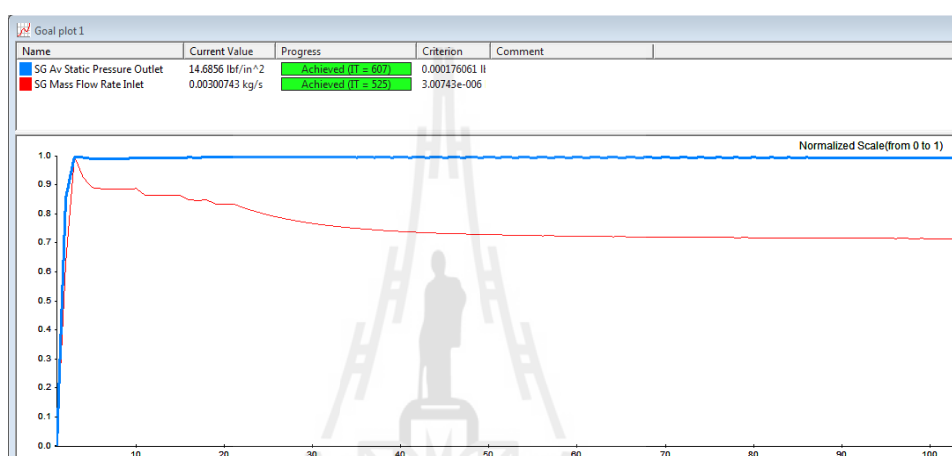
3.2.6 การคำนวณหาผลลัพธ์ (Solving)

ของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations นั้นสามารถกำหนดเงื่อนไขในการสิ้นสุดการคำนวณได้ในหลายรูปแบบ อย่างเช่น การระบุระยะเวลาในการทำงานจริง(Physical time) การระบุจำนวนรอบของการคำนวณ (Iteration) การระบุระดับของความละเอียดของกริดหรือ Mesh Refinement level (ในกรณีที่เปิดการใช้งานการปรับความละเอียดของกริดขณะทำการคำนวณ) หรือ การระบุการลู่เข้าของตัวแปรทางด้านฟิสิกส์(Convergence) เช่น อัตราการไหล ความดัน ความเร็ว อุณหภูมิ แรง หรือ โมเมนต์ เป็นต้น การกำหนดการลู่เข้าของตัวแปรนี้ในบางครั้งเราสามารถประยุกต์เพื่อนำมาใช้สังเกตการณ์การเปลี่ยนจากสภาวะไม่คงตัวไปสู่สภาวะคงตัวได้อีกด้วย

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.5 ว่า สำหรับแบบจำลองตั้งต้นของเครื่อง AUV3 นี้ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้การปรับความละเอียดของกริด (Mesh Refinement level) ให้มีความเหมาะสมระหว่างการคำนวณ ควบคู่ไปกับการเฝ้าสังเกตสภาวะลู่เข้าของตัวแปรทางฟิสิกส์ที่สนใจ เพื่อให้แน่ใจว่า การเปลี่ยนแปลงระดับความละเอียดของกริดนี้จะไม่ส่งผลอย่างมีนัยยะสำคัญต่อตัว

แปรที่เฝ้าสังเกตทั้ง 2 ตัวนั่นก็คือ 1) อัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้า และ 2) ความดันสถิตที่ท่อทางออกทั้ง 6 ท่อ อีกต่อไปแล้ว

หลังจากที่การคำนวณสิ้นสุดลง เราจึงทราบว่า สภาวะคงตัวของอัตราไหลเชิงมวลที่ทางเข้า และสภาวะคงตัวของความดันสถิตที่ทางออก ของการทำงานของเครื่อง AUV3 จะเกิดประมาณช่วงเวลาที 0.03 วินาที โดยที่ อัตราไหลเชิงมวลของอากาศที่ทางเข้านั้นอยู่ที่ประมาณ 0.003 kg/s และความดันสถิตที่ขาออกนั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 14.69 psi ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ข้อมูลการคู่เข้าของตัวแปรที่สนใจในระหว่างการประมวลผล

3.2.7 การจำลองพฤติกรรมของฝุ่นละออง (Particles Study)

ในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations นั้นบรรจุความสามารถในการทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กจากอิทธิพลของของไหลได้ หลังจากทำการคำนวณผลลัพธ์ในส่วนต่างๆ ไหลเรียบร้อยแล้ว เราจึงทำการสร้างเงื่อนไขเกี่ยวกับการศึกษาฝุ่นละอองได้ โดยเริ่มจาก

- ทำการกำหนดคุณสมบัติของฝุ่นละออง เช่น ชนิดของวัสดุ ขนาด ความเร็วเริ่มต้น บริเวณที่ฝุ่นละอองสะสมอยู่ อุณหภูมิ สำหรับคุณสมบัติของฝุ่นละอองที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเครื่อง AUV3 นี้ได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 3.2
- ทำการกำหนดคุณสมบัติการกระทบของอนุภาคกับผนัง

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการกำหนดคุณสมบัติของฝุ่นละอองในแบบจำลอง

ตำแหน่งการสะสม ของฝุ่นละออง	ขนาดของฝุ่น ละออง (μ)	ชนิดของฝุ่น ละออง	สัมประสิทธิ์การ สะท้อน	เวลาในการ ดูด (วินาที)
<ul style="list-style-type: none"> • Top Magnet • Top Disc • MBA 	0.5, 1.0 and 5	Stainless Steel	0.3	2

3.2.8 การศึกษาแบบจำลองของการกำจัดฝุ่นละออง

จากการประมวลผลพฤติกรรมของฝุ่นละอองจากอิทธิพลการไหลของอากาศระหว่างการทำงานของเครื่อง AUV3 แล้ว เราพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองโดยรวมจากแบบจำลองตั้งต้นนี้อยู่ที่ประมาณ 35 % โดยที่บริเวณ MBA เป็นบริเวณที่ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองน้อยที่สุด และฝุ่นละอองขนาด 5 ไมครอนเป็นขนาดที่มีฝุ่นละอองตกค้างมากที่สุดในทุกตำแหน่ง

3.3 การปรับปรุงแบบจำลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง

การทำการวิจัยในหัวข้อนี้มีความมุ่งหวังที่จะนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมจากแบบจำลองตั้งต้น (M0) มาปรับปรุงเพื่อให้ประสิทธิภาพของการกำจัดฝุ่นละอองมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เราจะทราบดีว่าการใช้โปรแกรมทางด้าน CFD เพื่อช่วยในการออกแบบนั้นมีข้อจำกัดที่น้อยกว่าในหลายๆด้าน แต่ผู้วิจัยก็ได้ละเอียดถึงข้อจำกัดจริงเมื่อถูกนำไปใช้งาน ด้วยเหตุนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความจำเป็นที่จะต้องคงสภาวะการทำงานให้ใกล้เคียงกับทรัพยากรที่ไลน์การผลิตมีให้ ให้ได้มากที่สุด อย่างเช่น อัตราการไหลของอากาศที่ทางออกซึ่งมีข้อจำกัดในการเพิ่มในทางปฏิบัติ สภาวะสุญญากาศภายในห้องดูดที่ต้องคำนึงถึง ความเสี่ยงที่จะเกิดการรั่วไหลของน้ำมันหล่อลื่นของตัวมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น ดังนั้นแบบจำลองที่มีการปรับปรุงนั้น ยังจำเป็นต้องคงคุณสมบัติเหล่านี้เอาไว้

3.3.1 หลักการในการปรับปรุงแบบจำลอง

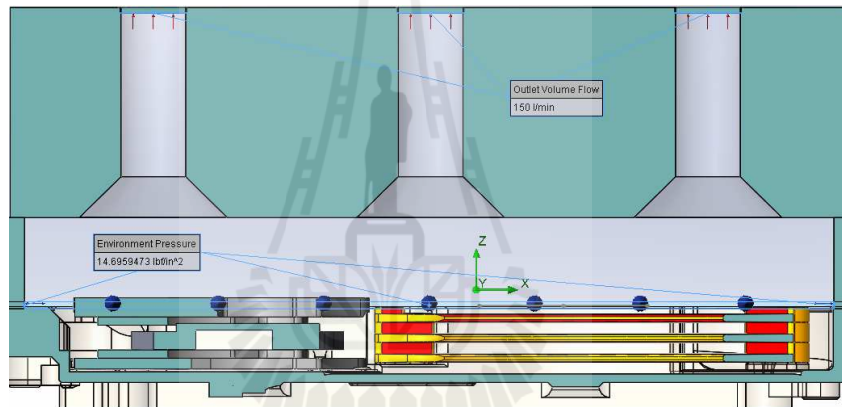
นั้น โดยหลักๆแล้วได้ถูกออกแบบมาโดยมุ่งเน้นที่จะปรับปรุงพฤติกรรมของอากาศให้ขึ้นไปตามเป้าหมายดังต่อไปนี้

- เพื่อเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศในห้องดูดให้มากขึ้น

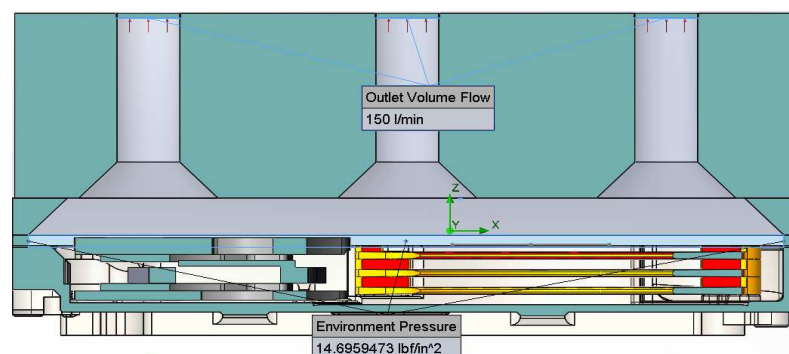
- ปรับปรุงการกระจายความเร็วของอากาศให้มีความแตกต่างลดลง (Uniformity Distribution)
- ต้องไม่ทำให้ความแตกต่างของความดันบริเวณแกนกลางถึงผิวของมอเตอร์มีค่าเกินกว่า 1 in-H₂O (1.87 mmHg) เนื่องจากจะมีผลทำให้น้ำมันในแกนแบร์ริง (Fluid Dynamic Bearing) เกิดการรั่วไหล

3.3.2 การกำหนดเงื่อนไขตั้งต้นของแต่ละแบบจำลอง

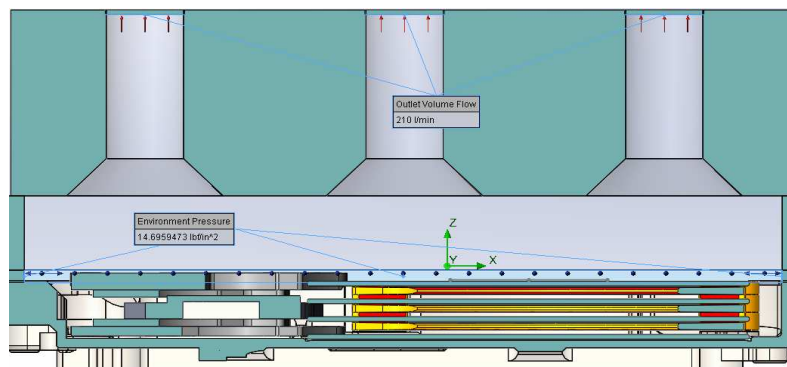
จากเป้าหมายที่ผู้วิจัยได้กำหนดขึ้นมา ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองออกมา 3 รูปแบบ ภายใต้เป้าหมายเหล่านั้น ลักษณะของแต่ละแบบจำลอง และการกำหนดเงื่อนไขตั้งต้นของแต่ละแบบจำลอง ได้ถูกแสดงเอาไว้ดัง รูปที่ 3.10 ถึง 3.12 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของแบบจำลอง M1



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของแบบจำลอง M2



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของแบบจำลอง M3

ตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบเงื่อนไขและขอบเขตในการคำนวณของแต่ละแบบจำลอง

ตัวแปร	โมเดล M0	โมเดล M1	โมเดล M2	โมเดล M3
ความสูงของทางเข้าของอากาศ	1.42 mm	0.7 mm	1.42 mm	1.42 mm
รูปร่างของห้องดูด	ทรงสี่เหลี่ยม	ทรงสี่เหลี่ยม	ทรงสี่เหลี่ยมเพิ่มมุมตัด 45 องศา และลดความสูงลง 50 %	ทรงสี่เหลี่ยม
ความสูงของห้องดูด	10 mm	10 mm	5 mm	10 mm
ขนาดของท่อดูด	8 mm	8 mm	8 mm	10 mm
จำนวนของท่อดูด	6	6	6	6
อัตราการไหลทางออก/ท่อ	25 ลิตร/นาທີ	25 ลิตร/นาທີ	25 ลิตร/นาທີ	35 ลิตร/นาທີ
อัตราการไหลทางออกรวม	150 ลิตร/นาທີ	150 ลิตร/นาທີ	150 ลิตร/นาທີ	210 ลิตร/นาທີ

3.3.3 การกำหนดเป้าหมายของการคำนวณ

ได้กำหนดให้โปรแกรมทำการหยุดคำนวณก็ต่อเมื่อ เข้าเงื่อนไขอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้ หากมีการเข้าเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งก่อนโปรแกรมก็จะทำการหยุดการคำนวณ

- เวลาการทำงานครบ 2 วินาที
- ตัวแปรสังเกตการณ์มีค่าลู่เข้า โดย แต่ละรอบการคำนวณต้องมี % ความแตกต่างไม่เกิน 1%

ซึ่งหลังจากโปรแกรมทำการคำนวณจนเสร็จสิ้น ปรากฏว่า สภาวะที่ตัวแปรสังเกตการณ์มีการเข้าเงื่อนไขก่อนในทุกๆแบบจำลอง คือ มีการลู่เข้า ทำให้โปรแกรมทำการหยุด

คำนวณก่อนที่ครบกำหนดเวลา 2 วินาที ในทุกแบบจำลอง ค่าผลลัพธ์สุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการคำนวณ ได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์การลู่เข้าของแต่ละแบบจำลอง

ตัวแปรสังเกตการณ์	ตำแหน่ง	โมเดล M0	โมเดล M1	โมเดล M2	โมเดล M3
อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)	ทางเข้า	0.0030	0.0030	0.0030	0.0042
ความดันสถิตย์	ทางออก	14.6936	14.6765	14.6863	14.6850

3.3.4 ข้อมูลเกี่ยวกับกริดของแต่ละแบบจำลอง

นั้นมีความแตกต่างกันไปในแต่ละ แบบจำลอง เนื่องจากผู้วิจัยได้เลือกวิธีการปรับความละเอียดของกริดในระหว่างการคำนวณควบคู่ ไปกับการเฟ้าสังเกตตัวแปรลู่เข้าจากความแตกต่างของรูปทรง หรือ แม้แต่สภาวะทำงานที่แตกต่างกันก็ส่งผลให้จำนวนของกริดที่ใช้มีความแตกต่างกัน หลักจากที่โปรแกรมทำการคำนวณเสร็จสิ้น ผลลัพธ์ของจำนวนของกริดในแต่ละแบบจำลองได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนกริดในสภาวะลู่เข้าของแต่ละแบบจำลอง

ชนิดของกริด	โมเดล M0	โมเดล M1	โมเดล M2	โมเดล M3
Fluid cell	347,545	472,007	446,312	382,018
Partial cell	497,490	579,430	573,004	511,425

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลลัพธ์จากการคำนวณ โดยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations โดยจะเริ่มต้นจากการอธิบายเกี่ยวกับผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ตั้งต้น โดยจะมีการแสดงให้เห็นถึง พฤติกรรมการไหลของอากาศ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ของตัวแปรที่สำคัญ อาทิ เช่น พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศ การกระจายตัวของความดันในห้องดูด หรือ การกระจายความเร็ว ของอากาศภายในห้องดูด หลังจากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแบบจำลองที่มีการสร้างขึ้นใหม่ และมีการเปรียบเทียบกันของทุกแบบจำลองในแต่ละตัวแปร สุดท้ายจะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดฝุ่นละอองที่สะสมอยู่ในตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

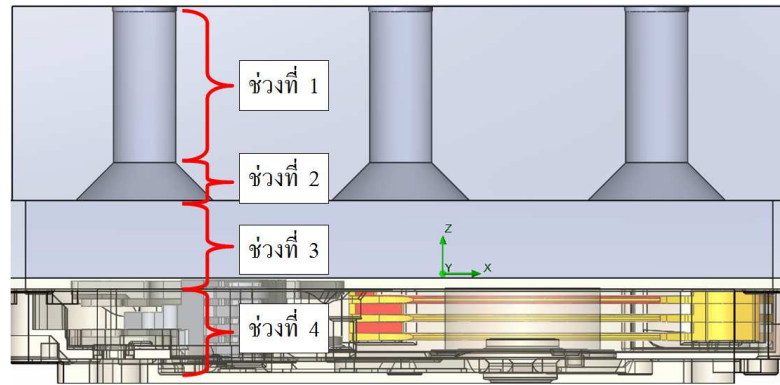
4.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแบบจำลองที่ตั้งต้น (M0)

4.2.1 ช่วงของการพิจารณา

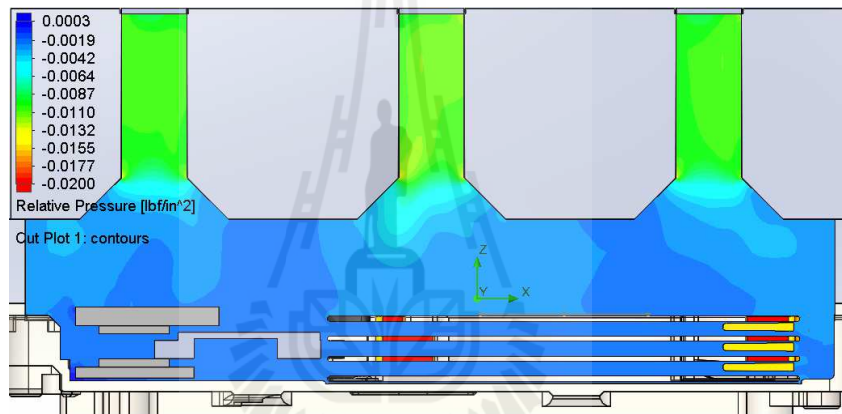
จากรูปที่ 4.1 จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงช่วงการพิจารณาที่แบ่งตามระดับความสูง โดยเราจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 ช่วง

4.2.2 การกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure)

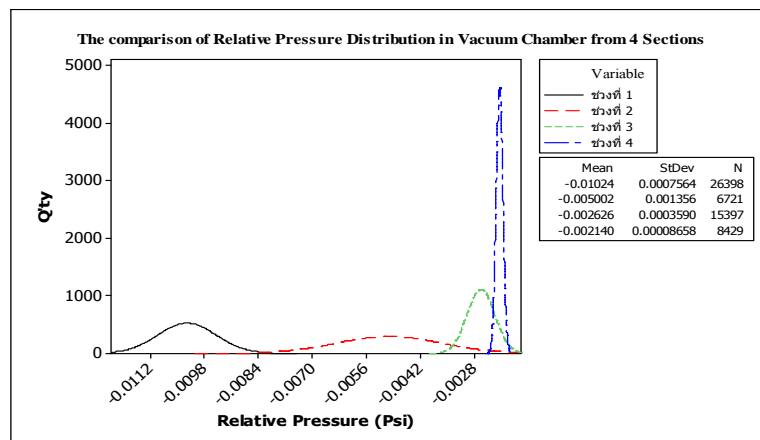
จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าความดันสัมพัทธ์ในบริเวณช่วงที่ 3 และ 4 นั้นมีค่าความแตกต่างจากความดันบรรยากาศค่อนข้างน้อย ประมาณ -0.002 Psi ในขณะที่ช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าความดันสัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณ -0.01 และ -0.005 Psi ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ใน โดยแผนภาพฮิสโตแกรมของทุกช่วง เราจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในช่วงที่ 3 และ 4 นั้นมีค่ามัชฌิม(Mean) อยู่ที่ประมาณ -0.002 Psi เทียบกับ ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการพิจารณาทั้ง 4 ช่วง



รูปที่ 4.2 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในแบบจำลอง M0

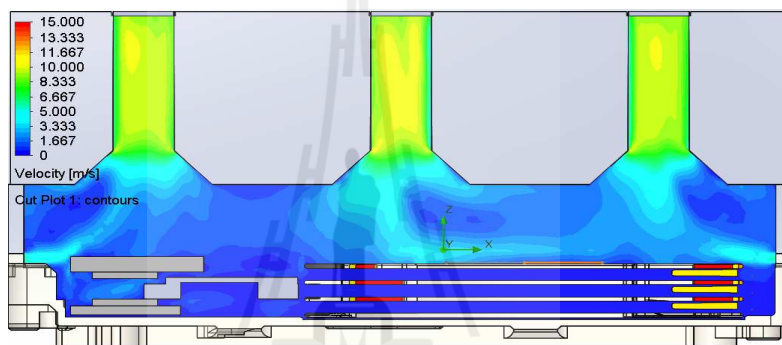


รูปที่ 4.3 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทั้ง 4 ช่วง

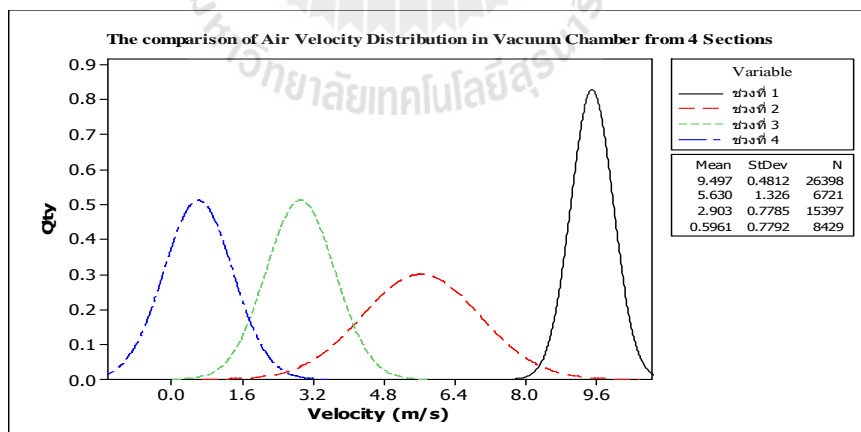
4.2.3 การกระจายตัวของความเร็วของอากาศในห้องดูด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็วของอากาศภายในห้องดูด โดย จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 ช่วง ตามความแตกต่างของความสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.4 และแผนภาพฮิสโตแกรมในรูปที่ 4.5 จะพบว่าความแตกต่างของความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศในแต่ละช่วงนั้นค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของอากาศส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงความสูงที่ 1 และ 2 ในขณะที่ช่วงความสูงที่ 3 และ 4 นั้นมีค่าที่ลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะช่วงที่ 4 นั้นความเร็วการเคลื่อนที่ของอากาศมีค่าน้อยมาก ประมาณ 0.59 m/s



รูปที่ 4.4 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศในแบบจำลอง M0



รูปที่ 4.5 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M0

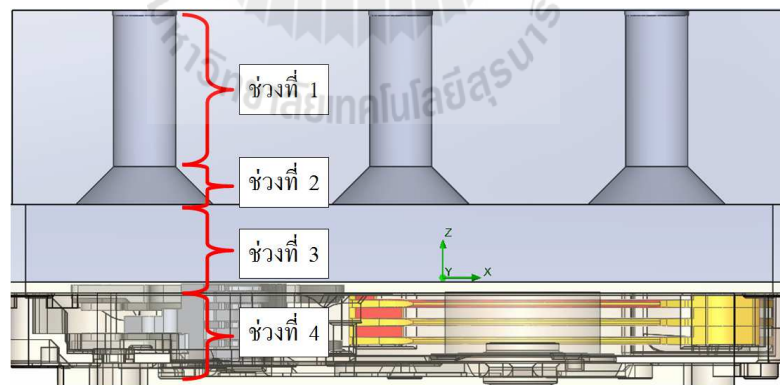
จากผลลัพธ์ของการกระจายตัวของความดันและความเร็วของอากาศในห้องดูจะพบว่ามีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเห็นได้ว่า ในบริเวณที่มีความแตกต่างของความดันจากความดันบรรยากาศมาก ๆ จะส่งผลให้ความเร็วการเคลื่อนตัวของอากาศที่มีค่าที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นบริเวณช่วงที่ 1 และ 2 แต่ในช่วงที่ 3 และ 4 นั้นเนื่องจากมีความแตกต่างของความดันที่น้อยมาก ทำให้อากาศไม่เกิดการเคลื่อนตัวเท่าที่ควร

ผลการคำนวณในแบบจำลอง CFD นี้มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในการทำให้ผู้วิจัยเข้าใจถึงสถานะที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของอากาศภายในห้องดู ซึ่งจะนี้เป็นพื้นฐานในการนำไปพัฒนาแบบจำลองในหัวข้อถัดไป แต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยก็คำนึงข้อจำกัดของการเพิ่มความแตกต่างของความดันที่ต้องมีค่าไม่เกิน 1 inch-H₂O ที่บริเวณหัวมอเตอร์ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าความแตกต่างของความดันบนหัวมอเตอร์ด้วยในทุกๆแบบจำลอง เพื่อเป็นการป้องกันว่าแบบจำลองที่จะนำไปผลิตจริงจะไม่ทำให้เกิดการรั่วไหลของน้ำมัน FDB

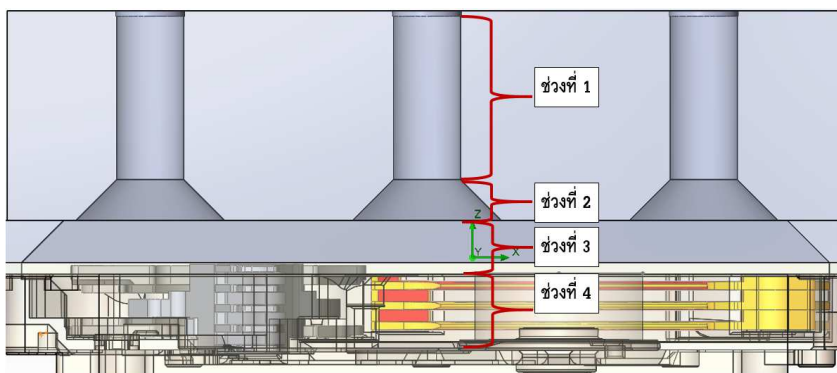
4.3 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของทุกแบบจำลอง

4.3.1 ช่วงของการพิจารณาของทุกแบบจำลอง

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงช่วงการพิจารณาที่แบ่งตามระดับความสูง โดยเราจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 ช่วง



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการพิจารณาทั้ง 4 ช่วงของแบบจำลอง M0, M1 และ M3

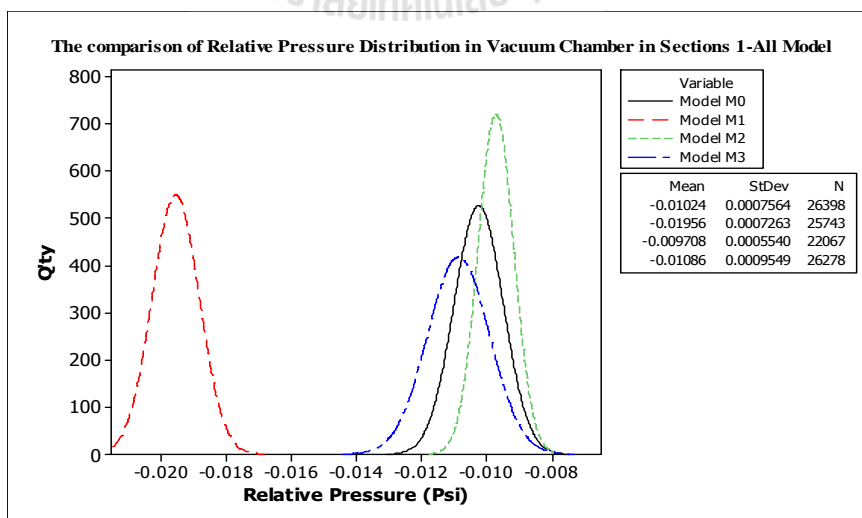


รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการพิจารณาทั้ง 3 ชั้นของแบบจำลอง M2

4.3.2 การกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ของทุกแบบจำลอง

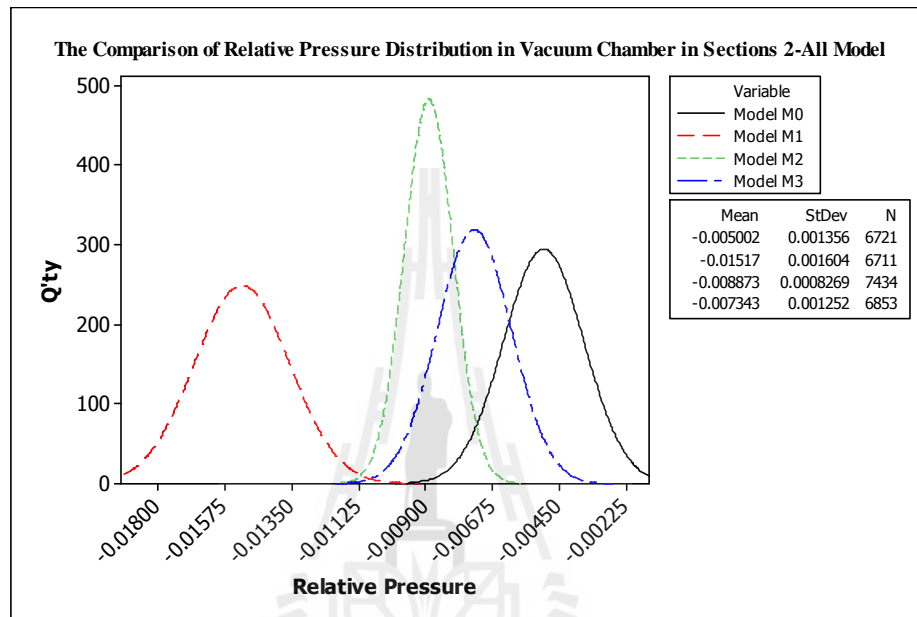
การวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของทุกแบบจำลองแบ่งตามช่วงความสูง โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 ชั้น ตามความแตกต่างของความสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สำหรับแบบจำลองตั้งต้น (M0) แบบจำลองที่ 1 (M1) และแบบจำลองที่ 3 (M3) สำหรับแบบจำลองที่ 2 (M2) จะถูกแสดงไว้ใน รูปที่ 4.7

ชั้นที่ 1 จะพิจารณาในบริเวณที่อุดทรงกระบอกทั้ง 6 ท่อ จากแผนภาพฮิสโตแกรม จะ พบว่าแบบจำลอง M1 นั้นมีค่าความดันสัมพัทธ์แตกต่างจากความดันบรรยากาศมากที่สุด โดยมีค่ามัธมยอยู่ที่ประมาณ -0.019 Psi ในขณะที่ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วงนี้ของทุกแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน



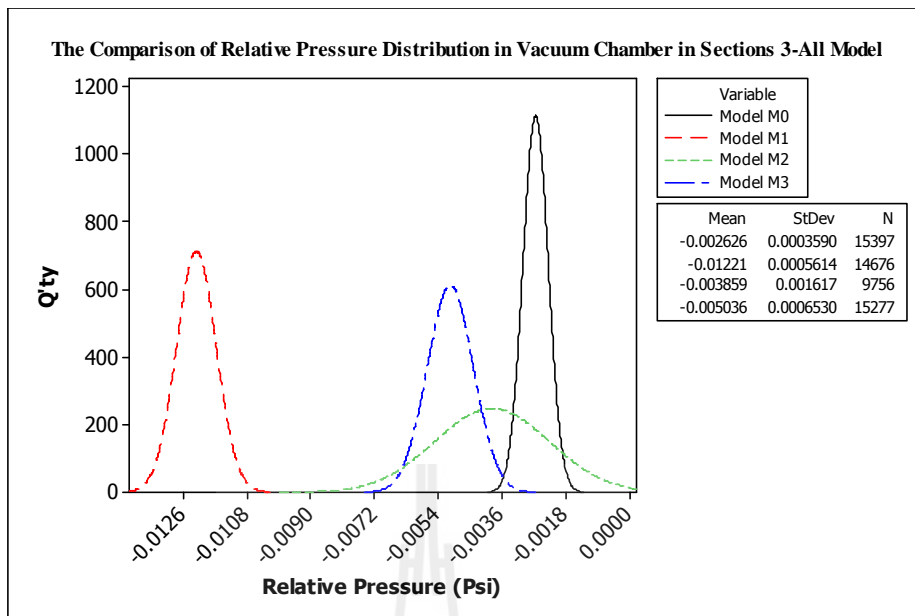
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในชั้นที่ 1 ของทุกแบบจำลอง

ช่วงที่ 2 จะเป็นการพิจารณาที่บริเวณปากทางเข้าของท่อดูดทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นแชมเฟอร์ จากแผนภาพฮิสโตแกรมจะพบว่า แบบจำลองที่ 1 ยังคงมีค่าความดันสัมพัทธ์แตกต่างจากความดันบรรยากาศมากที่สุด โดยมีค่ามัชฌิมอยู่ที่ประมาณ -0.015 Psi ถึงแม้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีขนาดที่ใหญ่กว่า แบบจำลองอื่นๆ แต่ก็เพียงแค่น้อย

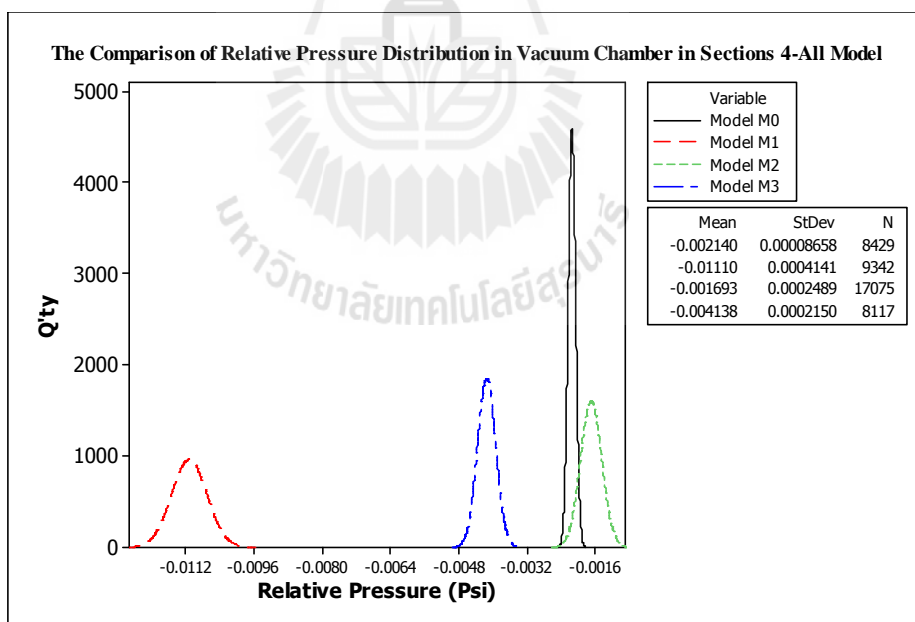


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในช่วงที่ 2 ของทุกแบบจำลอง

ช่วงที่ 3 และช่วงที่ 4 จะเป็นการพิจารณาที่บริเวณปากทางเข้าของท่อดูดลงมาถึงผิวด้านบนของแผ่นดิสก์ และจากผิวด้านบนของแผ่นดิสก์ลงมาถึงภายใน MBA ตามลำดับ จากแผนภาพฮิสโตแกรมในรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะพบว่า แบบจำลองที่ 1 ยังคงมีค่าความดันสัมพัทธ์แตกต่างจากความดันบรรยากาศมากที่สุด โดยมีค่ามัชฌิมอยู่ที่ประมาณ -0.012 Psi ในขณะที่แบบจำลองอื่นๆมีค่าความดันสัมพัทธ์วิ่งเข้าหา 0 มากขึ้นเรื่อย ๆ



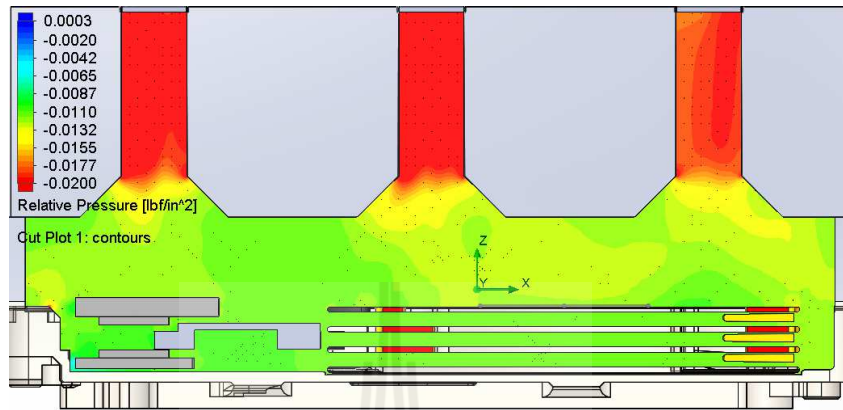
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในช่วงที่ 3 ของทุกแบบจำลอง



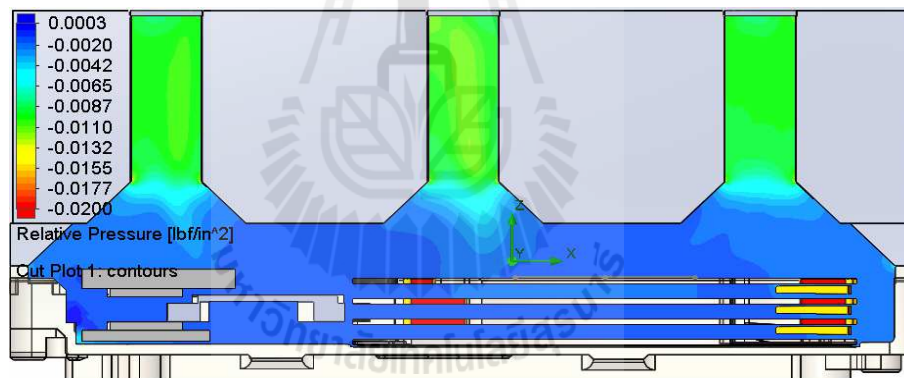
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในช่วงที่ 4 ของทุกแบบจำลอง

แผนภาพ contour ซึ่งแสดงถึงลักษณะของความดันสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นห้องดูดเครื่อง AUV3 ของแบบจำลอง M1, M2 และ M3 ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

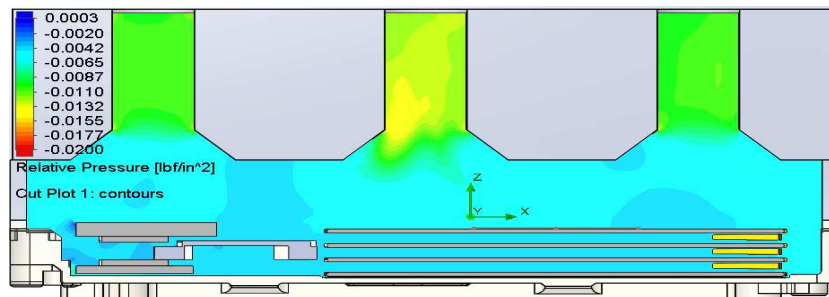
ในขณะที่แผนภาพฮีสโตรแกรมในรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 ได้แสดงถึงการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทุกช่วงพิจารณาของแบบจำลอง M1, M2 และ M3 ตามลำดับ



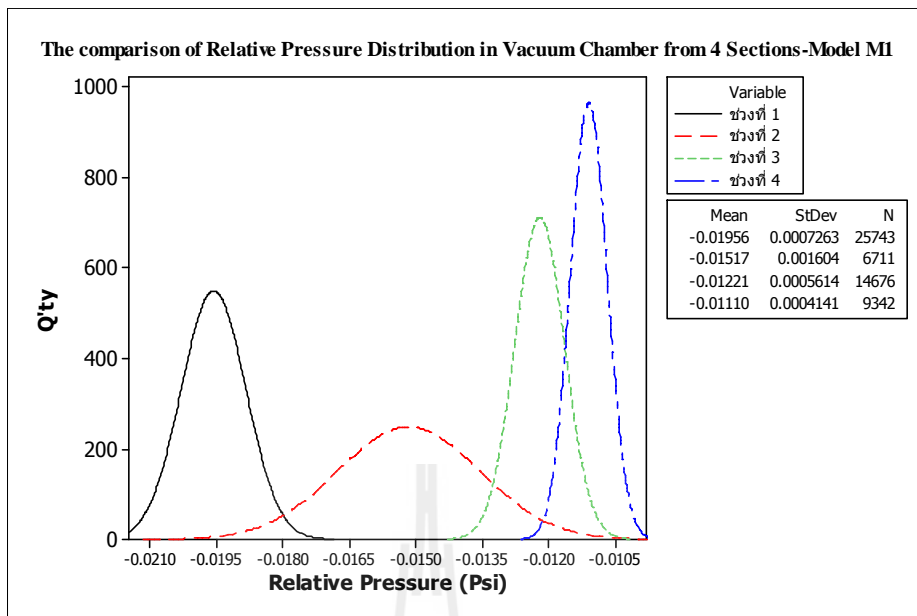
รูปที่ 4.12 การการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในแบบจำลอง M1



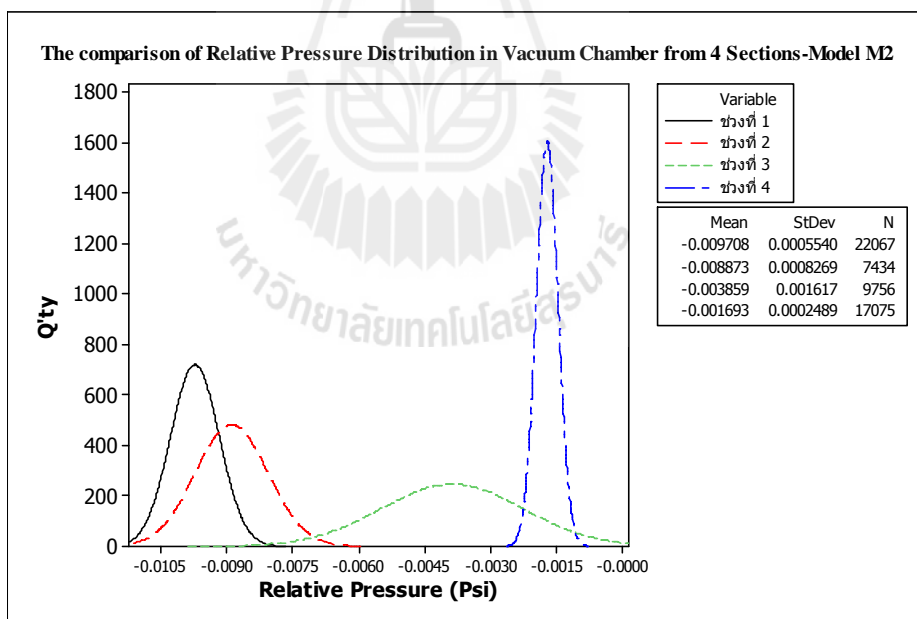
รูปที่ 4.13 การการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในแบบจำลอง M2



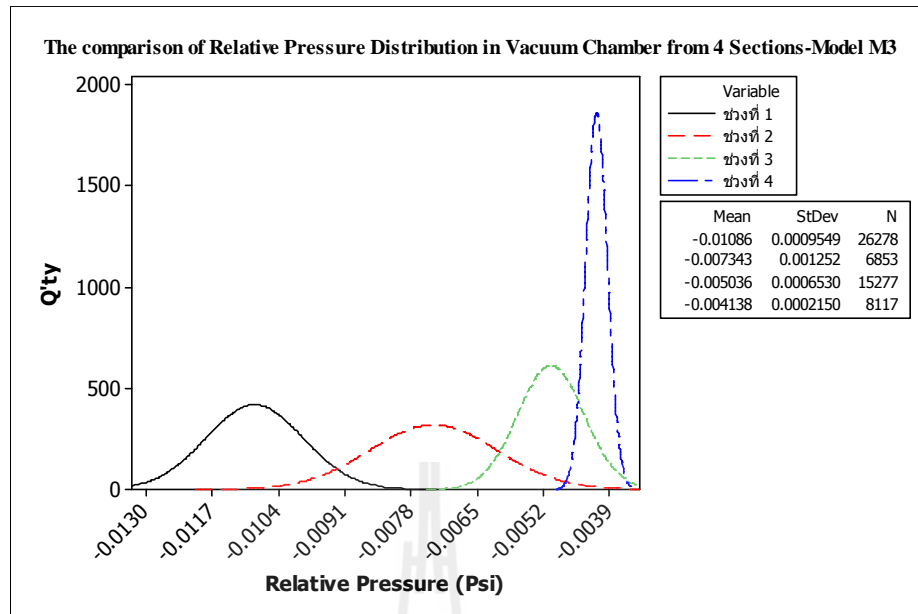
รูปที่ 4.14 การการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ในแบบจำลอง M3



รูปที่ 4.15 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M1

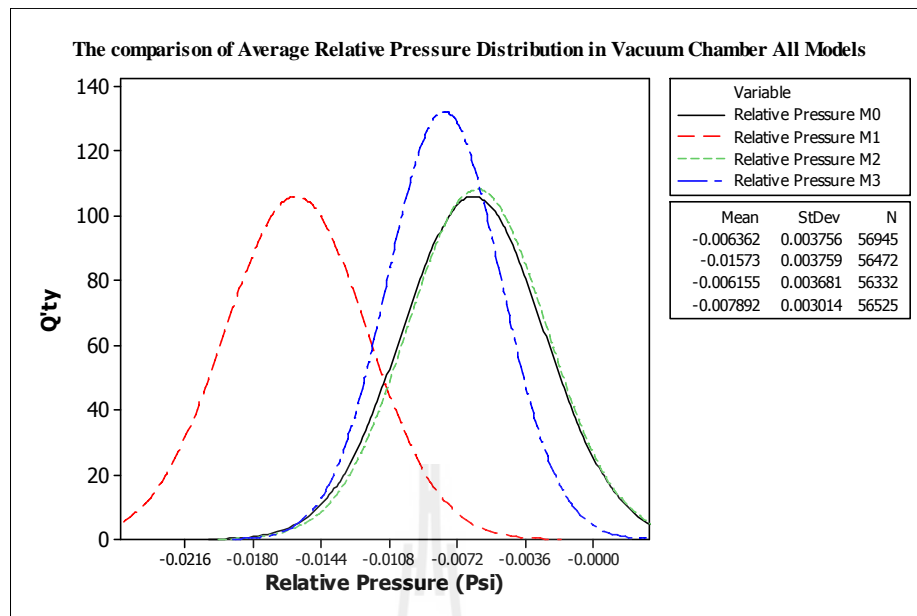


รูปที่ 4.16 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M2



รูปที่ 4.17 ค่าการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์ทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M3

จากรูปที่ 4.18 แสดงค่าความดันสัมพัทธ์เฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในห้องดูดของเครื่อง AUV3 ขณะทำงาน เราจะพบว่าผลของการลดขนาดของช่องอากาศไหลเข้าลงมาครึ่งหนึ่งของสถานะ ปกติในแบบจำลอง M0 มีผลทำให้ความดันสัมพัทธ์มีค่าลดลงประมาณ 2.5 เท่า จาก -0.006 Psi ลงมาอยู่ที่ 0-0.015 Psi ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลองที่ 2 นั้นไม่มีผลกระทบต่อค่าความดันสัมพัทธ์เฉลี่ยในห้องดูดเลย ส่วนการเพิ่มอัตราการไหลในแบบจำลองที่ 3 ขึ้นมาอีก 10 ลิตร/นาที ก็แทบจะไม่ได้ทำให้ค่าความดันสัมพัทธ์เฉลี่ยเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญ

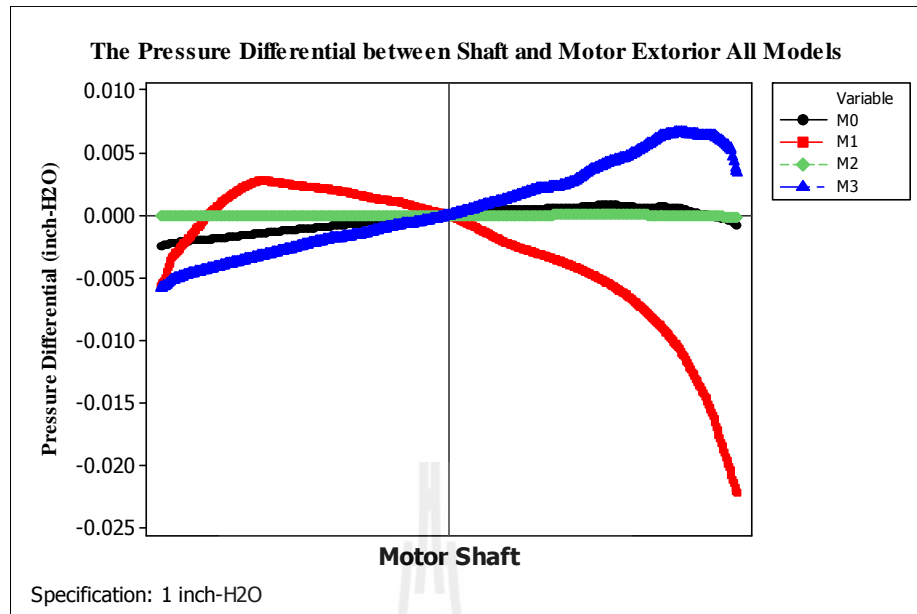


รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์เฉลี่ยในทุกแบบจำลอง

4.3.3 ความแตกต่างของความดันบริเวณมอเตอร์

ดังที่ได้กล่าวเอาไว้แล้วว่า ข้อจำกัดหนึ่งของการพัฒนาเครื่องมือในการกำจัดฝุ่นละอองโดยใช้สูญญากาศคือการที่เราต้องควบคุมปริมาณความแตกต่างของความดันที่วัดจากแกนหมุนของมอเตอร์กับบริเวณพื้นที่ที่พื้นผิวของตัวมอเตอร์ ไม่ให้มีค่าเกิน 1 inch-H₂O เนื่องจากว่าหากความแตกต่างของความดันทั้ง 2 จุดมีความแตกต่างกันี่จะมีผลทำให้เกิดความเสี่ยงที่น้ำมันในตัวมอเตอร์จะรั่วไหลออกมาภายนอก ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้แบบจำลองที่เราขึ้นใหม่เกิดความเสียหายตรงจุดนี้ ผู้วิจัยได้ทำการยืนยันเบื้องต้นว่าจะไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงนั้น

จากกราฟที่ 4.19 เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของความดันจากจุดแกนหมุนของมอเตอร์ไปยังบริเวณผิวด้านนอกของมอเตอร์ตลอดเวินผ่านศูนย์กลางของมอเตอร์ จากกราฟจะเห็นว่าแบบจำลองที่ 1 ที่เราพบว่าความดันสัมพัทธ์ในห้องคูมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดนั้น ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างแกนมอเตอร์กับผิวมอเตอร์ด้านนอกมากที่สุด โดยมีค่า dp สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.023 inch-H₂O แต่อย่างไรก็ตามในทุกแบบจำลอง มีค่าความแตกต่างของความดันไม่เกินที่กำหนด 1 inch-H₂O ดังนั้น ผลลัพธ์นี้เป็นการยืนยันเบื้องต้นว่า ทุกแบบจำลองที่สร้างขึ้นใหม่มีความปลอดภัยที่จะไม่ทำให้เกิดความเสี่ยงของการรั่วไหลของน้ำมันในมอเตอร์ แต่ที่ควรพึงระวังไว้ว่าการทำให้ความดันสัมพัทธ์ในห้องคูมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็มีผลที่จะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันบนมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

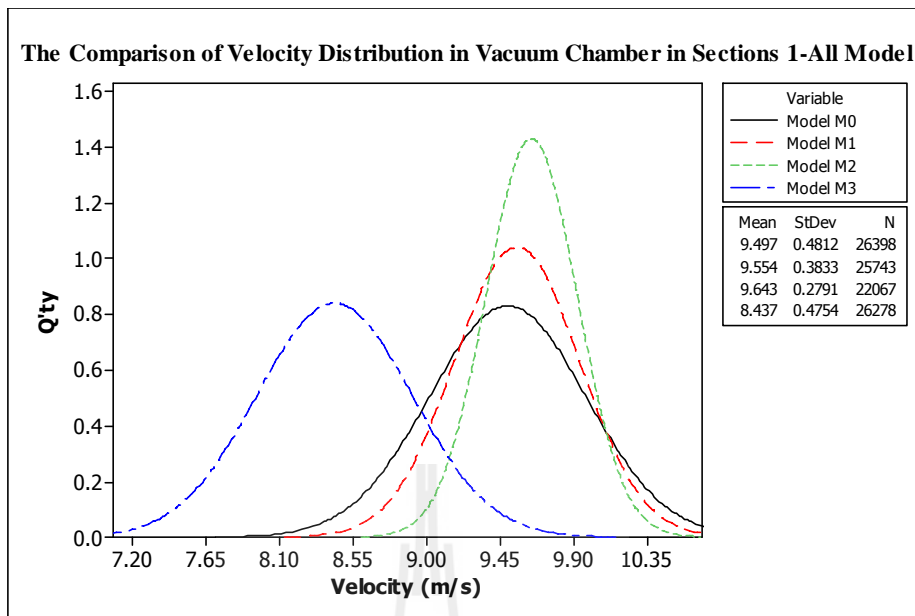


รูปที่ 4.19 ความแตกต่างของความดันบนผิวมอเตอร์ของทุกแบบจำลอง

4.3.4 การกระจายตัวของความเร็วของอากาศในห้องดูด

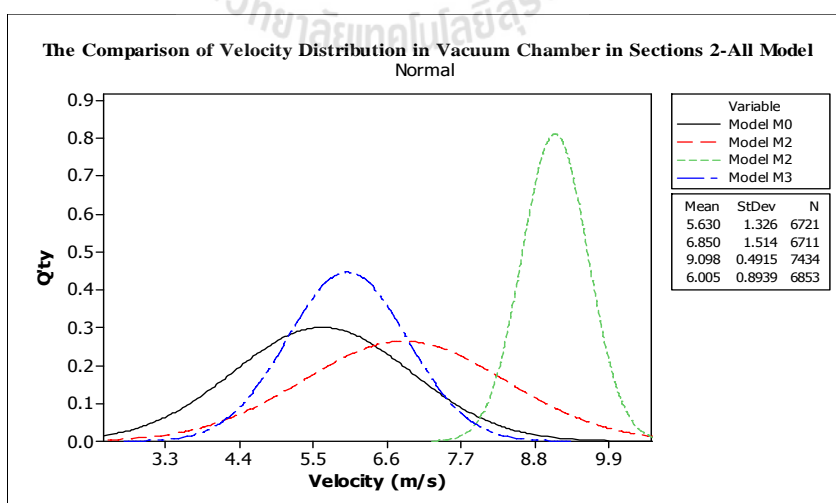
ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็วของอากาศภายในห้องดูด การวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของทุกแบบจำลองแบ่งตามช่วงความสูง โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 ช่วง ตามความแตกต่างของความสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สำหรับแบบจำลอง M0, M1 และ M3 และในรูปที่ 4.7 สำหรับแบบจำลอง M2

เริ่มจาก ช่วงที่ 1 จะพิจารณาบริเวณท่อดูดทรงกระบอกทั้ง 6 ท่อ จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าความเร็วของอากาศมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



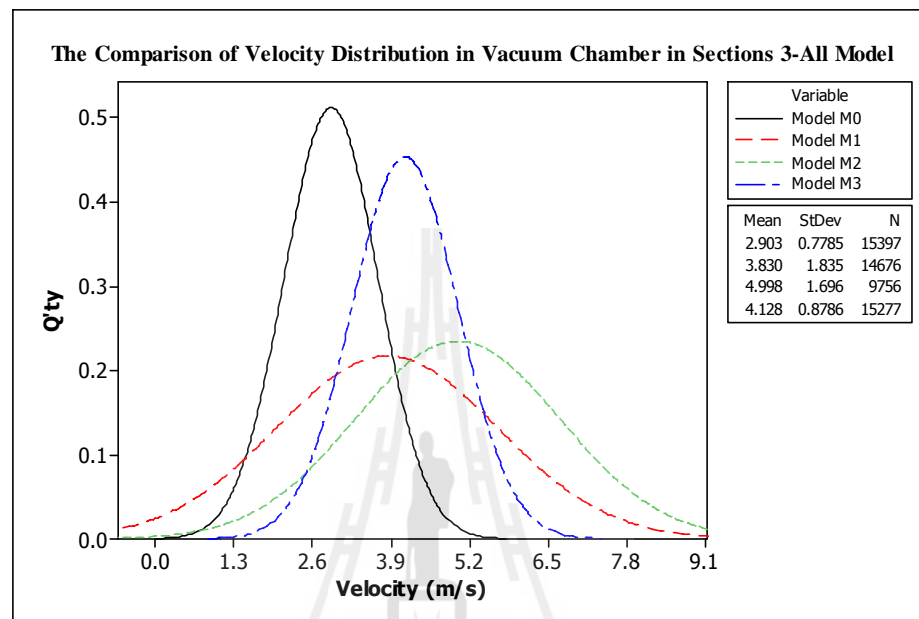
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในช่วงที่ 1 ของทุกแบบจำลอง

ช่วงที่ 2 จะเป็นพิจารณาที่บริเวณปากทางเข้าที่อคูดทรงกระบอกบริเวณที่เป็นแอมเฟอร์ จากแผนภาพฮิสโตแกรมจะพบว่าความเร็วที่บริเวณนี้ ในแบบจำลองที่ 2 จะมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่ามัชฌิมอยู่ที่ประมาณ 9 เมตร/วินาที ส่วนแบบจำลองที่เหลือนอกจากจะมีค่ามัชฌิมที่น้อยกว่าแล้วค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานยังสูงกว่าแบบจำลองที่ 2 อีกด้วย



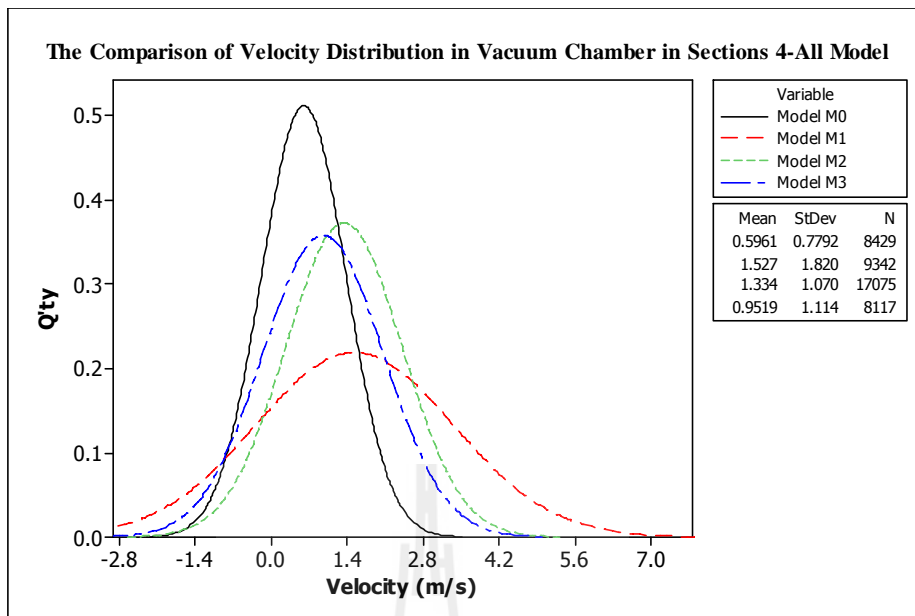
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในช่วงที่ 2 ของทุกแบบจำลอง

ช่วงที่ 3 จะเป็นพิจารณาที่บริเวณปากทางเข้าที่ดูดลงมาจนถึงพื้นผิวของแผ่นดิสก์ จากแผนภาพฮิสโตแกรมจะพบว่าความเร็วที่บริเวณนี้ ในแบบจำลองที่ M1, M2 และ M3 มีค่าที่ใกล้เคียงกันและสูงกว่าแบบจำลองตั้งต้น M0



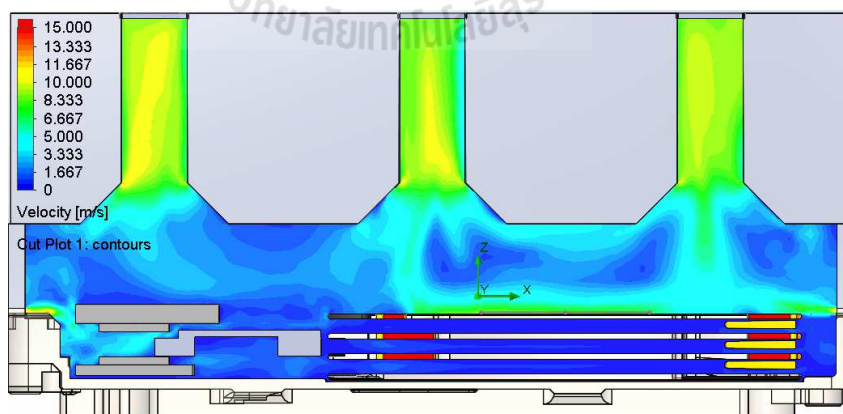
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในช่วงที่ 3 ของทุกแบบจำลอง

ช่วงที่ 4 จะเป็นพิจารณาที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นดิสก์ ลงมาถึงพื้นผิวของ MBA จากแผนภาพฮิสโตแกรมจะพบว่าความเร็วที่บริเวณนี้ ในแบบจำลองที่ M1, M2 มีค่ามัธยฐานที่สูงที่สุดและใกล้เคียงกัน แต่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบบจำลอง M1 นั้นมีค่าที่มากกว่า ซึ่งหมายความว่า การกระจายตัวของความเร็วในแบบจำลอง M1 นั้นแคบกว่า แบบจำลอง M2

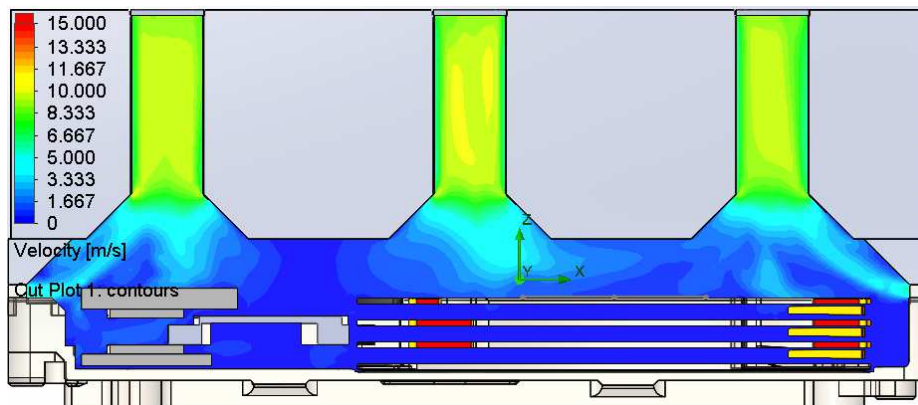


รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในช่วงที่ 4 ของทุกแบบจำลอง

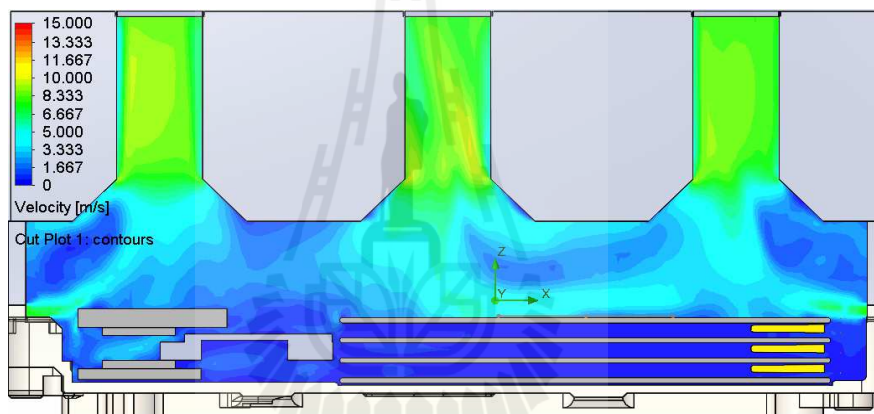
แผนภาพ contour ซึ่งแสดงถึงลักษณะของความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นในห้องดูดเครื่อง AUV3 ของแบบจำลอง M1, M2 และ M3 ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ ในขณะที่แผนภาพฮีต โตรแกรมในรูปที่ 4.27, 4.28 และ 4.29 ได้แสดงถึงการกระจายตัวของความเร็วของอากาศในทุกช่วงพิจารณาของแบบจำลอง M1, M2 และ M3 ตามลำดับ



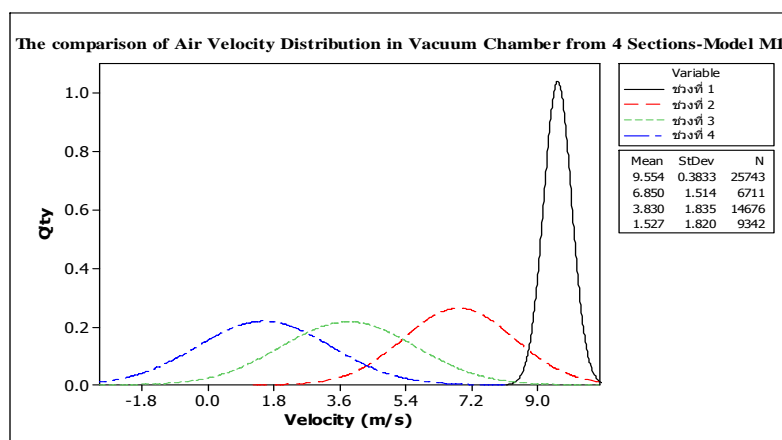
รูปที่ 4.24 การการกระจายตัวของความเร็วของอากาศในแบบจำลอง M1



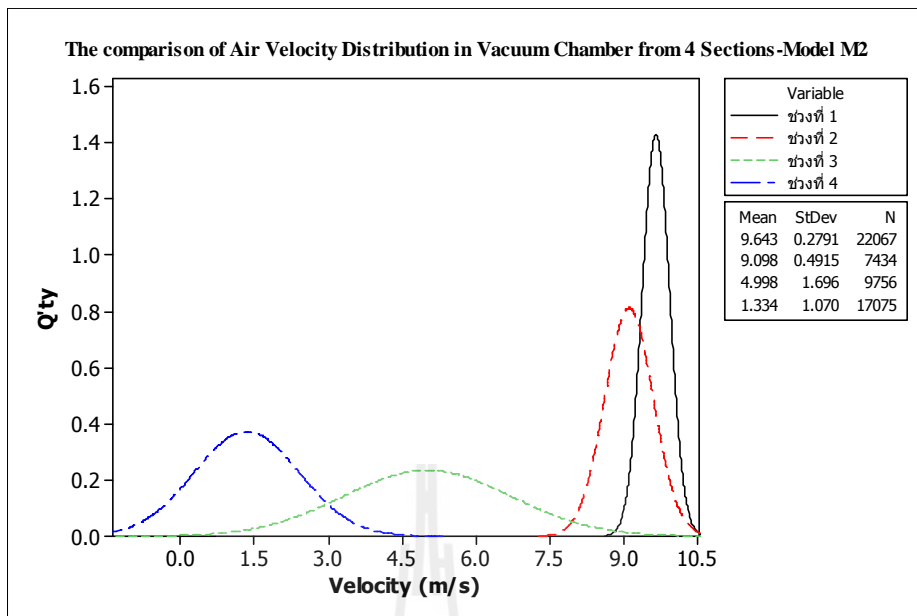
รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของความเร็วของอากาศในแบบจำลอง M2



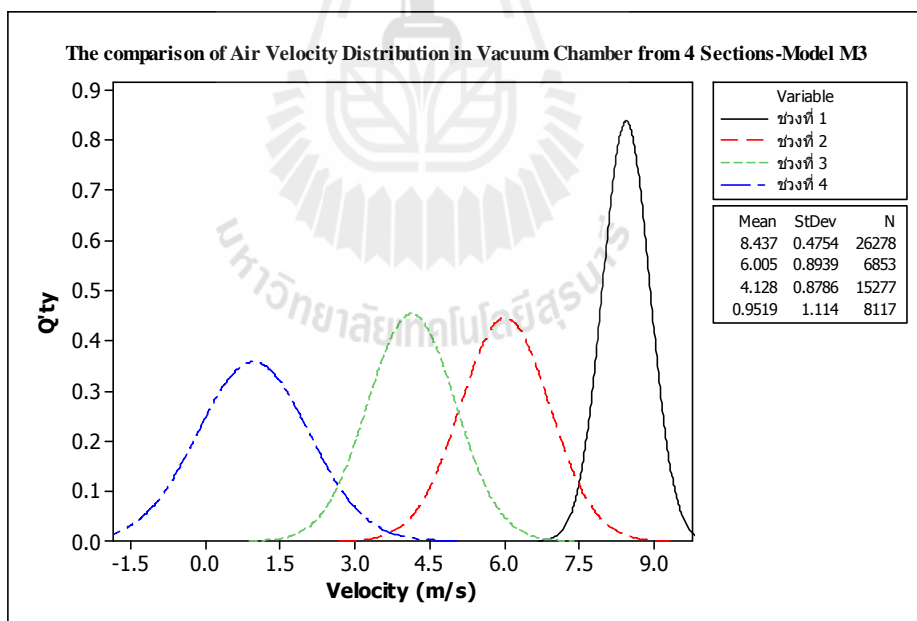
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของความเร็วของอากาศในแบบจำลอง M3



รูปที่ 4.27 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M1

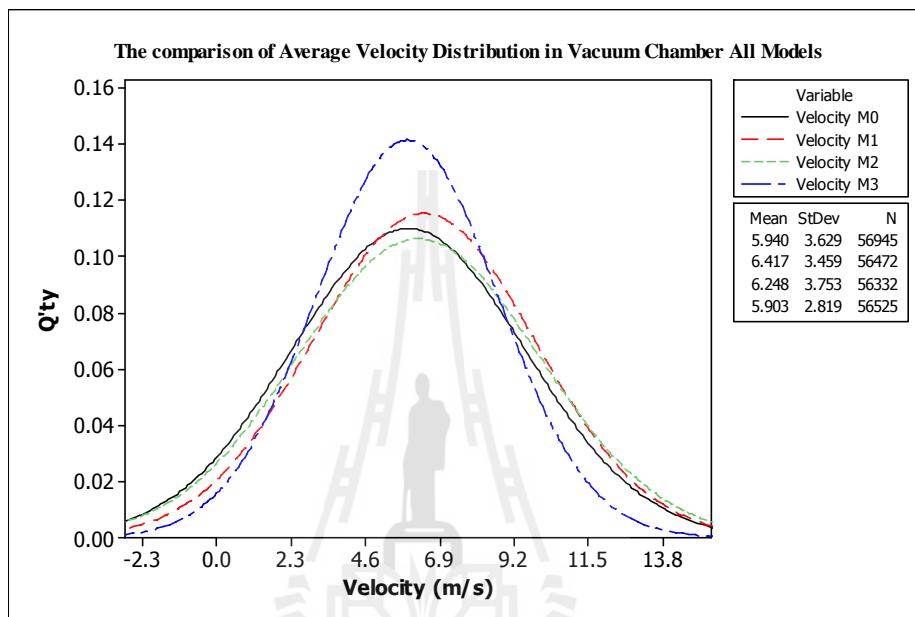


รูปที่ 4.28 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M2



รูปที่ 4.29 ค่าการกระจายตัวของความเร็วของอากาศทั้ง 4 ช่วงในแบบจำลอง M3

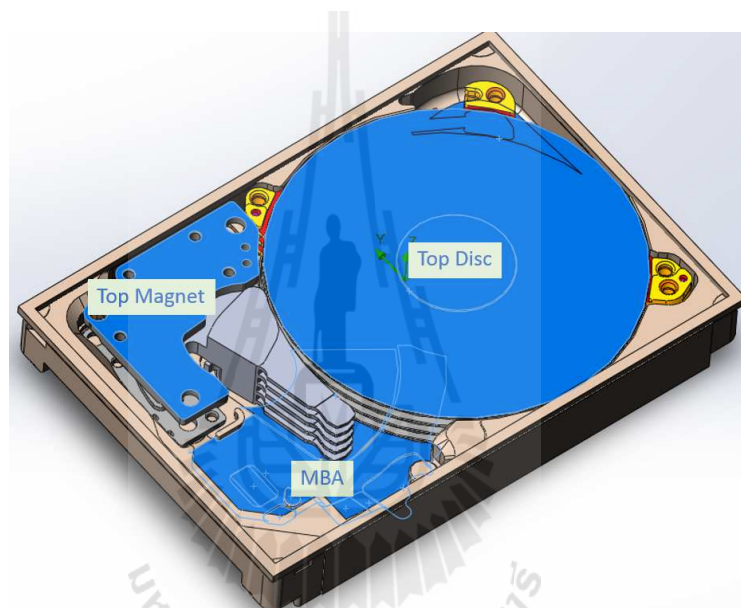
จากรูปที่ 4.30 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องดูดของเครื่อง AUV3 ขณะทำงาน เราจะพบว่าความเร็วเฉลี่ยของแบบจำลอง M2 นั้นมีค่ามัธยฐานที่สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของอากาศของทุกแบบจำลองนั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ



รูปที่ 4.30 ค่าการกระจายตัวเฉลี่ยของความเร็วของอากาศในทุกแบบจำลอง

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละออง

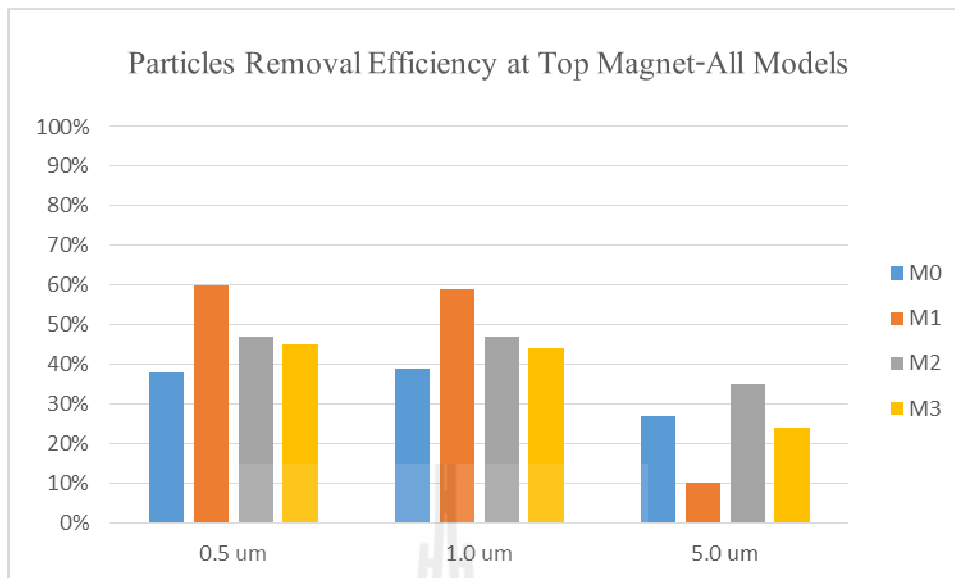
ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของแบบจำลอง ในการกำจัดฝุ่นละอองออกจากตัวฮาร์ดดิสก์หลังจากทำการคำนวณผลลัพธ์ในส่วนต่างๆของไหลเสร็จสิ้นแล้ว จากคุณสมบัติที่กำหนดในตารางที่ 3.2 เราจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นตามพื้นที่ตามรูปที่ 4.31 โดยในทุกพื้นที่ที่จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลองและทุกขนาดของฝุ่นละออง ฝุ่นละอองที่สามารถเคลื่อนตัวมาถึงที่ปากทางออกของท่อดูดในระยะเวลา 2 วินาที จะถูกพิจารณาว่าสามารถกำจัดออกไปจากตัวฮาร์ดดิสก์ได้



รูปที่ 4.31 ตำแหน่งการจำลองการสะสมของฝุ่นละอองในตัวฮาร์ดดิสก์ก่อนทำการดูดด้วยเครื่อง AUV3

4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่บริเวณ Top Magnet

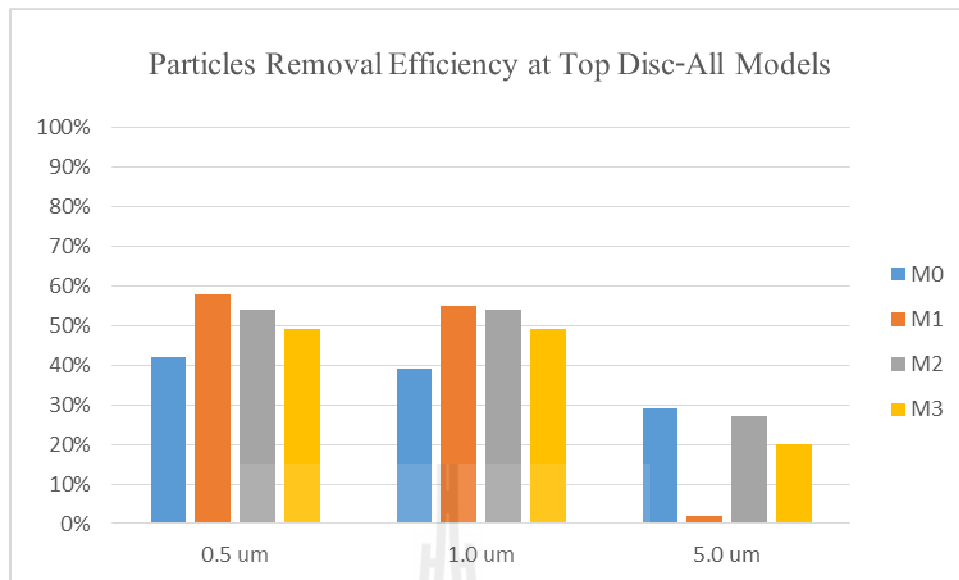
จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.32 จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของแบบจำลองที่ M1 ในบริเวณ Top Magnet มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับฝุ่นละอองขนาด 0.5 และ 1 micron ซึ่งสามารถกำจัดได้ประมาณ 60% ทั้ง 2 ขนาด แต่แบบจำลอง M1 มีประสิทธิภาพที่ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อฝุ่นละอองมีขนาด 5 micron ในขณะที่แบบจำลองที่ M2 มีประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองขนาด 5 micron ได้ดีที่สุดซึ่งสามารถกำจัดได้ประมาณ 35%



รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลอง
บริเวณ Top Magnet

4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่บริเวณ Top Disc

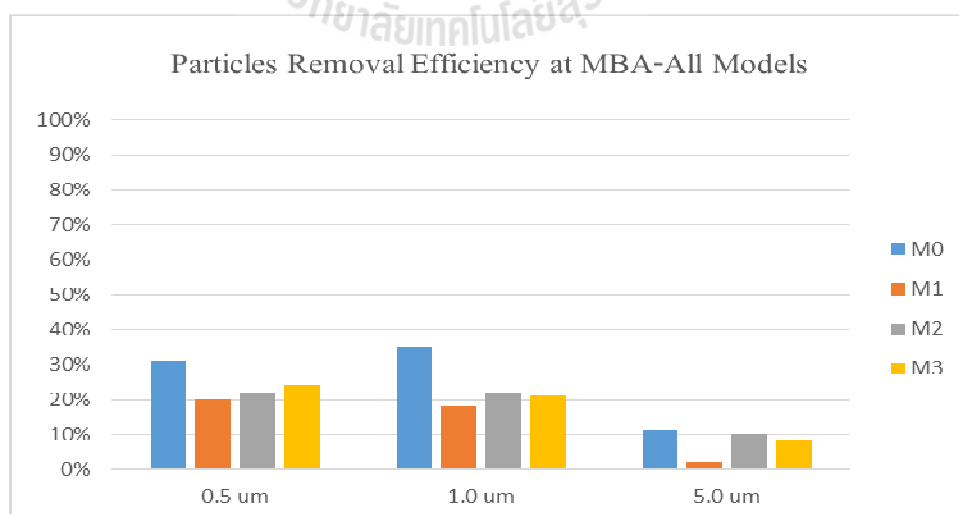
จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.33 จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของแบบจำลองที่ M1, M2 และ M3 มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับฝุ่นละอองขนาด 0.5 และ 1 micron แต่แบบจำลอง M1 มีประสิทธิภาพที่ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อฝุ่นละอองมีขนาด 5 micron ในขณะที่แบบจำลองที่ M0 และ M2 มีประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองขนาด 5 micron ที่ใกล้เคียงกันประมาณ 30%



รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลองบริเวณ Top Disc

4.4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่บริเวณ MBA

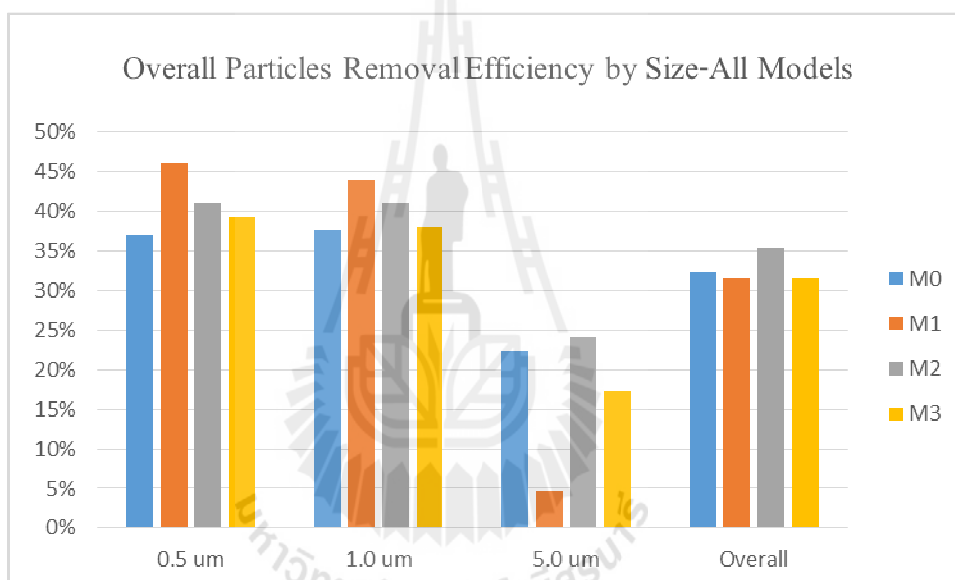
จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.34 จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลองมีค่า ลดลงเป็นอย่างมาก แต่แบบจำลองตั้งต้น M0 ยังมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด อยู่ที่ประมาณ 30% ในฝุ่นละอองขนาด 0.5 และ 1 micron และลดลงมาอยู่ที่ 10% สำหรับฝุ่นละอองขนาด 5 micron



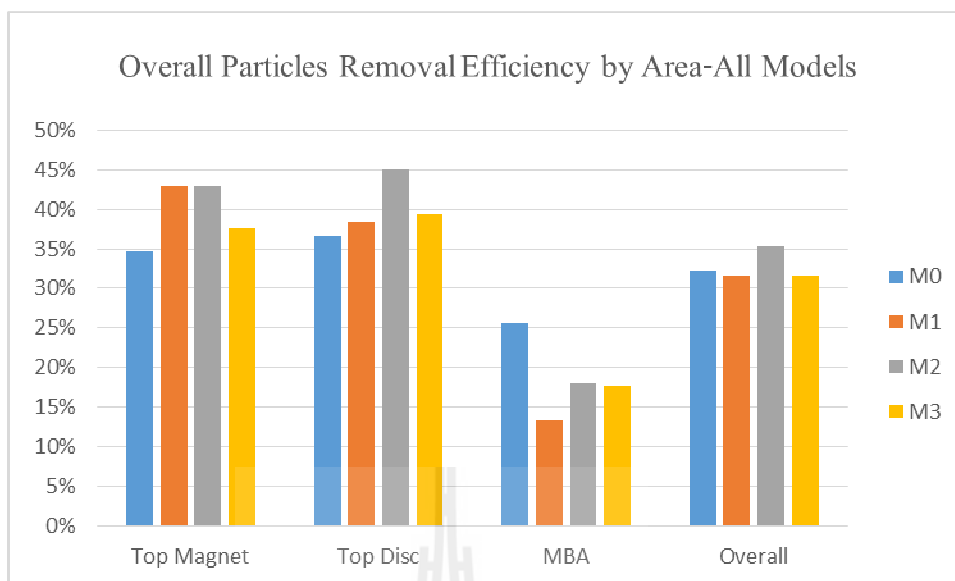
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลองบริเวณ MBA

4.4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมของการกำจัดฝุ่นละออง

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.35 และ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองโดยรวม โดยเราจะพบว่าหากพิจารณาในทุกพื้นที่แล้ว แบบจำลอง M1 มีประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่ดีที่สุดในพื้นที่ฝุ่นละอองขนาด 0.5 และ 1 micron และแบบจำลอง M2 ตามมาเป็นอันดับที่ 2 และหากพิจารณาโดยแบ่งตามพื้นที่แล้ว แบบจำลอง M2 มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในพื้นที่ Top Magnet และ Top Disc ในขณะที่แบบจำลองดั้งเดิม M0 ยังคงมีความได้เปรียบในพื้นที่ผิวของ MBA อยู่แต่อย่างไรก็ตามหากฝุ่นละอองมีการสะสมที่บริเวณนี้ ก็มีความสามารถเพียงแค่นำไม่เกิน 25% ที่จะกำจัดออกไป



รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองโดยรวมจำแนกด้วยขนาดฝุ่นละออง



รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองโดยรวมจำแนกตามพื้นที่สะสม
ของฝุ่นละออง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการที่ได้ทำการใช้โปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ทำการศึกษาพฤติกรรมของอากาศภายในสถานีดูดฝุ่นละออง AUV3 ทำให้มีความเข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของอากาศภายในมากขึ้น การใช้โปรแกรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์นั้นนอกจากจะช่วยลดต้นทุนทางการเงินและเวลาแล้ว ยังสามารถช่วยในการทำนายค่าของตัวแปรที่สนใจ ที่เราไม่สามารถทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดได้จริงในทางปฏิบัติได้อีกด้วย อย่างเช่นการวัดค่า ความดัน ความหนาแน่น ความเร็วของอากาศที่จุดต่างๆ ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทำการติดตั้งชุดเซ็นเซอร์เพื่อทำการวัดค่าเหล่านี้ในสถานีดูด AUV3 ได้อย่างแน่นอน ดังนั้นหากเรามีความเข้าใจในการใช้ความสามารถของโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้าน CFD ได้เป็นอย่างดีแล้ว จะทำให้เรามีความได้เปรียบในการทำ ความเข้าใจพฤติกรรมของไหลได้มากกว่า

จากการที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของอากาศภายในสถานีดูด AUV 3 ทำให้ได้เรียนรู้ว่า

5.1.1 อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานของแต่ละแบบจำลอง

จากแบบจำลอง M1 เราพบว่าหลังจากที่เราลดความสูงของช่องทางการไหลเข้าของอากาศในขณะเครื่องดูด AUV3 ทำงาน ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ทางออก 25 ลิตร/นาที เราพบว่า จะมีผลทำให้ความดันสัมพัทธ์ในห้องคูมีความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ กว่าทุกแบบจำลอง หมายความว่าหากต้องการให้ภายในห้องคูมีสภาวะที่เกิดสูญญากาศเกิดขึ้น วิธีที่ได้ผลดีที่สุดก็คือการลดขนาดของช่องทางการไหลเข้าของอากาศ ส่วนการลดปริมาตรในห้องคู ดังเช่นในแบบจำลอง M2 จะช่วยทำให้การกระจายตัวของความเร็วภายในบริเวณพื้นผิวของฮาร์ดดิสก์ไดฟ์มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น และการเพิ่มอัตราการไหลในแบบจำลอง M3 นั้น ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มความเร็วของอากาศในห้องคูได้น้อยมาก

5.1.2 อิทธิพลของความแตกต่างของความดันสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น

จากกรณีของแบบจำลอง M1 เราจะพบว่า เมื่อความแตกต่างของความดันสัมพัทธ์มีค่าที่เพิ่มขึ้นภายในห้องคู ก็มีส่งผลให้ความเร็วการเคลื่อนที่ของอากาศมีค่าที่สูงขึ้นเช่นกัน แต่

ผลกระทบที่ตามมาก็คือ ความแตกต่างของความดันที่บริเวณผิวมอเตอร์กับแกนกลางของมอเตอร์ก็จะมีค่าที่สูงขึ้นด้วย จากกราฟที่ 4.19 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแบบจำลอง M1 นั้นมีค่าแตกต่างของความดันที่บริเวณมอเตอร์มากที่สุดอย่างมีนัยยะสำคัญ

5.1.3 อิทธิพลของการกระจายตัวของความเร็วภายในห้องดูด

จากแบบจำลอง M2 ทำให้เราได้พอเข้าใจว่าหากการกระจายตัวของความเร็วในท่อกว้างช่วงความสูงจากท่อดูดทางออกมาจนถึงพื้นผิวของฮาร์ดดิสก์ไอดีที่มีความใกล้เคียงกัน ก็จะมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดฝุ่นละอองที่สะสมออกจากตัวฮาร์ดดิสก์ไอดีมากขึ้น

5.1.4 ความสามารถในการกำจัดฝุ่นละออง

โดยรวมแล้ว ความสามารถในการกำจัดฝุ่นละอองของทุกแบบจำลองยังมีค่าที่ต่ำอยู่ที่ประมาณ 35% โดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวของ MBA และฝุ่นละอองขนาด 5 micron ที่มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองที่ต่ำที่สุดในทุกแบบจำลอง ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองนี้มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับการกระจายตัวของความเร็วของอากาศ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะต่อการใช้โปรแกรมทางด้าน CFD ในการทำงานวิจัย

ถึงแม้การใช้ความสามารถของโปรแกรมทางด้าน CFD จะมีความสะดวกต่อการทำความเข้าใจพฤติกรรมของไหล โดยสามารถช่วยลดต้นทุนทางการเงินและเวลาได้ แต่เราก็ไม่ควรละเลยที่จะพิสูจน์ผลลัพธ์ของแบบจำลองเหล่านั้น ด้วยการทดลองจริงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อ เป็นการพิสูจน์ว่าความสามารถในการใช้ซอฟต์แวร์ของเรานั้น สามารถเชื่อถือได้ ควรใช้ความสามารถของโปรแกรมในการช่วยลดจำนวนชิ้นงานต้นแบบในกระบวนการวิจัยและพัฒนา น่าจะเป็นสิ่งที่เป็นประโยชน์มากที่สุดในงานอุตสาหกรรม

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานวิจัย

ผู้สนใจสามารถใช้งานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นในการทำความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความดัน กับ การเคลื่อนตัวของอากาศได้

5.2.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะให้ความสำคัญต่อการควบคุมและกำจัดฝุ่นละอองที่สะสมในตัวงานมาอย่างต่อเนื่อง มีเครื่องจักรมากมายที่ถูกพัฒนามาเพื่อวัดและ

กำจัดฝุ่นละออง หลักการการทำงานของเครื่องไม่แตกต่างกันมาก คือ การทำให้ภายในห้องคูมมีการเคลื่อนตัวของอากาศเพื่อชักนำฝุ่นละอองให้ออกไปที่ทางออกให้ได้ดีที่สุดซึ่งก็เป็นหลักการเดียวกับงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่อง AUV3 ชั้นนี้ ดังนั้น ผู้สนใจสามารถศึกษาจากงานวิจัยชั้นนี้ได้เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัยของอุปกรณ์กำจัดฝุ่นละอองแบบใหม่ๆ ได้เช่นกัน



รายการอ้างอิง

- ณรงค์วิทย์ ยิ้มศิริวัฒน์ (2554). การจำลองการไหลของอากาศ ระหว่างขั้นตอนการดูดอนุภาค
ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 98 หน้า.
- อนูรัตน์ วิเศษภูธรอรอด (2554), โครงการวิจัยการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของระบบ
Auto Vacuum (AUV). งานนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยี
อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 37 หน้า.
- D. Y. Lee, J. Hwang and G. N. Bae., (2004). **Effect of Disk Rotational Speed on
Contamination Particles Generated in a Hard Disk Drives**. *Microsystem
Technologies*, Vol. 10(Issue 2), pp. 103-108.
- H. Song, M. Damodaran and Quock Y. Ng., (2003). **Simulation of Flow Field and Particle
Trajectories in Hard Disk Drive Enclosures**. 1st Fluent CFD Conference for India and
South East Asia, Pune, India, November 2003, pp. 1-8.
- H. Kwon and H. J. Lee. (2006). **Nano-scale Particle Tracking in HDD Cavity**. International
ANSYS Conference, Pittsburgh, PA, May 2006, pp. 1-6.
- SolidWorks Corp. **SolidWorks Flow Simulation 2012 Technical Reference**.
- SolidWorks Corp. **SolidWorks Flow Simulation 2012 Solving Engineering Tasks**.



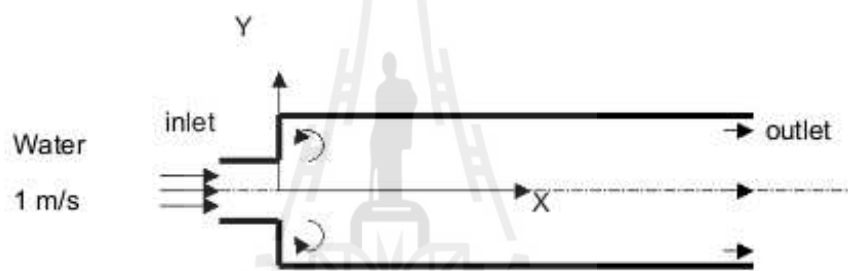
ภาคผนวก ก

การพิสูจน์แบบจำลองก่อนทำงานวิจัย

ก.1 การไหลแบบ 2 มิติ ในช่องทางที่มีการขยายแบบทันที (Flows in 2D Channels with Bilateral Sudden Expansions)

ในตัวอย่างนี้จะเป็นการพิสูจน์การใช้งานโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ในการวิเคราะห์การไหลผ่านช่องทางที่มีการขยายตัวแบบทันที แบบช่องทาง การไหลขยายแบบทันทีทั้ง 2 ด้าน ผลลัพธ์จากแบบจำลองในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations จะถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การคำนวณที่ได้จากสมการทางทฤษฎี

- น้ำ อุณหภูมิ 293.2 K ที่ความเร็ว 1 m/s แบบ uniform ไหลผ่านช่องทางเข้าที่มีความสูง 10 cm และขยายออกแบบทันที ดังรูปที่ ก.1.1 จงทำการคำนวณหาค่า Hydraulic loss เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการไหลโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation กับสมการอ้างอิง



รูปที่ ก.1.1 การไหลแบบ 2 มิติ ผ่านช่องทางที่มีการขยายตัวแบบทันทีทั้ง 2 ด้าน

ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียทางไฮดรอลิก จากการขยายตัวแบบทันทีทั้ง 2 ด้าน สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ($Re > 10^4$) และรูปแบบโปรไฟล์ของความเร็วเป็นแบบ uniform นั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการขยายของพื้นที่หน้าตัด และสามารถหาค่าได้จากสมการอ้างอิงที่ 1.1

$$\zeta_s = \frac{P_0 - P_1}{\frac{\rho u_0^2}{2}} = \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2 \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ	A_0 และ A_1	คือ	พื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและทางออกตามลำดับ
	P_0 และ P_1	คือ	ความดันที่ทางเข้าและทางออก
	$\frac{\rho u_0^2}{2}$	คือ	ความดันจลน์ ที่ทางเข้า

ในสภาวะจริงของการไหลผ่านช่องทางที่มีการขยายแบบทันทีนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียทางไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ $\zeta = \zeta_f + \zeta_s$ เมื่อ ζ_f คือ สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน แต่ในกรณีนี้เราจะไม่ทำการพิจารณา โดยการระบุให้ทุกผนังในช่องทางการไหลเป็นแบบอุดมคติ

ในการพิสูจน์นี้ เราจะทำการกำหนดสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดเพื่อพิจารณาที่ 1.5, 2.0, 3.0 และ 6.0 และเพื่อหลีกเลี่ยงผลของการรบกวนจากสภาพแวดล้อมของช่องทางออก ที่ทำให้มีความดันที่ 1 ความดันบรรยากาศ เราจะกำหนดให้ช่องทางการไหลนี้มีความยาวเป็น 10 เท่าของความสูงที่ช่องทางเข้า

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ได้ถูกแสดงไว้เป็นหัวข้อดังนี้

ก.1.1 ขอบเขตการคำนวณ

- เนื่องจากแบบจำลองตั้งต้นมีรูปร่างที่สมมาตร การพิจารณาสร้างขอบเขตการคำนวณในแบบจำลองนี้จะถูกพิจารณาให้เป็นแบบ 2 มิติ ขอบเขตการคำนวณได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ ก.1.2 ในบริเวณกรอบสีฟ้า



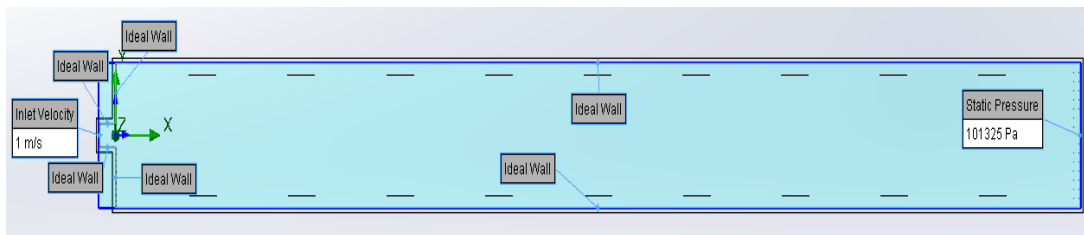
รูปที่ ก.1.2 ขอบเขตการคำนวณแบบ 2 มิติ

ก.1.2 เงื่อนไขตั้งต้น

- น้ำที่ ความดันบรรยากาศ $P=101325$ Pa, อุณหภูมิ $T=293.2$ K

ก.1.3 เงื่อนไขขอบเขต

- น้ำที่ความเร็ว 1 m/s ที่ทางเข้า, $Re=10^5$
- ความดันบรรยากาศที่ทางออก
- ผนังอยู่ในสภาวะอุดมคติ เป็นฉนวนและไม่มีแรงเสียดทาน



รูปที่ ก.1.3 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ก.1.4 เป้าหมายการคำนวณ

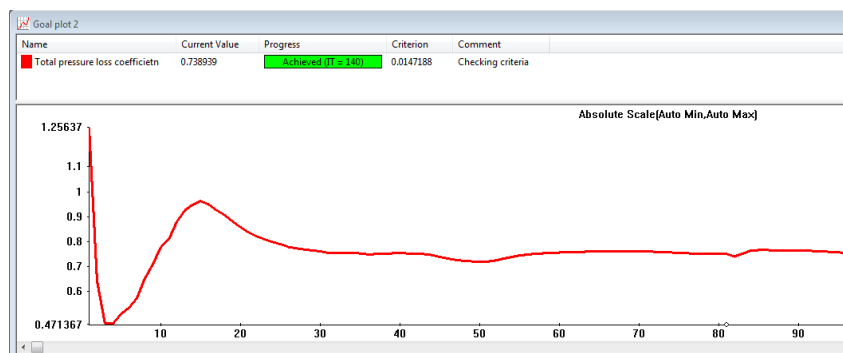
- เราต้องการทราบค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียทางไฮดรอลิก ซึ่งได้จากสมการที่ ก.1
- ซึ่งสามารถระบุในโปรแกรมได้ดังนี้
$$K_s = \frac{(\text{SG Average Total Pressure}(\text{inlet}) - \text{SG Average Total Pressure}(\text{outlet}))}{(\text{GG Average Density1}) * \{\text{Inlet Velocity1:Velocity normal to face}\}^2/2}$$

ก.1.5 รายละเอียดของกริด

- ความละเอียดของกริดอยู่ในระดับที่ 8 (สูงสุด)
- จำนวนกริดในแนวแกน x = 116, y=12, z=1
- แบ่งชนิดออกเป็น แบบ Fluid cell = 300, แบบ Partial cell=84

ก.1.6 ผลลัพธ์การลู่เข้า

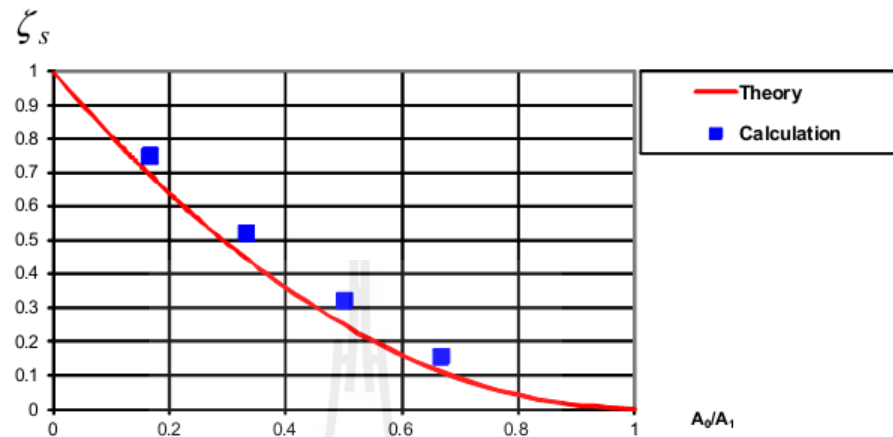
- สัมประสิทธิ์การสูญเสียทางไฮดรอลิกมีการลู่เข้าที่ค่า 0.738939 จาก 140 รอบการคำนวณ



รูปที่ ก.1.4 แสดงผลลัพธ์การลู่เข้า

ก.1.7 ผลลัพธ์ของความสูญเสียทางไฮดรอลิกเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี

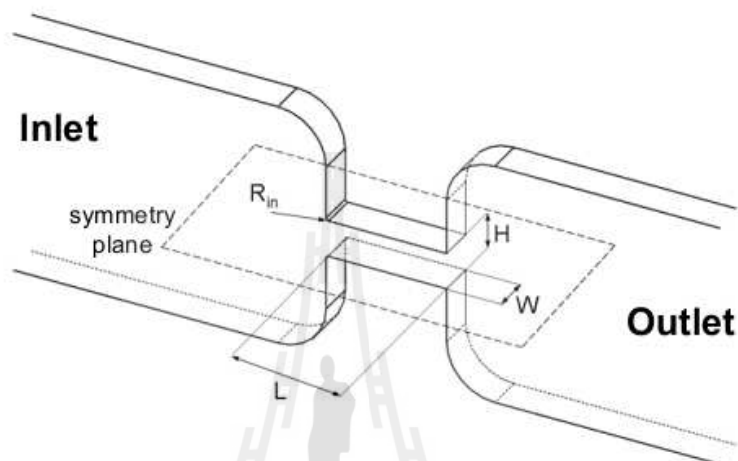
- ค่า ζ_s ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Flow Simulation มีค่าที่มากกว่าค่าทางทฤษฎีประมาณ 4.5-7.9 %



รูปที่ ก.1.5 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณจากโปรแกรม Flow Simulation และการคำนวณจากสมการ

ก.2 การเกิดโพรงอากาศในหัวฉีดแบบคอคอด (Isothermal Cavitation in a Throttle Nozzle)

ในตัวอย่างนี้เราจะทำการพิสูจน์การใช้งาน โปรแกรม SolidWorks Flow Simulations กับ การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดลองของการเกิดโพรงอากาศในหัวฉีดคอคอดที่มีของเหลวไหล ผ่านในวงการอุตสาหกรรมซึ่งมีความเป็นฉนวน ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะทำการวิเคราะห์โดย ทำการตัดผลกระทบจากอุณหภูมิออกไป รูปร่างของช่องการไหลคอคอดได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ xx



รูปที่ ก.2.1 รูปร่างและขนาดของช่องทางการไหล : $L = 1\text{ mm}$, $H = 0.299\text{ mm}$, $W = 0.3$

$$R_{in} = 0.02\text{ mm}$$

โดยที่ของเหลวที่ใช้พิจารณาคือ น้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิ 30 °C ถูกอัดที่ทางเข้าวัดความดันได้ 100 bar และความดันที่ทางออกถูกพิจารณาที่สภาวะที่แตกต่างกัน จาก 10-70 bar คุณสมบัติของน้ำมันดีเซล ที่สภาวะดังกล่าวถูกแสดงไว้ดังตารางที่ ก.2.1

ตารางที่ ก.2.1 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิ 30 °C

ความหนาแน่น (kg/m ³)	836
มวลโมเลกุล (kg/mol)	0.198
ความหนืดจลน์ (Pa*s)	0.0025
ความดันอิมพัลส์ (Pa)	2000

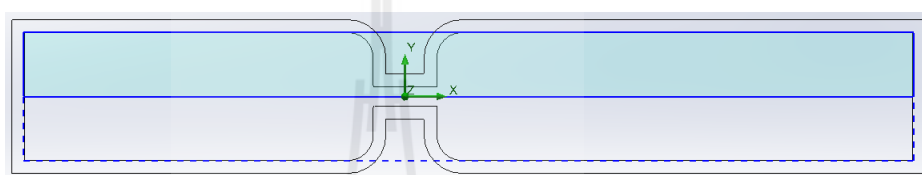
จุดประสงค์ของการคำนวณคือ เพื่อที่จะทราบถึงพฤติกรรมการเกิดโพรงอากาศภายใต้ สภาวะที่แตกต่างกันของหัวฉีด และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณใน โปรแกรมกับ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเนื่องจากช่องทางไหลมีรูปร่างที่สมมาตร ดังนั้นเราจะพิจารณาแบบจำลองของหัวฉีดนี้แค่เพียงครึ่งเดียว

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ได้ถูกแสดงไว้เป็นหัวข้อ ดังนี้

ก.2.1 ขอบเขตการคำนวณ

- ขอบเขตการคำนวณถูกพิจารณาในแบบ 3 มิติ แต่เนื่องจากแบบจำลองมีความสมมาตรในแนวแกน Y ทำให้เราสามารถพิจารณาแค่เพียงครึ่งเดียวดังกรอบสี่เหลี่ยมสีฟ้าได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ ก.2.2



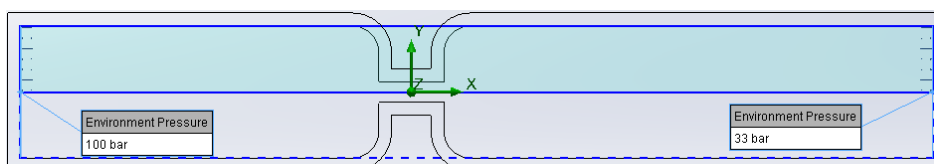
รูปที่ ก.2.2 แสดงขอบเขตการคำนวณ

ก.2.2 เงื่อนไขตั้งต้น

- ของไหลคือน้ำมันดีเซล คุณสมบัติดังตารางที่ ก.2.1
- ความดันภายนอก 20 bar
- อุณหภูมิ 303.15 K
- สมมติว่าในน้ำมันดีเซลมีส่วนผสมของอากาศเจือจางอยู่ด้วย โดยที่ค่าเจือจางมีค่าอยู่ที่ 0.0001

ก.2.3 เงื่อนไขขอบเขต

- แรงดันที่ทางเข้าขนาด 100 bar
- แรงดันที่ทางออกถูกพิจารณาในสภาวะที่แตกต่างกันจาก 10 -70 bar



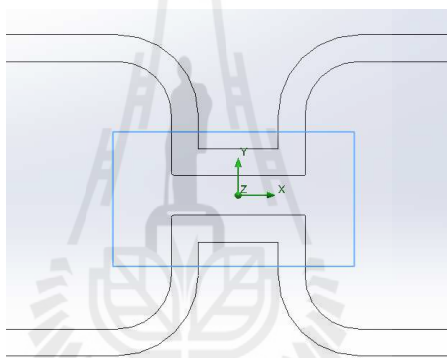
รูปที่ ก.2.3 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ก.2.4 เป้าหมายการคำนวณ

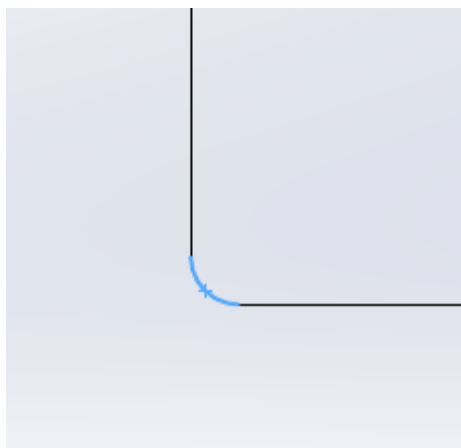
- ความหนาแน่นเฉลี่ยในหัวฉีดไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- อัตราการไหลเชิงมวลในหัวฉีดไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- อัตราการไหลเชิงมวลที่ทางเข้าและทางออกไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ก.2.5 รายละเอียดของกริด

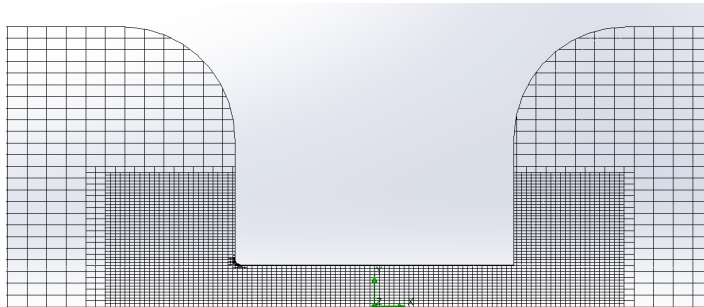
- กริดเริ่มต้น (Initial mesh) แบ่งจำนวนกริดในแนวแกน $X = 200$, $Y = 24$, $Z = 4$
- สร้าง local mesh เพิ่มเติมบริเวณคอคอด ดังรูปที่ ก .2.4 และ ก .2.5
- รายละเอียดของกริดหลังจากสร้างเสร็จแล้ว ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ ก.2.6 แบ่งชนิดออกเป็นแบบ Fluid cell = 65,276 และแบบ Partial cell = 30,264



รูปที่ ก.2.4 การสร้างกริดเพิ่มเติมบริเวณคอคอด



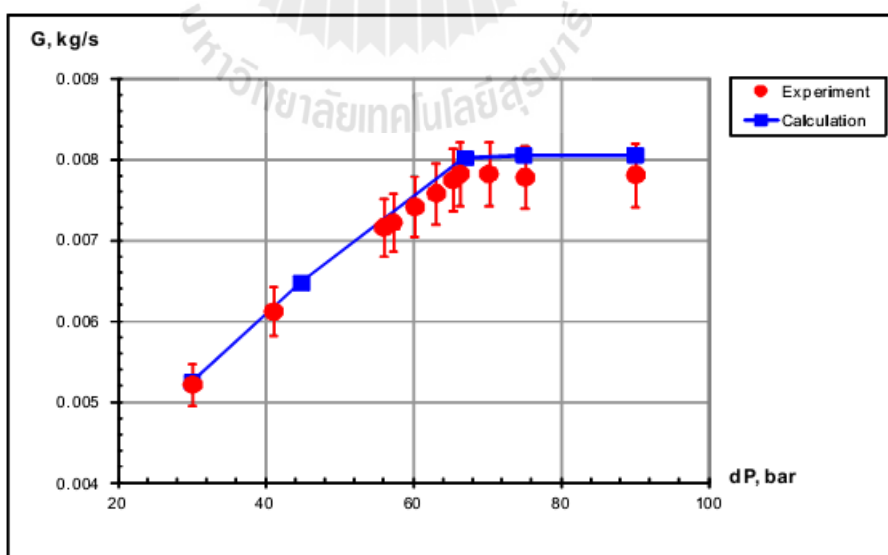
รูปที่ ก.2.5 การสร้างกริดเพิ่มเติมบริเวณมุมทางเข้า



รูปที่ ก.2.6 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการคำนวณ

ก.2.6 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณกับการทดลอง

- ข้อมูลจากการทดลองและผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยโปรแกรม **Flow Simulation** แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันที่มีผลต่ออัตราการไหลไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อความแตกต่างของความดันมีค่าที่มากขึ้นระหว่างทางเข้าและทางออกจะส่งผลให้อัตราการไหลสูงขึ้นจนถึงค่า **dP** ประมาณ **70 bar** อัตราการไหลเชิงมวลจึงมีค่าคงที่
- ความแตกต่างระหว่างผลจากการทดลองและผลลัพธ์จากการคำนวณมีค่าที่น้อยกว่า 5%



รูปที่ ก.2.7 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง ความแตกต่างของความดัน และ อัตราการไหลเชิงมวล ด้วยผลลัพธ์จาก Flow Simulation และข้อมูลจากการทดลอง

ก.3 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใต้การไหลแบบสม่ำเสมอ (Particles Trajectories in Uniform Flows)

ในตัวอย่างนี้จะเป็นการพิสูจน์การใช้ความสามารถของโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations ในการทำนายการเคลื่อนตัวของอนุภาคในการไหลของก๊าซ

ในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations นั้นจะทำการคำนวณการเคลื่อนตัวของอนุภาคได้หลังจากทำการคำนวณในส่วนต่างๆไหลเรียบร้อยแล้ว ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะคงตัว หรือสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มวลของอนุภาคและอัตราการไหลเชิงปริมาตรนั้นมีปริมาณที่น้อยกว่าของไหล ดังนั้น อิทธิพลของการเคลื่อนที่และอุณหภูมิ ของอนุภาคนั้นจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ ก.3.1

$$m \frac{dV_p}{dt} = - \frac{\rho_f (V_f - V_p) \cdot |V_f - V_p|}{2} C_d A + F_g \quad (\text{ก.3.1})$$

เมื่อ m คือ มวลของอนุภาค,
 t คือ เวลา,
 V_p และ V_f คือ ความเร็วของอนุภาค และ ของไหล ตามลำดับ,
 คือ ความหนาแน่นของไหล,
 คือ สัมประสิทธิ์แรงดึงของอนุภาค
 คือ แรงเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

อนุภาคจะถูกพิจารณาว่า ไม่มีการหมุน และมีมวลที่คงตัว ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงดึงของอนุภาค จะสามารถหาได้จาก สมการของ Henderson's semi-empirical ที่สถานะความเร็วต่ำมากๆของอนุภาค การเคลื่อนตัวของอนุภาคจะขึ้นกับของไหล ซึ่งทำให้ Mach number ของความเร็วสัมพัทธ์ >0 จะทำให้ค่า C_d มีค่าดังนี้

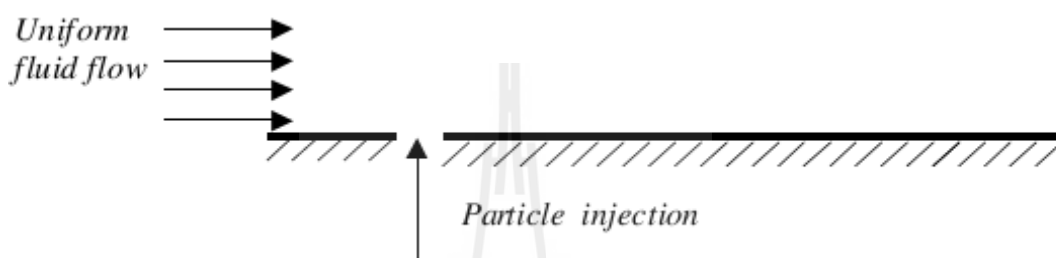
$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4.12}{1 + 0.03 \cdot Re + 0.48 \sqrt{Re}} + 0.38 \quad (\text{ก.3.2})$$

เมื่อ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) หาได้จาก

$$Re = \frac{\rho_f |V_f - V_p| d}{\mu}$$

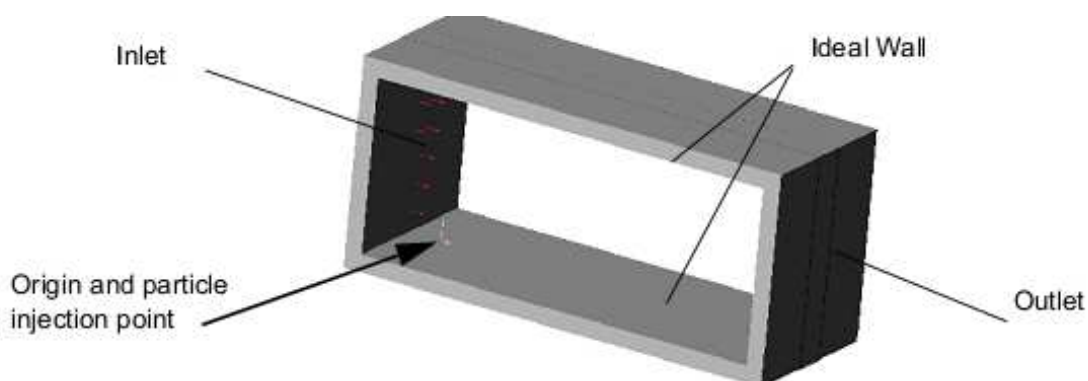
(ก.3.3)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และ u คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ของๆไหล โดยการพิสูจน์แบบจำลอง Flow Simulation จะแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบในการฉีดอนุภาคซึ่งตั้งฉากกับกับการไหลที่ทางเข้าแบบสม่ำเสมอ ดังรูปที่



รูปที่ ก.3.1 แสดงทิศทางการปล่อยอนุภาคสู่การไหลแบบสม่ำเสมอ

รูปร่างของแบบจำลองได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ ก.3.2 ผนังด้านบนและด้านล่างนั้นกำหนดให้เป็นแบบอุดมคติ ความยาวของช่องทางการไหล $L = 0.233$ m, ความสูง $H = 0.12$ m, ความหนาของผนัง = 0.01 m, ความเร็วที่ทางเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ และมีชั้นการไหลเป็นแบบ laminar ส่วนที่ทางออกถูกกำหนดให้เป็นความดันบรรยากาศ



รูปที่ ก.3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

โดยการพิสูจน์จะแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

- กรณีที่มีค่า Reynolds number มีค่าที่ต่ำมากๆ คือ $Re=0.1$ (ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า = 0.002 m/s), อนุภาคที่เป็นท่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d=0.5$ mm ถูกฉีดมาด้วยความเร็ว 0.002 m/s ตั้งฉากกับพื้น
- กรณีที่มีค่า Reynolds number มีค่าที่สูงมากๆ คือ $Re=10e5$ (ความเร็วของน้ำที่ทางเข้า = 10 m/s), อนุภาคที่เป็นเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d=10$ mm ถูกฉีดมาด้วยความเร็ว 1,2,3 m/s ตั้งฉากกับพื้น
- กรณีที่มีอนุภาคที่เป็นเหล็กถูกฉีดออกมาด้วยความเร็ว 1.34 m/s ทำมุม 63.44 องศา กับพื้น และมีแรงดึงดูดของโลกที่ 9.81 m/s² นำมาพิจารณา ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า 0.6 m/s, ขนาดของอนุภาคเหล็ก $d=10$ mm

ในกรณี ที่ 1 เนื่องจากค่า Re มีค่าที่น้อยมากๆ ค่า C_d จากสมการที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับ $C_d=24/Re$ และการไม่พิจารณาแรงดึงดูดของโลกทำให้สมการที่ 3.1 ที่ใช้ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งในแนวแกน x และ แกน y สามารถพิจารณาได้จาก

$$X(t) = X|_{t=0} + V_{fx} \cdot t + \frac{d^2 \rho_p}{18\mu} (V_{px}|_{t=0} - V_{fx}) \cdot \exp\left(-\frac{18\mu}{d^2 \rho_p} t\right)$$

$$Y(t) = Y|_{t=0} + V_{fy} \cdot t + \frac{d^2 \rho_p}{18\mu} (V_{py}|_{t=0} - V_{fy}) \cdot \exp\left(-\frac{18\mu}{d^2 \rho_p} t\right)$$

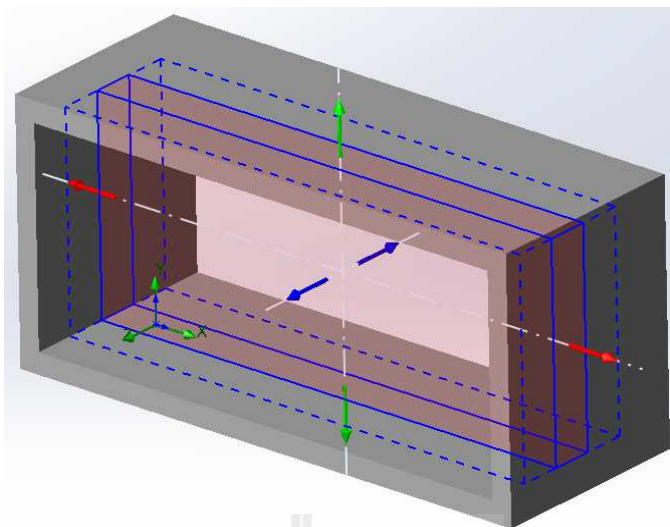
(ก.3.4)

เมื่อ V_{fx} , V_{px} , V_{fy} , V_{py} คือ ส่วนประกอบของความเร็วของอนุภาคไหลและอนุภาคในแนวแกน X และ Y ตามลำดับ, ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations

ก.3.1 ขอบเขตการคำนวณ

เนื่องจากแบบจำลองตั้งต้นมีรูปร่างที่สมมาตร การพิจารณาสร้างขอบเขตการคำนวณในแบบจำลองนี้จะถูกพิจารณาให้เป็นแบบ 2 มิติ ขอบเขตการคำนวณได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ ก.3.3 ในบริเวณกรอบสีแดง



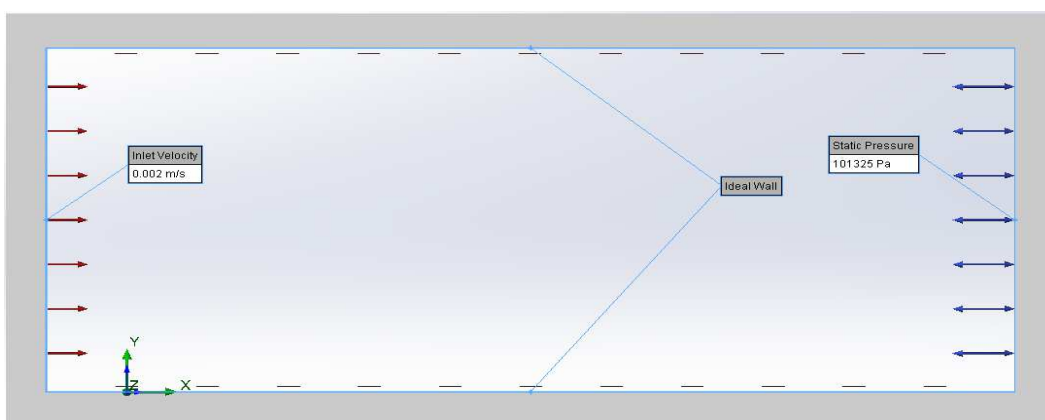
รูปที่ ก.3.3 ขอบเขตการคำนวณแบบ 2 มิติ

ก.3.2 เงื่อนไขตั้งต้น

- สภาพแวดล้อมที่ ความดันบรรยากาศ $P=101325$ Pa, อุณหภูมิ $T=293.2$ K

ก.3.3 เงื่อนไขขอบเขต

- ความเร็วทางเข้า ในแนวแกน X ที่ 0.002 m/s รูปแบบการไหลเป็นไปแบบ Laminar
- สภาพที่ทางออกถูกกำหนดด้วยความดันบรรยากาศ
- ผิวด้านบนและล่างถูกกำหนดให้เป็นแบบอุดมคติ คือ ไม่มีแรงเสียดทาน และเป็นฉนวน



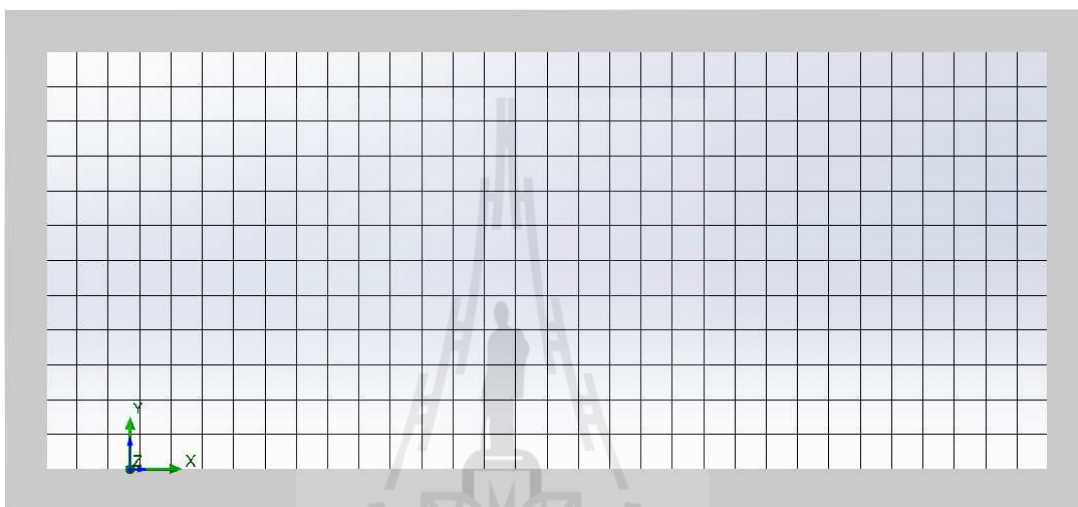
รูปที่ ก.3.4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ก.3.4 เป้าหมายการคำนวณ

- ความดันสถิตย์ที่ทางเข้ามีการลู่เข้า

ก.3.5 รายละเอียดของกริด

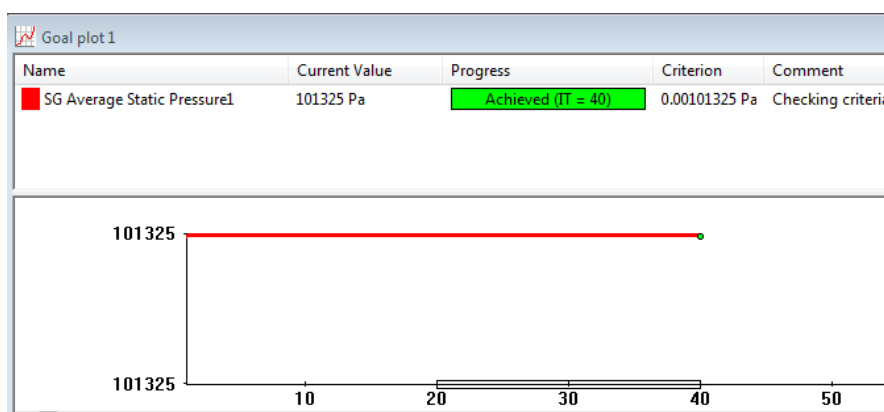
- ความละเอียดของกริดอยู่ในระดับที่ 5
- จำนวนกริดในแนวแกน $x = 32$, $y=12$, $z=1$
- แบ่งชนิดออกเป็น แบบ Fluid cell = 300, แบบ Partial cell=84



รูปที่ ก.3.5 แสดงรูปแบบของกริดที่ใช้ในการคำนวณ

ก.3.6 ผลลัพธ์การลู่เข้า

- ความดันสถิตย์มีการลู่เข้าที่ค่า 101325 Pa จากจำนวนรอบการคำนวณที่ 40 ครั้ง



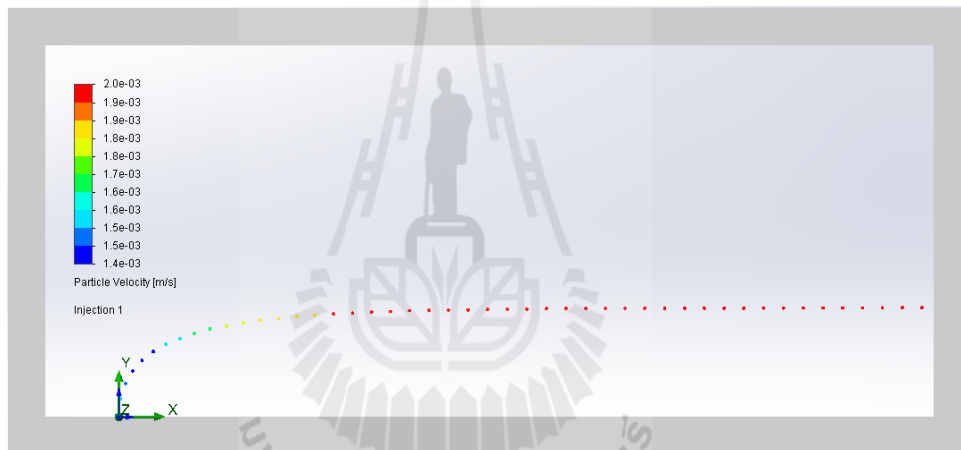
รูปที่ ก.3.6 แสดงการลู่เข้าของเป้าหมายการคำนวณ

ก.3.7 การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

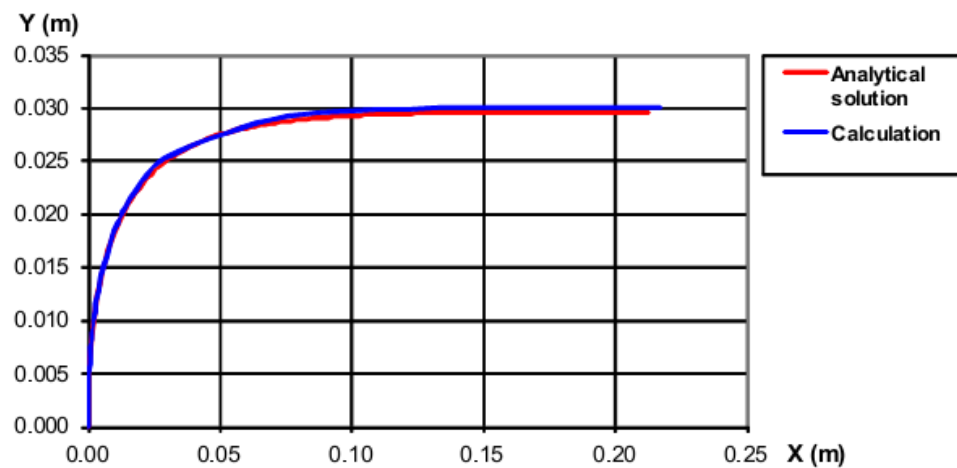
- อนุภาค ทอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm ถูกฉีดออกจาก จุด 0,0,0 ที่ความเร็วสัมบูรณ์ $V_{px}=0$, $V_{py}=0.002$ m/s และ $V_{pz}=0$
- คุณลักษณะของผนังถูกกำหนดให้เป็นแบบไม่สะท้อนกลับ

ก.3.8 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การเคลื่อนตัวของอนุภาค

- พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของอนุภาคทองจากการคำนวณในโปรแกรม Flow Simulation และการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการ ได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ
- จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลอง Flow Simulations และ การคำนวณจากสมการมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก



รูปที่ ก.3.7 การเคลื่อนตัวของอนุภาคทองจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations



รูปที่ ก. 3.8 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใต้รูปแบบการไหลแบบสม่ำเสมอที่ $Re=0.1$ จากการคำนวณด้วย Flow Simulation เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีทางด้าน Analytical

ในกรณี ที่ 2 เนื่องจากค่า Re มีค่าที่มาก ค่า Cd จากสมการที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับ $Cd=0.38$ และการไม่พิจารณาแรงดึงดูดของโลกทำให้สมการที่ 1 ที่ใช้ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งในแนวแกน x และ แกน y สามารถพิจารณาได้จาก

$$Y(t) = Y|_{t=0} + V_{fy} \cdot t + \frac{\rho_p d}{0.285\rho} (V_{py}|_{t=0} - V_{fy}) \cdot \ln\left(1 + \frac{0.285\rho}{\rho_p d} t\right)$$

$$X(t) = X|_{t=0} + V_{fx} \cdot t + \frac{\rho_p d}{0.285\rho} (V_{px}|_{t=0} - V_{fx}) \cdot \ln\left(1 + \frac{0.285\rho}{\rho_p d} t\right) \quad (ก.3.5)$$

เมื่อ V_{fx} , V_{px} , V_{fy} , V_{py} คือ ส่วนประกอบของความเร็วของอนุภาคไหลและอนุภาคในแนวแกน X และ Y ตามลำดับ, ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค และ $V_{py}(t=0)$ มีค่าเท่ากับ 1,2,3 m/s

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations

ก.3.9 ขอบเขตการคำนวณ

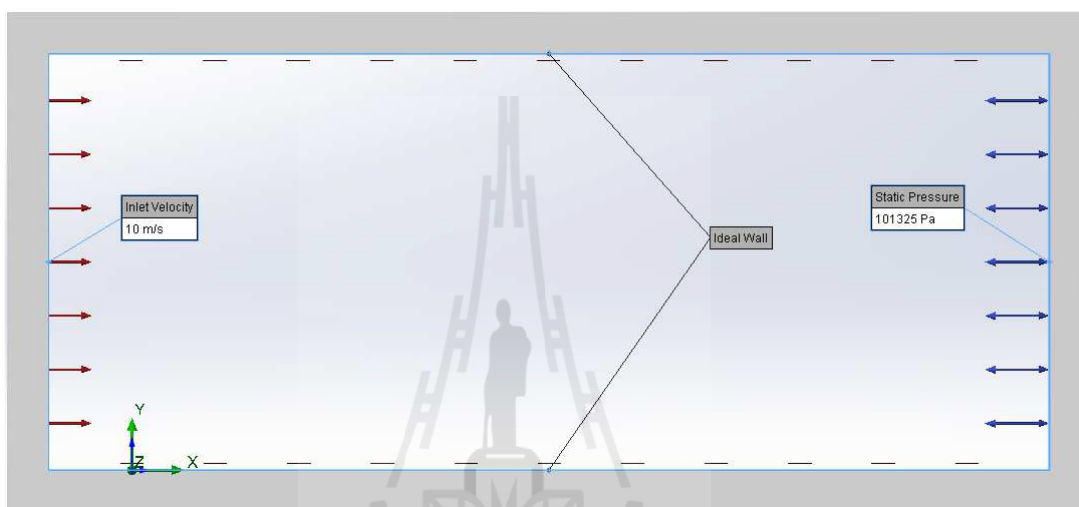
- รายละเอียดเหมือนกับกรณีที่ 1 ในรูปที่ ก.3.1

ก.3.10 เงื่อนไขตั้งต้น

- รายละเอียดเหมือนกับกรณีที่ 1

ก.3.11 เงื่อนไขขอบเขต

- ความเร็วของน้ำที่ทางเข้า ในแนวแกน X ที่ 10 m/s รูปแบบการไหลเป็นไปแบบ Turbulent ($Re=10e5$)
- สภาพที่ทางออกถูกกำหนดด้วยความดันบรรยากาศ
- ผิวด้านบนและล่างถูกกำหนดให้เป็นแบบอุดมคติคือ ไม่มีแรงเสียดทาน และเป็นฉนวน



รูปที่ ก.3.9 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ก.3.12 เป้าหมายการคำนวณ

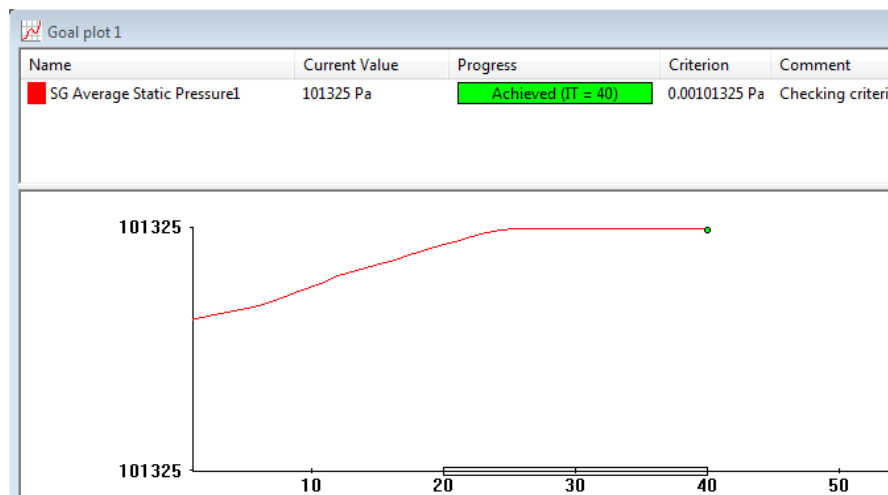
- ความดันสถิตย์ที่ทางเข้ามีค่าที่คงที่ เหมือนกับกรณีที่ 1

ก.3.13 รายละเอียดของกริด

- รายละเอียดเหมือนกับกรณีที่ 1 ในรูปที่ ก.3.5

ก.3.14 ผลลัพธ์การลู่เข้า

- ความดันสถิตย์มีการลู่เข้าที่ค่า 101325 Pa จากจำนวนรอบการคำนวณที่ 40 ครั้ง



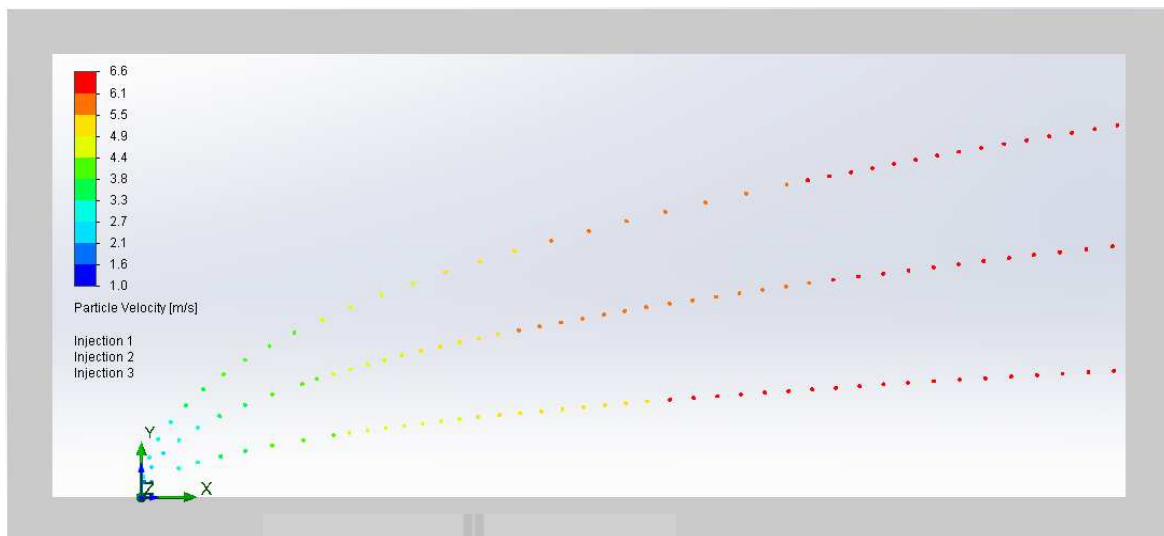
รูปที่ ก.3.10 แสดงการดูเข้าของเป้าหมายการคำนวณ

ก.3.15 การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

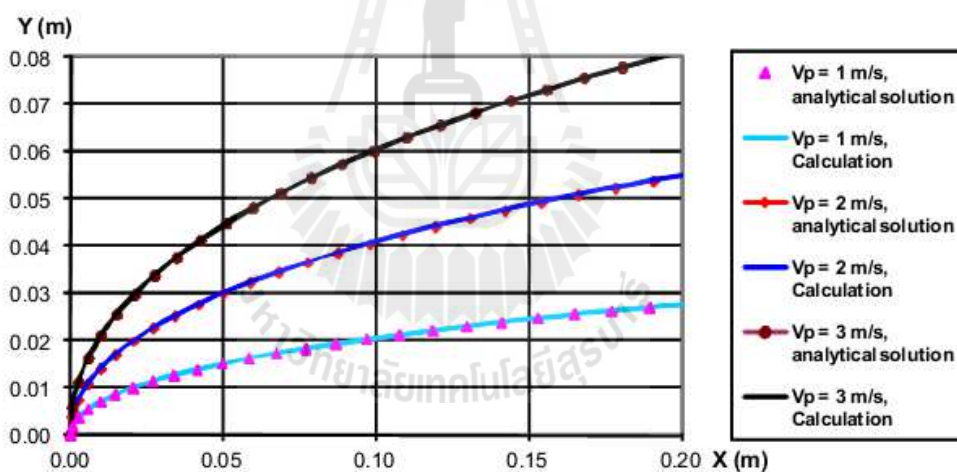
- แบบจำลองที่ 1 อนุภาค เหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ถูกฉีดออกจาก จุด 0,0,0 ที่ความเร็วสัมบูรณ์ $V_{px}=0$, $V_{py}=1$ m/s และ $V_{pz}=0$
- แบบจำลองที่ 2 อนุภาค เหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ถูกฉีดออกจาก จุด 0,0,0 ที่ความเร็วสัมบูรณ์ $V_{px}=0$, $V_{py}=2$ m/s และ $V_{pz}=0$
- แบบจำลองที่ 3 อนุภาค เหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ถูกฉีดออกจาก จุด 0,0,0 ที่ความเร็วสัมบูรณ์ $V_{px}=0$, $V_{py}=3$ m/s และ $V_{pz}=0$
- คุณลักษณะของผนังถูกกำหนดให้เป็นแบบ ไม่สะท้อนกลับทุกแบบจำลอง

ก.3.16 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การเคลื่อนตัวของอนุภาค

- พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอนุภาคเหล็กจากการคำนวณใน โปรแกรม Flow Simulation และการเปรียบเทียบกับการคำนวณจากสมการ ได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ ก.3.11 และ ก.3.12 ตามลำดับ
- จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลอง Flow Simulations และ การคำนวณจากสมการมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก



รูปที่ ก.3.11 การเคลื่อนตัวของอนุภาคเหล็กที่ความเร็ว V_y ที่ 1, 2 และ 3 m/s จากการคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations



รูปที่ ก.3.12 การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใต้รูปแบบการไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) ที่ $Re=10e5$ จากการคำนวณด้วย Flow Simulation เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีทางด้าน Analytical

ในกรณี ที่ 3 การเคลื่อนตัวของอนุภาคถูกควบคุมไว้ด้วยแรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียว สัมประสิทธิ์แรงดึงของอนุภาคมีค่าใกล้ 0 ดังนั้นสมการที่ ก.3.1 สามารถลดรูปได้ดัง สมการที่ ก.3.6

$$Y = Y|_{t=0} + V_{py}|_{t=0} t + g_y \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{X - X|_{t=0}}{V_{px}} \right)^2 \quad (\text{ก.3.6})$$

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations

ก.3.17 ขอบเขตการคำนวณ

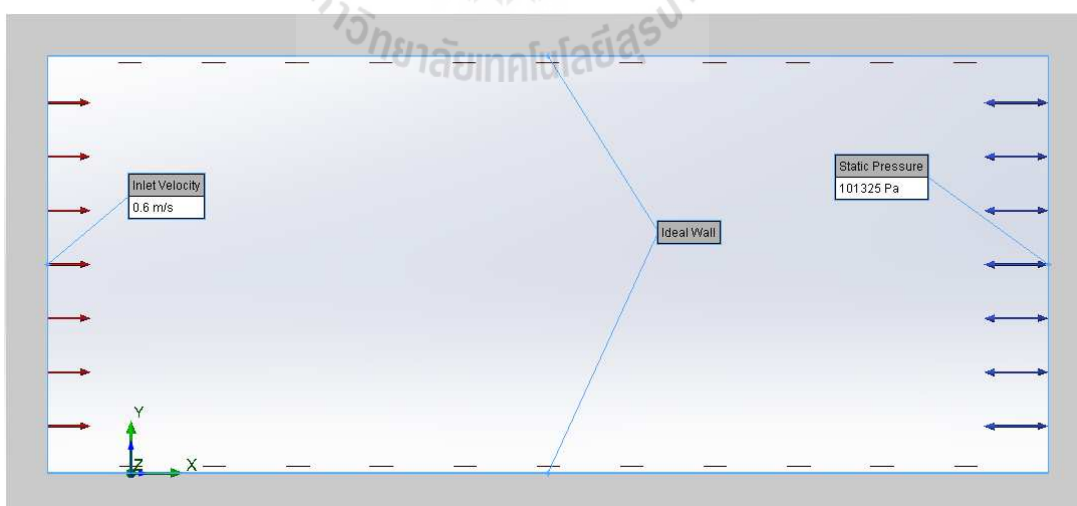
- รายละเอียดเหมือนกับกรณีที่ 1 ในรูปที่ ก.3.3

ก.3.18 เงื่อนไขตั้งต้น

- รายละเอียดเหมือนกับกรณีที่ 1

ก.3.19 เงื่อนไขขอบเขต

- ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า ในแนวแกน X ที่ 0.6 m/s
- สภาพที่ทางออกถูกกำหนดด้วยความดันบรรยากาศ
- ผิวด้านบนและล่างถูกกำหนดให้เป็นแบบอุดมคติ คือ ไม่มีแรงเสียดทาน และเป็นฉนวน



รูปที่ ก.3.13 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ก.3.20 เป้าหมายการคำนวณ

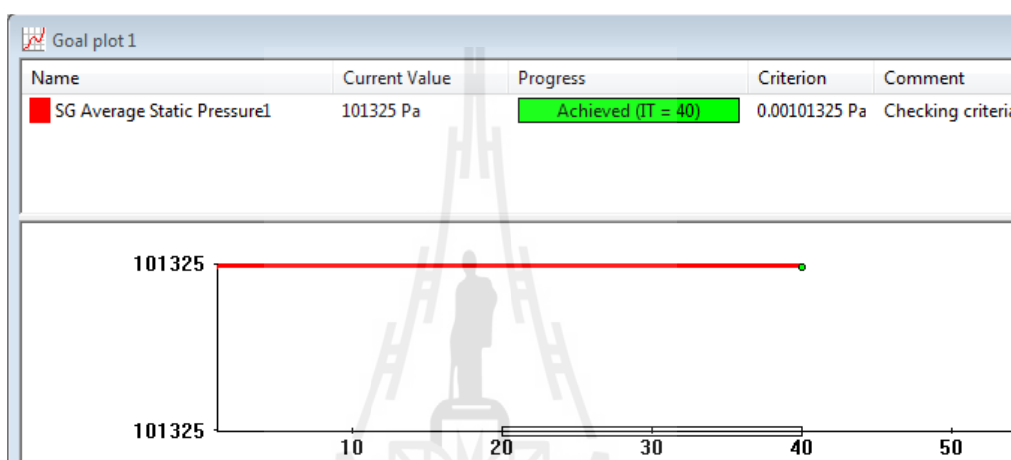
- ความดันสถิตย์ที่ทางเข้ามีค่าที่คงที่ เหมือนกับกรณีที่ 1

ก.3.21 รายละเอียดของกริด

- รายละเอียดเหมือนกับกรณีที่ 1 ในรูปที่ 5

ก.3.22 ผลลัพธ์การลู่เข้า

- ความดันสถิตย์มีการลู่เข้าที่ค่า 101325 Pa จากจำนวนรอบการคำนวณที่ 40 ครั้ง



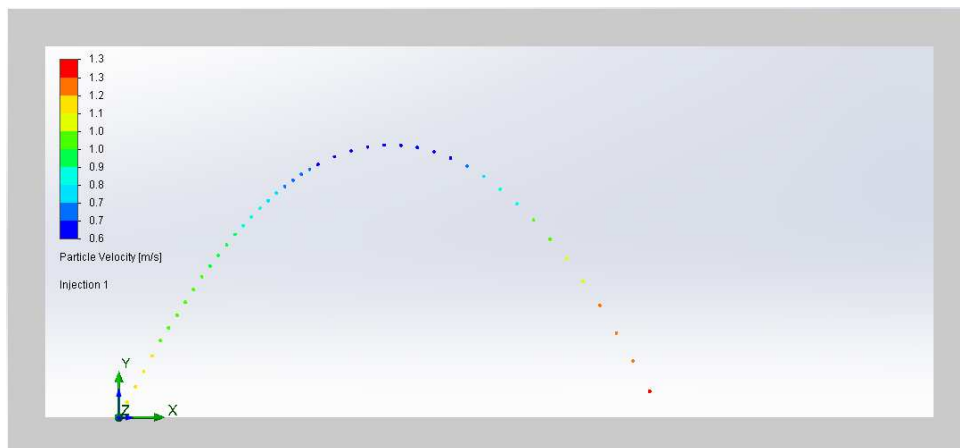
รูปที่ ก.3.14 แสดงการลู่เข้าของเป้าหมายการคำนวณ

ก.3.23 การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

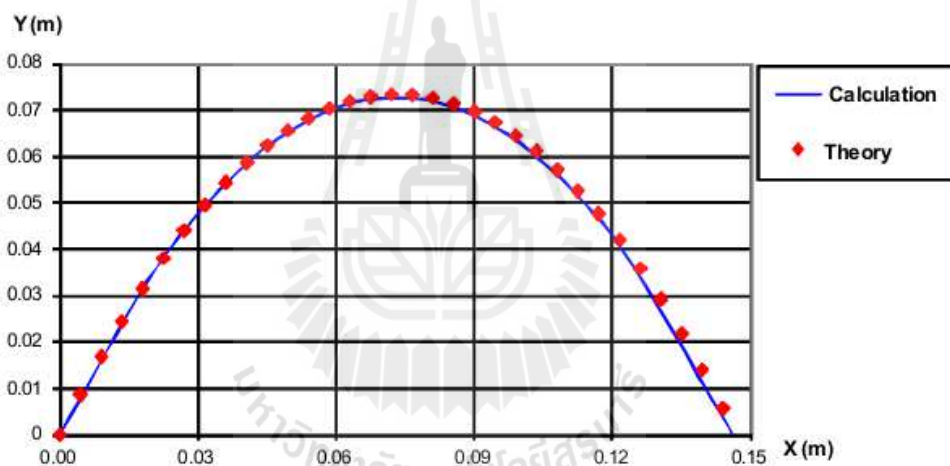
- อนุภาค เหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ถูกฉีดออกจาก จุด 0,0,0 ที่ความเร็วสัมบูรณ์ $V_p = 1.34$ m/s ทำมุม 63.44 องศาขึ้น ซึ่งสามารถระบุเป็นความเร็วส่วนประกอบในแนวแกน x,y,z ได้คือ $V_{px}=0.6$, $V_{py}=1.2$ m/s และ $V_{pz}=0$
- คุณลักษณะของผนังถูกกำหนดให้เป็นแบบ ไม่สะท้อนกลับทุกแบบจำลอง

ก.3.24 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การเคลื่อนตัวของอนุภาค

- พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอนุภาคเหล็กจากการคำนวณในโปรแกรม Flow Simulation และการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการ ได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ
- จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลอง Flow Simulations และการคำนวณจากสมการมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก



รูปที่ ก.3.15 การเคลื่อนตัวของอนุภาคเหล็กที่ความเร็ว V_p ที่ 1.34 m/s ทำมุม 63.44 องศา กับพื้นจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulations



รูปที่ ก.3.16 การเคลื่อนตัวของอนุภาคเหล็กภายใต้รูปแบบการไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) จากการคำนวณด้วย Flow Simulation เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีทางด้าน Analytical

The logo of Sakon Nakhon University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure standing on a pedestal, with a large 'S' and 'N' above it, all enclosed within a circular border containing the university's name in Thai script.

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

เอกรินทร์ จินดาพี และกิริติ สุกฤษณ์. การจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศในขณะขั้นตอนการ
กำจัดฝุ่นละอองในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. The Fifth International Data
Storage Technology Conference (DST-CON 2013). 14-15 กุมภาพันธ์ 2556 ณ
โรงแรมสุโกศล, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย.



SIMULATION OF AIRFLOW FOR THE PROCESS OF PARTICLES SUCTION IN HDD MANUFACTURING PROCESS

Aggarin Jindaphee¹, Keerati Suluk²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology,

Nakhon Ratchasima, Thailand

¹aggarin.jindaphee@seagate.com

²keerati@sut.ac.th

Abstract— The airflow field and particle trajectories inside hard disk drive (HDD) during operations of suction tool are investigated in this study using commercial software SolidWorks Flow Simulation. The airflow field inside HDD is simulated using Navier-Stokes equations. The effects of using the various setting condition such as Air inlet channel height, Outlet volume flow rate, Suction probe height and Suction chamber geometry are assessed in this study. Then, the particles of different sizes and materials are initiated from various critical locations to verify the removal efficiency for each model. After that the model was optimized in order to improve the suction capability. Based on the investigation in the simulation models, the particles removal efficiency to be different according to each model. Results of this research will be useful for researchers to do the further improvements of the suction tools. Moreover, improving the particles suction process will help to expand the HDDs lifetime and reliability.

Keywords— Hard Disk Drive (HDD), Computational Fluid Dynamics (CFD), Particle Trajectories, Suction Tool, SolidWorks Flow Simulation

I. INTRODUCTION

In the HDD manufacturing process, the particle is the important factor that affects to the HDD performance. Therefore, the HDD manufacturer has focused on their process to controlling and eliminating the particles. Currently, at the assembly process the production line will be installed the suction tools onto every steps after the screws was secured, since they found that the screws securing process is the major cause to generated the particles. However the current particles removal efficiency still need to be improving even though a lot of limitations such as the time conflict with the production line, the cost of fabricating the new tool that unpredictable the result, etc. All of those reasons become to the limitations of tooling designer to testing the new ideas of improving the current efficiency of the suction tool. Therefore, the capability of commercial computational fluid dynamic software will be used to demonstrate and helps the tooling designer to eliminate those limitations.

Previously some studies of the particle tracking in HDD has been done. Narongwit Yimsiriwatana and Thira Jearsiripongkul. [1]. Investigated that the most appropriate operating height for the suction tool design is at 5 mm above the target area. Ningyu L, Zhimin He, Craig Kok Tung Chow and Han Tong Loh. [2] Investigated that there is no difference on the particles distributions in HDD between the Spherical particles and Tetrahedron particles. Hiroyuki Kubotera, Dae-

WeeKong, Et al. [3] Studies on the time variable air flow inside the HDD and investigated that the air flow pattern around the OD is the turbulent and the laminar at the ID. [4] Was improved the comprehensive properties of the draining-sand jet pump by optimizing the diameter fitting of the nozzle and the throat.

II. THEORY

A. GOVERNING EQUATIONS

Flow Simulation solves the Navier-Stokes equations, which are formulations of mass, momentum and energy conservation laws for fluid flows. The equations are supplemented by fluid state equations defining the nature of the fluid, and by empirical dependencies of fluid density, viscosity and thermal conductivity on temperature. To predict turbulent flows, the Favre-averaged Navier-Stokes equations are used, where time-averaged effects of the flow turbulence on the flow parameters are considered, whereas the other, i.e. large-scale, time-dependent phenomena are taken into account directly. Through this procedure, extra terms known as the Reynolds stresses appear in the equations for which additional information must be provided. To close this system of equations, Flow Simulation employs transport equations for the turbulent kinetic energy and its dissipation rate, the so-called k-ε model. The conservation laws for mass, angular momentum and energy in the Cartesian coordinate system rotating with angular velocity Ω about an axis passing through the coordinate system's origin can be written in the conservation form as follows:

1) The Conservation of Mass Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

Where ρ is the fluid density

U is the fluid velocity.

2) The Conservation of Momentum Equation

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

Where S_M is a mass distributed external force $M = 1, 2, 3$

τ is the viscous shear stress tensor

3) The Conservation of Energy Equation

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla(U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_g \quad (3)$$

Where h_{tot} is the total enthalpy, related to the static enthalpy $h(T, p)$ by:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2 \quad (4)$$

λ is the thermal conductivity

S_g is the energy source

B. MESHING

The computation mesh in SolidWorks Flow Simulation is performed in a rectangular parallelepiped-shaped computational domain which boundaries are orthogonal to the axes of the Cartesian Global Coordinate System. A computational mesh splits the computational domain with a set of planes orthogonal to the Cartesian Global Coordinate System's axes to form rectangular parallelepipeds called cells. The resulting computational mesh consists of cells of the following four types:

- Fluid cells are the cells located entirely in the fluid.
- Solid cells are the cells located entirely in the solid.
- Partial cells are the cells which are partly in the solid and partly in the fluid. For each partial cells the following information is kept: coordinates of intersections of the cell edges with the solid surface and normal to the solid surface within the cell optimizations

As an illustration let us look at the example CAD model on Fig.1 and the generated computational mesh on Fig.2.

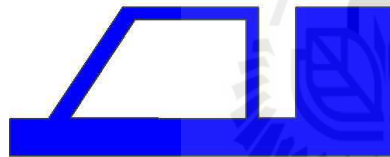


Fig. 1 The original model

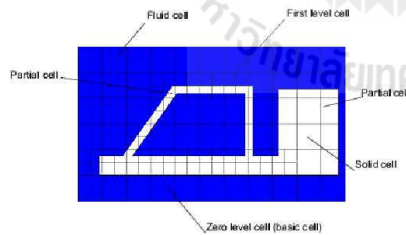


Fig. 2 The computational mesh cells of different types

C. PARTICLE TRANSPORT THEORY

Flow Simulation calculates two-phase flows as a motion of spherical liquid particles (droplets) or spherical solid particles in a steady-state flow field. Flow Simulation can simulate dilute two-phase flows only, where the particle's influence on the fluid flow (including its temperature) is negligible (e.g. flows of gases or liquids contaminated with particles). Generally, in this case the particles mass flow rate should be lower than about 30% of the fluid mass flow rate.

The particles of a specified material and constant mass are assumed to be spherical. The gravity is taken into account. And the interaction of particles with the model surfaces is taken into account by specific reflection coefficient.

Individual particles are tracked from their initiated points until they escape from the computation domain or some integration limit criterion is met.

III. SIMULATION MODELS

A. CAD MODEL GEOMETRY

1) Model M0

Let us start with the model M0 that working on the suction tool right now. When the HDD come into the station, the suction tool will provide volume flow rate which is generated by vacuum generator for each outlet about 35 liter/min for 2 second. After that the HDD will be release from the suction tool. The suction chamber is the open system. To clarify on this details the picture of the simplified 2.5" HDD and the suction tool that were used in the simulations model are shown in the Fig. 3

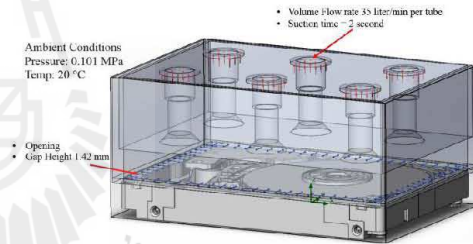


Fig. 3 Computation Domain and Suction on Tool Working Conditions

The summary of the Boundary conditions, Mesh cells and Particle Study of this model will be including in the other model in Table II, Table III and Table IV respectively.

2) Modified Conditions

The other objective of this research is to improve the particles removal efficiency. Therefore, we have been tested the ideas that related to the suction tool geometry and working condition in this research as well. The Fig. 4 to Fig. 6 will clarify on the ideas behind the modifications on each model and the Table I below will compare on the changed condition and blocking conditions for each model.

The M1 model is intend to increase the pressure difference between suction chamber and the environment pressure by reducing the opening gap about 50% from model M0 the Fig. 4 will illustrate this detail.

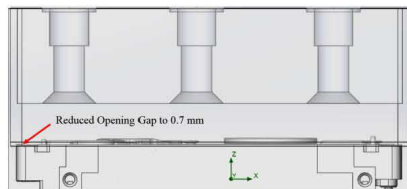


Fig. 4 The detail of model M1

The M2 model is intend to reduce the fluid volume in the suction chamber and remove the volume at the top corners of the suction chamber that we noticed from the flow behavior in the model M0 that have the swirl condition. By reducing the chamber height 50% from original and made the chamfer inside the chamber room. To clarify on this we have shown in the Fig. 5.

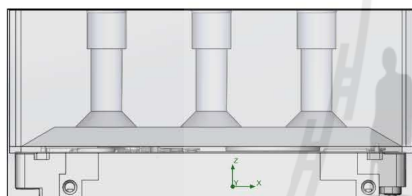


Fig. 5 The detail of model M2

The M3 model is almost the same with the model M0 except the outlet volume flow rate has been increased to 50 liter/min/probe

TABLE I
SIMULATION MODELS COMPARISON

Variable	M0	M1	M2	M3
Opening Gap	1.42 mm	1.0 mm	1.42 mm	1.42 mm
Chamber Geometry	Normal Cubic	Same M0	Volume Reduced	Same M0
Flow Rate	35 L/min	35 L/min	35 L/min	50 L/min

B. BOUNDARY CONDITIONS

The summary of the boundary conditions that setting into each model are summarized on the Table II. The Table III will be summarized on the mesh cells that have been generated for the computation in each model. And the Table IV will show the details of setting for Particles Study module in the SolidWorks Flow Simulations, all models will have the same setting conditions. The stainless steel particles has been generated from 3 interested areas, Top Magnet and the Base Plate surfaces with various size of particles. The

suction time is limited at 2 second, the particles that reached the outlet surface will be considered as removed particles. The removal efficiency will be discuss in the section IV.

TABLE II
BOUNDARY CONDITION

Variable	M0	M1	M2	M3
Fluid Volume (Liter)	0.1440	0.1440	0.1068	0.1440
Inlet	1 ATM, 20°C	1 ATM, 20°C	1 ATM, 20°C	1 ATM, 20°C
Outlet Volume Flow Rate	35 L/min	35 L/min	35 L/min	50 L/min

TABLE III
MESH INFORMATION

Model	Model Description	Fluid Cells	Partial Cells
M0	Original	161,746	253,232
M1	Reduced Opening Gap	161,746	253,232
M2	Modified Chamber Geometry	143,710	254,046
M3	Increase Volume Flow Rate	161,746	253,232

TABLE IV
PARTICLES STUDY INFORMATION

Particles Initiated Location	Size (μm)	Particles Material	Reflection Coefficient	Suction Time (second)
Top Magnet	0.5, 1.0 and 5.0	Stainless Steel	0.5	2
Top Disc				
Base Plate				

IV. RESULTS AND DISCUSSION

From the results, we have investigated that the model M0 have the pressure difference between the environment condition and suction chamber very small especially nearly the HDD surface, the simulation data from Fig. 6 and Fig. 7 shows that about 40-50 Pascal ($\approx 0.005\text{-}0.007$ Psi) was differences. The mean of pressure distribution inside the chamber is about 97.8 Pascal less than environment pressure (Fig. 8). While the models M1 and M3 shows the pressure difference is higher than the model M0 and M2.

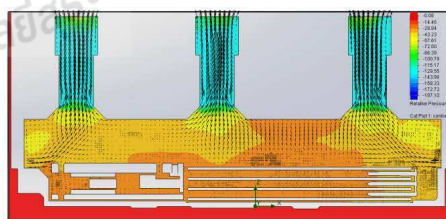


Fig. 6 The relative pressure contour plot of the model M0

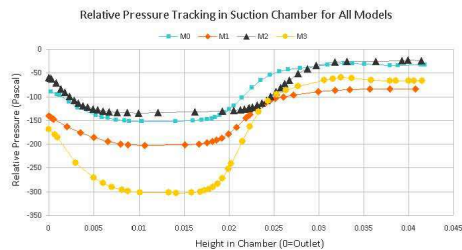


Fig. 7 The comparison of relative pressure tracking inside the suction chamber for all models

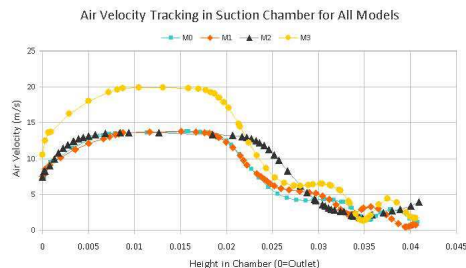


Fig. 10 The comparison of air velocity tracking inside the suction chamber for all models

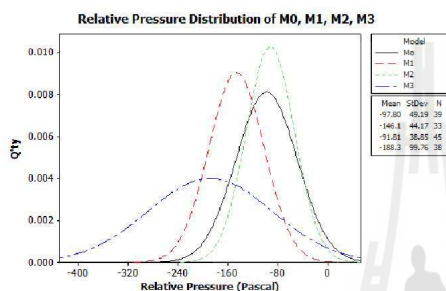


Fig. 8 The comparison of relative pressure distribution inside the suction chamber for all models

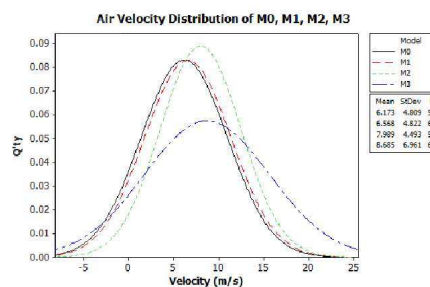


Fig. 11 The comparison of air velocity distribution inside the suction chamber for all models

From the velocity contour (Fig. 9) and velocity tracking inside the chamber (Fig. 10) we noticed that model M0 have the velocity inside suction chamber similar with model M1 and M2 while model M3 has the velocity around the suction tubes higher than other models, however the velocity around the HDD surfaces are almost the same. Fig. 11 indicated that even though model M2 has the similar velocity with other models but this model has the lowest deviation, which meant that the velocity distribution for this model is better than the other models.

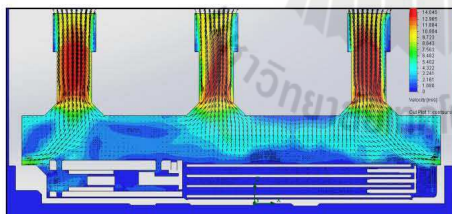


Fig. 9 The air velocity contour plot of the model M0

Form Fig. 12 and Fig. 13 are the overall particles removal efficiency sorting by simulated models, particles size and interested areas. The results of the simulated particles study from Flow Simulations indicated that model M0 have the overall removal efficiency for all sizes particles about 60%, and when compare to the another modified models, it showing that the model M0 is still higher than the other models excepts the model M2 only that looks better than the model M0. The Fig.12 also indicated that the larger particles size will gives the lower removal efficiency. The Fig. 13 indicated that removal efficiency for the Top Magnet surface and Top Disc surface are better than the Base Plate surface in every models. However the model M2 is looks better than all models in every areas. That result is related with the information of the air velocity tracking and velocity distribution that shows in Fig. 10 and Fig. 11 which is indicated that model M2 has the velocity mean higher than another models and low deviation as well.

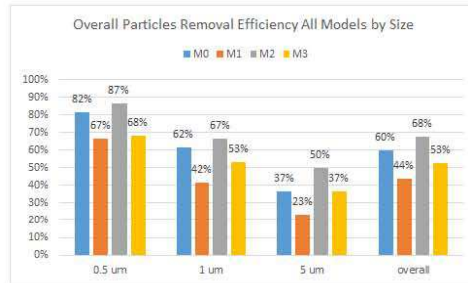


Fig. 12 The comparison of overall particles removal efficiency for all model by size

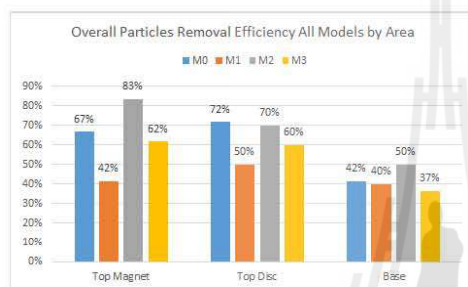


Fig. 13 The comparison of overall particles removal efficiency for all model by area

V. CONCLUSIONS

The experience of the Flow Simulations from this research is, we have investigated that the velocity distribution in the vacuum chamber is the major factor that related to the particles removal efficiency. The effective solution that we found in the model M2 is by reducing the suction chamber volume that will results to increasing the air velocity mean and lowering deviation, this should be the important strategy for the further research. However, we also found that the lacking area of removing particles is the Base Plate surface that have the low velocity. The further task of this research is to optimizing the model to improve the particles removal efficiency at the Base Plate surface that still lacking for all

model. And the important thing is to validating the candidate condition in the actual manufacturing line and compares the result between the computational model and the experimental. To compare the particles removal efficiency between model M0 vs. model M2, and experimental vs. computational, we will need to fabricating the physical prototype of the suction chamber of the model M2 and setup the evaluation in the actual production line. The 2 groups of HDDs will be doping the same quantity of particles and then load them into the difference type of suction chamber that we need to compare. The particles counter machine will be use to measuring the remaining particles after passed through the suction tool.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express gratitude for the generous support received from many individuals and company whose contribution made this paper possible. Firstly, we would like to thank every professor and committee at the Faculty of Engineering, Suranaree University for useful knowledge, advice, and comments on this paper. In addition, we would like to thank our project co-operators, which is the Seagate Technology (Thailand), for technical support and information. Moreover, we appreciated the funding and support from SUT/NECTEC/SEAGATE. Finally, we would like to thank to anyone who we did not mention above for any contribution to this paper.

REFERENCES

- [1] Narongwit Yimsriwatana and Thira Jearsiripongkul, "Airflow Simulation of Particle Suction in Hard Disk Drives Manufacturing Process," The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani, 20-22 October, 2010.
- [2] Ningyu Liu, Zhimin He, Craig Kok Tung Chow and Han Tong Loh. "A Numerical Investigation of Particle Trajectory inside Hard Disk Drives," IEEE Transactions on Magnetics, vol.47, No.7, July, 2011.
- [3] Hiroyuki Kubotera, Dae-WeeKong, YongHan Song, Takahiro Tokumura, and Cheol-Soon Kim, "Computational Fluid Dynamics and Experimental Visualization of Time-Variable Air Flow Pattern Inside Hard Disk Drives," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, No. 8, August 2012
- [4] Xu Liu, Hongchao Deng and WenxiangMa, "Numerical Analysis for Solid-Liquid Two-phase Flow Field of Draining-sand Jet Pump," Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 9 - 12, Changchun, China
- [5] SolidWorks Flow Simulation 2012 Technical Reference, SolidWorks Corp.

ประวัติผู้เขียน

นายเอกรินทร์ จินดาพิ เกิดเมื่อวันจันทร์ ที่ 8 มิถุนายน 2524 ที่อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา เริ่มการศึกษาตั้งแต่ระดับประถมศึกษาปีที่ 1 ถึง 6 ที่โรงเรียนบ้านโคกไผ่-ชนาย จังหวัดนครราชสีมา มัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึง 3 ที่โรงเรียนมหิศราธิบดี จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้ ทำการศึกษาต่อในสายอาชีพระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ที่วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา สาขาวิชาช่างยนต์และได้ศึกษาต่อในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ที่มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขาวิชาจักรกลหนัก สำเร็จการศึกษาวិชากรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เมื่อ พ.ศ. 2546 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีได้เข้า ทำงานที่ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งงาน Process Development Engineer แผนก Far East HDA Process Development ขณะทำงานได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท (บัณฑิตศึกษาทุน HDDI) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ (หลักสูตรวิชาแมคคาทรอนิกส์) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จากประสบการณ์และความรู้ที่สร้างสมจากการทำงานและการศึกษาจึงช่วยให้ ผู้วิจัยสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี จากการทำงานวิจัยได้มีบทความวิชาการที่ ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 บทความ โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ข.