



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประยุกต์ใช้ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานเพื่อการอนุรักษ์พลังงานใน  
ศูนย์ข้อมูล

Application of the Combined Air-Conditioning Systems for Energy Conservation in  
Data Center

นามผู้วิจัย นางสาวเจษฎาภรณ์ ปรียคำกล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์สมาน เจริญกิจพูลผล, M.Eng. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานเพื่อการอนุรักษ์พลังงานภายในศูนย์ข้อมูล

Application of the Combined Air-Conditioning Systems for Energy Conservation in Data Center

โดย

นางสาวเจษฎาภรณ์ ปรียคำกล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เลขานุการณั์ ปริญคำกล 2555: การประยุกต์ใช้ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานเพื่อการ  
อนุรักษ์พลังงานภายในศูนย์ข้อมูล ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 76 หน้า

ในปัจจุบันตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์(ตู้ rack) ภายในศูนย์ข้อมูลมีแนวโน้มการใช้พลังงาน  
ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ขณะทำงานตู้เซิร์ฟเวอร์มีการระบายความร้อนออกมาปริมาณมาก  
ด้วยเหตุนี้การปรับอากาศแบบพื้นยก ซึ่งเป็นระบบปรับอากาศที่ใช้ภายในศูนย์ข้อมูล จึงเป็นสิ่ง  
สำคัญในการทำให้ระบบคอมพิวเตอร์ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่องยาวนาน ดังนั้น  
การออกแบบระบบปรับอากาศจึงต้องออกแบบให้เหมาะสมกับการระบายความร้อนของตู้  
เซิร์ฟเวอร์ เพื่อที่จะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความร้อน  
สะสมมากผิดปกติ นอกจากระบบปรับอากาศแบบพื้นยกที่นิยมใช้ภายในศูนย์ข้อมูลแล้ว ระบบปรับ  
อากาศแบบตู้ปรับอากาศ(In-row) ซึ่งเป็นระบบปรับอากาศแบบใหม่ได้ถูกนำมาพิจารณาในงาน  
งานวิจัยนี้ด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสานสำหรับช่วย  
ผู้ออกแบบให้สามารถออกแบบระบบปรับอากาศได้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่สุด

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ(CFD) มาจำลอง  
ลักษณะการไหลของอากาศเย็นภายในศูนย์ข้อมูล โดยทำการสร้างแบบจำลองของศูนย์ข้อมูลทาง  
คอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาสอบเทียบ(Validation) กับผลการวัดค่าในศูนย์ข้อมูลจริง แล้วจึงออกแบบ  
ระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน โดยได้หาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติระหว่างค่า  
Supply Heat Index (SHI), ปริมาณความร้อนที่ถูกระบายออกจากตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์(Heat  
load)และปริมาณลมเย็นที่ถูกส่งออกจากแผ่นพอรุน โดยจะพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศที่ด้านหน้า  
ตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์(Rack inlet temperature) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของอากาศตามมาตรฐาน  
ของ ASHRAE ซึ่งสมการที่ได้จากการศึกษานี้ จะสามารถช่วยผู้ออกแบบ ให้ออกแบบระบบปรับ  
อากาศแบบผสมผสานภายในศูนย์ข้อมูล ได้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมมากที่สุด

ลายมือชื่อนิติศิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Jetsadaporn Priyadumkol 2012: Application of the Combined Air-Conditioning Systems for Energy Conservation in Data Center. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 76 pages.

The power trend of using server systems in data centers is continuously increasing. As a result, the server racks remove a dissipation of heat. For this reason, a raised floor air conditioning system is used in data center cooling systems. This cooling system is important to keep the computer system operating to be effective and long lasting. Thus the proper design air conditioning system in data center is concerned in order to avoid disruption that caused by overheat. Today it is not only a raised-floor cooling system that has been used in data center but also a new cooling system called “In-row” has been introduced into the market. This research presents a simulation of cool air flow generated by these 2 different air conditioning systems in data center for giving some appropriate guidelines to help the designer to achieve a better and more efficient cooling system.

Commercial Computational Fluid Dynamics program (CFD) was used to analyze the airflow for data center cooling system. Measurements of air velocity and temperature were carried out in the data center to validate the simulation results. Afterward, the simulation of airflow in the data center using combination of raised floor and In-row air conditioning systems was simulated. As a result, dimensionless parameters in the form of supply heat index (SHI), heat load of server racks and the volume flow rate from perforated tile were carried out by considering the rack inlet temperature compare with the standard air temperature of ASHRAE. It shows that these parameters provide an effective tool to the improvement of energy efficiency in the raised floor data center.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและวางแผนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอขอบคุณเพื่อน และพี่ ทุกท่าน ที่ได้มีส่วนในการให้คำแนะนำ ให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท SITEM ที่อำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานในการทดลองและให้ข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องภายในศูนย์ข้อมูล

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่เป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และ น้องสาว ที่ได้แนะนำและให้กำลังใจในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วยดีเสมอมา

เจษฎาภรณ์ ปริญคำกล

สิงหาคม 2555

## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	17
อุปกรณ์	17
วิธีการ	18
ผลและวิจารณ์	32
สรุปและข้อเสนอแนะ	57
สรุป	57
ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	59
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	62
ภาคผนวก ข ตารางผลการปรับอากาศที่ปริมาณความร้อนต่างๆ	67
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	76

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สภาวะอากาศที่แนะนำ	11
2 คุณสมบัติของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุนที่มีเปอร์เซ็นต์เปิดเท่ากับ 25%	25
3 ตารางแสดงสภาวะเงื่อนไขของระบบปรับอากาศแบบพื้นยก	26
4 ตารางแสดงสภาวะเงื่อนไขของระบบปรับอากาศแบบ In-row	28
5 ขนาดการทำความเย็นของตู้ปรับอากาศ (ตู้ In-row)	31
6 แสดงความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุน ที่ทำให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ขนาด 6 kW ทำความเย็นได้ตามมาตรฐานของ ASHRAE	48
<b>ตารางผนวกที่</b>	
ข1 ค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุนและตู้ปรับอากาศที่เหมาะสมกับ ปริมาณความร้อนต่างๆ (กรณีที ระบบปรับอากาศแบบพื้นยกสามารถทำความเย็น ได้อย่างมีประสิทธิภาพ)	68
ข2 ค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุนและตู้ปรับอากาศที่เหมาะสมกับ ปริมาณความร้อนต่างๆ (กรณีที่เป็นระบบปรับอากาศแบบผสมผสานทั้งหมด)	72

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	หลักการทำงานของระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก	3
2	หลักการทำงานของระบบปรับอากาศแบบ In-row	3
3	ผลของความสูงของศูนย์ข้อมูล ส่งผลต่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์	6
4	ภาพถ่ายของสายเคเบิลบริเวณช่องเปิดด้านหลังตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์	7
5	การจัดการแผ่นพรมแบบมาตรฐาน	8
6	การจัดวางแผ่นพรมแบบป้องกัน	8
7	คอนทัวร์ความดันของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์	9
8	การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน	15
9	ปล่องรีคลมเย็นช่วยวัดความเร็วลมของแผ่นพรม	17
10	แผนผังวิธีการวิจัย	18
11	รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ภายในศูนย์ข้อมูลระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก	20
12	ขนาดของปล่องรีคลมเย็น	21
13	แบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ภายในศูนย์ข้อมูลโดยมีขนาดเท่ากับสถานที่ทดลองจริง	22
14	การกำหนดรูปแบบเงื่อนไขขอบเขตของระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก	23
15	รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศแบบ In-row	27
16	การกำหนดรูปแบบขอบเขตของระบบปรับอากาศแบบ In-row	27
17	รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศแบบพ่นยึกเพื่อการปรับปรุง	29
18	รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศแบบ In-row เพื่อการปรับปรุง	30
19	ค่าความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบระหว่างแบบจำลองที่วิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์กับค่าที่เก็บจากการทดสอบในศูนย์ข้อมูลจริง	32

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบพื้นที่ยกที่ความสูง 1 เมตร	33
21	การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบพื้นที่ยกที่ความสูง 1.5 เมตร	34
22	การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบพื้นที่ยกที่ความสูง 2 เมตร	35
23	การกระจายอุณหภูมิของหน้าตัดด้านข้างของผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ในระบบปรับอากาศแบบพื้นที่ยก	36
24	การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบ In-row ที่ความสูง 1 เมตร	37
25	การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบ In-row ที่ความสูง 1.5 เมตร	38
26	การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบ In-row ที่ความสูง 2 เมตร	38
27	การกระจายอุณหภูมิของหน้าตัดด้านข้างของผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ในระบบปรับอากาศแบบ In-row	39
28	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ของ Rack A	40
29	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ของ Rack B	40
30	ผลของอุณหภูมิอากาศด้านหน้าผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Rack inlet temperature) ของระบบปรับอากาศแบบพื้นที่ยกที่ปริมาณความร้อนผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ 6-9 kW	42
31	ผลของอุณหภูมิอากาศด้านหน้าผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Rack inlet temperature) ของระบบปรับอากาศแบบพื้นที่ยกที่ปริมาณความร้อนผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ 10-14 kW	43

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก ระหว่างค่า SHI และ $Re * Pr$ และค่า R-squared ของแผนภูมิ	44
33	ระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ที่ปริมาณความร้อนของผู้เซิร์ฟเวอร์ 6 kW	47
34	ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ระหว่างค่า SHI และ $Re * Pr/\beta$	49
35	ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบแบบพ่นยึก และระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ระหว่างค่า SHI และ $Re * Pr/\beta$	50
36	ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบแบบพ่นยึก และระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน แสดงค่า R-squared บนแผนภูมิ	50
37	ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเวกเตอร์ความเร็ว ที่หน้าตัดด้านข้างของผู้เซิร์ฟเวอร์	52
38	การกระจายอุณหภูมิอากาศของเวกเตอร์ความเร็ว ที่หน้าตัดด้านข้างของผู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ตำแหน่ง A	53
39	การกระจายอุณหภูมิอากาศของเวกเตอร์ความเร็ว ที่หน้าตัดด้านข้างของผู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ตำแหน่ง B	54
40	การกระจายอุณหภูมิอากาศของเวกเตอร์ความเร็ว ที่หน้าตัดด้านข้างของผู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ตำแหน่ง C	55
41	การเกิด cross flow ของอากาศหน้าผู้เซิร์ฟเวอร์ เมื่อใช้การปรับอากาศแบบผสมผสาน	56

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

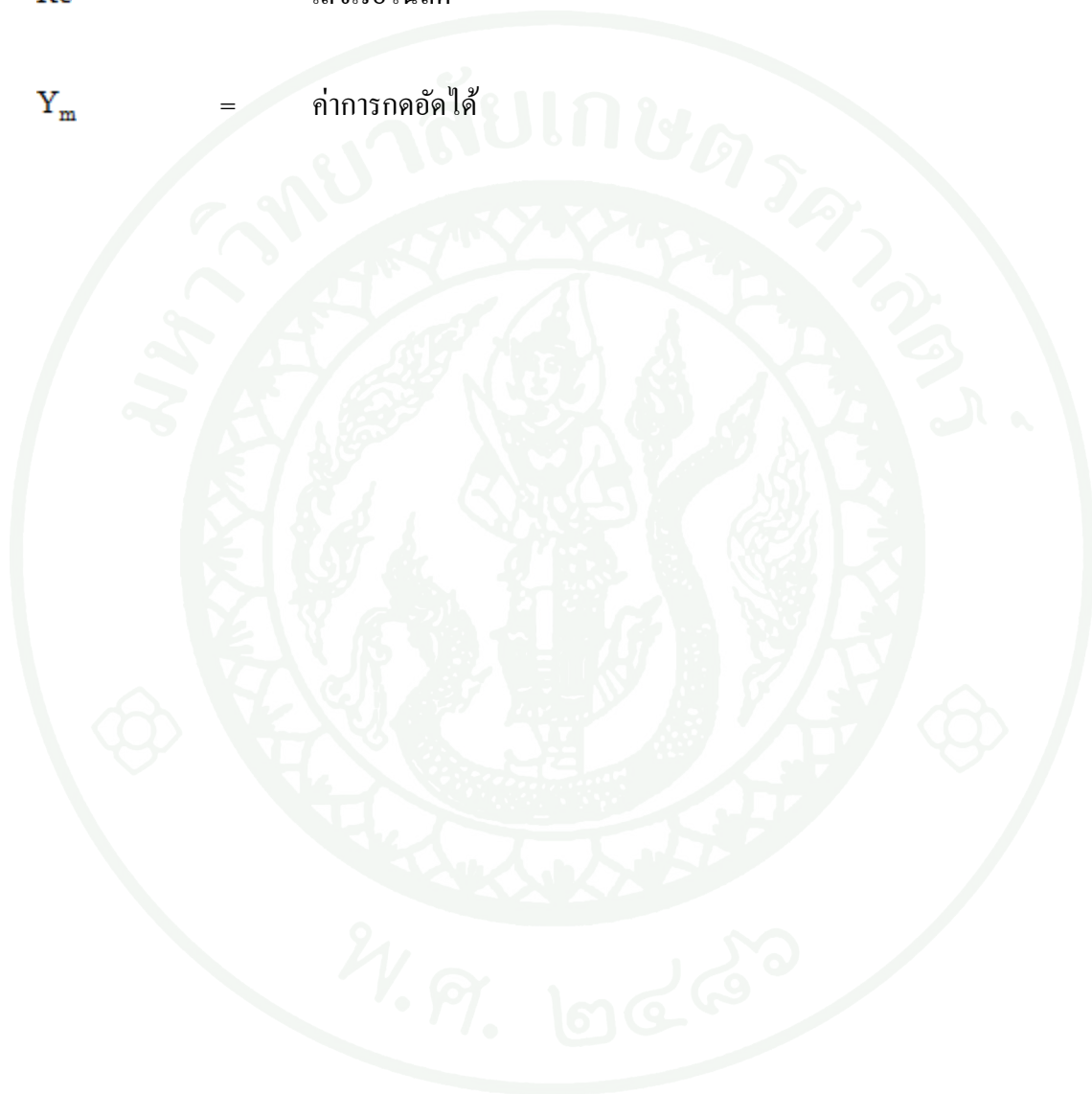
$dx, dy, dz$	=	อนุพันธ์ในแนวแกน X, Y, Z
$D_p$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแผ่นพอรุน
$f$	=	อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่เปิดของแผ่นพอรุน
$f_x, f_y$	=	แรงอื่นๆในแนวแกน
$g$	=	Gravitational acceleration
$G_b$	=	พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว
$G_k$	=	พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย
$k$	=	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
$K$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของอากาศผ่านแผ่นพอรุน
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลของมวลอากาศที่ผ่านตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์
$Pr$	=	เลขพริ้นด์เทิล
$P_{all}$	=	กำลังไฟฟ้ารวมของผู้ปรับอากาศ (In-row) และเครื่องCRAC
$P_{ir}$	=	กำลังไฟฟ้าของผู้ปรับอากาศ In-row
$P_p$	=	กำลังไฟฟ้าของเครื่อง CRAC

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\Delta P$  = ความดันตกคร่อม

Re = เลขเรย์โนลด์

$Y_m$  = ค่าการกอดักได้



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

### Greek symbols

$\varepsilon$  = การกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$  = Inverse effective Prandtl numbers สำหรับ  $k$  และ  $\varepsilon$

$\mu$  = ความหนืดจลน์

$\mu_t$  = ความหนืดจลน์ของความปั่นป่วน

$\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ

$\sigma_k$  = ค่า Prandtl number ของ  $k$

$\sigma_\varepsilon$  = ค่า Prandtl number ของ  $\varepsilon$

### คำย่อ

ASHRAE = American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

CFD = Computational Fluid Dynamics

CRAC = Computer Room Air Conditioning

# การประยุกต์ใช้ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานเพื่อการอนุรักษ์พลังงานภายใน ศูนย์ข้อมูล

## Application of the Combined Air-Conditioning Systems for Energy Conservation in Data Center

### คำนำ

ในปัจจุบันที่โลกกำลังวิตกกังวลเกี่ยวกับวิกฤตการณ์ภาวะโลกร้อน ทำให้เกิดการรณรงค์การใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุดการออกแบบการใช้พลังงานต่างๆให้ดีมีประสิทธิภาพ คุ่มค่ากับการลงทุน จึงเป็นเป้าหมายหลักการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ภายในศูนย์ข้อมูล หรือเรียกว่าห้อง Data Center เป็นพื้นที่ที่ใช้จัดวางระบบประมวลผลกลางและระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ขององค์กร แต่ละปีมีอัตราการขยายตัวอย่างต่อเนื่องตามการเติบโตของเทคโนโลยีสารสนเทศ วัตถุประสงค์หรือหน้าที่หลักของศูนย์ข้อมูล คือ จัดการรักษาประมวลผล และให้บริการข้อมูลที่สำคัญต่อการดำเนินการ โดยกลุ่มธุรกิจที่ให้ความสำคัญ ได้แก่ กลุ่มธนาคาร โทรคมนาคม การศึกษา ผู้ให้บริการด้านอินเทอร์เน็ต ซุปเปอร์สโตร์ และหน่วยงานราชการ โดยภายในศูนย์ข้อมูลจะมีอุปกรณ์เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) , เครื่องประมวลผลขนาดใหญ่ (Main frame) , เครื่องบันทึกข้อมูล (Storage) , อุปกรณ์เครือข่าย (Network switch) , ข่ายสายสัญญาณ (Data cabling system) และอุปกรณ์สื่อสารต่างๆ ซึ่งให้ความร้อนออกมาเป็นจำนวนมาก

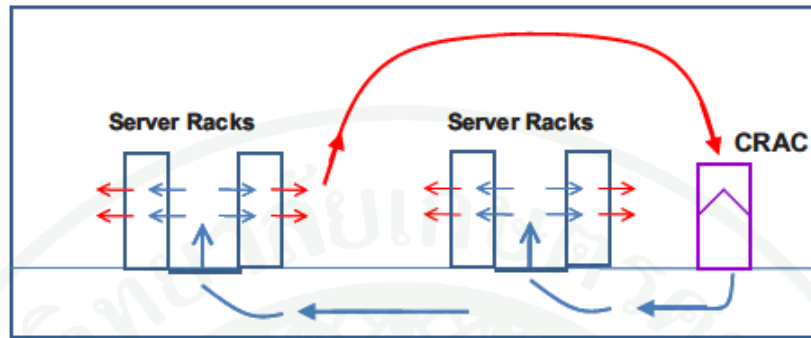
ศูนย์ข้อมูลที่กล่าวมานี้ อาจจะมีขนาด 1 ห้อง, 1 ชั้น หรือทั้งอาคาร อุปกรณ์ภายในมักบรรจุอยู่ในตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (ตู้ rack) ขนาด 19 นิ้ว ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐาน ภายในศูนย์ข้อมูลมีระบบควบคุมอากาศ (Air Conditioning) เพื่อควบคุมทำให้ศูนย์ข้อมูลมีอุณหภูมิที่ต่ำและเหมาะสมกับการทำงานของเซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ โดยส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นระบบปรับอากาศแบบพื้นยก (Raised Floor Conditioning System) คือยกพื้นให้สูงกว่าพื้นจริงเพื่อการหมุนเวียนอากาศและวางระบบสายไฟ โดยพื้นยกนี้จะมีช่องส่งอากาศเย็นผ่านทางแผ่นพอร์น (Perforated tile) เข้ามาภายในห้องเพื่อทำความเย็นให้แก่ตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 1 ทำให้ระบบ

คอมพิวเตอร์แม่ข่ายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ได้อีกด้วย

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบปรับอากาศแบบพื่นยก พบว่าการส่งลมเย็นไปยังด้านบนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์(ตู้ rack) ไม่เพียงพอต่อความต้องการ เนื่องจากลมเย็นที่ถูกส่งจากใต้พื่นยก ซึ่งบางพื้นที่อุปกรณ์คอมพิวเตอร์มีการระบายความร้อนออกมาเป็นจำนวนมาก (High-density zone) ทำให้ลมเย็นไม่สามารถระบายความร้อนบริเวณส่วนบนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ได้ จึงได้แก้ปัญหาโดยเพิ่มโหลดความเย็นให้มากขึ้นไว้ก่อน ทำให้ไม่สามารถประหยัดพลังงานได้ นอกจากนี้ในศูนย์ข้อมูลบางแห่งได้แก้ปัญหาบริเวณพื้นที่ที่มีการระบายความร้อนออกมาเป็นจำนวนมาก (High-density zone) ผู้ออกแบบจะใช้เครื่องปรับอากาศที่มีขนาดใกล้เคียงกับตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์เรียกว่า In-rowวางแทรกไปในแถวของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์โดยใช้การจ่ายลมเย็นทางด้านข้าง ไปยังตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ทางด้านซ้ายและด้านขวา ที่ระดับบน กลาง และล่าง ดังแสดงในภาพที่ 2 เพื่อเพิ่มปริมาณลมเย็น ที่จะถูกส่งไปยังด้านบนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการเกิดความร้อนสะสมบริเวณด้านบนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาจำลองลักษณะการไหลของอากาศเย็นภายในศูนย์ข้อมูล โดยทำการวิเคราะห์อุณหภูมิหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ของระบบปรับอากาศแบบพื่นยก ระบบปรับอากาศแบบ In-row และระบบปรับอากาศแบบผสม (ระบบปรับอากาศแบบพื่นยกที่นำ In-row มาติดตั้งในแถวของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์) โดยพิจารณาว่า ระบบปรับอากาศแบบใดจะสามารถแก้ปัญหาการทำความเย็นส่วนบนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ภายในศูนย์ข้อมูลได้ดีที่สุด ผลจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ของปริมาณอากาศเย็นที่ถูกจ่ายเข้ามาในศูนย์ข้อมูล ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ และอุณหภูมิของอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ โดยได้ใช้การวิเคราะห์ในรูปของเทอมตัวแปรไร้หน่วย ซึ่งจากความสัมพันธ์ข้างต้นนี้ จะทำให้ช่วยลดขั้นตอนการลองผิดลองถูกถ้าหากต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำความเย็น รวมถึงสามารถประหยัดเวลา และค่าใช้จ่าย ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ จะนำไปสู่องค์ความรู้ที่จะใช้ในการพิจารณาการออกแบบห้องปรับอากาศแบบพื่นยกที่เหมาะสม โดยจัดระเบียบการไหลของอากาศเย็นภายในห้อง ทำให้ไม่เกิดจุดที่มีความร้อนสูงผิดปกติ ระบบคอมพิวเตอร์แม่ข่ายก็จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ยังสามารถนำมาทำนายผลที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนอุปกรณ์เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (การเพิ่มขึ้นของโหลดความ

ร้อน) ในศูนย์ข้อมูล ทำให้ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องเพื่อโหลดความเย็น ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์



ภาพที่ 1 หลักการทำงานของระบบปรับอากาศแบบพินยอก



ภาพที่ 2 หลักการทำงานของระบบปรับอากาศแบบ In-row

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เกี่ยวกับการไหลของอากาศเย็นภายในศูนย์ข้อมูล โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) ให้มีรูปแบบทางกายภาพใกล้เคียงกับสถานที่จริง
2. ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการวัดจริงในศูนย์ข้อมูลกับอุณหภูมิของแบบจำลองระบบปรับอากาศแบบพื้นที่ที่วิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ เพื่อสามารถอ้างอิงได้ว่าการสร้างแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับศูนย์ข้อมูลจริง
3. สร้างแบบจำลองของระบบปรับอากาศแบบ In-row และระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน โดยการใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แล้วเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ในแบบจำลองของระบบปรับอากาศแบบพื้นที่ ระบบปรับอากาศแบบ In-row และระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน โดยพิจารณาว่า ระบบปรับอากาศแบบใดจะสามารถแก้ปัญหาค่าความเย็นส่วนบนของผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ภายในศูนย์ข้อมูลได้ดีที่สุด
4. นำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ในรูปของเทอมตัวแปรไร้มิติ ทำให้ตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพในการทำความเย็น และประหยัดพลังงานมากที่สุด

## การตรวจเอกสาร

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Roger *et al.* (2001) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการไหลของอากาศเย็นใต้พื้นยก ภายในศูนย์ข้อมูล พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตกคร่อมแผ่นพอรุน ( $\Delta P$ ) กับการไหลของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุน เป็นไปตามสมการที่ 1

$$\Delta P = RQ^2 \quad (1)$$

โดยที่  $Q$  คืออัตราการไหลและค่า  $R$  คือ ความต้านทานการไหลซึ่งคำนวณจาก

$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{A^2} \cdot K_{\text{tile}} \quad (2)$$

โดยที่ ค่า  $\rho$  คือค่าความหนาแน่นของอากาศ ที่อุณหภูมิอากาศ  $16^\circ\text{C}$  มีค่าเท่ากับ  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นพอรุนและค่า  $K_{\text{tile}}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของอากาศผ่านแผ่นพอรุน

แทนค่าสมการที่ (2) ใน สมการที่ (1) จะได้สมการที่ 3 คือ

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot K_{\text{tile}} \cdot V^2 \quad (3)$$

โดยค่า  $V$  คือ ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุน

Idelchik (1994) ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของอากาศผ่านแผ่นพอรุน  $K_{\text{tile}}$  ดังแสดงในสมการที่ 4

$$K_{\text{tile}} = \frac{1}{f^2} \left( 1 + 0.5(1-f)^{0.75} \right) + 1.414(1-f)^{0.375} \quad (4)$$

โดยค่า  $f$  คือ อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่เปิดของแผ่นพอรุน

Shrivastava *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศภายใน ศูนย์ข้อมูลขนาดใหญ่ โดยมีจุดประสงค์คือต้องการปรับปรุงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในศูนย์ ข้อมูล เพื่อให้มีอุณหภูมิต่ำเพียงพอสำหรับการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ โดยได้สร้าง แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้วิธีการคำนวณแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าผลของ อุณหภูมิอากาศที่เข้าสู่เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าสอดคล้องกับการวัดค่าจริง

Shrivastava *et al.* (2006) ยังได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของความสูงของเพดานใน ศูนย์ข้อมูล พบว่า ถ้าเพิ่มความสูงจาก 9 ฟุต เป็น 12 ฟุต จะทำให้อุณหภูมิอากาศที่เข้าสู่เซิร์ฟเวอร์ คอมพิวเตอร์มีค่าต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุดที่มีความร้อนสูง (Hot Spot) เพราะว่าเมื่อเพดานสูง อากาศร้อนที่ถูกระบายออกมาจากระบบคอมพิวเตอร์จะลอยสูงขึ้นทำให้ไม่เกิดการหมุนวนกลับเข้า มายังด้านหน้าของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3

Rack	9ft	12ft	17ft	22ft
L1	34.4	28.1	27.9	28.0
L7	41.4	34.4	27.1	27.9
L8	43.3	31.3	26.8	27.3
R4	39.3	32.3	27.1	26.3
L14	15.5	19.6	20.6	21.5
R18	26.0	25.5	25.1	23.6
L21	20.0	19.2	22.3	22.9
R26	25.1	25.0	25.5	25.5
L32	20.7	20.7	20.8	22.7
R32	26.4	28.2	27.1	26.3
L40	19.4	16.7	17.3	15.3
R50	25.0	24.5	23.0	22.3
R51	21.5	22.9	21.0	23.3
R57	27.5	25.9	21.6	23.8
L55	26.0	26.0	24.7	23.9
R73	25.6	26.9	25.1	24.4

ภาพที่ 3 ผลของความสูงของศูนย์ข้อมูล ส่งผลต่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่เซิร์ฟเวอร์ คอมพิวเตอร์

ที่มา: Shrivastava *et al.* (2006)

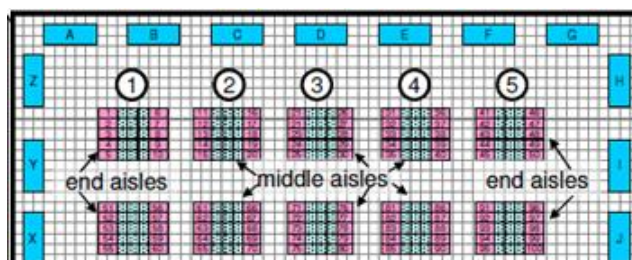
Hamann *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการรั่วของอากาศเย็นภายในศูนย์ข้อมูล ซึ่งโดยปกติแล้วอากาศเย็นจะถูกส่งจากแผ่นพรุน(Perforated tile) ทั้งหมดแต่เนื่องจากระบบแม่ข่ายคอมพิวเตอร์ต้องมีสายไฟต่อเชื่อมกันเป็นจำนวนมาก ทำให้จำเป็นต้องมีช่องเปิดที่พื้นยก(Raised floor) เพื่อให้สายไฟสามารถต่อเชื่อมกันได้ ทำให้เกิดปัญหาเนื่องจากการออกแบบการวางตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ จะหันด้านหน้าของตู้เข้าหากัน โดยพื้นที่ส่วนนี้คือทางเดินของอากาศเย็น (Cold aisle) เป็นบริเวณที่แผ่นพรุน(Perforated tile) ส่งลมเย็นออกมา ส่วนด้านหลังของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์เป็นทางเดินของอากาศร้อน(Hot aisle) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีช่องเปิด อันเนื่องมาจากการต่อสายเคเบิลต่างๆ ทำให้อากาศเย็นแทนที่จะออกที่แผ่นพรุนอย่างเดียว บางส่วนจึงรั่วออกมาทางช่องเปิดนี้ด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายของสายเคเบิลบริเวณช่องเปิดด้านหลังตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์

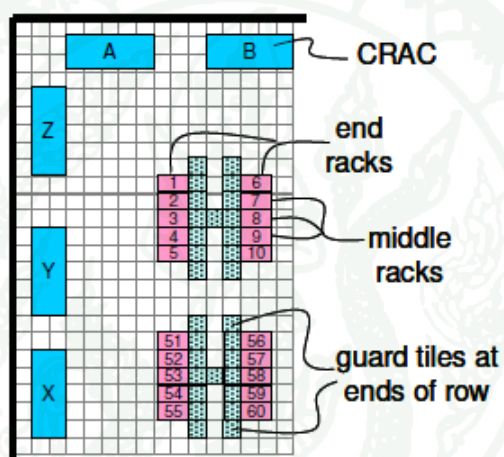
ที่มา: Hamann *et al.* (2008)

Hamann *et al.* (2008) จึงได้ทำการเปรียบเทียบการรั่วของอากาศเย็นกับการจัดวางแผ่นพรุน โดยทำการจัดวางแผ่นพรุนเป็น 2 แบบ คือการจัดวางแผ่นพรุนแบบมาตรฐาน (Standard tile arrangement) ดังแสดงในภาพที่ 5 และการจัดวางแผ่นพรุนแบบป้องกัน (Guard tile arrangement) ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าการจัดวางแผ่นพรุนแบบป้องกันช่วยให้อุณหภูมิของอากาศเย็นที่เข้าสู่ตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์มีอุณหภูมิต่ำกว่าการจัดวางแผ่นพรุนแบบมาตรฐาน เนื่องจากอากาศร้อนที่บริเวณทางเดินอากาศร้อนจะย้อนกลับไปยังด้านหน้าของตู้เซิร์ฟเวอร์โดยอ้อมไปยังตู้เซิร์ฟเวอร์ตู้ริมสุด การจัดวางแบบป้องกันจะช่วยทำให้อากาศร้อนไหลมายังด้านหน้าของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ได้น้อยลง เนื่องจากการจัดวางแบบนี้จะนำแผ่นพรุนวางล้อมออกไปจากตู้เซิร์ฟเวอร์ตู้สุดท้ายหนึ่งแผ่น ซึ่งจะทำหน้าที่บดกมลร้อนไม่ให้เข้าสู่ตู้เซิร์ฟเวอร์



ภาพที่ 5 การจัดการแผ่นพรมแบบมาตรฐาน

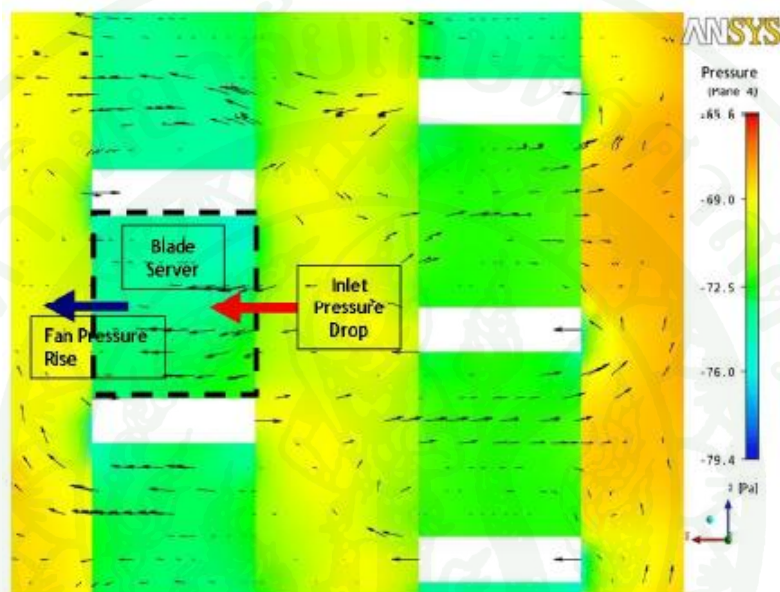
ที่มา: Hamann *et al.* (2008)



ภาพที่ 6 การจัดวางแผ่นพรมแบบป้องกัน

ที่มา: Hamann *et al.* (2008)

Singh *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาพบว่า ในศูนย์ข้อมูลความดันบริเวณภายในตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์จะมีค่าลดลง เนื่องจากอากาศเย็นที่ถูกจ่ายผ่านแผ่นพรุนไปยังด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์จะถูกต้านการไหลจากตะแกรงด้านหน้าของตู้เซิร์ฟเวอร์ ส่วนบริเวณด้านหลังตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์จะมีความดันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากด้านหลังเซิร์ฟเวอร์มีพัดลมระบายความร้อน ส่งผลทำให้สร้างความดันให้กับอากาศที่ผ่านด้วย ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 คอนทัวร์ความดันของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์

ที่มา: Singh *et al.* (2008)

Romadhon *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาโดยใช้วิธีการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อสามารถปรับปรุงการกระจายตัวของอากาศเย็น โดยต้องการลดการเกิดจุดที่มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ(Hot spot) และให้อากาศเย็นปริมาณเพียงพอในการทำมาความเย็นให้แก่ระบบคอมพิวเตอร์ภายในตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) แสดงภาพ 3 มิติ และใช้สมการ Navier-Stokes ควบคู่ไปกับแบบจำลองปั่นป่วน k- $\epsilon$  (Turbulence model) พบว่าการกระจายของอุณหภูมิไม่ดีขึ้น เนื่องจากการรวมกันระหว่าง Overhead distribution กับ Raised floor distribution ไม่เหมาะสมต่อทิศทางกรไหลของอากาศ เพราะว่าอากาศเย็นทั้งสองแหล่งปะทะกัน ส่งผลให้อากาศเย็นถูกแจกจ่ายไปยังบริเวณที่ไม่ได้ต้องการทำความเย็น

Cho *et al.* (2009) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของระบบปรับอากาศในหลายรูปแบบ เพื่อพิสูจน์ว่าผลกระทบของการจ่ายอากาศเย็นที่แตกต่างกันจะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้ต่างกัน โดยแต่ละแบบจะมีการแยกทางเดินของอากาศร้อนและอากาศเย็น (Hot aisle-Cold aisle) อย่างชัดเจน โดยผลที่ได้พบว่า การจ่ายอากาศเย็นแบบพื้นยกเป็นที่นิยมในการวางระบบในศูนย์ข้อมูลแต่จะมีปัญหาอุณหภูมิสูงบริเวณด้านบนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์เนื่องจากเกิดการไหลย้อนของอากาศร้อนไปยังตู้เซิร์ฟเวอร์ทำให้ต้องติดตั้งช่องกั้นอากาศร้อน air barrier panel (blanking panels) ป้องกันการเกิด short-circuiting ในส่วนบนของตู้เซิร์ฟเวอร์ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานมากขึ้น

## มาตรฐานที่ใช้สำหรับระบบเครื่องปรับอากาศ

สมาคมวิศวกรการทำความร้อน, การทำความเย็น และ การปรับอากาศแห่งสหรัฐอเมริกา หรือ ASHRAE ได้กำหนดมาตรฐาน 2 ข้อ สำหรับการทำความเย็นของอุปกรณ์ทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ภายในศูนย์ข้อมูล ซึ่งเป็นการกำหนดเงื่อนไขของอากาศที่จะเข้าไปทำความเย็น

1. อนุญาตให้อุณหภูมิของอากาศที่เข้าไปทำความเย็น ให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 59 – 90 °F(15 – 32 °C) ซึ่งไม่ใช่ช่วงที่จะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะกับการทำงานของอุปกรณ์ช่วงสั้นๆ
2. แนะนำให้อุณหภูมิของอากาศที่เข้าไปทำความเย็น ให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 64 – 81 °F(18 – 27 °C) ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่ทำให้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดระยะเวลาการทำงาน

ตารางที่ 1 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานที่แนะนำให้ใช้ ของเงื่อนไขของอากาศ ที่เข้าไปทำความเย็นให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 1 สภาวะอากาศที่แนะนำ

	2004 Version	2008 Version
Low End Temperature	20°C (68°F)	18°C (64.4°F)
High End Temperature	25°C (77°F)	27°C (80.6°F)
Low End Moisture	40% RH	5.5°C DP (41.9°F)
High End Moisture	50% RH	60% RH & 15°C DP (59°F DP)

### Supply Heat Index

Supply Heat Index (SHI) คือค่าตัวแปรไร้มิติ ใช้สำหรับบอกปริมาณการไหลเวียนของอากาศร้อนที่อยู่ในช่องทางเดินอากาศเย็น (Cold aisle) ภายในศูนย์ข้อมูล

ค่า SHI จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี โดยปกติแล้วจะมีค่า น้อยกว่า 0.4 ซึ่งค่า SHI ที่น้อยจะแสดงถึง การเกิดลมร้อนไหลย้อนกลับมาน้ำตู้เซิร์ฟเวอร์ปริมาณน้อย และแสดงถึงการออกแบบการส่งลมเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่า SHI ของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณได้ จากความสัมพันธ์ของ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าของตู้เซิร์ฟเวอร์ ( $T_{in}^r$ ), อุณหภูมิของอากาศออกจากตู้เซิร์ฟเวอร์ ( $T_{out}^r$ ) และอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ออกจากตู้ CRAC ( $T_{ref}$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5 (Sharma et al, 2002)

$$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} = \frac{T_{in}^r - T_{ref}}{T_{out}^r - T_{ref}} \quad (5)$$

โดยที่  $\delta Q$  คือ ค่าเอนทาลปีที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการรั่วของอากาศในช่องทางเดินอากาศเย็น และ  $Q + \delta Q$  คือ ค่าเอนทาลปีทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นทางด้านหลังของตู้เซิร์ฟเวอร์

### พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ทฤษฎีด้านพลศาสตร์ของไหลสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์การไหลของอากาศภายในศูนย์ข้อมูลได้ แม้ว่าจะยังต้องมีการปรับปรุงเรื่องความแม่นยำอยู่ก็ตาม แต่วิธีการนี้ก็ได้รับการยอมรับและนำไปใช้อ้างอิงเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในส่วนนี้จะอธิบายพื้นฐานความรู้ของการไหล และการแก้ปัญหาด้วยกระบวนการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัย การไหลของอากาศในหลายลักษณะที่เกิดขึ้นภายในศูนย์ข้อมูล

### พลศาสตร์ของไหล

การศึกษาพฤติกรรมของการไหลของของไหลจะจำกัดขอบเขตของการศึกษาด้วยปริมาตรของของไหลเล็กๆ (Control volume: C.V.) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลของของไหลในพิกัดหรือระนาบสามมิติ  $(x,y,z)$  ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum equation)

### สมการอนุรักษ์มวล

สมการอนุรักษ์มวลในรูปสมการอนุพันธ์โดยใช้สัญลักษณ์เวกเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 9

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (6)$$

### สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการที่ 7a และ 7b แสดงถึงสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมของมวลของไหลในทิศแกน x และแกน y

ในทิศแกน x

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} \dots \\ \dots = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \text{div}(\vec{V})) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ u \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned} \quad (7a)$$

ในทิศแกน y

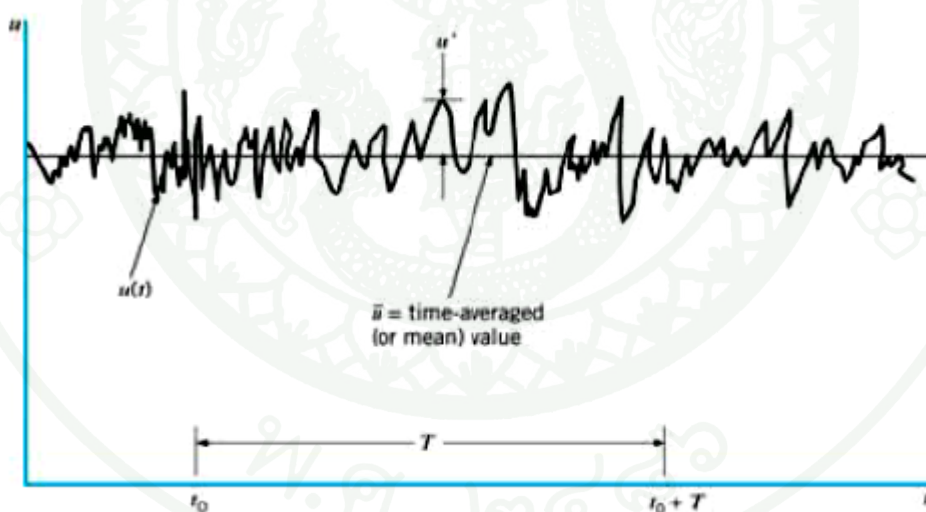
$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} \dots \\ \dots = \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \text{div}(\vec{V})) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ u \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned} \quad (7b)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะเรียกกลุ่มสมการที่เกิดขึ้นจากสมการอนุรักษ์ ว่าระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-stokes equations) ซึ่งเป็นระบบสมการตัวแทนการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นจริง โดยจะเห็นได้ว่าสมการเหล่านี้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนั้นการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรงนั้นเป็นงานที่ยุ่ยากซับซ้อน แต่เราสามารถนำเอาวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) มาช่วยในการหาคำตอบของสมการนี้ได้ ซึ่งเป็นที่มาของ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) และในลำดับต่อไป จะอธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบต่างๆ

## แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

การไหลที่ค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number,  $Re$ ) สูงกว่าค่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต ( $Re_{crit}$ ) สถานะการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการแก้ปัญหการไหลแบบปั่นป่วนทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นเรื่องยาก และใช้เวลาในการคำนวณนาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามจำลองความไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อใช้กับวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเหล่านั้น เราจำเป็นต้องทราบพฤติกรรม และคุณสมบัติพื้นฐานของความปั่นป่วนในการไหลของของไหลและสมการค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์

ความเร็วและคุณสมบัติต่างๆของการไหลแบบปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังภาพที่ 8 โดย  $u(x, y, z, t)$  เป็นคุณสมบัติของของไหล และเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน

ที่มา: Versteeg and Malalasekera (1995)

### แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ Standard $k - \epsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard  $k - \epsilon$  เป็นแบบจำลองกึ่งการทดลอง โดย turbulent viscosity เป็นฟังก์ชันของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (turbulence kinetic energy,  $k$ ) และ อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (dissipation of turbulence kinetic energy,  $\epsilon$ ) โดยมีสมการส่งถ่าย 2 ชุดเป็นสมการของ  $k$  และ  $\epsilon$  (FLUENT User's Guide, 2001) อย่างละชุด

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + G_k \dots$$

$$\dots + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \bar{U}) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \text{grad } \epsilon \right] \dots$$

$$\dots + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (9)$$

โดย  $G_k$  คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย,  $G_b$  คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว (Buoyancy),  $Y_M$  คือค่าการกอดัดได้ ซึ่งมีผลต่อความปั่นป่วนในการไหล,  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  และ  $C_{3\epsilon}$  เป็นค่าคงที่,  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\epsilon$  คือค่า turbulence Prandtl number ของ  $k$  และ  $\epsilon$  ตามลำดับ แบบจำลองของค่า turbulent viscosity,  $\mu_t$  คือ

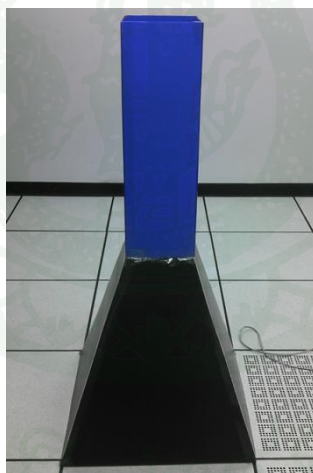
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10)$$

ซึ่ง  $C_\mu$  เป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปค่าคงที่ในสมการการถ่ายเทข้างต้น จะมีค่าเป็น  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\epsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$

## อุปกรณ์และวิธีการ

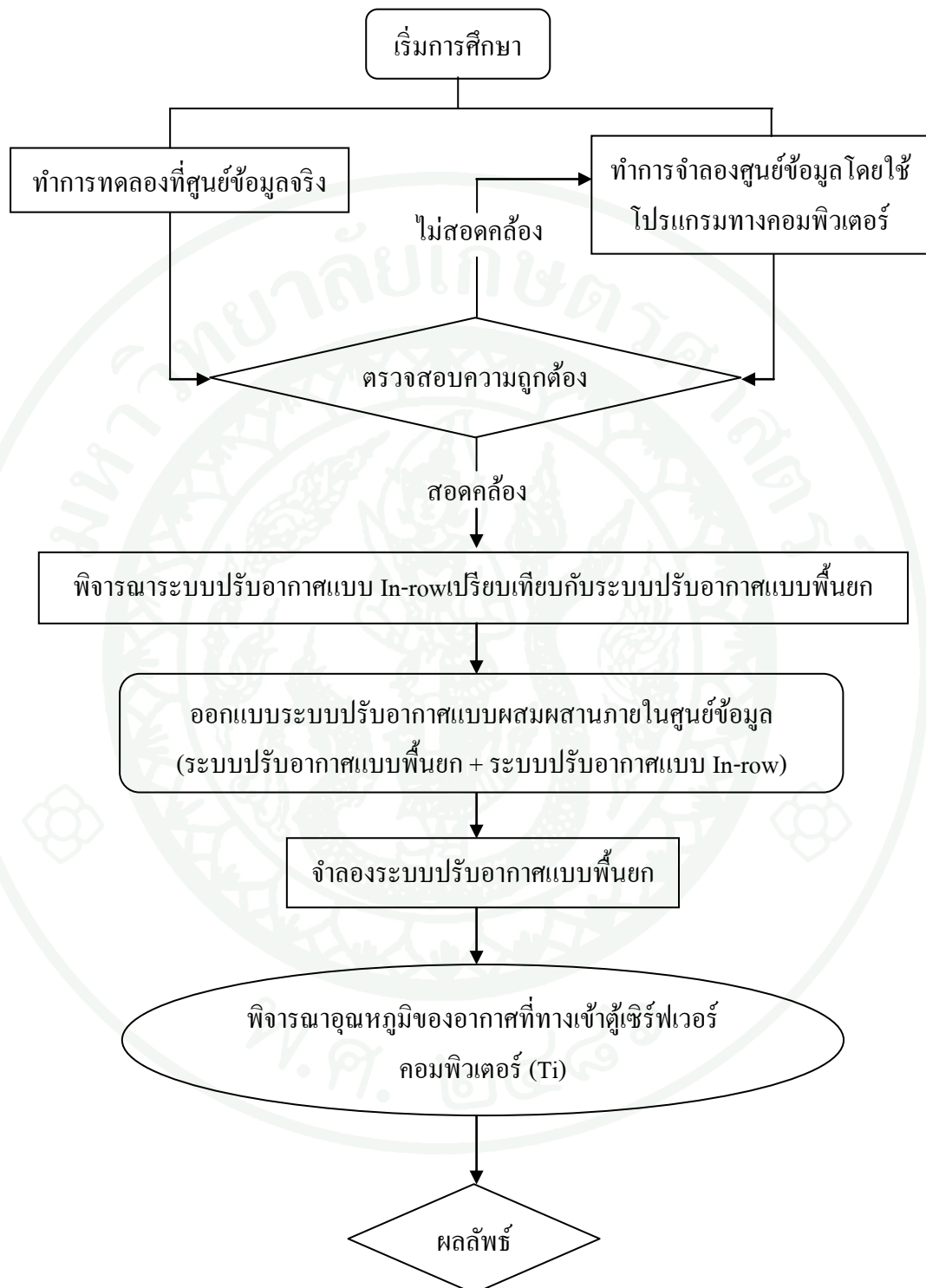
### อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. ศูนย์ข้อมูลที่ใช้งานจริง
3. เครื่องมือวัดความเร็วลมและความดัน แบบ Pitot tube
4. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Thermocouple type K
5. ปล่องรีดลมเย็น สำหรับช่วยในการวัดความเร็วลม ดังแสดงในภาพที่ 9
6. โปรแกรม Ansys (Fluent) และ Gambit
7. ท่อ PVC
8. ตลับเมตร

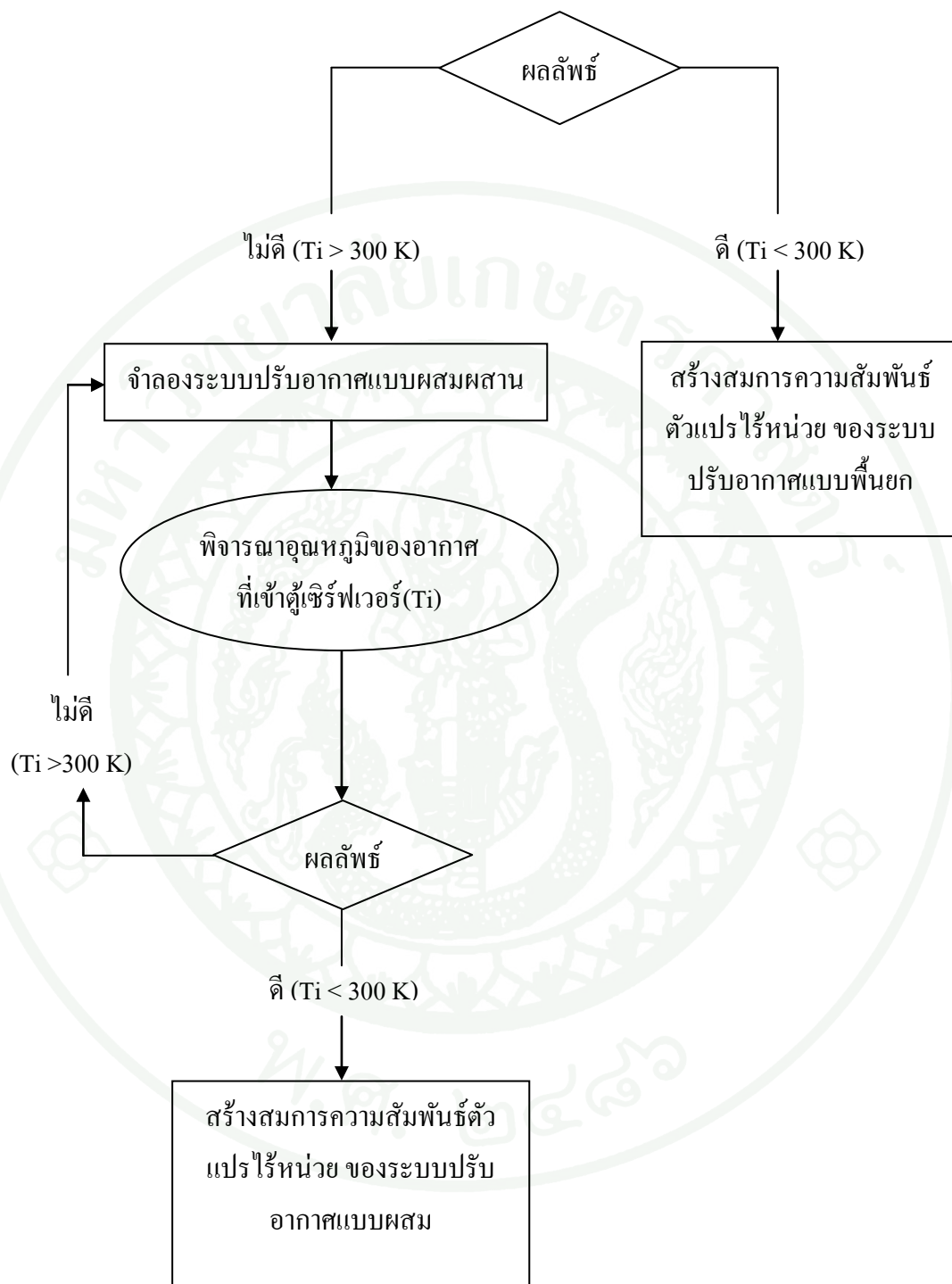


ภาพที่ 9 ปล่องรีดลมเย็น ช่วยวัดความเร็วลมของแผ่นพาราน

### วิธีการ



ภาพที่ 10 แผนผังวิธีการวิจัย



ภาพที่ 10 (ต่อ)

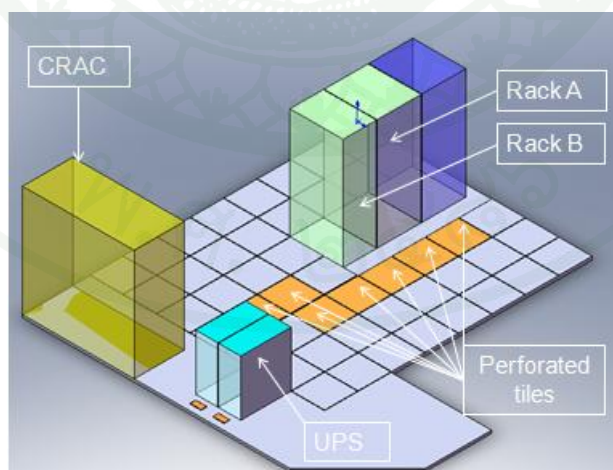
จากภาพที่ 10 แสดงกระบวนการและวิธีวิจัย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มหลักๆ ได้ 3 ส่วน คือ การประเมินความถูกต้องของโปรแกรมที่เลือกมาใช้ การเปรียบเทียบระบบปรับอากาศแบบ In-row และแบบพื้นยก และส่วนสุดท้ายคือ การออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน โดยแต่ละขั้นตอนสามารถแยกอธิบายได้ดังนี้

### การประเมินความถูกต้องของโปรแกรม

ในส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

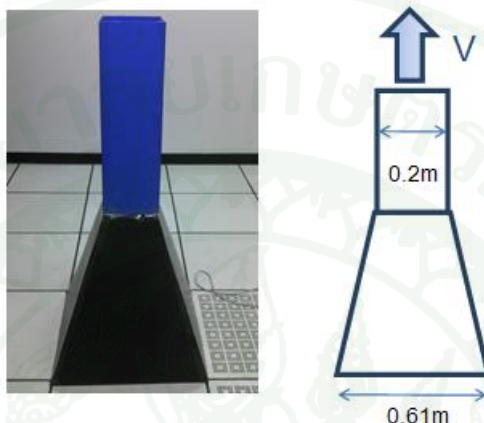
#### 1. การทดลองภายในศูนย์ข้อมูลจริง

ศูนย์ข้อมูลจริงที่ทำการทดสอบเป็นของบริษัท โตโยต้าลิซซิ่ง (ประเทศไทย) ซึ่งศูนย์ข้อมูลแห่งนี้มี การออกแบบระบบปรับอากาศแบบพื้นยก (Raised floor air conditioning system) มีขนาดห้องกว้าง 4.2 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 3.1 เมตร รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ภายในประกอบด้วย CRAC จำนวน 2 เครื่อง โดยแต่ละเครื่องมีขนาด 26 kW, ตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ทั้งหมด 3 เครื่อง แต่ใช้งานจริงเพียง 2 เครื่อง (Rack A และ Rack B) โดยแต่ละเครื่องที่ใช้งานมีขนาด 3 kW, UPS (Uninterruptible Power Supply) ขนาด 15 KVA จำนวน 2 เครื่อง และแผ่นพรมทั้งหมด 7 แผ่น แต่ละแผ่นมีเปอร์เซ็นต์พื้นที่เปิดเท่ากับ 25% ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ภายในศูนย์ข้อมูลระบบปรับอากาศแบบพื้นยก

ผู้วิจัยได้ทำการวัดปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพอรันทั้ง 7 แผ่น โดยใช้ Pitot tube วัดลมเย็นที่บริเวณด้านปลายของปล่องรีดลมเย็น ดังแสดงในภาพที่ 12 และได้วัดอุณหภูมิภายในศูนย์ข้อมูลแห่งนี้ ที่ความสูง 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 156 จุด โดยใช้ Thermocouple Type K เป็นตัววัด



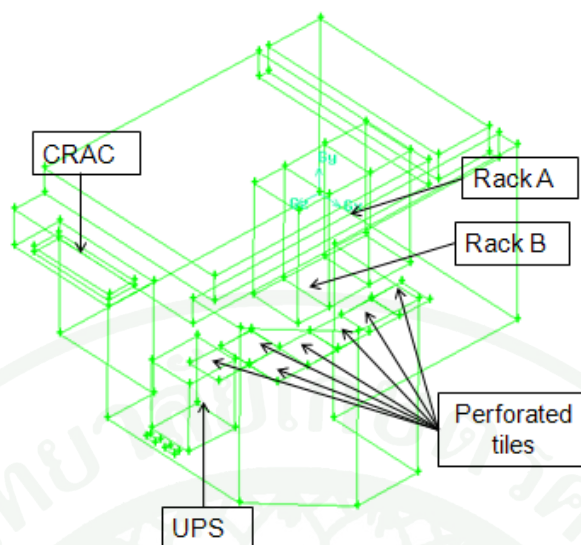
ภาพที่ 12 ขนาดของปล่องรีดลมเย็น

## 2. การศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์การไหลเชิงคำนวณหรือ CFD ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมต่างๆของการปรับอากาศแบบพื้นยกภายในศูนย์ข้อมูล โดยขั้นตอนการเตรียมประมวลผลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ประกอบไปด้วย การสร้างขอบเขต (Domain) การสร้างกริด (Grid Generation) และ การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบและค่าเริ่มต้น ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมา จะทำในโปรแกรม Gambit ส่วนโปรแกรม Ansys (Fluent) จะใช้สำหรับการคำนวณการไหลเชิงคำนวณ เพื่อหาลักษณะการไหล และทำให้ทราบค่าต่างๆภายในศูนย์ข้อมูล ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้

### 2.1 การสร้างขอบเขต

ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของศูนย์ข้อมูล ของบริษัท โตโยต้า ลิสซิ่ง(ประเทศไทย) เป็นแบบสามมิติ โดยมีขนาดตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และได้มีการจัดวางอุปกรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 13



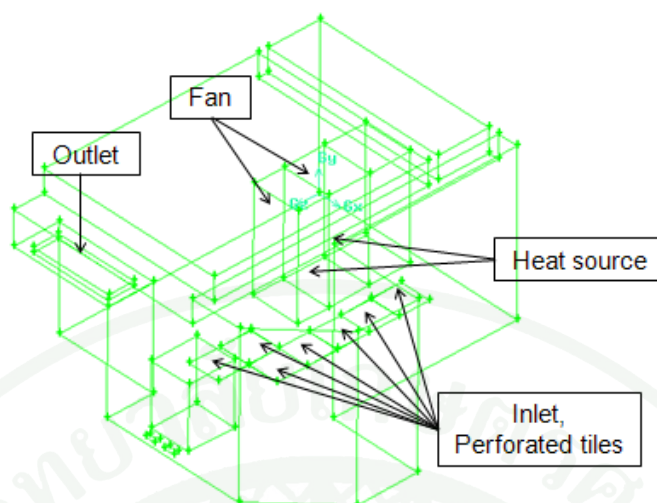
ภาพที่ 13 แบบวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ภายในศูนย์ข้อมูล โดยมีขนาดเท่ากับสถานที่จริง

## 2.2 การสร้างกริด

ได้ทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสามมิติภายในศูนย์ข้อมูล โดยใช้โปรแกรม Gambit รูปแบบการแบ่งเป็นแบบ unstructured tetrahedral ได้จำนวนชิ้นส่วนประกอบ 1,791,750 ชิ้น โดยการสร้างกริดจะเน้นไปที่บริเวณด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Rack) เพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำได้ทำการพิจารณา Grid independence ในกรณีนี้ด้วย

## 2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบและค่าเริ่มต้น

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายในศูนย์ข้อมูล เป็นไปตามที่แสดงในภาพที่ 14 โดยจะนำไปใช้คำนวณการไหลของอากาศ ในโปรแกรม Ansys (Fluent) ต่อไป



ภาพที่ 14 การกำหนดรูปแบบเงื่อนไขขอบเขตของระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก

กำหนดการไหลภายในศูนย์ข้อมูลเป็นแบบปั่นป่วน โดยการไหลที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady flow) เนื่องจากศูนย์ข้อมูลมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ตลอด 24 ชั่วโมง

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศจะใช้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier Stokes equations) และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard  $k-\epsilon$  โดยกำหนดให้อากาศเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)

สร้างแผ่นพอรุนแบบเสมือน เนื่องจากการสร้างแผ่นพอรุนจริงนั้นต้องใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์เป็นอย่างมาก จึงทำการสร้างแผ่นพอรุนแบบเสมือนโดยใช้หลักการความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแผ่นพอรุน (pressure drop) ดังสมการที่ 11

$$\Delta P = \frac{1}{2} * \rho * K_{tile} * V^2 \quad (11)$$

$K_{tile}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของอากาศ ค่า  $K_{tile}$  สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ  $\Delta P$  กับ  $V^2$  ซึ่งได้มาจากเค้ดดาถือคของผู้ผลิตแผ่นพอรุนขนาดพื้นที่เปิดแผ่นพอรุน 25% ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยได้ค่าอัตราส่วนระหว่าง  $\Delta P$  กับ  $V^2$   $\left(\frac{\Delta P}{V^2}\right)$  เท่ากับ 26.31

$$\text{ดังนั้นเมื่อทำการเทียบกับสมการที่ 11 จะได้ } \frac{\Delta P}{V^2} = 26.31 = \frac{1}{2} K_{tile} \rho$$

ถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นอากาศ( $\rho$ ) ที่อุณหภูมิอากาศ  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีค่าเท่ากับ  $1.225\text{ kg/m}^3$  จะได้ค่า  $K_{\text{tile}}$  เท่ากับ 42.92

และเมื่อกำหนด โดยใช้สมการของ Idelchik (1994) ตามสมการที่ 12 พบว่าแผ่นพอรันที่มีเปอร์เซ็นต์พื้นที่เปิดเท่ากับ 25% ได้ค่า  $K_{\text{tile}}$  เท่ากับ 42.75

$$K_{\text{tile}} = \frac{1}{f^2} \left( 1 + 0.5(1-f)^{0.75} \right) + 1.414(1-f)^{0.375} \quad (12)$$

โดยค่า  $f$  คือ อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์พื้นที่เปิดของแผ่นพอรัน จากการหาค่า  $K_{\text{tile}}$  ทั้งสองแบบพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของอากาศที่ผ่านแผ่นพรุนที่มีเปอร์เซ็นต์เปิดเท่ากับ 25 %

Air flow measurement			
Pressure/Airflow		Pressure/Airflow	
Pa	L/s	H2O	CFM
50	495	0.2	1050
45	467	0.18	990
40	446	0.16	944
35	418	0.14	886
30	386	0.12	818
25	352	0.1	746
20	314	0.08	666
15	276	0.06	584
12.5	251	0.05	532
10	225	0.04	476
5	157	0.02	332

ที่มา: Tate Access Floors, Inc.(2007)

สภาวะเงื่อนไขขอบ(Boundary condition) ของแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของศูนย์ข้อมูล กำหนดดังภาพที่ 14 โดยทางเข้า(Inlet) กำหนดให้ค่าความเร็วของอากาศ(Velocity inlet) โดยกำหนดให้ลมไหลเข้ามีความเร็วคงที่, Perforated tile กำหนดให้แผ่นพรุนมีความต้านทานการไหลของอากาศ, ด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ กำหนดเป็น Interior, ด้านหลังตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ กำหนดให้มีการติดตั้งพัดลม (Fan) ซึ่งมีอัตราการไหล 1300-1600 CFM (Choi *et al.* , 2008) และด้านทางออก (Outlet) กำหนดให้เป็น Pressure outlet ตามตารางที่ 3 โดยกำหนดให้ตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง มี Heat source 3 kW

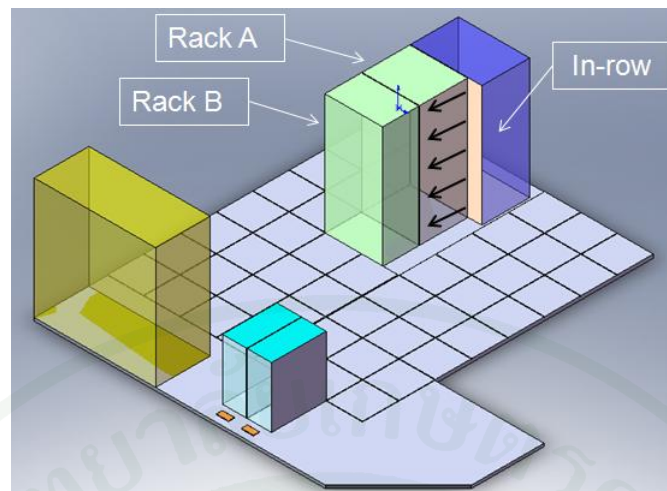
ตารางที่ 3 ตารางแสดงสภาวะเงื่อนไขขอบระบบปรับอากาศแบบพื้นยก

Boundary	Setting
Inlet	Velocity inlet 0.34 m/s temperature 286 K
Outlet	Pressure outlet 0 Pa
Fan	Pressure jump constant
Perforated tile	Setting as porous zone and is calculated using Eq. (1), (2)
Rack inlet	Interior
Other	wall

ผลที่ได้จากการวัดในศูนย์ข้อมูลจริงจะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD โดยจะทำการสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำกับอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่บริเวณความสูง 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร ทั้งหมด 156 ตำแหน่ง เพื่อที่จะอ้างอิงได้ว่ารูปแบบเงื่อนไขต่างๆในแบบจำลอง มีความใกล้เคียงกับศูนย์ข้อมูลจริง

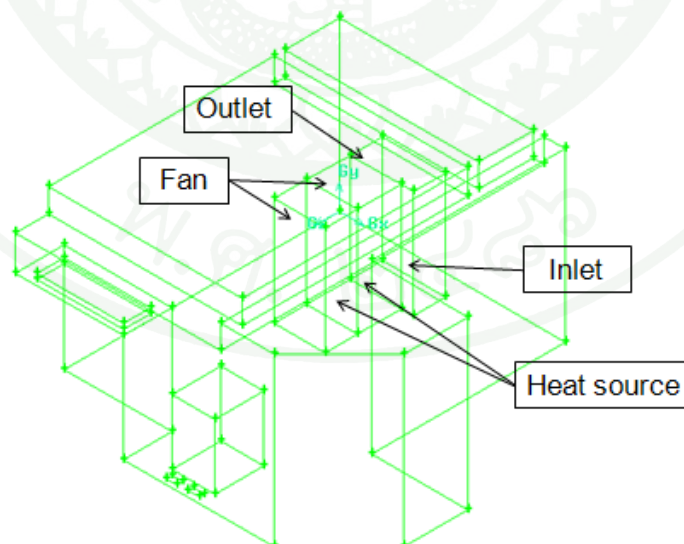
#### การเปรียบเทียบระบบปรับอากาศแบบ In-row และระบบปรับอากาศแบบพื้นยก

ระบบปรับอากาศแบบ In-row เป็นระบบปรับอากาศแบบใหม่ที่ถูกนำมาใช้เสริมในการทำความเย็นภายในศูนย์ข้อมูล เนื่องจากลักษณะภายนอกมีขนาดเท่ากับตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (ตู้ rack) ทำให้ถ้าหากบริเวณใดมีความร้อนสะสมมาก สามารถนำระบบปรับอากาศแบบ In-row ไปแทรกเสริมเพื่อทำความเย็นให้บริเวณนั้นได้ทันที โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบปรับอากาศแบบเดิม (ระบบปรับอากาศแบบพื้นยก) ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการแสดงให้เห็นว่าระบบนี้มีจุดเด่นและการกระจายลมเย็นอย่างไร จึงทำการสร้างแบบจำลองของศูนย์ข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 11 แต่ได้มีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ตัวที่ไม่ได้ใช้งานให้เป็นตู้ปรับอากาศแทน (ตู้ In-row) ซึ่งทำการจ่ายลมเย็นออกมาทางด้านข้างเพื่อปรับอากาศแทนการใช้แผ่นพอรุน ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศแบบ In-row

สภาวะเงื่อนไขขอบ(Boundary condition) ของระบบปรับอากาศแบบ In-row กำหนดดังภาพที่ 16 โดยด้าน Inlet กำหนดให้เป็น Velocity inlet โดยกำหนดให้ลมไหลเข้ามีความเร็วคงที่, ด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ กำหนดเป็น Interior, ด้านหลังตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ กำหนดเป็น Fan มีอัตราการไหล 1300-1600 CFM (Choi *et al.* , 2008) และด้าน Outlet กำหนดให้ด้านหลังตู้ปรับอากาศ (ตู้ In-row) เป็น Pressure outlet ตามตารางที่ 4 โดยกำหนดให้ตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง มี Heat source 3 kW



ภาพที่ 16 การกำหนดรูปแบบขอบเขตของระบบปรับอากาศแบบ In-row

ตารางที่ 4 ตารางแสดงสภาวะเงื่อนไขขอบระบบปรับอากาศ In-row

Boundary	Setting
Inlet	Velocity inlet 1.92 m/s temperature 286 K
Outlet	Pressure outlet 0 Pa
Fan	Pressure jump constant
Rack inlet	Interior
Other	wall

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD ของระบบปรับอากาศแบบ In-row จะทำให้ทราบลักษณะการไหลของอากาศเย็นที่เข้าไปทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างจากระบบปรับอากาศแบบพื้นยกอย่างไร แล้วจึงนำจุดเด่นของทั้งสองระบบมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เพื่อพัฒนาระบบปรับอากาศแบบผสมผสานให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

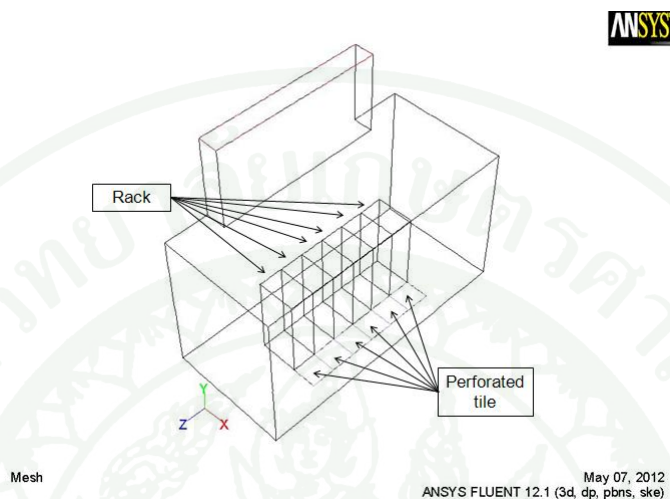
#### การออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน

นำการวิเคราะห์การไหลเชิงคำนวณหรือ CFD มาใช้ในการออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

##### 1. พิจารณาระบบปรับอากาศแบบพื้นยก

เริ่มพิจารณาโดยใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่ถูกระบายออกจากตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Heat load) กับปริมาณลมเย็นที่ถูกส่งจากแผ่นพวุน โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศที่ด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Rack inlet temperature) ตามมาตรฐานของ ASHRAE ซึ่งปริมาณความร้อนที่สนใจอยู่ในช่วงระหว่าง 6-20 kW และปริมาณลมเย็นที่ส่งผ่านแผ่นพวุน ได้นำมาจากมาตรฐานผู้ผลิตแผ่นพวุน ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.436-1.375 m/s ทั้งหมด 11 ค่า คือ 0.436, 0.625, 0.697, 0.767, 0.872, 0.978, 1.072, 1.161, 1.239, 1.297 และ 1.375 m/s โดยความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพวุนทั้ง 11 ค่านี้ คำนวณมาจากตารางที่ 2 (Tate Access Floors, Inc.)

ศูนย์ข้อมูลที่ใช้ศึกษามีขนาด กว้าง 3 เมตร ยาว 6.6 เมตร และสูง 3.6 เมตร (Shrivastaca *et al.*, 2006) ภายในประกอบด้วยตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์จำนวน 6 เครื่อง แผ่นพอรุนจำนวน 6 แผ่น ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศแบบพ่นยวเพื่อการปรับปรุง

การคำนวณแบบจำลองนี้ได้ใช้โปรแกรม CFD โดยเริ่มจาก

- 1.1 เลือกปริมาณความร้อนค่าที่ต่ำที่สุดที่ต้องการพิจารณา
- 1.2 เปลี่ยนค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุน เริ่มจากค่าที่น้อยที่สุด
- 1.3 พิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ (Rack inlet temperature) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ ASHRAE กำหนด
- 1.4 ถ้าอุณหภูมิอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์มีค่ามากกว่าที่กำหนด ให้เพิ่มความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุน แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงในเกณฑ์แล้ว ให้เปลี่ยนค่าปริมาณความร้อน แล้วพิจารณาข้อ 1.1 ใหม่

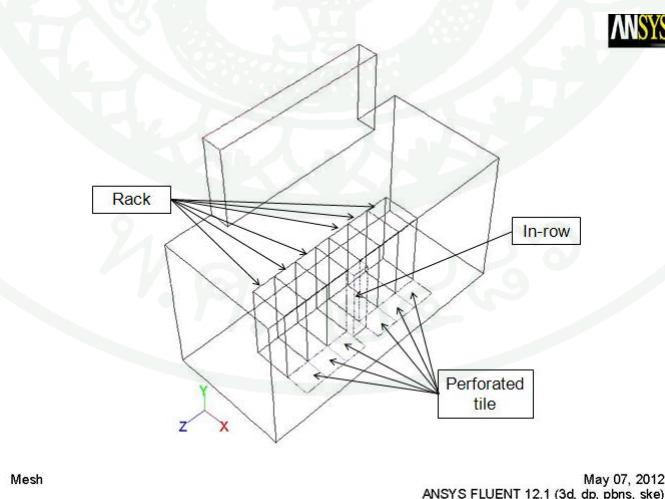
สิ่งที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองในครั้งนี้จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์และความเร็วของอากาศที่ออกจากแผ่นพอรุน ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรไว้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบพ่นยวได้

จากความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่า ในบางกรณีระบบปรับอากาศแบบพื้นยกยังไม่สามารถจัดการแก้ปัญหาอุณหภูมิอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานถูกนำมาพิจารณาในหัวข้อถัดไป

## 2. ระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน

เป็นการพิจารณาต่อจากระบบปรับอากาศแบบพื้นยกในหัวข้อที่ 1 โดยในหัวข้อนี้ การปรับอากาศแบบผสมผสาน คือ การปรับอากาศแบบพื้นยกที่เสริมตู้ปรับอากาศ(ตู้ In-row) เข้ามาเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทำความเย็นให้แก่ตู้เซิร์ฟเวอร์

ในบางกรณีที่การปรับอากาศแบบพื้นยกไม่สามารถทำความเย็นให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ จึงได้ทำแบบจำลองของระบบปรับอากาศแบบผสมผสานขึ้น โดยมีเงื่อนไขเหมือนกับระบบปรับอากาศแบบพื้นยก นั่นคือ พิจารณาโดยใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่ถูกระบายออกจากตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Heat load) กับปริมาณลมเย็นที่ถูกส่งจากแผ่นพอรุน โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศที่ด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Rack inlet temperature) ตามมาตรฐานของ ASHRAE แต่จะมีการเพิ่มตู้ปรับอากาศ (ตู้ In-row) โดยจะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างแถวตู้เซิร์ฟเวอร์ตามภาพที่ 18



ภาพที่ 18 รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศแบบ In-row เพื่อการปรับปรุง

ตู้ปรับอากาศ(ตู้ In-row) ที่มีใช้ในการพาณิชย์ปัจจุบันมีทั้งหมด 4 รุ่น โดยแต่ละรุ่นมีขนาดการทำงานต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขนาดการทำความเย็นของตู้ปรับอากาศ (ตู้ In-row)

Cooling capacity(kW)	Airflow (m <sup>3</sup> /hr)
24	4,700
32.2	6,000
36.5	7,700
56	10,800

ที่มา: STULZ (2011)

การคำนวณแบบจำลองนี้ได้ใช้โปรแกรม CFD โดยเริ่มจาก

- 2.1 นำเงื่อนไขปริมาณความร้อนที่ออกจากตู้เซิร์ฟเวอร์ และความเร็วแผ่นพรมของระบบปรับอากาศแบบพื้นยก ที่ไม่สามารถทำความเย็นได้ตามมาตรฐาน ASHRAE จากหัวข้อการออกแบบระบบปรับอากาศแบบพื้นยกมาพิจารณา
- 2.2 เพิ่มปริมาณลมเย็นจากตู้ปรับอากาศ (ตู้ In-row) โดยเริ่มจากขนาดเล็กที่สุด
- 2.3 พิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ (Rack inlet temperature) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ ASHRAE กำหนด
- 2.4 ถ้าอุณหภูมิอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์มีค่ามากกว่าที่กำหนด ให้เพิ่มขนาดของตู้ปรับอากาศ (ตู้ rack) แต่ถ้าอุณหภูมิอยู่ในเกณฑ์แล้ว ให้เปลี่ยนค่าปริมาณความร้อน แล้วพิจารณาข้อ 2.1 ใหม่

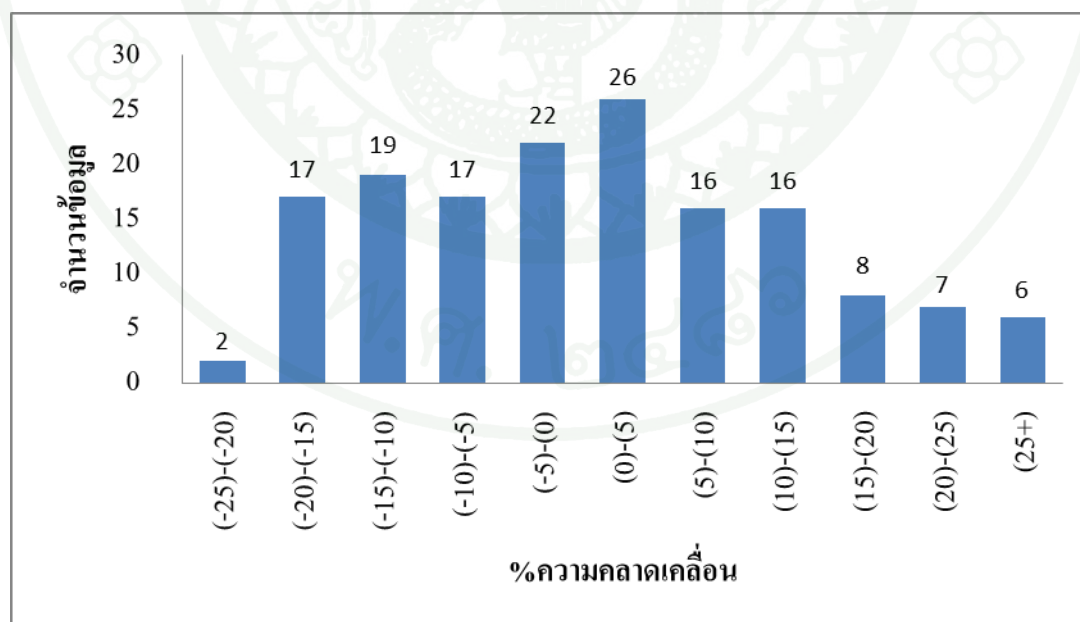
สิ่งที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองในครั้งนี้จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ความเร็วของอากาศที่ออกจากแผ่นพรม และขนาดของตู้ปรับอากาศ ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรไว้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบผสมผสานได้

## ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาแบบจำลองของศูนย์ข้อมูล โดยใช้โปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วน และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรม CFD การเปรียบเทียบระบบปรับอากาศแบบ In-row และแบบพื้นที่ และส่วนสุดท้ายคือ การออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ผลที่ได้จากการจำลองสามารถแสดงได้ดังนี้

### การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในโปรแกรม CFD

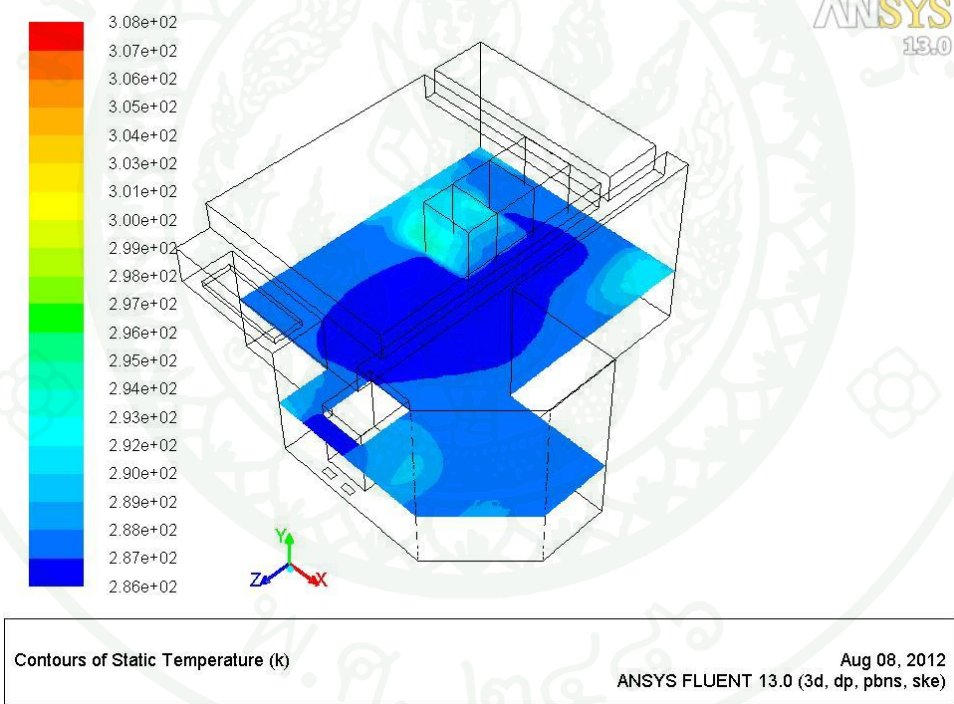
จากการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ศึกษาอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล โดยทำการสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำกับอุณหภูมิของอากาศที่วัดได้จากศูนย์ข้อมูลจริง ซึ่งพิจารณาอากาศที่บริเวณความสูง 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตรทั้งหมด 156 ตำแหน่ง พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 15% จากการวัด คิดเป็น 74.6% ของตำแหน่งวัดทั้งหมด และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ไม่เกิน 20% จากการวัดคิดเป็น 90.4% ของตำแหน่งที่วัดทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ค่าความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบระหว่างแบบจำลองที่วิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์กับค่าที่เก็บจากการทดสอบในศูนย์ข้อมูลจริง

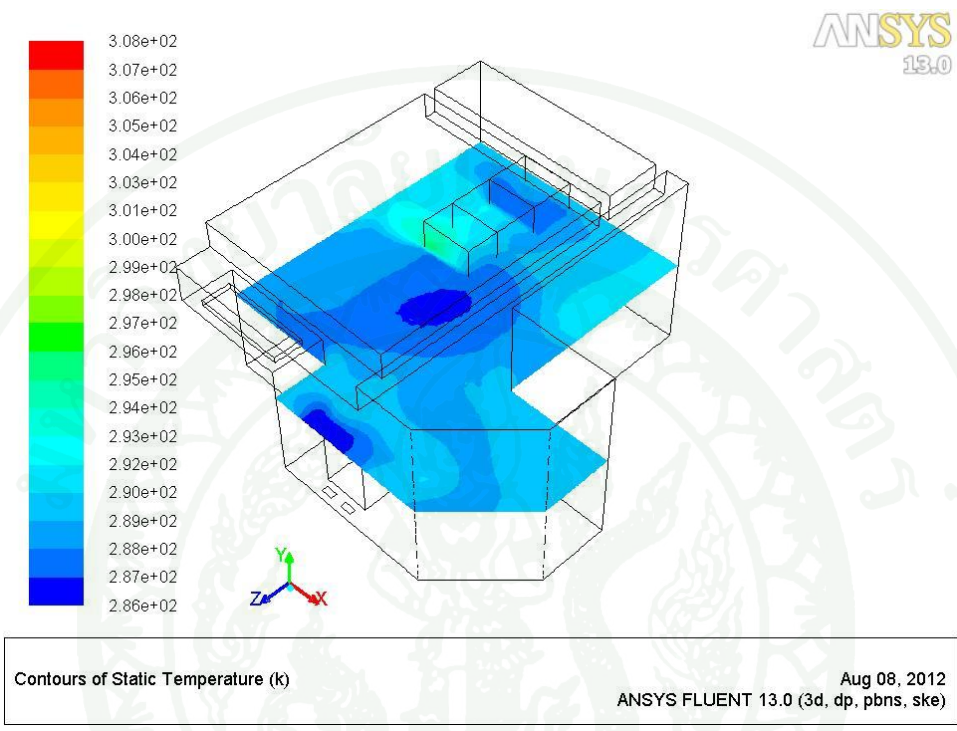
จากการเปรียบเทียบข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการทำนายปรากฏการณ์ของการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับระบบปรับอากาศแบบพื้นยกภายในศูนย์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ผลจากการใช้โปรแกรม CFD วิเคราะห์และจำลองลักษณะการไหลของอากาศเย็นภายในศูนย์ข้อมูล แสดงให้เห็นว่าการกระจายอุณหภูมิภายในศูนย์ข้อมูล ที่บริเวณความสูงห้อง 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 20, 21 และ 22 กล่าวคือ ที่ความสูงห้อง 1 เมตร ภาพที่ 20 อุณหภูมิการทำความเย็นภายในห้องค่อนข้างต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์พบว่าอากาศเย็นสามารถทำความเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ



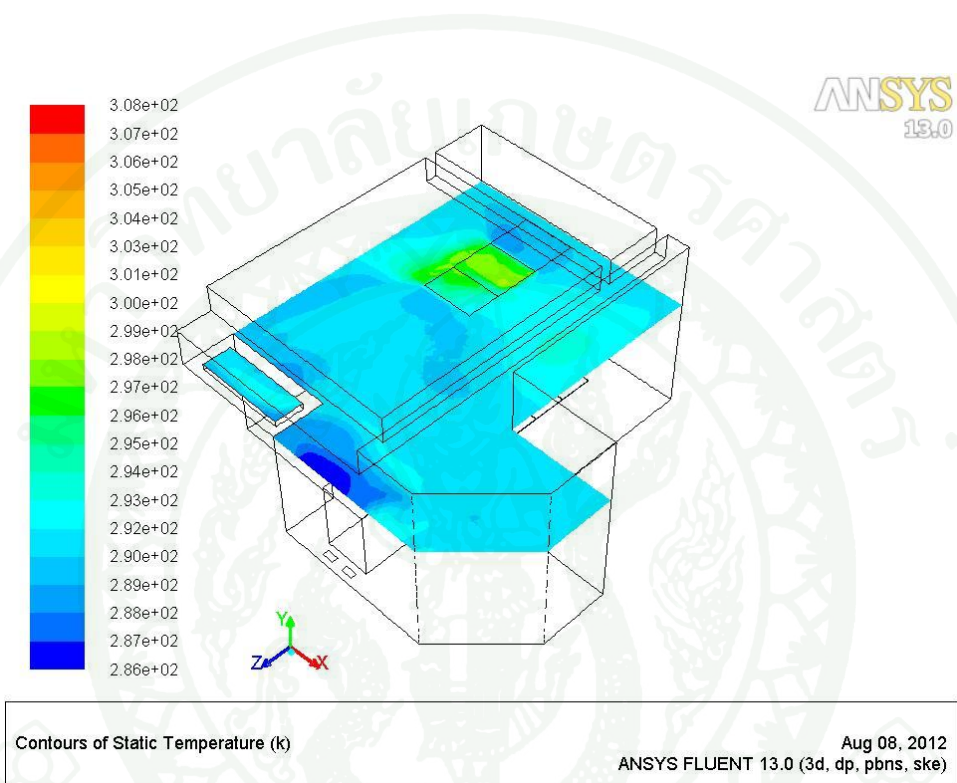
ภาพที่ 20 การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบพื้นยกที่ความสูง 1 เมตร

จากภาพที่ 21 อุณหภูมิการทำความเย็นที่ความสูง 1.5 เมตร ภายในศูนย์ข้อมูลจะมีค่าต่ำ บริเวณด้านบนแผ่นพูน และจะสูงขึ้นบริเวณตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์



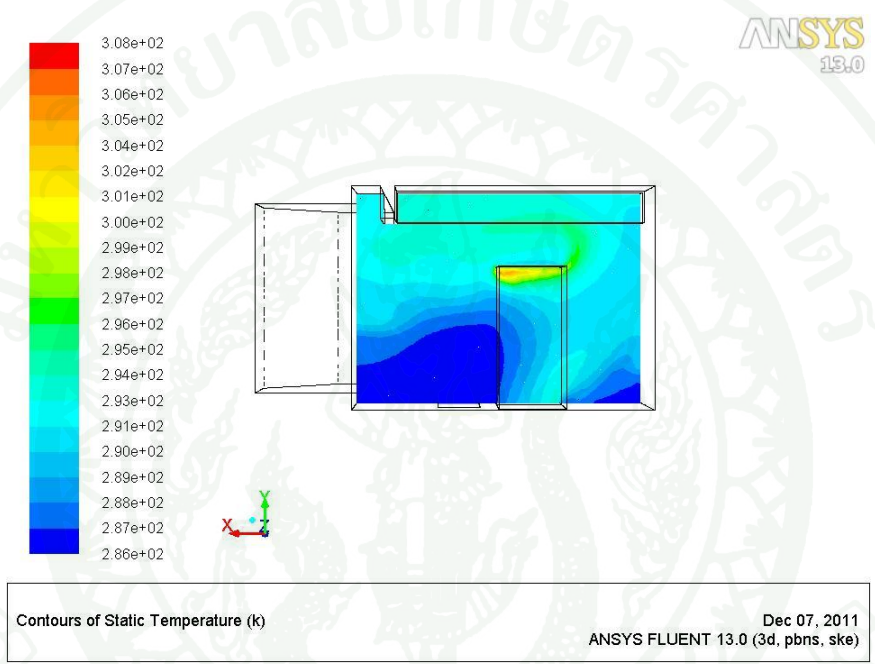
ภาพที่ 21 การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบพ่นยึกที่ความสูง 1.5 เมตร

จากภาพที่ 22 พบว่าอุณหภูมิการทำความเย็นที่ความสูง 2 เมตร ภายในศูนย์ข้อมูลจะมี อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงขึ้น โดยมีการกระจายอุณหภูมิของอากาศค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอดทั้ง ความสูง แต่ถ้าพิจารณาบริเวณด้านบนของผู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ จะพบว่า มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง กว่าบริเวณด้านล่างอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 22 การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบพื้นยกที่ ความสูง 2 เมตร

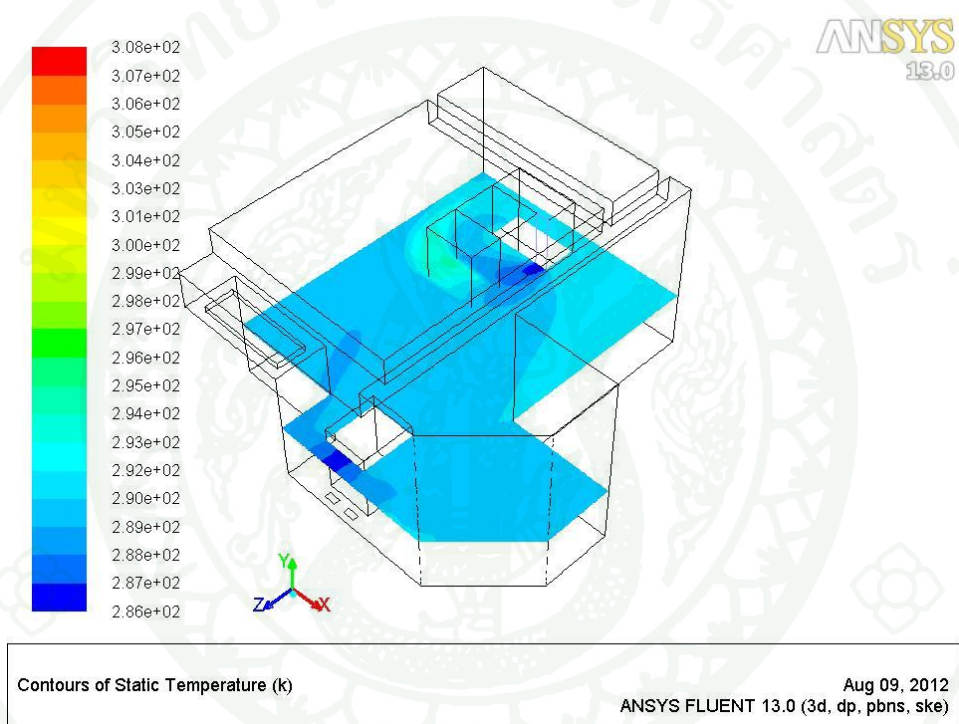
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 23 พบว่า ระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก ไม่สามารถทำความเย็นให้กับบริเวณด้านบนของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากพบว่ายังมีกลุ่มความร้อนสะสม(Hot spot) บริเวณด้านบน ของตู้เซิร์ฟเวอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพ่นลมมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการทำความเย็นให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ ซึ่งอาจทำให้ระบบคอมพิวเตอร์เสียหายได้



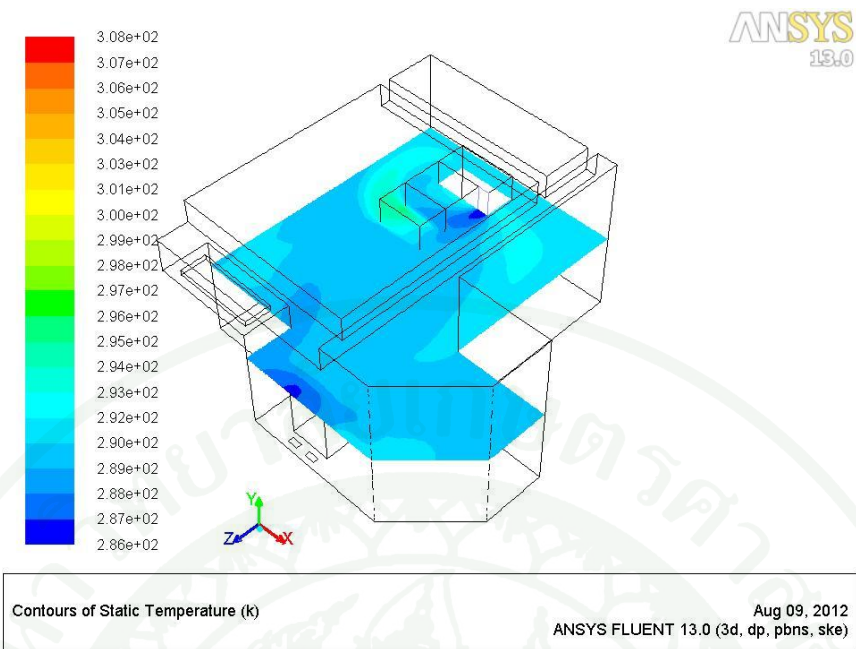
ภาพที่ 23 การกระจายอุณหภูมิของหน้าตัดด้านข้างของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ในระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก

## การเปรียบเทียบระบบปรับอากาศแบบ In-row และแบบพื้นยก

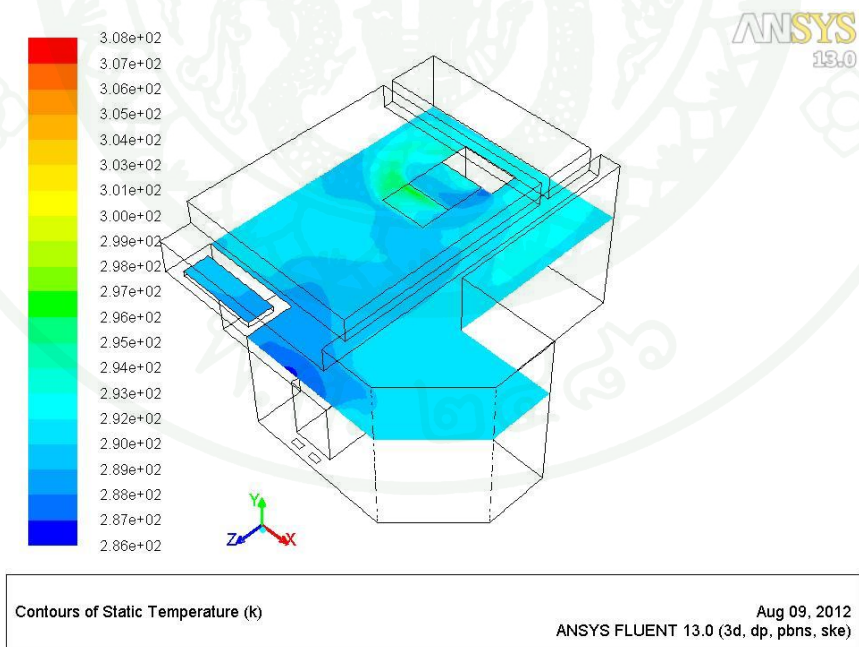
จากการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ของระบบปรับอากาศแบบ In-row ภายในศูนย์ข้อมูล พบว่า ผลจากการใช้โปรแกรม CFD วิเคราะห์อุณหภูมิของอากาศที่บริเวณความสูงห้อง 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 24, 25 และ 26 ซึ่งพบว่าที่ความสูงทั้งสามระดับ การกระจายอากาศเย็นภายในห้องมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 24 การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบ In-row ที่ความสูง 1 เมตร

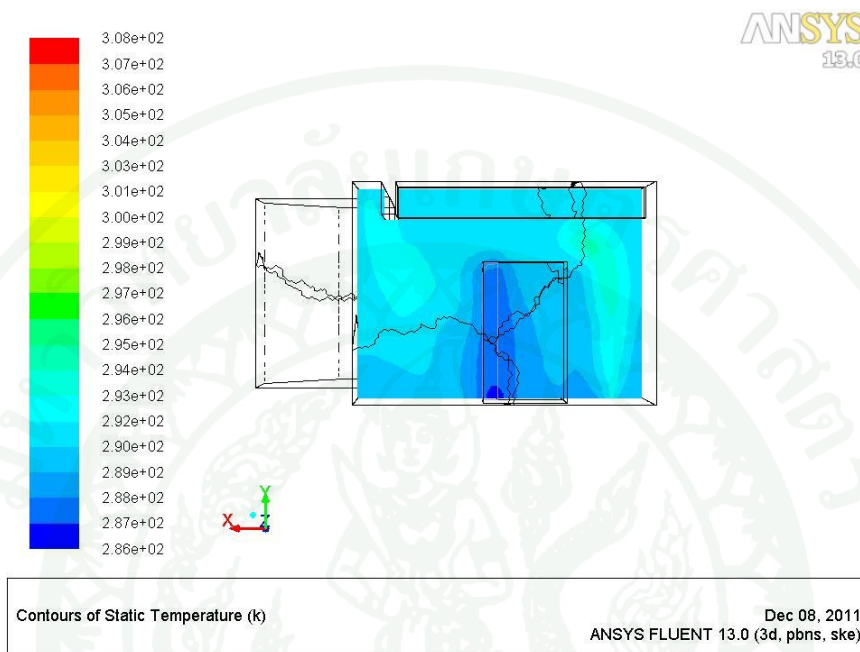


ภาพที่ 25 การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบ In-row ที่ ความสูง 1.5 เมตร



ภาพที่ 26 การกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่มีระบบปรับอากาศแบบ In-row ที่ ความสูง 2 เมตร

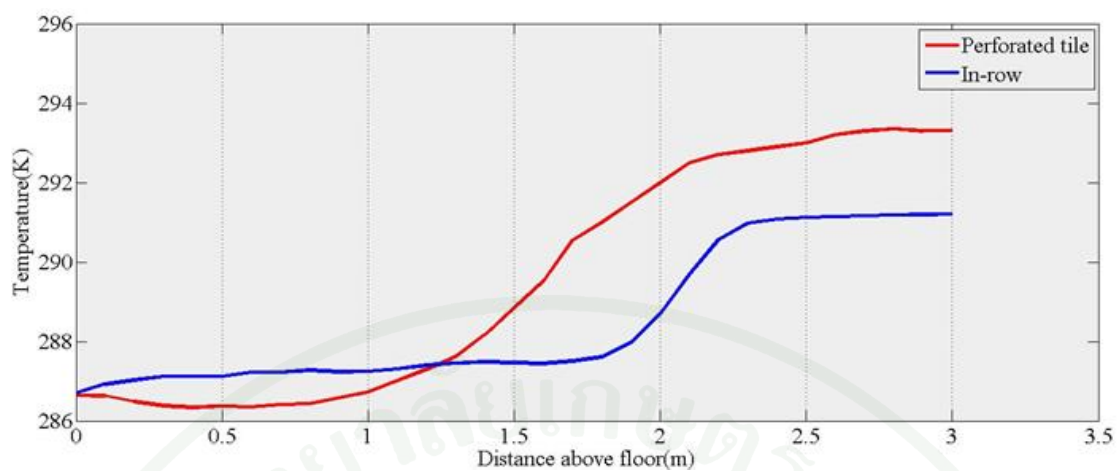
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์บริเวณด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 27 พบว่า ระบบปรับอากาศแบบ In-row สามารถกระจายลมเย็นเข้าสู่ตู้เซิร์ฟเวอร์ ได้ดี และสม่ำเสมอตลอดทุกความสูงซึ่งทำให้ตู้เซิร์ฟเวอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



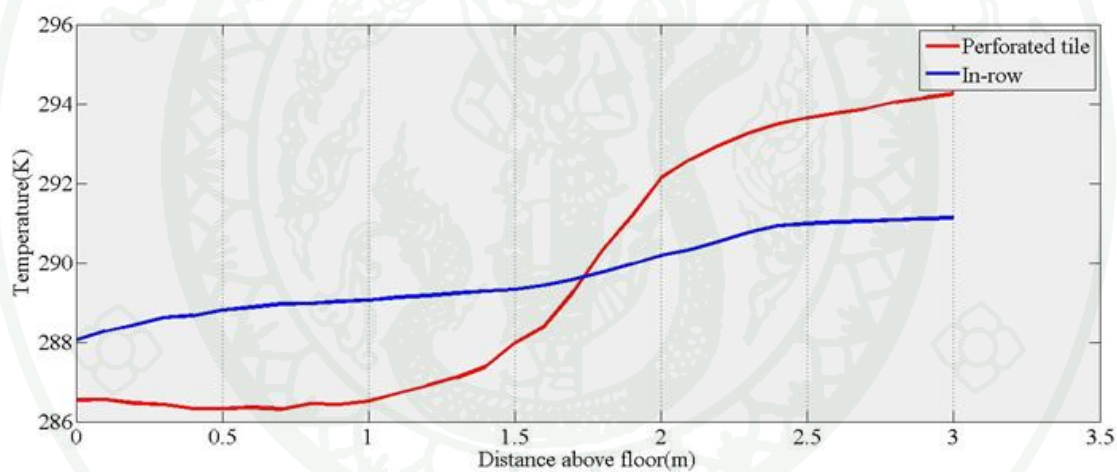
ภาพที่ 27 การกระจายอุณหภูมิของหน้าตัดด้านข้างของตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ในระบบปรับอากาศแบบ In-row

เมื่อนำระบบปรับอากาศแบบพื้นยก และระบบปรับอากาศแบบ In-row มาพิจารณา อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าของตู้เซิร์ฟเวอร์ ดังแสดงในภาพที่ 28 พบว่า อุณหภูมิอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ในช่วงความสูง 0 - 2 เมตร ของระบบปรับอากาศแบบ In-row ในตู้ Rack A มีอุณหภูมิทางเข้าตู้เซิร์ฟเวอร์ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงระหว่าง 286.5 - 287.5 K ซึ่งต่างจากระบบปรับอากาศแบบพื้นยกที่จะมีอุณหภูมิต่ำในช่วงความสูง 1 เมตรและหลังจากนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ

เมื่อพิจารณาตู้ Rack B ภาพที่ 29 พบว่า อุณหภูมิของอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ของระบบปรับอากาศแบบ In-row มีค่าเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นกว่าระบบปรับอากาศแบบพื้นยก แต่ถ้าพิจารณา ที่ความสูง 2 เมตร ระบบปรับอากาศแบบ In-row สามารถทำความเย็นให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ ให้มีอุณหภูมิทำความเย็นต่ำกว่าระบบปรับอากาศแบบพื้นยกอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 28 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ของ Rack A



ภาพที่ 29 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ของ Rack B

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวทำให้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระบบปรับอากาศแบบพื้นยกสามารถทำความเย็นให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ที่ความสูงไม่มากนัก แต่ระบบปรับอากาศแบบ In-row สามารถทำความเย็นได้ตลอดความสูงของตู้ปรับอากาศ (ซึ่งมีความสูงเท่ากับตู้เซิร์ฟเวอร์) แต่มีข้อเสียคือ การกระจายลมเย็นของตู้ปรับอากาศ (In-row) ทำได้ไม่ดีเท่าระบบปรับอากาศแบบพื้นยก จึงมีแนวคิดที่จะผสมระบบปรับอากาศทั้งสองแบบเพื่อที่จะสามารถทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์ภายในศูนย์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพียงพอต่อความต้องการ

### การออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน

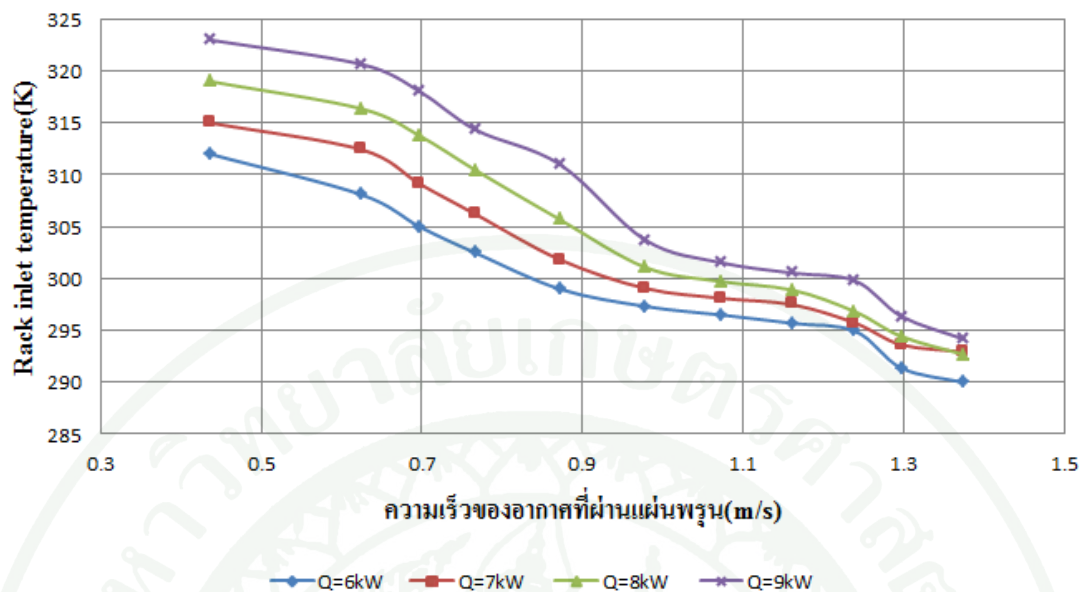
จากการวิเคราะห์ผลของการไหลเชิงคำนวณหรือ CFD ของ การออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

#### 1. พิจารณาผลของระบบปรับอากาศแบบพื้นยก

จากการพิจารณาโดยใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่ถูกระบายออกจากตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Heat load) ซึ่งปริมาณความร้อนที่สนใจอยู่ในช่วงระหว่าง 6-20 kW กับปริมาณลมเย็นที่ถูกส่งจากแผ่นพรุณ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.436-1.375 m/s ทั้งหมด 11 ค่า คือ 0.436, 0.625, 0.697, 0.767, 0.872, 0.978, 1.072, 1.161, 1.239, 1.297 และ 1.375 m/s (Tate Access Floors, Inc.) โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศที่ด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Rack inlet temperature) ตามมาตรฐานของ ASHRAE ซึ่งได้แนะนำให้อุณหภูมิของอากาศที่เข้าไปทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 18 – 27 °C หรือ ประมาณ 291 – 300 K

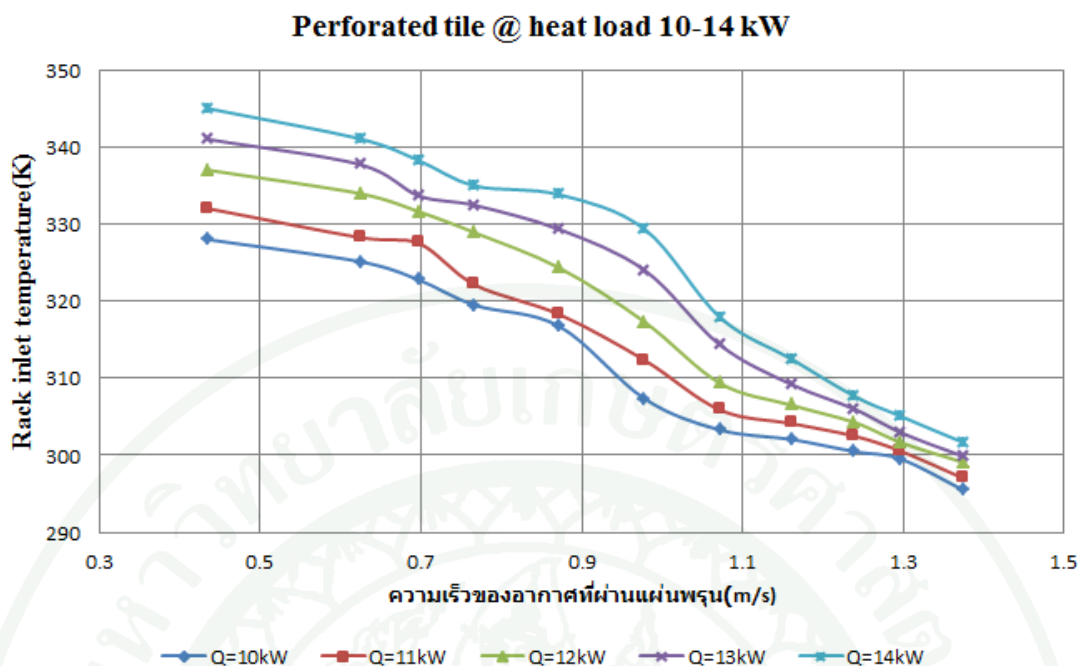
ผลจากการใช้โปรแกรม CFD วิเคราะห์อุณหภูมิของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ ของระบบปรับอากาศแบบพื้นยก ที่ความเร็วของอากาศผ่านแผ่นพรุณค่าต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 30 และ ภาพที่ 31

## Perforated tile @ heat load 6-9 kW



ภาพที่ 30 ผลของอุณหภูมิอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Rack inlet temperature) ของระบบปรับอากาศแบบพ่นยวดยิ่งที่ปริมาณความร้อนตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ 6-9 kW

จากภาพที่ 30 พิจารณาความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ ระหว่าง 6-9 kW พบว่าที่ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ (Heat load) ใดๆเมื่อมีความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุนเข้าไปทำความเย็นในปริมาณที่ต่างกัน จะมีผลต่ออุณหภูมิของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ (Rack inlet temperature) แตกต่างกัน ซึ่งจะนำผลอุณหภูมิของอากาศที่ด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ที่ได้ เทียบกับมาตรฐานของ ASHRAE โดยพบว่าปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ที่ 6 kW ต้องใช้ปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพอรุนมากกว่า 0.872 m/s ทำความเย็น, ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ 7 kW ต้องใช้ปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพอรุนมากกว่า 0.978 m/s ทำความเย็น, ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ 8 kW ต้องใช้ปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพอรุนมากกว่า 1.072 m/s ทำความเย็น และปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ 9 kW ต้องใช้ปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพอรุนมากกว่า 1.161 m/s ทำความเย็น จึงจะทำให้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามมาตรฐานของ ASHRAE

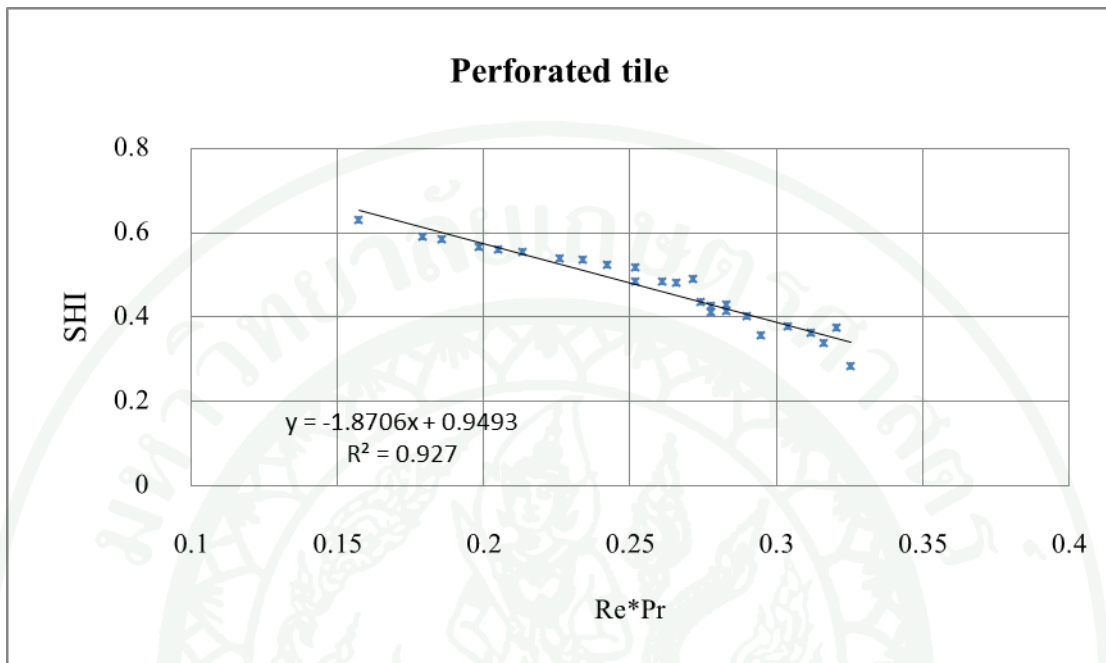


ภาพที่ 31 ผลของอุณหภูมิอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ (Rack inlet temperature) ของระบบปรับอากาศแบบพื้นยกที่ปริมาณความร้อนตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ 10-14 kW

จากภาพที่ 31 พบว่า เมื่อปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์มีค่ามากขึ้น ปริมาณอากาศเย็นที่ใช้ทำความเย็นมีค่าไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังจะเห็นว่า เมื่อเทียบอุณหภูมิของอากาศกับมาตรฐานของ ASHRAE แล้ว จะมีปริมาณลมเย็นเพียงไม่กี่ค่าที่ทำให้ระบบปรับอากาศแบบพื้นยกทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์ได้มีประสิทธิภาพและเพียงพอต่อความต้องการ โดยพบว่า ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ที่ 10 kW ต้องใช้ปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพรุนมากกว่า 1.239 m/s ทำความเย็น ,ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ 11 kW ต้องใช้ปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพรุนมากกว่า 1.297 m/s ทำความเย็น ,ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ 12 kW และ 13kW ต้องใช้ปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพรุน 1.379 m/s ทำความเย็นและจะเห็นว่า ที่ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ตั้งแต่ 14 kW ขึ้นไป การทำความเย็นแบบพื้นยกเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามมาตรฐานของ ASHRAE จึงจำเป็นต้องใช้ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานเข้ามาช่วยทำความเย็นเพิ่ม ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

จากข้อมูลข้างต้น ทำให้สร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบพื้นยก โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า SHI (Supply Heat Index) และ  $Re \cdot Pr$  ดังแสดงในภาพที่ 32 โดยค่า

Re คือ เลขเรย์โนลด์  
Pr คือ เลขพรันด์เทิล



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบพินยอก ระหว่างค่า SHI และ  $Re * Pr$  และค่า R-squared ของแผนภูมิ

จากภาพที่ 32 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบพินยอก คือ

$$SHI = -1.8706(Re * Pr) + 0.9493 \quad (13)$$

สมการที่ 13 แสดงค่าความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ (Re) เลขพรันด์เทิล (Pr) และค่า Supply Heat Index (SHI)

เลขเรย์โนลด์ (Re) ของการไหลผ่านแผ่นพูนคือ ดัชนีบอกสภาพการไหลของของไหลผ่านแผ่นพูน สูตรที่ใช้คือ

$$Re = \frac{\rho D_p V_f}{\mu} \quad (14)$$

โดยที่	$Re$	คือ เลขเรย์โนลด์
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m <sup>3</sup>
	$D_p$	คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนที่แผ่นพรุน, m
	$V_p$	คือ ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นพรุน, m/s
	$\mu$	คือ ความหนืดเชิงพลศาสตร์, Pa s

เลขพรันด์เทิล( $Pr$ ) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของของไหลในการส่งผ่านโมเมนตัมในของไหลเมื่อเทียบกับการส่งผ่านความร้อนในของไหล สูตรที่ใช้คือ

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} = \frac{C_p \mu D_p \Delta T}{Q} \quad (15)$$

โดยที่	$Pr$	คือ เลขพรันด์เทิล
	$C_p$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, J/(kg K)
	$\mu$	คือ ความหนืดเชิงพลศาสตร์, Pa s
	$K$	คือ สภาพการนำความร้อน, W/(m K)
	$D_p$	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนที่แผ่นพรุน, m
	$\Delta T$	คือ ผลต่างของอุณหภูมิด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์กับด้านหลังตู้เซิร์ฟเวอร์, K
	$Q$	คือ ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์, W

จากสมการที่ 13 สามารถนำสมการนี้ไปช่วยออกแบบศูนย์ข้อมูลที่ใช้ระบบปรับอากาศแบบพื้นยกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยหลักการคือ กำหนดให้ ค่า SHI น้อยกว่า 0.4 และอุณหภูมิของอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์( $T_{in}^a$ ) น้อยกว่า 300 K ตามมาตรฐานของ ASHRAE จากข้อมูลข้างต้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ 5 จะได้ค่าอุณหภูมิของอากาศหลังตู้เซิร์ฟเวอร์( $T_{out}^a$ ) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ด้านหน้าและด้านหลังตู้เซิร์ฟเวอร์( $\Delta T$ ) และเนื่องจากรู้ค่าของ โหลดความร้อน( $Q$ ) ทำให้สามารถคำนวณเลขพรันด์เทิล( $Pr$ ) โดยใช้สมการที่ 15 จากข้อมูลดังกล่าวจะทำให้สามารถคำนวณเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) และทราบค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรุน( $V_p$ ) ซึ่งช่วยให้ผู้ออกแบบประมาณค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นพรุน ให้มีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดโหลดความร้อนภายในศูนย์ข้อมูล (ตัวอย่างการคำนวณระบบปรับอากาศแบบพื้นยกอยู่ที่ภาคผนวก) แต่สำหรับตู้เซิร์ฟเวอร์มีการระบายความร้อนออกมามากกว่า 14 kW ขึ้นไประบบปรับอากาศแบบพื้นยกไม่สามารถจัดการทำความเย็นให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องใช้ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานเข้ามาช่วยในการจัดการทำความเย็น

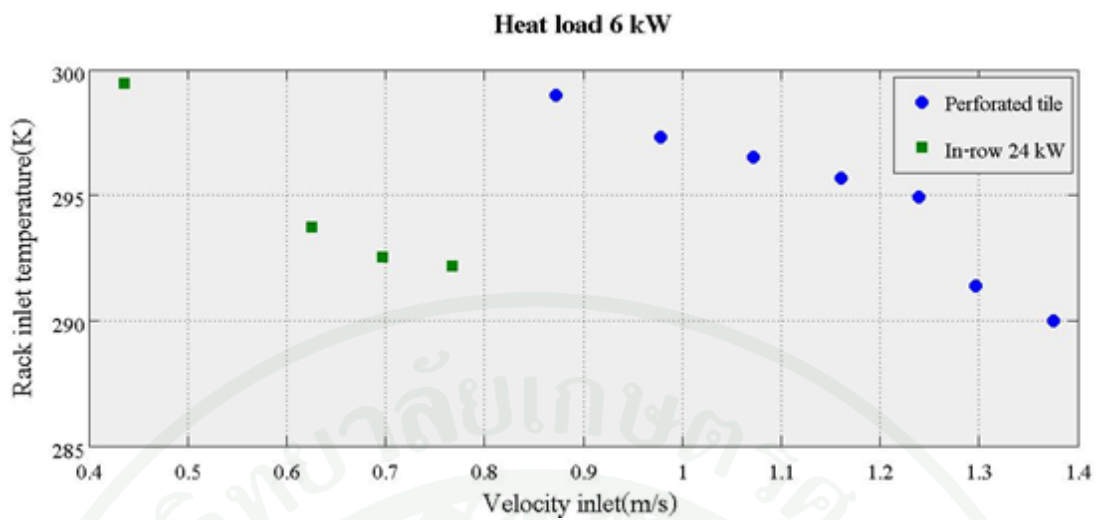
## 2. พิจารณาผลของระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน

เป็นการพิจารณาต่อจากระบบปรับอากาศแบบพื้นยกในหัวข้อ 1 โดยนำตู้ปรับอากาศ(ตู้ In-row) เสริมเข้ามาในระบบปรับอากาศแบบพื้นยกที่มีอยู่แล้ว เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทำความเย็นให้แก่ตู้เซิร์ฟเวอร์ ซึ่งตู้ปรับอากาศที่ใช้พิจารณาร่วมในที่นี้มี 4 ขนาด คือ 24 kW, 32.2 kW, 36.5 kW และ 56 kW

ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานถูกนำมาพิจารณา โดยพิจารณาใน 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 พิจารณาปริมาณลมเย็นที่ออกจากแผ่นพอรุน ร่วมกับตู้ปรับอากาศที่มีค่าอุณหภูมิของอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(Rack inlet temperature) ไม่ผ่านเกณฑ์ของ ASHRAE จากหัวข้อ 1

กรณีที่ 2 พิจารณาปริมาณลมเย็นทุกค่า ที่ออกจากแผ่นพอรุน ร่วมกับตู้ปรับอากาศ ที่ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ตั้งแต่ 14 - 20 kW



ภาพที่ 33 ระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ที่ปริมาณความร้อนของผู้เซิร์ฟเวอร์ 6 kW

จากภาพที่ 33 พบว่า ที่ปริมาณความร้อนของผู้เซิร์ฟเวอร์ 6 kW ระบบปรับอากาศแบบพื้น ยกสามารถทำความเย็นให้ผู้เซิร์ฟเวอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อมีความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่น พอรุนไม่น้อยกว่า 0.872 m/s แต่ถ้ามีความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพอรุนน้อยกว่านั้น จำเป็นต้องเพิ่มตู้ปรับอากาศ(In-row) ขนาด 24 kW เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณลมทำความเย็นหรือถ้าแสดงเป็นตารางจะ เป็นไปตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรุณ ที่ทำให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ขนาด 6 kW ทำความเย็นได้ตามมาตรฐานของ ASHRAE

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรุณมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)
6	แบบพื้นยก	-	1.375	289.99
			1.297	291.37
			1.239	294.94
			1.161	295.69
			1.072	296.5
			0.978	297.32
	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	0.872	298.98
			0.767	292.2
			0.697	292.53
			0.625	293.72
			0.436	299.48

สำหรับการปรับอากาศแบบผสมผสานที่มีปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ระหว่าง 7 - 20 kW สามารถจะเลือกขนาดของตู้ปรับอากาศ(ตู้ In-row) ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรุณ โดยผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ ASHRAE ได้ที่ภาคผนวก

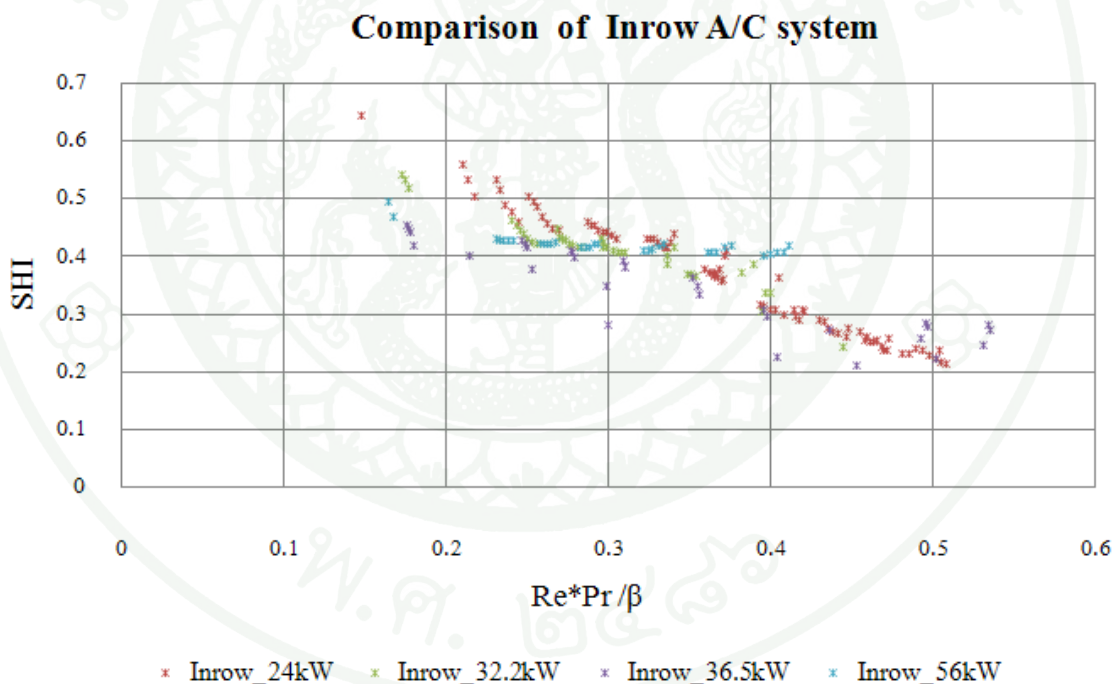
จากความสัมพันธ์ข้างต้น พบว่า ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานสามารถแก้ไขปัญหาการทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะเห็นว่า เมื่อตู้เซิร์ฟเวอร์มีการระบายความร้อนออกมาปริมาณมาก ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานสามารถทำให้อุณหภูมิของอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์มีค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน ASHRAE ได้ ยกเว้นที่ ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรุณ ที่มีค่า ต่ำกว่า 0.436 m/s ที่ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ มีค่า 18 kW, 19 kW และ 20kW ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานไม่สามารถทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์ได้อย่างเพียงพอ จึงควรที่จะเพิ่มความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรุณให้มีค่ามากกว่านี้ เพื่อให้อุณหภูมิของอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ (Rack inlet temperature) เป็นไปตามมาตรฐาน

จากข้อมูลข้างต้น ทำให้สร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบผสมผสานได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า SHI (Supply Heat Index) และ  $Re \cdot Pr / \beta$  ดังแสดงในภาพที่ 34

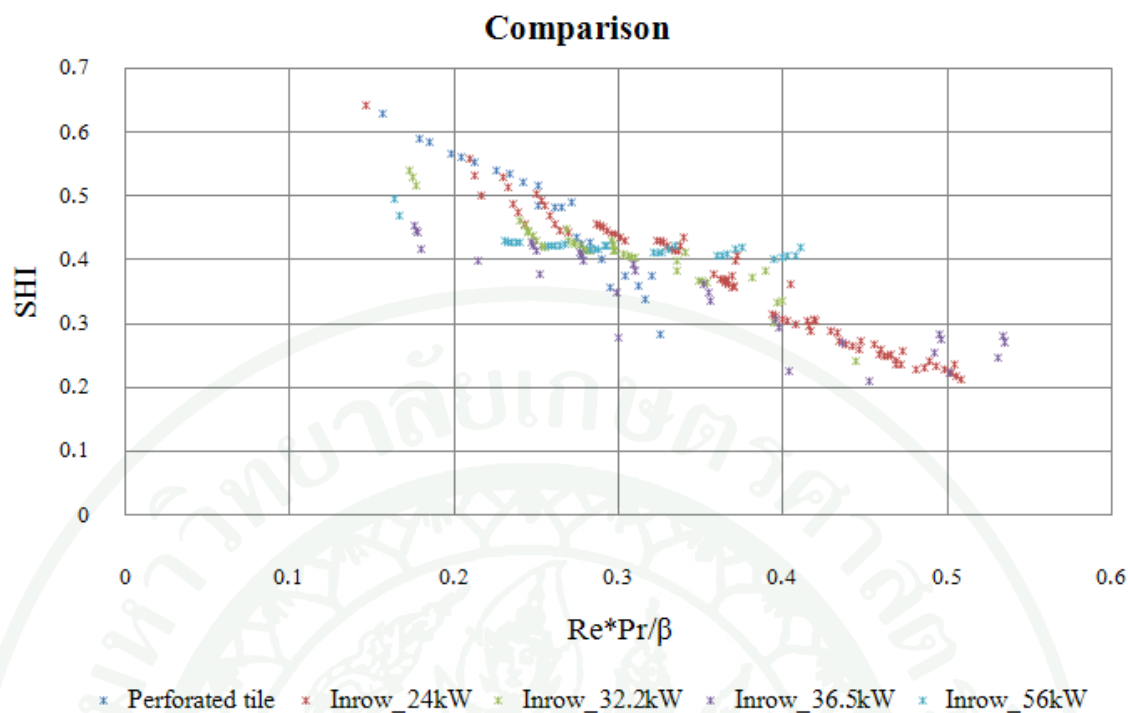
โดย  $\beta$  คือ อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าของเครื่อง CRAC,  $P_p$  ต่อ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าของผู้ปรับอากาศ (In-row) และเครื่อง CRAC,  $P_{all}$

$$\beta = \frac{P_p}{P_{all}} = \frac{P_p}{P_p + P_{ir}} \tag{16}$$

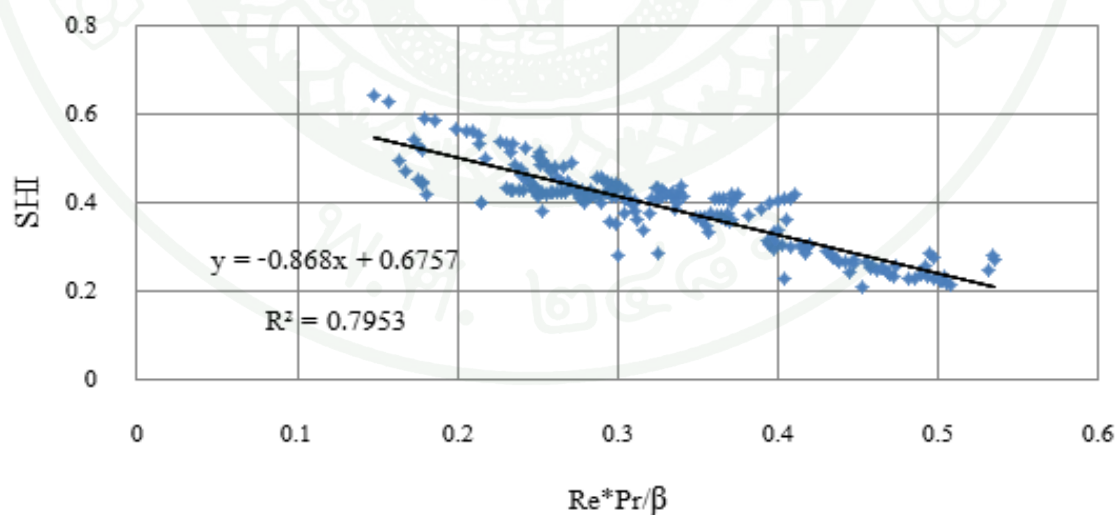
โดยที่  $P_p$  คือกำลังไฟฟ้าของเครื่อง CRAC, kW  
 $P_{ir}$  คือกำลังไฟฟ้าของผู้ปรับอากาศ (In-row), kW



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ระหว่างค่า SHI และ  $Re \cdot Pr / \beta$



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบแบบพื้นยก และระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ระหว่างค่า SHI และ  $Re*Pr/\beta$



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยของระบบแบบพื้นยก และระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน แสดงค่า R-squared บนแผนภูมิ

จากภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วย ของระบบปรับอากาศแบบพื้นยก และระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน ทำให้สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า SHI (Supply Heat Index) และ คือ  $Re*Pr/\beta$

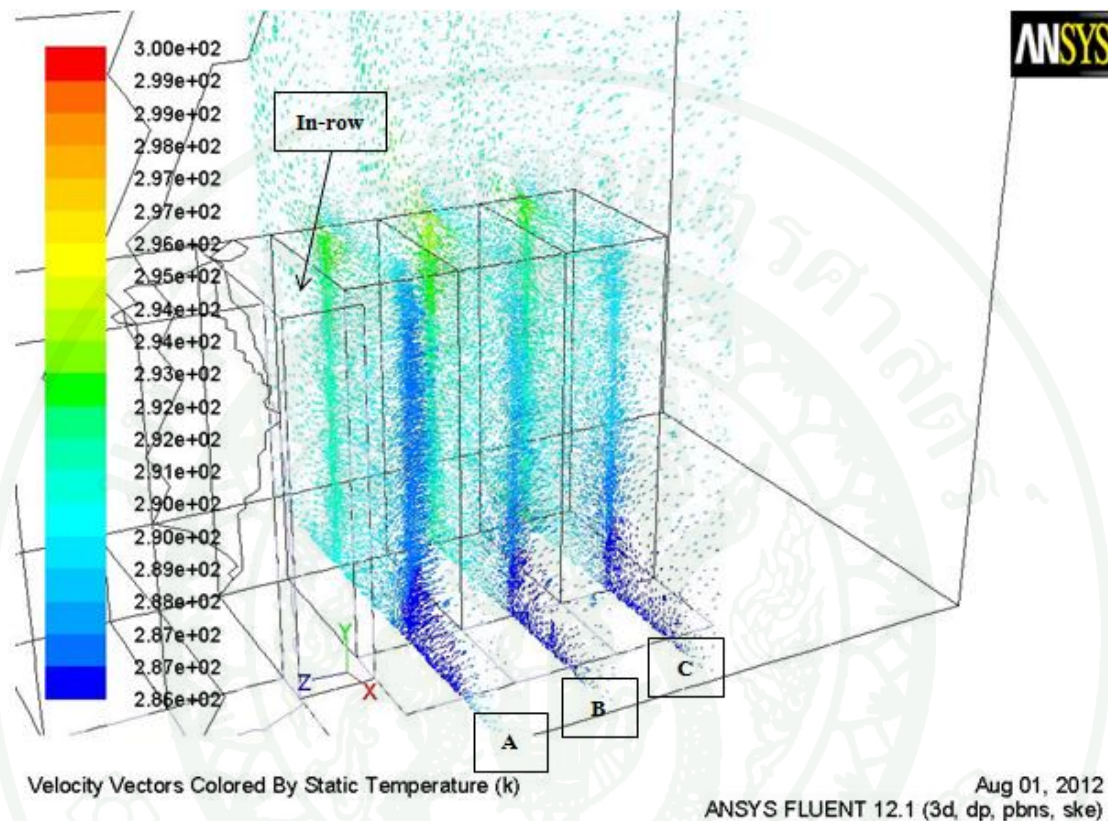
$$SHI = -0.868 \left( \frac{Re*Pr}{\beta} \right) + 0.675 \quad (17)$$

สมการที่ 17 แสดงค่าความสัมพันธ์ของ ค่า Supply Heat Index (SHI) เลขเรย์โนลด์ (Re) เลขพรันด์เทิล (Pr) และค่าคงที่  $\beta$

จากสมการที่ 17 สามารถนำสมการนี้ไปช่วยออกแบบศูนย์ข้อมูลที่ใช้ระบบปรับอากาศแบบผสมผสานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยหลักการคือ กำหนดให้ ค่า SHI น้อยกว่า 0.4 และ อุณหภูมิของอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ ( $T_{in}^c$ ) น้อยกว่า 300 K ตามมาตรฐานของ ASHRAE จากข้อมูลข้างต้น เมื่อแทนค่าในสมการที่ 5 จะได้ค่าอุณหภูมิของอากาศหลังตู้เซิร์ฟเวอร์ ( $T_{out}^c$ ) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ด้านหน้าและด้านหลังตู้เซิร์ฟเวอร์ ( $\Delta T$ ) จากข้อมูลดังกล่าว ทำให้สามารถคำนวณเพื่อหาเลขพรันด์เทิล (Pr) เนื่องจากรู้ค่าไหลความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ (Q) โดยใช้สมการที่ 15 และเนื่องจากการปรับอากาศแบบผสมผสาน จะทราบค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรุณ ( $V_p$ ) เพราะเป็นระบบเดิมที่มีอยู่ จะทำให้คำนวณเลขเรย์โนลด์ (Re) ได้จากสมการที่ 14 ส่งผลให้ค่า  $\beta$  สามารถหาได้จากสมการที่ 17 ทำให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าของตู้ปรับอากาศ ( $P_{in}$ ) ที่ช่วยจัดการทำความเย็นให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ทำงานให้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ (โดยตัวอย่างการคำนวณระบบปรับอากาศแบบผสมผสานอยู่ที่ภาคผนวก)

จากค่าต่างๆดังที่กล่าวมาแล้ว สมการที่ 17 สามารถช่วยผู้ออกแบบเลือกใช้ตู้ปรับอากาศ (In-row) ให้มีขนาดที่สัมพันธ์กับปริมาณความร้อนที่จ่ายออกจากตู้เซิร์ฟเวอร์มีค่าระหว่าง 14 - 20 kW ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ เมื่อรู้ว่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นพรุณ จะสามารถประมาณค่ากำลังไฟฟ้าของตู้ปรับอากาศให้เหมาะสมกับไหลความร้อน และความเร็วอากาศที่ผ่านแผ่นพรุณ ส่งผลให้การระบายความร้อนของอากาศออกจากตู้เซิร์ฟเวอร์ มีประสิทธิภาพที่ดี และสามารถช่วยในการเลือกซื้อตู้ปรับอากาศ (In-row) ที่มีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดไหลความร้อนภายในห้องจริงๆ

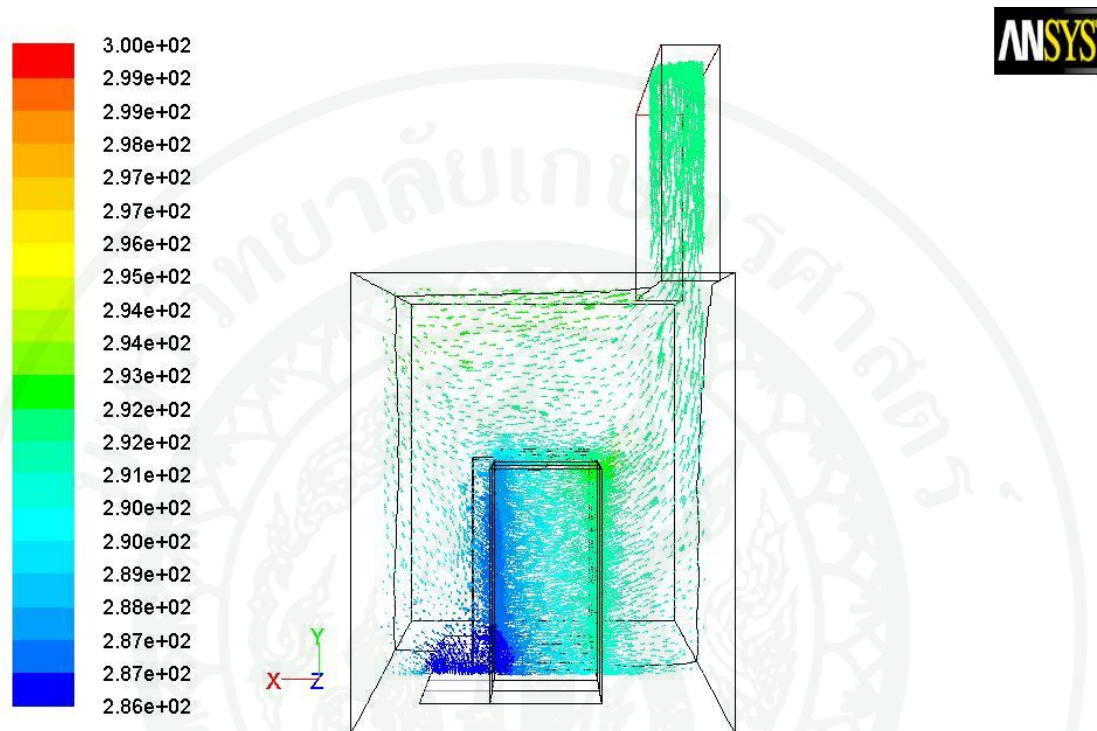
เนื่องจากระบบปรับอากาศแบบผสมผสานเป็นการปรับอากาศในศูนย์ข้อมูลรูปแบบใหม่ ลักษณะของการไหลของอากาศเย็นที่ออกจากแผ่นพรมผสมกับอากาศเย็นที่ออกจากตู้ปรับอากาศ สามารถแสดงได้จากภาพที่ 37



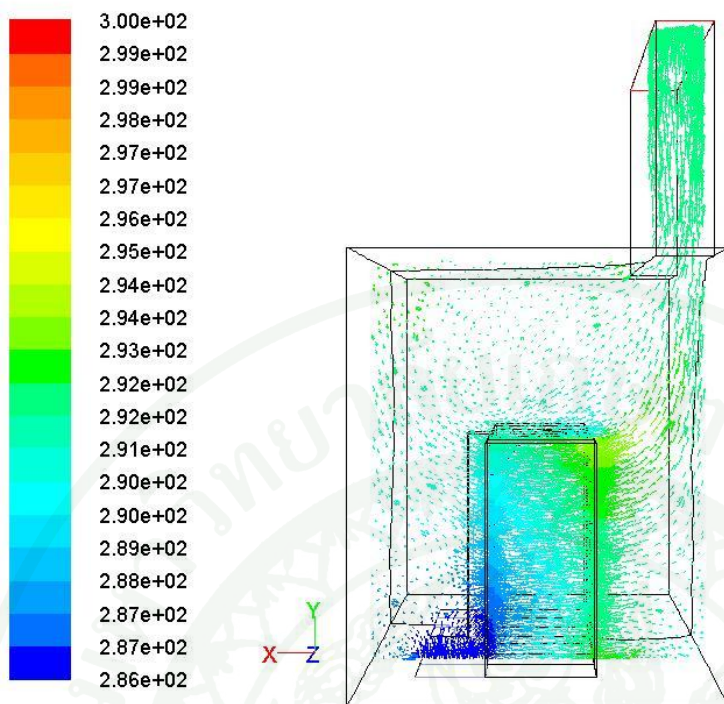
ภาพที่ 37 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเวกเตอร์ความเร็ว ที่หน้าตัดด้านข้างของตู้เซิร์ฟเวอร์

ภาพที่ 37 แสดงให้เห็นถึง การกระจายอุณหภูมิของเวกเตอร์ความเร็ว ของหน้าตัดด้านข้างของตู้เซิร์ฟเวอร์ โดยพิจารณาจากภาพที่ 18 ที่ตำแหน่งตู้เซิร์ฟเวอร์ 3 เครื่อง ทางด้านซ้ายของตู้ปรับอากาศ(ตู้ In-row) โดยที่ตำแหน่ง A คือตู้เซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ใกล้ตู้ปรับอากาศมากที่สุด ตำแหน่ง B คือตู้เซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ถัดจาก A และตำแหน่ง C คือ ตู้เซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ไกลจากตู้ปรับอากาศที่สุด จากภาพที่ 36 พบว่า ตู้เซิร์ฟเวอร์ตำแหน่ง A ได้รับอิทธิพลการส่งลมเย็นออกจากตู้ปรับอากาศมากที่สุด สังเกตได้จากมีแถบสีน้ำเงินเข้ม ตลอดแนวความสูงของตู้เซิร์ฟเวอร์ ส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์ตำแหน่ง B และ C นั้น จะได้รับอิทธิพลการส่งลมเย็นออกจากตู้ปรับอากาศน้อยลงตามลำดับ แต่เมื่อได้พิจารณา ลักษณะการไหลของอากาศเย็นที่ผ่านแผ่นพรมพบว่า อากาศเย็นที่ออกจากแผ่นพรม พบว่า อากาศเย็นส่วนใหญ่ ไม่เข้าไปทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์ ตำแหน่ง A ดังแสดงในภาพที่ 38 แต่จะเข้าไปทำความเย็นมากขึ้นเมื่อตู้เซิร์ฟเวอร์อยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากตู้ปรับอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 39 ที่

ตำแหน่ง B มีปริมาณอากาศเย็นที่ออกจากแผ่นพรมเข้าไปทำความเย็นให้แก่ตู้เซิร์ฟเวอร์มากกว่าตำแหน่ง A และภาพที่ 40 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ปริมาณอากาศเย็นทั้งหมดที่ออกจากแผ่นพรมเข้าไปทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์ที่ตำแหน่ง C



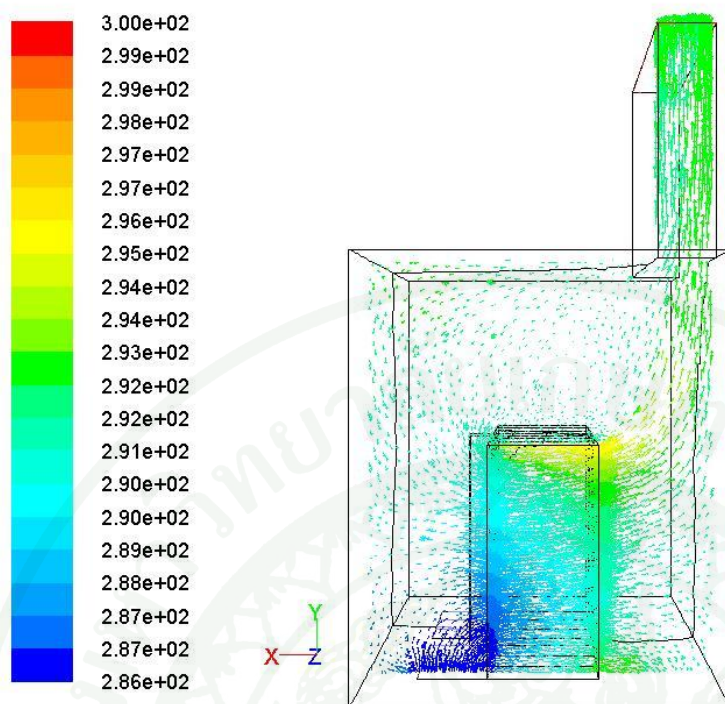
ภาพที่ 38 การกระจายอุณหภูมิอากาศของเวกเตอร์ความเร็ว ที่หน้าตัดด้านข้างของตู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ตำแหน่ง A



Velocity Vectors Colored By Static Temperature (k)

Aug 01, 2012  
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, ske)

ภาพที่ 39 การกระจายอุณหภูมิอากาศของเวกเตอร์ความเร็ว ที่หน้าตัดด้านข้างของตู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ตำแหน่ง B

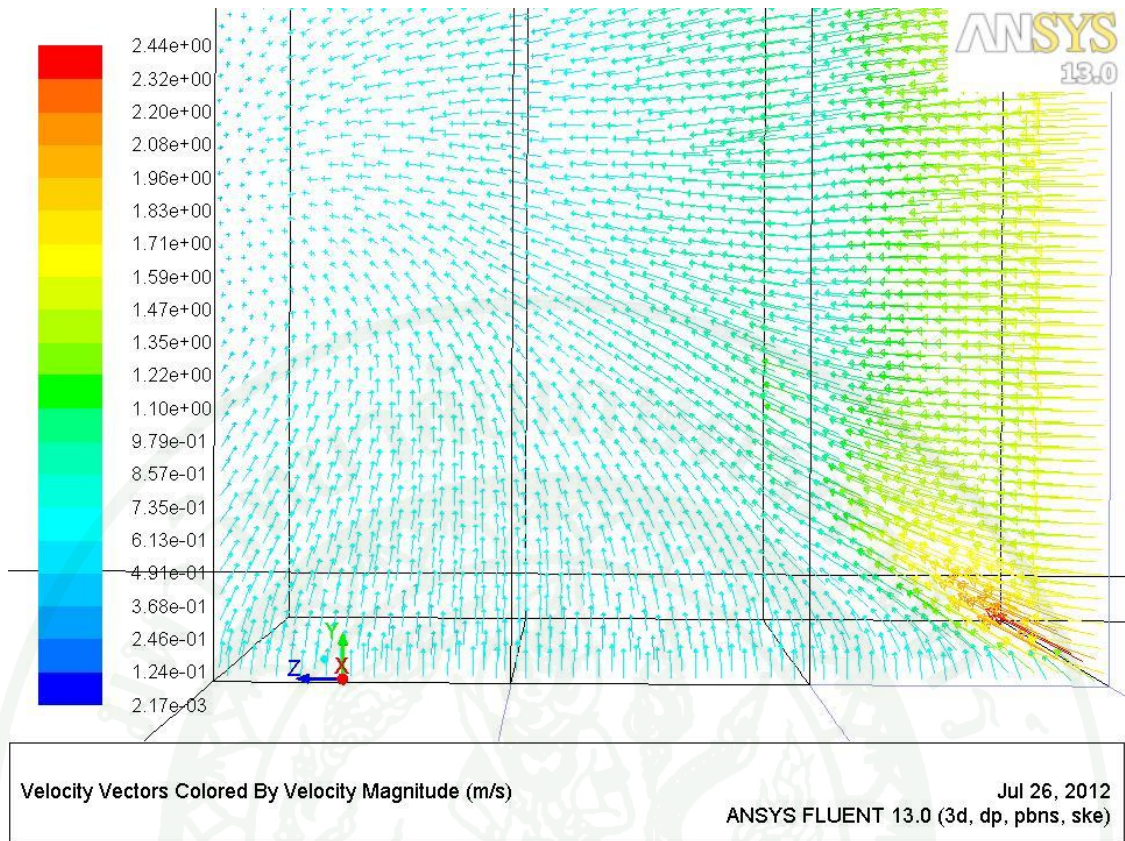


Velocity Vectors Colored By Static Temperature (k)

Aug 01, 2012  
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, ske)

ภาพที่ 40 การกระจายอุณหภูมิอากาศของเวกเตอร์ความเร็ว ที่หน้าตัดด้านข้างของตู้เซิร์ฟเวอร์ ที่ตำแหน่ง C

ภาพที่ 41 แสดงการเกิด cross flow ของอากาศเมื่อใช้การปรับอากาศแบบผสมผสาน จากภาพพบว่า ตู้เซิร์ฟเวอร์ตำแหน่งขวาสุดซึ่งติดกับตู้ปรับอากาศ ได้รับอิทธิพลของตู้ปรับอากาศ โดยตรง ทิศทางอากาศที่ไหลเข้าตู้เซิร์ฟเวอร์จึงมีทิศขนานกับพื้นห้อง ซึ่งส่งผลต่ออากาศเย็นที่ไหลผ่านแผ่นพวุน เนื่องจากอากาศเย็นที่ผ่านแผ่นพวุนมีทิศทางการไหลของอากาศตั้งฉากกับพื้นห้อง จากภาพจะเห็นได้ชัดว่า ทิศการไหลของอากาศจะเฉียงขึ้นไปทางด้านซ้าย เนื่องมาจาก เกิดการตัดกันของกระแสอากาศที่ออกจากแหล่งจ่ายทั้ง 2 แห่ง ซึ่งพบว่า ถ้าแหล่งจ่ายลมเย็นตำแหน่งไหนมีปริมาณความเร็วของอากาศมากกว่า ก็จะส่งผลต่อลักษณะทิศการไหลมากกว่า



ภาพที่ 41 การเกิด cross flow ของอากาศหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์ เมื่อใช้การปรับอากาศแบบผสมผสาน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

ผลจากการทำการสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำ โดยการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถนำมาใช้ทำนายการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนภายในศูนย์ข้อมูลได้ โดยพิจารณาอุณหภูมิของอากาศภายในศูนย์ข้อมูล ที่บริเวณความสูง 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร ทั้งหมด 52 ตำแหน่ง พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 15% จากการวัด คิดเป็น 74.6% ของตำแหน่งวัดทั้งหมด และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ไม่เกิน 20% จากการวัดคิดเป็น 90.4% ของตำแหน่งที่วัดทั้งหมด

ผลการเปรียบเทียบลักษณะการทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์ ของระบบปรับอากาศแบบพ่นยกที่ใช้การส่งลมเย็นผ่านแผ่นพรุณ กับระบบปรับอากาศแบบ In-row ที่มีตู้ปรับอากาศติดตั้งแทรกระหว่างตู้เซิร์ฟเวอร์ จากการศึกษาพบว่า ระบบปรับอากาศแบบพ่นยกสามารถทำความเย็นได้ดีที่ความสูงไม่มากนัก แต่ระบบปรับอากาศแบบ In-row สามารถทำความเย็นได้ดีตลอดความสูงของตู้ปรับอากาศ (ซึ่งมีความสูงเท่ากับตู้เซิร์ฟเวอร์) แต่มีข้อเสียคือ การกระจายลมเย็นของตู้ปรับอากาศ (In-row) ทำได้ไม่ดีเท่าระบบปรับอากาศแบบพ่นยก

ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วย ของระบบปรับอากาศแบบพ่นยกและระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า SHI (Supply Heat Index) และ  $Re*Pr/\beta$  ได้เป็น

$$SHI = -0.868[Re*Pr/\beta] + 0.675$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นทำให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน โดยการเลือกใช้ตู้ปรับอากาศ(In-row) ที่เหมาะสมกับโหลดความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์ภายในศูนย์ข้อมูลและมีความสัมพันธ์กับความเร็วลมที่ออกจากแผ่นพรุณได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

### ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิเคราะห์กระบวนการที่เกิดขึ้นทางคอมพิวเตอร์นั้น ยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากแบบจำลองความปั่นป่วนของ Standard  $k-\epsilon$  ดังนั้น เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น อาจจะลองเปลี่ยนแบบจำลองความปั่นป่วน เป็น RNG  $k-\epsilon$  หรือ Realization  $k-\epsilon$

2. สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า SHI (Supply Heat Index) และ  $Re \cdot Pr / \beta$  เป็นสมการที่ใช้กับศูนย์ข้อมูลมีความสูงที่ 3.6 เมตร ดังนั้นหากจะให้ครอบคลุมกับศูนย์ข้อมูลทุกแห่ง ควรจะต้องสร้างแบบจำลองที่ความสูงต่างๆ ให้เหมาะสมกับสถานที่จริง

3. สร้างการทดลองของระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน เพื่อที่จะได้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงานจริง และเพื่อที่ใช้ผลการทดลองยืนยันความถูกต้องได้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Anderson, J.I., 1995. **Computational fluid dynamics: the basic with application**. McGraw-Hill, Singapore.
- Cho, J., T. Lim and B.S. Kim., 2009. **Measurements and predictions of the air distribution systems in high compute density (Internet) data centers**. Energy and Buildings.
- Choi, J., Y. Kim, A. Sivasubramaniam, J. Srebric and Q. Wang., 2008. **A CDF-Based Tool for Studying Temperature in Rack-Mounted Servers**. IEEE Transactions on computers.
- Hamann, H., M. Iyengar and M. O'Boyle., 2008. **The impact of air flow leakage on server inlet air temperature in a raised floor data center**. In Proceedings of IThERM08 the Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems May 28-31, Orlando, Florida, USA
- Idelchik, I.E. 1994. **Handbook of Hydraulic Resistance**. CRC, Boca Raton, FL.
- Pantankar, S.V. 2010. **Air Flow and Cooling in a Data Center**. Journal of Heat transfer.
- Romadhon, R., M. Ali, A.M. Mahdzir and Y.A. Abakr., 2009. **Optimization of Cooling Systems in Data Centre by Computational Fluid Dynamics Model and Simulation**. In Proceedings of CITISIA09 the Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications July 25-26, pp. 322-327, Kuala Lumpur, Malaysia
- Singh, U., A.K. Singh, S. Parvez and A.Sivasubramaniam., 2008. **CFD-Based Operational Thermal Efficiency Improvement of a Production Data Center**. In Proceedings of SustainIT

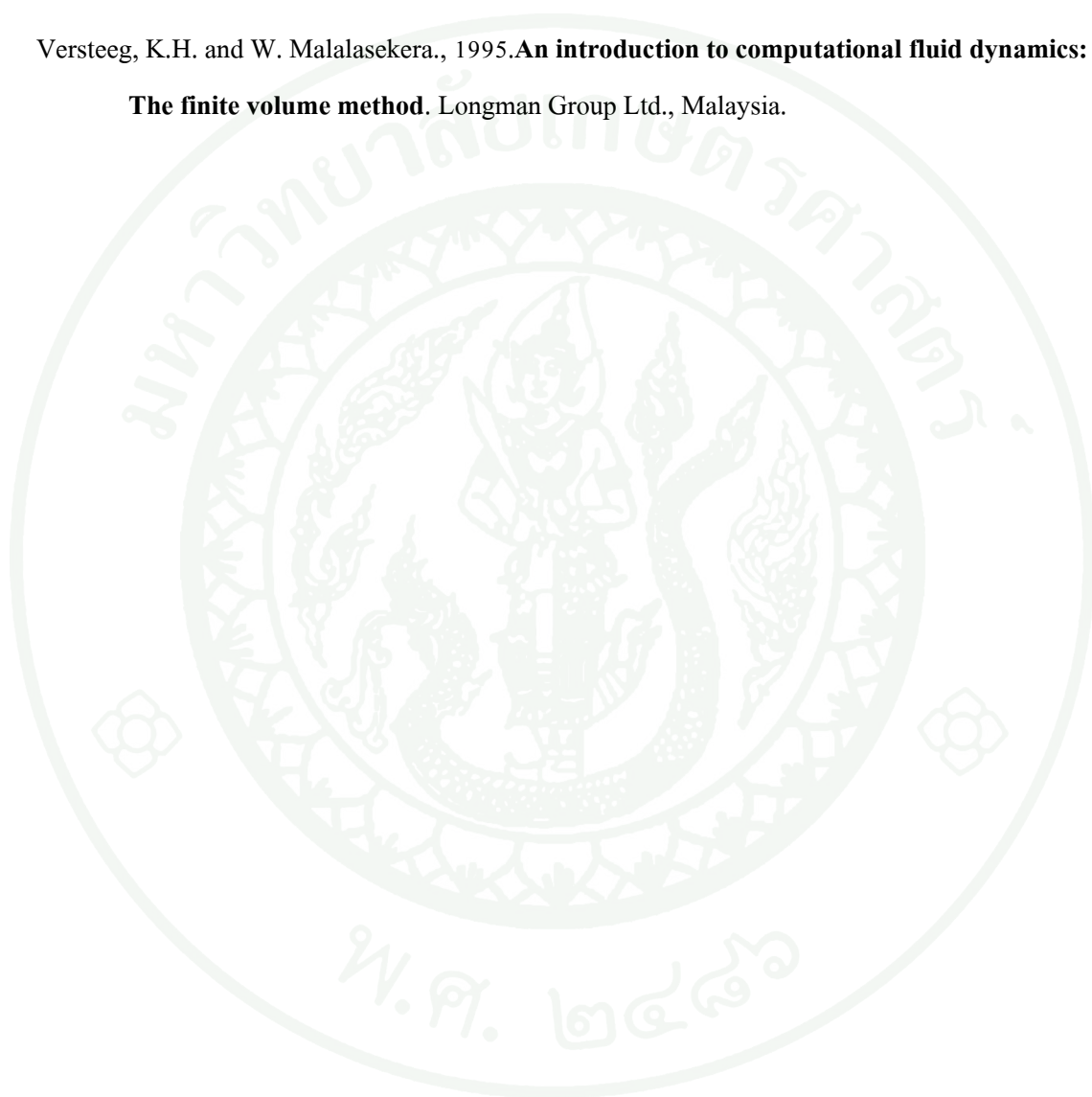
Shrivastava, S.K., M. Iyengar, B.G. Sammakia, R. Schmidt and J.W. VanGilder., 2009.

**Experimental-numerical comparison for a high-density data center: Hot spot heat fluxes in excess of 500 W/ft<sup>2</sup>.** pp.166-172, Components and Packaging Technologies.

Volume: 32. Issue 1.

Versteeg, K.H. and W. Malalasekera., 1995.**An introduction to computational fluid dynamics:**

**The finite volume method.** Longman Group Ltd., Malaysia.







ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณ

## ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก

สมมติให้ ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์(Q) มีค่า 10 kW จะออกแบบให้ความเร็วของอากาศที่ออกจากแผ่นพ่น(Vp) มีค่าเท่าใด

วิธีทำ

- กำหนดค่า SHI คือ 0.4 และให้  $T_{in}^r = 300$  K เมื่อทราบค่า  $T_{ref} = 286$  K แทนค่าในสมการที่ 5 จะได้  $T_{out}^r = 321$  K ทำให้ได้  $\Delta T = 21$  K

$$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} = \frac{T_{in}^r - T_{ref}}{T_{out}^r - T_{ref}} \quad (5)$$

- หาเลขพริ้นด์เทิล (Pr) โดยใช้สมการที่ 15 จากโจทย์คือทำความเย็นให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ขนาด 10 kW,  $Q = 10,000$  W และจากการคำนวณในข้อ 1. ได้ค่า  $\Delta T = 21$  K โดยมีค่าอื่นๆ ได้แก่  $C_p = 1010$  J/kg K,  $\mu = 0.0000179$  N s/m<sup>2</sup> และ  $D_p = 0.338$  m (เมื่อแผ่นพ่นมีพื้นที่เปิด 25%) จะได้  $Pr = 1.283E-05$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} = \frac{C_p \mu D_p \Delta T}{Q} \quad (15)$$

- หาเลขเรย์โนลด์ (Re) จากสมการที่ 13 โดยที่  $SHI = 0.4$  และ  $Pr = 1.283E-05$  จะได้  $Re = 22916.67$

$$SHI = -1.8706(Re * Pr) + 0.9493 \quad (13)$$

- หาค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพ่น(Vp) ใช้สมการที่ 14 โดยมีค่า  $p = 1.225$  kg/m<sup>3</sup> ได้  $V_p = 0.9907$  m/s

$$Re = \frac{\rho D_p V_p}{\mu} \quad (14)$$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ถ้าตู้เซิร์ฟเวอร์มีปริมาณความร้อน 10 kW ผู้ออกแบบจำเป็นต้อง ออกแบบระบบปรับอากาศแบบพ่นยึก โดยกำหนดให้ อัตราเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพ่นด้านหน้า ตู้ นั้น มีความเร็วอากาศไม่ต่ำกว่า 0.9907 m/s จึงจะสามารถทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์ให้ทำงาน ได้ดี มีประสิทธิภาพมากที่สุด



การคำนวณระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน

สมมติให้ ปริมาณความร้อนของตู้เซิร์ฟเวอร์(Q) มีค่า 10 kW โดยมีความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพวุน(Vp) เท่ากับ 0.6 m/s โดยมีกำลังไฟฟ้าของตู้ CRAC (Pp) 26 kW จะต้องเลือกตู้ปรับอากาศ(P<sub>ir</sub>) ขนาดเท่าไรในการช่วยทำความเย็นให้แก่ศูนย์ข้อมูลแห่งนี้

วิธีทำ

1. กำหนดค่า SHI คือ 0.4 และให้  $T_{in}^r = 300$  K เมื่อทราบค่า  $T_{ref} = 286$  K แทนค่าในสมการที่ 5 จะได้  $T_{out}^r = 321$  K ทำให้ได้  $\Delta T = 21$  K

$$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} = \frac{T_{in}^r - T_{ref}}{T_{out}^r - T_{ref}} \quad (5)$$

2. หาเลขพริ้นด์เทิล(Pr) โดยใช้สมการที่ 15 จากโจทย์คือทำความเย็นให้ตู้เซิร์ฟเวอร์ขนาด 10 kW,  $Q = 10,000$  W และจากการคำนวณในข้อ 1. ได้ค่า  $\Delta T = 21$  K โดยมีค่าอื่นๆ ได้แก่  $C_p = 1010$  J/kg K,  $\mu = 0.0000179$  N s/m<sup>2</sup> และ  $D_p = 0.338$  m (เมื่อแผ่นพวุนมีพื้นที่เปิด 25%) ทำให้คำนวณ Pr ได้เท่ากับ 1.283E-05

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} = \frac{C_p \mu D_p \Delta T}{Q} \quad (15)$$

3. หาเลขเรย์โนลด์(Re) จากสมการที่ 14 โดยที่  $\rho = 1.225$  kg/m<sup>3</sup> และ  $V_p = 0.6$  m/s จะได้  $Re = 13878.77$

$$Re = \frac{\rho D_p V_p}{\mu} \quad (14)$$

4. หาค่าอัตราส่วนกำลังไฟฟ้า( $\beta$ ) ใช้สมการที่ 17 โดยที่  $SHI = 0.4$ ,  $Re = 13878.77$  และ  $Pr = 1.283E-05$  จะได้  $\beta = 0.562$

$$SHI = -0.868 \left( \frac{Re \cdot Pr}{\beta} \right) + 0.675 \quad (17)$$

5. หาค่ากำลังไฟฟ้าของตู้ปรับอากาศ(P<sub>ir</sub>) จากสมการที่ 16 โดยที่รู้กำลังไฟฟ้าของตู้ CRAC (Pp) เท่ากับ 26 kW จะได้  $P_{ir} = 20.263$  kW

$$\beta = \frac{P_p}{P_{all}} = \frac{P_p}{P_p + P_{ir}} \quad (16)$$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ถ้าภายในศูนย์ข้อมูลมีตู้เซิร์ฟเวอร์ขนาดปริมาณความร้อนคือ 10 kW และมีความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรม 0.6 m/s ผู้ออกแบบจำเป็นต้องออกแบบระบบปรับอากาศแบบผสมผสาน โดยต้องเลือกขนาดกำลังไฟฟ้าของตู้ปรับอากาศไม่ต่ำกว่า 21 kW ดังนั้นจากตารางที่ 5 สามารถเลือกตู้ปรับอากาศขนาดทำความเย็น 24 kW ก็มีประสิทธิภาพเพียงพอในการทำความเย็นให้กับตู้เซิร์ฟเวอร์ให้ทำงานได้ดี มีประสิทธิภาพมากที่สุด





ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมและตู้ปรับอากาศที่เหมาะสมกับปริมาณความร้อนต่างๆ

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)
7	แบบพื้นยก	-	1.375	292.93
			1.297	293.62
			1.239	295.72
			1.161	297.49
			1.072	298.11
			0.978	299.06
	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	0.872	292.79
			0.767	293.2
			0.697	294.04
			0.625	296.01
		In-row 32.2 kW	0.436	295.62

## ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)
8	แบบพ่นชก	-	1.375	292.67
			1.297	294.42
			1.239	296.81
			1.161	298.9
			1.072	299.72
	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	0.978	293.9
			0.872	293.96
			0.767	294.44
			0.697	295.49
			0.625	298.59
			In-row 32.2 kW	0.436
9	แบบพ่นชก	-	1.375	294.15
			1.297	296.35
			1.239	299.79
	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.161	293.94
			1.072	294.43
			0.978	294.94
			0.872	295.87
		In-row 32.2 kW	0.767	297.77
			0.697	294.13
			0.625	294.61
			0.436	299.28

## ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)	
10	แบบพื้นที่ยก	-	1.375	295.45	
			1.297	299.51	
	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.239	290.77	
			1.161	293.3	
			1.072	294.52	
			0.978	294.94	
			0.872	295.93	
			0.767	297.57	
			0.697	299.77	
			In-row 32.2 kW	0.625	295.78
In-row 36.5 kW	0.436	294.74			
11	แบบพื้นที่ยก	-	1.375	296.98	
			1.297	290.74	
	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.239	291.14	
			1.161	292.4	
			1.072	294.39	
			0.978	295.82	
			0.872	296.94	
			0.767	299.12	
			In-row 32.2 kW	0.697	296.05
			In-row 36.5 kW	0.625	296.92
	0.436	293.58			

## ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)			
12	แบบพ่นยก	-	1.375	299.06			
	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.297	290.96			
			1.239	291.47			
			1.161	293.04			
			1.072	294.57			
			0.978	296.83			
			0.872	298.15			
			In-row 32.2 kW	0.767	296.39		
				0.697	297.07		
				0.625	298.3		
			In-row 36.5 kW	0.436	294.25		
			13	แบบพ่นยก	-	1.375	299.81
				แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.297	291.29
1.239	291.99						
1.161	293.52						
1.072	295.17						
0.978	297.85						
0.872	299.22						
In-row 32.2 kW	0.767	297.31					
	0.697	298.05					
	0.625	298.97					
In-row 36.5 kW	0.436	298.44					

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมและตู้ปรับอากาศที่เหมาะสมกับปริมาณความร้อนต่างๆ (กรณีที่เป็นระบบปรับอากาศแบบผสมผสานทั้งหมด)

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)	
14	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.375	291.81	
			1.297	292.48	
			1.239	293	
			1.161	293.74	
			1.072	296.07	
			0.978	298.95	
			0.872	300	
			In-row 32.2 kW	0.767	298.27
				0.697	299
			In-row 36.5 kW	0.625	291.12
				0.436	299.58
			15	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW
1.297	292.19				
1.239	293				
1.161	294.02				
1.072	296.98				
0.978	299.92				
In-row 32.2 kW	0.872	297.42			
	0.767	299.53			
In-row 36.5 kW	0.697	297.55			
	0.625	298.56			
	0.436	300			

## ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)	
16	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.375	291.99	
			1.297	292.62	
			1.239	293.55	
			1.161	294.81	
			1.072	297.85	
			0.978	300	
			In-row 32.2 kW	0.872	298.99
				0.767	299.97
			In-row 36.5 kW	0.697	298.47
				0.625	299.69
In-row 56 kW	0.436	298.18			
17	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.375	292.54	
			1.297	293.25	
			1.239	294.13	
			1.161	295.54	
			1.072	298.3	
		In-row 32.2 kW	0.978	298.44	
			0.872	297.63	
		In-row 36.5 kW	0.767	298.53	
			0.697	299.73	
			0.625	298.65	
		In-row 56 kW	0.436	300	

## ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)
18	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.375	293.09
			1.297	293.92
			1.239	294.78
			1.161	296.1
			1.072	299.19
		In-row 36.5 kW	0.978	294.71
			0.872	296.93
			0.767	299.85
		In-row 56 kW	0.697	297.02
			0.625	297.36
			0.436	301.57
19	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.375	293.69
			1.297	294.66
			1.239	295.78
			1.161	296.81
		In-row 36.5 kW	1.072	295.53
			0.978	295.54
			0.872	298.2
		In-row 56 kW	0.767	297.33
			0.697	297.59
			0.625	297.93
			0.436	302.88

## ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Heat load (kW)	การปรับอากาศ	อุปกรณ์ทำความเย็น	ความเร็วของอากาศที่ผ่านแผ่นพรมมีค่าไม่น้อยกว่า(m/s)	อุณหภูมิสูงสุดของอากาศด้านหน้าตู้เซิร์ฟเวอร์(K)
20	แบบผสมผสาน	In-row 24 kW	1.375	294.28
			1.297	295.45
			1.239	296.35
			1.161	297.47
		In-row 36.5 kW	1.072	294.96
			0.978	296.58
			0.872	299.59
		In-row 56 kW	0.767	297.81
			0.697	298.2
			0.625	298.59
			0.436	304.13

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นางสาวเจษฎาภรณ์ ปริญดํากล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	16 สิงหาคม พ.ศ. 2531
สถานที่เกิด	อำเภอป้อมปราบศัตรูพ่าย จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี ๒๕๕๔ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)