



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การจำลองเชิงตัวเลขของทางเดินอนุภาคภายในเครื่องจักรอัตโนมัติ  
Numerical Simulation of Particle Trajectory inside Automation

ดร.จตุพร ทองศรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557  
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การจำลองเชิงตัวเลขของทางเดินอนุภาคภายในเครื่องจักรอัตโนมัติ  
แหล่งเงิน...รายได้....

ประจำปีงบประมาณ...2557...จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน...150,000...บาท

ระยะเวลาการทำวิจัย...1...ปี ตั้งแต่...1...ตุลาคม...2556...ถึง...30...กันยายน...2557...

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ พร้อมระบุหน่วยงานต้นสังกัด

ดร.จตุพร ทองศรี วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายใต้เกณฑ์การปนเปื้อนของอนุภาคน้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมีการติดตั้งพัดลมกรองอากาศทางด้านบนของเครื่องจักรอัตโนมัติเพื่อทำให้เกิดการไหลของอากาศภายใน โดยคาดหวังว่าการไหลของอากาศนั้นจะสามารถป้องกันอนุภาคจากภายนอก และกำจัดอนุภาคที่อยู่ภายในทำให้ลดการปนเปื้อนของอนุภาคในการผลิตได้ งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายตรวจสอบเชิงตัวเลขของทางเดินอนุภาคภายในเครื่องจักร และการใช้การไหลของอากาศดังกล่าวด้วยพื้นฐานทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้เงื่อนไขจริงของโรงงาน พบว่าพัดลมกรองอากาศให้รูปแบบการไหลของอากาศที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดการปนเปื้อนของอนุภาคในเครื่องจักรได้ ผลของงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้พัฒนาเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของอนุภาค

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การไหลของอากาศ, การปนเปื้อนของอนุภาค, เครื่องจักรอัตโนมัติ

**Research Title:** Numerical Simulation of Particle Trajectory Inside Automation

**Researcher:** Dr.Jatuporn Thongsri

**Address:** College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang

### Abstract

In a hard disk drive (HDD) manufacturing process, it is necessary to produce HDDs under a criterion of the lowest particle contamination. For this reason, fan filter units (FFUs) is installed on top of an automation machine (AM) to generate airflow inside. It is expected that the airflow can block particles from the outside and disperse particles inside the AM, causing the reduction of particle contamination in the production. This research aims to numerically investigate particle traces inside the automation and the use of airflow based on computational fluid dynamics under a condition of HDD factory. It was found that FFUs gives the optimum airflow pattern, which can reduce the particle contamination inside the AM. The results of this research can be applied to develop related machines to improve their efficiency in reducing particle contamination

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Airflow, Particle Contamination, Automation

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ การใช้เครื่องมือ เครื่องคอมพิวเตอร์ และการประสานงาน ได้รับเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดีจากเจ้าหน้าที่ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล นอกจากนี้ข้อมูลบางส่วนในการวิจัยยังได้รับการสนับสนุนจาก บริษัทซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ทั้งหมดนี้ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ดร.จตุพร ทองศรี

ผู้วิจัย

มีนาคม 2558

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจากวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ การใช้เครื่องมือ เครื่องคอมพิวเตอร์ และการประสานงาน ได้รับเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดีจากเจ้าหน้าที่ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล นอกจากนี้ข้อมูลบางส่วนในการวิจัยยังได้รับการสนับสนุนจาก บริษัทซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ทั้งหมดนี้ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ดร.จตุพร ทองศรี

ผู้วิจัย

มีนาคม 2558

## สารบัญ

## หน้า

|   |    |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                          | ก  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                       | ข  |
| กิตติกรรมประกาศ.....                          | ค  |
| สารบัญ.....                                   | ง  |
| สารบัญรูปภาพ.....                             | จ  |
| บทที่ 1: บทนำ.....                            | 1  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเนื้อหา.....     | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....              | 2  |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                    | 2  |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....                   | 2  |
| 1.5 คำสำคัญ.....                              | 2  |
| บทที่ 2: แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....     | 4  |
| บทที่ 3: วิธีดำเนินการวิจัย.....              | 5  |
| 3.1 แบบจำลองเครื่องจักรอัตโนมัติ.....         | 5  |
| 3.2 แบบจำลองอากาศและแบบจำลองเมฆ.....          | 5  |
| 3.3 การกำหนดเงื่อนไขและค่าที่จำเป็นต่างๆ..... | 5  |
| 3.4 ความถูกต้องของผลการคำนวณ.....             | 6  |
| บทที่ 4: ผลการวิจัยและการอภิปราย.....         | 8  |
| บทที่ 5: สรุปผลการวิจัย.....                  | 12 |
| บทที่ 6: ผลผลิตที่ได้จากการวิจัย.....         | 13 |
| เอกสารอ้างอิง.....                            | 14 |
| ภาคผนวก.....                                  | 15 |
| เอกสารหมายเลข1.....                           | 16 |
| เอกสารหมายเลข2.....                           | 22 |
| เอกสารหมายเลข2.....                           | 27 |
| ประวัติผู้วิจัย.....                          | 34 |

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 1: แบบจำลองของเครื่องจักรอัตโนมัติ และลักษณะการไหลของอากาศ.....  | 5  |
| รูปที่ 2: (a) แบบจำลองของอากาศ (b) แบบจำลองเมฆ และ (c) ด้านข้างของแบบจำลองเมฆ.....  | 6  |
| รูปที่ 3: ผลการเปรียบเทียบความเร็วอากาศระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงบริเวณด้านหลังของ.....<br>เครื่องจักรฯและค่าที่ได้จากการจำลอง         | 7  |
| รูปที่ 4: เส้นกระแสการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรอัตโนมัติ.....   | 8  |
| รูปที่ 5: ร่องรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาคอลูมิเนียมตัวอย่างจำนวน 100 อนุภาคเมื่อความเร็วอากาศ.....<br>จาก FFUs เป็น 0.45 m/s                | 9  |
| รูปที่ 6: ร่องรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาคอลูมิเนียมตัวอย่างจำนวน 300 อนุภาคเนื่องจากอิทธิพล.....<br>ของการไหลของอากาศในเครื่องจักรอัตโนมัติ | 10 |
| รูปที่ 7: เปอร์เซ็นต์ของจำนวนอนุภาคอลูมิเนียมที่ตกลงบนสายพานลำเลียง และที่ยังล่องลอย.....<br>ในเครื่องจักรอัตโนมัติ                       | 11 |
| รูปที่ 8: เปอร์เซ็นต์ของจำนวนอนุภาคอลูมิเนียมที่ตกลงบนสายพานลำเลียงที่ความเร็วของอากาศ.....<br>จาก FFUs ค่าต่างๆ                          | 11 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเนื้อหา

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่สำคัญของโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์เนื่องจากการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กบริเวณหัวอ่าน/เขียน (read/write head) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก เหนียวนำไปเกิดการขัดเรียงตัวกันของแมกนีไทเซชันบนสื่อบันทึก (media) เกิดขึ้นเป็นบิต 0 และ 1 โดยขณะอ่าน หรือ เขียน ข้อมูลระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและสื่อบันทึกมีค่าประมาณ 3-10 nm ดังนั้นหากยังคงมีอนุภาคขนาดเล็กหลงเหลืออยู่ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ผลิตได้ อาจส่งผลกระทบต่ออ่าน/เขียนข้อมูลขณะใช้งานทำให้เกิดความผิดพลาดได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆเพื่อประกอบเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงจำเป็นต้องผลิตภายในห้องสะอาด (clean room) ที่มีการปนเปื้อนของอนุภาค (particle contamination) ในระดับต่ำตามเกณฑ์มาตรฐานของแต่ละโรงงานได้กำหนดไว้ เช่นการประกอบชุดหัวอ่านสำเร็จ (head stack assembly, HSA) ของโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แห่งหนึ่ง ถูกกำหนดให้ถูกผลิตในห้องสะอาดคลาส 100 ตามเกณฑ์ US FED STD 209E นั่นคืออนุภาคที่มีอนุภาคขนาด 0.5 ไมครอนและใหญ่กว่าได้ไม่เกิน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต แต่ห้องสะอาดคลาส 100 ดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการสร้าง และการบำรุงรักษาค่อนข้างสูง ตลอดจนมีข้อกำหนดในการควบคุมคุณภาพค่อนข้างมาก ดังนั้นในการผลิตจริง ทางโรงงานจึงกำหนดให้ผลิตในห้องสะอาดคลาส 1,000 แทน นั่นคืออนุภาคที่มีอนุภาคขนาด 0.5 ไมครอนและขนาดใหญ่กว่าได้ไม่เกิน 1,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต แต่มีการติดตั้งพัดลมกรองอากาศ (Fan Filter Units, FFUs) ไว้ด้านบนเครื่องจักรผลิต โดยคาดการณ์ว่าอากาศที่ไหลจาก FFUs นั้นจะลดการปนเปื้อนของอนุภาคขณะผลิตจริงได้จากการอธิบายปัญหานี้ร่วมกับวิศวกรของโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แห่งหนึ่งซึ่งได้รายงานว่า ทางโรงงานมีการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และผลิตชิ้นส่วนอื่นๆที่เกี่ยวข้องตลอดเวลาผ่านระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง จึงต้องการที่จะตรวจสอบประสิทธิภาพของ FFUs แต่การหยุดสายพานการผลิตเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของ FFUs ดังกล่าวแม้เพียง 10 นาทีอาจทำให้ทางบริษัทสูญเสียรายได้มหาศาล ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบปัญหาดังกล่าว โดยไม่ต้องหยุดการผลิตแต่อย่างใด

จากการทบทวนวรรณกรรม FFUs จะถูกใช้ในห้องสะอาด และพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยทางด้านนี้ เช่น Liu และคณะ [1] ได้ใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศภายในห้องผ่าตัดโรงพยาบาล และได้หาวิธีลดการปนเปื้อนที่จะเกิดขึ้นกับผู้ป่วยที่จะผ่าตัดได้ Noh และคณะ [2] ประสบความสำเร็จในการใช้ CFD เพื่อหาวิธีควบคุมการปนเปื้อนของอนุภาคในห้องสะอาดโดยอาศัยหลักการวัดความเข้มข้นของอนุภาค นอกจากนั้น Xu และคณะ [3] ได้ศึกษาความสามารถของ FFUs สำหรับประยุกต์ในห้องสะอาดให้มีประสิทธิภาพในการลดการ

ปนเปื้อนตียิ่งขึ้น เมื่อไม่นานมานี้เราได้ใช้ CFD จำลองเส้นทางของอนุภาคขนาดเล็กใน HDD [4] เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการวางแผ่นกรองอากาศ (circulating filter) ของ HDD ในบทความล่าสุด [5] เราได้ใช้ CFD จำลองการไหลของอากาศในเครื่องจักรอัตโนมัติโดยใช้เงื่อนไขแวดล้อม (ambient condition) จริงที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม และได้สรุปว่าการไหลของอากาศที่เกิดภายในสามารถป้องกันอนุภาคจากภายนอก ทำให้ลดการปนเปื้อนของอนุภาคในขณะผลิตได้ โดยเปรียบเทียบจากความเร็วของอากาศในเครื่องจักรฯซึ่งมีค่ามากกว่าความเร็วของอากาศภายนอกเครื่องจักรฯหลายเท่า ซึ่งเป็นเพียงการสรุปเพียงเบื้องต้นเท่านั้น ยังไม่ได้มีการจำลองโดยการปล่อยอนุภาคอย่างแท้จริง จากการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในโรงงานยังพบอีกว่า นอกจากการปนเปื้อนจะมาจากอนุภาคภายนอกซึ่งเกิดจากกิจกรรมต่างๆของพนักงานแล้ว ยังเกิดขึ้นเองภายในเครื่องจักรฯเนื่องจากการเคลื่อนที่ หรือการเสียดสีกันของอุปกรณ์ภายในตัวเองอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อความเร็วอากาศจาก FFUs เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของอนุภาคมากขึ้น ซึ่งสิ่งที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ยังไม่ได้ศึกษาและรายงานในเอกสารอ้างอิง [5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการขยายงานในเอกสารอ้างอิง[5] เพื่อตรวจสอบ และตอบคำถามดังต่อไปนี้ 1) ความเร็วอากาศจาก FFUs ที่ใช้อยู่ในโรงงานปัจจุบันเฉลี่ย 0.45 m/s สามารถป้องกันอนุภาคจากภายนอกได้หรือไม่? โดยอาศัยการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค 2) การไหลของอากาศภายในเครื่องจักรฯสามารถกำจัดอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในเครื่องจักรอัตโนมัติได้หรือไม่? และ 3) ความเร็วอากาศจาก FFUs มีผลต่อการปนเปื้อนของอนุภาคหรือไม่?

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขสิ่งแวดล้อมที่กำหนด
- เพื่อศึกษาลักษณะทางเดินของอนุภาคภายในเครื่องจักรตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขสิ่งแวดล้อมที่กำหนด
- เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถควบคุมการปนเปื้อนของอนุภาคในเครื่องจักรตัวอย่างได้
- เพื่อหากระบวนการวิจัยที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการไหลของอากาศ และการปนเปื้อนของอนุภาคในเครื่องจักรตัวอย่าง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- มีความรู้และความเข้าใจลักษณะการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรตัวอย่าง
- มีความรู้และความเข้าใจลักษณะทางเดินของอนุภาคภายในเครื่องจักรตัวอย่าง
- สามารถเสนอแนะเงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถควบคุมการปนเปื้อนของอนุภาคได้
- ได้กระบวนการวิจัยที่เหมาะสมสำหรับแก้ปัญหาการไหลของอากาศและการปนเปื้อนของอนุภาคในเครื่องจักรตัวอย่าง

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. วาดแบบจำลองเครื่องจักรผลิตในคอมพิวเตอร์
2. สร้างแบบจำลองเมชที่เหมาะสม

3. จำลองทางเดินของอนุภาคภายในเครื่องจักรผลิตภายใต้เงื่อนไขสภาวะแวดล้อมกรณีศึกษา
4. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับการวัดจริง
5. เปลี่ยนเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมเพื่อหาทางเดินของอนุภาคที่เหมาะสม
6. วิเคราะห์ อภิปราย และสรุปผลการคำนวณ
7. สรุปและเขียนรายงานโครงการ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

### 1.5 คำสำคัญ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การไหลของอากาศ, การปนเปื้อนของอนุภาค, เครื่องจักรอัตโนมัติ

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบการไหลของอากาศในเครื่องจักรอัตโนมัติหาได้จากการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของสมการอนุรักษ์ (conservation equations) และสมการความปั่นป่วน (turbulence equations) ซึ่งรูปแบบของสมการดังกล่าวสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [6] ส่วนร่องรอยของอนุภาค (particle trace) คำนวณจากสมการสมดุลแรงอนุภาค (particle force balance equation) [6] ซึ่งเขียนดังนี้

$$du_p/dt = F_D(u_g - u_p) + g(\rho_p - \rho_g)/\rho_p + F_s \quad (1)$$

เมื่อสัญลักษณ์ตัวห้อย  $p$  แทนอนุภาค  $g$  แทนของเหลว  $\rho$  คือความหนาแน่น  $u$  แทนความเร็ว  $F_D$  คือแรงลาก (Drag Force)  $F_s$  คือแรงอื่นๆที่มากกระทำกับอนุภาคเช่น แรงมวลเสมือน (virtual mass force) แรงยก (lift force) แรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (attractive force between particles) ฯลฯ แต่แรงเหล่านี้ไม่มีผลกับอนุภาคขนาดเล็กที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เนื่องจาก  $\rho_p \gg \rho_g$

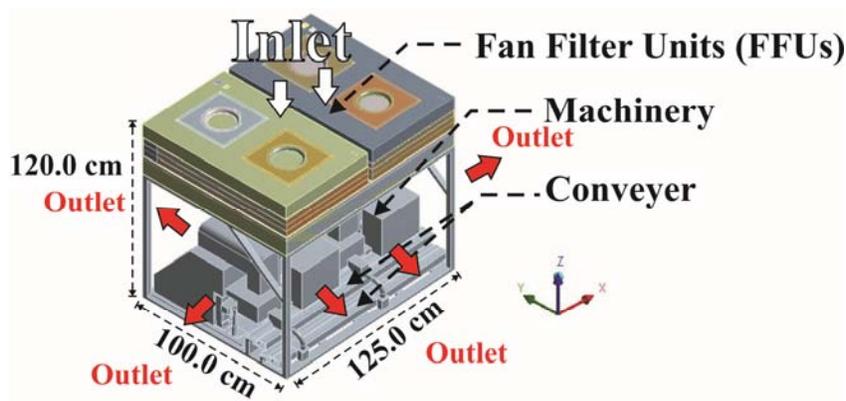
เพื่อที่จะศึกษาร่องรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาค เราได้นำอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งเป็นหนึ่งในอนุภาคที่พบบ่อยในโรงงาน และทำให้เกิดการปนเปื้อนมาเป็นกรณีศึกษาอนุภาคคอลลอยด์นี้ ถูกสมมติให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.5 \mu\text{m}$  ซึ่งถือว่าเล็กมาก และมีความหนาแน่น  $2,719 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งมากกว่าความหนาแน่นของอากาศ  $1.225 \text{ kg/m}^3$  หลายเท่า ดังนั้นเราจึงได้ใช้การจำลองแบบทางเดียว (one way simulation) นั่นคือคำนวณหารูปแบบการไหลของอากาศในเครื่องจักรด้วยโปรแกรม FLUENT 14.5 ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Transition Shear Stress Transport แล้วจึงปล่อยอนุภาคเข้าไปในการไหลอากาศที่คำนวณได้สุดท้ายโปรแกรมจึงคำนวณหาร่องรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งคำตอบที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือ และเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาในงานวิจัยนี้ [6]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แบบจำลองเครื่องจักรอัตโนมัติ

เครื่องจักรอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่ประกอบชิ้นส่วนย่อยต่างๆเข้ากับ HSA ประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ 1) พัดลมกรองอากาศ (FFUs) ทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอกให้ไหลเข้าสู่ตัวเครื่องจักร 2) เครื่องจักร (machinery) ทำหน้าที่ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ และ 3) สายพานลำเลียง (conveyer) ทำหน้าที่ลำเลียง HSA ที่ผลิตได้ไปยังตำแหน่งต่างๆ รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองของเครื่องจักรที่ผ่านการลดความซับซ้อน (simplify) และทิศทางการไหลของอากาศเบื้องต้น



รูปที่ 1: แบบจำลองของเครื่องจักรอัตโนมัติ และลักษณะการไหลของอากาศ

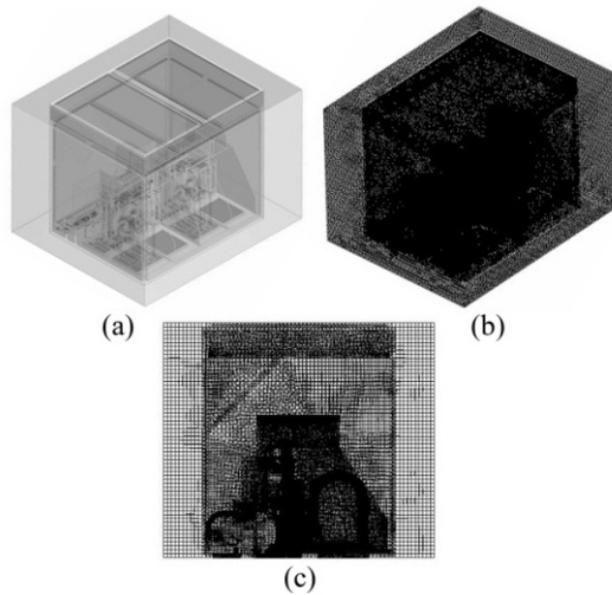
#### 3.2 แบบจำลองอากาศและแบบจำลองเมช

เราต้องการศึกษาร่องรอยของอนุภาคทั้งขณะที่อยู่ภายในและอยู่ภายนอกของเครื่องจักรฯ ดังนั้นแบบจำลองอากาศ และแบบจำลองเมชจึงถูกสร้างขึ้นดังรูปที่ 2(a) และ 2(b) ตามลำดับ แบบจำลองเมชนี้ด้านในจะประกอบด้วยเมชทรงสี่หน้า (tetrahedron) และทรงหกหน้า (hexahedron) ส่วนด้านนอกเป็นทรงหกหน้าเท่านั้น รูป 2(c) แสดงแบบจำลองเมชบริเวณด้านข้าง ซึ่งประกอบไปด้วยเมชทั้งสองชนิดดังที่กล่าวมาแล้ว เราได้วิเคราะห์ความเป็นอิสระของเมช (mesh independent analysis) โดยกำหนดให้ขนาดของเมชบริเวณผิวด้านอากาศเข้า (inlet) และอากาศออก (outlet) มีขนาดตั้งแต่ 1-4 cm พบว่าเมชขนาด 2 cm ซึ่งมีจำนวน 1.15 ล้านโหนด (nodes) และ 5.24 ล้านเอลิเมนต์ (elements) มีความเหมาะสมทั้งในเรื่องของคำตอบ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

#### 3.3 การกำหนดเงื่อนไขและค่าที่จำเป็นต่างๆ

เราใช้เงื่อนไขสภาพแวดล้อม (ambient condition) จริงที่วัดได้จากโรงงาน ได้แก่ ความเร็วอากาศจาก FFUs  $0.45 \pm 0.05$  m/s ความดัน  $106300 \pm 300$  Pa อุณหภูมิ  $24.5 \pm 0.1$  °C เป็นเงื่อนไขความเร็วอากาศ

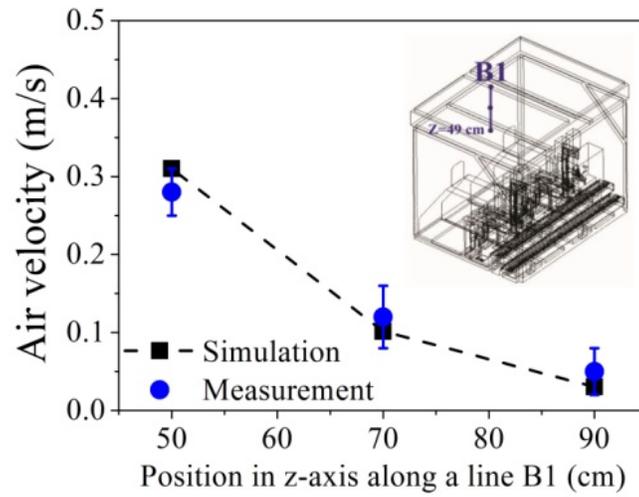
ขาเข้า (velocity inlet) ส่วน Pressure Gauge 0 Pa ถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขของความดันขาออก (pressure outlet) ส่วนค่าอื่นๆให้โปรแกรมกำหนดเอง (default value) โดยใช้การคำนวณแบบสภาวะคงที่ (steady state) จนกระทั่งค่าตอบลู่เข้า (converge)



รูปที่ 2: (a) แบบจำลองของอากาศ (b) แบบจำลองเมช และ (c) ด้านข้างของแบบจำลองเมช

### 3.4 ความถูกต้องของผลการคำนวณ

โดยใช้แบบจำลองเมชในรูป 2(b) และเงื่อนไขสภาพแวดล้อมจริงของโรงงาน คำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT 14.5 รูปที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วของอากาศบนเส้นสมมติ B1 ที่ได้จากการวัดจริง และที่ได้จากการคำนวณ จำนวน 3 ตำแหน่ง ซึ่งจุดดังกล่าวอยู่ทางด้านหลังของเครื่องจักรฯ ผลการเปรียบเทียบพบว่าสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากความเร็วอากาศของ FFUs ที่ใช้ 0.45 m/s เป็นค่าเฉลี่ย แต่ความเร็วอากาศจริงที่วัดได้มีค่าไม่คงที่ คืออยู่ระหว่าง 0.40-0.50 m/s ในทำนองเดียวกัน เรายังได้เปรียบเทียบความเร็วบนเส้นสมมติอื่นๆอีก 3 เส้น ซึ่งผลการเปรียบเทียบยังคงสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นผลการคำนวณของเรามีความน่าเชื่อถือ

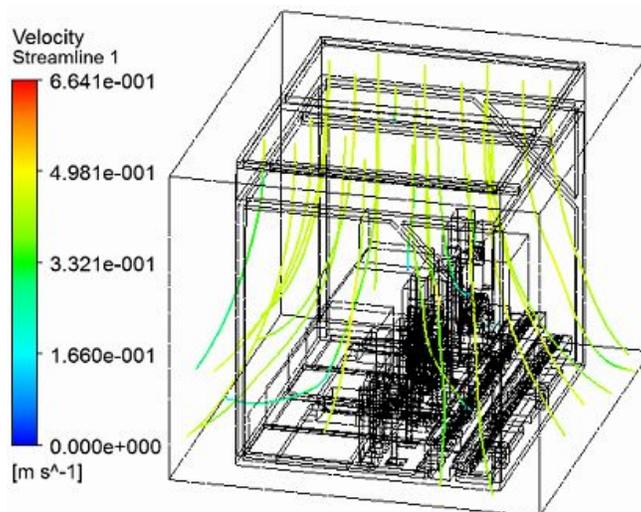


รูปที่ 3: ผลการเปรียบเทียบความเร็วอากาศระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงบริเวณด้านหลังของเครื่องจักรฯ และค่าที่ได้จากการจำลอง

## บทที่ 4

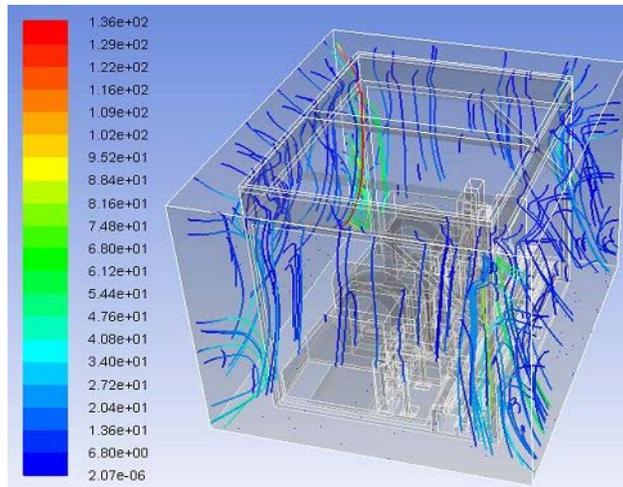
### ผลการวิจัยและการอภิปราย

รูปที่ 4 แสดงเส้นกระแส (streamline) ของอากาศเมื่อกำหนดให้ความเร็วอากาศจาก FFUs มีค่า 0.45 m/s จะเห็นได้ว่าอากาศจะไหลจาก FFUs เข้าไปในเครื่องจักรฯ และไหลออกทางด้านข้างทั้งสี่ด้านซึ่งสอดคล้องกับที่สังเกตได้จากในโรงงาน



รูปที่ 4: เส้นกระแสการไหล (streamline) ของอากาศภายในเครื่องจักรอัตโนมัติ

เพื่อตรวจสอบว่าการไหลของอากาศในเครื่องจักรฯ นี้สามารถป้องกันอนุภาคจากภายนอกได้หรือไม่? เราได้ทดลองวัดความเร็วของอากาศที่ได้จากการหายใจ และการพูดในภาวะปกติของนักศึกษาหนึ่งคนจำนวน 100 ครั้ง พบว่ามีความเร็ว  $0.19 \pm 0.07$  m/s ความเร็วนี้เราสมมติว่าเป็นความเร็วของอนุภาคออลูมิเนียมที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆของพนักงานที่กำลังล่องไปที่เครื่องจักร เราจำลองสถานการณ์นี้ โดยกำหนดให้อนุภาคออลูมิเนียม 100 อนุภาค ลอยเข้าไปในเครื่องจักรฯแบบสุ่มจากทั้งสี่ด้านของบริเวณอากาศออกด้วยความเร็ว 0.19 m/s ผลการจำลองแสดงถึงร่องรอยการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 5 พบว่าอนุภาคเข้าไปได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นก็ถูกการไหลของอากาศภายในพัดออกมาภายนอก ไม่สามารถล่องเข้าไปในเครื่องจักรฯได้ ในรูปเฉดสีแสดงเวลาที่อนุภาคอยู่ในเครื่องจักรฯ (particle residence time) นอกจากนี้เรายังได้จำลองโดยเพิ่มจำนวนอนุภาคจนถึง 500 อนุภาค และยังได้ลองเปลี่ยนความเร็วของอนุภาคที่ปล่อยเข้าไปในเครื่องจักรฯให้เพิ่มขึ้นจนถึง 50 m/s ผลที่ได้ยังคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากโมเมนตัมของอนุภาคมีค่าน้อยมาก จึงไม่สามารถล่องผ่านกระแสอากาศเข้าไปได้ ดังนั้นการไหลของอากาศในเครื่องจักรฯ นี้สามารถป้องกันอนุภาคจากภายนอกได้

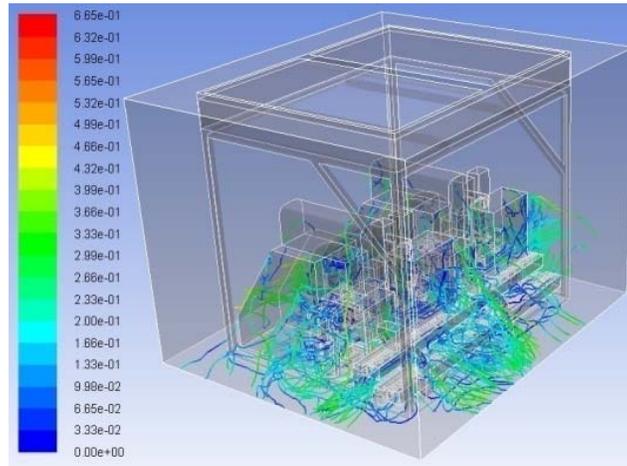


รูปที่ 5: ร่องรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาคอลูมิเนียมตัวอย่างจำนวน 100 อนุภาคเมื่อความเร็วอากาศจาก FFUs เป็น 0.45 m/s

เพื่อตรวจสอบว่าการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรนี้สามารถกำจัดอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในได้หรือไม่? เราได้จำลองโดยปล่อยอนุภาคอลูมิเนียมแบบสุ่มจากบริเวณผิวของเครื่องจักร (machinery) รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างผลการจำลองร่องรอยของอนุภาคอลูมิเนียม 300 อนุภาค หลังการเคลื่อนที่ พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่เมื่อหลุดออกจากผิวของเครื่องจักรแล้ว การไหลของอากาศภายในจะพัดอนุภาคดังกล่าวออกทางด้านทั้ง 4 มีบางส่วนเท่านั้นที่ตกลงบนสายพานลำเลียงเกิดการปนเปื้อนขึ้น เพื่อการวิเคราะห์อย่างละเอียด เรากำหนดให้เมชบริเวณสายพานลำเลียงมีขนาด 1.0 cm และเพิ่มจำนวนอนุภาคที่ปล่อยเป็น 1,000 2,000 และ 3,000 อนุภาค ทุกๆกรณีปล่อย 100 ครั้ง แล้วนับจำนวนอนุภาคที่ตกลงบนสายพานลำเลียง (trapped) และอนุภาคที่ยังลอยอยู่ในเครื่องจักร (undetermined) ผลแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ถูกพัดออกจากเครื่องจักร อนุภาค 6.39%-6.67% ตกลงบนสายพานลำเลียง ขณะที่ อนุภาค 3.23%-3.34% ยังลอยอยู่ในเครื่องจักรยังไม่สามารถกำหนดได้ว่าจะถูกกำจัดออกไป หรือตกลงบนสายพานลำเลียง ค่าความคลาดเคลื่อน (error bar) ของทุกข้อมูลอยู่ในช่วง 0.21%-0.34% ในทำนองเดียวกันเรายังได้จำลองโดยลดขนาดของเมชบริเวณสายพานฯ ให้มีขนาด 0.5 cm ทำให้เมชบริเวณดังกล่าวละเอียดขึ้น คือมีจำนวนโหนดเพิ่มประมาณ 8 หมื่นโหนด จำนวนเอलिเมนต์เพิ่มประมาณ 4 แสนเอลิเมนต์ ผลที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน ดังนั้นการไหลของอากาศในเครื่องจักรนี้สามารถกำจัดอนุภาคที่เกิดขึ้นเองภายในได้

เราต้องการศึกษาผลของความเร็วอากาศจาก FFUs ต่อการปนเปื้อนของอนุภาค เราจึงจำลองโดยการปล่อยอนุภาคอลูมิเนียมจำนวน 3,000 อนุภาค และเปลี่ยนความเร็วอากาศของ FFUs ตั้งแต่ 0.03 m/s จนถึงความเร็ว 0.65 m/s แล้วบันทึกเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคอลูมิเนียมที่ตกลงบนสายพานลำเลียง ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 8 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อความเร็วของ FFUs มีค่า 0.03 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วของอากาศภายนอกของเครื่องจักรฯ เมื่ออนุภาคหลุดออกมา ความเร็วอากาศจาก FFUs 0.03 m/s มีค่าน้อยเกินไปที่จะ

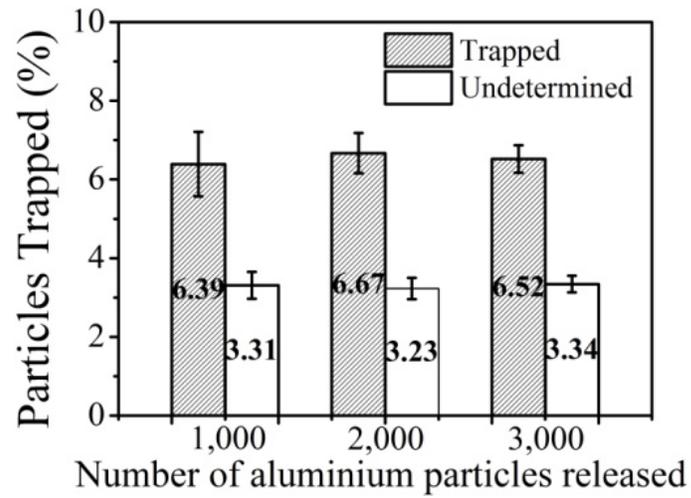
ไล่อนุภาคดังกล่าวให้ออกไปได้ อนุภาคจึงยังลอยอยู่ในเครื่องจักรถึง 46.42% ขณะที่ตกลงบนสายพานเพียง 0.48% เท่านั้น เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศจาก FFUs การไหลของอากาศจะพัดอนุภาคที่ล่องลอยอยู่ให้ออกไปได้มากขึ้น ดังนั้นจำนวนอนุภาคที่ล่องลอยในเครื่องจักรจึงลดลง นั่นคือการไหลของอากาศภายในสามารถกำจัดอนุภาคที่ลอยอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาเฉพาะจำนวนอนุภาคที่ตกลงบนสายพาน พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของอากาศจาก FFUs ซึ่งสอดคล้องกับที่ทางวิศวกรได้รายงานไว้



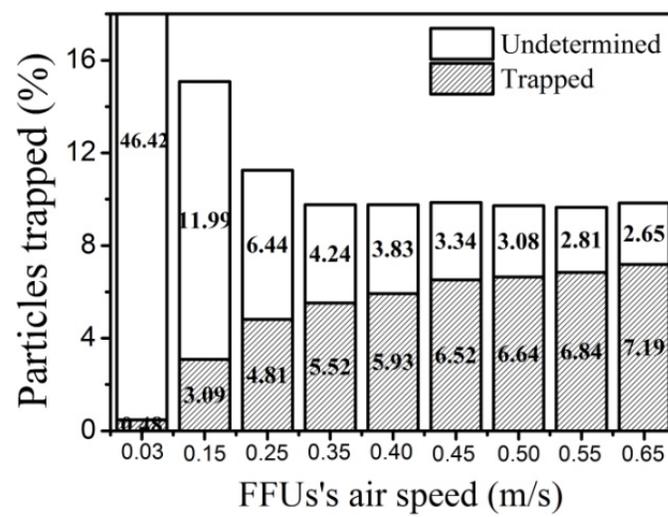
**รูปที่ 6:** ร่องรอยการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์อย่างจำนวน 300 อนุภาคเนื่องจากอิทธิพลของการไหลของอากาศในเครื่องจักรอัตโนมัติ

ในการจำลองนี้เราปล่อยอนุภาคแบบสุ่มจากทุกๆพื้นผิวของเครื่องจักร แต่ในความเป็นจริงมีส่วนของเครื่องจักรบางชิ้นเท่านั้นที่ปล่อยอนุภาคออกมา ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่ตกลงบนสายพานที่แท้จริงต้องน้อยกว่าที่เราจำลองได้ในงานวิจัยนี้

สุดท้าย จากผลการจำลองทั้งหมด เราได้นำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลมาตรฐานความเร็วอากาศที่เหมาะสมของ FFUs สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ลดการปนเปื้อนภายในห้องสะอาดจากเอกสารอ้างอิง [8] เราจึงเสนอว่า ความเร็วอากาศของ FFUs ที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักรอัตโนมัตินี้ควรอยู่ในช่วง 0.40-0.50 m/s จะสามารถลดการปนเปื้อนขณะผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกนำเสนอไปยังทางโรงงานเพื่อเป็นข้อมูลประกอบสำหรับปรับปรุงเครื่องจักรอัตโนมัติต่อไป



รูปที่ 7: เปอร์เซนต์ของจำนวนอนุภาคอลูมิเนียมที่ตกลงบนสายพานลำเลียง (trapped) และที่ยังล่องลอยในเครื่องจักรอัตโนมัติ (undetermined)



รูปที่ 8: เปอร์เซนต์ของจำนวนอนุภาคอลูมิเนียมที่ตกลงบนสายพานลำเลียงที่ความเร็วของอากาศจาก FFUs ค่าต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการตรวจสอบการไหลของอากาศในเครื่องจักรอัตโนมัติที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายใต้สภาพแวดล้อมจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยการจำลองทาง CFD พบว่าเมื่อความเร็วอากาศจาก FFUs มีค่าอยู่ในช่วง 0.40-0.50 m/s การไหลของอากาศภายในเครื่องจักรอัตโนมัติสามารถป้องกันอนุภาคจากภายนอก และกำจัดอนุภาคที่เกิดขึ้นเองภายในได้ เป็นการลดการปนเปื้อนของอนุภาคขณะผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 6

### ผลผลิตที่ได้จากการวิจัย

ผลงานวิจัยนี้ได้มีการนำไปตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ และนานาชาติดังต่อไปนี้

#### วารสารระดับชาติ

- J. Thongsri, Airflow Simulation inside Automation Machine using Computational Fluid Dynamics and Its Application for Reducing Particle Contamination, Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 31, pp. 1-5, 2014. (ภาคผนวกเอกสารหมายเลข 1)

*วารสารนี้อยู่ในฐานข้อมูล Thai Citation Index (TCI) กลุ่มที่ 1*

#### วารสารระดับนานาชาติ

- J. Thongsri, A. Kaokom, Successful Simulation of Airflow in the Microenvironment of an Assembly Automation Machine and its Implication, Advanced Materials Research, Vol. 931-932, pp 1063-1067, 2014. (ภาคผนวกเอกสารหมายเลข 2)

*วารสารนี้อยู่ในฐานข้อมูล SCOPUS และอยู่ในฐานข้อมูล SJR ควอไทล์ที่ 3 (Q3)*

- J. Thongsri, M. Pimsarn, Optimum Airflow to Reduce Particle Contamination Inside Welding Automation Machine of Hard Disk Drive Production Line, Int. J. Precis. Eng. Man., Vol. 16, No.3, pp 509-515, 2015. (ภาคผนวกเอกสารหมายเลข 3)

*วารสารนี้อยู่ในฐานข้อมูล SCOPUS, ISI และอยู่ในฐานข้อมูล SJR ควอไทล์ที่ 1 (Q1) มี Impact Factor = 1.50*

เนื่องงานวิจัยนี้ได้ของบวิจัยจากทางวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูลจำนวน 150,000 บาท โดยมีข้อกำหนดว่าต้องตีพิมพ์ในวารสารที่มีฐานข้อมูลใน SJR ควอไทล์ที่ 1-2 (Q1-2) ดังนั้นงานวิจัยนี้ซึ่งได้ตีพิมพ์ในวารสาร 3 ฉบับ ช่างต้น จึงถือว่าเกินความคาดหมาย สูงกว่าเกณฑ์ที่ทางวิทยาลัยฯผู้ให้ทุนได้กำหนดไว้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Liu, H. Wang and W. Wen, “Numerical simulation on a horizontal airflow for airborne particles control in hospital operating room,” *Building and Environment*, Vol.44, No.11, pp.2284-2289, 2009.
- [2] K. C. Noh, H.S. Kim and M.D. Oh, “Study on contamination control in a minienvironment inside clean room for yield enhancement based on particle concentration measurement and airflow CFD simulation,” *Building and Environment*, Vol.45, No.4, pp.825-831, 2010.
- [3] R. Flaherty, “Clean rooms: continuing evolution of fan filter units for clean rooms,” *Filtration+Separation*, Vol. 48, No. 4, pp.33-37, 2011.
- [4] J. Thongsri and V. Pongkom, “A Simulation of the number of particles trapped by the circulating filter of a hard disk drive and their trajectories” *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 548-549, pp.953-957, 2014.
- [5] J. Thongsri and A. Khaokom, “Successful simulation of airflow in the microenvironment of an assembly automation machine and its implication,” *Advanced Materials Research*, Vols. 931-932, pp.1063-1067, 2014.
- [6] Ansys Fluent 14.5, User’s guide, October 2012.
- [7] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14644-1 Cleanrooms and Associated Controlled Environments. Part 1: Classification of Air Cleanliness. Rolling Meadows, IL, USA: The Institute of Environmental Sciences and Technology (IEST); 1999.

ภาคผนวก

# การจำลองการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรอัตโนมัติด้วย พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการประยุกต์ใช้เพื่อลดการ ปนเปื้อนของอนุภาค

## Airflow Simulation inside Automation Machine using Computational Fluid Dynamics and Its Application for Reducing Particle Contamination

จตุพร ทองศรี

หน่วยวิจัยเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีความน่าเชื่อถือทางกล สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต  
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ในบทความวิชาการนี้ เรากล่าวถึงการจำลองการไหลของอากาศ (Airflow) ภายในเครื่องจักรอัตโนมัติ (Automation Machine) และการนำไปใช้เพื่อลดการปนเปื้อนของอนุภาค (Particle Contamination) ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) ในการจำลองเราใช้เงื่อนไขสภาพแวดล้อม (Ambient Conditions) เช่น อุณหภูมิ ความดัน และความเร็วของอากาศจริงที่วัดได้จากโรงงานอุตสาหกรรม ผลการจำลองแสดงถึงรูปแบบการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรอัตโนมัติที่สามารถทำหน้าที่คล้ายตัวป้องกันอนุภาคจากภายนอก และมีประสิทธิภาพลดการปนเปื้อนของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในเครื่องจักรขณะทำงานด้วย เราบทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยย่อ หลีกเลี่ยงสมการที่ซับซ้อน และนำเสนอระเบียบวิธีของการจำลอง เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ ความรู้จากบทความนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับออกแบบเครื่องจักรอัตโนมัติแบบอื่นๆ เพื่อลดการปนเปื้อนของอนุภาคได้

**คำสำคัญ :** พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การไหลของอากาศ, การปนเปื้อนของอนุภาค, เครื่องจักรอัตโนมัติ

### Abstract

In this academic article, we introduce a simulation of airflow inside an automation machine (AM) and its application for reducing particle contamination using the computational fluid dynamics. In the simulation, we used an actual ambient condition such as temperature, pressure and air velocity measured from a factory. The result of simulation shows that airflow pattern inside the AM can act as a particle blocker from outside and has more efficiency in reducing particle contamination inside the AM while it is working. We briefly review a relevant theory, neglect complicated equations, and present a methodology of simulation in order to easy to understand. The knowledge in this article can be applied as fundamental information for designing the other automation to reduce particle contamination.

**Keywords :** Computational Fluid Dynamics, Airflow, Particle Contamination, Automation Machine

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นอุตสาหกรรมสำคัญของประเทศไทย ซึ่งการส่งออกเครื่องใช้และอุปกรณ์เหล่านี้ สร้างรายได้ให้กับประเทศไทยมากมาย ในปี 2011 ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์คิดเป็นมูลค่า 30% ของการส่งออกทั้งหมดของประเทศ มีการจ้างงานคิดเป็นร้อยละ 14 ของการจ้างงานทั้งหมด การผลิตชิ้นส่วนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องผลิตภายในห้องสะอาด (Clean Room) ที่มีการปนเปื้อนของอนุภาค (Particle Contamination) ในระดับต่ำ ตามเกณฑ์มาตรฐานของแต่ละชนิดของอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ (Automation Machine) แทนแรงงานคนในการปฏิบัติงาน เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิต และที่สำคัญเป็นการลดการปนเปื้อนของอนุภาคอีกด้วย ตัวอย่างเช่น การผลิตชุดหัวอ่านสำเร็จ (Head Stack Assembly, HSA) ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ถูกกำหนดให้ผลิตในห้องสะอาดคลาส 100 นั่นคืออนุภาคที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมครอน ได้ไม่เกิน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต แต่ห้องสะอาดคลาส 100 ดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการสร้าง และการบำรุงรักษาค่อนข้างสูง ตลอดจนมีข้อกำหนดในการควบคุมคุณภาพค่อนข้างมาก ดังนั้นในการผลิตจริงบางโรงงานจึงกำหนดให้ผลิตชุดหัวอ่านสำเร็จในห้องสะอาดคลาส 1,000 แทน นั่นคืออนุภาคที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมครอน ได้ไม่เกิน 1,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต แต่มีการติดตั้งพัดลมกรองอากาศ (Fan Filter Unit, FFU) ไว้บนเครื่องจักรผลิต โดยคาดหวังว่าการไหลของอากาศนั้นจะลดการปนเปื้อนของอากาศได้

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นวิชาที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล จากการทบทวนวรรณกรรม ไม่พบว่ามีรายงานที่เกี่ยวกับการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณศึกษาการไหลของอากาศเพื่อลดการปนเปื้อนของอากาศในเครื่องจักรแบบนี้โดยตรง แต่มีการนำไปประยุกต์ใช้ใน

ห้องสะอาด และอุปกรณ์อื่นๆ [1-4] แต่ยังคงใช้หลักการของพลศาสตร์ของไหลเป็นหลักสำคัญเช่นเดียวกัน Liu และคณะ [1] ได้ตรวจสอบอิทธิพลของคอมพิวเตอร์รูปแบบการไหลของอากาศในห้องผ่าตัดโรงพยาบาล Noh และคณะ [2] ประสบความสำเร็จในการควบคุมการปนเปื้อนของอนุภาคในห้องสะอาดโดยอาศัยหลักการวัดความเข้มข้นของอนุภาค ร่วมกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Naphon และคณะ [3] ได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของอากาศในตู้ทดสอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ปัจจุบันงานวิจัยบางส่วนของเราเองก็ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแก้ปัญหาตรวจสอบ และพัฒนาระบบการผลิตในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ หนึ่งในงานเหล่านั้นเช่น การใช้หลักการนี้ตรวจสอบการไหลของอากาศในเครื่องประกอบอัตโนมัติของโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง [4] เพื่อหาเงื่อนไขสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับลดการปนเปื้อนของอนุภาคได้ ที่กล่าวอ้างมาทั้งหมดนี้สามารถยืนยันได้ว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีบทบาทสำคัญในการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาอุปกรณ์ ตลอดจนระบบการผลิตต่างๆ ให้มีสมบัติสอดคล้องกับความต้องการได้

จากประสบการณ์ที่มีในการทำวิจัยร่วมกับภาคอุตสาหกรรม ทำให้เรามีโอกาสใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรมจริงหลายครั้ง ในบทความนี้ เรามีจุดประสงค์แนะนำการประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อหาวิธีลดการปนเปื้อนของอนุภาคในเครื่องจักรอัตโนมัติ โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยย่อ หลักเบื้องสมการที่ซับซ้อน เน้นระเบียบวิธีในการแก้ปัญหา เพื่อให้เข้าใจง่าย จึงยกตัวอย่างด้วยงานวิจัยของผู้แต่งเองที่ได้ทำร่วมกับภาคอุตสาหกรรม จึงเหมาะกับนักศึกษา วิศวกร ช่างเทคนิค ตลอดจนผู้สนใจทั่วไป แม้มีพื้นฐานด้านนี้เพียงบางส่วน ก็สามารถนำความรู้ที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้ให้เป็นประโยชน์ได้

## 2. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

รูปแบบการไหลของอากาศสามารถหาได้จากการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของสมการที่เกี่ยวข้องได้แก่

สมการอนุรักษ์ (Conservation Equation) และสมการความปั่นป่วน (Turbulence Equation) ซึ่งสมการอนุรักษ์ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (1), สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (2) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (3) [5]

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho v) = S_m \quad (1)$$

$$\partial(\rho v)/\partial t + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g + F \quad (2)$$

$$\partial(\rho E)/\partial t + \nabla \cdot (v(\rho E + p)) = -\nabla \cdot (\Sigma_j h_j J_j) + S_h \quad (3)$$

เมื่อ  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ  $t$  คือเวลา  $\tau$  คือเทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor)  $S_m$  และ  $S_h$  คือเทอมของแหล่งกำเนิด (Source Term)  $p$  คือความดันสถิต (Static Pressure)  $\rho g$  และ  $F$  คือแรงโน้มถ่วง และ แรงกระทำจากภายนอกตามลำดับ

สมการความปั่นป่วนมีมากมายหลายสมการ เช่น  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  และอื่นๆ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือ และเหมาะสมสำหรับการศึกษาปัญหาทางวิศวกรรมที่แตกต่างกัน แต่ในบทความนี้เราใช้ Transition Shear Stress Transport (Transition SST) ซึ่งเป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรม [5] เนื่องจากให้ผลการคำนวณที่มีความน่าเชื่อถือสูง Transition SST ประกอบด้วย สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy,  $k$ ) สมการอัตราการกระจายเฉพาะ (Specific Dissipation Rate,  $\omega$ ) สมการทรานสิชั่นธิคเนส เรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Transition Momentum Thickness Reynolds Number,  $Re_{\theta}^*$ ) และสมการอินเตอร์มิทเทนซี (Intermittency,  $\gamma$ ) เนื่องจากพื้นที่ในบทความนี้มีจำกัด จึงไม่สามารถแสดงสมการ และอธิบายความหมายทั้งหมดได้ ผู้ที่สนใจสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้ในเอกสารอ้างอิง [5] ในการคำนวณด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนนี้ คอมพิวเตอร์จะต้องแก้ 3 สมการอนุรักษ์ และ 4 สมการความปั่นป่วน รวมทั้งหมด 7 สมการ โดยอาศัยหลักการของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method, FVM) เพื่อหาคำตอบ

ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดจะใช้แก้ปัญหาคำนวณของไหลโดยแบบจำลองของของไหล (Fluid Model) จะถูกแบ่งย่อยออกเป็นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า ปริมาตรควบคุม

(Control Volume) สมการอนุรักษ์ย่อยทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องในปริมาตรควบคุมนี้จะถูกเปลี่ยนรูปให้เป็นระบบสมการพีชคณิตจำนวนมาก เมื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น และปริมาณที่เกี่ยวข้องต่างๆ ครบถ้วน คอมพิวเตอร์จะแก้ระบบสมการดังกล่าวเพื่อหาคำตอบในปริมาตรควบคุมอย่างต่อเนื่องจนครบทั้งแบบจำลองวัตถุ แล้วรายงานผลในรูปแบบของผลลัพธ์เพื่อต่อการวิเคราะห์

### 3. ระเบียบวิธีการแก้ปัญหา

#### 3.1 แบบจำลองเครื่องจักรอัตโนมัติ

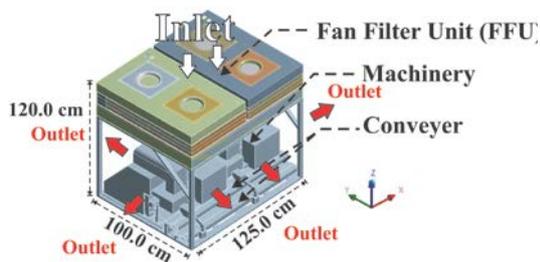
ต่อไปเรายกตัวอย่างการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแก้ปัญหาจริงในภาคอุตสาหกรรม ข้อมูลบางส่วนนำมาจากเอกสารอ้างอิง [4] จุดมุ่งหมายของงานนี้คือต้องการหารูปแบบการไหลของอากาศ และตรวจสอบความเป็นไปได้ ในการใช้การไหลของอากาศจากพัดลมกรองอากาศเพื่อลดการปนเปื้อนของอนุภาคในเครื่องจักร

ขั้นตอนการวิจัยเป็นดังนี้ เราได้วัดขนาดของเครื่องจักรอัตโนมัติจริง เขียนแบบจำลองของเครื่องจักรนี้ในคอมพิวเตอร์ และได้ตรวจสอบลักษณะการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรเบื้องต้น เพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขค่าขอบ (Boundary Condition) รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองเครื่องจักรอัตโนมัติที่มีการลดความซับซ้อนลง (Simplify) เฉพาะในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้อง และลักษณะการไหลของอากาศที่สังเกตได้เบื้องต้น เครื่องจักรอัตโนมัติเครื่องนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ 1) พัดลมกรองอากาศ (FFU) ทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอกผ่านตัวกรองอากาศ ไหลเข้าสู่เครื่องจักร แล้วไหลออกด้านข้างทั้งสองด้าน 2) เครื่องจักร (Machinery) ทำหน้าที่ผลิตสินค้าและ 3) สายพานลำเลียง (Conveyor) ทำหน้าที่ลำเลียงสินค้าที่ผลิตได้ไปยังเครื่องจักรชนิดอื่นๆ ที่อยู่ติดกันต่อไป

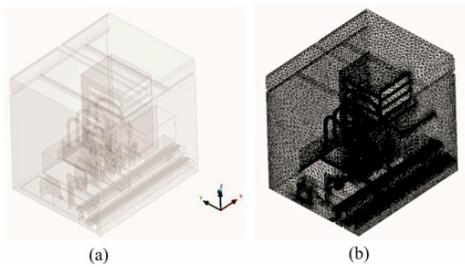
#### 3.2 แบบจำลองของไหล และแบบจำลองเมช

อาศัยแบบจำลองดังรูปที่ 2 เราได้ใช้โปรแกรม FLUENT ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ซิเกท เทคโนโลยีฯ สร้างแบบจำลองของเหลวซึ่งได้ถูกนำไปเป็นต้นแบบเพื่อสร้างแบบจำลองเมชต่อไป โดยแบบจำลองของเหลว และแบบจำลองเมชที่ใช้ในงานนี้แสดงดังรูปที่ 2 (a) และ (b) ตามลำดับ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเมชมี

ความสำคัญ เพราะทั้งชนิด ขนาด และคุณภาพของเมชมีผลต่อทั้งเวลาที่ใช้คำนวณ และผลเฉลยที่ได้ ดังนั้นเราจึงได้วิเคราะห์ความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independent Analysis) ด้วย



รูปที่ 1: แบบจำลองของเครื่องจักรอัตโนมัติ และลักษณะการไหลของอากาศเบื้องต้น



รูปที่ 2: (a) แบบจำลองของไหล และ (b) แบบจำลองเมช

เพื่อที่จะได้แบบจำลองเมชที่เหมาะสม นั่นคือผลการคำนวณไม่ขึ้นกับ ชนิด ขนาดและรูปร่างของเมช เราได้สร้างแบบจำลองเมช 5 แบบจำลอง โดยให้มีความละเอียดแตกต่างกันเฉพาะในบริเวณทางอากาศออก (Outlet) และบริเวณใกล้สายพานลำเลียง แบบจำลองเมชทั้งหมดที่ได้มีจำนวน โหนด และเอลิเมนต์อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.25-1.44 ล้านโหนด และ 6.54-7.65 ล้านเอลิเมนต์ตามลำดับ เมื่อคำนวณและเปรียบเทียบผลด้วยการวิเคราะห์ความเป็นอิสระของเมช เราพบว่าแบบจำลองเมชที่มีจำนวน 1.28 ล้านโหนด และ 6.84 ล้านเอลิเมนต์ มีความเหมาะสมทั้งในแง่ของผลการคำนวณที่ได้ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

### 3.3 กำหนดเงื่อนไขและค่าที่จำเป็นต่างๆ

ขั้นตอนี่สำหรับกำหนดค่าต่างๆให้โปรแกรม FLUENT ใช้ในการคำนวณ การคำนวณมีสองแบบคือ สภาวะคงที่ (Steady-State) และสภาวะขึ้นกับเวลา (Transient) ส่วนใหญ่การคำนวณสภาวะคงที่จะใช้เวลาในการคำนวณที่สั้นกว่าสภาวะขึ้นกับเวลา ซึ่งมีการกำหนดค่าก่อนข้างซับซ้อน และใช้เวลาในการคำนวณมาก แต่ได้ผล

เฉลยที่มีความน่าเชื่อถือกว่าสภาวะคงที่ ในงานวิจัยนี้เราได้คำนวณแบบสภาวะคงที่ ค่าที่จำเป็นสำหรับการคำนวณเป็นค่าจริงที่ได้จากการวัดสภาพแวดล้อม (Ambient Condition) ในโรงงานอุตสาหกรรมแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: ค่าที่วัดได้จากโรงงานอุตสาหกรรม

| ตัวแปร            | ค่าที่วัดได้  |
|-------------------|---------------|
| อุณหภูมิ          | 24.5±0.1 °C   |
| ความดัน           | 106300±300 Pa |
| ความเร็วอากาศเข้า | 0.45±0.05 m/s |

ค่าในตารางที่ 1 ใช้กำหนดความเร็วอากาศเข้า (velocity inlet) และค่าอ้างอิง (Reference Value) เราใช้ความดันขาออก (Pressure Outlet) เป็นอีกเงื่อนไขสำหรับการคำนวณค่าต่างๆแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ค่าที่กำหนดความดันขาออก

| ตัวแปร                             | ค่าที่วัดได้ |
|------------------------------------|--------------|
| Pressure Gauge                     | 0 Pa         |
| Backflow Turbulent Intensity       | 5 %          |
| Backflow Turbulent Viscosity Ratio | 10           |

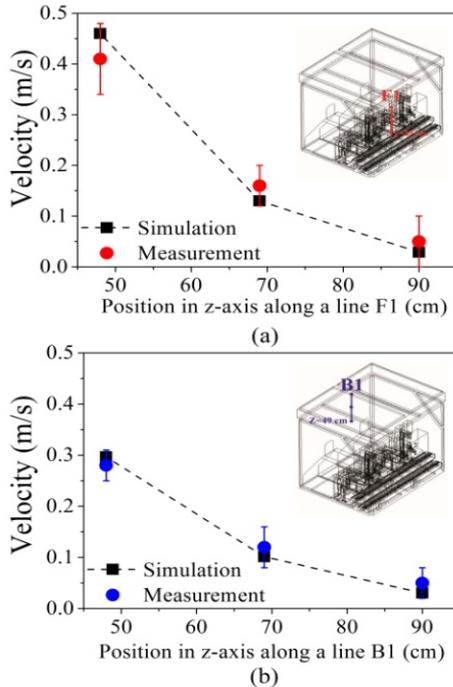
กำหนดค่าต่างๆดังตารางที่ 1 และ 2 แล้วคำนวณแบบสภาวะคงที่จำนวน 1200 ครั้ง (Iteration) โดยมีเกณฑ์การลู่เข้าสัมบูรณ์ของค่าตอบเป็น  $10^{-6}$  ผลการคำนวณจะเริ่มคงที่ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อแสดงรูปแบบการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรอัตโนมัติได้

## 4. ผลการคำนวณและการอภิปราย

โดยใช้แบบจำลองเมชในรูปที่ 2 (b) ร่วมกับการคำนวณโดยใช้สมการความปั่นป่วนแบบ Transition SST ในโปรแกรม FLUENT เราได้รูปแบบการไหลของอากาศในเครื่องจักรอัตโนมัติทุกๆบริเวณตามต้องการ เราแบ่งการรายงานผลการจำลองออกเป็นสามส่วน ได้แก่ ความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณ ความเป็นไปได้ในการป้องกันอนุภาคจากภายนอก และความเป็นไปได้ของการกำจัดอนุภาคที่เกิดขึ้นภายใน

เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณ เราได้วัดความเร็วของอากาศจริงขณะเครื่องจักรทำงานเพื่อเปรียบเทียบ โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบขดลวดความร้อน (Hot Wire Anemometer) ที่มีค่าความ

ละเอียด  $\pm 0.03$  m/s ทำการวัดความเร็วเฉลี่ยในพื้นที่ 3 บริเวณที่ตัวอย่าง ได้แก่ ด้านหน้า ด้านหลัง และสายพานลำเลียง รูปที่ 3 (a) แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วอากาศบริเวณด้านหน้าของเครื่องจักรบนเส้น F1 ที่ตำแหน่งบนแกน Z เท่ากับ 49, 68 และ 90 cm ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 3 (b) แสดงผลการเปรียบเทียบบริเวณด้านหลังของเครื่องจักรบนเส้น B1 ที่ระยะ Z เดียวกัน

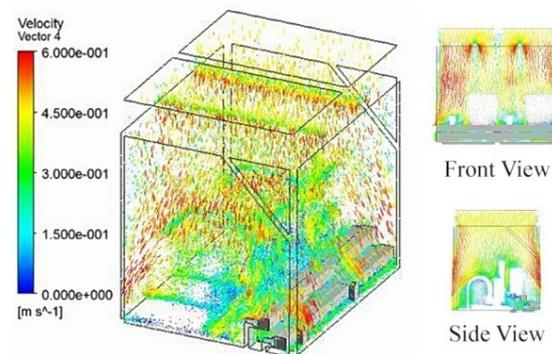


รูปที่ 4: ผลการเปรียบเทียบความเร็วอากาศระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองและที่ได้จากการวัดจริงบริเวณ (a) ด้านหน้า และ (b) ด้านหลังของเครื่องจักรฯ

ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าทั้งสองนั้นมีความสอดคล้องกัน ความแตกต่างเล็กน้อยที่เกิดขึ้นนี้อาจมีสาเหตุจากความเร็วอากาศที่ออกจากพัดลมกรองอากาศมีค่าไม่คงที่ นั่นคือ จากการวัดจริงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.40-0.50 m/s แต่เราได้ใช้ค่าเฉลี่ย 0.45 m/s เป็นความเร็วขาเข้า เมื่อกำหนดให้ความเร็วอากาศขาเข้าเป็น 0.40 และ 0.50 m/s พบว่าค่าที่คำนวณได้แตกต่างจากที่ได้จาก 0.45 m/s เล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในช่วงของความคลาดเคลื่อนที่เกิดการวัด เรายังได้เปรียบเทียบความเร็วของอากาศทั้งสองบริเวณบนเส้นสมมติอื่นอีก 2 เส้น ซึ่งผลทั้งหมดสอดคล้องกันเป็นอย่างดี นอกจากนี้ เรายังได้วัดความเร็วอากาศที่บริเวณสายพานลำเลียงด้วย พบว่ามันอยู่ในช่วง 0.08-0.22 m/s ในขณะที่

ค่าจากการคำนวณอยู่ในช่วง 0.09-0.21 m/s นั่นคือผลการคำนวณของเรามีความน่าเชื่อถือ

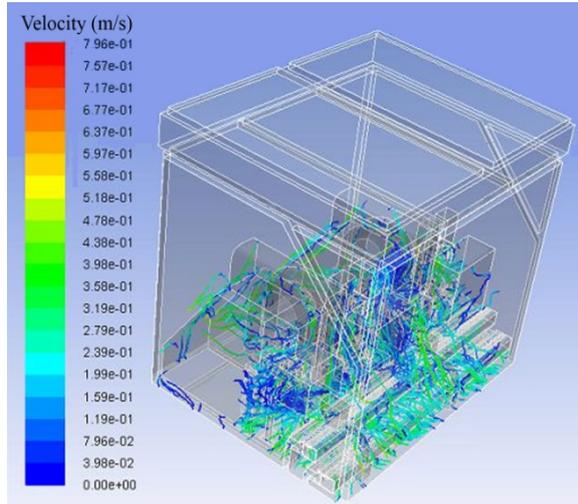
เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของการป้องกันอนุภาคจากภายนอกไม่ให้ไหลเข้ามาภายในเครื่องจักรอัตโนมัติ รูปที่ 4 แสดงเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector) ของอากาศในเครื่องจักรฯ เมื่อพิจารณาในภาพรวมพบว่าอากาศจะไหลจากพัดลมกรองอากาศสู่เครื่องจักรอัตโนมัติและไหลออกทางด้านข้างทั้งสี่ด้านดังที่คาดการณ์ไว้แล้ว เมื่อพิจารณาเฉพาะบริเวณขอบของเครื่องจักร พบว่าความเร็วลมดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 0.23 - 0.60 m/s ตลอดทั้งเครื่อง เมื่อเทียบกับค่าความเร็วอากาศด้านนอกเครื่องที่เราวัดได้ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.03 m/s จะเห็นได้ว่ามีค่าสูงกว่ามาก ดังนั้น โอกาสที่อนุภาคจากภายนอกที่จะลอยเข้าสู่เครื่องประกอบอัตโนมัติได้จึงเป็นไปได้ยาก



รูปที่ 4: เวกเตอร์ความเร็วของอากาศภายในเครื่องจักร

เนื่องจากในขณะผลิต การเคลื่อนไหว และการเสียดสีกันของอุปกรณ์ต่างๆภายในเครื่องจักรฯอาจปลดปล่อยอนุภาคทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของการกำจัดอนุภาคที่เกิดขึ้นภายใน เราจึงได้จำลองเหตุการณ์นี้ โดยปล่อยอนุภาคอนุภาคนิยาม ( $\rho=2,719$  kg/m<sup>3</sup>,  $C_p = 871$  J/kg-K) ซึ่งเป็นอนุภาคหนึ่งที่พบบ่อยในโรงงาน ในผลจำลองการไหลของอากาศที่คำนวณได้ อนุภาคนี้นี้มีขนาด 0.5 ไมครอน ถูกปล่อยออกจากบริเวณต่างๆของเครื่องจักรฯแบบสุ่ม จำนวน 500 อนุภาค โดยใช้แบบจำลอง Discrete Phase Model (DPM) ในโปรแกรม FLUENT รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างร่องรอย (Particle Trace) ของอนุภาค 500 อนุภาคซึ่งถูกปล่อยแล้วเกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากอิทธิพลของอากาศที่ออกจาก

พัฒนกรองอากาศโดยที่เจดสีแสดงถึงความเร็วของอนุภาคขณะเคลื่อนที่



**รูปที่ 5:** ร่องรอยของอนุภาคอนุกรมนิยมจำนวน 500 อนุภาคที่เคลื่อนที่เนื่องจากอากาศที่ออกจากพัฒนกรองอากาศจากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าอนุภาคส่วนใหญ่จะถูกอากาศที่ออกจากพัฒนกรองอากาศบังคับให้เคลื่อนที่ออกจากเครื่องจักรอัตโนมัติ มีเพียงอนุภาคส่วนน้อยเท่านั้นที่ตกลงบนสายพานลำเลียงและทำให้เกิดการปนเปื้อนขึ้น ดังนั้นการไหลของอากาศภายในเครื่องจักรนี้สามารถกำจัดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากภายในเครื่องจักรเองได้

อาศัยระเบียบวิธีวิจัยดังที่กล่าวมานี้ เรายังได้คำนวณความเร็วอากาศที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจักรตัวอย่างนี้ด้วย เราพบว่าความเร็วจากพัฒนกรองอากาศในช่วง 0.40-0.50 m/s จะมีประสิทธิภาพในการป้องกัน และลดการปนเปื้อนของอนุภาคได้ดีที่สุด เนื่องจากความเร็วช่วงนี้จะทำให้มีจำนวนอนุภาคตกลงบนสายพานลำเลียงน้อยที่สุด ความเร็วของอากาศที่น้อย หรือมากเกินไปจะทำให้เกิดการปนเปื้อนมาก รายละเอียดของผลการวิจัยได้ถูกรายงานไปยังโรงงานเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิต โดยปกติโรงงานจะมีการผลิตสินค้าด้วยระบบอัตโนมัติตลอด 24 ชั่วโมง หากหยุดการผลิตจะทำให้สูญเสียรายได้ แต่การใช้พลศาสตร์ของไหลเช่นนี้สามารถจำลองเหตุการณ์ และแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยไม่ต้องหยุดสายการผลิตแต่อย่างใด นับเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในภาคการผลิตได้ ความรู้ที่ได้จากวารสารนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรอัตโนมัติในอุตสาหกรรมชนิด

อื่นๆ ให้มีประสิทธิภาพในการลดการปนเปื้อนของอนุภาคในขณะผลิตได้

## 5. สรุป

บทความวิชาการนี้ได้กล่าวถึงการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจำลองรูปแบบการไหลของอากาศในเครื่องจักรอัตโนมัติ โดยเราได้ยกตัวอย่างงานวิจัยจริงที่ได้ทำร่วมกับภาคอุตสาหกรรม พบว่าอากาศที่ออกจากพัฒนกรองอากาศที่ถูกติดตั้งบนเครื่องจักรอัตโนมัติอยู่ในช่วง 0.40-0.50 m/s นอกจากนี้จะสามารถป้องกันอนุภาคจากภายนอกที่จะไหลเข้าสู่ตัวเครื่องจักรแล้ว ยังทำหน้าที่กำจัดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากภายในเครื่องจักรเองได้อีกด้วย เป็นการลดการปนเปื้อนของอนุภาคในขณะทำการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบริษัทซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Liu, H. Wang and W. Wen, "Numerical simulation on a horizontal airflow for airborne particles control in hospital operating room," Building and Environment, Vol.44, No.11, pp.2284-2289, 2009.
- [2] K.C.Noh, H.S. Kim and M.D. Oh, "Study on contamination control in a minienvironment inside clean room for yield enhancement based on particle concentration measurement and airflow CFD simulation," Building and Environment, Vol.45, No.4, pp.825-831, 2010.
- [3] P. Naphon, S. Ratchaneekorn and J. Kurujareon, "Heat transfer and flow characteristics in the hard disk drive tester," International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.36, No.8, pp.820-826, 2009.
- [4] J. Thongsri and A. Khaokom, "Successful simulation of airflow in the microenvironment of an assembly automation machine and its implication," Accepted by Advanced Materials Research. Advanced Materials Research, Vols.931-932, pp. 1063-1067, 2014.
- [5] Ansys Fluent 14.5, User's guide, Chapter 4, 2012 Turbulence, October 2012.

## Successful Simulation of Airflow in the Microenvironment of an Assembly Automation Machine and its Implication

Jatuporn Thongsri<sup>a\*</sup> and Adisorn Khaokom<sup>b</sup>

Research Unit on Mechanical Reliability Technology

College of Data Storage Innovation

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Bangkok 10520, Thailand

<sup>a</sup>ktjatupo@kmitl.ac.th, <sup>b</sup>a.khaokom@hotmail.com

**Keywords:** Airflow, Computational Fluid Dynamics, Automation, Hard Disk Drive, Fan Filter Unit, Microenvironment

**Abstract.** Today, the hard disk drive (HDD) industry is using assembly automation machine (AAM) to construct head stack assembly (HSA) from smaller parts. AAM needs to operate in a clean environment with very low particle counts. To achieve this end, fan filter Unit (FFU) is used to supply purified air into the environment by filtering out airborne particles from recirculating air. In this study, we investigated numerically the airflow induced by FFUs inside a microenvironment that houses an AAM in an HDD factory. The boundary conditions chosen for simulation were directly derived from the real ambient conditions in this HDD factory. We found that the FFUs not only filter out airborne particles from the air supplied into the microenvironment but also act as a particle blocker, pushing away the nearby particles in the air surrounding the openings of the microenvironment. The findings from this study can be applied to cases where other kinds of machinery need to be protected from airborne particles.

### Introduction

Production of electronics parts and components is an important industry in Thailand. In 2011, it generated 12 billion US dollars income into the country which amounted to 30% of all Thailand's incomes from exports. This kind of production absolutely needs to be done in clean room or environment with very low particle counts. The standards of clean environment vary among different types of production. In general, the standard of clean room for production of electronics parts is 'class 100'; that is, only 100 particles per cubic feet bigger than 0.5  $\mu\text{m}$  are allowed. However, class 100 clean room is very expensive to construct and maintain, so in a real mass production facility, class 1,000 clean room is used instead, where only 1,000 particles per cubic feet bigger than 0.5  $\mu\text{m}$  are allowed. To ensure that this type of clean room provides sufficiently low particle counts around the AAM, FFUs are installed on top of the AAM's microenvironment. The rationale behind using FFUs in this way is that when the ambient conditions around an AAM's microenvironment are tightly controlled—conditions such as temperature, pressure, and air velocity—the air filtered through the FFUs into the microenvironment will have sufficiently low particle counts.

From a literature search, we found that there was no direct computer fluid dynamics (CFD) study of airflow in the microenvironment of an assembly automation machine reported before, but there were several indirect studies such as studies of airflow in a clean room and other facilities [1-5]. Those studies applied the same fluid dynamic principles that are relevant to our work. One of those studies is by Liu et al [1]. They investigated the effect of medical lamps and thermal plume on the airflow pattern in a hospital operating room. Noh et al. [2], using a CFD simulation of particle counts, were able to successfully control the contamination inside a clean room. Naphon et al. [3] studied the heat transfer and airflow inside an HDD tester. They found that air flowed unevenly there. Recently, Liu et al. [4, 5] conducted a numerical study of the effect of HDD cover and

circulating filter as well as of airflow pattern on the entrapment of loose particles inside an HDD. Their findings are very useful for precise design of components for reducing particle contamination inside an HDD while it is spinning. Recently, we applied a standard, an RNG and a realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model to predicting the airflow inside a 3.5 dual platter HDD [6]. The results from these studies show that there were large differences among the reported velocities around the HGA. These three  $k-\varepsilon$  turbulence models also have several limitations when applied to practical applications.

In this article, using the transition shear stress transport (transition SST) model in Fluent simulation software, we conducted simulations to accomplish 2 objectives: first, to numerically investigate the airflow pattern inside the microenvironment of an assembly automation machine under real ambient conditions in a production line; and second, to determine the capability of fan filter units for blocking out airborne particles in the surroundings of the microenvironment.

## Methodology

### Mathematical Modeling

The main mathematical equations used in this study were conservation equations and turbulence equations. The conservation equations used, elaborated in reference [7], were the following equations: mass conservation (1), momentum conservation (2), and energy conservation (3).

$$\partial\rho/\partial t + \nabla\cdot(\rho v) = S_m, \quad (1)$$

$$\partial(\rho v)/\partial t + \nabla\cdot(\rho v v) = -\nabla p + \nabla\cdot(\tau) + \rho g + F, \quad (2)$$

$$\partial(\rho E)/\partial t + \nabla\cdot(v(\rho E + p)) = -\nabla\cdot(\Sigma j_h j_j) + S_h, \quad (3)$$

where  $\rho$  is the fluid density and  $t$  is time.  $\tau$  is the stress tensor related to molecular viscosity.  $S_m$  and  $S_h$  are user-defined source terms.  $\rho g$  and  $F$  are the gravitational force and external body forces, respectively.  $p$  is the static pressure.

The turbulence equations used in this study were chosen from several available mathematical models. These models are such as  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ , transition SST, etc. Each of these and other models has been reliably used for solving different types of engineering and physics problems. We specifically chose the turbulence equations of the transition SST model because they suited the nature of our problem perfectly and are widely accepted by HDD industrial research laboratories [8]. These equations were the following equations: turbulence kinetic energy ( $k$ ), specific dissipation rate ( $\omega$ ), intermittency ( $\gamma$ ), and transition momentum thickness Reynolds number ( $R\tilde{e}_{\theta t}$ ). The full forms of these equations are omitted because of limited space, but they can be found in reference [7]. To obtain numerical results, all of the seven equations used in this study were solved with a finite volume method (FVM) in Fluent software.

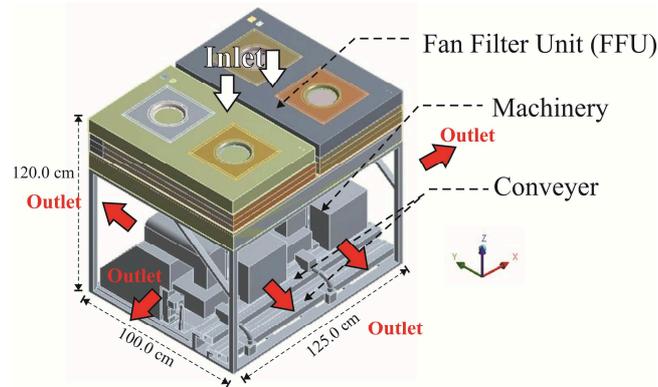
### Assembly Automation Model

The assembly automation machine (AAM) pertaining to this study is an industrial machinery for assembling smaller parts into head stack assembly (HSA), a major component of hard disk drive (HDD). In an HDD factory, an assembly automation machine is housed in a class 1,000 clean room and composed of 3 functional parts. The first part is a fan filter unit (FFU) which gently blows laminar-flow air which is filtered to very low particle counts over the other 2 parts in the microenvironment. The second part is a machinery that assembles parts into an HSA. The third part is a conveyor that transports the HSA assembly to various positions inside the microenvironment. Fig. 1 illustrates a simplified solid model of an AAM. It can also be seen in this figure that the air flows downward from the top of the FFUs and flows out through the outlets along all 4 sides of the AAM. Air flow directions are one of the conditions that need to be set before running the Fluent simulation software.

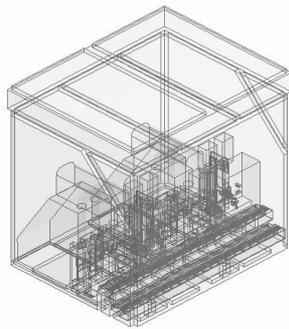
### Fluid and Mesh Models

Fig. 2 illustrates a fluid model of the AAM based on the previously mentioned solid model. The model was constructed with Ansys 14.5 software. To find an optimum mesh model, five different mesh models were constructed. These 5 models differed only in the resolutions of the meshes

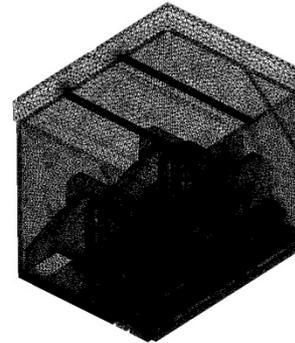
around the conveyor and the outlets on 4 sides of the AAM. The number of nodes and elements varied in the ranges of 1.25-1.44 million and 6.54-7.65 million respectively. All of these 5 models went through a mesh independent analysis. The optimum model found had 1.28 million nodes and 6.84 million elements. It was optimum in accuracy and computation time. Below in Fig. 3 is an illustration of this mesh model.



**Figure. 1** Schematic diagram of assembly automation and its airflow direction



**Figure. 2** Fluid Model



**Figure. 3** Mesh Model

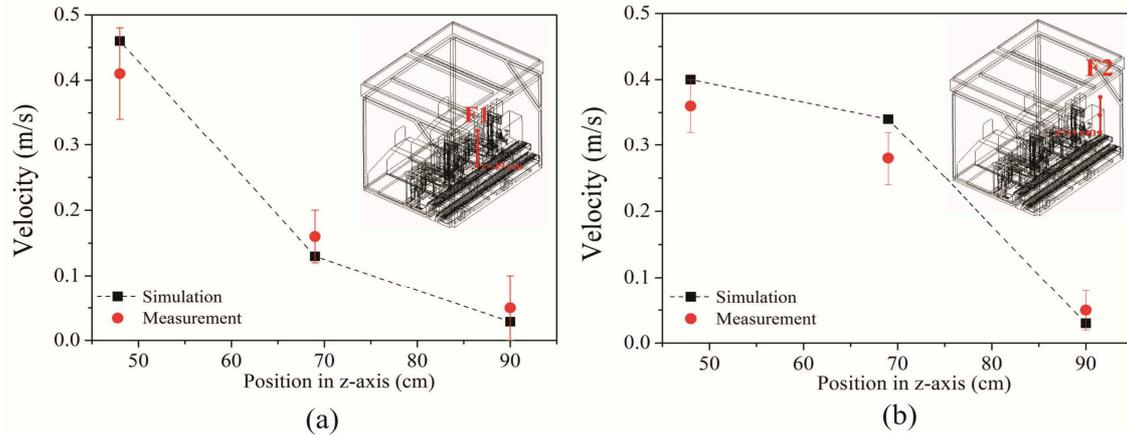
### Fluent Setup

Before a Fluent simulation can start, the boundary conditions and other parameters must be set first. In this study, these values were obtained from real ambient conditions around an AAM in an HDD factory. The boundary conditions were set as follows: air velocity at the inlet at  $0.45 \pm 0.05$  m/s, room pressure at  $106,300 \pm 300$  Pa, room temperature at  $297.5 \pm 0.1$  K and pressure gauge 0 Pa as a pressure outlet condition. Other settings were as follows: pressure-velocity coupling was set to couple; spatial discretization of pressure, momentum, turbulent kinetic energy, and turbulent dissipation rate was set to be second order upwind. With the settings above, steady state solutions were computed. After these solutions were found, they were input into a transient solver module to compute the final transient solutions. This time, the settings for the transient module were as follows: a time step of  $2 \times 10^{-5}$  s was set for 500 steps with 10 iterations per time step; absolute convergence criterion was set at  $10^{-6}$ . In the final step, the transient solutions found were used to determine the airflow pattern inside the AAM.

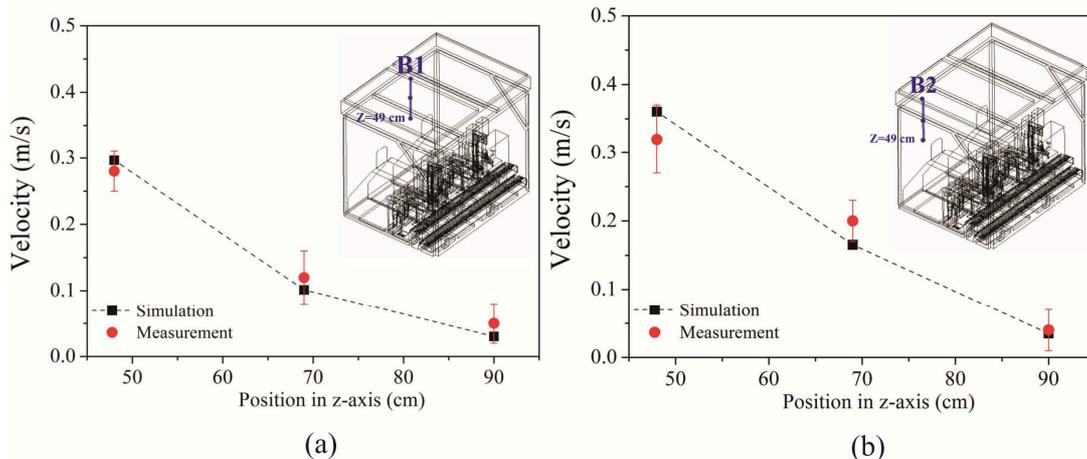
### Results and Discussion

In this section, we discuss the accuracy of our simulation and the particle-blocking capability of the FFUs. First, to check the accuracy of our simulation, we compared the simulated air velocities with the measured air velocities taken at the factory site. These measured velocities were taken at 3 different places with an anemometer that was accurate to  $\pm 0.03$  m/s. The first place was at the front side of the AAM along the lines F1 and F2 at the z-positions of 49, 68, and 90 cm, as shown in Fig. 4. The second place was at the back side of the AAM along the lines B1 and B2 at the same z-positions, as shown in Fig. 5. It can be clearly seen in these two figures that the simulated velocities

matched the measured velocities closely. The small discrepancies between the two might be due to the inconstant air velocity coming out from the FFUs. The measured velocities were varying in the range of 0.40-0.50 m/s, but we used the average value of 0.45 m/s in our simulation. The third place that air velocities were measured at was a region around the conveyor. The conveyor was operating normally when measurements were taken, so its smaller parts were moving constantly, causing the measured air velocities around them to swing in the range of 0.08-0.22 m/s. Our simulated air velocities in this region were in the range of 0.09-0.21 m/s, matching the measured ones very closely again. All of these results suggested that our simulation was accurate.



**Figure. 4** Comparison between the measured air velocity with the simulated results at front side of the assembly automation



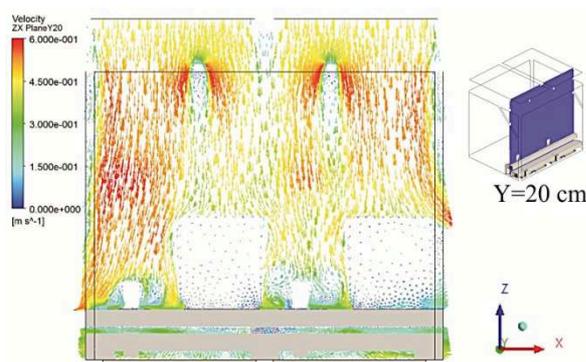
**Figure. 5** Comparison between the measured air velocity with the simulated results at back side of the assembly automation

Second, to determine the particle-blocking capability of the FFUs, we compared the speed of simulated air velocity vectors inside the AAM's microenvironment with the measured air speed immediately outside it. An illustration of the air velocity vectors in an XZ plane is shown in Fig. 6, and another one but in a YZ plane in Fig. 7. The speed of the vector velocities in these planes and several other similar planes were many times higher than the speed of the outside air which was around 0.00-0.01 m/s, so we can infer that air comes out of the FFUs, flows into the microenvironment, and flows out of it along its four sides continuously. In effect, the outflow air blocks the surrounding airborne particles from getting into the microenvironment.

## Summary

In this study, we numerically investigated the airflow inside the microenvironment of an assembly automation machine for assembling head stack assembly of hard disk drive (HDD). Fluent simulation software was used to simulate the airflow. Specifically, the airflow was computed with

Fluent's transition SST model along with real ambient conditions measured in an established HDD factory. We found that our simulated airflow matched the real air flow closely. We also found that the air flowing out of fan filter units can block outside airborne particles from getting into the microenvironment. Our findings can be used to devise a way to reduce airborne particle contamination in the environment of other production-line machines in the HDD industry and other related industries. Our next study will use the same methodology used in this study but adding an additional discrete phase model to simulate traces of small particles released by movements of machine parts. We are interested in finding ways to get rid of these particles from an AAM's microenvironment.



**Figure. 6** Velocity vectors in a given xz plane at y=20. cm



**Figure.7** Velocity vectors in a given yz plane at x=55 cm

### Acknowledgement

The authors would like to thank the College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for having financially supported this research.

### References

- [1] J. Liu, H. Wang, W. Wen, Numerical simulation on a horizontal airflow for airborne particles control in hospital operating room, *Build. Environ.* 44 (2009) 2284-2289.
- [2] K.C. Noh, H.S. Kim, M.D. Oh, Study on contamination in a minienvironment inside clean room for yield enhancement based on particle concentration measurement and airflow CFD simulation, *Build. Environ.* 45 (2010) 825-831.
- [3] P. Naphon, S. Ratchaneekorn, J. Kurujareon, Heat transfer and flow characteristics in the hard disk drive tester, *Int. Commun. Heat. Mass.* 36 (2009) 820-826.
- [4] N. Liu, Q. Zhang, K. Sundaravadivelu, A numerical simulation of particle trajectory in thin hard disk drive, *IEEE Trans. Magn.* 49 (2013), 2590-2593.
- [5] N. Liu, Z. He, C.K.T. Chow, H.T. Loh, A numerical investigation of particle trajectory inside hard disk drives, *IEEE Trans. Magn.* 47 (2011) 1890-1892.
- [6] J. Thongsri, Comparison of  $k-\epsilon$  turbulence models for predicting airflow in 3.5 dual platter hard disk drive, *Proc. Int. Conf. Engineering, Applied Science, and Technology*, (2013) 1-5.
- [7] Ansys Fluent 14.5, User's guide, Chapter 4 Turbulence, 2012.
- [8] F.R. Menter, Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective, *Int. J. Comput. Flu. Dyn.* 23 (2009) 305-316.

# Optimum Airflow to Reduce Particle Contamination Inside Welding Automation Machine of Hard Disk Drive Production Line

Jatuporn Thongsri<sup>1,2,#</sup> and Monsak Pimsarn<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Research Unit on Mechanical Reliability Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

<sup>2</sup> College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

# Corresponding Author / E-mail: ktjatupo@kmitl.ac.th, TEL: +66-2-329-8271, FAX: +66-2-329-8263

KEYWORDS: Airflow, Automation, Particle contamination, Computational fluid dynamics, Fan filter units

*Welding automation machine (WAM), used for welding minute components to the head gimbal assembly (HGA) of a hard disk drive (HDD), needs to operate in a strictly clean environment. In today's HDD factories, to prevent airborne particle contamination to the WAM, Fan Filter Units (FFUs) are installed on top of it to supply clean air and blow away outside airborne micro particles, keeping the microenvironment clean. Furthermore, the mass of the clean air should also carry away harmful particles generated inside the microenvironment. In this research, numerical simulation of airflow inside a WAM was performed in order to verify these cleaning functions of the airflow. A transition shear stress transport turbulence model was employed to simulate airflow from the FFUs through and out of the microenvironment. The simulation results showed that the airflow from the FFUs truly performs the two cleaning functions as intended. Moreover, they also revealed that the optimum air speed, the speed resulting in the lowest particle counts, is in the range of 0.35-0.55 m/s. Our findings can be useful for developers who may use FFUs to reduce particle counts in the environment of other types of industrial machinery.*

Manuscript received: May 2, 2014 / Revised: November 27, 2014 / Accepted: December 1, 2014

## NOMENCLATURE

$i, j = 1, 2, 3$  correspond to the components of  $x, y$  and  $z$ , respectively

$\rho$  = fluid density

$u$  = velocity

$P$  = pressure

$t$  = time

$F$  = external force

$k$  = thermal conductivity

$E$  = internal energy

$\sigma_{ij}$  = stress tensor

$T$  = temperature

$S$  = user-defined source term

## 1. Introduction

Production of electronic parts and components is an important industry in Thailand. In 2011, it generated several billions US dollars which amounted to 30% of all Thailand's incomes from exports. This kind of production absolutely needs to be done in a clean room or a clean environment with very low particle counts. Contaminating particles are generated by various human activities.<sup>1</sup> Some activities may generate up to 30 million particles per minute.<sup>2</sup> Movement of machine parts also generates a lot of micro particles. The standards of a clean environment vary among different types of industrial production. In general, the standard of a clean room for production of electronic parts is 'class 100', referring to the US FED STD 209E criterion; that is, only 100 particles per cubic feet bigger than 0.5  $\mu\text{m}$  are allowed. However, class 100 clean room is prohibitively costly to construct and maintain; therefore, in a real mass production facility, class 1,000 clean room is used instead, in which only 1,000 particles per cubic feet bigger than 0.5  $\mu\text{m}$  are allowed. In order to achieve even lower particle

counts, particularly around a welding automation machine (WAM) in a hard disk drive production line, fan filter units (FFUs) are installed on top of the WAM's microenvironment, under the assumption that when temperature, pressure, and air velocity around the WAM are tightly controlled, the air coming through the FFUs into the microenvironment should be sufficiently free of contaminating particles.<sup>3-5</sup> Another two tacit assumptions are that the clean air from the FFUs should block outside airborne micro particles from coming through the openings of the microenvironment and purge out particles generated inside it.

However, direct verification of these two latter functions is not practical. It is not only next to impossible to set up an experiment that can accurately measure particle counts and air speeds inside the microenvironment of an operating WAM without introducing confounding elements that will render the obtained data useless, but it is also too costly to stop a production line to perform an experiment—a blackout of only 10 minutes at a hard disk drive factory has cost the manufacturer many thousands US dollars. Therefore, we have resorted to reliable computer simulation of the actual event. We have successfully used computational fluid dynamics (CFD) before to predict the airflow behavior inside a hard disk drive and inside a microenvironment of a production line machinery.<sup>6,7</sup> The simulated results were empirically verified to be sufficiently accurate.

Even though a specific CFD study of the airflow inside the microenvironment of a WAM has not been reported in the literature, there were several similar studies of airflow in a clean room and other facilities.<sup>8-15</sup> One of these studies was done by Srebric et al.<sup>8</sup> They used CFD to predict contaminant dispersion around human occupants, yielding valuable data that can be used to resolve poor indoor air quality. Rouaud and Havet<sup>9</sup> used CFD to find a method for solving a contamination problem in a food-processing clean room. Liu et al.<sup>10</sup> investigated how medical lamps and thermal plume affected the airflow pattern in a hospital operating room. More closely related to our study, Noh et al.<sup>11</sup> simulated particles inside the microenvironment of an LCD-manufacturing clean room and were able to use their results to formulate a way to control particle contamination in the room. As for hard disk drive (HDD) related CFD studies, two are particularly relevant: Naphon et al.<sup>12</sup> found that air flowed unevenly inside an HDD tester; and Liu et al.<sup>13,14</sup> investigated how the HDD cover and circulating filter affected the airflow pattern and entrapment of particles generated inside a spinning HDD. Another example of related CFD studies comes from a medical research study. Inthavong et al.<sup>15</sup> simulated the manner of particle deposition in human nasal cavity after a nasal spray device was applied. All of these studies are evidence of widespread and reliable uses of CFD to simulate airflow and particles in an environment. CFD is a viable tool for discovering ways to reduce particle contamination.

In an ongoing cooperative research with a hard disk drive manufacturer, the authors have come to know of a problem in the manufacturer's FFU-equipped hard disk drive production line; a production reliability technician has reported that when the air speed blowing out of the FFUs was too low or too high, the finished products did not meet their reliability standard. There was an excessive contamination of particles such as polystyrene, aluminum, stainless steel, etc. Hence, we decided to investigate the nature of this problem by using CFD. We set out to find the answers to 3 particular questions, namely: (1) Can the FFUs actually blow away the particles in the

surrounding air and the machine-generated particles inside the WAM microenvironment? (2) How many of each kind of particles-polystyrene, aluminum, and stainless steel-get blown away or trapped on the conveyor of the WAM? and (3) What is the optimum FFUs' air speed that reduces particle contamination most effectively?

## 2. Theoretical Backgrounds

### 2.1 Conservation equations

Airflow pattern was determined by solving a set of partial differential equations: conservation equations and turbulence equations. The conservation equations are given by Eqs. (1)–(3).<sup>16</sup> Similarly, particle tracking, finding the position of a contaminating particle at each point in time as it is carried away by the mass of the flowing air, was determined by solving a particle force balance equation.<sup>17</sup> This capability is featured in the discrete phase model (DPM) of the Fluent CFD software.

$$\partial\rho/\partial t + \partial(\rho u_i)/\partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial(\rho u_i)/\partial t + \partial(\rho u_i u_j)/\partial x_j = \\ -\partial P/\partial x_i + F_i + \partial[\tau_{ij}]/\partial x_j + \partial(-\rho \overline{u_i u_j})/\partial x_j + \partial(-\rho \overline{u_i^2})/\partial x_i + S_m \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \partial(\rho E)/\partial t + \partial[u_i(\rho E + P)]/\partial x_i = \\ \partial((k)_{eff}(\partial T/\partial x_j) + u_i(\tau_{ij})_{eff})/\partial x_j + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2 Turbulence equations

Several mathematical models incorporate turbulence equations for solving various types of engineering and physics problems—models such as  $k$ - $\epsilon$  family,  $k$ - $\omega$  family, transition  $k$ - $k$ - $\omega$ , and transition SST. We chose the transition SST model for this study because of its perfect match to the nature of our problem and its wide acceptance by several HDD and other industrial research laboratories.<sup>18</sup> The transition SST has 4 adjustable parameters: turbulence kinetic energy ( $k$ ), specific dissipation rate ( $\omega$ ), intermittency ( $\gamma$ ), and transition momentum thickness Reynolds number ( $R_{et}$ ). The full forms of the 4 equations containing these parameters can be found in reference.<sup>16</sup> To find an airflow pattern, the Fluent CFD software solves Eqs. (1)–(3) together with the 4 equations mentioned above, making up a total of 7 equations to be solved.

### 2.3 Discrete phase model

To determine the number of contaminating particles trapped on the conveyor of a WAM, the discrete phase model (DPM) featured in the Fluent CFD software was used. Since the particles were very small, 0.5  $\mu\text{m}$ , it was assumed that the coupling between the fluid phase and the particle phase was one way only; that is, only the fluid phase affected the particle phase through drag and turbulence. Particle tracking was achieved by solving the particle force balance equation,<sup>17</sup> shown below.

$$du_p/dt = F_D(u_g - u_p) + g(\rho_p - \rho_g)/\rho_p + F_s \quad (4)$$

where subscripts  $p$  and  $g$  represent the particle and the fluid, respectively.  $F_D$  is the drag force acting on the particle.  $F_s$  represents other forces

such as virtual mass force, Basset force, pressure gradient force, lift force, thermoelectric force, Brownian force, etc. that are not applicable to the micron-sized particle in which  $\rho_p \gg \rho_g$ . Therefore, only drag force is considered to act on the particles in the model.

### 3. Methodology

#### 3.1 Welding automation machine

A welding automation machine (WAM) is a type of industrial machinery employed in hard disk drive (HDD) factories for welding together smaller components of an HDD. It operates in a class 1,000 clean room in order to protect the assembled HDDs from damaging particle contamination. The microenvironment of a WAM is further protected from airborne particles by fan filter units (FFUs) which blow filtered air into it. Inside the microenvironment, there are 2 kinds of machines: a welder and a conveyor that carries the components to be welded in and out. A solid model of a WAM is shown in Fig. 1. The illustration also shows the primary directions of airflow—downward from the FFUs and outward through the openings on all 4 sides of the microenvironment. It was necessary to set up these conditions properly in the Fluent CFD software before a simulation run.

#### 3.2 Fluid and mesh models

Based on the solid model in Fig. 1, a fluid model, shown in Fig. 2(a), and several mesh models were constructed with Ansys 14.5 software. Specifically, six different mesh models differing only in their mesh resolution around the areas of the conveyor and the openings on all 4 sides of the WAM microenvironment were constructed. The number of nodes and elements of these 6 models were in the ranges of 0.81-0.96 millions and 4.03-4.96 millions, respectively. All of these 6 models were then tested for the best balance between accuracy and computation time by a mesh independent analysis. The optimum model, shown in Fig. 2(b), was found to be the one with 0.85 million nodes and 4.37 million elements.

#### 3.3 Fluent setup

To start a simulation, boundary conditions and other parameters need to be set first. The conditions and parameters that we used were obtained from real ambient characteristics around an actual WAM in an HDD factory. They were as follows: air velocity at the inlet at  $0.45 \pm 0.07$  m/s, air pressure in the room at  $106,300 \pm 300$  Pa, room temperature at  $24.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , and air pressure difference at the outlets at 0 Pa. Other settings were set as follows: pressure-velocity coupling was set to couple; spatial discretization of pressure, momentum, turbulent kinetic energy, and turbulent dissipation rate were set to be second order upwind. With these settings, steady state solutions were computed until the solution converged. The converged solution depicted the airflow pattern inside the WAM. This pattern was used, together with the discrete phase model, to determine particle tracks.

#### 3.4 Validation

This section discusses the accuracy of our simulation. The accuracy was checked by comparing the simulated air velocities to the actual air velocities measured on site at an HDD factory. The actual air velocities

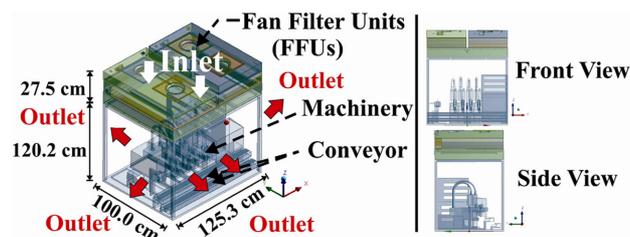


Fig. 1 Solid model of the welding automation machine and the airflow directions in its microenvironment

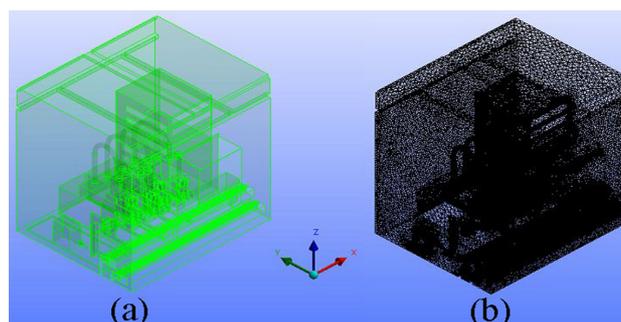


Fig. 2 (a) Fluid Model and (b) Mesh model

were measured at 3 different areas in the WAM microenvironment with a hot-wire anemometer that was accurate to 0.03 m/s. In 2 areas, 1) and 2) below, air velocities were measured perpendicular to the outlet surfaces, no such specified direction for area 3). They were the following: 1) at the front side of the WAM along the line F1 at the positions 50, 70, and 90 cm on the z-axis, as shown in Fig. 3(a); 2) at the back side of the WAM along the line B1 at the same 3 z-positions, as shown in Fig. 3(b); and 3) at an area around the conveyor. We found that, at the first 2 areas, 1) and 2), the simulated and the measured air velocities matched closely at all positions, as can be seen in Fig. 3. The small discrepancies might be because we used a single average value of 0.45 m/s for the air velocity coming out from the FFUs in our simulation instead of the actual unsteady air velocities of 0.38-0.52 m/s. At the area around the conveyor, since small parts were moving constantly, the actual air velocities there swung from 0.05-0.23 m/s. Again, this range matched closely with the range of our simulated air velocities around that area at 0.08-0.23 m/s. Shown in Fig. 4, the air leaving the FFUs flowed into the WAM and out from its four sides. These simulated airflow directions were similar to those observed in the factory as mentioned in section 3.1. Please note that we also measured additional air velocities along 4 other different lines that were also in good agreement with the simulated ones, but they are not presented here due to limited space.

Another positive check of the accuracy of our simulation was that the observed trend of more simulated particles got trapped on the conveyor at higher FFUs' air speed settings was the same as the trend reported by a technician at the factory that the level of contamination in their finished products also became unacceptably high at higher speed settings. More detailed description of the observed trend is in the results and discussion section.

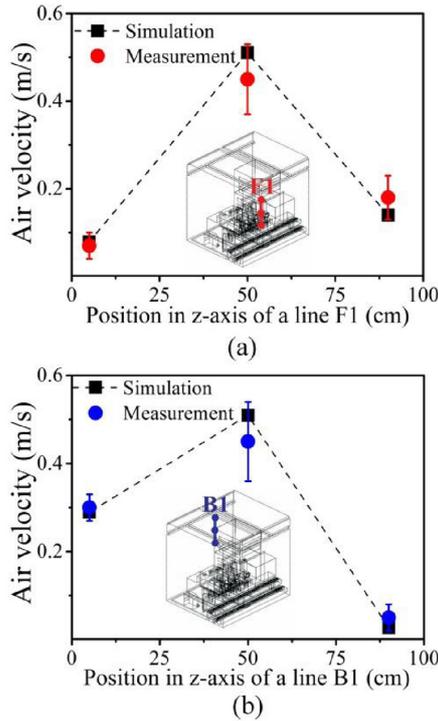


Fig. 3 Comparison between the measured and the simulated air velocities at (a) the front side and (b) the back side of the welding automation machine

4. Results and Discussion

In this section, simulation results are described and their implications discussed. The discussion is organized into 4 topics: first, the blocking capability of the airflow from fan filter units (FFUs) that prevented outside airborne particles from intruding into the WAM’s microenvironment; second, the purging capability of the airflow from FFUs that carried away particles generated inside the microenvironment; third, the different extents of contamination on the conveyor by 3 kinds of particles of different densities-polystyrene, aluminum, and stainless steel; and fourth, the optimum air speed of the FFUs that provided the best prevention of contamination on the conveyor.

The first topic of discussion is the outside-particle blocking capability of the airflow from the FFUs. Our premise regarding this capability was that if the mass of air from the FFUs blowing out of the microenvironment through its outlets was at a speed much higher than that of the air outside blowing in, airborne particles in the mass of the outside air would not be able to get carried into the microenvironment. A comparison between the simulated air velocity vectors at the outlets and the actual air velocities measured immediately outside the microenvironment was made, and it was found that, at every outlet, the speed and direction of the air blowing out were much higher than those of the surrounding air blowing in, which is around 0.00-0.03 m/s. Fig. 4 shows these simulated air velocity vectors. Hence, it was concluded that the airflow from the FFUs was truly able to block outside airborne particles from intruding into the microenvironment of the WAM.

The second topic is the purging capability of the airflow from the FFUs that carried away particles generated inside the microenvironment.

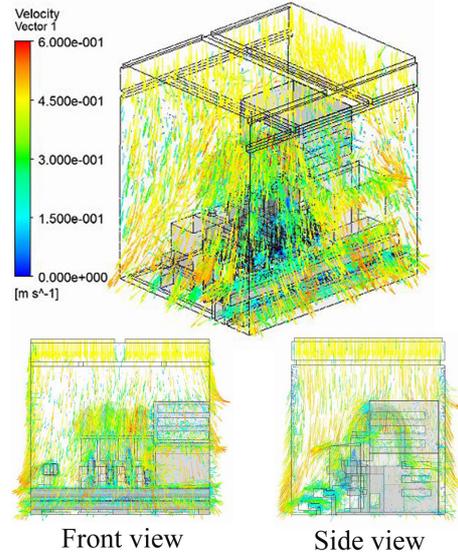


Fig. 4 Air velocity vectors inside the WAM at an inlet velocity of 0.45 m/s

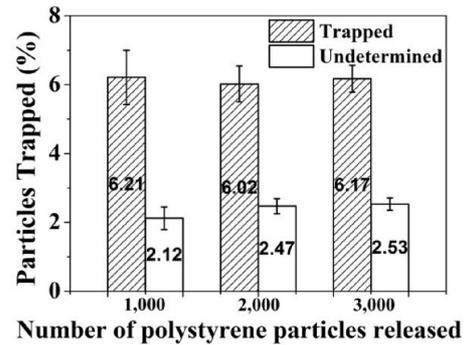


Fig. 5 Percentages of polystyrene particles trapped on the conveyor

To determine this capability, we used the discrete phase model of the Fluent CFD software to simulate particles released from various places inside the microenvironment. Specifically, 0.5 μm polystyrene particles numbering in 1,000, 2,000, and 3,000 were simulated to detach from randomly selected places. Their motion was constrained by the airflow from the FFUs at the speed of 0.45 m/s. The simulation was repeated 50 times. At the end of each run, the number of particles trapped on the conveyor was counted. It can be seen in the histogram in Fig. 5 that most of the particles were purged from the microenvironment. For the release of 2,000 particles, after 20,000 iterations, only 6.02% were trapped on the conveyor and 2.47% were still undetermined whether they would eventually be trapped or purged-undetermined meaning that the particles were still floating inside the WAM. It should be noted that, in a real situation, only the moving parts or the scraping parts of the WAM generate particles, not all of its parts. Therefore, the actual number of trapped particles should be lower than this. Fig. 6 illustrates the tracks of 500 particles colored according to their velocity magnitude. It shows that most particles got blown out of the microenvironment; only a few got trapped on the conveyor.

According to a report from the factory, finished products processed

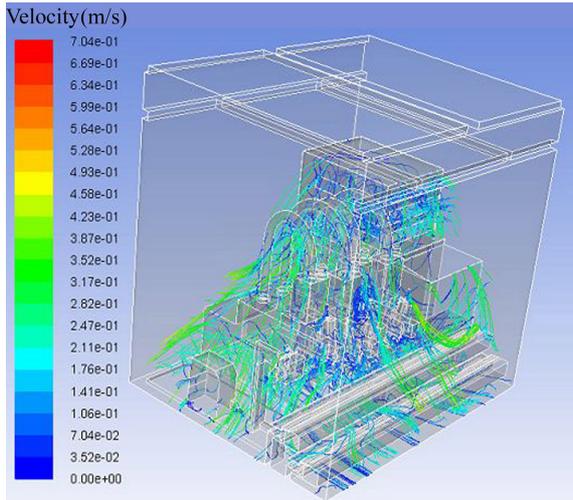


Fig. 6 Particle tracks inside the WAM

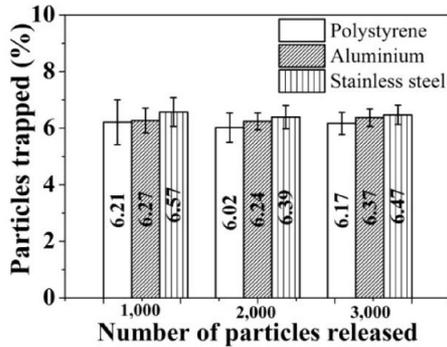


Fig. 7 Percentages of the numbers of polystyrene, aluminium, and stainless steel particles trapped on the conveyor

in the WAM microenvironment were contaminated by many types of particle. Therefore, the third topic is the different extents of contamination on the conveyor by 3 kinds of particles of different densities-polystyrene, aluminum, and stainless steel. Simulation runs were conducted to find out whether these particles, found frequently in the clean room housing an actual WAM in an HDD factory, contaminated the conveyor to the same extent or not. Releases of the following types of particles were simulated: 0.5  $\mu\text{m}$  particles of polystyrene ( $\rho=1,050 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p=1,300 \text{ J/kg-K}$ ), aluminum ( $\rho=2,719 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p=871 \text{ J/kg-K}$ ), and stainless Steel ( $\rho=8,000 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p=500 \text{ J/kg-K}$ ). For each kind of particles, their simulation was run repeatedly for 50 times. Our finding was that the three types of particles did not contaminate the conveyor to a much different extent. As shown in Fig. 7, around 6% of them got trapped on the conveyor. Even though more of the stainless steel particles got trapped, the difference was minimal, indicating that the effect of density on the level of contamination was negligible for our simulation settings.

Our last topic of discussion is the optimum air speed of the FFUs for providing the least amount of contamination on the conveyor. Particle contamination comes from 2 sources: they are either carried into the microenvironment by the mass of air surrounding it or generated inside

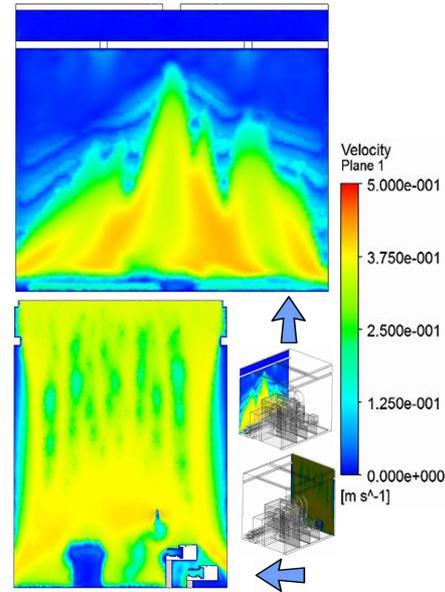


Fig. 8 Air velocity contour in two given planes of the WAM at the FFUs' air speed of 0.35 m/s

the microenvironment itself. We determined the optimum air speed for preventing contamination from each source and suggested the overall optimum air speed that yields the least amount of contamination from both sources.

For the purpose of finding the optimum FFUs' air speed for blocking outside particles, we simulated airflow with speeds ranging from 0.03-0.65 m/s. It was found that any air speeds coming out of the FFUs in the range of 0.25-0.65 m/s resulted in an air speed at the outlets that was many times higher than the speed of the air surrounding the microenvironment which is typically 0.00-0.03 m/s and, hence, should be able to block out particles coming in from the surrounding air. For example, the simulated outlet air velocity at position 50 on the z-axis at the front side of the microenvironment was about 0.44 m/s, much higher than 0.03 m/s, when the FFUs' air speed was 0.45 m/s. In an extreme case where people are breathing and talking near a WAM, the air velocities produced by these activities are still lower than this outlet velocity. To verify this estimation, our students measured for 100 times the air velocities 10 cm away from their faces while they were talking and they found that the air velocities were in the range of 0.190.07 m/s, still much lower than the outlet velocity, shown in Fig. 8. Since the air velocities blowing out from inside the microenvironment were much higher than the air velocities blowing in from the activity of the technicians, outside particles could not be carried by the outside air mass deeply into the conveyor.

To find the optimum air speed for purging internally generated particles, we released 3,000 polystyrene particles into the air inside the microenvironment in runs at 6 specified FFUs' air speeds. The particles were released 50 times in each run and the numbers of particles trapped on the conveyor were observed. The results are shown as a histogram in Fig. 9. The standard deviation of each result ranged from 0.13-0.36%. It can be seen that, at the FFUs' air speed of 0.03 m/s (the same as the typical air speed in a clean room), only 0.69% of all of the particles got trapped on the conveyor while 37.40% were still undetermined whether

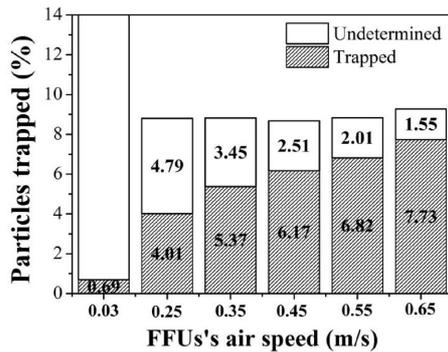


Fig. 9 Percentages of particle trapped on the conveyor at various FFUs' air speeds

they would drop onto it or get purged out of the microenvironment. At the FFUs' air speeds in the range of 0.35-0.55 m/s, the percentages of trapped particles were higher, in the range of 5.37-6.82%. However, at a higher air speed of 0.65 m/s, the percentage of trapped particles jumped to 7.73%. These results implied that higher speed air pushed more particles onto the conveyor. This finding is in agreement with the report from a technician at the HDD factory that when their FFUs' air speed was set too low or too high, the finished products were contaminated to an unacceptable level.

The results in Fig. 9 also reveal that FFUs' air speed within the range of 0.25-0.35 can reduce particle contamination most effectively. This agrees with the minimum FFU's air speed of class 100 clean room suggested in references<sup>19,20</sup> of 0.26-0.36 m/s. Based on these results, we concluded that the overall optimum FFUs' air speed for both blocking and purging should be in the range of 0.35-0.55 m/s to allow for higher surrounding air speeds from activities of on-site operators, technicians and engineers. This piece of information was forwarded to the HDD factory and accepted as valid data for further development of their clean production line.

## 5. Conclusions

In this study, Fluent CFD software was utilized to simulate the airflow from fan filter units (FFUs) into and out of the microenvironment of a welding automation machine of a hard disk drive production line in order to investigate the FFUs' airborne particle blocking and purging capabilities. It was found that the airflow from the FFUs was able to block out particles effectively when the FFUs' air speed was in the range of 0.25-0.65 m/s. The airflow was also able to purge out internally generated particles effectively. However, at a higher air speed setting, the airflow pushed more particles onto the conveyor, contaminating it more instead. Also, an investigation of whether 3 kinds of particles with different densities-polystyrene, aluminum, and stainless steel-contaminated the conveyor to significantly different extents, revealed that the contaminations were roughly to the same extent, about 6%. Lastly, the overall optimum FFUs' air speed, for both the particle blocking and purging purposes, was found to be in the range of 0.35-0.55 m/s. These findings can be applied to other cases where FFUs are used to reduce particle contamination.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Development and Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST), College of Data Storage Innovation (DSTAR), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) and Seagate Technology (Thailand) Ltd. for supporting this research.

## REFERENCES

- McDonagh, A. and Byrne, M., "The Influence of Human Physical Activity and Contaminated Clothing Type on Particle Resuspension," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 127, pp. 119-126, 2014.
- Vidali, S., "Human Contamination Control in a Clean Room," *Microchemical Journal*, Vol. 45, No. 3, pp. 336-342, 1992.
- Flaherty, R., "Clean Rooms: Continuing Evolution of Fan Filter Units for Clean Rooms," *Filtration+ Separation*, Vol. 48, No. 4, pp. 33-37, 2011.
- Xu, T., Lan, C. H., and Jeng, M. S., "Performance of Large Fan-Filter Units for Cleanroom Applications," *Building and Environment*, Vol. 42, No. 6, pp. 2299-2304, 2007.
- Chen, J. J., Lan, C. H., Jeng, M. S., and Xu, T., "The Development of Fan Filter Unit with Flow Rate Feedback Control in a Cleanroom," *Building and Environment*, Vol. 42, No. 10, pp. 3556-3561, 2007.
- Thongsri, J. and Pongkom, V., "A Simulation of the Number of Particles Trapped by the Circulating Filter of a Hard Disk Drive and their Trajectories," *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 548-549, pp. 953-957, 2014.
- Thongsri, J. and Khaokom, A., "Successful Simulation of Airflow in the Microenvironment of an Assembly Automation Machine and Its Implication," *Advanced Materials Research*, Vols. 931-932, pp. 1063-1067, 2014.
- Srebric, J., Vukovic, V., He, G., and Yang, X., "CFD Boundary Conditions for Contaminant Dispersion, Heat Transfer and Airflow Simulations around Human Occupants in Indoor Environments," *Building and Environment*, Vol. 43, No. 3, pp. 294-303, 2008.
- Rouaud, O. and Havet, M., "Numerical Investigation on the Efficiency of Transient Contaminant Removal from a Food Processing Clean Room using Ventilation Effectiveness Concepts," *Journal of Food Engineering*, Vol. 68, No. 2, pp. 163-174, 2005.
- Liu, J., Wang, H., and Wen, W., "Numerical Simulation on a Horizontal Airflow for Airborne Particles Control in Hospital Operating Room," *Building and Environment*, Vol. 44, No. 11, pp. 2284-2289, 2009.
- Noh, K. C., Kim, H. S., and Oh, M. D., "Study on Contamination Control in a Minienvironment Inside Clean Room for Yield Enhancement based on Particle Concentration Measurement and Airflow CFD Simulation," *Building and Environment*, Vol. 45, No. 4, pp. 825-831, 2010.

12. Naphon, P., Ratchaneekorn, S., and Kurujareon, J., "Heat Transfer and Flow Characteristics in the Hard Disk Drive Tester," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 8, pp. 820-826, 2009.
13. Liu, N., Zhang, Q., and Sundaravadivelu, K., "A Numerical Simulation of Particle Trajectory in Thin Hard Disk Drive," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, No. 6, pp. 2590-2593, 2013.
14. Liu, N., He, Z., Chow, C. K. T., and Loh, H. T., "A Numerical Investigation of Particle Trajectory Inside Hard Disk Drives," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 7, pp. 1890-1892, 2011.
15. Inthavong, K., Ge, Q., Se, C. M., Yang, W., and Tu, J., "Simulation of Sprayed Particle Deposition in a Human Nasal Cavity Including a Nasal Spray Device," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 42, No. 2, pp. 100-113, 2011.
16. Ansys, Inc., "Ansys Fluent 14.5, User's Guide," Chap. 4, 2012.
17. Ansys, Inc., "Ansys Fluent 14.5, User's Guide," Chap. 16, 2012.
18. Menter, F. R., "Review of the Shear-Stress Transport Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective," *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 23, No. 4, pp. 305-316, 2009.
19. ISO No. 14644-1, "Cleanrooms and Associated Controlled Environments - Part 1: Classification of Air Cleanliness," 1999.
20. The Institute of Environmental Science and Technology, "Considerations in Cleanroom Design," IEST-RP-CC012.1, 1993.

## ประวัติผู้วิจัย



### ดร.จตุพร ทองศรี

อาจารย์และนักวิจัย

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10520

โทร: 02-3298271 แฟกซ์: 02-3298263

อีเมลล์: ktjatupo@kmitl.ac.th, thongsri\_j@hotmail.com

### ข้อมูลส่วนตัว:

วัน/เดือน/ปีเกิด: 10 มกราคม 2522 อายุ: 36 สัญชาติ: ไทย

### การศึกษา:

| ปริญญา | Major   | University            | Graduated Year |
|--------|---------|-----------------------|----------------|
| วท.บ   | ฟิสิกส์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น    | 2544           |
| วท.ม   | ฟิสิกส์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | 2548           |
| วท.ด   | ฟิสิกส์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | 2553           |

### ความชำนาญ:

- ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับงานวิศวกรรม
- พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ:

- 1.1 M. Natenapit and J. Thongsri, Shape Effect on the Strongly Nonlinear Response of Elliptical Composites, Eur. Phys. J. Appl. Phys. Vol. 46, pp. 20701-1-5, 2009.
- 1.2 J. Thongsri and M. Natenapit, Shape Effect on Weakly Nonlinear Elliptical Composites, Composites: Part B, Vol. 43, pp. 1252-1257, 2012.
- 1.3 J. Thongsri, V. Pongkom, A simulation of the Number of Particle Trapped by Circulating Filter of a Hard Disk Drive and Their Trajectories, Appl. Mech. Mater. Vol. 548-549, pp. 953-957, 2014.
- 1.4 J. Thongsri, Airflow Simulation inside Automation Machine using Computational Fluid Dynamics and Its Application for Reducing Particle Contamination, Ladkrabang Eng. J. Vol. 31, No. 1, pp. 1-5, 2014.
- 1.5 J. Thongsri, W. Suksawaeng, Numerical Investigation of Airflow Behavior inside Environmental Chamber, Adv. Mater. Res. Vol. 931-932, pp 1048-1052, 2014.

- 1.6 J. Thongsri, V. Pongkom, Simulated Trajectories of Particles and the Number of Particles Trapped by the Circulating Filter in a Hard Disk Drive, *Adv. Mater. Res.* Vol. 931-932, pp 1058-1062, 2014.
- 1.7 J. Thongsri, A. Kaokom, Successful Simulation of Airflow in the Microenvironment of an Assembly Automation Machine and its Implication, *Adv. Mater. Res.* Vol. 931-932, pp 1063-1067, 2014.
- 1.8 J. Thongsri, Effect of Grain Size on Effective Permittivity of Ferroelectric Films based on Effective Medium Theory, *Appl. Mech. Mater.* Vols. 619, pp. 188-192, 2014.
- 1.9 J. Thongsri, M. Pimsarn, Optimum Airflow to Reduce Particle Contamination Inside Welding Automation Machine of Hard Disk Drive Production Line, *Int. J. Precis. Eng. Man.*, Vol. 16, No.3, pp 509-515, 2015.

#### ผลงานที่ได้รับการนำเสนอในการประชุมระดับนานาชาติ:

- 1.10 J. Thongsri, Comparison of  $k-\epsilon$  Turbulence Models for Predicting Airflow in 3.5-inch Dual Platter Hard Disk Drive, *Int. Conf. Engineering Applied Science and Technology*, Bangkok, Thailand, (2013) 1-5
- 1.11 V. Puengkhom, J. Thongsri, M. Pimsarn, On Finite Element Modeling Aspect of HDD's Head Stack Assembly Vibration Analysis, *Proc. The 5<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Chiang Mai, Thailand, AMM055, 2014.

#### ทุนวิจัยที่ได้รับ

| Titles   | Fund   | Years |
|--|--|-------|
| 1. Thermal Study on a Printed Circuit Board (PCB) Applicable to Hard Disk Drive  | Cal-Comp Electro (Thai) Pub. Co. Ltd.  | 2014  |
| 2. Study of Airflow Characteristics inside a Computer Case and Its Application for Reducing Particle Contamination using CFD | Cal-Comp Electro (Thai) Pub. Co. Ltd.  | 2014  |
| 3. Numerical investigation of airflow behavior inside a DSTAR clean room   | The Development and Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST) | 2014  |
| 4. Effect of Environment on Airflow Simulation in Hard Disk Drive  | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)                      | 2013  |
| 5. Numerical Simulation of Particle Trajectory inside Automation   | College of Data Storage Innovation (DSTAR)                                     | 2013  |
| 6. Parametric Study of Head Stack Assembly (HSA) Vibration Characteristics   | Seagate Technology (Thailand) Ltd., KMITL and NSTDA                            | 2013  |
| 7. VENA Behavior Study Based on Hard Disk Drive Environment Test using FEM   | Seagate Technology (Thailand) Ltd.   | 2013  |
| 8. Airflow Simulation for Reflow, ULRT and ATAAP Machines using FEM  | Seagate Technology (Thailand) Ltd.   | 2013  |
| 9. Humidity and Temperature Behavior in VENA Chamber using FEM   | Seagate Technology (Thailand) Ltd.   | 2012  |