



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบ 3 มิติในพื้นที่ปรับอากาศ

โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น

Numerical Study of Three-dimensional in Air-conditioned Spaces

using Linear and Non-linear Turbulence Models

โดย ดร.วรากรณ์ จันทสาโร

พฤษภาคม 2545

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบ 3 มิติในพื้นที่ปรับอากาศ

โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น

Numerical Study of Three-dimensional in Air-conditioned Spaces

using Linear and Non-linear Turbulence Models

ผู้วิจัย

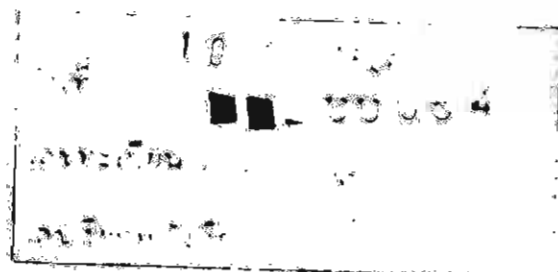
สังกัด

ดร. วรณัฏฐ์ จันทสาโร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



สนับสนุนโดยสำนักงบประมาณศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศ

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศ  
ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศ

๑. หนังสือเวียน เรื่อง อนุมัติโครงการวิจัย

๒. หนังสือเวียน เรื่อง อนุมัติโครงการวิจัย



## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบปรับอากาศมีบทบาทสำคัญกับผู้คนเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิภายในโลกสูงเพิ่มขึ้นทุกปี ทำให้สถานที่อาคารต่างๆ ต้องมีการติดตั้งระบบปรับอากาศภายในตัวอาคาร เพื่อให้ผู้คนที่อยู่ภายในอาคารรู้สึกสบายในการประกอบภารกิจ ซึ่งระบบปรับอากาศที่ดีนอกจากมีความสามารถในการทำความเย็นตามที่ต้องการแล้ว ยังต้องสามารถการกระจายของความเย็นให้ได้อย่างทั่วถึงด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการกระจายการไหลของอากาศภายในพื้นที่ปรับอากาศ เพื่อเป็นข้อมูลในการปรับปรุงระบบปรับอากาศให้มีการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในงานวิจัย ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งได้ปรับปรุงจากโปรแกรมที่มีอยู่แล้ว โดยมีการเพิ่มเติมสมการพลังงาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความรู้สึกเย็นสบายภายในพื้นที่ปรับอากาศ โดยใช้ค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจเป็นตัวแปรในวิเคราะห์ ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็ว อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของความปั่นป่วน ซึ่งในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน โดยแบบจำลองที่นำมาใช้วิเคราะห์ คือ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ  $k-\epsilon$  และ  $q-G$  และแบบไม่เชิงเส้น  $q-G$  ซึ่งพบว่า แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น  $q-G$  ให้ค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองมากที่สุด และได้ทำการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในพื้นที่ปรับอากาศที่มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันและมีการติดตั้งตำแหน่งของช่องลมที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าการกระจายความเย็นภายในอาคารให้มีความเหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน ได้แก่ ลักษณะของการใช้งานของแต่ละตำแหน่งพื้นที่ภายในอาคาร และกิจกรรมภายในอาคาร อีกทั้งตำแหน่งของช่องลมจ่ายกับช่องลมกลับ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการประหยัดค่าใช้จ่ายและพลังงานในการทำความเย็นในระบบปรับอากาศ

## **Abstract**

The air conditioning system is important nowadays because the world temperature is increasing every year. Almost every building is air-conditioned to help people feel comfortable. The good air conditioning should not only make the required cooling load but also have good thermal comfort distribution. The current work aims to study the airflow distribution in an occupied zone in order to improve the efficiency of the air conditioning system.

In the present work, the existing computational fluid dynamics software is developed for the thermal comfort analysis in an air-conditioning area by adding an energy equation. The variable called percentage dissatisfied is used for the analysis. This variable depends on velocities, temperature and turbulence intensity. Furthermore, different turbulence models have been studied to find the most suitable one for the air distribution study. The low-Reynolds number linear  $k$ - $\epsilon$  and  $q$ - $\zeta$ , and non-linear  $q$ - $\zeta$  models are used as turbulence closure. It is found that the prediction using the non-linear  $q$ - $\zeta$  model is the closest to the experimental data. The model is used to analyze the air distribution in air conditioning areas that have different work types and different positions of diffuser. It is found that the suitable air distribution depends on the work type of each position in the considered area, the activity type in the area and the position of a diffuser and a return grille. The mentioned factors have effect on cost and energy saving.

## คำนิยม

งานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้ เนื่องด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆ ฝ่ายดังนี้ คือ ศ.ดร.ปราโมทย์ เจริญทรัพย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันมีประโยชน์เกี่ยวกับการทำงานวิจัย ผศ.ดร.เอกชัย จันทสาโร อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง คุณวรพงศ์ พงศ์บุญชู สำหรับทักษะในการเขียนโปรแกรมที่ดี ผศ.ดร.ภูซังค์ อุทัยภาส ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผล สุดท้ายนี้ งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพข.)

## สารบัญ

|                                                    | หน้า |
|----------------------------------------------------|------|
| สารบัญ                                             | (1)  |
| สารบัญตาราง                                        | (2)  |
| สารบัญภาพ                                          | (3)  |
| สัญลักษณ์และคำย่อ                                  | (6)  |
| คำนำ                                               | 1    |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา                     | 1    |
| วัตถุประสงค์                                       | 3    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                          | 3    |
| การตรวจเอกสาร                                      | 4    |
| ความเป็นมาและการศึกษาการกระจายของการไหล            |      |
| ในบริเวณพื้นที่ที่มีการปรับอากาศ                   | 4    |
| การศึกษาการไหลโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข          | 6    |
| การศึกษาการกระจายของการไหลในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ |      |
| โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข                        | 7    |
| อุปกรณ์และวิธีการ                                  | 12   |
| อุปกรณ์                                            | 12   |
| วิธีการ                                            | 12   |
| หลักการและขั้นตอนในการวิเคราะห์                    | 12   |
| การศึกษาการกระจายของอากาศ                          | 23   |
| ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง                             | 43   |
| ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการไหล                       | 43   |
| ผลการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ  | 48   |
| วิจารณ์ผลการวิเคราะห์                              | 88   |
| สรุป                                               | 92   |
| ข้อเสนอแนะ                                         | 94   |
| เอกสารอ้างอิง                                      | 95   |
| ภาคผนวก                                            | 98   |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                 | หน้า |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ำ<br>k- $\epsilon$ | 16   |
| 2        | ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่ำ<br>q- $\zeta$    | 18   |
| 3        | รายละเอียดของข้อมูลในการวิเคราะห์ห้องสำนักงานขนาดเล็ก                           | 27   |
| 4        | ค่าสภาวะขอบเขตและค่าเริ่มต้นของสำนักงานขนาดเล็ก                                 | 28   |
| 5        | รายละเอียดของข้อมูลในการวิเคราะห์โรงยิมเนเซียม                                  | 34   |
| 6        | ค่าสภาวะขอบเขตและค่าเริ่มต้นของโรงยิมเนเซียม                                    | 35   |
| 7        | รายละเอียดของข้อมูลในการวิเคราะห์ที่พักโดยสาร                                   | 39   |
| 8        | ค่าสภาวะขอบเขตและค่าเริ่มต้นของที่พักโดยสาร                                     | 40   |
| 9        | ระยะเวลาในการวิเคราะห์ของแต่ละแบบจำลองการไหลของสำนักงาน                         | 44   |
| 10       | ค่าความเร็วเฉลี่ยในระนาบขอบเขตอาศัยที่ตำแหน่ง 9 ตำแหน่งของ<br>แต่ละแบบจำลอง     | 47   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                               | หน้า |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | เครื่องล้างอากาศ                                                              | 5    |
| 2      | โครงสร้างและขนาดของสำนักงานขนาดเล็ก                                           | 26   |
| 3      | ตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ในระนาบขอบเขตอาศัย 9 ตำแหน่ง                       | 29   |
| 4      | โครงสร้างและขนาดของสำนักงานขนาดเล็กที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2            | 32   |
| 5      | โครงสร้างและขนาดของโรงยิมเนเซียม                                              | 33   |
| 6      | โครงสร้างและขนาดของโรงยิมเนเซียมที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1               | 36   |
| 7      | โครงสร้างและขนาดของโรงยิมเนเซียมที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2               | 37   |
| 8      | โครงสร้างและขนาดของที่พักโดยสารที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1                | 41   |
| 9      | โครงสร้างและขนาดของที่พักโดยสารที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2                | 42   |
| 10     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1 ภายในสำนักงานในระบบ 3 มิติ | 51   |
| 11     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ภายในสำนักงานในรูปเวกเตอร์    | 52   |
| 12     | การกระจายของอุณหภูมิของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1 ภายในสำนักงานในระบบ 3 มิติ       | 53   |
| 13     | ความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบขอบเขตอาศัย                        | 54   |
| 14     | อุณหภูมิของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบขอบเขตอาศัย                              | 54   |
| 15     | อัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบขอบเขตอาศัย           | 55   |
| 16     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2 ภายในสำนักงานในระบบ 3 มิติ | 56   |
| 17     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ภายในสำนักงานในรูปเวกเตอร์    | 57   |
| 18     | การกระจายของอุณหภูมิของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2 ภายในสำนักงานในระบบ 3 มิติ       | 58   |
| 19     | ความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบขอบเขตอาศัย                        | 59   |
| 20     | อุณหภูมิของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบขอบเขตอาศัย                              | 59   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                        | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 21     | อัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบ<br>ขอบเขตอาศัย                | 60   |
| 22     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1 ภายใน<br>โรงยิมเนเซียมในระบบ 3 มิติ | 64   |
| 23     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ภายใน<br>โรงยิมเนเซียมในรูปเวกเตอร์    | 65   |
| 24     | การกระจายของอุณหภูมิของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1 ภายใน<br>โรงยิมเนเซียมในระบบ 3 มิติ       | 66   |
| 25     | ความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบขอบเขตอาศัย                                 | 67   |
| 26     | อุณหภูมิของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบขอบเขตอาศัย                                       | 67   |
| 27     | อัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบ<br>ขอบเขตอาศัย                | 68   |
| 28     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2 ภายใน<br>โรงยิมเนเซียมในระบบ 3 มิติ | 69   |
| 29     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ภายใน<br>โรงยิมเนเซียมในรูปเวกเตอร์    | 70   |
| 30     | การกระจายของอุณหภูมิของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2 ภายใน<br>โรงยิมเนเซียมในระบบ 3 มิติ       | 71   |
| 31     | ความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบขอบเขตอาศัย                                 | 72   |
| 32     | อุณหภูมิของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบขอบเขตอาศัย                                       | 72   |
| 33     | อัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบ<br>ขอบเขตอาศัย                | 73   |
| 34     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1 ภายใน<br>ที่พักโดยสารในระบบ 3 มิติ  | 78   |
| 35     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ภายใน<br>ที่พักโดยสารในรูปเวกเตอร์     | 79   |
| 36     | การกระจายของอุณหภูมิของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1 ภายใน<br>ที่พักโดยสารในระบบ 3 มิติ        | 80   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                       | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 37     | ความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบขอบเขตอาศัย                                | 81   |
| 38     | อุณหภูมิของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบขอบเขตอาศัย                                      | 81   |
| 39     | อัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจของช่องลมตำแหน่งที่ 1 ในระนาบ<br>ขอบเขตอาศัย               | 82   |
| 40     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2 ภายใน<br>ที่พักโดยสารในระบบ 3 มิติ | 83   |
| 41     | การกระจายของความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ภายใน<br>ที่พักโดยสารในรูปเวกเตอร์    | 84   |
| 42     | การกระจายของอุณหภูมิของช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2 ภายใน<br>ที่พักโดยสารในระบบ 3 มิติ       | 85   |
| 43     | ความเร็วเฉลี่ยของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบขอบเขตอาศัย                                | 86   |
| 44     | อุณหภูมิของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบขอบเขตอาศัย                                      | 86   |
| 45     | อัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจของช่องลมตำแหน่งที่ 2 ในระนาบ<br>ขอบเขตอาศัย               | 87   |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|            |   |                                                                             |
|------------|---|-----------------------------------------------------------------------------|
| $C_{E1}$   | = | ค่าคงที่ของพจน์แหล่งกำเนิด (source term) ในสมการ $\varepsilon$              |
| $C_{E2}$   | = | ค่าคงที่ของพจน์แหล่งรับ (sink term) ในสมการ $\varepsilon$                   |
| $C_\mu$    | = | ค่าคงที่ของแบบจำลองแบบความหนืดไหลวนเชิงเส้น                                 |
| $C_P$      | = | ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่                                            |
| $C_v$      | = | ค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่                                            |
| $C_{G1}$   | = | ค่าคงที่ของพจน์แหล่งกำเนิดในสมการ $G$                                       |
| $C_{G2}$   | = | ค่าคงที่ของพจน์แหล่งรับในสมการ $G$                                          |
| $D$        | = | พจน์การสลาย (dissipation term) ในสมการ $k$                                  |
| $K$        | = | พลังงานจลน์เฉลี่ย                                                           |
| $P$        | = | ความดัน                                                                     |
| $PD$       | = | อัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจ (percentage dissatisfied)                       |
| $Pr_t$     | = | ค่าพลังทึ่มเบอร์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl number)                  |
| $Re$       | = | เรย์โนลด์สทึ่มเบอร์                                                         |
| $Re_t$     | = | เรย์โนลด์สทึ่มเบอร์ความปั่นป่วน                                             |
| $S_{ij}$   | = | อัตราความเครียดเฉลี่ย                                                       |
| $S_\phi$   | = | พจน์แหล่งกำเนิดของ $\phi$                                                   |
| $T$        | = | อุณหภูมิ                                                                    |
| $U_p$      | = | ความเร็วในแกน $x$ ที่ตำแหน่ง $p$                                            |
| $V_{mea}$  | = | ความเร็วเฉลี่ยจากการวัด                                                     |
| $V_p$      | = | ความเร็วในแกน $y$ ที่ตำแหน่ง $p$                                            |
| $V_{pre}$  | = | ความเร็วเฉลี่ยจากการวิเคราะห์                                               |
| $W_p$      | = | ความเร็วในแกน $z$ ที่ตำแหน่ง $p$                                            |
| $\Theta_T$ | = | พลังงานรวม                                                                  |
| $\Theta$   | = | พลังงานภายใน                                                                |
| $f_{E1}$   | = | ค่าแดมป์ฟังก์ชัน (damping function) ของพจน์แหล่งกำเนิดในสมการ $\varepsilon$ |
| $f_{E2}$   | = | ค่าแดมป์ฟังก์ชันของพจน์แหล่งรับในสมการ $\varepsilon$                        |
| $f_\mu$    | = | ค่าแดมป์ฟังก์ชันของแบบจำลองเรย์โนลด์สทึ่มเบอร์ต่ำ $k-\varepsilon$ และ $q-G$ |
| $f_{G1}$   | = | ค่าแดมป์ฟังก์ชันของพจน์แหล่งกำเนิดในสมการ $G$                               |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|                      |   |                                                   |
|----------------------|---|---------------------------------------------------|
| $f_{\zeta 2}$        | = | ค่าแถมปีปึงฟังก์ชันของพจน์แหล่งรับในสมการ $\zeta$ |
| $h$                  | = | พลังงานเอนทาลปีจำเพาะ                             |
| $k$                  | = | พลังงานจลน์ปั่นป่วน                               |
| $k_T$                | = | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน                      |
| $p$                  | = | ความดัน                                           |
| $q$                  | = | รากที่สองของพลังงานจลน์ปั่นป่วน                   |
| $t$                  | = | เวลา                                              |
| $t_{ij}$             | = | เทนเซอร์ความเค้นจากความหนืด                       |
| $u_i$                | = | ตัวประกอบความเร็วของแต่ละแกน                      |
| $\overline{u_i}$     | = | ตัวประกอบความเร็วเรย์โนลด์                        |
| $x$                  | = | พิกัดแกน $x$                                      |
| $y$                  | = | พิกัดแกน $y$                                      |
| $z$                  | = | พิกัดแกน $z$                                      |
| $\delta_{ij}$        | = | โครเนคเกอร์เดลต้า (kronecker delta)               |
| $\varepsilon$        | = | อัตราการกระจายของพลังงานจลน์ปั่นป่วน              |
| $\mu$                | = | ค่าความหนืดพลศาสตร์                               |
| $\mu_t$              | = | ค่าความหนืดไหลวนปั่นป่วน                          |
| $\Omega_{ij}$        | = | เทนเซอร์การหมุนวนเฉลี่ย                           |
| $\phi$               | = | ตัวแปรสเกลาร์                                     |
| $\rho$               | = | ค่าความหนาแน่น                                    |
| $\Psi$               | = | พจน์แหล่งกำเนิด                                   |
| $\sigma_\varepsilon$ | = | ค่าคงที่แบบจำลอง                                  |
| $\sigma_k$           | = | ค่าคงที่แบบจำลอง                                  |
| $\sigma_T$           | = | ค่าคงที่แบบจำลอง                                  |
| $\tau_{ij}$          | = | เทนเซอร์ความเค้น                                  |
| $\zeta$              | = | ตัวแปรการสลาย                                     |
| $\nu$                | = | ค่าความหนืดจลน์                                   |

# การศึกษาการหมุนเวียนของอากาศและการปรับอากาศในพื้นที่ปิดโดยใช้วิธีการคำนวณ โดยใช้คอมพิวเตอร์และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น

## Computational Study of Ventilation and Air Conditioning in Closed Space using Non-linear Turbulence Model

### คำนำ

การศึกษาการกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศเป็นวิธีหนึ่งในการพัฒนาระบบปรับอากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากการศึกษาการกระจายของอากาศนั้นทำให้สามารถเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ เช่น การกระจายความเย็นและความสบาย ซึ่งมีผลกระทบต่อความรู้สึก สุขภาพและประสิทธิภาพการทำงานของผู้นที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ เพื่อที่จะได้นำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ไปทำการปรับปรุงระบบปรับอากาศให้มีการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในงานวิจัยนี้จะพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาทำการวิเคราะห์การไหลในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งเป็นการจำลองการไหลที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ โดยไม่ต้องทำการทดสอบจริง เพื่อลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ และสามารถวิเคราะห์การกระจายของอากาศที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันได้

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบปรับอากาศมีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิของโลกสูงเพิ่มขึ้นทุกปี ระบบปรับอากาศจึงมีส่วนช่วยให้ผู้นที่อยู่อาศัยรู้สึกสบายในการประกอบภารกิจภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ ดังนั้นอาคารสำนักงาน สถานที่ต่าง ๆ หรืออาคารบ้านเรือนส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะมีระบบปรับอากาศเป็นส่วนประกอบหรือปัจจัยของตัวอาคาร โดยที่ระบบปรับอากาศที่ดีนอกจากมีความสามารถในการทำความเย็นได้ตามที่ต้องการแล้ว ภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศจะต้องมีการกระจายของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศให้สม่ำเสมอและทั่วถึง ซึ่งมีผลกระทบต่อความสบาย สุขภาพ และประสิทธิภาพในการทำงานของผู้นในบริเวณปรับอากาศ และทางด้าน

อุตสาหกรรมยังมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรอีกด้วย ดังนั้นการศึกษาการกระจายตัวของอากาศในระบบปรับอากาศจึงเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนั้นข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการกระจายของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศยังสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งในการติดตั้งระบบปรับอากาศที่เหมาะสมในสถานที่ที่มีขนาดและลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันได้ด้วย

การศึกษาการกระจายของอากาศได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่นิยมใช้ส่วนใหญ่คือ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  $k-\epsilon$  โดยแบบจำลองการไหลนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นแบบจำลองเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูงและแบบจำลองเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ ซึ่งแบบจำลองการไหลเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูงนั้นมีผลการคำนวณที่บริเวณชั้นขีดผิวที่ไม่ถูกต้องแม่นยำนัก เนื่องจากการใช้สมการ วอลล์ฟังก์ชัน (wall function) ในการประมาณค่าที่บริเวณชั้นขีดผิว แต่แบบจำลองการไหลเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำจะคำนวณผลที่บริเวณชั้นขีดผิวโดยไม่ใช้สมการวอลล์ฟังก์ชัน แต่จะใช้สมการการเคลื่อนที่ในการวิเคราะห์การไหลที่บริเวณชั้นขีดผิวแทน จึงทำให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่า

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบการกระจายของอากาศโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ  $k-\epsilon$  ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศ และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น  $q-\zeta$  ซึ่งแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้นนั้นเป็นแบบจำลองที่ให้ค่าผลเฉลยที่มีค่าที่ถูกต้องมากกว่าแบบจำลองแบบปั่นป่วนเชิงเส้น แต่ยังไม่เคยมีการนำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำผลเฉลยจากแบบจำลองแต่ละแบบมาทำการเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์การกระจายของอากาศ โดยในการวิเคราะห์พื้นที่ปรับอากาศนั้นจะใช้รูปแบบของพื้นที่ปรับอากาศที่มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ สำนักงานขนาดเล็ก โรงยิมเนเซียมและที่พักโดยสาร และในแต่ละพื้นที่ปรับอากาศก็จะมีวิเคราะห์การติดตั้งของระบบปรับอากาศที่แตกต่างกันด้วย เพื่อที่จะศึกษาและเข้าใจการจำลองการไหลของอากาศที่มีรูปแบบการกระจายของอากาศที่แตกต่างกัน โดยข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ได้นี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงระบบปรับอากาศให้การทำงานได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณให้สามารถวิเคราะห์การกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น
2. เพื่อจำลองลักษณะการไหลของอากาศในพื้นที่ปรับอากาศที่มีลักษณะการใช้งานและตำแหน่งในการติดตั้งของระบบปรับอากาศที่แตกต่างกัน
3. เพื่อสามารถวิเคราะห์หาแบบจำลองการไหลที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการศึกษาการกระจายของอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ
4. เพื่อนำข้อมูลทีวิเคราะห์ได้ไปใช้ในการปรับปรุงระบบปรับอากาศให้มีการทำงานได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ เพื่อการประหยัดพลังงาน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจในหลักการของการกระจายของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ แบบ 3 มิติ ที่เป็นการไหลแบบไม่สามารถอัดตัวได้
2. ทำให้ได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการวิเคราะห์การกระจายของความเร็ว อุณหภูมิ และค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจ ภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศที่มีขนาดและลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันได้
3. ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปรับปรุงระบบปรับอากาศให้มีการกระจายของอากาศที่มีความรู้สึกเย็นสบายได้อย่างทั่วถึงและให้เกิดประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า เพื่อที่จะได้ประหยัดค่าใช้จ่ายและพลังงานในการใช้งานมากที่สุด

## การตรวจเอกสาร

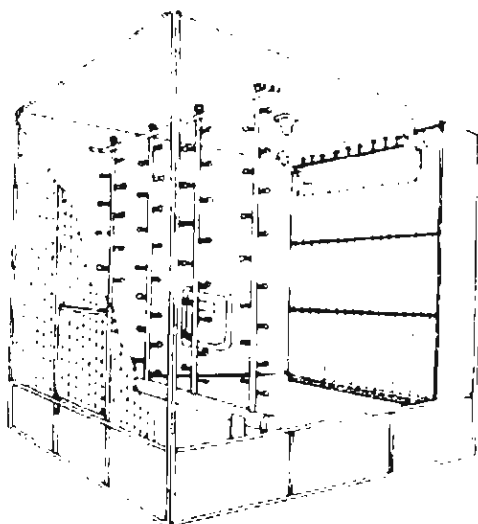
### ความเป็นมาและการศึกษาการกระจายของอากาศไหลในบริเวณพื้นที่ที่มีการปรับอากาศ

การปรับอากาศเป็นการกระทำต่ออากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามความต้องการของพื้นที่นั้นๆ ซึ่งการปรับอากาศนั้นเริ่มแรกถูกพัฒนาไปใช้ในวงการอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่เพื่อต้องการให้ได้อุณหภูมิและการกระจายของอากาศภายในโรงงานตามที่ต้องการ เพื่อให้เครื่องจักรทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และมีส่วนทำให้คนงานรู้สึกสบายขึ้น จากการสำรวจพบว่าในโรงงานที่มีการปรับอากาศ คนงานจะมีความทำงานที่ผิดพลาดน้อยลง มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น และอาจมีผลกับสินค้าบางชนิดที่ต้องควบคุมปริมาณอากาศเพื่อให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น จนภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 1 จึงได้มีการพัฒนาระบบปรับอากาศเพื่อความสะอาดสบายของมนุษย์

การปรับอากาศได้มีการพัฒนามาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1822 โดย Cagniard ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับสภาวะวิกฤตของแก๊สฮีเธอร์ และในปีถัดมา Davy และพี่ชายของเขา Faraday ได้เป็นบุคคลแรกที่สามารทำให้ไอแอมโมเนีย กลายเป็นแอมโมเนียเหลวได้สำเร็จ ต่อมาในปี ค.ศ. 1824 Carnot ได้พบหลักการเบื้องต้นของ วัฏจักรการทำความเย็น และในปีเดียวกัน ทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ของเขาก็ได้ถูกนำออกมาเผยแพร่ สิ่งที่ได้ถือได้ว่าเป็นเครื่องปรับอากาศเครื่องแรกคือ สิ่งประดิษฐ์ที่ Mc.Crety ได้ประดิษฐ์ขึ้นและได้จดทะเบียนลิขสิทธิ์ไว้ในปี ค.ศ. 1897 ระบบของเขาเรียกว่า เครื่องล้างอากาศ (air washer) โดยระบบการทำความเย็นคือการฉีดน้ำให้เป็นละอองเข้าไปในอากาศ ส่วน Carrier เป็นบุคคลแรกที่สามารควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ โดยที่เขาประสบความสำเร็จในการปรับอากาศในโรงพิมพ์ด้วยระบบเครื่องล้างอากาศที่ทำให้อากาศเย็นลงและอึดตัวที่จุดน้ำค้าง เมื่อปี ค.ศ. 1906 และปี ค.ศ. 1911 Carrier ก็ได้เสนอทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ของเขาต่อสมาคมวิศวกรเครื่องกลอเมริกัน ต่อจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาจนกลายมาเป็นเครื่องปรับอากาศ ซึ่งมีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนา และนำเอาระบบปรับอากาศมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านอุตสาหกรรม และด้านที่อยู่อาศัยและสำนักงาน ซึ่งได้มีการพัฒนาระบบปรับอากาศต่อมาเรื่อยๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและการใช้งานสูงสุด และเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ใช้ระบบปรับอากาศ โดยได้มีการพัฒนาด้านต่างๆ หลายด้าน เช่นพัฒนาระบบภายในเครื่องปรับอากาศให้มีประ

ประสิทธิภาพความเย็นสูง และมีต้นทุนการผลิตที่ลดลง เพื่อจะได้มีการใช้งานที่แพร่หลายมากยิ่งขึ้น รวมทั้งมีการพัฒนาระบบการจ่ายลม ระบบไฟฟ้า และระบบอื่นๆ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพที่ 1 เครื่องล้างอากาศ

ที่มา : การปรับอากาศ (2533)

การพัฒนาระบบปรับอากาศได้มีมาจนถึงปัจจุบัน รวมถึงการศึกษาการกระจายของอากาศภายในบริเวณปรับอากาศ ซึ่งการพัฒนาศึกษาค้นคว้าทางด้านนี้เพื่อวิเคราะห์ว่ามีการกระจายของอากาศที่สม่ำเสมอและทั่วถึงหรือไม่ เริ่มแรกเป็นการศึกษาการระบายและการถ่ายเทของอากาศภายในระบบที่จะศึกษา เริ่มขึ้นช่วง ปีค.ศ.1950-1960 โดย Kostel และ Tuve (1955) เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในบริเวณระบบที่มีการออกแบบการระบายของอากาศ ซึ่งข้อมูลนั้นนำมาวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของการกระจายของอากาศภายในระบบ และเริ่มเป็นแนวทางในการกำหนดกฎเกณฑ์คุณภาพของอากาศภายในระบบที่มีการออกแบบ

Ikeda (1986) ได้ทำการศึกษาคุณภาพของอากาศภายในอาคารสำนักงานที่มีการปรับอากาศ โดยทำการวิเคราะห์โดยการวัด ซึ่งศึกษาสิ่งเจือปนและอัตราการไหลภายในอาคาร โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (hotwire anemometer) และอุปกรณ์วัดสิ่งเจือปนของอากาศ แต่สามารถทำการวัดได้ค่าเพียงหยาบๆ เท่านั้น

Jouini และคณะ (1994) ได้ทำการวัดคุณสมบัติของอากาศที่ไหลภายในห้องแบบมีฉากกั้น และไม่มีฉากกั้น โดยทำการวัดความเร็วของอากาศ และรูปแบบการไหล โดยได้ทำการทดลองในห้องทดสอบที่มีการกำหนดค่าสภาวะแรกเริ่มไว้ก่อน แล้วจึงทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราความเร็วของลม (omni-directional anemometer) และเครื่องมือวิเคราะห์การไหล (DANTEC multiflow analyser) วัดที่ตำแหน่งภายในห้องในแนวตั้งรวมทั้งหมด 21 ตำแหน่งแต่ทำการวิเคราะห์เพียงแต่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal) เท่านั้น

### การศึกษาการไหลโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนในระยะแรกนั้นมีปัญหาหลักคือระยะเวลาในการคำนวณค่าเรย์โนลด์จากแบบจำลองความเค้นเรย์โนลด์ จนกระทั่งเริ่มมีการใช้คอมพิวเตอร์ความเร็วสูงในการคำนวณ จึงสามารถแก้ปัญหาในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนได้มากขึ้น แต่การไหลแบบที่มีการถูกรบกวนนั้นยังไม่สามารถทำนายผลให้มีค่าที่ถูกต้องได้

จนในช่วงกลางของ ค.ศ. 1960 เริ่มมีการพัฒนาวิธีการโดยใช้สมการอนุพันธ์ควบคุม (governing partial differential equation, PDE) โดยช่วงแรกจะใช้สมการการเคลื่อนที่เฉลี่ยในการคำนวณ จนในปี ค.ศ. 1968 มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดจึงมีการประชุมเพื่อออกแบบวิธีในการทำนายผลของการไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณชั้นขีดผิวให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยทำการปรับปรุงสมการ PDE ให้มีการคำนวณค่าผลเฉลยได้ถูกต้องมากกว่าวิธีอินทิกรัล (integral method) และให้รูปแบบของการคำนวณของแบบจำลองมีความละเอียดมากขึ้น เพื่อที่จะสามารถทำนายการไหลแบบปั่นป่วนที่มีรูปแบบความซับซ้อน ซึ่งยากลำบากต่อการทดลองจากการวัด

ในช่วงต่อมาระบบคอมพิวเตอร์เริ่มมีการพัฒนาจนสามารถแก้สมการนาเวียร์-สโตกแบบ 3 มิติที่ขึ้นกับเวลา สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการเคลื่อนที่แบบลาร์จสเกล (large-scale motion) โดยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้วิเคราะห์มีวิธีในการแก้สมการอนุพันธ์หลายแบบ ได้แก่

1. แบบจำลองสมการศูนย์ (zero-equation model) เป็นแบบจำลองที่ใช้เพียงสมการ PDE สำหรับความเร็วเฉลี่ยเท่านั้นและไม่มีสมการ PDE แบบปั่นป่วน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ง่ายในการวิเคราะห์และใช้จำนวนพจน์ที่น้อยในการคำนวณและให้ผลทำนายที่ดีในบริเวณชั้นที่บาง แต่ไม่

สามารถที่จะศึกษาการไหลที่มีการแยกไหลหรือหมุนวนและคำนวณได้เพียงค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์เท่านั้น

2. แบบจำลองสมการเดียว (one-equation model) เป็นแบบจำลองที่ใช้สมการ PDE ที่มีความสัมพันธ์กับสเกลของความเร็วปั่นป่วน (turbulence velocity scale) ซึ่งมีการเพิ่มสมการ PDE ของการไหลเฉลี่ยด้วย โดยแบบจำลองจะมีการใช้รูปแบบสมการพลังงานจลน์ปั่นป่วนในการคำนวณหาค่าความเร็วปั่นป่วน ซึ่งแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การกระจายของค่าสเกลความยาว แต่ส่วนมากไม่นิยมใช้

3. แบบจำลองสองสมการ (two-equation model) เป็นแบบจำลองที่มีการเพิ่มสมการ PDE ที่มีความสัมพันธ์กับสเกลของความยาวปั่นป่วน (turbulence length scale) ในการคำนวณอีก 2 สมการ ซึ่งแบบจำลองนี้ที่นิยมใช้กันเป็นจำนวนมาก เพราะง่ายในการวิเคราะห์เพียงกำหนดค่าสภาวะขอบเขตที่ต้องการและให้ค่าผลเฉลยที่ถูกต้องด้วย แต่จะให้ผลเฉลยที่ไม่ถูกต้องมากในกรณีที่มีการไหลที่ซับซ้อนมาก เช่น การไหลแบบหมุนวน

4. แบบจำลองสมการความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress-equation model) เป็นแบบจำลองที่ใช้สมการ PDE ที่มีความสัมพันธ์กับเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์ทั้งหมดและสเกลความยาว (length scale) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการคำนวณมากที่สุดแบบจำลองข้างต้นโดยให้ผลเฉลยที่มีความถูกต้องและสามารถคำนวณหาค่าความเค้นเรย์โนลด์ได้ทุกค่า อีกทั้งสามารถคำนวณการไหลที่ซับซ้อนได้ดี แต่ใช้ระยะเวลาในการคำนวณสูงและไม่เป็นที่นิยมใช้เท่ากับแบบจำลองสมการคู่

แบบจำลองข้างต้นนั้นเป็นแบบจำลองที่มีการใช้สมการเรย์โนลด์ในการคำนวณความปั่นป่วนและเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยแบบจำลองที่นิยมใช้มากในการศึกษาการไหลคือแบบจำลองสองสมการ ถึงแม้ว่ามีผู้วิจัยบางท่านระบุว่าแบบจำลองสมการความเค้นเรย์โนลด์นั้นให้ผลเฉลยที่ถูกต้องมากกว่าก็ตาม

### การศึกษาการกระจายของการไหลในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การศึกษาการกระจายของอากาศในบริเวณระบบปรับอากาศโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นการใช้สมการการไหล ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ

เพื่อลดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ การศึกษาการกระจายของอากาศโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น Nielsen (1974) ได้ทำการศึกษาการไหลของอากาศแบบ 2 มิติ ไหลผ่านระนาบภายในห้อง โดยใช้สมการการไหลที่เขียนอยู่ในรูป stream function และ vorticity มาใช้ในการแก้ปัญหา พบว่าการกระจายของอากาศที่คำนวณได้โดยรวมมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ยกเว้นบริเวณชั้นขีดผิว เนื่องจากมีการสมมติการไหลให้เป็นการไหลที่ปราศจากความหนืด

ต่อมามีการใช้สมการนาเวียร์-สโตก (Navier-Stokes equation) ในการวิเคราะห์การกระจายของของไหล เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาให้ได้ถูกต้องตามความเป็นจริงมากขึ้น ซึ่งต่อมาการศึกษาการกระจายของอากาศในบริเวณปรับอากาศ พบว่าอากาศที่ไหลนั้นมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน จึงมีการนำเอาแบบจำลองการไหลแบบสองสมการมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งแบบจำลองที่นิยมใช้คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- $\epsilon$  โดยสามารถแยกได้ 2 แบบ คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูง k- $\epsilon$  กับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ k- $\epsilon$

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ถูกใช้ในระยาะแรกๆ คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูง k- $\epsilon$  โดยแบบจำลองการไหลนี้ใช้สมการวอลล์ฟังก์ชัน (wall function) ในการคำนวณที่บริเวณชั้นขีดผิว เพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์ อาทิเช่น

Murakami (1987) ได้ทำการศึกษาการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด ซึ่งทำการวิเคราะห์ลักษณะการไหลภายในห้อง 6 รูปแบบที่มีการไหลที่แตกต่างกัน โดยเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกัน

Qingyan (1988) ได้ทำการศึกษาการไหลและคุณภาพของอากาศภายในห้อง โดยมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ACCURACY ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์พลังงาน โดยทำการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ การกระจายของอากาศที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะได้ค่าที่ใกล้เคียงในกรณีที่อุณหภูมิภายในคงที่เท่านั้น

AWBI (1989) ได้ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายการกระจายความเร็วของอากาศ และอุณหภูมิภายในห้อง พบว่าผลการคำนวณที่บริเวณชั้นขีดผิวมีค่าคลาดเคลื่อนจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากการใช้สมการวอลล์ฟังก์ชันประมาณค่าที่บริเวณชั้นขีดผิว

Yaghoubi และคณะ (1995) ศึกษาการเคลื่อนที่ของอากาศและสิ่งเจือปนในอากาศ โดยเป็น การทำนายการไหลของอากาศ การระบายและคุณภาพของอากาศในสำนักงาน โดยมีภาระความร้อนจากกำแพงที่มีความร้อนมาจากระบบท่อ โดยมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ EXACT3 ซึ่งเป็น โปรแกรมผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) แต่สามารถแสดงผลเฉลยออกมาได้เพียงแค่ 2 มิติเท่านั้น

Said และคณะ (1995) ได้ศึกษาการกระจายอากาศภายในห้องโดยใช้โปรแกรม EXACT3 ซึ่งเป็นโปรแกรมผลต่างสืบเนื่อง ทำนายการกระจายของความเร็ว และอุณหภูมิของอากาศ เทียบ กับค่าข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยมีการวิเคราะห์ภาวะของห้องทดสอบ 2 แบบ คือ แบบอุณหภูมิคงที่ (isothermal) กับแบบอุณหภูมิไม่คงที่ (nonisothermal) ซึ่งผลจากการคำนวณการไหลแบบ อุณหภูมิคงที่มีค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แต่ผลจากการคำนวณการไหลแบบ อุณหภูมิไม่คงที่มีค่าที่ไม่ตรงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากนัก ซึ่งค่าที่ไม่ตรงกันอาจเนื่องมาจาก ความยากและซับซ้อนของการไหลของอากาศแบบอุณหภูมิไม่คงที่

Chow และ Fung (1996) ศึกษาการไหลของอากาศภายในบริเวณพื้นที่ระบบปรับอากาศใน 6 สถานที่ที่แตกต่างกัน เช่น สำนักงาน ที่จอดรถ และโรงยิม พบว่าการกระจายของอากาศที่คำนวณได้ นั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์สจำนวนสูง  $k-\epsilon$  จะให้ ผลการคำนวณในบริเวณชั้นขีดผิวที่ไม่ถูกต้องแม่นยำมากนัก เนื่องจากการใช้สมการวอลล์ฟังก์ชัน ประมาณค่าที่บริเวณชั้นขีดผิว ต่อมาจึงมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส จำนวนต่ำ  $k-\epsilon$  มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนแทน เนื่องจากแบบจำลองนี้จะ คำนวณค่าในบริเวณชั้นขีดผิวโดยไม่ใช้สมการวอลล์ฟังก์ชันในการประมาณค่า แต่จะใช้สมการการ เคลื่อนที่ของ  $k$  และ  $\epsilon$  ในการวิเคราะห์การไหลที่บริเวณชั้นขีดผิวแทนจึงทำให้ผลการคำนวณที่ได้มี ค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น อาทิเช่น

Chen และคณะ (1991) ศึกษาการกระจายของความเร็วของอากาศ อุณหภูมิ และสิ่งปลอมปน ภายในสำนักงาน ซึ่งมีค่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการกระจายของอากาศหลายค่า เช่น ผลกระทบจาก รูปทรงและขนาดของช่องลม และอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านช่องลม ผลการคำนวณ ที่ได้พบว่าผลกระทบจากรูปทรงและขนาดของช่องลมมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกระจายของอากาศ

ภายในห้อง แต่อัตราการไหลนั้นมีผลต่อการกระจายของอากาศ ต่อมาได้ทำการวิเคราะห์การไหลและอุณหภูมิภายในห้องที่มีลักษณะการติดตั้งของช่องลมที่แตกต่างกัน 6 รูปแบบ ผลการวิเคราะห์พบว่า ตำแหน่งและชนิดของการติดตั้งมีผลต่อการกระจายของอากาศภายในห้อง และการศึกษาข้างต้นทำให้สามารถหาดำแหน่งในการติดตั้งช่องลมที่เหมาะสมกับลักษณะของห้องได้

ในประเทศไทยนั้นมีการพัฒนาและวิจัยปรับปรุงในสาขานี้ไม่รวดเร็วและมากมายเท่าประเทศในแถบยุโรปและอเมริกา โดยได้มีการพัฒนาระบบปรับอากาศในด้านต่างๆ เช่น การพัฒนาเครื่องปรับอากาศหรือระบบปรับอากาศให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การพัฒนาออกแบบให้มีการเลือกระบบปรับอากาศที่มีการใช้งานที่เหมาะสมกับสถานที่ที่ใช้งานและคุณภาพของอากาศภายในอาคาร รวมถึงทางด้านการกระจายของอากาศภายในบริเวณปรับอากาศ ซึ่งด้านการกระจายของอากาศโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์นั้นก็ได้มีการศึกษาวิจัยด้วย อาทิเช่น เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์ และมานิช กิจเจริญศักดิ์กุล (1996) ซึ่งศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความเร็วของอากาศแบบ 2 มิติ ภายในบริเวณปรับอากาศ เพื่อทำการพิจารณาหาดำแหน่งการติดตั้งเครื่องปรับอากาศได้อย่างเหมาะสมที่สุดโดยกำหนดให้แหล่งกำเนิดความร้อนที่มีเป็นแบบจุดกระจายในบริเวณปรับอากาศ ส่วนในการคำนวณได้ใช้สมการความต่อเนื่อง สมการการเคลื่อนที่ และสมการพลังงาน มาคำนวณโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) และใช้การแก้สมการด้วยวิธีการกระทำซ้ำโดยตรง (direct iteration) สำหรับสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น และวิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gauss elimination method) สำหรับสมการที่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์นี้ไม่คำนึงถึงแรงลอยตัว ผลที่ได้แสดงออกมาเป็นรูปภาพฟลักของเวกเตอร์ความเร็วและอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ แต่ทำการวิเคราะห์เพียง 2 มิติเท่านั้น

จากการตรวจสอบเอกสารในข้างต้น พบว่าแบบจำลองการไหลแบบสองสมการเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ  $k-\epsilon$  นั้นให้ผลที่มีค่าที่ถูกต้องน่าพอใจ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้ในการคำนวณการกระจายของไหลที่มีชื่อเรียกว่า โปรแกรม BOFFIN (Jones, 1988) มาทำการพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ 2 รูปแบบ คือ วิเคราะห์แบบจำลองการไหล โดยในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำมาทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองการไหลแบบสองสมการแบบต่างๆ ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์หาผลเฉลยที่น้อยและให้ค่าผลเฉลยที่มีความ

ถูกต้องกว่าแบบจำลองการไหลแบบเชิงเส้น และหลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์การกระจายของอากาศภายในพื้นที่ปรับอากาศที่มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สำนักงาน โรงยิมเนเซียม และที่พักโดยสาร โดยในการวิเคราะห์แต่ละสถานที่ได้มีการวิเคราะห์ตำแหน่งในการติดตั้งของช่องลมที่แตกต่างกันด้วย เพื่อจะได้ศึกษาและเข้าใจการจำลองการไหลของอากาศที่มีรูปแบบการกระจายของอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละแบบนั้นก็จะมีผลกระทบต่อผู้ที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศนั้นที่แตกต่างกันออกไป เพื่อจะได้สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปทำการปรับปรุงการติดตั้งตำแหน่งของช่องลมให้มีการกระจายของความเย็นได้อย่างทั่วถึงและก่อให้เกิดประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า เพื่อที่จะได้ประหยัดค่าใช้จ่ายและพลังงานในการทำความเย็นมากที่สุด

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้หน่วยประมวลผลกลางแบบเพนเทียมทรีโปรเซสเซอร์ 1 จิกกะเฮิร์ตซ์ (PENTIUM 3 processor 1 GHz) หน่วยความจำหลัก 30 จิกกะไบท (GB) หน่วยความจำ (RAM) 256 เมกกะไบท (MB)
2. เครื่องพิมพ์ชนิดใช้แสงเลเซอร์ ยี่ห้อฮิวเลตต์แพคการ์ด เลเซอร์เจ็ต 1100 (Hewlett Packard Laserjet 1100)
3. โปรแกรมภาษาฟอร์แทรนเพาเวอร์สเตชันรุ่น 4.0 (Fortran Powerstation version 4.0)
4. โปรแกรมวิชวลซีพลัสพลัสรุ่น 6.0 (Visual C++ version 6.0)

### วิธีการ

ในการศึกษาการกระจายของอากาศภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศนั้นมีวิธีในการวิเคราะห์หลายแบบ เช่น การทดสอบจริงด้วยการวัด และ การใช้แบบจำลองในการทดสอบจริง รวมถึงการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองการไหล ซึ่งแต่ละวิธีนั้นต่างก็มีข้อดีที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับรูปแบบของความต้องการในการศึกษาและปัจจัยอื่นๆ เช่น ระยะเวลา ค่าใช้จ่าย และความซับซ้อนของการไหล ซึ่งการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์นั้นก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการศึกษาการกระจายของอากาศ ดังนั้นงานวิจัยในปัจจุบันจึงมีการศึกษาการกระจายของอากาศโดยวิธีนี้มากขึ้น รวมถึงการศึกษาการกระจายของอากาศในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งในการศึกษาสามารถแยกเป็นองค์ประกอบได้ดังนี้

### หลักการและขั้นตอนในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการกระจายของอากาศภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ โดยได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้ในการ

คำนวณการกระจายของของไหล โปรแกรม BOFFIN โดยที่ผู้เขียนโปรแกรมเริ่มแรกคือ Jones (1988) โปรแกรมนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบปริมาตรจำกัดในการแก้ระบบสมการและสามารถคำนวณกริดแบบ 3 มิติ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ จึงมีการเพิ่มเติมสมการพลังงาน (energy equation) เข้าไปในระบบสมการ เพื่อที่จะสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิภายในสำหรับไปใช้ในการวิเคราะห์ และนำค่าอุณหภูมินี้ไปใช้ในการคำนวณค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจ (percentage dissatisfied, PD) เพื่อไปใช้ในการศึกษาการกระจายของอากาศ

## 1 สมการหลักในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ครั้งนี้จะทำการกำหนดให้อากาศที่ไหลภายในพื้นที่ปรับอากาศเป็นการไหลแบบไม่สามารถอัดตัวได้ และปั่นป่วนในระบบ 3 มิติ โดยสมการควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ สมการนาเวียร์-สโตก (Navier-Stokes equation) และสมการพลังงาน ดังนี้

### 1.1 สมการความต่อเนื่อง (continuity equation)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

### 1.2 สมการโมเมนตัม (momentum equation)

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_i + \tau_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

โดยที่  $p$  เป็นค่าความดัน  $\tau_i$  และ  $\tau_i$  เป็นค่าความเค้นจากการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วนตามลำดับ สำหรับการไหลแบบนิวโทเนียน (newtonian fluid) ซึ่งจะมีค่าความหนืดคงที่ และไม่สามารถอัดตัวได้

$$\tau_i = \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right]$$

ซึ่ง  $\mu$  เป็นค่าความหนืดของการไหล และ  $\delta_{ij}$  เป็นค่าไครเนกเกอร์ เดลต้า (kronecker delta) โดย  $\delta_{ij}$  จะมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับ  $i \neq j$  และ มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับ  $i = j$

### 1.3 สมการพลังงาน (energy equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i e_T) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{k_T}{c_v} + \frac{\mu_i}{Pr_i} \right) \frac{\partial e_T}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (t_i + \tau_i)] - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i P) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{k_T}{c_v} + \frac{\mu_i}{Pr_i} \right) \frac{\partial}{\partial x_i} (K + k) \right] \end{aligned}$$

โดยที่  $k_T$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และ  $Pr_i$  เป็นค่าพลังทึ่มเบอร์ของความปั่นป่วน (Prandtl number) กำหนดให้เท่ากับ 0.91 และ  $e_T$  เป็นค่าพลังงานรวม โดยเท่ากับ

$$e_T = e + K + k$$

โดยที่  $e$  เป็นค่าพลังงานภายใน ซึ่งเท่ากับ  $e = C_v T$  และ  $K$  เป็นค่าพลังงานจลน์เฉลี่ย

## 2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแบบจำลองการไหลแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งในแต่ละแบบจำลองมีสมการที่ใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกัน ดังนี้

## 2.1 แบบจำลองแบบเชิงเส้นเรย์โนลด์สแบบบีร์ด้า k-ε

จากการประมาณของ Boussinesq (1877) นั้น กำหนดให้ค่าเทนเซอร์ของความเค้นเรย์โนลด์ส (Reynolds-stress tensor,  $\tau_{ij}$ ) มีค่าเท่ากับ

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

โดยที่กำหนดให้ค่าความหนืดหมุนวน (eddy viscosity) อยู่ในพจน์ของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน  $k$  และค่าอัตราการกระจายของพลังงานจลน์ปั่นป่วน  $\epsilon$

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

ซึ่งค่า  $k$  และ  $\epsilon$  จะคำนวณจากการแก้สมการการเคลื่อนที่ของ  $k$  และ  $\epsilon$

$$\rho \left[ \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} \right] = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho(\epsilon + D) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\}$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_i} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} + f_{\epsilon 1} C_{\epsilon 1} \tau_{ij} \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho f_{\epsilon 2} C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \rho E$$

โดยในสมการการเคลื่อนที่ของ  $k$  ที่พจน์ทางด้านขวาของสมการนั้น พจน์แรกเป็นพจน์การผลิต (production term) พจน์ที่ 2 เป็นพจน์การสลาย (dissipation term) พจน์ที่ 3 เป็นพจน์การแพร่ (diffusion term)

ส่วนในสมการการเคลื่อนที่ของ  $\varepsilon$  ที่พจน์ทางด้านขวาของสมการนั้น พจน์แรกเป็นพจน์การแพร่ (diffusion term) พจน์ที่ 2 เป็นพจน์การผลิต (production term) พจน์ที่ 3 เป็นพจน์การทำลาย (destruction term)

ซึ่งค่าคงที่ต่างๆในแบบจำลองใช้ค่าคงที่ของ Launder และ Sharma (1974) ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ k- $\varepsilon$

| ค่าคงที่             | ค่าที่กำหนด                                                |
|----------------------|------------------------------------------------------------|
| $\sigma_k$           | 1.0                                                        |
| $\sigma_\varepsilon$ | 1.3                                                        |
| $C_\mu$              | 0.09                                                       |
| $C_{\varepsilon 1}$  | 1.44                                                       |
| $C_{\varepsilon 2}$  | 1.92                                                       |
| $f_{\varepsilon 1}$  | 1.0                                                        |
| $f_{\varepsilon 2}$  | $1 - 0.3 \exp(-Re_t^2)$                                    |
| $f_\mu$              | $\exp(-3.4 / (1 + Re_t^2 / 50)^2)$                         |
| $Re_t$               | $k^2 / \nu \varepsilon$                                    |
| $E$                  | $2 \nu \nu_t (\partial^2 U / \partial x_k \partial x_m)^2$ |
| $D$                  | $2 \nu (\partial(\sqrt{k}) / \partial x_i)^2$              |

## 2.2 แบบจำลองแบบเชิงเส้นเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ q- $\zeta$

แบบจำลอง q- $\zeta$  ถูกคิดค้นโดย Gibson และ Dafa'Alla (1994) ซึ่งกำหนดให้ค่าความหนืดหมุนวนสามารถจัดอยู่ในพจน์ของค่า q และ  $\zeta$

$$\mu_i = \rho c_{\mu} f_{\mu} \frac{q^3}{2\zeta}$$

โดยที่ ค่า q จะอยู่ในรูปของค่า k ดังนี้

$$q = \sqrt{k}$$

และค่า  $\zeta$  จะอยู่ในรูปของค่า  $\varepsilon$  กับ q ดังนี้

$$\zeta = \frac{\varepsilon}{2q}$$

ซึ่งค่า q และ  $\zeta$  จะคำนวณจากการแก้สมการการเคลื่อนที่ของ q และ  $\zeta$

$$\rho \frac{\partial u_i q}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_q} \right) \frac{\partial q}{\partial x_i} \right] + \frac{\tau_i}{2q} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \rho \zeta$$

$$\rho \frac{\partial u_i \zeta}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\zeta} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \right] + c_{\zeta_1} f_{\zeta_1} \frac{\zeta}{q^2} \tau_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \rho c_{\zeta_2} f_{\zeta_2} \frac{\zeta}{q^2} + \rho \Psi$$

โดยที่

$$\tau_i = -\frac{2}{3} \delta_i \rho q^2 + \mu_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)$$

ในสมการการเคลื่อนที่ของ  $q$  ที่พจน์ทางด้านขวาของสมการนั้น พจน์แรกเป็นพจน์การแพร่ (diffusion term) พจน์ที่ 2 เป็นพจน์การผลิต (production term) พจน์ที่ 3 เป็นพจน์การสลาย (dissipation term)

ส่วนในสมการการเคลื่อนที่ของ  $\zeta$  ที่พจน์ทางด้านขวาของสมการนั้น พจน์แรกเป็นพจน์การแพร่ (diffusion term) พจน์ที่ 2 เป็นพจน์การผลิต (production term) พจน์ที่ 3 เป็นพจน์การทำลาย (destruction term)

ซึ่งค่าคงที่ต่าง ๆ ในแบบจำลองใช้ค่าคงที่ของ Gibson และ Dafa'Alla (1994) ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ  $q-\zeta$

| ตัวแปร                    | ค่าที่กำหนด                                      |
|---------------------------|--------------------------------------------------|
| $\sigma_q$                | $\sigma_k$                                       |
| $\sigma_\zeta$            | $\sigma_\varepsilon$                             |
| $C_{\zeta_1} f_{\zeta_1}$ | $2C_{\varepsilon_1} f_{\varepsilon_1} - 1$       |
| $C_{\zeta_2} f_{\zeta_2}$ | $2C_{\varepsilon_2} f_{\varepsilon_2} - 1$       |
| $f_\mu$                   | $\exp(-6/(1 + Re_t/50)^2) (1 + 3\exp(-Re_t/10))$ |
| $Re_t$                    | $q^3/2V\zeta_s$                                  |
| $\Psi$                    | $E/2q$                                           |

### 2.3 แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ q- $\zeta$

แบบจำลองการไหลแบบไม่เชิงเส้น  $q-\zeta$  จะมีการเพิ่มความถูกต้องในการวิเคราะห์ผลในบริเวณที่มีพฤติกรรมใกล้ชั้นขอบเขต ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนค่าเทนเซอร์ของความเค้นเรย์โนลด์ส์เฉลี่ย ( $\tau_i$ ) โดยการเพิ่มพจน์ไม่เชิงเส้นเข้าไปในสมการ ซึ่งวิธีการนี้ปรับปรุงโดย Pope (1975) ดังนี้

$$\tau_i = \rho f_\mu c_\mu \frac{q^3}{2\zeta} s_i - \rho f_\mu \frac{q^4}{4\zeta^2} \Omega_i - \frac{2}{3} \rho q^2 \delta_i$$

ซึ่งพจน์แรกทางด้านขวาคือพจน์ของเชิงเส้นและส่วนพจน์ที่ 2 คือพจน์ของไม่เชิงเส้นที่ทำให้การเพิ่มเติม โดยที่

$$s_i = s_i - \frac{1}{3} \delta_i s_{kk}$$

$$\Omega_i = \Omega_i - \frac{1}{3} \delta_i \Omega_{kk}$$

ซึ่งค่า  $S_i$  คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉลี่ย (mean strain rate)

$$s_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)$$

ค่า  $\Omega_i$  คือพจน์ของไม่เชิงเส้น สามารถหาจาก

$$\Omega_i = q_i S_i S_i + q_i (s_i \Omega_i + s_i \Omega_i) + q_i \Omega_i \Omega_i$$

และค่า  $\Omega_i$  คือค่าการหมุนวน (vorticity)

$$\Omega_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)$$

โดยที่

$$q_1 = \frac{3}{f(\bar{S})} \quad q_2 = \frac{15}{f(\bar{S})} \quad q_3 = \frac{19}{f(\bar{S})}$$

และ

$$f(\bar{S}) = 1000 + \bar{S}$$

$$\bar{S} = \frac{q}{2\zeta} \sqrt{2S_1 S_2}$$

$$\bar{\Omega} = \frac{q}{2\zeta} \sqrt{2\Omega_1 \Omega_2}$$

ซึ่งในแบบจำลองไม่เชิงเส้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า  $C_\mu$  ของ Suratanakavikul (1999)

$$C_\mu = \frac{2/3}{4 + f_\mu \bar{S} + 0.5 f_\mu \bar{\Omega}}$$

และได้ใช้สมการ damping function ของ Cotton และ Kirwin (1995)

$$f_\mu = 1 - 0.97 \exp\left(\frac{-Re_t}{160}\right) - 0.0045 Re_t \exp\left(-\left(\frac{Re_t}{200}\right)^3\right)$$

สมการที่กล่าวมาในข้างต้นนั้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนั้นจากหลักการของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงได้แปลงสมการเหล่านี้ให้อยู่ในรูปแบบของสมการพีชคณิต เพื่อนำไปคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการประมาณค่าผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ และใช้ระบบพิกัดแบบเส้นโค้ง (curvilinear co-ordinate system) แทนที่ระบบพิกัดฉาก (cartesian co-ordinate system) โดยขอบเขตของการไหลจะใช้ระบบพิกัดขอบเขตสัมผัส (boundary fitted co-ordinate system)

ในงานวิจัยนี้มีการปรับปรุงเพิ่มเติมขั้นตอนในการคำนวณ เพื่อให้มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ โดยมีขั้นตอน

1. ทำการแก้ไขปรับปรุงโปรแกรม BOFFIN (Jones, 1988) จากเดิมที่จำเป็นต้องประมวลผลในระบบคอมพิวเตอร์แบบเวิร์คสเตชัน (workstation) เปลี่ยนมาให้สามารถประมวลผลในระบบคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้ (personal computer)

2. ทำการสร้างกริดสำหรับรูปแบบของพื้นที่ปรับอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละแบบ

3. ทำการคำนวณหาค่าสถานะเริ่มต้นและค่าสถานะขอบเขตของแต่ละพื้นที่ปรับอากาศที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของพื้นที่นั้นๆ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์

4. มีการเพิ่มสมการพลังงานในกระบวนการคำนวณ เพื่อที่จะสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิภายในและนำค่าอุณหภูมินี้ไปใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศ โดยทำการใส่สมการพลังงานนี้เข้าไปหลังจากกระบวนการในหาค่าผลเฉลี่ยของแต่ละตัวแปรนั้นมีการสุ่มเข้าที่คงที่แล้ว จากนั้นจึงเริ่มนำค่าตัวแปรที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานมาใส่ในสมการพลังงาน เนื่องจากในงานวิจัยนี้สมมติให้การไหลที่พิจารณาเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ดังนั้นการกระจายตัวของอุณหภูมิจึงไม่ผลกระทบบกับการกระจายตัวของความเร็ว จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องแก้สมการพลังงานพร้อมกันกับสมการการเคลื่อนที่อื่นๆ

5. ในกระบวนการคำนวณหาค่าพลังงานในสมการพลังงานในแต่ละรอบนั้น หลังจากได้ค่าพลังงานในแต่ละรอบก็นำมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิโดยใช้สมการดังนี้

$$\theta_T = C_v T + K + k$$

6. ในการกำหนดจำนวนรอบในการคำนวณค่าพลังงานและค่าของอุณหภูมินั้น นอกจากการกำหนดด้วยค่าเศษตกค้างแล้วยังกำหนดด้วยค่าอุณหภูมิภายในห้องด้วย โดยถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้แล้วจะทำการหยุดการคำนวณ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการกำหนด

จะเป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ต้องการภายในระนาบขอบเขตอาศัย โดยในแต่ละพื้นที่จะมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการสภาพแวดล้อมภายในพื้นที่นั้นๆ

7. นำข้อมูลความเร็วและอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ไปคำนวณหาค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ความรู้สึกสบายของผู้คนต่อสภาพของอากาศที่อยู่ในพื้นที่ปรับอากาศในขณะนั้น

8. หลังจากคำนวณได้ค่าผลเฉลี่ยของตัวแปรแต่ละค่าแล้ว จึงนำค่าผลเฉลี่ยที่ต้องการวิเคราะห์ไปทำการแสดงผลโดยใช้โปรแกรมการแสดงผล SCV (PRG, 2001) ซึ่งต้องมีการนำค่าผลเฉลี่ยที่ได้ไปทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลที่โปรแกรมการแสดงผลนั้นสามารถประมวลผลได้ จึงมีการเขียนโปรแกรมย่อยโดยใช้โปรแกรมวิซวลชีพลัสพลัส หลังจากแปลงข้อมูลแล้วจึงนำไปใช้ในการแสดงผลต่อไป

ขั้นตอนโดยสรุปในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศภายในพื้นที่ปรับอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังนี้

1. ทำการสร้างกริด โดยการกำหนดขนาดของโครงสร้างอาคารและจำนวนจุดกริดที่ต้องการในการวิเคราะห์
2. กำหนดสภาวะขอบเขตและสภาวะแรกเริ่มของอาคาร เช่น ขนาดและตำแหน่งของทางเข้าและออก ปริมาณและค่าของตัวแปรต่าง ๆ ภายในพื้นที่ปรับอากาศ
3. กำหนดค่าเศษตกค้างและค่าอุณหภูมิที่ต้องการภายในพื้นที่ปรับอากาศ เพื่อเป็นตัวกำหนดจำนวนรอบในการสุ่มเข้าหาค่าผลเฉลี่ย
4. นำข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ไปประมวลผลในโปรแกรม BOFFIN
5. นำค่าผลเฉลี่ยที่ได้ไปคำนวณหาค่าพลังงานและอุณหภูมิ

6. นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศ ซึ่งคือค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจ

7. นำข้อมูลทั้งหมดไปแสดงผลโดยใช้โปรแกรมการแสดงผล

### การศึกษาการกระจายของอากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองการไหลแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ และศึกษาการจำลองการกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งมีหัวข้อดังนี้

#### 1 การวิเคราะห์แบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำไปใช้ศึกษาการกระจายอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ การวิเคราะห์แบบจำลองการไหลแต่ละแบบจะใช้สถานที่และสภาวะขอบเขตเดียวกัน เพื่อที่จะให้ผลจากการเปรียบเทียบมีความถูกต้อง

##### 1.1 แบบจำลองในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองการไหล 3 แบบ ซึ่งทั้งหมดเป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ ได้แก่

แบบจำลองที่ 1 คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้น  $k-\epsilon$

แบบจำลองที่ 2 คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้น  $q-G$

แบบจำลองที่ 3 คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น  $q-G$

โดยในการเลือกแบบจำลองทั้ง 3 แบบมาทำการวิเคราะห์นี้ เนื่องจากแบบจำลองที่ 1 หรือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ  $k-\epsilon$  เป็นแบบจำลอง  $k-\epsilon$  ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การไหล และแบบจำลองที่ 1 เป็นแบบจำลองการไหลแบบเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ ซึ่งจะนำไปทำการเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองของ Chow และ Fung ซึ่งใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูง  $k-\epsilon$  เพื่อศึกษาผลที่แตกต่างกันระหว่างแบบจำลองแบบเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูงกับแบบจำลองแบบเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ โดยแบบจำลองทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันในด้านการคำนวณหาค่าผลเฉลยเพราะแบบจำลองแบบเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำนั้นใช้สมการการเคลื่อนที่ในการหาค่าผลเฉลยจากบริเวณนอกชั้นขีดผิวไปจนถึงบริเวณชั้นขีดผิว ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่ของของไหลจริง แต่แบบจำลองแบบเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูงนั้นจะใช้สมการการเคลื่อนที่ในการหาค่าผลเฉลยแค่เพียงบริเวณนอกชั้นขีดผิว แต่บริเวณชั้นขีดผิวจะทำการประมาณค่าโดยใช้สมการวอลล์ฟังก์ชัน (wall function equation) ในการหาค่าผลเฉลย ซึ่งเป็นสมการแบบเชิงเส้น จึงทำให้ผลคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองมีความแตกต่างกัน

แบบจำลองที่ 2 หรือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ  $q-G$  นั้นเป็นแบบจำลองที่มีการใช้ตัวแปร  $q$  และ  $G$  ในการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะมีความแตกต่างกับแบบจำลองที่มีการใช้ตัวแปร  $k$  และ  $\epsilon$  เพราะว่าตัวแปร  $q$  และ  $G$  นั้นแปรผันเป็นเชิงเส้นกับระยะแกน  $y$  ที่บริเวณใกล้ผนัง แต่ตัวแปร  $k-\epsilon$  จะแปรผันกับระยะแกน  $y^2$  ที่บริเวณใกล้ผนัง ซึ่งจะทำให้แบบจำลอง  $q-G$  ใช้ระยะเวลาในการลู่อเข้าหาผลเฉลยที่น้อยกว่าและจำนวนจุดกริดที่ใช้จึงไม่ต้องมีความละเอียดมากเท่ากับแบบจำลอง  $k-\epsilon$  ดังนั้นจึงนำแบบจำลองที่ 2 มาทำการเปรียบเทียบผลเพื่อศึกษาความแตกต่างกันระหว่างแบบจำลอง  $q-G$  และ  $k-\epsilon$

แบบจำลองที่ 3 หรือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ  $q-G$  นั้น เป็นแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการคำนวณที่ละเอียดมากขึ้นกว่าแบบจำลองแบบเชิงเส้น เพราะว่าแบบจำลองแบบเชิงเส้นมีการสมมติให้ค่าความเค้นเรย์โนลด์์ตั้งฉากในแต่ละทิศมีค่าที่เท่ากัน ซึ่งจะให้ผลที่ไม่ถูกต้องในกรณีที่เกิดการแยกไหลหรือการหมุนวน แต่แบบจำลองการไหลแบบไม่เชิงเส้นนั้นจะไม่สมมติค่าความเค้นเรย์โนลด์์ตั้งฉากในแต่ละทิศให้มีค่าที่เท่ากัน ทำให้ผลเฉลยของแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นนั้นมีความถูกต้องกว่าแบบจำลองแบบเชิงเส้น

## 1.2 รูปแบบสถานที่ในการวิเคราะห์

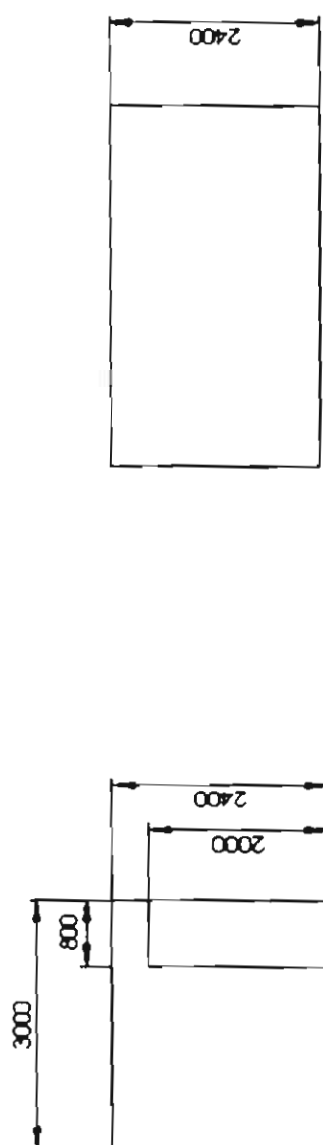
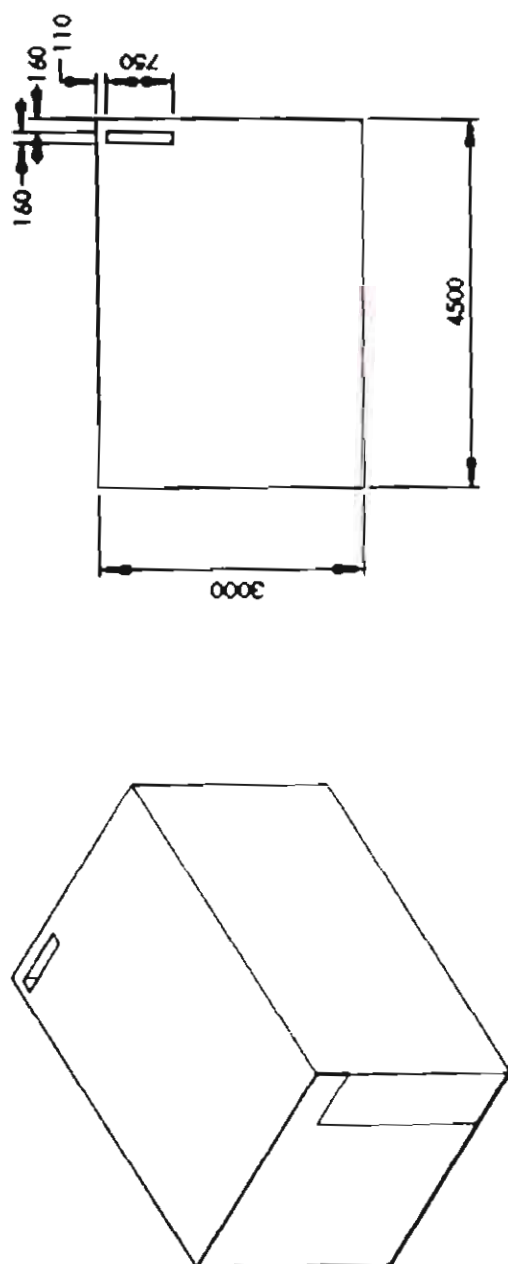
ในการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลทั้ง 3 แบบจะใช้รูปแบบของสถานที่เดียวกัน เพื่อให้ผลเปรียบเทียบที่ได้มีความถูกต้อง โดยรูปแบบของสถานที่ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเป็นห้องสำนักงานขนาดเล็กที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศ ซึ่งมีขนาดของห้องคือ ยาว 4.5 เมตร กว้าง 3 เมตร และสูง 2.4 เมตร ภายในห้องมีการติดตั้งระบบปรับอากาศโดยทำการติดตั้งตำแหน่งของช่องลมในการกระจายความเย็นที่ฝ้าเพดานด้านบนบริเวณมุมห้องด้านซ้าย และมีประตูทางออกที่บริเวณด้านตรงข้ามทางขวา ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยพื้นที่ภายในห้องทั้งหมดเป็นห้องโล่งไม่มีอุปกรณ์ตกแต่งภายในและผู้คนอาศัย

## 1.3 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

ในการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลทั้ง 3 แบบนั้น จะทำการอ้างอิงผลที่ได้จากการทดสอบของ Chow และ Fung (1996) ซึ่งทำการทดสอบโดยการวัดและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูง  $k-\epsilon$  โดยนำผลเฉลยจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบมาเปรียบเทียบกับผลของ Chow และ Fung ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงต้องมีการกำหนดข้อมูลในการวิเคราะห์ให้ตรงกับการทดสอบของ Chow และ Fung ด้วย

ในการทดสอบของ Chow และ Fung ซึ่งทำการทดสอบโดยการวัดและการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้น ที่บริเวณทางออกจะกำหนดมีความเร็วไม่เกิน 0.05 m/s ส่วนตำแหน่งของกริดในการวัดจะถูกทำเครื่องหมายไว้เพื่อให้ตำแหน่งที่วัดมีความถูกต้อง และใช้เครื่องทริพพอด (standard tripod) เป็นเครื่องวัดพลังงาน ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะทำการวัดที่ระดับที่สูงจากพื้นขึ้นมา 1.2 เมตรและใช้ระยะเวลาในการวัดประมาณ 5 นาที โดยจะใช้ผู้คนประมาณ 1 ถึง 2 คน เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนการไหลของอากาศ และในการวัดแต่ละตำแหน่งจะต้องอยู่ห่างจากตำแหน่งวัดประมาณ 0.9 เมตร เพื่อป้องกันอุณหภูมิที่เกิดจากร่างกายคนส่งผลต่อสภาพแวดล้อมรอบที่ตำแหน่งที่ทำการวัด

ในการกำหนดข้อมูลในการวิเคราะห์ห้องสำนักงานขนาดเล็กนั้น ได้กำหนดตามการทดสอบของ Chow และ Fung ซึ่งได้มีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 2 โครงสร้างและขนาดของสำนักงานขนาดเล็ก หน่วย : มิลลิเมตร

### ตารางที่ 3 รายละเอียดของข้อมูลในการวิเคราะห์ห้องสำนักงานขนาดเล็ก

| รายละเอียด                                                            | สำนักงาน                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| ขนาดของโครงสร้างห้อง :                                                |                                                                         |
| - ความยาว (เมตร)                                                      | 4.5                                                                     |
| - ความกว้าง (เมตร)                                                    | 3                                                                       |
| - ความสูง (เมตร)                                                      | 2.4                                                                     |
| จำนวนของผู้คนที่อาศัยอยู่ในช่วงเวลาปกติ                               | 2                                                                       |
| ชนิดของระบบการกระจายของอากาศ                                          | แบบบังคับที่ออกมาจากหัวจ่ายลมที่ฝ้าเพดาน                                |
| จำนวนของอากาศที่เปลี่ยนต่อชั่วโมง<br>(number of air changes per hour) | 34.2                                                                    |
| บริเวณขอบเขตอาศัย (occupied zone)                                     | ระดับการหายใจ (สูงจากระดับพื้นประมาณ 1.2 เมตร)                          |
| ขนาดของหัวจ่ายลมฝ้าเพดาน (ceiling diffuser) :                         |                                                                         |
| - ขนาด (เมตร x เมตร)                                                  | 0.75 x 0.16                                                             |
| - ความเร็วลม (m/s)                                                    | 2.645                                                                   |
| - อุณหภูมิ (°C)                                                       | 16                                                                      |
| ขนาดของประตูทางออก :                                                  |                                                                         |
| - ขนาด (เมตร x เมตร)                                                  | 0.8 x 2                                                                 |
| - อุณหภูมิ (°C)                                                       | 32                                                                      |
| สภาวะของผนังทุกด้าน                                                   | สภาวะไม่มีการถ่ายเทความร้อน (adiabatic)                                 |
| ลักษณะของกริด                                                         | กริดแบบคงรูปสม่ำเสมอ                                                    |
| ขนาดจำนวนของโครงร่างกริดแต่ละด้าน :                                   |                                                                         |
| - ด้านยาว                                                             | 30                                                                      |
| - ด้านกว้าง                                                           | 29                                                                      |
| - ด้านสูง                                                             | 10                                                                      |
| จำนวนของเซลล์กริดทั้งหมด                                              | 8700                                                                    |
| ค่าความรุนแรงของความปั่นป่วน<br>(turbulence intensity)                | 0.01                                                                    |
| ตัวแก้สมการ (solver)                                                  | พรีคอนดิชัน-คอนจูเกต เกรเดียนต์<br>(pre-conditioned conjugate gradient) |
| ขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์                                           | เพนเทียมทรี 1 จิกกะเฮิรตซ์ (pentium3 1 GHz)                             |

โดยในการทดสอบจะทำการกำหนดให้ผนังทุกด้านเป็นฉนวนคือไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในห้องกับภายนอก ค่าสภาวะขอบเขต (boundary condition) และค่าเริ่มต้น (initial condition) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์นั้นได้แสดงดังในตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ค่าสภาวะขอบเขตและค่าเริ่มต้นของสำนักงานขนาดเล็ก

| รายละเอียด                              | สภาวะขอบเขต                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| หัวจ่ายลมฝ้าเพดาน<br>(ceiling diffuser) | $U = 0.0 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = -2.645 \text{ m/s}$<br>$k = 1.5(T_u \times U_{mag})^2$<br>$= 0.001049$<br>โดยที่ $(U_{mag} = (u^2 + v^2 + w^2)^{0.5}, T_u = 0.01)$<br>$\epsilon = k^{1.5}/\text{lsxfactor}$<br>$= 0.003778$<br>โดยที่ $(\text{ls} = 0.009, \text{factor} = 1)$ |
| ประตูทางออก(Outlet)                     | $\partial\phi / \partial n = 0$<br>โดย $\phi = u, v, w, E, k, \epsilon$                                                                                                                                                                                                                               |
| ผนัง(Wall)                              | $U = 0.0 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = 0.0 \text{ m/s}$<br>$\partial E / \partial n = 0.0$                                                                                                                                                                                            |
| สภาวะเริ่มต้น                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| สภาวะภายในห้อง                          | $P = 1.0133 \text{ E}+5 \text{ Pa}$<br>$U = 0.0 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = 0.0 \text{ m/s}$                                                                                                                                                                                        |

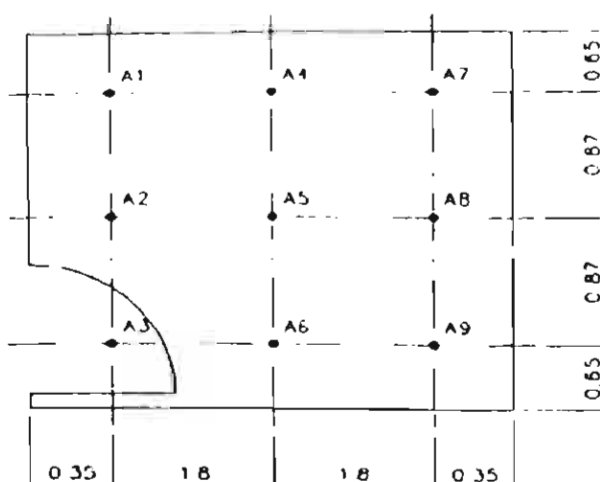
หลังจากทำการวิเคราะห์หาผลเฉลยจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบแล้ว จึงนำผลเฉลยที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลจากการวัดและผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ Chow และ Fung ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ

### ระยะเวลา

การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลในห้องสำนักงานขนาดเล็กจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ Chow และ Fung ซึ่งใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูง  $k-\epsilon$  เพื่อหาแบบจำลองที่ใช้ระยะเวลาในการหาค่าผลเฉลยน้อยที่สุด โดยใช้ค่าเศษตกค้างเป็นตัวกำหนดในการยุติจำนวนรอบในการหาค่าผลเฉลย

### ความถูกต้องของผลเฉลย

การเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าผลเฉลยนั้น จะนำผลเฉลยจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบมาทำการเปรียบเทียบกับผลจากการวัดและผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ Chow และ Fung ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ยภายในระนาบขอบเขตอาศัยที่สูงจากระดับพื้นห้องประมาณ 1.2 เมตร จำนวน 9 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 3 และแสดงผลในค่าผลต่างของความเร็วในรูปของอัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่าง โดยคำนวณจากผลต่างของความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง ( $V_{pre}$ ) กับความเร็วที่ได้จากการวัด ( $V_{mea}$ ) ต่อความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่มีค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลจากการวัดมากที่สุด



ภาพที่ 3 ตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์ในระนาบขอบเขตอาศัย 9 ตำแหน่ง

## 1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน จะมีค่าตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ

ความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งใดๆ ( $V_{pm}$ ) คือ ขนาดของ เวกเตอร์ความเร็วรวมทั้งสามแกนที่ตำแหน่งใดๆ ภายในพื้นที่ปรับอากาศ

$$V_{pm} = \sqrt{u_p^2 + v_p^2 + w_p^2}$$

อัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่าง คือ ผลต่างของความเร็วที่ได้จากแบบจำลองกับความเร็วที่ได้จากการวัดต่อความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง

$$\text{Difference} = (V_{pm} - V_{mea}) / V_{pm} * 100$$

## 2 การวิเคราะห์การกระจายของอากาศภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ

การวิเคราะห์การกระจายของอากาศในพื้นที่ปรับอากาศในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาพื้นที่ปรับอากาศที่มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยแต่ละพื้นที่จะเป็นโครงสร้างอาคารอย่างง่าย คือ ภายในพื้นที่ปรับอากาศทั้งหมดจะเป็นห้องโล่งไม่มีอุปกรณ์ตกแต่งภายในและผู้คนอาศัย อีกทั้งกำหนดให้ผนังทุกด้านเป็นฉนวนไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในห้องกับภายนอก ซึ่งในพื้นที่ปรับอากาศแต่ละสถานที่ก็มีความแตกต่างกันในด้านต่างๆ เช่น ขนาดของอาคาร ขนาดตำแหน่งและจำนวนของช่องลมเข้าและออก และปริมาณลมเข้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ สำนักงาน โรงยิมเนเซียม และที่พักโดยสาร โดยสถานที่ทั้งสามนั้นได้นำรูปแบบโครงสร้างและข้อมูลรายละเอียดของแต่ละสถานที่มาจากการทดสอบของ Chow และ Fung (1996) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองการไหลที่ที่ให้ค่าผลเฉลยที่ถูกต้องมากที่สุดมาทำการวิเคราะห์การกระจายของอากาศและแต่ละสถานที่ก็ได้มีการวิเคราะห์ตำแหน่งในการติดตั้งของช่องลมที่แตกต่างกันด้วย โดยตำแหน่งของช่องลมที่นำมาเลือกใช้ในแต่ละสถานที่นั้นจะทำการเลือกสุ่มมาใช้ในการวิเคราะห์จำนวน 2 ตำแหน่ง เพื่อจะได้ศึกษาและเข้าใจการจำลองการ

ไหลของอากาศที่มีรูปแบบการกระจายของอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละแบบก็มีผลกระทบต่อผู้คนที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ที่ปรับอากาศนั้นที่แตกต่างกันออกไป

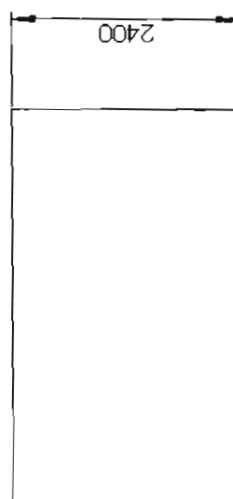
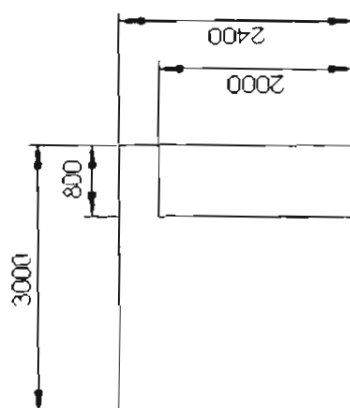
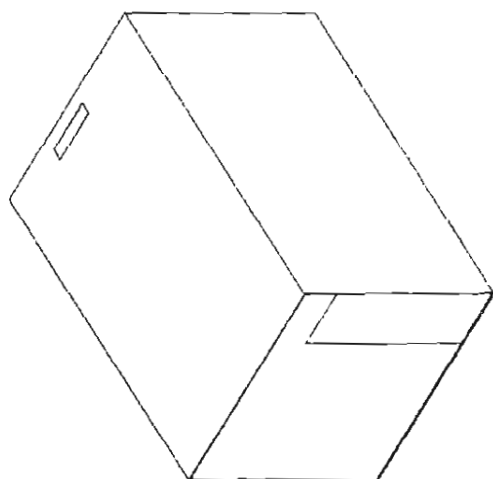
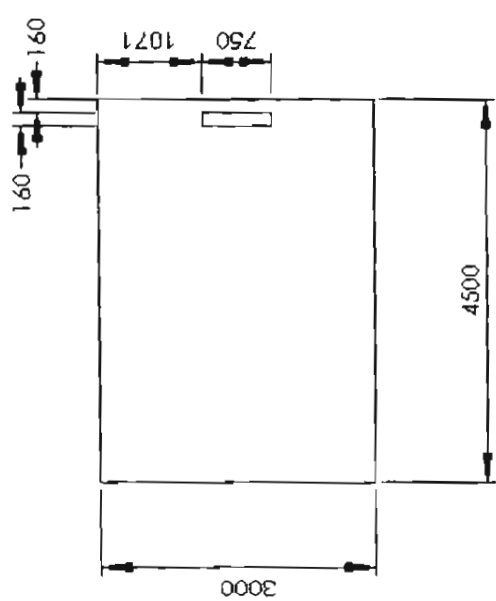
## 2.1 สำนักงานขนาดเล็ก

ในการวิเคราะห์สำนักงานขนาดเล็กนั้นได้ใช้รูปแบบรายละเอียดของสถานที่เช่นเดียวกับการทดสอบหาแบบจำลองที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 2 และรายละเอียดของห้อง ดังแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4

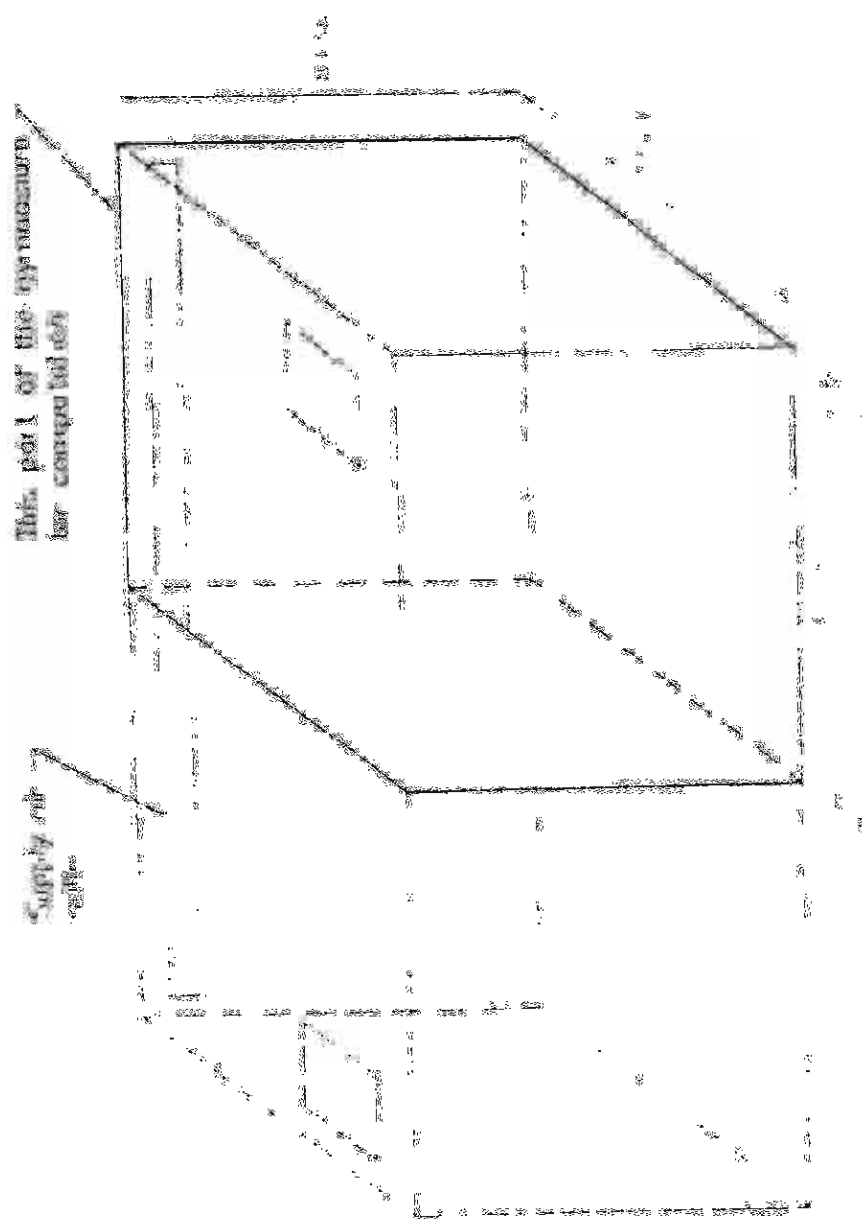
ตำแหน่งในการติดตั้งช่องลมของสำนักงานทั้ง 2 ตำแหน่งนั้น มีการติดตั้งที่แตกต่างกันคือ ในตำแหน่งที่ 1 จะทำการติดตั้งช่องลมในการกระจายความเย็นที่ฝ้าเพดานด้านบนบริเวณมุมห้องด้านซ้าย และมีประตูทางออกที่บริเวณด้านตรงข้ามทางขวา ดังแสดงในภาพที่ 2 ส่วนในตำแหน่งที่ 2 จะทำการติดตั้งช่องลมไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของขอบผนังฝ้าเพดานด้านบน ดังแสดงในภาพที่ 4

## 2.2 โรงยิมเนเซียม

การวิเคราะห์พื้นที่โรงยิมเนเซียมนั้น พบว่าห้องมีขนาดใหญ่และมีลักษณะของพื้นที่เป็นแบบสมมาตร ดังแสดงในภาพที่ 5 ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงสามารถทำการวิเคราะห์เพียงครึ่งห้อง โดยภายในห้องกำหนดให้มีอุณหภูมิที่ต้องการประมาณ 18 องศาเซลเซียส และรายละเอียดของข้อมูลและค่าสภาวะต่าง ๆ นั้นถูกกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6



ภาพที่ 4 โครงสร้างและขนาดของสำนักงานขนาดเล็กที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2 หน่วย : มิลลิเมตร



ภาพที่ 5 โครงสร้างและขนาดของโมเดลการเพิ่ม

หน่วย : เมตร

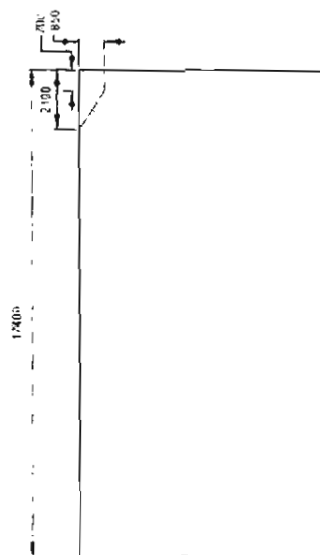
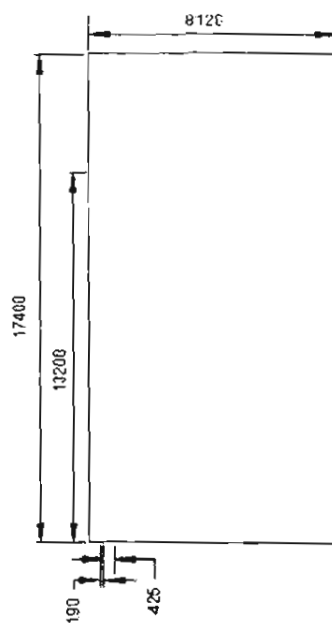
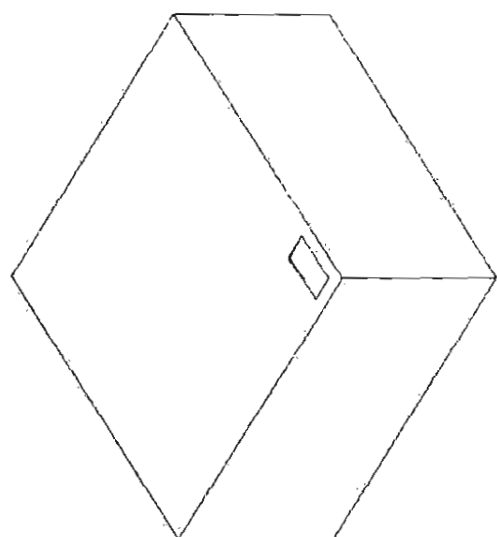
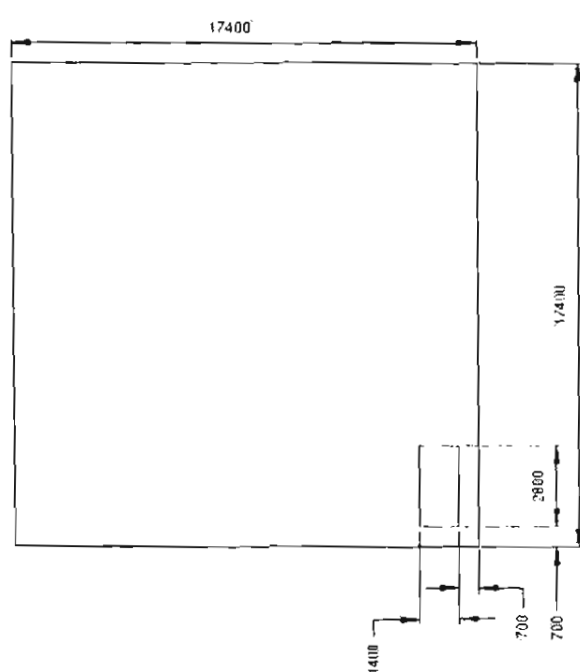
## ตารางที่ 5 รายละเอียดของข้อมูลในการวิเคราะห์โรงยิมเนเซียม

| รายละเอียด                                                            | โรงยิมเนเซียม                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| ขนาดของโครงสร้างห้อง :                                                |                                                                         |
| - ความยาว (เมตร)                                                      | 34.8                                                                    |
| - ความกว้าง (เมตร)                                                    | 17.4                                                                    |
| - ความสูง (เมตร)                                                      | 8.12                                                                    |
| จำนวนของผู้คนที่อาศัยอยู่ในช่วงเวลาปกติ                               | 2 ถึง 20                                                                |
| ชนิดของระบบการกระจายของอากาศ                                          | แบบบังคับที่ออกมาจากช่องลมกริลล์แบบด้านข้าง                             |
| จำนวนของอากาศที่เปลี่ยนต่อชั่วโมง<br>(number of air changes per hour) | 18.3                                                                    |
| บริเวณขอบเขตอาศัย (occupied zone)                                     | ระดับการหายใจ (สูงจากระดับพื้นประมาณ 1.2 เมตร)                          |
| ขนาดของช่องลมด้านข้าง (side grilles) :                                |                                                                         |
| - ขนาด (เมตร x เมตร)                                                  | 13.2 x 0.19                                                             |
| - ความเร็วลม (m/s)                                                    | 5                                                                       |
| - อุณหภูมิ (°C)                                                       | 16                                                                      |
| ขนาดของช่องลมกลับ (return grilles) :                                  |                                                                         |
| - ขนาด (เมตร x เมตร)                                                  | 2.8 x 1.4                                                               |
| - อุณหภูมิ (°C)                                                       | 32                                                                      |
| สภาวะของผนังทุกด้าน                                                   | สภาวะไม่มีการถ่ายเทความร้อน (adiabatic)                                 |
| ลักษณะของกริด                                                         | กริดแบบคงรูปสม่ำเสมอ                                                    |
| ขนาดจำนวนของโครงร่างกริดแต่ละด้าน :                                   |                                                                         |
| - ด้านยาว                                                             | 26                                                                      |
| - ด้านกว้าง                                                           | 26                                                                      |
| - ด้านสูง                                                             | 20                                                                      |
| จำนวนของเซลล์กริดทั้งหมด                                              | 13520                                                                   |
| ค่าความรุนแรงของความปั่นป่วน<br>(turbulence intensity)                | 0.01                                                                    |
| ตัวแก้สมการ (solver)                                                  | พรีคอนดิชัน-คอนจูเกต เกรเดียนต์<br>(pre-conditioned conjugate gradient) |
| ขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์                                           | เพนเทียมทรี 1 จิกกะเฮิรตซ์ (pentium3 1 GHz)                             |

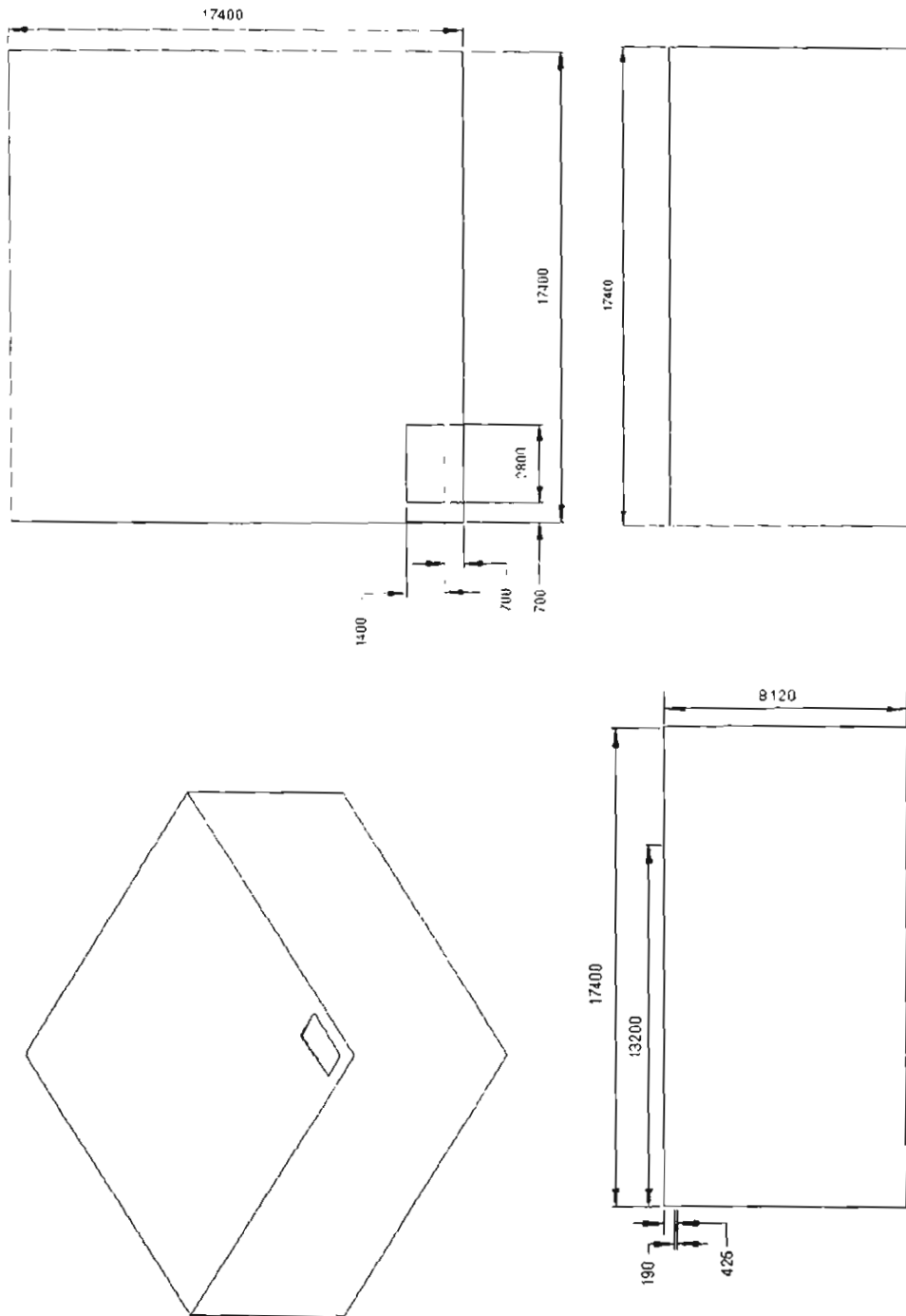
**ตารางที่ 6** ค่าสภาวะขอบเขตและค่าเริ่มต้นของโรงยิมเนเซียม

| รายละเอียด                    | สภาวะขอบเขต                                                                                                     |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ช่องลมด้านข้าง (side grilles) | $U = 5.0 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = 0.0 \text{ m/s}$<br>$k = 0.00375$<br>$\epsilon = 0.0255$ |
| ช่องลมกลับ (return grilles)   | $\partial \phi / \partial n = 0$<br>โดย $\phi = u, v, w, E, k, \epsilon$                                        |
| ผนัง(wall)                    | $U = 0.0 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = 0.0 \text{ m/s}$<br>$\partial E / \partial n = 0.0$      |
| สภาวะเริ่มต้น                 |                                                                                                                 |
| สภาวะภายในห้อง                | $P = 1.0133 \text{ E}+5 \text{ Pa}$<br>$U = 0.0 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = 0.0 \text{ m/s}$  |

ในการวิเคราะห์ตำแหน่งในการติดตั้งช่องลมของโรงยิมเนเซียมทั้ง 2 ตำแหน่งนั้น มีการติดตั้งที่แตกต่างกันคือ ในตำแหน่งที่ 1 จะทำการติดตั้งช่องลมโดยให้ช่องลมยื่นออกมาจากผนังกำแพง ดังแสดงในภาพที่ 6 ส่วนในตำแหน่งที่ 2 จะทำการติดตั้งช่องลมโดยให้ช่องลมติดอยู่ที่ผนังกำแพง และไม่มีการยื่นออกมา ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 โครงสร้างและขนาดของโรงยิมเนเซียมที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1 หน่วย : มิลลิเมตร



ภาพที่ 7 โครงสร้างและขนาดของโรงเรียนเนเชียมที่ติดตั้งห้องลมที่ตำแหน่งที่ 2 หน่วย : มิลลิเมตร

### 2.3 ที่พักโดยสาร

พื้นที่บริเวณที่พักโดยสารนั้น เป็นห้องที่มีขนาดใหญ่และมีความสูงประมาณ 20 เมตร ดังนั้นในการติดตั้งระบบปรับอากาศ ถ้าต้องการให้ภายในห้องทั้งหมดมีอากาศที่เย็นทั่วถึง จะต้องใช้ระบบปรับอากาศที่มีกำลังทำความเย็นที่มาก ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงและสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์ เนื่องจากในบริเวณการใช้งานของห้องจะใช้มากเฉพาะในบริเวณช่วงขอบเขตอาศัย ดังนั้นในการติดตั้งตำแหน่งของช่องลมนั้น จึงติดตั้งในระดับที่ต่ำเพื่อเน้นการจ่ายลมให้กับบริเวณขอบเขตอาศัย และเพื่อเป็นการลดขนาดของเครื่องทำความเย็น (chiller) ให้เล็กลงแต่ยังให้มีความเย็นที่จ่ายภายในห้องเท่าเดิม จึงมีการเพิ่มความเร็วลมเข้าสู่ภายในห้องมากกว่าปกติ ซึ่งมีรายละเอียดของข้อมูลและค่าสภาวะต่าง ๆ นั้นถูกกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 7 และตารางที่ 8

ในการวิเคราะห์ตำแหน่งในการติดตั้งช่องลมของที่พักโดยสารทั้ง 2 ตำแหน่งนั้น มีการติดตั้งที่แตกต่างกันคือ ในตำแหน่งที่ 1 จะทำการติดตั้งช่องลมโดยให้ช่องลมติดอยู่ที่ผนังกำแพงและมีจำนวนช่องลม 2 ช่อง และมีช่องลมกลับจำนวน 2 ช่องเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 8 ส่วนในตำแหน่งที่ 2 จะทำการติดตั้งช่องลมโดยให้ช่องลมติดอยู่ที่ผนังกำแพงและมีจำนวนช่องลม 2 ช่อง และมีช่องลมกลับจำนวน 2 ช่อง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการติดตั้งที่ตำแหน่งที่ 1 แต่มีการเลื่อนตำแหน่งของช่องลมทั้งสองช่องขึ้นจากเดิมไปทางด้านบนประมาณ 1.7 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 9

## ตารางที่ 7 รายละเอียดของข้อมูลในการวิเคราะห์ที่หักโดยสาร

| รายละเอียด                                                            | ที่หักโดยสาร                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| ขนาดของโครงสร้างห้อง :                                                |                                                                         |
| - ความยาว (เมตร)                                                      | 18.5                                                                    |
| - ความกว้าง (เมตร)                                                    | 18.5                                                                    |
| - ความสูง (เมตร)                                                      | 20.1                                                                    |
| จำนวนของผู้คนที่อาศัยอยู่ในช่วงเวลาปกติ                               | 150                                                                     |
| ชนิดของระบบการกระจายของอากาศ                                          | แบบบังคับที่จ่ายจากช่องลมกริลล์แบบด้านข้างที่ระดับต่ำ                   |
| จำนวนของอากาศที่เปลี่ยนต่อชั่วโมง<br>(number of air changes per hour) | 48.6                                                                    |
| บริเวณขอบเขตอาศัย (occupied zone)                                     | ระดับการหายใจ (สูงจากระดับพื้นประมาณ 1.2 เมตร)                          |
| ขนาดของช่องลมด้านข้าง (side grilles) :                                |                                                                         |
| - ขนาด (เมตร x เมตร)                                                  | 4.9 x 1.14                                                              |
| - ความเร็วลม (m/s)                                                    | 8.3                                                                     |
| - อุณหภูมิ (°C)                                                       | 27                                                                      |
| ขนาดของช่องลมกลับ (return grilles) :                                  |                                                                         |
| - ขนาด (เมตร x เมตร)                                                  | 4.9 x 3.03                                                              |
| - อุณหภูมิ (°C)                                                       | 32                                                                      |
| สภาวะของผนังทุกด้าน                                                   | สภาวะไม่มีการถ่ายเทความร้อน (adiabatic)                                 |
| ลักษณะของกริด                                                         | กริดแบบคงรูปสม่ำเสมอ                                                    |
| ขนาดจำนวนของโครงร่างกริดแต่ละด้าน :                                   |                                                                         |
| - ด้านยาว                                                             | 20                                                                      |
| - ด้านกว้าง                                                           | 20                                                                      |
| - ด้านสูง                                                             | 25                                                                      |
| จำนวนของเซลล์กริดทั้งหมด                                              | 10000                                                                   |
| ค่าความรุนแรงของความปั่นป่วน<br>(turbulence intensity)                | 0.01                                                                    |
| ตัวแก้สมการ (solver)                                                  | พรีคอนดิชัน-คอนจูเกต เกรเดียนต์<br>(pre-conditioned conjugate gradient) |
| ขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์                                           | เพนเทียมทรี 1 จิกกะเฮิรตซ์ (pentium3 1 GHz)                             |

**ตารางที่ 8** ค่าสภาวะขอบเขตและค่าเริ่มต้นของโรงยิมเนเซียม

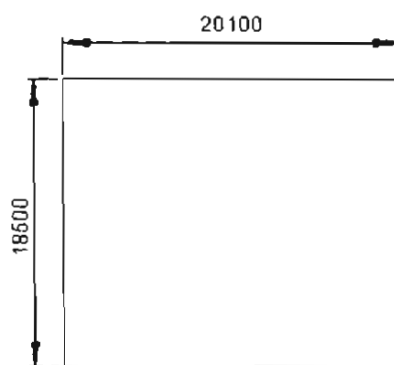
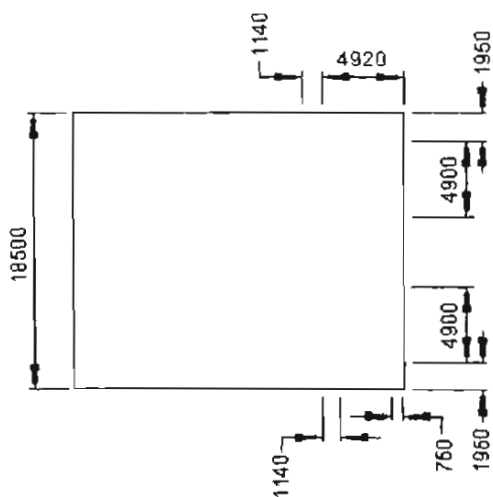
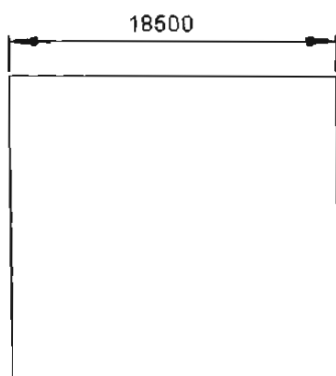
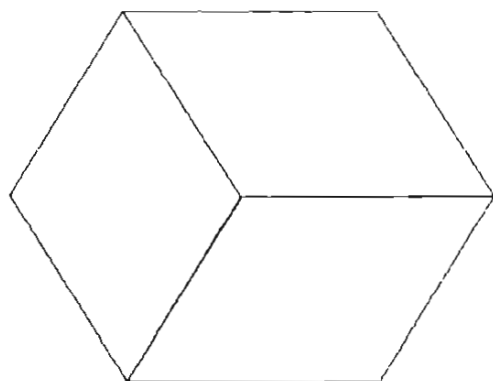
| รายละเอียด                    | สภาวะขอบเขต                                                                                                     |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ช่องลมด้านข้าง (side grilles) | $U = 8.3 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = 0.0 \text{ m/s}$<br>$k = 0.01036$<br>$\epsilon = 0.1172$ |
| ช่องลมกลับ (return grilles)   | $\partial \phi / \partial n = 0$<br>โดย $\phi = u, v, w, E, k, \epsilon$                                        |
| ผนัง (wall)                   | $U = 0.0 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = 0.0 \text{ m/s}$<br>$\partial E / \partial n = 0.0$      |
| สภาวะเริ่มต้น                 |                                                                                                                 |
| สภาวะภายในห้อง                | $P = 1.0133 \text{ E}+5 \text{ Pa}$<br>$U = 0.0 \text{ m/s}$<br>$V = 0.0 \text{ m/s}$<br>$W = 0.0 \text{ m/s}$  |

## 2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

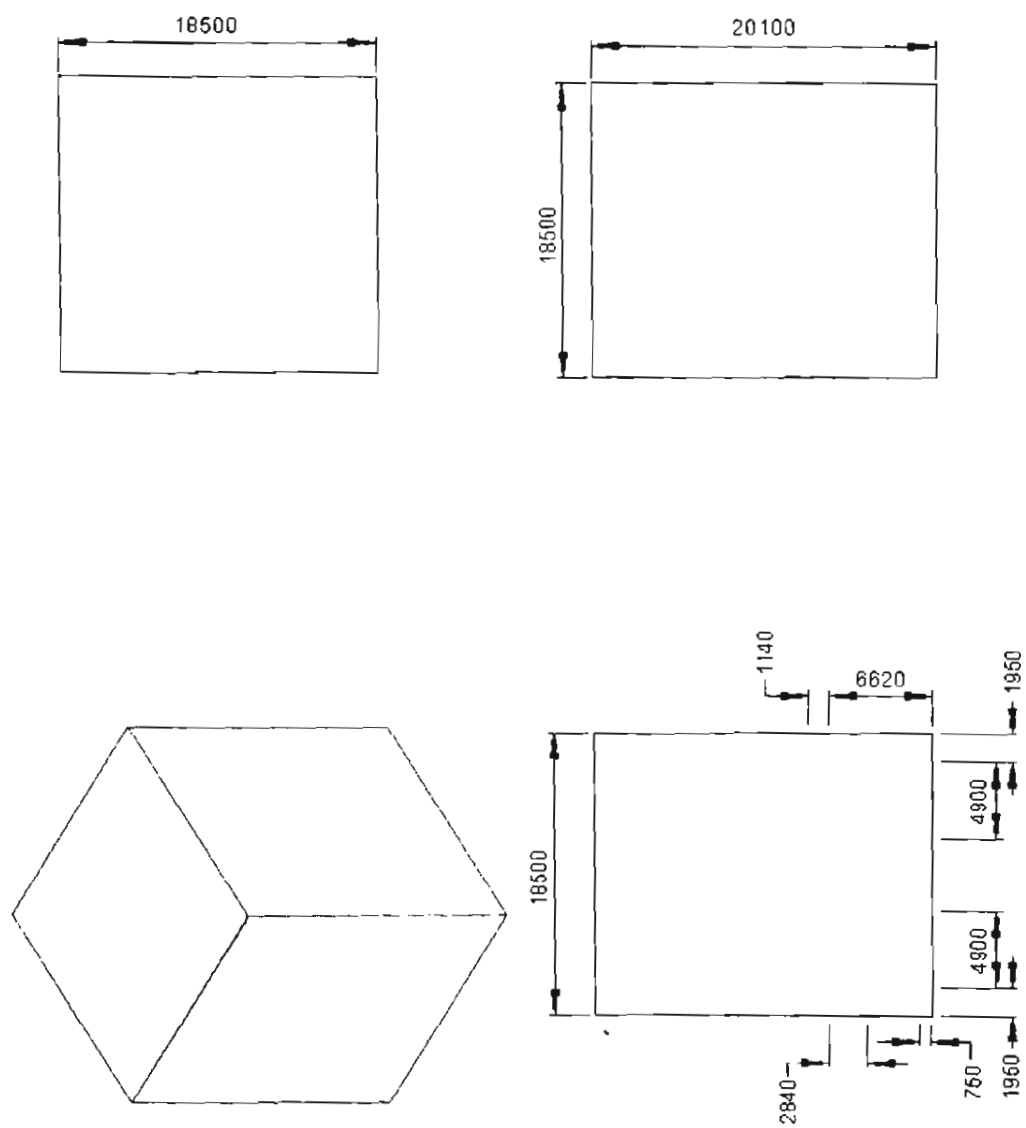
ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ จะมีค่าตัวแปรที่ใช้ในการเทียบ คือ ความเร็วเฉลี่ย อุณหภูมิ และอัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจ

อัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจ (percentage dissatisfied, PD) คือ ค่าที่แสดงจำนวนคนที่รู้สึกไม่สบายกับสภาพของอากาศในขณะนั้น โดยคิดเป็นอัตราส่วนต่อจำนวน 100 คน (Awbi 1991) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความเร็วเฉลี่ย ( $V_{pm}$ ) อุณหภูมิ ( $T_a$ ) และค่าความเข้มข้นของความชื้นปน (T<sub>w</sub>)

$$PD = (3.143 + 0.3696V_{pm}T_a)(34 - T_a)(V_{pm} - 0.05)^{0.8228}$$



ภาพที่ 8 โครงสร้างและขนาดของที่พักโดยสารที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1 หน่วย : มิลลิเมตร



ภาพที่ 9 โครงสร้างและขนาดของที่พักโดยสารที่ติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 2 หน่วย : มิลลิเมตร

## ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผล 2 รูปแบบ คือ

1. การวิเคราะห์แบบจำลองการไหลที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน
2. การวิเคราะห์การกระจายของอากาศภายในพื้นที่ปรับอากาศ

### ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการไหล

การวิเคราะห์แบบจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ได้้นำแบบจำลองการไหล 3 แบบมาทำการเปรียบเทียบผล เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์การกระจายอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งทั้ง 3 แบบจำลอง เป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ ได้แก่

แบบจำลองที่ 1 คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้น  $k-\epsilon$

แบบจำลองที่ 2 คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้น  $q-G$

แบบจำลองที่ 3 คือแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น  $q-G$

โดยรูปแบบสถานที่ในการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 แบบเป็นห้องสำนักงานขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งองค์ประกอบที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบ คือ

#### 1. ระยะเวลาในการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทั้งสามแบบนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ Chow และ Fung (1996) ซึ่งใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์นัมเบอร์สูง  $k-\epsilon$  ในการวิเคราะห์ โดยใช้ค่าเศษตกค้างเป็นตัวกำหนดในการยุติจำนวนรอบในการหาค่าผลเฉลย พบว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น  $q-G$  ใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่ค่าผลเฉลย

ประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งใช้ระยะเวลาที่ใช้น้อยกว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้น q-G ประมาณ 3 เท่า และน้อยกว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเส้น k-E ประมาณ 4 เท่า อีกทั้งน้อยกว่าแบบจำลองของ Chow และ Fung ประมาณ 7 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 9

**ตารางที่ 9** ระยะเวลาในการวิเคราะห์ของแต่ละแบบจำลองการไหลของสำนักงาน

| แบบจำลอง                           | แบบจำลองการไหล<br>แบบปั่นป่วนเชิงเส้น<br>เรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูง k-E<br>(Chow และ Fung) | แบบจำลองการไหล<br>แบบปั่นป่วนเชิงเส้น<br>k-E | แบบจำลองการไหล<br>แบบปั่นป่วนเชิงเส้น<br>q-G | แบบจำลองการไหล<br>แบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น<br>q-G |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| ระยะเวลาในการสุ่มเข้า<br>(ชั่วโมง) | 20                                                                                     | 12                                           | 8                                            | 3                                               |
| จำนวนรอบ                           | 72000                                                                                  | 35000                                        | 25000                                        | 10000                                           |

ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น q-G นั้นเป็นแบบจำลองที่ใช้ระยะเวลาและจำนวนรอบในการสุ่มเข้าหาผลเฉลยที่น้อยที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทั้งสามแบบที่นำมาพิจารณา

## 2. ความถูกต้องของผลเฉลย

หลังจากวิเคราะห์ได้ผลออกมาแล้ว นำผลจากทั้งสามแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบผลกับผลจากการวัดและผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ Chow และ Fung โดยทำการเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่ง 9 ตำแหน่งในระนาบขอบเขตอาศัย ดังแสดงในภาพที่ 3 และได้แสดงค่าผลต่างของความเร็วในเทอมของอัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่าง โดยคำนวณจากผลต่างของความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง ( $V_{mod}$ ) กับความเร็วที่ได้จากการวัด ( $V_{mea}$ ) ต่อความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 10 จากผลในตารางพบว่าแบบจำลองแต่ละแบบต่างก็มีค่าความเร็วที่ใกล้กับผลจากการวัด แต่แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น q-G นั้นให้ผลในตำแหน่งทั้ง 9 ตำแหน่งที่ใกล้กับผลจาก

การวัดมากกว่าแบบจำลองอื่น ซึ่งได้แก่ ตำแหน่งที่ A-1 มีค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่าง 24% ตำแหน่งที่ A-4 มีค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่าง 30 % ตำแหน่งที่ A-5 มีค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่าง 4 % และตำแหน่งที่ A-7 มีค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่าง 45 % และส่วนที่ตำแหน่งอื่นก็มีค่าที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองที่มีค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่างที่น้อยในตำแหน่งนั้น อีกทั้งค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ผลต่างเฉลี่ยรวมของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น q-G นั้นก็มีค่าน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆคือประมาณ 6.2%

ผลจากการวิเคราะห์ทั้งสามแบบจำลองจะเห็นได้ว่า แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ q-G เป็นแบบจำลองที่ให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลจากการวัด อีกทั้งใช้ระยะเวลาและจำนวนรอบในการลู่เข้าหาผลเฉลยน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆที่ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ซึ่งสาเหตุที่แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ q-G มีพฤติกรรมที่ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆที่นำมาวิเคราะห์ผลมาจาก

1. แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำนั้นใช้สมการการเคลื่อนที่ในการหาค่าผลเฉลยจากบริเวณนอกชั้นขีดผิวไปจนถึงบริเวณชั้นขีดผิว ซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่ของของไหลจริง แต่แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์สูงนั้นจะใช้สมการการเคลื่อนที่ในการหาค่าผลเฉลยแค่เพียงบริเวณนอกชั้นขีดผิว แต่บริเวณชั้นขีดผิวจะทำการประมาณค่าโดยใช้สมการวอลล์ฟังก์ชันในการหาค่าผลเฉลย ซึ่งเป็นสมการแบบเชิงเส้น จึงทำให้ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำมีค่าที่ถูกต้องมากกว่า

2. ตัวแปร q-G นั้นแปรผันเชิงเส้นกับระยะแกน  $y$  ที่บริเวณใกล้ผนัง แต่ตัวแปร k-E จะแปรผันกับระยะแกน  $y^2$  ที่บริเวณใกล้ผนัง ดังนั้นจึงใช้ระยะเวลาในการลู่เข้าหาผลเฉลยที่น้อยกว่าและจำนวนจุดกริดที่ใช้จึงไม่ต้องมีความละเอียดมากเท่ากับตัวแปร k-E แต่ในการวิเคราะห์กำหนดให้มีจำนวนจุดกริดที่เท่ากัน จึงทำให้แบบจำลอง q-G มีค่าผลเฉลยที่ถูกต้องมากกว่าแบบจำลอง k-E

3. แบบจำลองแบบเชิงเส้นนั้นมีการสมมติให้ค่าความเค้นนอร์มอลเรย์โนลด์์ในแต่ละด้านของจุดกริดมีค่าที่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลในกรณีที่เกิดการแยกไหลหรือการหมุนวน ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าที่ยังไม่ถูกต้อง แต่แบบจำลองการไหลแบบไม่เชิงเส้นนั้นจะไม่สมมติค่าความเค้นนอร์มอลเรย์

โหนดในแต่ละด้านของจุดกริดให้มีค่าที่เท่ากัน แต่จะทำการคำนวณหาค่าออกมา จึงทำให้ผลเฉลยมีความถูกต้องมากกว่า

ดังนั้นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ  $q-G$  จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในงานวิจัยนี้

**ตารางที่ 10** ค่าความเร็วเฉลี่ยในระนาบขอบเขตอาศัยที่ตำแหน่ง 9 ตำแหน่งของแต่ละแบบจำลอง

| ตำแหน่งในการวัด | ทิศทาง    | ผลจากการวัด | แบบจำลองการไหล<br>แบบปั่นป่วนเชิงเส้น<br>เวย์โนคส์-เบอร์กซ์ k-ε<br>(Chow และ Fung) |                                             |                                                                                                   | แบบจำลองการไหล<br>แบบปั่นป่วนเชิงเส้น<br>k-ε |                                  | แบบจำลองการไหล<br>แบบปั่นป่วนเชิงเส้น<br>q-q |                                  | แบบจำลองการไหล<br>แบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น q-q |                                  |
|-----------------|-----------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|
|                 |           |             | ความเร็วเฉลี่ย (V <sub>avg</sub> )<br>(m/s)                                        | ความเร็วเฉลี่ย (V <sub>avg</sub> )<br>(m/s) | อัตราเปอร์เซ็นต์<br>ความต่าง<br>(V <sub>avg</sub> -V <sub>obs</sub> ) /<br>V <sub>obs</sub> *100% | ความเร็วเฉลี่ย (V <sub>avg</sub> )<br>(m/s)  | อัตรา<br>เปอร์เซ็นต์<br>ความต่าง | ความเร็วเฉลี่ย (V <sub>avg</sub> )<br>(m/s)  | อัตรา<br>เปอร์เซ็นต์<br>ความต่าง | ความเร็วเฉลี่ย (V <sub>avg</sub> )<br>(m/s)  | อัตรา<br>เปอร์เซ็นต์<br>ความต่าง |
| สำนักงาน        |           |             |                                                                                    |                                             |                                                                                                   |                                              |                                  |                                              |                                  |                                              |                                  |
| A-1             | (8.5,22)  | 0.1         | 0.75                                                                               | 86                                          | 0.186                                                                                             | 48                                           | 0.178                            | 44                                           | 0.132                            | 24                                           |                                  |
| A-2             | (15.5,22) | 0.18        | 0.127                                                                              | -42                                         | 0.182                                                                                             | 1                                            | 0.167                            | -8                                           | 0.124                            | -45                                          |                                  |
| A-3             | (22.5,22) | 0.45        | 0.519                                                                              | 13                                          | 0.218                                                                                             | -106                                         | 0.2                              | -125                                         | 0.186                            | -142                                         |                                  |
| A-4             | (8.5,15)  | 0.1         | 0.034                                                                              | -194                                        | 0.032                                                                                             | -212                                         | 0.076                            | -32                                          | 0.142                            | 30                                           |                                  |
| A-5             | (15.5,15) | 0.1         | 0.067                                                                              | -49                                         | 0.061                                                                                             | -64                                          | 0.058                            | -72                                          | 0.104                            | 4                                            |                                  |
| A-6             | (22.5,15) | 0.15        | 0.106                                                                              | -41                                         | 0.185                                                                                             | 19                                           | 0.17                             | 12                                           | 0.173                            | 13                                           |                                  |
| A-7             | (8.5,8)   | 0.15        | 0.175                                                                              | 14                                          | 0.304                                                                                             | 51                                           | 0.31                             | 52                                           | 0.274                            | 45                                           |                                  |
| A-8             | (15.5,8)  | 0.2         | 0.224                                                                              | 11                                          | 0.167                                                                                             | 40                                           | 0.203                            | -1                                           | 0.211                            | 5                                            |                                  |
| A-9             | (22.5,8)  | 0.15        | 0.202                                                                              | 26                                          | 0.157                                                                                             | 36                                           | 0.153                            | 2                                            | 0.136                            | 10                                           |                                  |
| ค่าเฉลี่ย       |           |             |                                                                                    | -19.5                                       |                                                                                                   | -29                                          |                                  | -14.2                                        |                                  | -6.2                                         |                                  |

## ผลการวิเคราะห์การกระจายของอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ

การวิเคราะห์การกระจายของอากาศในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์พื้นที่ปรับอากาศที่มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยใช้รูปแบบโครงสร้างอาคารอย่างง่าย ซึ่งในพื้นที่ปรับอากาศแต่ละสถานที่ก็必将มีความแตกต่างกันในด้านต่างๆ เช่น ขนาดของอาคาร ขนาด ตำแหน่งและจำนวนของช่องลมเข้าและออก และปริมาณลมเข้า โดยพื้นที่ปรับอากาศที่ใช้วิเคราะห์มี 3 แบบ คือ

### 1. สำนักงาน

ในการวิเคราะห์พื้นที่สำนักงานนั้น ส่วนใหญ่ผู้คนหรือพนักงานภายในห้องจะทำกิจกรรมที่เบา ซึ่งผู้คนภายในห้องต้องการความรู้สึกสบายในการทำงานเพราะต้องทำงานอยู่ภายในห้องนั้นเป็นเวลานานๆ ดังนั้นการวิเคราะห์จึงทำการหาค่าอัตราเปอร์เซ็นต์ความไม่พอใจภายในห้องด้วย และมีการวิเคราะห์การกระจายของอากาศที่มีการติดตั้งของตำแหน่งของช่องลมที่ตำแหน่งต่างกัน 2 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะมีลักษณะการกระจายของอากาศที่แตกต่างกัน โดยได้ผลดังนี้

#### 1.1 การติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งที่ 1

ผลจากการติดตั้งช่องลมที่ตำแหน่งมุมห้องด้านซ้ายของขอบผนัง ดังแสดงในภาพที่ 2 นั้น ได้มีการแสดงผลของความเร็วและอุณหภูมิในรูป 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมแสดงผล SCV (PRG, 2001) ดังภาพที่ 10 11 และ 12 ตามลำดับ ซึ่งจากภาพพบว่า อากาศเย็นที่พ่นออกมาจากช่องลมมีการเคลื่อนที่ลงบริเวณพื้นด้านล่างและกระจายออกด้านข้างไปทางขวาเคลื่อนไปทางด้านประตูทางออก ส่วนอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าก็จะเคลื่อนที่ขึ้นบริเวณด้านบนของผนัง ซึ่งการที่อากาศเย็นกระจายตัวอยู่ในบริเวณพื้นด้านล่าง เนื่องจากที่อากาศอุณหภูมิต่ำนั้นมีความหนาแน่นของอากาศมากกว่าอากาศอุณหภูมิสูงดังนั้นจึงอากาศเย็นที่หนักกว่าจึงตกลงด้านล่าง ส่วนอากาศที่อุณหภูมิสูงกว่าจึงลอยขึ้นสู่ด้านบน

จากนั้นนำค่าความเร็วและอุณหภูมิที่ในบริเวณระนาบขอบเขตอาศัยมาทำการแสดงผลดังภาพที่ 13 และ 14 ตามลำดับ จากภาพที่ 13 พบว่า การกระจายของอากาศภายในระนาบนั้นหลังจากที่ออกมาจากช่องลมแล้วก็เคลื่อนตัวจากมุมห้องด้านซ้ายบนกระจายออกไปทางด้านประตูทางออกที่มุมห้องด้านขวาล่าง ซึ่งที่บริเวณมุมห้องด้านซ้ายบนและบริเวณใกล้ประตูและบริเวณขอบผนัง