ผลกระทบจากการจัดวางพื้นที่การทำงานต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด

Effects of the Workbench Geometry on the Characteristics of Air flow in a Clean Room

มงคล แก้วบำรุง[1*] และ เวชพงศ์ ชุติชูเดช[1]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900
โทร 0-2942-8555 โทรสาร 0-2579-8570 *อีเมล์ mong_ae@hotmail.com

Mongkol Kaewbumrung[1*] and Vejapong Juttijudata[1]
[1] Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,
Bangkhen, Bangkok, 10900, Thailand,
Tel: 0-2942-8555, Fax: 0-2579-8570, *E-mail: mong_ae@hotmail.com

บทคัดย่อ:

Keywords: ห้องสะอาด (Clean room), CFD, การหมุนวนของกระแสอากาศ (Recirculation zones), พื้นที่การทำงาน (Workbench)

จุดประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของพัดลมเป่าประจุและตำแหน่งการนั่งของคน โดยในการศึกษานี้จะพิจารณาการไหลแบบคงตัวสองมิติและใช้การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ แบบมาตรฐาน และไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น โดยในการศึกษานี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป FLUENT ในการคำนวณ ผลที่ได้จากการศึกษาจะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดเพื่อตรวจสอบถึงความถูกต้อง ผลจากการศึกษาพบว่าทุกกรณีมีบริเวณที่เกิดการหมุนวนของกระแสอากาศซึ่งเป็นบริเวณที่กักเก็บฝุ่นเอาไว้ทั้งหมด 3 จุดหลักด้วยกันคือ บริเวณใต้เก้าอี้ที่พนักงานนั่ง, บริเวณที่ด้านหน้าของพนักงาน (ด้านหน้าของพัดลมเป่าประจุ) และด้านหลังของพัดลมเป่าประจุ ซึ่งบริเวณด้านหน้าของพนักงานเป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงที่จะนำฝุ่นละอองจากใบหน้าของพนักงานไปสู่ชิ้นงานได้ นอกจากนี้ยังพบว่าจากตัวแปรที่ศึกษา การเปลี่ยนแปลงระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุจากพื้นโต๊ะ มีผลทำให้ลักษณะและขนาดของการหมุนวนของกระแสอากาศเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ซึ่งการศึกษาในอนาคตจะมุ่งเน้นการศึกษาถึงวิธีลดการหมุนวนของกระแสอากาศที่ด้านหน้าของพนักงานและผลจากความไม่คงตัวของการไหลอันเนื่องมาจากผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของพนักงาน

The objective of this study is to investigate the effect of the workbench geometry in particular the height of air ionizer and the position of the operator. Flows are assume to be steady, two-dimensional, turbulent flow, and are not affected by temperature and humidity changes. The standard $k-\varepsilon$ model is used to account for the turbulence effect. The CFD commercial software Fluent is used in this study. The numerical results are validated against the measurements. The results in all cases suggest the presence of three main recirculation zones where the contamination accumulates: under the operator chair, in front of operator (in front of the air ionizer) and at the back of the air ionizer. The recirculation zone in front of the air ionizer is the most critical one because it is likely to bring in the contamination from the operator face to the working area. Among these three geometry parameters, the height of the air ionizer is the most

critical one i.e. the change of the height changes the shape and the size of the recirculation zones in front of operator and at the back of the ionizer drastically. The future work will focus on reducing the recirculation zone at in front of the operator and the transient effect of moving operator.

1.บทนำ

ห้องสะอาด (Clean Room) หมายถึง ห้องหรือบริเวณปิดที่ได้รับการควบคุมคุณสมบัติของสภาวะแวดล้อมภายในอย่างเคร่งครัด เช่น ปริมาณและขนาดของฝุ่นละออง ความชื้น ความดัน รูปแบบการไหลของอากาศ ความเป็นกลางทางไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งมีการใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เซมิคอนดักส์เตอร์ อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ และอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีห้องสะอาดเป็นองค์ประกอบพื้นฐานในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงแต่มีของเสียต่ำ และแต่ละอุตสาหกรรมต้องการมาตรฐานความสะอาดและชนิดของห้องแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด ความแม่นยำ และวิธีในการผลิตชิ้นงาน โดยห้องสะอาดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการไหลของอากาศคือ Convectional type (Turbulent mixed type), Cross flow type (Horizontal laminar flow type) และแบบ Down flow type (Vertical laminar flow type) ซึ่ง Down flow type เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และ ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เนื่องจากอากาศทั้งหมดที่ไหลจากฝ้าเพดานผ่านลงมาในห้องสะอาดแล้วลงสู่พื้นด้านล่างออกไปนอกห้องทันที ทำให้ระยะทางการไหลของอากาศสั้นที่สุดและมีประสิทธิภาพการพาฝุ่นละอองออกจากห้องสะอาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ข้อเสียคือ ต้นทุนการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูง ส่วนมาตรฐานความสะอาดของของห้องสะอาดที่นิยมใช้มีอยู่ 3 มาตรฐานคือ U.S. Federal Standard 209e , VDI 2083 (Germany) และ British Standard BS 295 (1989) แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะแบ่งมาตรฐานความสะอาดตาม U.S Federal Standard 209e ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ คือ Class 100 หมายถึง จำนวนอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอน ขึ้นไปต้องมีไม่เกิน 100 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต นอกจากนี้แล้วสำหรับอุตสาหกรรมการผลิต ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ จะต้องติดตั้ง พัดลมเป่าประจุ หรือ Air Ionizer เพื่อทำให้บริเวณพื้นที่ทำงานมีค่าของกระแสไฟฟ้าสถิตเป็นกลาง (Electrostatic Discharge) ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดของเสียและลดความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ได้ โดย พัดลมเป่าประจุจะใช้ Corona grid มีลักษณะคล้ายเข็มติดอยู่ภายในพัดลมแล้วใช้ไฟฟ้ากระแสตรงต่อเข้าไปเพื่อปล่อยประจุและปรับสมดุลทางไฟฟ้า

เนื่องจากกระบวนการการผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟนั้นต้องทำการผลิต ภายใต้ห้องสะอาด Class 100 และรูปแบบการไหลภายในห้องเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) แต่ที่ผ่านมาพบว่าบางพื้นที่ภายในห้องสะอาดไม่ผ่านมาตรฐานความสะอาดหลังจากติดตั้งเครื่องมือทำงาน พัดลมเป่าประจุ (Air Ionizer) รวมถึงพนักงานที่นั่งทำงาน เป็นต้น ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าสิ่งต่างๆ เหล่านี้ได้ส่งผลกระทบให้รูปแบบการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปจากแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) และอาจก่อให้เกิดบริเวณที่เรียกว่า การหมุนวนของกระแสอากาศ (Recirculation zone) มากขึ้นซึ่งบริเวณดังกล่าวมีส่วนที่ทำให้เกิดการแขวนลอยหรือตกค้างของฝุ่นละอองได้ ดังนั้นหากมีการจัดบริเวณการทำงานไม่เหมาะสมหรือขัดกับหลักอากาศพลศาสตร์จะส่งผลให้เกิดจำนวนของเสียเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าก่อนการติดตั้งผู้ทำการผลิตได้ออกแบบหรือศึกษาถึงหลักอากาศพลศาสตร์และสามารถทำนายลักษณะการไหลของกระแสอากาศได้ก่อนการติดตั้งแล้วก็จะสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ แต่ในการศึกษาเกี่ยวกับอากาศพลศาสตร์นั้นมีความซับซ้อนของสมการทางคณิตศาสตร์และเกี่ยวข้องกับปัญหาค่าขอบ (Boundary Value Problem) จึงได้มีการประยุกต์ใช้ ความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของของไหลเพื่อช่วยแก้ปัญหาด้านการไหลของอากาศซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนแบบไม่เชิงเส้นและยากต่อการหาคำตอบแบบแม่นตรง (Exact solution) ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำความรู้ทางด้านการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณเชิงตัวเลขหรือพลศาสตร์ของของไหลเชิงคำนวณ(Computational Fluid Dynamics) หรือ CFD เข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวด้วย

จากการสืบค้นเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการออกแบบและพัฒนาห้องสะอาดที่ใช้พลศาสตร์ของของไหลเชิงคำนวณมีดังต่อไปนี้

Cheng, Liu, Lam, Chai, and Lee (1999) ได้ศึกษาการออกแบบ Unidirectional Flow Clean room พบว่าความเร็วของกระแสอากาศที่เข้าห้องสะอาดทางฝ้าเพดาน ความสูง ความกว้างของห้อง ความสูงของพื้นห้อง และความพรุนของพื้นห้องมีผลกับรูปแบบและทิศการไหลของกระแสอากาศในห้องสะอาด

Kwang Chul Noh, Myung Do Oh, Seung Chul Lee (2005) ได้ศึกษาพฤติกรรรมการไหลของอากาศและการกระจายตัวของ Cross Contamination ในกระบวนการ Photolithography พบว่า ความพรุนที่ทางเข้าของอากาศ (Porosity of access panel), ค่าความหน่วงของ Damper ส่งผลกระทบโดยตรงกับการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด

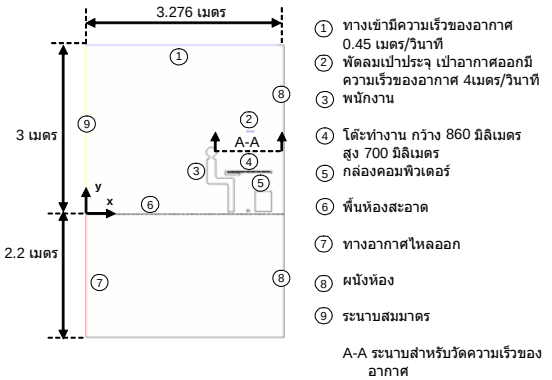
Suh-Jeng Yang, Wu-Shung Fu (2002) ได้ศึกษาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของพนักงานด้วยความเร็วคงที่ในสภาวะแบบไม่คงตัวพบว่าบริเวณการหมุนวนของกระแสอากาศ (Recirculation Zone) เกิดขึ้นบริเวณรอบๆ พนักงานและบริเวณโต๊ะทำงานแต่สามารถลดการเกิดการหมุนวนของกระแสอากาศลงได้โดยการติดม่านกั้นระหว่างพนักงานกับพื้นที่การทำงาน

จากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการศึกษาสำหรับการไหลของอากาศทั้งห้องสะอาดเพื่อดูลักษณะการไหลในระดับมหภาค แต่ยังไม่มีการศึกษาหรือวิเคราะห์การไหลของอากาศที่บริเวณโต๊ะทำงาน

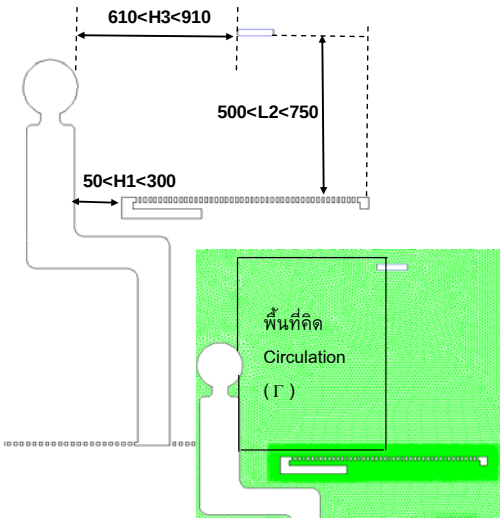
อย่างชัดเจนมากนักดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้คือการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยน ตำแหน่งของพัดลมเป่าประจุและตำแหน่งการนั่งของคน เพื่อประโยชน์ในการจัดวางพื้นที่การทำงานให้ถูกต้องตามหลักอากาศพลศาสตร์และเหมาะสมต่อกระบวนการผลิต

2.รูปร่างของปัญหา

ห้องที่ใช้ในการศึกษาเป็นห้องสะอาดแบบ Vertical Laminar flow ของบริษัทผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งมีระดับความสะอาด Class 100 ตลอดทั้งห้องและบริเวณที่ทำการศึกษาพิจารณาแบบสองมิติดังรูปที่ 1-2



รูปที่ 1 รูปร่างและค่าขอบ ของห้องสะอาดที่ทำการศึกษา



รูปที่ 2 ตำแหน่ง , กริด และ พื้นที่สำหรับคำนวณ Circulation

ในการศึกษาครั้งนี้สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 10 กรณี โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างพนักงานกับโต๊ะ ระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุกับพื้นโต๊ะ และ ระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุส่วนในกรณีศึกษาที่ 10 เป็นการนำกรณีที่ให้ค่า Circulation น้อยที่สุดจาก 9 กรณี มารวมกันเพื่อพิจาณาถึงตำแหน่งที่ดีที่สุดของการทำงาน โดยตำแหน่งที่พนักงานนั่งทำงานอยู่ปัจจุบันคือกรณีที่ 1

ตารางที่ 1 ตำแหน่งของแต่ละกรณีศึกษา

[redacted]

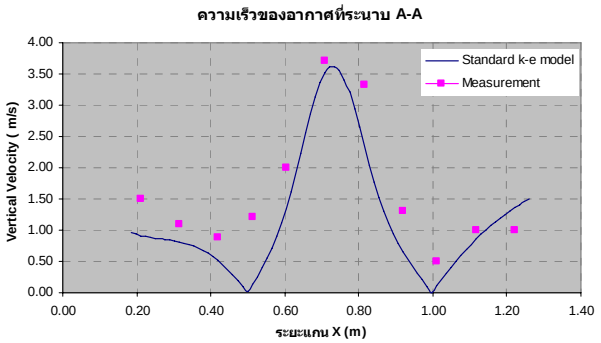
การศึกษาครั้งนี้บริเวณที่เกิด Recirculation จะได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใบหน้าของพนักงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดฝุ่นละอองได้มากที่สุด ซึ่งตัวชี้วัดถึงความแรงของ Recirculation ที่เกิดขึ้นจะพิจารณาจากค่า Circulation (Γ) ที่คำนวณได้ โดยสามารถหาได้จาก

$$\Gamma = -\oint_C V \cdot ds \qquad (1)$$

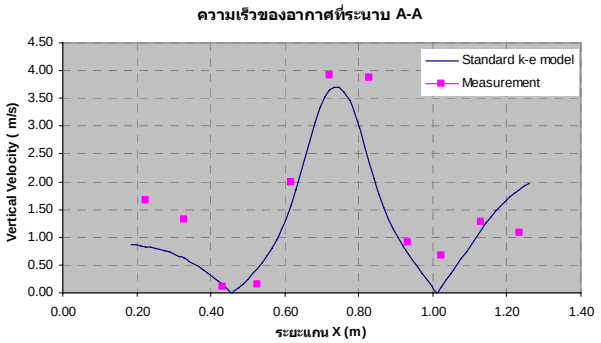
3.แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษานี้จะพิจารณาการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ที่สภาวะคงตัวสองมิติ คุณสมบัติของอากาศคงที่ และเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยเลือกใช้การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ แบบมาตรฐาน, Standard Wall functions และไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น

การศึกษานี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป FLUENT ซึ่งใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ในการคำนวณเชิงตัวเลข วิธีการผลต่างที่ใช้หาค่าความดัน (Pressure-Velocity Coupling) คือ SIMPLEC และ Discretization แบบ Second Order Upwind โดเมนในการคำนวณของแต่ละกรณีมีขนาดระหว่าง 730,000 - 900,000 ปริมาตรควบคุม เมื่อนำผลความเร็วของอากาศที่ได้จากการศึกษากรณีที่ 1 (ตำแหน่งการทำงานปัจจุบัน) กับกรณีที่ 5 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดเพื่อตรวจสอบถึงความถูกต้องของการศึกษา พบว่าการจำลองโดยใช้วิธีการคำนวณดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลการวัดดังรูป ที่ 3-4



รูปที่ 3 กราฟแสดงข้อมูลความเร็วจากการวัดเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของ กรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 4 กราฟแสดงข้อมูลความเร็วจากการวัดเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของ กรณีศึกษาที่ 5

4.ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

ผลการคำนวณที่ได้จากการศึกษาดังรูปที่ 5-6 แสดงเส้น Path Line ของกรณีที่ 1 และ 10 พบว่า บริเวณที่เกิดการหมุนของกระแสอากาศเกิดขึ้นหลักๆ อยู่สามบริเวณ คือ ด้านล่างบริเวณใต้เก้าอี้ที่พนักงานนั่ง, ด้านหลังของพัดลมเป่าประจุ และ บริเวณที่ด้านหน้าของพนักงาน (ด้านหน้าของพัดลมเป่าประจุ) ซึ่งบริเวณด้านหน้าของพนักงานเป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงที่จะนำฝุ่นละอองจากใบหน้าของพนักงานไปสู่ชิ้นงานได้ และจากกราฟรูปที่ 7-9 แสดงค่า Circulation ที่เกิดขึ้นของแต่ละกรณี โดยจุดวงกลมบนกราฟแทนค่าที่ได้จากการคำนวณจากตำแหน่งทำงานปัจจุบัน ซึ่งจากการศึกษาตัวแปรทั้งสามได้ผลสรุปดังนี้

4.1 การลดระยะความสูงของพัดลมเป่าประจุกับพื้นโต๊ะ

พบว่าทำให้ลักษณะและขนาดของการหมุนวนของกระแสอากาศมีค่าลดลง จากผลการคำนวณพบว่าระยะที่ดีที่สุด คือ L2=500 มม.โดยมี Circulation = 2.24 m^2/s เมื่อเทียบกับตำแหน่งปัจจุบัน ที่ L2=700 มม.โดยมี Circulation = 3.12 m^2/s แต่ไม่สามารถปรับระยะของพัดลมเป่าประจุลงมาที่ตำแหน่งนี้ได้เนื่องจากจะไปขัดขวางการทำงานของ Real Time Particle Sensor Monitoring ซึ่งต้องการรัศมีหวังผลการวัดอยู่ที่ 200 มม. จากจุดติดตั้งเครื่องมือ ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 7 ระยะที่เหมาะสมและเป็นไปได้มากที่สุดคือ L2=700 มม. เนื่องจากตำแหน่งนี้จะทำให้เกิด Circulation น้อยที่สุด นอกจากนี้แล้วพบว่าถ้าปรับตำแหน่งพัดลมเป่าประจุจากตำแหน่งเดิมไปเพียง 100 มม. จะส่งผลให้ค่า Circulation เปลี่ยนแปลงถึง 16.38% ดังนั้นพนักงานต้องระมัดระวังเป็นพิเศษในการปรับตำแหน่งความสูงของพัดลมเป่าประจุ

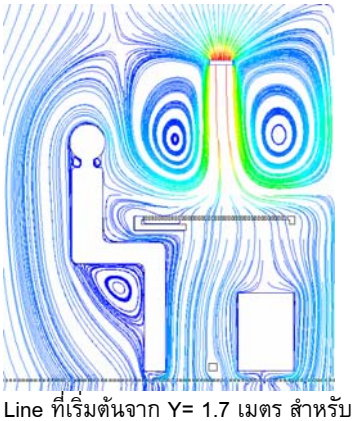
4.2 กรณีการปรับตำแหน่งการนั่งของพนักงาน

พบว่าจะเกิด Circulation น้อยเมื่อพนักงานนั่งชิดกับโต๊ะทำงาน จากผลการคำนวณพบว่าระยะที่ดีที่สุด คือ H1=50 มม.โดยมี Circulation = 2.91 m^2/s เมื่อเทียบกับตำแหน่งปัจจุบัน ที่ H1=150 มม. โดยมี Circulation = 3.12 m^2/s แต่จากการพิจารณาถึงวิธีการทำงานและการจับวางชิ้นงานพบว่าระยะที่พนักงานสะดวกในการทำงานมากที่สุดจะอยู่ในช่วงระหว่าง 150<H1<250 มม. ซึ่งขึ้นอยู่กับสรีระของพนักงานด้วย และจากกราฟรูปที่ 8 พบว่าช่วงระหว่าง 150<H1<250 มม. Circulation มีการเปลี่ยนแปลงเพียง 7.40% ดังนั้นช่วงดังกล่าวนี้จึงเป็นช่วงที่สามารถนำมาใช้ในการปฏิบัติงานได้

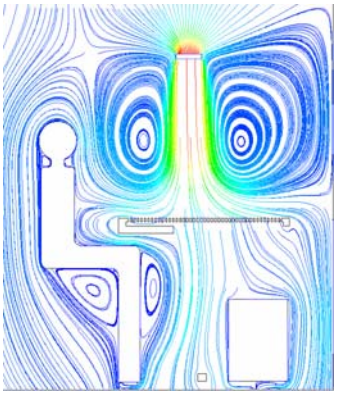
4.3 กรณีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ

จะต้องคำนึงถึงผลของการปล่อยประจุไฟฟ้าไปที่บริเวณการทำงานด้วย ซึ่งจากข้อมูลของผู้ผลิตชิ้นงานพบว่าขอบเขตของตำแหน่งที่พัดลมเป่าประจุสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดผลเสียต่อชิ้นงานอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าสถิตไม่สมดุล คือ 600<H3<800 มม. จากผลการคำนวณพบว่าระยะที่ดีที่สุด คือ H3=610 มม.โดยมี Circulation = 3.11 m^2/s เมื่อเทียบกับตำแหน่งปัจจุบัน ที่ H3=710 มม.โดยมี Circulation = 3.12 m^2/s และจากกราฟรูปที่ 9 พบว่าช่วงระหว่าง 610<H3<800 มม. Circulation มีการเปลี่ยนแปลงเพียง 1.61% ดังนั้นช่วงดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้ในการปฏิบัติงานได้

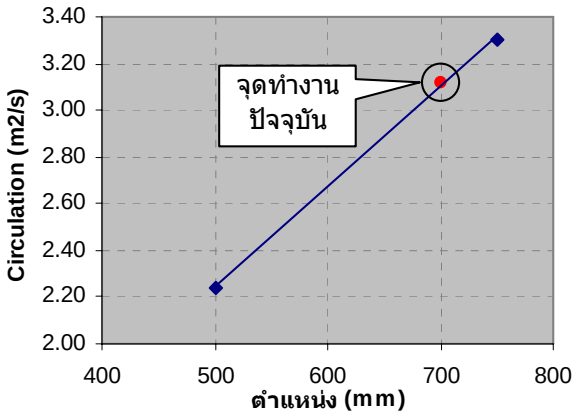
จากผลการศึกษาจะได้จุดที่ดีที่สุดที่จะนำไปศึกษาเป็นกรณีที่ 10 ประกอบด้วย H1=200 มม. L2=700 มม. และ H3=610 มม. เมื่อนำไปคำนวณพบว่าเกิด Recirculation เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่งที่บริเวณหน้าขาของพนักงาน ซึ่งจะทำให้พนักงานมีโอกาสเพิ่มมากขึ้นที่จะสัมผัสกับฝุ่นละอองและอาจส่งผลกระทบต่อจำนวนของเสียที่จะเกิดขึ้นได้ และนอกจากนี้ค่า Circulation ที่บริเวณที่ด้านหน้าของพนักงาน (ด้านหน้าของพัดลมเป่าประจุ) มีค่าสูงกว่าตำแหน่งที่ใช้อยู่ปัจจุบันจึงเป็นสาเหตุให้กรณีที่ 10 ไม่เหมาะสมที่จะนำไปเป็นจุดการใช้งาน



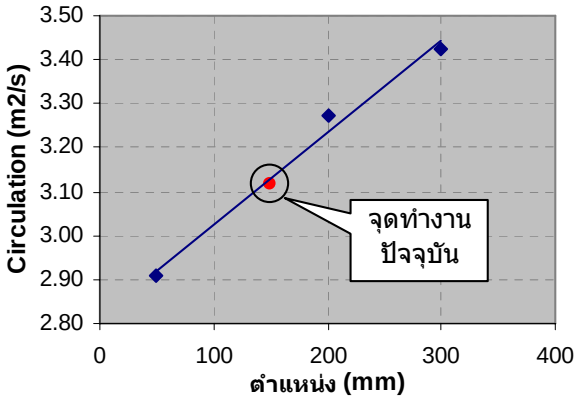
รูปที่ 5 Path Line ที่เริ่มต้นจาก Y= 1.7 เมตร สำหรับ กรณีที่ 1 (ตำแหน่งการทำงานปัจจุบัน)



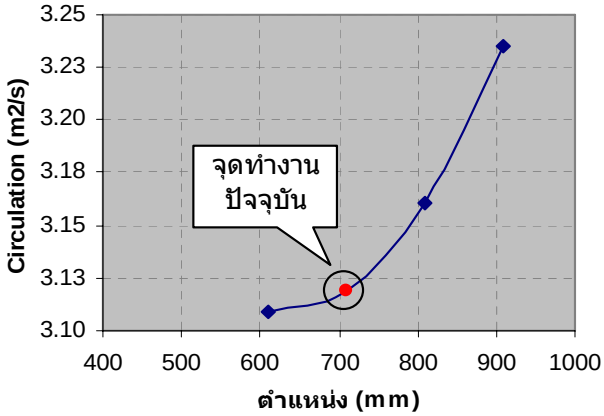
รูปที่ 6 Path Line ที่เริ่มต้นจาก Y= 1.7 เมตร สำหรับ กรณีที่ 10



รูปที่ 7 ขนาดของ Circulation เมื่อเปลี่ยนความสูงของพัดลมเป่าประจุ



รูปที่ 8 ขนาดของ Circulation เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการนั่งของพนักงาน



รูปที่ 9 ขนาดของ Circulation เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ

5.สรุป

ผลของการเปลี่ยนแปลงระยะความสูงของ พัดลมเป่าประจุจากพื้นโต๊ะ มีผลทำให้ลักษณะและขนาดของการหมุนวนของกระแสอากาศบริเวณด้านหน้าของพนักงาน (ด้านหน้าของพัดลมเป่าประจุ) เปลี่ยนแปลงมากที่สุด และเมื่อนำจุดที่ให้ค่า Circulation ต่ำสุดของแต่ละกรณีมารวมกันเพื่อหาจุดทำงานที่ดีที่สุดพบว่าเกิด Recirculation zone เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่งที่บริเวณหน้าขาของพนักงาน และค่า Circulation ที่ได้มากกว่ากรณีที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งการทำงานปัจจุบัน ดังนั้น ตำแหน่งที่ดีที่สุดจากการศึกษาครั้งนี้ คือ ความสูงของพัดลมเป่าประจุจากพื้นโต๊ะ 700 มม. , 150 มม. <ระยะห่างของพนักงานกับโต๊ะ <250 มม. และ 610 มม. <ระยะห่างระหว่างพนักงานกับพัดลมเป่าประจุ <700 มม.

6.เอกสารอ้างอิง

[1] วรางค์รัตน์ จันทสาโร . (2005). **วิธีปริมาตรจำกัดสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

[2] สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย, **ห้องสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมและพานิชยกรรม**, บริษัท ออฟเซ็ท ครีเอชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, 2546.

[3] เอกรงค์ สุขจิต, วรางค์รัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (2006). **การศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤกติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20. นครราชสีมา.

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

[5] Fluent Inc. (2001). **Fluent user's guide: Version 6.2**. United States of America: Fluent Inc.

[6] Frank M. White, **Fluid mechanics**, McGraw-Hill Publishing Company Limited, Singapore, (1999)

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

[8] Kwang Chul Noh, Myung Do Oh, and Seung Chul Lee (2005). A numerical study on airflow and dynamics cross-contamination in the super clean room for photolithography process. **Building and Environment** 40:1431-1440

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

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

[11] Suh Jenq Yang, Wu Shung Fu, (2002). A numerical investigation of effects of a moving operator on airflow patterns in a clean room. **Building and Environment** 37:705-712.

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

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

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