

การศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหลของอากาศ
อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด
Numerical Study of Turbulence Effects on Behaviors of Airflow, Temperature,
Humidity and Particle in a Clean Room

เอกรงค์ สุขจิต ^{1*} วรารัตน์ จันทสาโร ² และ เอกชัย จันทสาโร ¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-4410 โทรสาร 0-4422-4613 *อีเมล s_eakarong@hotmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

โทร 0-2942-8555 ต่อ 1829 โทรสาร 0-2579-4657 อีเมล fengvrj@ku.ac.th

Eakarong Sukjit ^{1*}, Varangrat Juntasaro ², and Ekachai Juntasaro ¹

¹ School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Tel: 0-4422-4410, Fax: 0-4422-4613, *E-mail: s_eakarong@hotmail.com

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,
Bangkhen, Bangkok 10900, Thailand

Tel: 0-2942-8555 ext 1829, Fax: 0-2579-4657, E-mail: fengvrj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของการศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด คือการทำความเข้าใจในพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ซึ่งจะนำไปสู่สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตต่างๆ ที่ใช้ห้องสะอาด ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มคุณภาพและลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ ในการศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นด้วยภาษา Visual C++ บนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด ขั้นตอนวิธี SIMPLE และการประมาณในช่วงของ Rhie and Chow ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการไม่เกี่ยวพันกันของสนามความเร็วและสนามความดัน ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์สแบบเบอร์ต่ำ $k-\varepsilon$ ของ Launder and Sharma โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นได้รับการทดสอบและตรวจสอบความถูกต้อง โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองและผลการคำนวณเชิงตัวเลขของปัญหาการไหลพื้นฐานที่เป็นที่ยอมรับก่อนทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด

Abstract

The objective of this numerical study of turbulence effects on behaviors of airflow, temperature, humidity and particle in a clean room is to understand the behavior of environment inside a clean room leading to the suitable environment for manufacturing that employs a clean room. This will improve the product quality and decrease the defected product. In this study, the computer program is developed on Visual C++ and on the basis of the finite volume method. The SIMPLE algorithm combined with the Rhie and Chow interpolation is used to avoid the decoupling between the velocity field and the pressure field. For turbulent flow, the low-Reynolds-number linear $k-\varepsilon$ turbulence model of Launder and Sharma is employed. The developed computer program is tested and validated by comparing the computed results with the experimental data and acceptable numerical solution of fundamental flow problems before analyzing the turbulence effects on the behavior of environment in the clean room.

1. บทนำ

ห้องสะอาด (Clean Room) เป็นห้องบริเวณปิดที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้องได้แก่ อนุภาคสิ่งเจือปน อุณหภูมิ ความดันอากาศ ความชื้น รูปแบบการไหลของอากาศ การสั่นสะเทือน แสงสว่าง และสิ่งมีชีวิตจำพวกจุลินทรีย์ ในอดีตการควบคุมคุณภาพของห้องสะอาดนั้นมีข้อจำกัดอยู่มากทั้งด้วยความรู้ทางวิชาการที่ยังน้อยและเครื่องมือในการผลิตอุปกรณ์ยังไม่สนับสนุน แต่ในปัจจุบันทั้งความรู้และประสิทธิภาพของเครื่องมือในการผลิตอุปกรณ์มีมากขึ้น ทำให้เทคโนโลยีห้องสะอาดถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและนำมาใช้กับอุตสาหกรรมหลายประเภท ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ระบบห้องสะอาดเป็นปัจจัยสนับสนุนพื้นฐานที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบที่ละเอียดได้มากขึ้นและช่วยให้การต่ออุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทำได้โดยมีประสิทธิภาพ ในอุตสาหกรรมการผลิตยาระบบห้องสะอาดทำให้สามารถบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อโรคได้และสามารถเตรียมสารที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมีได้อย่างปลอดภัย ระบบห้องสะอาดนำไปสู่การเพิ่มคุณภาพทางการผลิตฟิล์มถ่ายรูปและพลาสติกฟอโต้ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพมากขึ้น ระบบห้องสะอาดสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ทางกลและเครื่องมือที่ต้องการความแม่นยำในการปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดี การใช้เทคโนโลยีห้องสะอาดไม่ได้จำกัดอยู่ในวงการอุตสาหกรรมเท่านั้นแต่ยังมีการใช้ในการปฏิบัติงานสำคัญในด้านอื่นๆ อีก เช่น ใช้เป็นระบบปรับอากาศให้กับห้องผู้ป่วยฉุกเฉิน ห้องผ่าตัด และห้องผู้ป่วยที่มีระบบภูมิคุ้มกันอ่อนแอภายในโรงพยาบาล เทคโนโลยีห้องสะอาดถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อรักษาความสะอาดของอากาศที่ต้องการใช้ในพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยการทำให้อากาศมีปริมาณสิ่งเจือปนน้อยที่สุดและควบคุมรูปแบบการไหลของอากาศที่เหมาะสม ป้องกันอันตรายจากฝุ่นละอองและเชื้อโรคที่ปะปนอยู่ในอากาศก่อนจะก่อให้เกิดความเสียหายในกระบวนการผลิตและผู้ป่วย ป้องกันการปลดปล่อยอนุภาคสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกสู่สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันเทคโนโลยีห้องสะอาดไม่ได้เป็นความรู้เฉพาะทางอีกต่อไป ได้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม

หลังจากมีการใช้ประโยชน์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยเริ่มจากปี ค.ศ. 1960 เพื่อใช้ในการออกแบบด้านอากาศยาน ปัจจุบันพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้กลายเป็นความรู้ที่ใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัยด้านต่างๆ รวมถึงช่วยในการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีห้องสะอาด จากการสืบค้นเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีห้องสะอาดโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

Cheng, Liu, Lam, Cai, and Lee (1999) ได้ศึกษาผลกระทบของความพรุนของพื้นห้องสะอาดซึ่งใช้ในการดูดซับการไหลที่ปล่อยออกมาจากหัวจ่ายลม ความสูงของพื้น และขนาดความกว้างของห้องที่มีต่อความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็วของอากาศภายในห้องสะอาดแบบ Unidirectional Flow Clean Room โดยใช้ซอฟต์แวร์ STAR-CD

Hu, Chuah, and Yen (2002) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของการติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Mini-environment เพื่อช่วยเพิ่มระดับของความสะอาดภายในห้องสะอาดของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยผลของติดตั้ง Buffer Zone เพื่อช่วยในการป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปในส่วนในพื้นที่ปฏิบัติงาน พบว่าสามารถควบคุมฝุ่นละอองได้น้อยกว่า 1 Particle/m³ ในส่วนของพื้นที่ปฏิบัติงาน

Rouaud and Havet (2002) ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ESTET เพื่อตรวจสอบรูปแบบการไหลภายในห้องสะอาดของกระบวนการผลิตอาหาร โดยเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการประเมินความถูกต้องแบบของจำลองความปั่นป่วน 2 แบบคือ Standard $k-\epsilon$ และ Renormalisation Group (RNG) $k-\epsilon$ จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ มีความเหมาะสมในการจำลองการไหลภายในห้องสะอาดมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ เนื่องจากค่าความหนาแน่นของความปั่นป่วนที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ มีค่าที่สูงกว่าความเป็นจริงส่งผลให้ค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนมีค่าสูงตามไปด้วยทำให้การจำลองการไหลบริเวณที่เกิดการหมุนวนมีความผิดพลาดได้มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ที่ให้ค่าความหนาแน่นของความปั่นป่วนที่ดูสมจริงกว่า

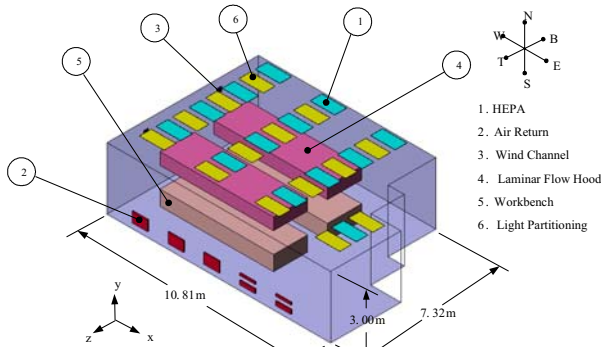
Rouaud and Havet (2005) ได้พัฒนาความรู้เพื่อหาวิธีในการออกแบบห้องสะอาดด้วยการศึกษาการเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดในสภาวะไม่คงตัว โดยนำเสนอดัชนีที่ใช้ในการบ่งบอกประสิทธิภาพของการระบายอากาศภายในห้องสะอาด 3 ดัชนีด้วยกันซึ่งประกอบด้วย ϵ_c (Contamination Removal Effectiveness), τ_p (Local Mean Age of Air) และ τ_m (Room Mean Age of Air) อีกทั้งยังได้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่มีต่อการรักษาระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่า ACH (Air Change Rate per Hour) ที่เหมาะสมต่อการรักษาระดับความสะอาดของห้องสะอาด ซึ่งการเพิ่มค่า ACH โดยปราศจากการหาค่าที่เหมาะสมจะนำไปสู่การสิ้นเปลืองต้นทุน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้คือการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมของการไหล อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองของอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องสะอาด เพื่อประโยชน์ในการออกแบบและปรับปรุงห้องสะอาดให้มีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิต

2. รูปร่างของปัญหา

ห้องสะอาดที่ใช้ในการศึกษาเป็นห้องสะอาด SQE. C/R ของบริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ. นครราชสีมา ซึ่งเป็นห้องสะอาดประเภท Mixed Flow C/R ระดับความสะอาดภายในห้องถูกออกแบบให้ทำงานที่ระดับความสะอาด Class 10,000 ส่วนพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood ถูกออกแบบให้มีระดับความสะอาด Class 100 ขนาดของห้องสะอาดที่มากที่สุดในทิศทาง x, y และ z มีค่าเท่ากับ 10.81, 3.0 และ 7.32 เมตร ตามลำดับ รูปที่ 1 แสดงรูปร่างของห้องสะอาดที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์หลักภายในห้องประกอบด้วย หัว

จ่ายลม (HEPA) 13 หัวจ่าย ช่องลมที่ผนังด้านทิศตะวันตก 2 ช่อง ช่องลมกลับ 5 ช่อง แผงหลอดไฟ 14 แผง โต๊ะทำงาน 2 ตัว และ Laminar Flow Hood 2 เครื่อง



รูปที่ 1 รูปร่างของห้องสะอาด SQE. C/R

3. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษาจะพิจารณาการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้และปั่นป่วนที่สภาวะคงตัว อากาศที่พิจารณาเป็นของผสมระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ อากาศถูกสมมติให้เป็นก๊าซอุดมคติ และไม่มีอุปกรณ์ใดภายในห้องที่สามารถแผ่หรือดูดซับไอน้ำได้ คุณสมบัติของอากาศเป็นไปตามกฎของก๊าซผสมทางอุดมคติ สมการควบคุมที่เกี่ยวข้องในการอธิบายพฤติกรรมของอากาศภายในห้องสะอาดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปค่าเฉลี่ยกับเวลาแบบเทนเซอร์ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(t_{ji} - \rho \overline{u'_j u'_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g_j \beta (T - T_r) \delta_{ij} + S_i \quad (2)$$

สมการพลังงาน

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\bar{k}}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \right] \frac{\partial h}{\partial x_j} \\ & - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\bar{k}}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) T \frac{\partial C_p}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

สมการเศษส่วนมวลของไอน้ำ

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_{t,m}} \right) \frac{\partial m}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

สมการระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho D_{i,c} + \frac{\mu_t}{Sc_{t,c}} \right) \frac{\partial c}{\partial x_j} \right] + S_c \quad (5)$$

สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon - \rho D + S_k \quad (6)$$

สมการการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3} G_k) \frac{\varepsilon}{k} \\ & - \rho C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \rho E + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

โดยที่

$$t_{ji} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (8)$$

$$-\rho \overline{u'_j u'_i} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (9)$$

$$P_k = -\rho \overline{u'_j u'_i} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (10)$$

$$G_k = -\frac{\mu_t}{\sigma_T} g \beta \frac{\partial T}{\partial y} \quad (11)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

สำหรับค่าที่ ฟังก์ชันการหน่วง และเทอมพิเศษต่างๆมีค่าดังนี้

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_T = 0.9, C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44,$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_{\varepsilon 3} = 1.0, f_{\varepsilon 1} = 1.0, f_{\varepsilon 2} = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2)$$

$$f_\mu = \exp \left(\frac{-3.4}{(1 + Re_t/50)^2} \right), D = \frac{2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right)^2,$$

$$E = \frac{2\mu}{\rho} \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_m} \right)^2, \quad \text{Re}_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$$

คุณสมบัติของอากาศซึ่งเป็นของผสม (Mixture) ระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำสามารถหาได้จากกฎการผสมกันของก๊าซสมบูรณ์แบบนี้

$$\rho_{\text{mixture}} = \frac{p}{RT \sum_{\alpha=1}^N (m_{\alpha} / M_{\alpha})} \quad (13)$$

$$C_{p,\text{mixture}} = \sum_{\alpha=1}^N (m_{\alpha} C_{p,\alpha}) \quad (14)$$

$$\mu_{\text{mixture}} = \sum_{\alpha=1}^N \left(\frac{x_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta=1}^N (x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta})} \right) \quad (15)$$

โดยที่

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (16)$$

และ

$$\bar{k}_{\text{mixture}} = \sum_{\alpha=1}^N \left(\frac{x_{\alpha} \bar{k}_{\alpha}}{\sum_{\beta=1}^N (x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta})} \right) \quad (17)$$

โดยที่

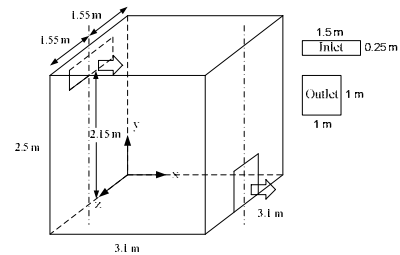
$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\bar{k}_{\alpha}}{\bar{k}_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (18)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของห้องสะอาด SQE. C/R ได้จากข้อมูลการวัดของ ปราโมทย์ สิงห์ทอง, พชรินทร์ จินดาหลวง, มลธิลา สุภาภรณ์ และ เศรษฐกิจ ป่วงกลาง (2003)

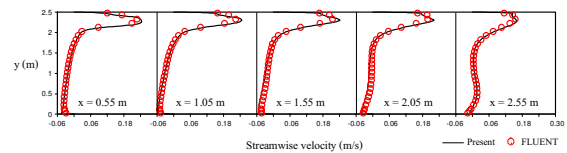
4. การตรวจสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปใช้ในการจำลองปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่า ดังแสดงในรูปที่ 2 อากาศที่ช่องทางเข้ามีอุณหภูมิ 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 25 % และ Re=7,000 ผนังทุกด้านของห้องมีอุณหภูมิคงที่ 20 °C โดยทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับผลการคำนวณที่ได้จากซอฟต์แวร์ FLUENT เวอร์ชัน 6.1.22 บนระนาบ z=1.55 m ดังแสดงในรูปที่ 3

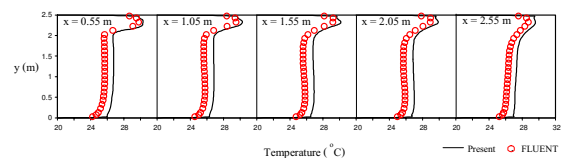
นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าของความเร็วบนเส้น z=3.86 m และ y=0.92 m ของปัญหาการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขณะ Laminar Flow Hood ไม่ได้ทำงาน ระหว่างผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับผลการคำนวณที่ได้ซอฟต์แวร์ FLUENT รูปที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกน x, y, z และความเร็วลัพธ์ตามลำดับ



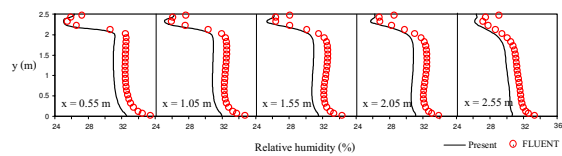
รูปที่ 2 รูปร่างของปัญหาการไหลของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ



(a) ความเร็ว

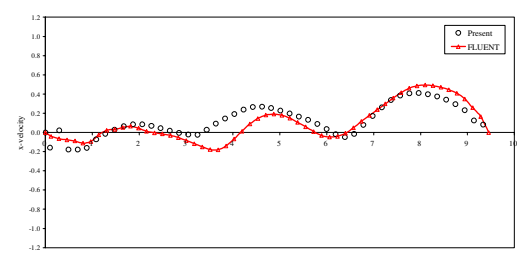


(b) อุณหภูมิ



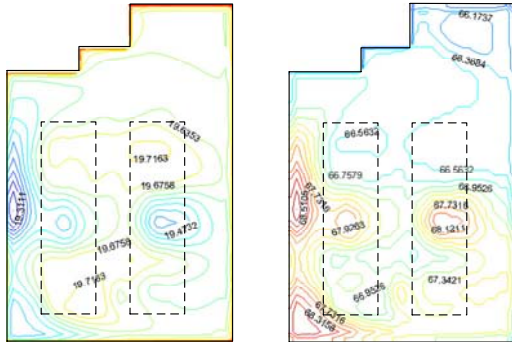
(c) ความชื้นสัมพัทธ์

รูปที่ 3 การกระจายตัวของ (a) ความเร็ว (b) อุณหภูมิ และ (c) ความชื้นสัมพัทธ์ ของปัญหาการไหลของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่า



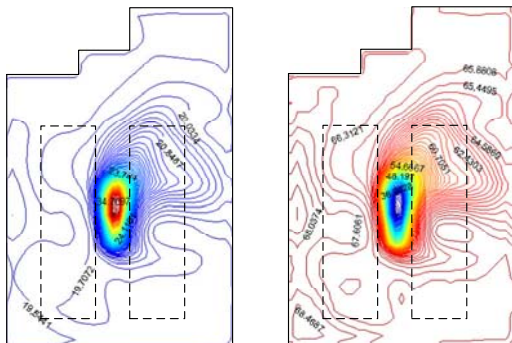
รูปที่ 4 ความเร็วในแนวแกน x ของการไหลภายในห้องสะอาด

ซึ่งสูงกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ปกติที่ต้องควบคุมภายในห้องสะอาดที่มีค่า 50 ± 2.5 % ตามคำแนะนำของ สุรพล พุกกะพานิข (2003) อิทธิพลของอากาศเย็นที่ออกมาจาก HEPA ทำให้พื้นที่บริเวณใต้ HEPA มีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ภายในห้องสะอาด



รูปที่ 11 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อใช้ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในกรณีภายในห้องสะอาดมีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งผลิตความร้อน โดยแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 10 kW ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากกลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์จำนวน 35 เครื่องตามข้อมูลงานวิจัยของ Zhzo, Li, and Yan (2003) ติดตั้งไว้บริเวณกลางห้องสะอาด ผลจากการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนนั้น ทำให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดความร้อนมีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งมีค่าประมาณ 35°C และ 39 % ตามลำดับ ช่องลมกลับจะทำหน้าที่ระบายอากาศที่มีอุณหภูมิสูงอันเนื่องมาจากการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนออกจากห้องสะอาด ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณช่องลมกลับมีอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 12

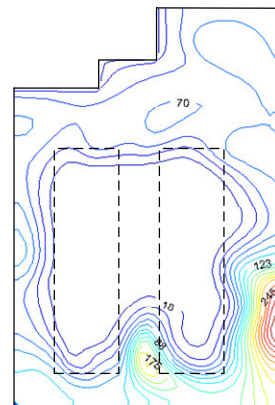


รูปที่ 12 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m กรณีมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนไว้บริเวณกลางห้องสะอาด

5.3 พฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด

จากการวิเคราะห์เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด พบว่าอนุภาคของฝุ่นละอองไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของ

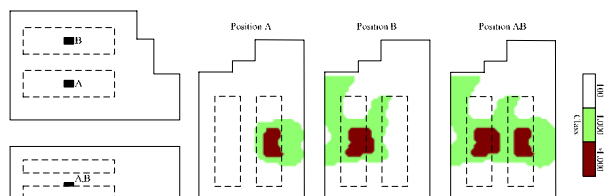
อากาศ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rouaud and Havet (2005) ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดจึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองที่ถูกกระทำโดยการไหลของอากาศ พฤติกรรมของฝุ่นละอองถูกศึกษาผ่านสมการการขนถ่ายของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่แสดงถึงจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยในปริมาตร 1 m^3 เงื่อนไขขอบเขตของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ HEPA สามารถคำนวณได้โดยการพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกรองฝุ่นละอองของ HEPA ที่มีค่า 99.97 % และห้องสะอาดที่พิจารณามีระดับความสะอาด Class 10,000 ซึ่งมีการกำหนดจำนวนอนุภาคขนาด $0.5 \mu\text{m}$ ไม่เกิน 353,000 อนุภาคในปริมาตร 1 m^3 ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ HEPA มีค่า 106 Particles/ m^3 สำหรับระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ช่องลมนั้น พิจารณาจากผนังของช่องลมอยู่ติดกับห้องสะอาด Class 100 จึงได้กำหนดระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ช่องลมมีค่า 3,530 Particles/ m^3 นอกจากนี้ยังได้พิจารณาการกรองฝุ่นละอองของแผ่นกรองฝุ่นละอองที่ติดตั้งภายใน Laminar Flow Hood ด้วยเทอมที่ก่อให้เกิดการสูญเสียเพื่อให้สามารถรักษาระดับความสะอาด Class 100 ในบริเวณพื้นที่การปฏิบัติงาน ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้แสดงการกระจายตัวของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 m ดังรูปที่ 13 ซึ่งพบว่าปริมาณฝุ่นละอองจำนวนมากที่มาจากช่องลมสามารถระบายออกจากห้องสะอาดได้เป็นอย่างดีด้วยช่องลมกลับ และพบว่าบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood มีปริมาณฝุ่นละอองน้อยมาก



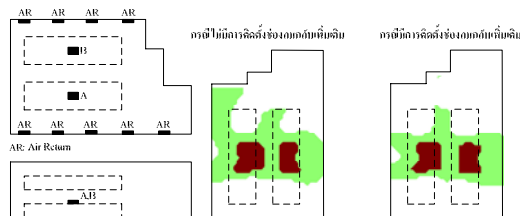
รูปที่ 13 การกระจายตัวของความเข้มข้นของฝุ่นละออง (Particles/ m^3) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m

หลังจากการศึกษาระยะการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่มาจาก HEPA และช่องลม ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่เกิดจากการปฏิบัติงานในพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood ซึ่งถูกจำลองด้วยแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง ตามข้อมูลงานวิจัยของ Rouaud and Havet (2005) เป็นปริมาณฝุ่นละอองที่สอดคล้องกับปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดจากการบวนการผลิตภายในห้องสะอาดมีขนาด 10^5 Particle/s โดยได้ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองจำนวน 1 ตำแหน่งและ 2 ตำแหน่งที่เปรียบเสมือนมีกระบวนการผลิตภายในพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood จำนวน 1 บริเวณ และ 2 บริเวณ ผลการศึกษา

แสดงดังรูปที่ 14 สำหรับกรณีที่มีแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง 1 ตำแหน่งในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ Laminar Flow Hood ที่ใกล้กับช่องลมกลับ พบว่าฝุ่นละอองที่ปลดปล่อยมาจากแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองสามารถระบายออกจากห้องสะอาดได้เป็นอย่างดีด้วยช่องลมกลับ ทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่ภายในห้องมีปริมาณฝุ่นละอองอยู่ในระดับความสะอาด Class 100 แต่สำหรับกรณีที่มีแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองอยู่ในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ Laminar Flow Hood ที่ใกล้กับผนังที่ไม่มีการติดตั้งช่องลมกลับ พบว่าฝุ่นละอองที่ปลดปล่อยมาจากกระบวนการผลิตในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ Laminar Flow Hood ใกล้กับผนังที่ไม่มีการติดตั้งช่องลมกลับจะแพร่กระจายไปในบริเวณกว้าง เนื่องจากผลของรูปแบบการไหลในบริเวณดังกล่าวที่มีลักษณะการไหลของอากาศส่วนหนึ่งเมื่อออกจาก Laminar Flow Hood แล้วไม่ได้เคลื่อนที่ไปยังช่องลมกลับแต่กลับถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เข้าไปยัง Laminar Flow Hood ทางด้านบนด้วยอิทธิพลของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายใน Laminar Flow Hood ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 10 ทำให้ฝุ่นละอองในบริเวณดังกล่าวถูกระบายออกได้ยาก ส่วนอากาศที่ไม่ได้ถูกเหนี่ยวนำเข้าไปใน Laminar Flow Hood จะใช้เวลานานในการเคลื่อนที่ไปยังช่องลมกลับเนื่องจากระยะทางที่ไกล ส่งผลให้พื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 ภายในห้องสะอาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด วิธีการที่จะช่วยลดปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานได้ Laminar Flow Hood ในบริเวณดังกล่าวสามารถทำได้โดยการติดตั้งช่องลมกลับเพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งพบว่าพื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 มีพื้นที่เพิ่มขึ้น 20 %



รูปที่ 14 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองและระดับความสะอาดที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 m

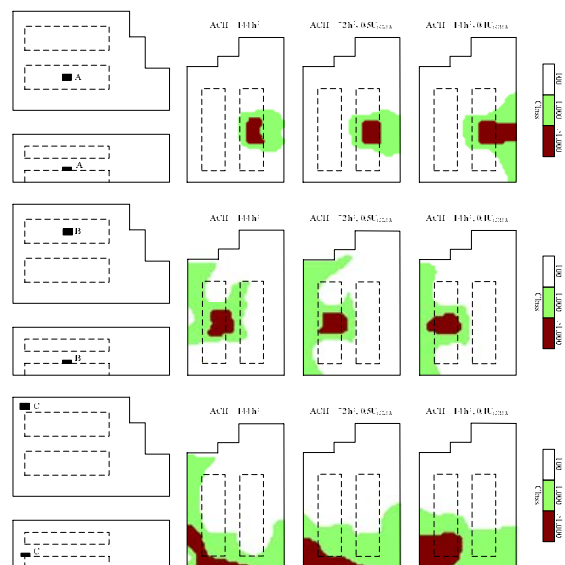


รูปที่ 15 การติดตั้งช่องลมกลับเพิ่มเติมเพื่อช่วยในการระบายฝุ่นละอองออกจากห้องสะอาด

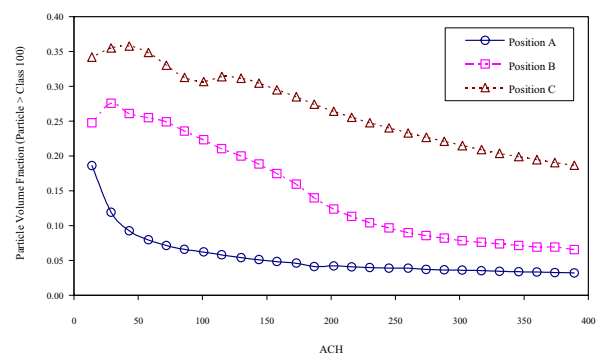
5.4 ผลกระทบของ ACH ที่มีต่อการควบคุมระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลกระทบของ ACH ที่มีต่อการควบคุมระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่า ACH ที่เหมาะสมต่อการปฏิบัติงานภายในห้องสะอาด ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ACH กับปริมาณฝุ่นละอองที่แสดงอยู่ในรูปของเศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองที่มีระดับความสะอาดมากกว่า Class 100 โดย

พิจารณาบริเวณที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง 3 บริเวณด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17 ซึ่งขนาดของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่ใช้พิจารณา มีขนาด 10^5 Particles/s จากผลการคำนวณที่ได้พบว่าระดับความสะอาดภายในห้องสะอาดจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง การติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองไว้ในบริเวณที่อากาศไม่สามารถถ่ายเทได้สะดวกจะทำให้การควบคุมระดับความสะอาดเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณ ACH ก็ไม่แน่ว่าจะสามารถช่วยรักษาระดับความสะอาดภายในห้องสะอาดได้มากขึ้น การเพิ่มปริมาณ ACH โดยปราศจากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมแล้วอาจจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองของต้นทุนในการผลิต ซึ่งการหาค่าปริมาณ ACH ที่เหมาะสมจำเป็นต้องที่จะต้องทำการหาค่าตำแหน่งในการติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองหรือเปรียบเสมือนกับการหาบริเวณที่จะใช้ในการปฏิบัติงานให้ได้เสียก่อน ดังห้องสะอาดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะใช้ในการปฏิบัติงานมากที่สุดคือบริเวณตำแหน่ง A และปริมาณ ACH ที่เหมาะสมต่อการรักษาระดับความสะอาดภายในห้องควรอยู่ที่ 150 h^{-1} ปริมาณ ACH ที่ต่ำกว่า 50 h^{-1} จะทำให้พื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 ลดลงอย่างรวดเร็ว

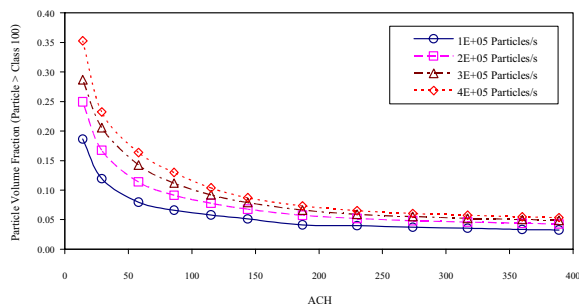


รูปที่ 16 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง และระดับความสะอาดที่ระนาบความสูง 1 m ที่ปริมาณ ACH = 144 h^{-1} , 72 h^{-1} และ 14 h^{-1}



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง ACH กับ เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองที่มีระดับความสะอาดมากกว่า Class 100

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่มีต่อระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด โดยเลือกติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองไว้ที่ตำแหน่ง A ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งพบว่าพฤติกรรมของฝุ่นละอองมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือพื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 จะลดลงอย่างรวดเร็วที่ปริมาณ ACH ค่าหนึ่ง และปริมาณ ACH ที่มากกว่า 150 h⁻¹ จะทำให้พื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 มีค่าค่อนข้างคงที่



รูปที่ 18 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่มีต่อระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด

6. สรุป

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และการออกแบบห้องสะอาดได้ แต่ยังคงต้องมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มความสามารถต่อไป โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถจำลองพฤติกรรมของความเร็ว อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับทุนเมธีวิจัยอาวุโส ศ.ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปราโมทย์ สิงห์ทอง, พชรินทร์ จินดาหลวง, มลธิลา สุภาพรณ์ และ เศรษฐกิจ ป่วงกลาง. (2003). การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมทางกายภาพของห้องสะอาดขนาดเล็ก. โครงการงานปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [2] สุรพล พฤษพานิช. (2003). การออกแบบห้องสะอาด. ใน เอกสารการสัมมนาวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีและการออกแบบห้องสะอาด. สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร.
- [3] Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N. (2002). **Transport phenomena** (2nd ed.). United States of America: John Wiley & Sons.
- [4] Cengel, Y. A., and Boles, M. A. (1998). **Thermodynamics: An engineering approach** (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [5] Cheng, M., Liu, G. R., Lam, K. Y., Cai, W. J., and Lee, E. L. (1999). Approaches for improving airflow uniformity in unidirectional flow cleanrooms. **Building and Environment** 34: 275-284.
- [6] Fluent Inc. (2001). **Fluent user's guide: Version 6.1**. United States of America: Fluent Inc.
- [7] Hu, S. C., Chuah, Y. K., and Yen, M. C. (2002). Design and evaluation of a minienvironment for semiconductor manufacture processes. **Building and Environment** 37: 201-208.
- [8] Incropera, F. P., and De Witt, D. P. (1985). **Fundamentals of heat and mass transfer** (2nd ed.). United States of America: John Wiley & Sons.
- [9] Launder, B. E., and Sharma, B. I. (1974). Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. **Letters in Heat and Mass Transfer** 1: 131-138.
- [10] Patankar, S. V. (1980). **Numerical heat transfer and fluid flow**. United States of America: Hemisphere.
- [11] Rhie, C. M., and Chow, W. L. (1983). Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. **AIAA Journal** 21 (11): 1525-1532.
- [12] Rouaud, O., and Havet, M. (2002). Computation of the airflow in a pilot scale clean room using $k-\epsilon$ turbulence models. **International Journal of Refrigeration** 25: 351-361.
- [13] 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.
- [14] Teodosiu, C., Hohota, R., Rusaouen, G., and Woloszyn, M. (2003). Numerical prediction of indoor air humidity and its effect on indoor environment. **Building and Environment** 38: 655-664.
- [15] Varaksin, A. Y., Polezhaev, Y. V., and Polyakov, A. F. (2000). Effect of particle concentration of fluctuating velocity of the disperse phase for turbulent pipe flow. **International Journal of Heat and Fluid Flow** 21: 562-567.
- [16] Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (1995). **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. Malaysia: Longman Scientific & Technical.