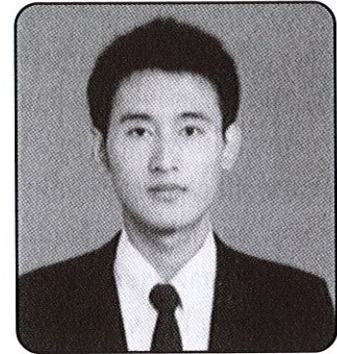


การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหล ของ

อากาศ อุณหภูมิ และความชื้นภายในห้องสะอาด

Numerical Study of Airflow, Temperature and Humidity in a Clean Room



• เอกรงค์ สุขจิต
วารังศรีรัตน์ จันทสาโร
และ เอกชัย จันทสาโร¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา
โทร. (044) 224410-1 โทรสาร (044) 224411 E-Mail : s_eakarong@hotmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ
โทร (02) 9428555 ต่อ 1829, E-Mail : fengvrij@ku.ac.th

บทคัดย่อ

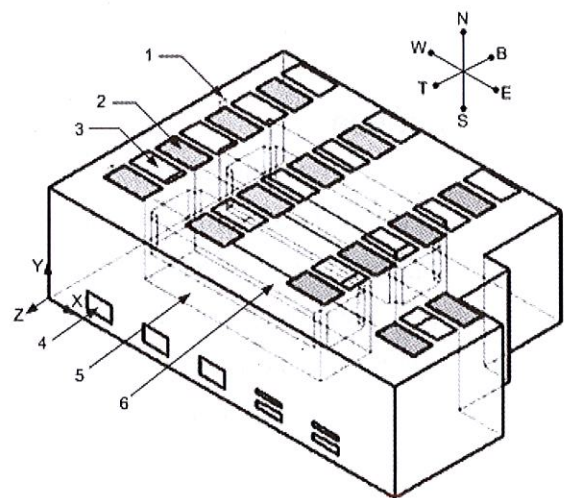
การศึกษาเชิงตัวเลขของปรากฏการณ์การขนถ่ายผ่านแบบจำลองทางฟิสิกส์ของอุณหภูมิและความชื้นที่ได้รับอิทธิพลจากกระแสการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดจะถูกนำเสนอในบทความนี้ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อทำความเข้าใจในพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมเหล่านั้นให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ห้องสะอาดในกระบวนการผลิต ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มคุณภาพและลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ ในการศึกษา จะทำการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นเองบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม และแก้ปัญหาตามขั้นตอนวิธีของ SIMPLE การไหลภายในห้องสะอาดถูกกำหนดให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ ของ Launder และ Sharma ก่อนทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมต่างๆภายในห้องสะอาด เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น จะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลที่ได้จากการวัดบนระนาบสูงจากพื้น 1 เมตร โดยตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องคือ ความเร็วลัพธ์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ หลังจากการเปรียบเทียบพบว่าผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการวัด

1. บทนำ

บทบาทของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบ วิเคราะห์ ตรวจสอบและพัฒนางานทางด้านต่างๆ มิให้พบเห็นกันอย่างแพร่หลายรวมไปถึงงานทางด้านการบินอวกาศ ปัจจุบันในสถานะที่อากาศเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา มนุษย์กับระบบปรับอากาศจึงมีความสัมพันธ์กันมากขึ้น ซึ่งเห็นได้จากอาคารสถานที่ต่างๆ ล้วนแล้วแต่ต้องมีการติดตั้งระบบปรับอากาศภายในตัวอาคาร หรือในภาคอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภทเช่น อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยระบบปรับอากาศเพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นฝุ่นละออง อุณหภูมิ และความชื้นภายในห้องปฏิบัติการเพื่อให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ลักษณะของห้องที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างๆ จะถูกเรียกว่าห้องสะอาด สภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาดจะต้องเหมาะสมกับกระบวนการผลิตอุปกรณ์เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์เหล่านั้น ขั้นตอนในการออกแบบระบบปรับอากาศเพื่อที่จะสามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาดให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในบทบาทฉบับนี้จะนำเสนอการศึกษาปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมต่างๆภายในห้องสะอาดอันได้แก่ ความเร็ว อุณหภูมิและความชื้น โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นบนภาษา Visual C++ และใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมในการแก้ปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจในพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมต่างๆภายในห้องสะอาด และเป็นเครื่องมืออีกหนึ่งที่จะช่วยวิศวกรในการออกแบบระบบปรับอากาศภายในห้องสะอาดหรือบริเวณใดๆ ที่มีการปรับอากาศ

2. รูปร่างของห้องสะอาด

ห้องสะอาดที่ใช้ในการศึกษาเป็นห้อง SQE. C/R ของบริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ.นครราชสีมา สภาวะความสะอาดภายในห้องถูกออกแบบให้ทำงานที่สภาวะความสะอาด Class 10,000 ในส่วนพื้นที่การทำงานได้ Laminar Flow Hood ถูกออกแบบให้มีสภาวะความสะอาด Class 100 ขนาดของห้องสะอาดที่มากที่สุดในทิศทาง x, y และ z มีค่าเท่ากับ 10.81, 3.0 และ 7.32 เมตร ตามลำดับ รูปที่ 1 แสดงรูปร่างของห้องสะอาดที่ใช้ในการศึกษา โดยอุปกรณ์หลักที่ถูกพิจารณาในการศึกษาประกอบด้วย หัวจ่ายลม (HEPA) 13 หัวจ่าย ช่องลมที่ผนังด้านทิศตะวันตก 2 ช่อง ช่องลมกลับ 5 ช่อง แฉงหลอดไฟ 14 แฉง โต๊ะทำงาน 2 ตัว และ Laminar Flow Hood 2 เครื่อง ในเบื้องต้นจะทำการศึกษาปรากฏการณ์การขนถ่ายภายในห้องสะอาดขณะที่เครื่อง Laminar Flow Hood ทั้ง 2 เครื่องยังไม่ได้ทำงาน และเลือกใช้ระบบกริดแบบสม่ำเสมอขนาด 55x31x37 ปริมาตรควบคุม



1. Wind Channel
2. Light
3. HEPA (High Efficiency Particulate Air Filters)
4. Air return
5. Workbench
6. Laminar flow hood

รูปที่ 1 รูปร่างของห้องสะอาด

3. แบบจำลองทางฟิสิกส์

ในการศึกษาจะพิจารณาการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ และปั่นป่วนที่สภาวะคงตัว อากาศที่พิจารณาเป็นของผสมระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ อากาศถูกสมมติให้เป็นก๊าซสมบูรณ์แบบ (Perfect gas) และไม่มีอุปกรณ์ใดภายในห้องที่สามารถแผ่หรือดูดซับไอน้ำได้ สมการควบคุมที่เกี่ยวข้องในการอธิบายพฤติกรรมของอากาศภายในห้องสะอาดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปค่าเฉลี่ยกับเวลาแบบเทนเซอร์ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \overline{\rho u'_j u'_i}) - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g_j \beta (T - T_0) \delta_{ij} \quad (2)$$

สมการพลังงาน

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

สมการเศษส่วนมวลของไอน้ำ

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j m) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc} \right) \right] \quad (4)$$

สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \rho \epsilon - \rho D \quad (5)$$

$$C_{p,mixture} = \sum_{\alpha=1}^N (m_\alpha C_{p,\alpha}) \quad (13)$$

$$\mu_{mixture} = \sum_{\alpha=1}^N \left(\frac{X_\alpha \mu_\alpha}{\sum_{\beta=1}^N (X_\beta \Phi_{\alpha\beta})} \right) \quad (14)$$

โดยที่

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_\alpha}{M_\beta} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_\alpha}{\mu_\beta} \right)^{1/2} \left(\frac{M_\beta}{M_\alpha} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (15)$$

และ

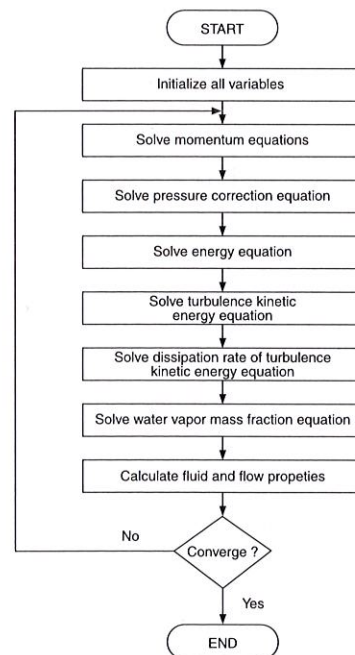
$$\bar{k}_{mixture} = \sum_{\alpha=1}^N \left(\frac{X_\alpha k_\alpha}{\sum_{\beta=1}^N (X_\beta \Phi_{\alpha\beta})} \right) \quad (16)$$

โดยที่

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_\alpha}{M_\beta} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\bar{k}_\alpha}{\bar{k}_\beta} \right)^{1/2} \left(\frac{M_\beta}{M_\alpha} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (17)$$

4. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เลือกใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องในการศึกษา โดยใช้วิธีผลต่างต้นลมกับเทอมการพาและวิธีผลต่างกลางกับเทอมการแพร่และการกำเนิด ใช้ขั้นตอนวิธีของ SIMPLE ในการป้องกันความไม่เกี่ยวพันกันของสนามความเร็วกับสนามความดัน ลำดับขั้นตอนในการแก้ปัญหาแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลำดับขั้นตอนของการแก้ปัญหา

สมการการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (p u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3} G_k) \frac{\varepsilon}{k} - p C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + p E \quad (6)$$

โดยที่

$$t_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (7)$$

$$-p \overline{u'_j u'_i} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(p k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (8)$$

$$P_k = -p \overline{u'_j u'_i} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (9)$$

$$G_k = -\frac{\mu_t}{\sigma_T} g \beta \frac{\partial T}{\partial y} \quad (10)$$

$$\mu_t = p C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

สำหรับค่าคงที่ ฟังก์ชันการหน่วง และเทอมพิเศษต่างๆมีค่าดังนี้

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

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

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

$$E = \frac{2\mu}{p} \frac{\mu_t}{p} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_m} \right)^2, Re_t = \frac{p k^2}{\mu \varepsilon}$$

คุณสมบัติของอากาศซึ่งเป็นของผสม (Mixture) ระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำสามารถหาได้จากกฎการผสมกันของก๊าซสมบูรณ์แบบดังนี้

$$P_{mixture} = \frac{p}{RT \sum_{\alpha=1}^N (m_\alpha / M_\alpha)} \quad (12)$$

5. สภาวะขอบเขต

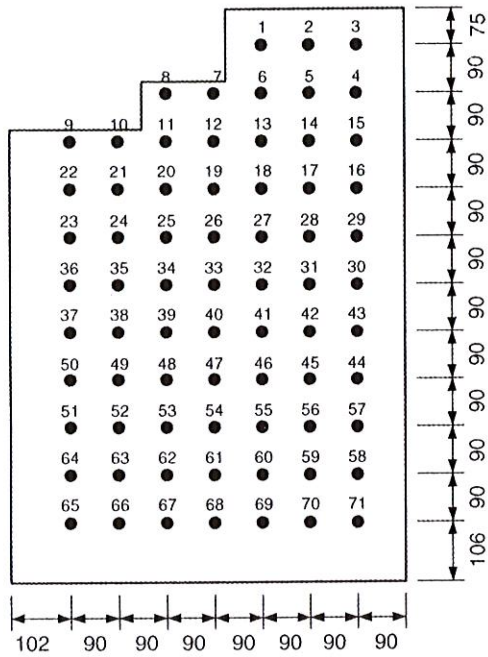
ในการกำหนดค่าสภาวะขอบเขตของการคำนวณสำหรับทางเข้าจะกำหนดเป็นความเร็ว อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์คงที่ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวัด ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนและค่าอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วนสามารถหาได้จากความเร็วและเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ตามสมการที่ 18 และ 19 โดยกำหนดให้ค่ารุนแรงของความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับ 4% สำหรับผนังจะใช้เงื่อนไขไม่ลื่นไถลในการกำหนดสภาวะขอบเขตของความเร็ว กำหนดอุณหภูมิของผนังเป็นค่าคงที่ซึ่งได้จากการวัด ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนและค่าอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ และกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ในทิศทางตั้งฉากกับผนังมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนสภาวะขอบเขตที่ทางออกจะกำหนดให้ตัวแปรทุกตัวที่คำนวณมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับศูนย์ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของทางออก

$$k_o = \frac{3}{2} U_o^2 \quad (18)$$

$$\varepsilon_o = C_\mu^{3/4} \frac{k_o^{3/2}}{0.07 D_h} \quad (19)$$

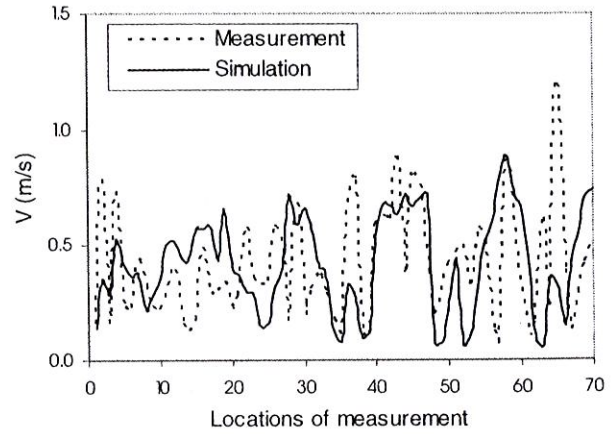
6. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

ในการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจะทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบค่าความเร็วลัพท์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการวัดบนระนาบที่สูงจากพื้น 1 เมตรโดยมีข้อมูลจากการวัดด้วยกันทั้งหมด 71 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่า ในส่วนของค่าความเร็วลัพท์และอุณหภูมิ ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับผลการวัดเป็นอย่างดี ส่วนค่าความชื้นสัมพัทธ์ ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 10% เมื่อเทียบกับผลการวัด

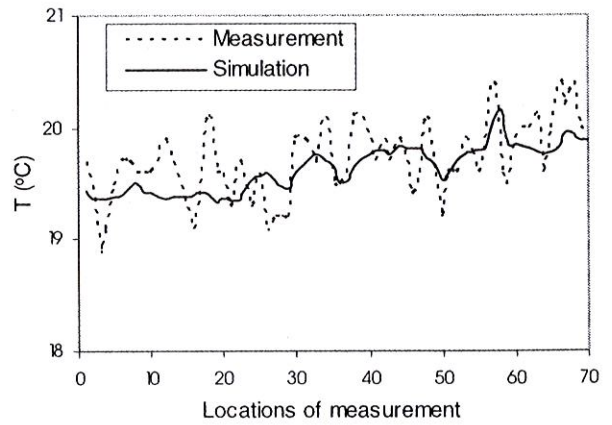


รูปที่ 3 ตำแหน่งในการวัดข้อมูล

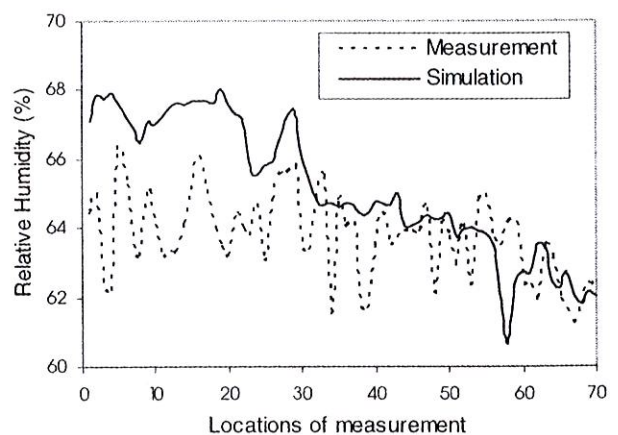
เมื่อพิจารณาผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นพบว่าลักษณะการถ่ายเทของอากาศภายในห้องค่อนข้างจะถ่ายเทได้ดี โดยอากาศส่วนใหญ่ถูกระบายออกได้เป็นอย่างดีจึงทำให้อุณหภูมิภายในห้องค่อนข้างจะสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบการไหลหมุนวนเป็นบริเวณเล็กน้อยที่ด้านหน้าของห้อง (ด้านทิศตะวันออก) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการหักมุมของผนัง การไหลหมุนวนจะทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวไม่ถูกระบายออกจึงทำให้บริเวณด้านหน้าของห้องมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำกว่าบริเวณอื่นและมีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าบริเวณอื่น ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่แนะนำไว้ในเอกสารการออกแบบห้องสะอาด [12] ซึ่งในเอกสารนี้ได้แนะนำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องสะอาดอยู่ในช่วง 50-60 % เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าค่าที่แนะนำนี้อาจจะทำให้อุปกรณ์ประเภทเหล็กเกิดสนิมขึ้นได้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัด (a) ความเร็วลัพท์ (b) อุณหภูมิ และ (c) ความชื้นสัมพัทธ์

7. สรุป

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถใช้ศึกษาปรากฏการณ์การชนถ่ายภายในห้องสะอาดได้ โดยภาพรวมแล้วโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้สามารถทำให้เราเห็นพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมต่างๆที่สำคัญภายในห้องสะอาดได้ ไม่ว่าจะเป็นความเร็ว อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งจะ เป็นเครื่องมืออันหนึ่งที่จะช่วยวิศวกรในการออกแบบและปรับปรุงห้องสะอาดหรือบริเวณใดๆ ที่มีการปรับอากาศได้ แต่ยังคงต้องหาวิธีที่จะปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณบริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ.นครราชสีมา เป็นอย่างสูงที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
 $C_{p,\alpha}$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของ
 พันธุมวล
 C_{ε_1} = ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน
 C_{ε_2} = ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน
 C_{ε_3} = ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน
 C_μ = ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน
 D = เทอมการกำเนิดในสมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน
 D_i = สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นที่สามารถแพร่
 เข้าไปในอากาศ
 D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์
 E = เทอมการกำเนิดในสมการอัตราการผลิต
 พลังงานจลน์ปั่นป่วน
 f_{ε_1} = ฟังก์ชันการหน่วงของแบบจำลองความปั่นป่วน
 f_{ε_2} = ฟังก์ชันการหน่วงของแบบจำลองความปั่นป่วน
 f_μ = ฟังก์ชันการหน่วงของแบบจำลองความปั่นป่วน
 g_j = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในแนวแกน x, y
 และ z
 G_k = การสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
 h = เอนทาลปี
 I = ความรุนแรงของความปั่นป่วน (%)
 I_o = ความรุนแรงของความปั่นป่วน (%) ที่ทางเข้า
 k = พลังงานจลน์ปั่นป่วน
 k_o = พลังงานจลน์ปั่นป่วนที่ทางเข้า
 \bar{k} = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 \bar{k}_α = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของพันธุมวล α
 \bar{k}_β = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของพันธุมวล β
 m_i = เศษส่วนมวลของไอน้ำ
 m = เศษส่วนมวลของพันธุมวล
 M_α = มวลโมเลกุลของพันธุมวล α
 M_β = มวลโมเลกุลของพันธุมวล β
 N = จำนวนของพันธุมวลในก๊าซผสม
 P = ความดัน
 P_k = การสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากความเค้น
 R = ค่าคงที่ของก๊าซสากล
 Re_t = เลขเรย์โนลด์ความปั่นป่วน
 Sc_t = ค่าชmidt หนี้มเบอร์ของความปั่นป่วน
 T = อุณหภูมิ
 T_r = อุณหภูมิอ้างอิง

- t_{ji} = เทนเซอร์ความเค้นจากความหนืด
 u_j = ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x, y และ z
 U_o = ความเร็วที่ทางเข้า
 x_α = เศษส่วนโมลของพันธุมวล α
 x_β = เศษส่วนโมลของพันธุมวล β

สัญลักษณ์กรีก

- β = สัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิ
 p = ความหนาแน่น
 $-p'u'_i$ = เทนเซอร์ความเค้นของเรย์โนลด์
 ε = อัตราการผลิตสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน
 ε_o = อัตราการผลิตสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่ทางเข้า
 μ = ความหนืดพลศาสตร์
 μ_t = ความหนืดไหลวนปั่นป่วน
 μ_α = ความหนืดพลศาสตร์ของพันธุมวล
 μ_β = ความหนืดพลศาสตร์ของพันธุมวล
 σ_k = แปรนดท์ทอลนัมเบอร์ความปั่นป่วนของ
 σ_ε = แปรนดท์ทอลนัมเบอร์ความปั่นป่วนของ
 σ_T = แปรนดท์ทอลนัมเบอร์ความปั่นป่วนของ
 $\Phi_{\alpha\beta}$ = ตัวแปรไร้มิติในการหาค่าคุณสมบัติของผสม
 ระหว่าง α และ β
 δ_{ij} = ครอนเนคเกอร์เดลต้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bird, R.B., Stewart, W.E., and Lightfoot, E.N., (2002), "Transport Phenomena", Second Edition, John Wiley & Sons.
- [2] Cengel, Y.A., and Boles, M.A., (1998), "Thermodynamics: An Engineering Approach", Third Edition, McGraw-Hill.
- [3] Incropera, F.P., and De Witt, D.P., (1985), "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Second Edition, John Wiley & Sons.
- [4] Kays, W.M., and Crawford, M.E., (1993), "Convective Heat and Mass Transfer", Third Edition, McGraw-Hill.
- [5] Patankar, S.V., (1980), "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill.
- [6] Versteeg, H.K., and Malalasekera, W., (1995), "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", Longman Group.
- [7] Welty, J.R., Wicks, C.E., and Wilson, R.E., (1984), "Fundamentals of Momentum Heat, Heat, and Mass Transfer", Third Edition, John Wiley & Sons.
- [8] Wilcox, D.C., (1993), "Turbulence Modeling for CFD", DWC Industries, Inc.
- [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", Letter in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, 131-138.
- [10] Rouaud O., and Havet M., (2002), "Computation of the Airflow in a Pilot Scale Clean Room Using Turbulence Models", International Journal of Refrigeration, Vol. 25, 351-361.
- [11] 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, Vol. 38, 655-664.
- [12] Ungbhakorn V., (2003), "Technology and Clean Room Design", The 3rd Symposium of Air-Conditioning Engineering Association of Thailand.