

การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็ก

Numerical Simulation for Air Flow in a Small Clean Room

เอกรงค์ สุขจิตต์¹ วรารักษ์รัตน์ จันทสาโร² และ เอกชัย จันทสาโร¹

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Lab)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร (044) 224410-1, โทรสาร (044) 224411, E-Mail: s_eakarong@hotmail.com

² ห้องปฏิบัติการกลศาสตร์เชิงคำนวณ (CML)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บางเขน กรุงเทพฯ 10900

โทร (02) 9428555 ต่อ 1829, โทรสาร (02) 5794576, E-Mail: ovrsk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีห้องสะอาดได้มีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น โดยทั่วไปอากาศที่ไหลภายในห้องสะอาดมักถูกควบคุมให้เป็นการไหลแบบราบเรียบและไม่เกิดการหมุนวน ดังนั้นบทความฉบับนี้จะนำเสนอการจำลองการไหลเพื่อให้เห็นพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดเพื่อนำไปสู่การควบคุมพฤติกรรมการไหลภายในห้องสะอาดให้เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการผลิต โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะอยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume method) และใช้ SIMPLE algorithm ร่วมกับการประมาณค่าในช่วงของ Rhie และ Chow เพื่อป้องกันการไม่เกี่ยวพันกันของสนามความเร็วและสนามความดันบนระบบกริดร่วม (Collocated grid) ในสมการควบคุมจะใช้วิธีผลต่างต้นลม (Upwind differencing scheme) กับเทอมการพา (Convection) และใช้วิธีผลต่างกลาง (Central differencing scheme) กับเทอมการแพร่ (Diffusion) และเทอมการกำเนิด (Source) การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้นเรียโนลด์ส์- $k-\epsilon$ ของ Launder และ Sharma ในส่วนของขอบเขตที่เป็นสิ่งกีดขวางเลือกใช้วิธีกันค่า (Block off) เพื่อกำหนดขอบเขต ผลจากการคำนวณได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดที่ระดับความสูงจากพื้น 1 เมตร ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการวัด

Abstract

At present cleanroom technology has played an important role for a variety of industries: microelectronics, food production

and physician instrument industries, etc. In general the airflow inside a cleanroom is controlled to be laminar flow and has no circulation of flow. Therefore this paper is aimed to present the simulation of flow in order to investigate the airflow pattern inside the cleanroom toward the optimum flow control for manufacturing process. The software developed is based on the finite volume method and employs the SIMPLE algorithm combined with the Rhie and Chow interpolation to prevent the decoupling between pressure and velocity fields on the collocated grid configuration. The convective terms are approximated by the upwind differencing scheme and the central differencing scheme is used to evaluate the diffusive and source terms. The linear low-Reynolds-number $k-\epsilon$ turbulence model of Launder and Sharma is used in this work. The block off technique is applied for the grid points inside the obstacle. The computational results are compared with the experimental data at 1.0 m. above the floor. It is found that the results obtained agree with the experimental data.

1. บทนำ

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้มีบทบาทสำคัญมากในการช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบหรือปรับปรุงอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ เนื่องจากคอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็วและยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปกับการทำการทดลอง ในศาสตร์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลที่เรียกว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งได้ใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยศึกษาพฤติกรรมของของไหลนั้นปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

เนื่องจากสมการที่กำกับพฤติกรรมการไหลของของไหลมีความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้เกิดความยุ่งยากมากในการหาคำตอบที่เป็นผลเฉลยแม่นยำ การทำการทดลองจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันเพื่อที่จะหาผลเฉลยเหล่านั้นแต่ปัญหาใหญ่ที่พบในการทำการทดลองคือค่าใช้จ่ายอันมหาศาลเพราะต้องใช้เครื่องมือวัดที่ทันสมัย ดังนั้นเพื่อช่วยลดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำการทดลองจึงต้องอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลขแทน

โดยปัญหาที่การศึกษาจะเป็นปัญหาการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็กเนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีห้องสะอาดได้มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมหลายๆประเภทเช่น อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น ห้องสะอาดเป็นห้องที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้อง ซึ่งสภาวะแวดล้อมที่สำคัญได้แก่ การไหล อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง ดังนั้นหากมีการศึกษาเพื่อจำลองพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ได้ ก็จะทำให้สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมในห้องสะอาดให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ในแต่ละอุตสาหกรรมได้ ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพที่สูงขึ้นและลดปริมาณการสูญเสียผลิตภัณฑ์ด้วย ในบทความฉบับนี้จะนำเสนอเฉพาะการจำลองการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็กที่ตั้งอยู่ในบริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ.นครราชสีมา เพื่อให้เห็นพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในห้อง และนำไปสู่การออกแบบเพื่อหาทางปรับปรุงประสิทธิภาพของห้องสะอาดให้มีการไหลที่เหมาะสมต่อการปฏิบัติงานมากที่สุด

2. ทฤษฎี

2.1 สมการควบคุม

การวิเคราะห์การไหลในที่นี้จะกำหนดให้เป็นการไหลที่สภาวะคงที่แบบอัดตัวไม่ได้และเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในระบบปิดฉาก 3 มิติ ซึ่งมีสมการควบคุมที่เขียนอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยกับเวลาในแบบ tensor ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(t_{ij} + \tau_{ij}) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

ค่าความเค้นเฉลี่ยเนื่องจากความหนืด, t_{ij} มีค่าเป็น

$$t_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

โดยที่ μ คือ ความหนืดของของไหล

ส่วนค่าความเค้นเฉลี่ยของ Reynolds, τ_{ij} มีค่าเป็น

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (4)$$

ซึ่งเป็นเทอมที่ไม่ทราบค่า จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองมาช่วยหาค่าของเทอมดังกล่าว โดยในที่นี้เลือกแบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์แบบเบอร์ต้า $k-\varepsilon$ ของ Launder และ Sharma (1974)

2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

ในแบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์แบบเบอร์ต้า $k-\varepsilon$ การหาค่าความเค้นเฉลี่ยของ Reynolds จะอยู่บนพื้นฐานของ Boussinesq's assumption (1877) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k) \quad (5)$$

โดยที่ μ_t คือ eddy viscosity, k คือ พลังงานจลน์ความปั่นป่วน และ δ_{ij} คือ Kronecker delta: $\delta_{ij} = 0$ สำหรับ $i \neq j$ และ $\delta_{ij} = 1$ สำหรับ $i = j$

สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์แบบเบอร์ต้า $k-\varepsilon$ จะมีสมการดังนี้

สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon - \rho D \quad (6)$$

สมการการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \\ & - \rho C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \rho E \end{aligned} \quad (7)$$

โดยที่ ค่า μ_t มีค่าดังนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

ส่วนค่าคงที่ของแบบจำลอง ฟังก์ชันการหน่วง และเทอมพิเศษต่างๆมีค่าดังนี้

$$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

$$f_{\varepsilon 1} = 1.0$$

$$D = \frac{2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right)^2$$

$$E = \frac{2\mu}{\rho} \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_m} \right)^2$$

$$f_{\varepsilon 2} = 1 - 0.3 \exp(-\text{Re}_t^2)$$

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$$

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รูปแบบสมการควบคุมข้างต้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปทั่วไปที่ประกอบด้วยเทอม convection, diffusion และ source/sink ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S^\varphi \quad (9)$$

convection term = diffusion term + source/sink term

โดยที่ φ คือ ตัวแปรตามทั่วไป (General dependent variable)

Discretisation สมการควบคุมโดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด เลือกใช้ upwind differencing scheme กับเทอม convection และ central differencing scheme กับเทอม diffusion และ source/sink ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$a_P \varphi_P = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W + a_N \varphi_N + a_S \varphi_S + a_T \varphi_T + a_B \varphi_B + b \quad (10)$$

โดยที่ $a_E, a_W, a_N, a_S, a_T, a_B$ และ a_P คือสัมประสิทธิ์ของ $\varphi_E, \varphi_W, \varphi_N, \varphi_S, \varphi_T, \varphi_B$ และ φ_P ตามลำดับ ส่วน b คือเทอม source หรือ sink ใช้ SIMPLE algorithm ในการป้องกันความไม่เกี่ยวพันกันระหว่างสนามความเร็วกับสนามความดัน เลือกใช้ระบบกริดร่วม (Collocated grid) ในการวิเคราะห์และใช้ Rhie and Chow interpolation ในการหาค่าความเร็วที่ด้านของปริมาตรควบคุมเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาสนามความดันเป็น checker-board

ในส่วนของขอบเขตที่เป็นสิ่งกีดขวางเลือกใช้วิธีกันค่า (Block off) เพื่อกำหนดขอบเขต โดยมีรายละเอียดดังนี้

พิจารณาสมการพีชคณิตของระบบสมการควบคุม

$$a_P \varphi_P = \sum a_{nb} \varphi_{nb} + S^\varphi \quad (11)$$

กำหนดให้ค่าที่ต้องการแทนด้วยสัญลักษณ์ φ_{design} ทำการแก้ไขค่าสัมประสิทธิ์ a_P และพจน์การกำเนิดใหม่ดังนี้

$$a_P = a_P + 10^{30} \quad (12)$$

$$S^\varphi = S^\varphi + 10^{30} \times \varphi_{design} \quad (13)$$

ทำการแทนค่า a_P และ S^φ ที่แก้ไขใหม่แล้วลงในสมการพีชคณิตของระบบสมการควบคุม จะได้สมการที่สามารถระบุค่าคำตอบที่ต้องการที่จุดใดๆ ดังนี้

$$(a_P + 10^{30}) \varphi_P = \sum a_{nb} \varphi_{nb} + S^\varphi + (10^{30} \times \varphi_{design}) \quad (14)$$

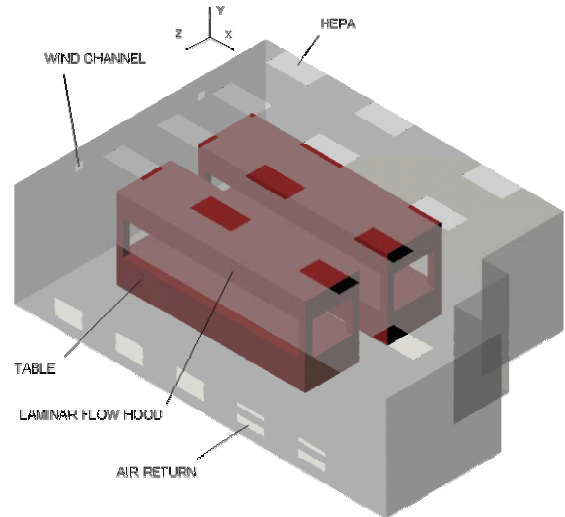
หากต้องการกำหนดบริเวณใดเป็นสิ่งที่กีดขวางก็สามารถทำได้โดยกำหนดค่าความเร็วให้เท่ากับศูนย์ หรือ φ_{design} เท่ากับศูนย์ในระบบสมการข้างต้นซึ่งสมการจะลดรูปลงดังนี้

$$(a_P + 10^{30}) \varphi_P = \sum a_{nb} \varphi_{nb} + S^\varphi \quad (15)$$

และนอกจากจะกำหนดค่าความเร็วในบริเวณสิ่งที่กีดขวางให้เป็นศูนย์แล้วจำเป็นจะต้องกำหนดฟลักส์บริเวณรอยต่อระหว่างสิ่งที่กีดขวางกับบริเวณรอบข้างให้เป็นศูนย์ด้วย

4. ห้องสะอาดที่ใช้ในการทดสอบ

ห้องสะอาดที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นห้องสะอาดขนาดเล็กชื่อว่าห้อง SQE. C/R ตั้งอยู่ในพื้นที่บริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ. นครราชสีมา เพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณได้มีการประมาณการและปรับแก้ค่าของอุปกรณ์บางชุด โดยมีรายละเอียดที่ใช้ในการคำนวณดังนี้



รูปที่ 1 ห้องสะอาดขนาดเล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 รายละเอียดของห้องสะอาดขนาดเล็ก

ความยาวที่สุด (x)	10.81 m
ความสูง (y)	3.00 m
ความกว้างที่สุด (z)	7.32 m
หัวจ่ายลม (HEPA)	จำนวน 13 หัว ขนาด 0.57 x 1.19 m ²
ช่องลม (Wind channel)	จำนวน 2 ช่อง ขนาด 0.23 x 0.23 m ²
ช่องอากาศออก (Air return)	จำนวน 5 ช่อง ขนาด 0.49 x 0.75 m ² (ช่องลมที่ 1 และ 2 ถูกแนวของท่อสายไฟบังอยู่ทำให้ลมออกได้ไม่เต็มช่อง)
Laminar flow hood	จำนวน 2 เครื่อง ขนาด 1.65 x 5.49 x 0.57 m ³
โต๊ะทำงาน (Table)	จำนวน 2 ตัว ขนาด 1.65 x 5.49 x 0.72 m ³

ในเบื้องต้น การจำลองการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็กจะทำการจำลองการไหลขณะที่เครื่อง Laminar flow hood ทั้ง 2 เครื่องไม่ได้ทำงาน จึงทำให้สามารถจำลองเครื่อง Laminar flow hood ทั้ง 2 เครื่องเป็นสิ่งที่คิดขวางได้ ซึ่งระบบกริดที่ใช้ในการคำนวณเป็นระบบกริดแบบสม่ำเสมอขนาด 57 x 33 x 39 กริด

5. สภาวะขอบเขต

ในการวิเคราะห์ได้มีการกำหนดสภาวะขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นดังข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2 ค่าสภาวะขอบเขต

สภาวะขอบเขต					
หัวจ่ายลม (HEPA)					
NO.	U m/s	V m/s	W m/s	k m ² /s ²	ε m ² /s ³
1	0.00	-0.62	0.00	5.76e-05	1.33e-06
2	0.00	-0.67	0.00	6.74e-05	1.69e-06
3	0.00	-0.83	0.00	1.04e-04	3.24e-06
4	0.00	-0.89	0.00	1.19e-04	3.93e-06
5	0.00	-0.68	0.00	6.95e-05	1.76e-06
6	0.00	-0.66	0.00	6.54e-05	1.61e-06
7	0.00	-0.87	0.00	1.16e-04	3.80e-06
8	0.00	-0.86	0.00	1.11e-04	3.54e-06
9	0.00	-0.84	0.00	1.05e-04	3.29e-06
10	0.00	-0.72	0.00	7.81e-05	2.10e-06
11	0.00	-0.84	0.00	1.05e-04	3.29e-06
12	0.00	-0.65	0.00	6.34e-05	1.54e-06

13	0.00	-0.86	0.00	1.11e-04	3.54e-06
ช่องลม					
NO.	U m/s	V m/s	W m/s	k m ² /s ²	ε m ² /s ³
1	5.68	-1.21	1.37	5.35e-03	1.19e-03
2	5.66	-1.21	2.00	5.63e-03	1.29e-03
ทางออก	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0.0$				
สิ่งกีดขวาง	U, V, W, k และ ε = 0.0				
ผนัง	U, V, W, k และ ε = 0.0				

สภาวะขอบเขตของค่า k และ ε มีค่าตาม [3] ดังนี้
 $k = 1.5(T_i \times U_{mag})^2$; $U_{mag} = (U^2 + V^2 + W^2)^{1/2}$, $T_i = 0.01$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}; l = 0.07L$$

โดยที่ T_i คือ Turbulence intensity และ L คือ Characteristic length

ตารางที่ 3 ค่าสภาวะเริ่มต้น

สภาวะเริ่มต้น
U = 0.0
V = 0.0
W = 0.0
k = 0.0
ε = 0.0

6. ตัวแปรในการวิเคราะห์

ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นค่าความเร็วลัพธ์ที่จุด P ใดๆ บนระนาบที่สูงจากพื้นห้องสะอาดเป็นระยะทาง 1.0 เมตร

$$V_{P,R} = \sqrt{U_P^2 + V_P^2 + W_P^2} \quad (16)$$

ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสามารถหาได้จาก

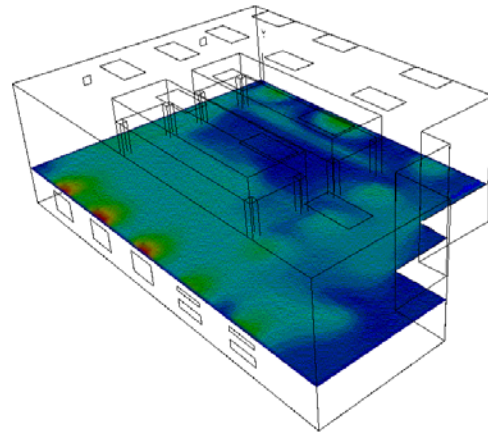
$$\%Error = \frac{|V_{measured} - V_{computed}|}{V_{measured}} \times 100\% \quad (17)$$

7. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

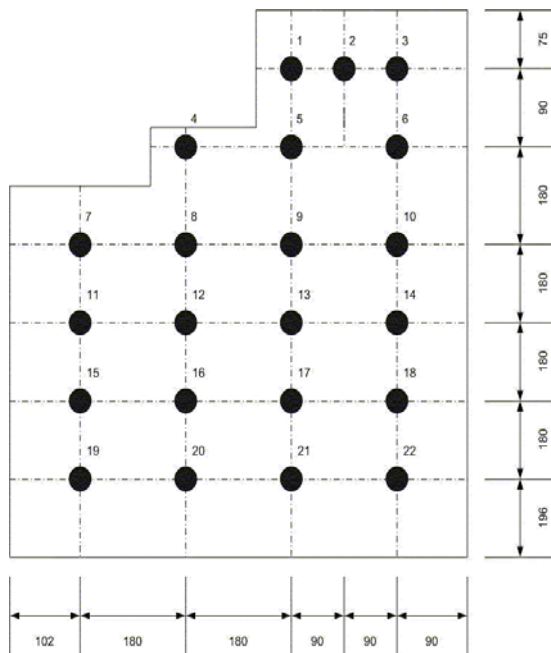
ผลการคำนวณที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดบนระนาบที่สูงจากพื้น 1 เมตรซึ่งเป็นระดับที่อยู่บริเวณใบหน้าของผู้ที่นั่งทำงานภายในห้องที่สามารถรับรู้ถึงความแรงของการไหลของอากาศภายในห้องได้ โดยตำแหน่งที่ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณบนระนาบดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งมีทั้งหมด 22 ตำแหน่ง ผลการคำนวณบนระนาบดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 และ 4

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นการหมุนวนบริเวณมุมห้องได้อย่างชัดเจนดังที่แสดงในรูปที่ 5 และเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบ

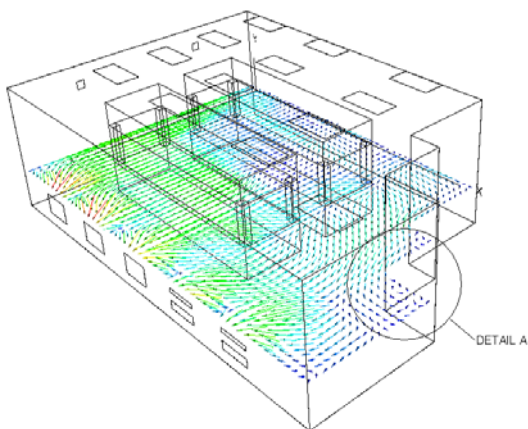
ระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัดดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าตำแหน่งที่ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการหมุนวนจะมีความผิดพลาดของผลการคำนวณที่สูง ส่วนตำแหน่งอื่นที่มีความผิดพลาดสูง คาดว่าเป็นความผิดพลาดเชิงตัวเลข (Numerical error) จากเส้นแสดงขนาดความเร็วลัพธ์ในรูปที่ 6 พบว่าหลายตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีความชันของความเร็ว (Velocity gradient) ที่สูงแต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระบบกริดที่เป็นแบบสม่ำเสมอซึ่งอาจจะทำให้มีความละเอียดไม่พอที่จะจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ และการที่ผู้วิจัยได้ทำการปรับแก้ค่าของอุปกรณ์บางชุดให้สะดวกต่อการคำนวณอาจจะส่งผลให้ผลการคำนวณที่ได้มีความผิดพลาดสูง



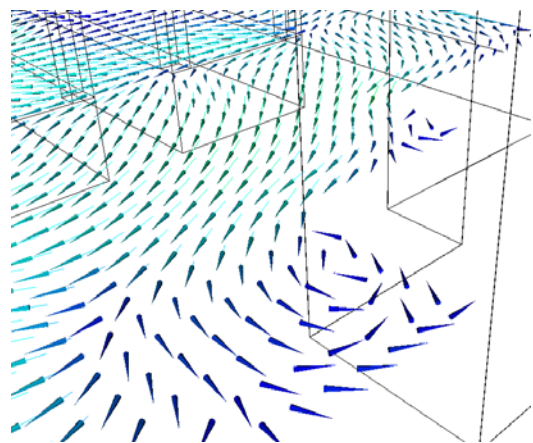
รูปที่ 4 ขนาดความเร็วลัพธ์บนระนาบสูงจากพื้น 1 เมตร



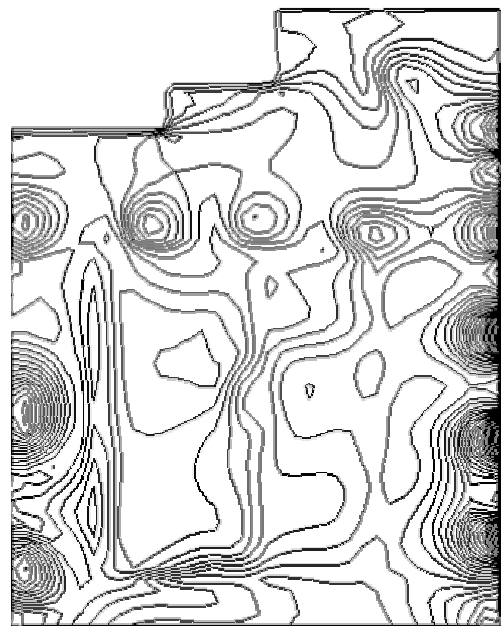
รูปที่ 2 ตำแหน่งบนระนาบสูงจากพื้น 1 เมตรที่ใช้ในการวิเคราะห์ (หน่วยเป็น cm)



รูปที่ 3 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบสูงจากพื้น 1 เมตร



รูปที่ 5 DETAIL A



รูปที่ 6 เส้นแสดงขนาดเร็วลัพธ์บนระนาบสูงจากพื้น 1 เมตร

ตารางที่ 4 ค่าความเร็วลัพธ์บนระนาบสูงจากพื้น 1 เมตร

ตำแหน่ง ในการวัด	ความเร็วลัพธ์ m/s		เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
	ผลการวัด	ผลการคำนวณ	
1	0.22	0.11	51
2	0.60	0.12	81
3	0.45	0.16	65
4	0.27	0.16	41
5	0.20	0.25	24
6	0.37	0.40	9
7	0.58	0.18	69
8	0.14	0.25	74
9	0.30	0.27	9
10	0.46	0.39	15
11	0.21	0.20	5
12	0.17	0.11	34
13	0.41	0.27	33
14	0.61	0.46	25
15	0.41	0.11	74
16	0.46	0.09	80
17	0.56	0.44	22
18	0.27	0.44	66
19	0.37	0.31	17
20	0.21	0.14	34
21	0.46	0.35	25
22	0.58	0.62	8

8. สรุป

โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้พบว่าโดยภาพรวมแล้วสามารถทำให้เราเห็นพฤติกรรมการไหลของของไหลรวมถึงบริเวณที่เกิดการหมุนวนได้ แต่ความถูกต้องของผลการคำนวณเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดยังอยู่ในระดับที่มากพอสมควร ซึ่งเป็นงานที่ผู้วิจัยจะได้ศึกษาต่อไปเพื่อทำให้ความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยมุ่งเน้นไปที่การหาแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนอื่นๆที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ รวมถึงการพิจารณาอิทธิพลของขนาดกริดที่ใช้ในการคำนวณ

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ. นครราชสีมาเป็นอย่างยิ่งที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการให้ใช้สถานที่และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และขอขอบคุณ นายปราโมทย์ สิงห์ทอง นางสาวพัชรินทร์ จินดาหลวง

นางสาวมลลิลลา สุภาภรณ์ และนายเศรษฐกิจ ป่วงกลาง นักศึกษาชั้นปีที่ 4 จากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับข้อมูลที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภูชงค์ อุทโยภาส จาก Parallel Research Group (PRG) สำหรับซอฟต์แวร์ SCView ที่ใช้ในการแสดงผลการคำนวณ

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรพงศ์ พงศ์บุญชู, “การศึกษาการหมุนเวียนของอากาศและการปรับอากาศในพื้นที่ปิดโดยใช้การคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์”, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
- [2] Patankar, S.V., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1980.
- [3] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., “An Introduction to Computational Fluid Dynamics”, Longman Scientific & Technical, 1995.
- [4] Wilcox, D.C., “Turbulence Modeling for CFD”, DCW Industries , Inc., USA, 1993.
- [5] Chow, W.K. and Fung, W.Y., “Numerical Studies on the Indoor Air Flow in the Occupied Zone of Ventilated and Air-conditioned Space”, Building and Environment., Vol.31, 1996, pp.319-344.
- [6] Launder, B.E. and Sharma, B.I., “Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow near a Spinning Disc”, Letter in Heat and Mass Transfer, 1974, Vol.1, pp.131-138.