การศึกษาการไหลของอากาศเย็นใต้พื้นยกภายในห้องเก็บข้อมูลขนาดใหญ่

A Simulation of Air Flow under raised floor in a Large Data Center

อาชว์ ริยะจันทร์ และ ชวลิต กิตติชัยการ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
*ติดต่อ: โทรศัพท์: +6629428555 ต่อ 1801, โทรสาร: +6625794576, E-mail: fengclk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการไหลของอากาศเย็นภายใต้พื้นยกสำหรับระบบปรับอากาศแบบพื้นยกภายในห้องเก็บข้อมูล (Data Center) ขนาดใหญ่โดยนำโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) มาใช้ในการวิเคราะห์ค่าปริมาตรการไหลที่ไหลผ่านแผ่นพรุน,ค่าความดันและการจำลองการไหลของอากาศเย็นภายใต้พื้นยก นอกจากนี้ในการศึกษายังได้ทำการวัดค่าอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศเย็นที่ไหลผ่านแผ่นพรุนและความดันของอากาศเย็นใต้พื้นยกในห้องเก็บข้อมูล ค่าที่ได้จากการวัดจะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD จากผลการศึกษาเปรียบเทียบพบว่าค่าอัตราการไหลโดยปริมาตรและความดันของอากาศเย็นที่ไหลภายใต้พื้นยกและที่ไหลผ่านแผ่นพรุน (Perforate plate) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD และที่วัดได้จริงมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 14% แต่ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 6.85% นอกจากนี้ผลจากการใช้โปรแกรม CFD วิเคราะห์และจำลองลักษณะการไหลของอากาศเย็นใต้พื้นยกในห้องเก็บข้อมูลจริง พบว่าอากาศเย็นใต้พื้นยกเกิดการไหลวนในบางบริเวณ ทำให้ปริมาณอากาศเย็นที่ไหลผ่านแผ่นพรุนเพื่อที่จะระบายความร้อนให้คอมพิวเตอร์ที่อยู่เหนือพื้นยกมีค่าต่ำ ส่งผลให้ถ้ามีการติดตั้งเครื่องคอมพิวเตอร์จำนวนมากในบริเวณนั้น จะเกิดจุดร้อน (hot spot) ในบริเวณนั้น ส่งผลให้ไม่สามารถระบายความร้อนได้ดีและคอมพิวเตอร์อาจเกิดความเสียหายได้

คำหลัก: ห้องเก็บข้อมูล, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, แผ่นพรุน, ระบบปรับอากาศแบบพื้นยก

Abstract

This paper presents a simulation of air flow under raised floor in a large data center. A commercial software in Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to visualize and analyze the distribution of air velocity and pressure. Not only the computational simulation was carried out, a measurement of air flow rate through the perforated plate and pressure were also conducted within the data center. The results obtained from these approaches were then compared. From the results obtained, it was found that the computational results and measured data agreed well with each other. Moreover the

simulation of air flow under raised floor showed that there was a recirculation of air in some areas. This results in a lower volume flow rate of the air through the perforate plates. It tends to cause hot spot areas and may result in a break down of computer in the data center due to insufficient cooling.

***Keywords**:* Data Center, CFD, Perforate plate

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ผู้คนทั่วโลกกำลังวิตกกังวลเป็นอย่างมากเกี่ยวกับวิกฤตการณ์ปัญหาโลกร้อน จึงทำให้เกิดการรณรงค์การใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด การออกแบบเกี่ยวกับการใช้พลังงานต่างๆ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญและเป็นจุดเริ่มต้นในการช่วยประหยัดพลังงานที่มีอยู่ ถ้ามีการออกแบบระบบที่ดีมีประสิทธิภาพ ปัญหาการใช้พลังงานโดยสิ้นเปลืองก็จะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยที่สุด

จากการค้นหาข้อมูลพบว่า ประเทศไทยมีการสร้างห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์หรือที่เรียกว่า ห้อง Data Center จำนวนมาก ห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ จะเป็นศูนย์ข้อมูลที่ประกอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไปศูนย์ข้อมูลจะควบคุมสภาพแวดล้อมภายในเป็นอย่างดี เช่น การควบคุมอุณหภูมิ การไหลเวียนอากาศ การป้องกันการเกิดอัคคีภัย การสำรองไฟฟ้า การเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ต และการรักษาความปลอดภัย วัตถุประสงค์หรือหน้าที่หลักของ ห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์คือ จัดการรักษา ประมวลผล และให้บริการข้อมูลที่สำคัญต่อการดำเนินการ ตัวอย่างเช่น ธนาคารจะมีห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อรักษาข้อมูลลูกค้าและรายการธุรกรรม (Transaction) ในต่างประเทศ ตามเมืองหลักๆ ก็จะมีห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ตั้งอยู่ที่ๆ ปลอดภัยและใกล้แหล่งบริการสื่อสาร เพื่อให้บริการรับฝาก Server (Co-location services) เนื่องด้วยข้อมูลในห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์มีความสำคัญต่อการดำเนินการขององค์กร ดังนั้นอุปกรณ์ เทคโนโลยี และความชำนาญการต่างๆ จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างด้วยมาตรฐานสูงสุดเท่าที่จะสามารถทำได้

ห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ที่กล่าวถึงนี้ อาจจะมีขนาด 1 ห้อง, 1 ชั้น หรือทั้งอาคาร อุปกรณ์ภายในมักบรรจุอยู่ในตู้ Rack ขนาด 19 นิ้วซึ่งเป็นขนาดมาตรฐาน ที่สะดวกต่อผู้ดูแลระบบโดยสามารถเข้าถึงอุปกรณ์ที่ติดตั้งในตู้ดังกล่าวได้จากทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ภายในห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์จึงต้องมี ระบบควบคุมอากาศ (Air conditioning) เพื่อให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำเหมาะแก่การทำงานของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ โดยจะเป็นระบบแบบพื้นยก (Raised floor) คือ ยกพื้นห้องให้สูงกว่าพื้นจริง เพื่อหมุนเวียนอากาศและวางสายไฟ พื้นยกเหล่านี้จะมีบางแผ่นที่มีช่องเปิดที่เรียกว่า แผ่นพรุน (Perforate plate) เพื่อระบายลมเย็นออกจากพื้นมายังอุปกรณ์เก็บข้อมูลและคอมพิวเตอร์ ซึ่งหากเครื่องคอมพิวเตอร์ภายในศูนย์ข้อมูลเหล่านี้ มีอุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้เกิดการขัดข้อง ส่งผลให้องค์กรไม่สามารถดึงข้อมูลลูกค้า หรือทำธุรกรรมใดๆได้ ผลที่ตามมาคือ ความเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างร้ายแรง

สำหรับการออกแบบระบบปรับอากาศแบบพื้นยกในปัจจุบัน ยังขาดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการไหลของอากาศภายใต้พื้นยก ทำให้การจัดวางแผ่นพรุน เพื่อให้อากาศใต้พื้นยกไหลขึ้นมาสู่ด้านบนเป็นไปได้ยากหรือเกิดการสูญเสีย ความดันมากจนไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ภายในห้องเก็บข้อมูล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาจำลองลักษณะการไหลของอากาศเย็นภายใต้พื้นยกเพื่อช่วยในการศึกษาวิเคราะห์และประมวลผลค่าตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้อง ผลการวิเคราะห์จะทำให้ทราบรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของอากาศใต้พื้นยก เพื่อนำมาปรับปรุง

การติดตั้งแผ่นพรุนและการจัดวางคอมพิวเตอร์เพื่อไม่ให้เกิดจุด hot spot นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปปรับใช้กับการออกแบบระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็นรูปแบบอื่นได้ เช่น การเก็บรักษาพืชผลทางการเกษตรของเกษตรกร ให้สามารถเก็บไว้ได้นาน โดยปรับเปลี่ยนจากการปรับอากาศรูปแบบเดิมๆมาเป็นการปรับอากาศแบบพื้นยก ซึ่งจะช่วยให้ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องเผื่อโหลดความเย็น ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

2. ทฤษฎี

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้พื้นยกด้วยโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจาก Kailash C et. al.มีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

Mass conservation equation

$$\frac{\partial \overline{u_{ai}}}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

Momentum conservation equations

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho_a \overline{u_{ai}u_{aj}}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \overline{u_{ai}}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_{aj}}}{\partial x_i}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho_a \overline{u'_{ai}u'_{aj}}) + \rho_a g_i + \rho_a F_D(u_{pi} - u_{ai}) \qquad (2)$$

Kailash C et. al. (2003)ได้แนะนำแบบจำลองความปั่นป่วน k-ε Turbulence model สำหรับการวิเคราะห์การไหลของอากาศใต้พื้นยก

$$\rho_a \bar{u}_{ai}\frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + G_k - \rho_a \varepsilon \qquad (3)$$

$$\rho_a \bar{u}_{ai}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho_a\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (4)$$

สำหรับความดันของอากาศเมื่อไหลผ่านแผ่นพรุน Δp สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta P = RQ^2 \qquad (5)$$

โดยที่ ΔP คือค่าความดันลด, Q คืออัตราการไหล และค่า R คือ ความต้านทานการไหลซึ่งคำนวณจาก

$$R = \frac{1}{2}\frac{\rho}{A^2}K \qquad (6)$$

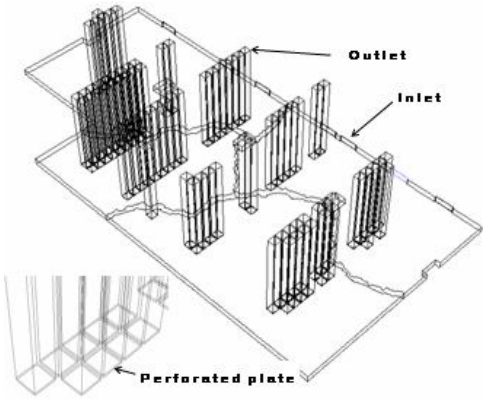
ที่ซึ่งค่า ρ คือค่าความหนาแน่นของอากาศ, A คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นพรุน และค่า K คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในแต่ละรูปแบบของแผ่นพรุน ซึ่งคำนวณได้จากสมการของ Idelchik (1984)

$$K = \frac{1}{f^2}(1 + 0.5(1-f)^{0.75}) + 1.414(1-f)^{0.375} \qquad (7)$$

โดยค่า f เป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เปิดของแผ่นพรุน

3.การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสามมิติใต้พื้นยกภายในห้องเก็บข้อมูลขนาดใหญ่ทางคอมพิวเตอร์เท่ากับขนาดจริง โดยแบ่งโดเมนแบบ unstructured tetrahedral และสร้างขอบเขตของตำแหน่ง Inlet, Outlet และแผ่นพรุนตามสภาวะการทำงานจริงตามรูปที่ 1 เพื่อที่จะศึกษาและคาดคะเนการกระจายตัวของความดันและความเร็วของอากาศภายใต้พื้นยก รวมถึงอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นพรุนภายในห้องเก็บข้อมูลขนาดใหญ่



รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองและขอบเขตของพื้นยกภายในห้องเก็บข้อมูลขนาดใหญ่เท่ากับขนาดจริง

ในการกำหนดรูปแบบเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และมีข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

เป็นการไหลแบบปั่นป่วนภายใต้สภาวะคงตัว

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้คือ k-ε และกำหนดให้อากาศเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

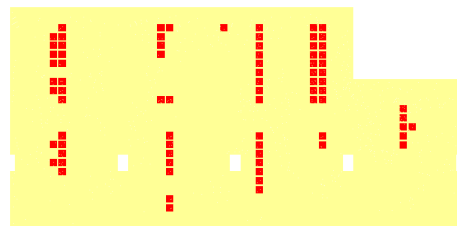
แบบจำลองของแผ่นพรุนจะกำหนดด้วยค่า R ที่ได้สมการที่ (5),(6) และ (7)

ตารางที่ 1 สภาวะเงื่อนไขขอบเขต

Boundary	Settings
Inlet flow	Velocity inlet (1-3)=5.129 m/s Velocity inlet (4-7)= 3.980 m/s
Return and exhausts	Pressure outlet 0 Pa
Perforated tile	Setting as porous zone and is calculated using Eq (5),(6) and (7)
Other	Wall

4.การทดลอง

ในการทดลองได้มีการวัดความเร็วและความดันของอากาศภายใต้พื้นยกตลอดจนอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นพรุนภายในห้องเก็บข้อมูลจริง โดยขนาดของพื้นยกภายในห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์มีขนาด 33.77m x 16.18m x 0.44m ภายในห้องมี Computer Room Air Conditioner (CRAC) จำนวน 7 เครื่อง โดย 3 เครื่องมีอัตราการไหลโดยปริมาตรเท่ากับ 11,700 m^3/h (ความเร็ว 5.129 m/s) และอีก 4 เครื่องที่เหลือมีอัตราการไหลโดยปริมาตรเท่ากับ 9,100 m^3/h (ความเร็ว 3.98 m/s) จำนวนแผ่นพรุนที่ใช้มีทั้งหมด 78 แผ่น แต่แผ่นละมีขนาด 0.61m x 0.61m เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เปิดของแผ่นพรุนอยู่ที่ 25 โดยมีการจัดวางแผ่นพรุนดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการวางของแผ่นพรุน

ส่วนการวัดได้ทำการวัดที่ตำแหน่งตามที่กำหนดดังรูปที่ 2 โดยได้ทำการวัดปริมาตรการไหลที่ไหลผ่านแผ่นพรุนที่ทางออกของแผ่นพรุน

ผลที่ได้จากการวัดได้นำมาใช้ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD โดยทำการเปรียบเทียบค่าปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นพรุน ของอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆ เพื่อมาประเมินหาค่าความคลาดเคลื่อน

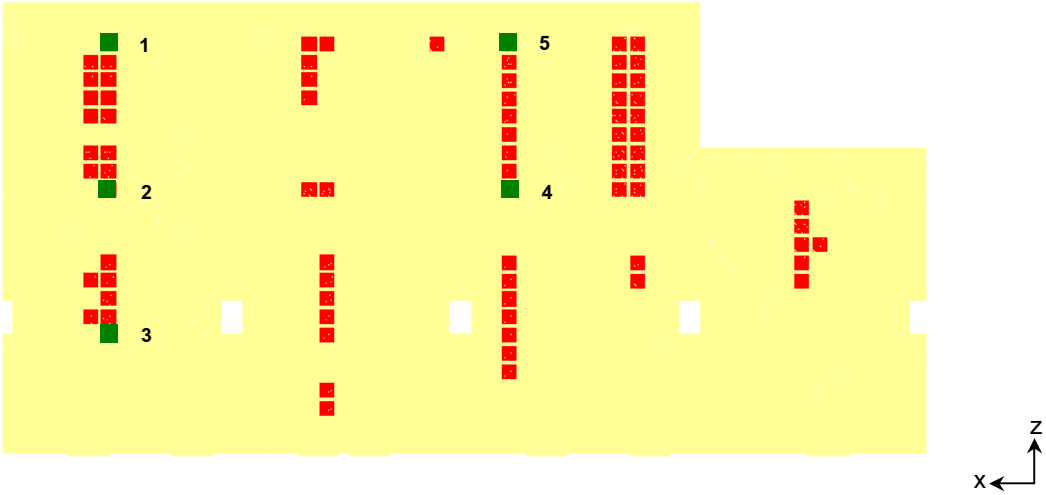
5. ผลและวิจารณ์

รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการวัดจริงและผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม CFD และจากรูปที่ 4 พบว่าค่าปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นพรุนที่ได้จากวัดและจากการวิเคราะห์ทาง CFD มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน ณ จุดต่างๆ โดยจุดที่ 1(9.1%) 2(8.2%), 3(3.0%), 4(7.1%), และ 5(14.00%) ซึ่งจากการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยทำนายปรากฏการณ์ของการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับระบบปรับอากาศแบบพื้นยก

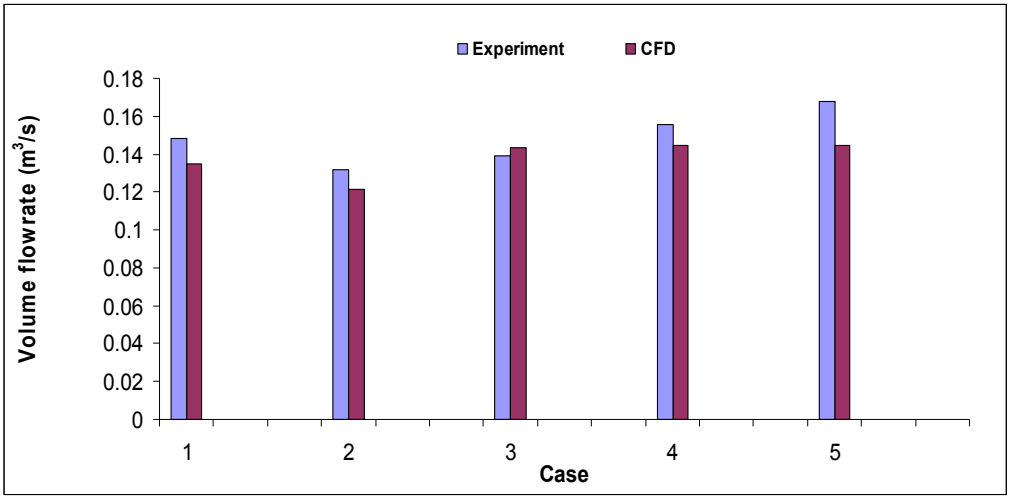
ภายใต้ห้องเก็บข้อมูล (Data Center) ขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ผลจากการใช้โปรแกรม CFD วิเคราะห์และจำลองลักษณะการไหลของอากาศเย็นใต้พื้นยกในห้องเก็บข้อมูล พบว่าการไหลของอากาศที่ทางเข้าของหมายเลข 1 และ 6 ลำอากาศเกิดการไหลเอียงเนื่องมาจากเกิดจากการไหลวนที่บริเวณมุมของห้องดังแสดงในรูปที่ 5 และจากการไหลวนนี้จะทำให้เกิดความดันต่ำในบริเวณนั้นดังแสดงในรูป 6 ซึ่งจากการที่อากาศเย็นมีค่าความดันที่ต่ำในบริเวณนั้น ส่งผลให้อากาศไม่สามารถไหลผ่านแผ่นพรุนขึ้นมาสู่ด้านบนของพื้นยกได้ ทำให้ปริมาณลมในบริเวณนั้นไม่เพียงพอในการระบายความร้อนให้กับคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณนั้น เกิดเป็นจุด hot spot ซึ่งอาจทำให้คอมพิวเตอร์เกิดความเสียหายได้

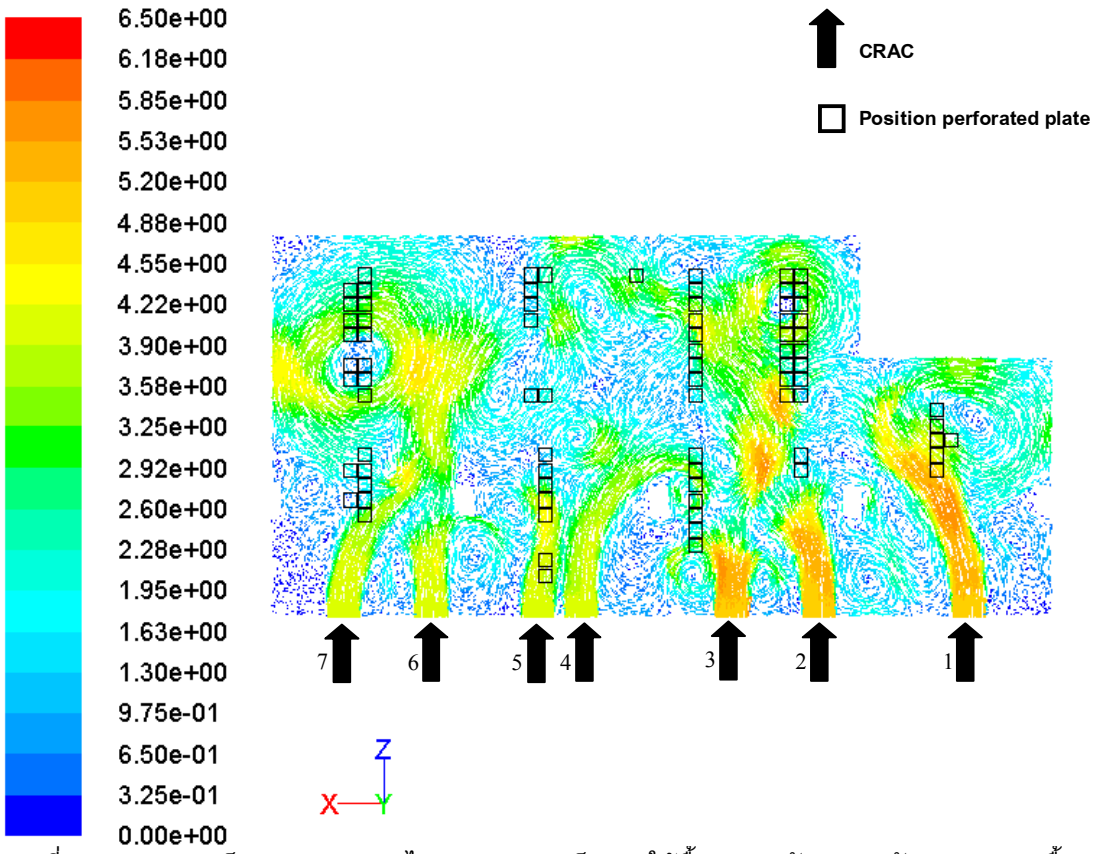
ในรูปที่ 7 แสดงการกระจายตัวความดันสถิต (Pa) ของแบบจำลองใต้พื้นยกในแนวระนาบแกน x โดยในรูป A ที่ระยะ x = 4.25 m ซึ่งในรูปนี้ได้ตัดผ่านบริเวณที่มีการเกิดการไหลวนจึงทำให้มีความดันสถิตต่ำ ส่วนในรูป B ที่ระยะ x = 7.5 m เป็นการแสดงการไหลใต้พื้นยกแบบที่ไม่เกิดการไหลวน บริเวณที่ใกล้กับ CRAC มีค่าความดันสถิตต่ำ เนื่องจากบริเวณนี้มีความเร็วสูงแล้วความดันสถิตจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะห่างของ CRAC รูปที่ 8 การแสดงตำแหน่งแผ่นพรุนทุกแผ่นในแต่ละโซนและปริมาณลมที่ไหลออกจากแผ่นพรุนแต่ละแผ่นแต่ละโซน ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าโซนที่ 1 บริเวณแผ่นที่ 21-24 และโซนที่ 4 บริเวณแผ่นพรุนที่ 12-14 เป็นบริเวณที่เกิดการไหลวนของอากาศเย็นใต้พื้นยก เกิดเป็นบริเวณที่มีความดันต่ำ ปริมาณลมเย็นที่ผ่านแผ่นพรุนบริเวณนี้มีค่าต่ำ จึงเป็นบริเวณที่อาจเกิดจุดร้อน (hot spot) ได้ หากมีการติดตั้งคอมพิวเตอร์ในบริเวณนี้เป็นจำนวนมากอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ สำหรับการที่จะปริมาณลมที่ไหลผ่านแผ่นพรุนโดยการเพิ่มปริมาตรการไหลที่ทางเข้าให้มีค่ามากขึ้น ในขณะที่บริเวณโซนที่ 2 และโซนที่ 3 มีการกระจายลมเย็นจากแผ่นพรุนในบริเวณนี้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอดังนั้นจึงควรติดตั้งคอมพิวเตอร์ในบริเวณนี้เพราะลมเย็นจะช่วยระบายความร้อนจากคอมพิวเตอร์ได้ดี



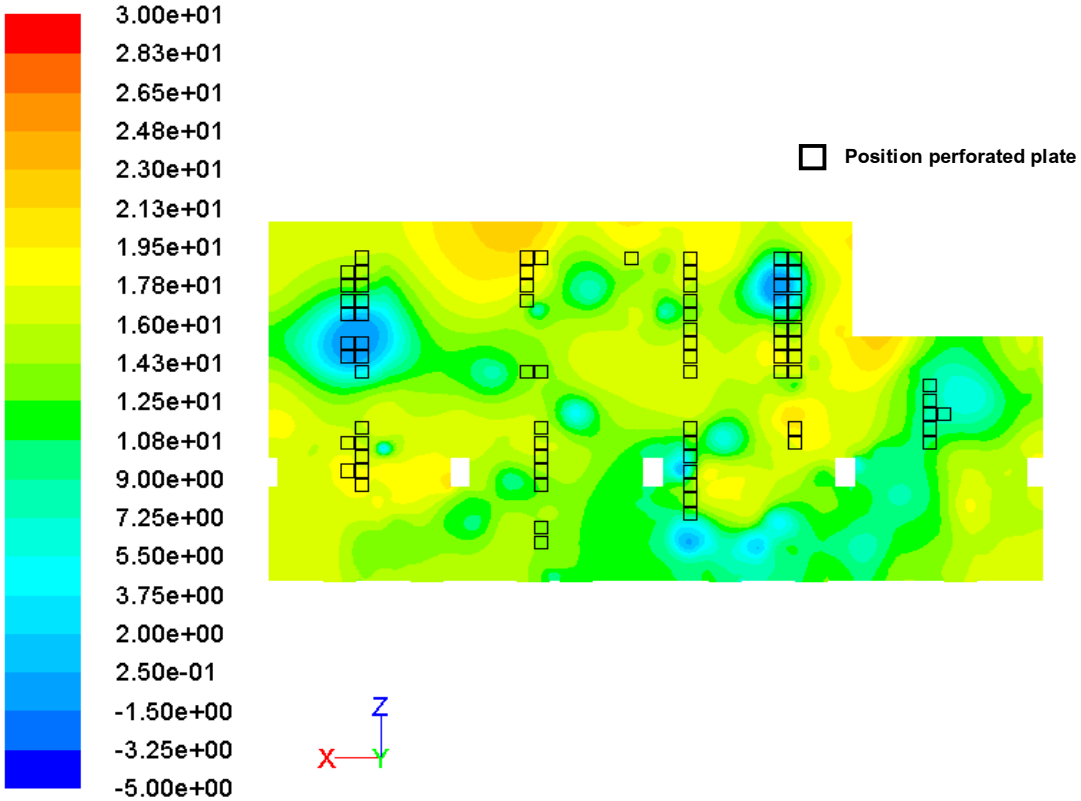
รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วที่ไหลผ่านแผ่นพรุนเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ



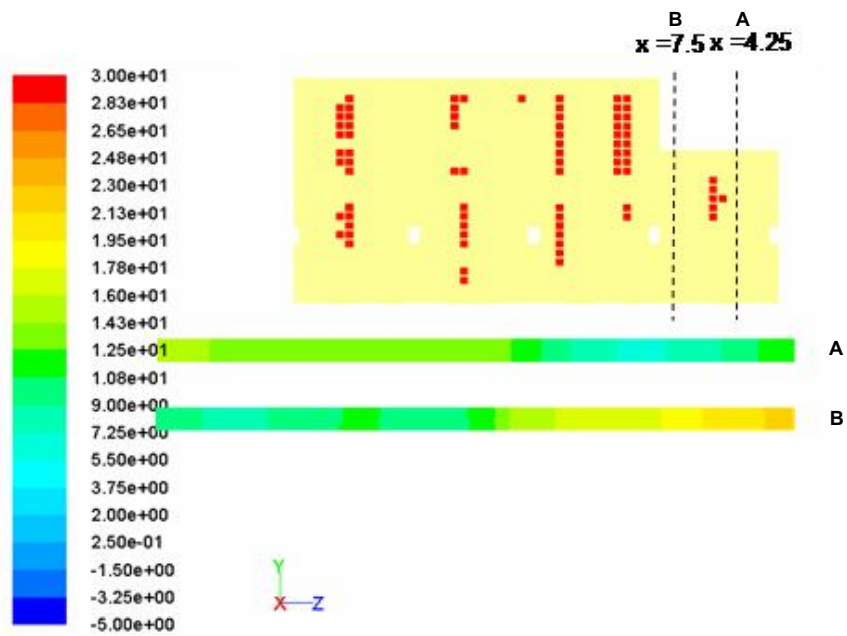
รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาตรการไหลที่ไหลผ่านแผ่นพรุน



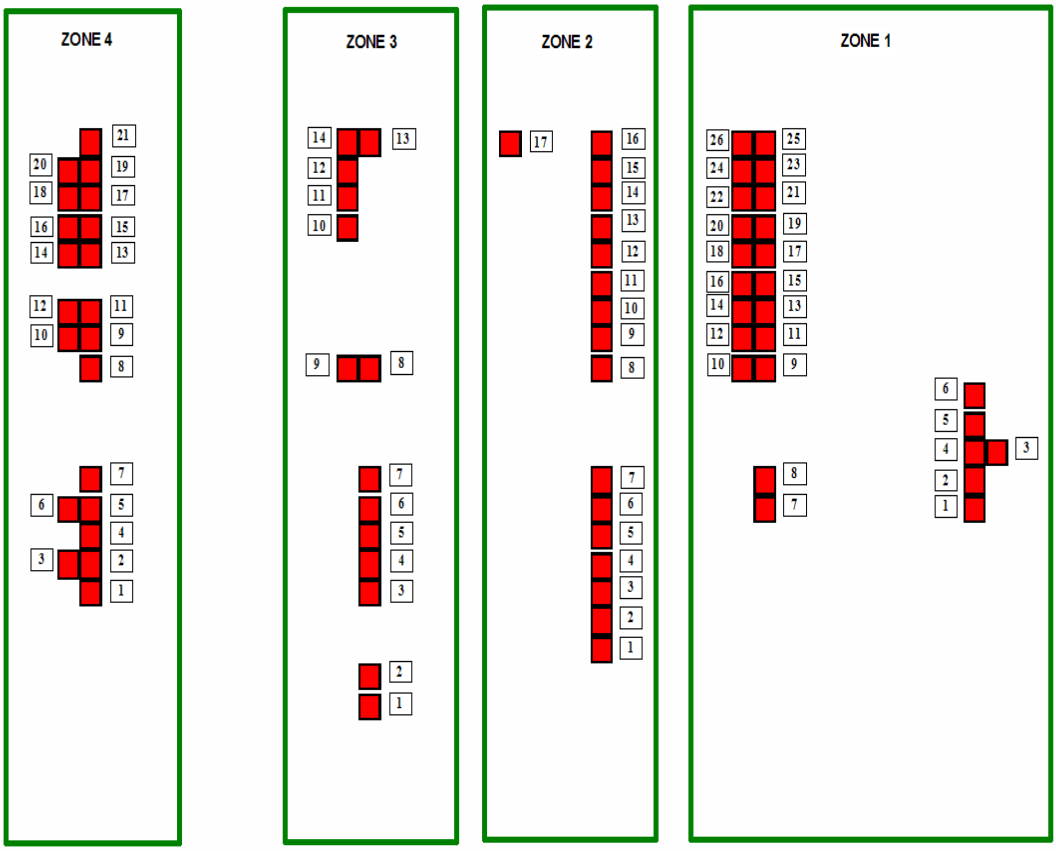
รูปที่ 5 แสดงความเร็ว (m/s) ของการไหลของอากาศเย็นภายใต้พื้นยกสำหรับระบบปรับอากาศแบบพื้นยกภายใต้ห้องเก็บข้อมูล (Data Center) ขนาดใหญ่ในแนวระนาบแกน y (y = 0.2m)

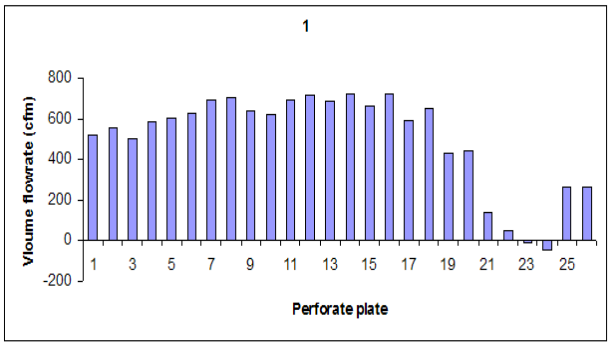


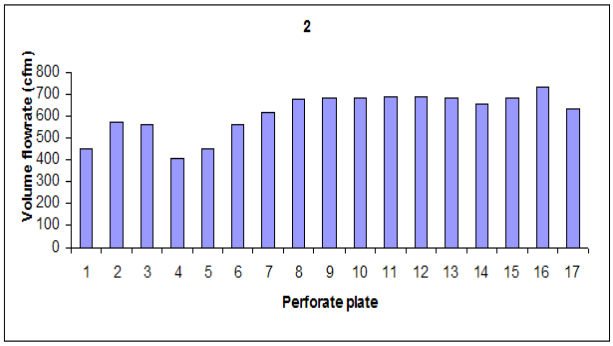
รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวความดันสถิต (Pa) ของแบบจำลองใต้พื้นยกในแนวระนาบแกน y (y = 0.2m)

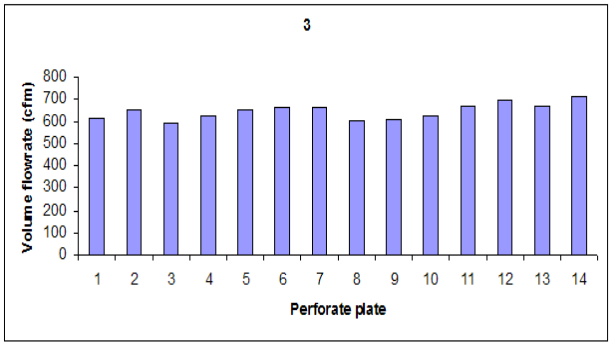


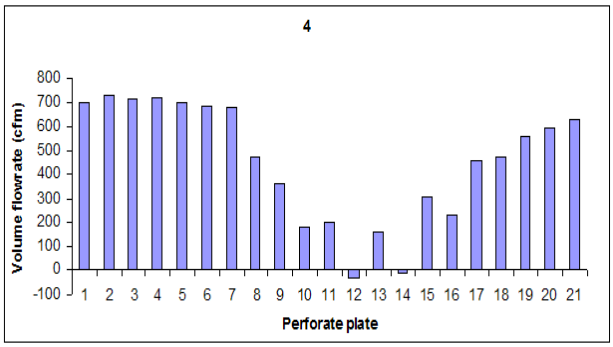
รูปที่ 7 แสดงการกระจายตัวความดันสถิต (Pa) ของแบบจำลองใต้พื้นยกในแนวระนาบแกน x , A ที่ x = 4.25 m และ B ที่ x = 7.5 m











รูปที่ 8 แสดงค่าปริมาตรการไหลที่ไหลผ่านแผ่นพรุน (CFM) ในแต่ละแผ่นในแต่ละโซน

6.สรุป

โปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถนำมาใช้ในการทำนายการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนภายใต้พื้นยกภายในห้องเก็บข้อมูลคอมพิวเตอร์ โดยมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 14 %

จากผลการศึกษาพบว่าไม่ควรติดตั้งคอมพิวเตอร์จำนวนมากในบริเวณโซนที่ 1 และ 4 เพราะอาจเกิดจุด hot spot คอมพิวเตอร์ไม่สามารถระบายความร้อนได้ทัน จึงอาจเกิดความเสียหายได้ ในขณะที่โซนที่ 2 และ 3 เกิดการไหลของอากาศเย็นผ่านแผ่นพรุนสู่ด้านบนของพื้นยกได้ดี มีการกระจายตัวของปริมาณลมที่สม่ำเสมอและใกล้เคียงกัน หากมีการติดตั้งคอมพิวเตอร์บริเวณนี้จะทำให้คอมพิวเตอร์สามารถระบายความร้อนได้ทัน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณภูวนาถ ฮุนตระกูลจากบริษัท DATA CENTER CONSULTANT และคุณอิสสรา กรรณิกา จากบริษัท SITEM ที่อำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานในการทดลองในสถานที่การทำงานจริงของห้องเก็บข้อมูลทางคอมพิวเตอร์และให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างของแผ่นพรุนและข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้อง

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Kailash C, Karki, Amir Radmehr, and Suhas V. Patankar,2003. Use of Computational Fluid Dynamics for Calculating Flow Rates Through Perforated Tiles in Raised-Floor Data Centers, International Journal of Heating, Ventilation, Air-Conditioning, and Refrigeration Research, Volume 9, Number 2, April 2003, pp. 153-166.

[2] Idelchik, I.E., 1994, TileFlow: A Simulation Tool for Airflow Distribution in Raised-Floor data Centers ,Handbook of Hydraulic Resistance,CRC Press, Florida. Innovative Research, Inc., 2001,