# บทที่ 2

# ทฤษฎี

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดและความรู้พื้นฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งแบ่งเป็นข้อย่อย ดังนี้

2.1 ระบบปริมาตรอากาศแปรผัน (Variable Air Volume (VAV) system)

2.2 โปรแกรมวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคาร (Energy Simulation Program)

## 2.1 ระบบปริมาตรอากาศแปรผัน (Variable Air Volume (VAV) system)

ระบบปรับอากาศมีวัตถุประสงค์หลัก คือการรักษาอุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในบริเวณพื้นที่ปรับอากาศให้อยู่ในช่วงที่คนรู้สึกสบาย ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของพื้นที่ปรับอากาศสามารถทำได้โดยการขจัดภาระความร้อนที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ของการปรับอากาศ เมื่อพิจารณาการขจัดภาระความร้อนสำหรับคอยล์ในระบบส่งจ่ายลมเย็นของระบบปรับอากาศ (Air Handling system) สามารถทำได้ 2 วิธี

- เปลี่ยนอุณหภูมิของลมจ่าย ขณะที่รักษาปริมาณการส่งจ่ายลมเย็นให้คงที่
- เปลี่ยนปริมาณการส่งจ่ายลมเย็น ขณะที่รักษาอุณหภูมิลมจ่ายให้คงที่

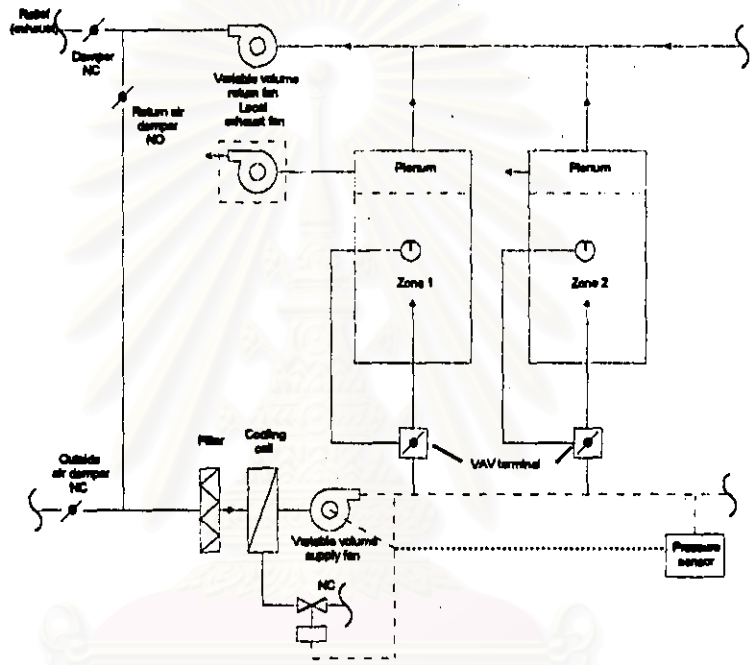
### 2.1.1 แนวคิดพื้นฐานของระบบปริมาตรอากาศแปรผัน

คือ การลดปริมาณการส่งจ่ายลมจากระดับภาระการทำงานเต็มที่ ในช่วงเวลาที่ภาระความร้อนของพื้นที่ปรับอากาศลดลงน้อยกว่าช่วงภาระความร้อนสูงสุด (peak load) เมื่อปริมาณการส่งจ่ายลมลดลงการส่งถ่ายความร้อนจากการทำงานของพัดลม (energy transfer) ที่คอยล์เย็น (cooling coil) และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมก็จะลดลงด้วย

ระบบปริมาตรอากาศแปรผัน อาศัยหลักการควบคุมอุณหภูมิของลมที่ส่งจ่ายให้คงที่ แต่จะแปรเปลี่ยนปริมาณการส่งจ่ายของลม ให้เหมาะสมตามภาระความร้อนของพื้นที่ปรับอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา (load profile) ในระบบปริมาตรอากาศแปรผันโดยทั่วไปจะถูกออกแบบ

เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในขณะที่ภาระความร้อนลดลง และโดยส่วนใหญ่ของระบบนี้จะถูกออกแบบมาสำหรับ ระบบการทำความเย็น (cooling)

รูปที่ 2.1 แสดงระบบปริมาตรอากาศแปรผัน (Variable Air Volume System) โดยทั่วไปสำหรับระบบการทำความเย็นแบบหลายโซน ซึ่งจะปรับปริมาณการส่งจ่ายลมเย็นโดยอาศัยตัวควบคุมอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb thermostat) ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณของอุณหภูมิภายในห้องปรับอากาศ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากภาระความร้อนที่เกิดขึ้น




รูปที่ 2.1 ระบบปรับอากาศแบบปริมาตรอากาศแปรผัน

ในช่วงของภาระการทำความเย็นสูงสุด (peak cooling conditions) , ระบบปริมาตรอากาศแปรผันจะทำหน้าที่เหมือนกับระบบปริมาตรอากาศคงที่คือ การทำงานส่งจ่ายลมเย็นในปริมาณสูงสุดและความสามารถของการทำความเย็นของคอยล์เย็นสูงสุด และเมื่อภาระการทำความเย็นอยู่ในช่วงภาระบางส่วน (part load) ระบบปริมาตรอากาศแปรผันก็จะลดปริมาณการส่งจ่ายลมเย็นลงด้วยการปิดบานปรับลมเย็น (dampers) ของอุปกรณ์ปรับปริมาตรอากาศปลายทาง (VAV terminal) โดยใช้ ตัวควบคุมอุณหภูมิ (thermostat) ควบคุมการทำงาน และจะมีตัวตรวจรู้ความดัน (static pressure sensor) ในท่อส่งลมเย็น เพื่อส่งสัญญาณสำหรับควบคุมอุปกรณ์แปรผันปริมาณการส่งจ่ายลมเย็น

### 2.1.2 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภาระความร้อน ( Effect of Load profile)

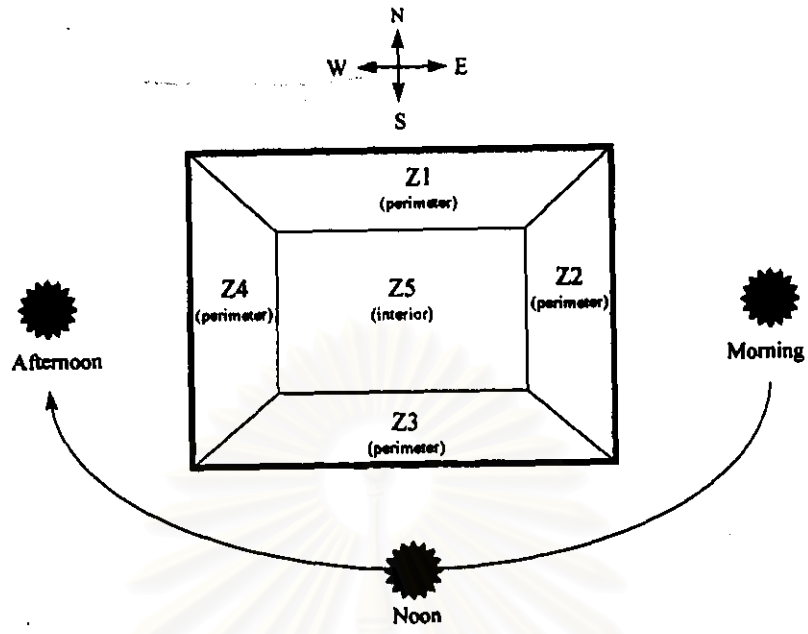
จากแนวความคิดของระบบปริมาตรอากาศแปรผัน (Variable Air Volume System) ซึ่งแสดงถึงระบบปรับอากาศที่แปรเปลี่ยนปริมาณการส่งจ่ายลมเย็น ให้เหมาะสมกับภาระความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา (load profile) เมื่อระบบปริมาตรอากาศแปรผันถูกนำมาใช้เฉพาะบริเวณพื้นที่ภายในของอาคาร (interior zone) , load profile ก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนของผู้อาศัย และกิจกรรมที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของการปรับอากาศมากกว่าสภาวะของอากาศภายนอก ในทางกลับกันถ้าระบบปริมาตรอากาศแปรผันถูกนำมาใช้ในพื้นที่โดยรอบของกรอบอาคาร (perimeter zone) แสงอาทิตย์และสภาวะอากาศภายนอกก็จะมีอิทธิพลต่อระบบมากกว่า

ดังนั้นความเข้าใจถึง load profile ที่เกิดขึ้น จะเป็นส่วนสำคัญของการเลือก และการออกแบบสำหรับระบบปรับอากาศแบบปริมาตรอากาศแปรผัน สำหรับอาคารหรือพื้นที่ของการปรับอากาศใด ๆ ซึ่งมีลักษณะของ load profile ค่อนข้างคงที่หรือต้องการการระบายอากาศสูง ๆ การที่จะเลือกเอาระบบปริมาตรอากาศแปรผันมาใช้นั้นอาจไม่ช่วยประหยัดพลังงาน ซึ่งการเลือกระบบปริมาตรอากาศคงที่มาใช้ อาจมีความเหมาะสมทั้งทางด้านประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายมากกว่า

### 2.1.3 ผลกระทบของรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ต่อพื้นที่ปรับอากาศ (Effect of shifting sun load on different zones of building)

พิจารณาพื้นที่การปรับอากาศดังรูปที่ 2.2 แบ่งพื้นที่ของการปรับอากาศเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ปรับอากาศบริเวณกรอบอาคาร(perimeter zone) และพื้นที่ปรับอากาศภายใน(interior zone) พบว่าเมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนตัวจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกในระหว่างวัน จะทำให้ภาระความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าภาระความร้อนของพื้นที่ปรับอากาศบริเวณกรอบอาคาร โดยโซนที่ Z2 , Z3 และ Z4 จะมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 2.2** แสดงตัวอย่างพื้นที่การปรับอากาศ

พิจารณาตัวอย่างผลกระทบของรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ต่อพื้นที่ปรับอากาศ ตัวอย่างค่าภาระความร้อนที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ ในแต่ละโซน

| | Zone Peaks(tons) | | | | Total loads |
|---|---|---|---|---|---|
| | 9.00 | 12.00 | 15.00 | 18.00 | (tons) |
| **Z1** | 4 | 8 | 10 Max | 8 | 10 |
| **Z2** | 14 Max | 10 | 7 | 4 | 14 |
| **Z3** | 7 | 22 Max | 20 | 10 | 22 |
| **Z4** | 4 | 6 | 14 Max | 11 | 14 |
| **Z5** | 3 | 6 | 8 Max | 6 | 8 |
| **Total load** | 32 Min | 52 | ***59 Max*** | 39 | ***68*** |

จากค่าภาระความร้อนของโซนปรับอากาศต่าง ๆ ข้างต้น แสดงให้เห็นว่าค่าภาระความความร้อนสูงสุดในแต่ละโซนไม่ได้เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน พิจารณาพื้นที่ปรับอากาศบริเวณกรอบอาคารค่าภาระความร้อนจะมีเปลี่ยนแปลงมากระหว่างวัน โดยใน Z1 และ Z4 ค่าภาระความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นเวลา 15.00 น. ส่วน Z2 และ Z3 ค่าภาระความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นเวลา 9.00 น. และ 12.00 น. ตามลำดับ สำหรับพื้นที่ปรับอากาศภายใน Z5 จะเห็นว่าค่าภาระความร้อนมีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากค่าภาระความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากจำนวนคนและกิจกรรมที่เกิดขึ้น

และเมื่อพิจารณาการออกแบบขนาดของระบบส่งจ่ายลมเย็นจากตัวอย่างข้างต้นพบว่ากรณีการออกแบบขนาดระบบแบบปริมาตรอากาศคงที่ซึ่งเป็นการคำนวณแบบใช้ค่าผลรวมของ Peak zones และกรณีของระบบแบบปริมาตรอากาศแปรผันซึ่งเป็นการคำนวณแบบ Block load ขนาดของระบบส่งจ่ายลมเย็นจะมีขนาดเท่ากับ 68 ตัน และ 59 ตัน ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้ระบบแบบปริมาตรอากาศแปรผัน สามารถลดขนาดของระบบส่งจ่ายลมเย็นลงได้ เมื่อผลกระทบของรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ต่อพื้นที่ปรับอากาศมีมาก

### 2.1.4 อุปกรณ์พื้นฐานของระบบปริมาตรอากาศแปรผัน

ในระบบปริมาตรอากาศแปรผันโดยทั่วไปจะประกอบด้วย

1. อุปกรณ์แปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลม (Flow modulator) จะทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนปริมาณลมที่พัดลมจะส่งจ่ายโดยใช้สัญญาณจากตัวตรวจรู้ความดันสถิต ควบคุมปริมาณลมที่ส่งจ่าย สำหรับอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลมที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ Variable Inlet Guide Vanes, Discharge damper และอุปกรณ์ปรับความถี่ของมอเตอร์ (Inverter) เป็นต้น

2. อุปกรณ์ปรับปริมาตรอากาศปลายทาง (VAV terminal) จะทำหน้าที่ปรับปริมาณของลมเย็นที่จะส่งจ่ายไปยังพื้นที่ของการปรับอากาศตามภาระความร้อนที่เกิดขึ้น โดยอาศัยเทอร์โมสตัททำหน้าที่ในการตรวจวัด สำหรับอุปกรณ์ปรับปริมาตรอากาศปลายทางแบบที่พบเห็นและใช้กันโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้หลายแบบ เช่น

- Pressure-dependent variable volume terminals ผลของการเปลี่ยนแปลงของความดันสถิตที่ทางเข้า มีผลทำให้ปริมาณของการส่งจ่ายลมเย็นจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิภายในห้อง

- Pressure-independent variable volume terminals มี velocity sensor ติดตั้งไว้ที่ทางขาเข้าเพื่อวัดอัตราการส่งจ่ายลมเย็น ทำให้ปริมาณการส่งจ่ายลมเย็นเป็นอิสระกับการเปลี่ยนแปลงของความดันสถิตที่ทางเข้า

- Induction terminals มีไว้เพื่อเพิ่มปริมาณการหมุนเวียนของอากาศ (Recirculation) ภายในพื้นที่ของการปรับอากาศ ในขณะที่ปริมาณลมเย็นจากเครื่องจ่ายลมเย็น (Primary air) มีปริมาณลดลง

- Fan power terminals ส่วนมากใช้ในพื้นที่ ที่ต้องการเคลื่อนที่ของอากาศภายในห้องสูง หรือ พื้นที่ที่มีการทำงานที่ ภาระการทำงานต่ำ ๆ บ่อยครั้ง เช่น พื้นที่รอบกรอบอาคาร, ห้องใต้หลังคา และในพื้นที่ที่ต้องการลมจ่ายแบบปริมาตรคงที่

3. สถานีตรวจวัดอัตราการไหล (Airflow measuring station) ทำหน้าที่วัดปริมาณของลมเย็นที่ไหลผ่านเข้ามายังอุปกรณ์ส่งจ่ายลมต่าง ๆ แล้วส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมการทำงานเพื่อประมวลผล

4. ตัวตรวจรู้ความดันสถิต (Main duct static pressure sensor) ทำหน้าที่ตรวจวัดความดันสถิตและการเปลี่ยนแปลงปริมาณของลมเย็นภายในท่อลมประธาน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลมที่ไหลผ่านอุปกรณ์ปรับปริมาตรอากาศปลายทาง สำหรับในระบบปริมาตรอากาศแปรผัน ค่าความดันสถิตในท่อลมส่งจ่ายจะถูกกำหนดไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปจะวัดค่าความดันสถิตจากตำแหน่งการติดตั้งตัวตรวจรู้ความดันสถิตที่ระยะ 2/3 ของความยาวท่อลมประธาน

5. อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน (VAV Controller) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบ โดยสัญญาณจากตัวควบคุมอุณหภูมิ, ตัวตรวจวัดความเร็วลม, และตัวตรวจรู้ความดันสถิต จะถูกส่งมายัง controller เพื่อทำการประมวลผลจากข้อมูล แล้วจึงส่งสัญญาณสั่งการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อรักษาอุณหภูมิของลมเย็นที่ส่งจ่าย, ปริมาณการส่งจ่ายลมตามภาระความร้อนที่แปรเลี่ยนไป, และรักษาความดันสถิตภายในท่อลม

6. อุปกรณ์ทั่วไปของระบบปรับอากาศ เช่น ชุดคอยล์ความเย็น, กรองอากาศ และหัวจ่ายลมเย็น เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.1.5 ระบบท่อลมและพัดลมในระบบปริมาตรอากาศแปรผัน

*ระบบท่อลม* [3]

รูปที่ 2.3 แสดงความดันสูญเสียในระบบท่อลมของระบบแบบปริมาตรอากาศแปรผัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

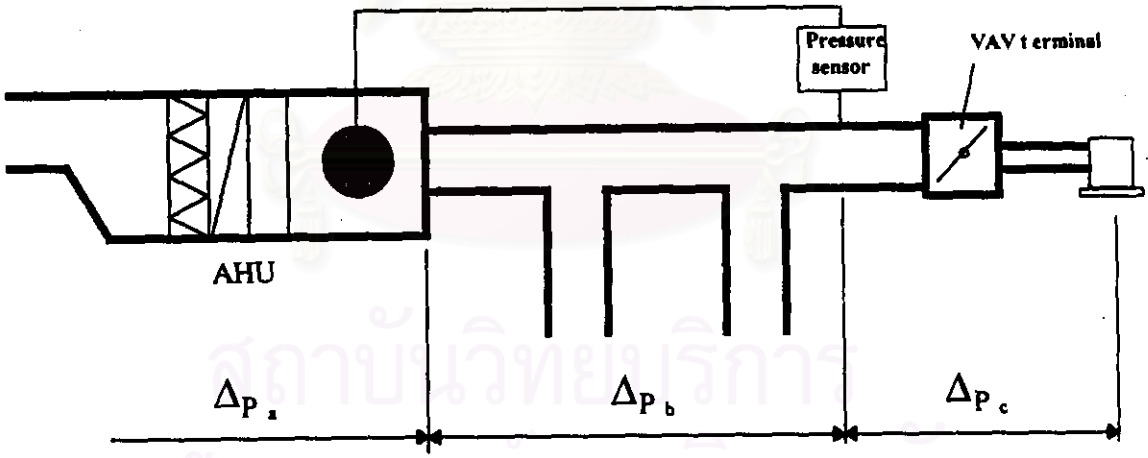
$\Delta P_a$ : ความดันสูญเสียในชุดอุปกรณ์จ่ายลมเย็น,แปรผันยกกำลังสองกับอัตราการไหลของอากาศ

$\Delta P_b$ : ความดันสูญเสียในท่อลม, แปรผันยกกำลังสองกับอัตราการไหลของอากาศ

$\Delta P_c$ : ความดันสูญเสียคงที่ ตกคร่อมอุปกรณ์ปรับปริมาตรอากาศปลายทาง,โดยทั่วไปมีค่าประมาณ ระหว่าง 25 - 50 % ของความดันลดทั้งหมดของระบบ

ดังนั้นความดันสูญเสียรวมของระบบท่อลมสามารถแสดงด้วยสมการต่อไปนี้

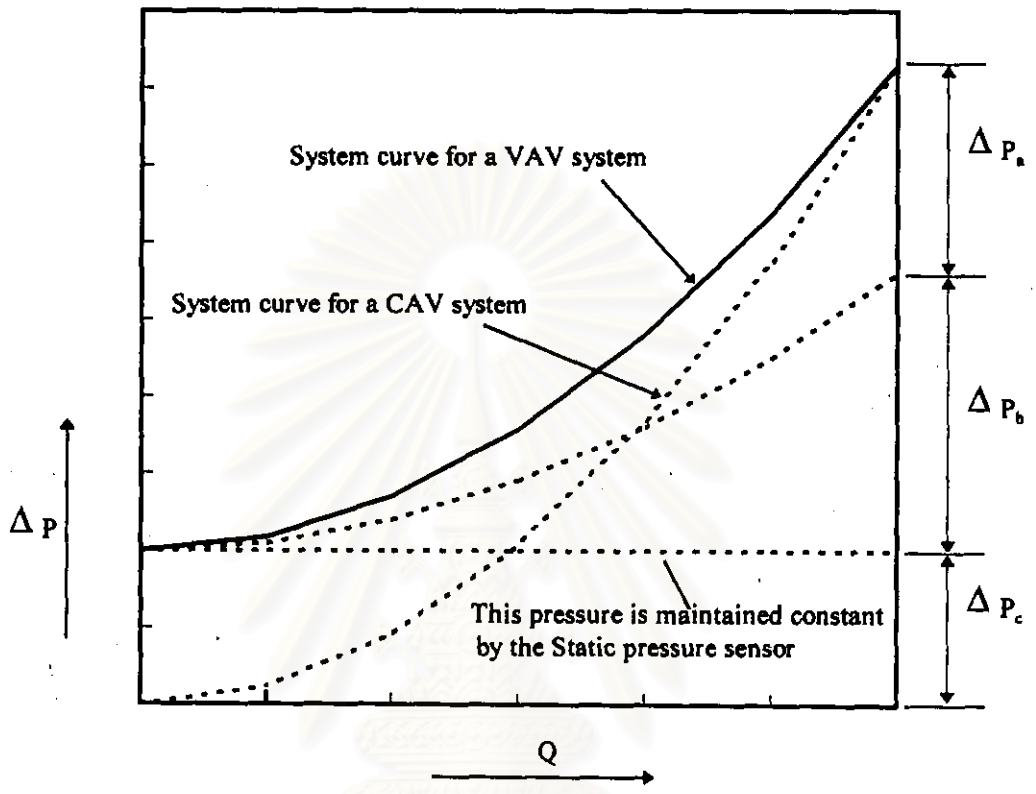
$$\Delta P_T = C_1 \cdot Q^2 + C_2$$




รูปที่ 2.3 ก ระบบท่อลมในระบบปริมาตรอากาศแปรผัน

---

3 Lack,C.W. Flow Modulation with good energy saving on centrifugal fans with inlet guide vanes. BHRA Fluid Engineering, K4(September,1982):501-514.




**รูปที่ 2.3 ข ความดันลดในระบบปริมาตรอากาศแปรผัน**

*พัดลม* [4]

ในระบบปริมาตรอากาศแปรผัน(VAV) จะพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลม (supply fan) เป็นส่วนสำคัญของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ของชุดอุปกรณ์ส่งจ่ายลมเย็น (Air Handling Unit) สำหรับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ด้านเช่น ชนิดของพัดลม, ชนิดของชุดควบคุม, ชนิดของอุปกรณ์ปรับปริมาตรอากาศปลายทาง และวิธีการแปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลม (Method of flow modulation) โดยทั่วไปพัดลมที่ใช้ในเครื่องจ่ายลมเย็นจะเป็น พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal fan) ซึ่งชนิดของใบพัดของพัดลมแบบนี้อาจแบบออกได้เป็นหลายชนิด เช่น Backward inclined (BI), Air Foil wheels (AF), และ Forward Curve wheels (FC) เป็นต้น ในการเลือกใช้ก็ขึ้นอยู่กับความต้องการ เช่น ปริมาณ

---

4 Herb Wendes,P.E. Variable Air Volume Manual. America: The Fairmont Press,1994.

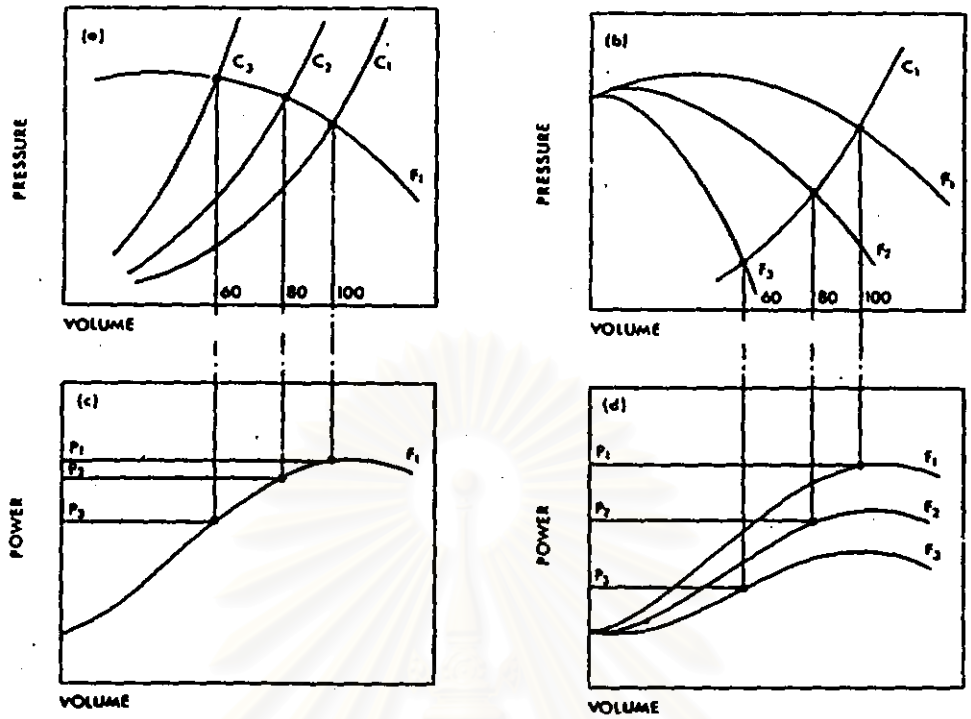
การส่งจ่ายลม, ความดันของระบบ, และเสียงรบกวน เป็นต้น ในส่วนของวิธีการแปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลมก็มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน โดยจุดประสงค์ของการควบคุมปริมาณลมก็เพื่อให้ได้ปริมาณของอากาศ เป็นสัดส่วนตามความต้องการของอุปกรณ์ปรับปริมาตรอากาศปลายทาง, เพื่อรักษาความดันที่เหมาะสมของท่อลม และเพื่อการประหยัดพลังงาน

วิธีการแปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลมสามารถทำได้หลายวิธีเช่น Riding the fan curve , Inlet Guide Vane และ Variable Fan Speed เป็นต้น ในการที่จะเลือกใช้วิธีแบบใด เราจะพิจารณาถึงความเหมาะสมของการทำงาน, การบำรุงรักษา, ต้นทุน(initial costs) และปริมาณของการประหยัดพลังงาน เป็นปัจจัยในการเลือกเอาวิธีการใดวิธีการหนึ่งมาใช้

1. *Riding the fan curve* แปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลมโดยการเพิ่มความดันสถิตที่ทางออกของพัดลม สามารถทำได้ 2 วิธีคือ การใช้บานปรับลมด้านทางออก(Discharge damper) และ terminal throttling ซึ่งการเพิ่มความดันสถิตจะเป็นการเปลี่ยนจุดการทำงาน (operating point) ที่เหมาะสมของพัดลมและระบบ ทำให้เมื่อลดปริมาณการส่งจ่ายลมลง ก็จะสามารถลดการใช้พลังงานของพัดลมลงได้ จากรูปที่ 2.4 ก แสดงสภาวะการทำงานของพัดลม เมื่อทำงานด้วยการใช้บานปรับลมด้านทางออก

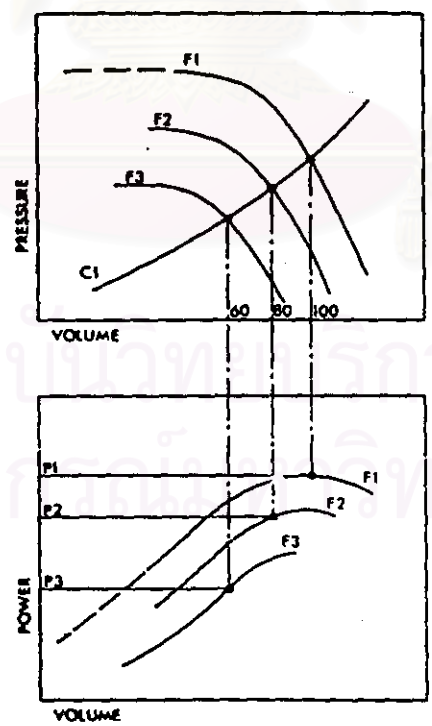
2. *Inlet Guide Vanes (IGV)* แปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลมโดยการใช้บานปรับลมติดตั้งด้านทางเข้าของพัดลมในแนวรัศมี และทำการปรับตำแหน่งของบานปรับลม เพื่อทำให้เกิดการหมุนวน(spin) ของอากาศในทิศทางเดียวกับการหมุนของพัดลม เมื่อต้องการแปรเปลี่ยนปริมาณลม ซึ่งมีผลทำให้ความดันสถิต และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมลดลง การควบคุมแบบนี้ไม่เพียงแค่ควบคุมปริมาณลมเท่านั้น ในการปรับตำแหน่งของบานปรับลมแต่ละครั้ง จะทำให้เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะการทำงานของพัดลม (fan performance curve) เปลี่ยนไปด้วย จากรูปที่ 2.4 ข จะแสดงเส้นคุณลักษณะของพัดลม เมื่อใช้ Inlet Guide Vanes

3. *Variable Fan Speed (VSD)* เป็นการควบคุมปริมาณลมของพัดลมโดยการใช้อุปกรณ์ควบคุมความถี่ (Inverter) เพื่อควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งที่ใช้ในการขับพัดลม โดยเมื่อความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ลดลงก็จะทำให้ปริมาณลมและความดันที่พัดลมสร้างลดลงตามไปด้วย มีผลทำให้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมลดลง จากรูปที่ 2.5 แสดงเส้นคุณลักษณะของพัดลม เมื่อใช้ Variable Fan Speed




(ก) Riding the fan curve (ข) Inlet Guide Vanes

**รูปที่ 2.4** วิธีการแปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลม



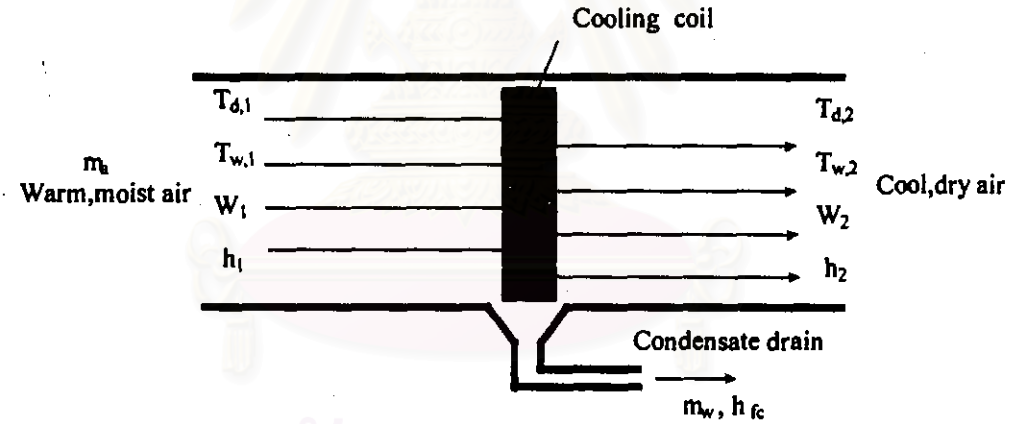

**รูปที่ 2.5** วิธีการแปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลมโดย Variable Fan Speed

### 2.1.6 การคำนวณค่าอัตราการส่งจ่ายลมเย็น และการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปริมาตรอากาศแปรผัน

ในระบบปรับอากาศแบบปริมาตรอากาศแปรผัน เราจะพิจารณาถึงการประหยัดพลังงานของระบบเนื่องจากปริมาณของการส่งจ่ายลมเย็นที่ลดลงในช่วงเวลาที่ภาระความร้อนของพื้นที่ปรับอากาศลดลงน้อยกว่าช่วงภาระความร้อนสูงสุด (peak load) ในที่นี้เราจะพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนของพัดลมในระบบเท่านั้น โดยจะพิจารณาให้ผลกระทบเนื่องจากตัวแปรอื่น ๆ มีผลต่อการใช้พลังงานของระบบน้อยมาก

- การคำนวณค่าอัตราการส่งจ่ายลมเย็น

การคำนวณหาอัตราการส่งจ่ายลมเย็นสามารถหาได้โดย การหาภาระความร้อนที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงในหัวข้อ 2.2 ต่อไป จากค่าภาระความร้อนภายในพื้นที่ปรับอากาศสามารถนำมาคำนวณหาค่าอัตราการส่งจ่ายลมเย็นได้โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่คอยล์เย็น




**รูปที่ 2.6** กระบวนการทำความเย็นและลดความชื้นในคอยล์เย็น

จากรูปที่ 2.6 พิจารณาสมการสมดุลทางความร้อนของการไหลของอากาศผ่านคอยล์เย็น

ภาระความร้อนสัมผัส

$$\dot{Q}_{cool,S} = \dot{m}_a C_{p,a}(T_{d,1} - T_{d,2}) \qquad (2.1)$$

ภาระความร้อนแฝง

$$\dot{Q}_{cool,L} = \dot{m}_w h_{fc} = \dot{m}_a(W_1 - W_2)h_{fc} \qquad (2.2)$$

ภาระความร้อนรวม

$$\dot{Q}_{cool,T} = \dot{Q}_{cool,S} + \dot{Q}_{cool,L} = \dot{m}_a(h_1 - h_2) \quad (2.3)$$

โดยที่ $\dot{m}_a$ คือ อัตรามวลไหลของอากาศ,kg

$\dot{m}_w$ คือ อัตรามวลไหลของน้ำ,kg

$C_{p,a}$ คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศ มีค่าเท่ากับ 1 kJ/kg.K

$T_d$ คือ อุณหภูมิของอากาศ,K

W คือ ค่าความชื้นจำเพาะของอากาศ,$kg_{dry\ air}$/kJ

h คือ เอนทัลปีของอากาศ (kJ/kg)

$h_{fc}$ คือ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ (kJ/kg)

จากสมการ (2.1) และ (2.3) ข้างต้น เราสามารถคำนวณหาอัตราการส่งจ่ายลมเย็นในระบบที่ต้องการสำหรับภาระความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{Q}_{cool,S}}{\rho_a C_{p,a}(T_{d,1} - T_{d,2})} \quad (2.4)$$

หรือ

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{Q}_{cool,T}}{\rho_a(h_1 - h_2)} \quad (2.5)$$

- การคำนวณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลม

สำหรับการคำนวณหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนการทำงานของพัดลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Power_{fluid} = \dot{m}_a \frac{(P_i - P_o)}{\rho} = \dot{V}_a \cdot \Delta P \quad (2.6)$$

โดยที่ $Power_{fluid}$ คือ กำลังงานที่ให้กับของไหล,W

$P_i$ คือ ความดันลมก่อนเข้าพัดลม,Pa

$P_o$ คือ ความดันลมออกจากพัดลม,Pa

$\Delta P$ คือ ความดันที่พัดลมสร้างขึ้น หรือความดันสูญเสียรวมของระบบท่อลม,Pa

$\dot{V}_a$ คือ อัตราการไหลของอากาศ,$m^3/s$

แต่สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการขับการหมุนของพัดลม จะต้องมีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องให้กับของไหล เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานของการไหลภายในท่อ เนื่องจากประสิทธิภาพของพัดลมและประสิทธิภาพของมอเตอร์ ดังนั้นพลังงานที่ใช้จริงสำหรับการทำงานของพัดลมคำนวณได้จาก

$$P_{E,Fan} = \frac{\dot{V}_s \cdot \Delta P}{\eta_F \eta_M} \qquad (2.7)$$

โดยที่ $P_{E,Fan}$ คือ กำลังงานไฟฟ้าที่ให้กับพัดลม,W

$\eta_M$ คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์

$\eta_F$ คือ ประสิทธิภาพของพัดลม

### 2.1.7 การวิเคราะห์ระบบท่อลม (System Analysis)

ระบบท่อลมของระบบปรับอากาศในที่นี้จะพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงของตำแหน่งในท่อลม และการถ่ายเทความร้อนของท่อลมกับสิ่งแวดล้อมไม่มีผลต่อการพิจารณาความดันสูญเสียในระบบท่อลม ทำให้เราสามารถลดรูปสมการเบอร์นูลี (Bernoulli's equation) เพื่อสร้างความสัมพันธ์สำหรับความต้านทานการไหลระหว่างตำแหน่ง 2 ตำแหน่งในท่อลมได้เป็น

$$\Delta P_{1-2} = P_{t,1} - P_{t,2}$$

$$P_t = P_s + P_v \quad ; P_v = \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

โดยที่ $P_t$ คือ ความดันรวม,Pa

$P_s$ คือ ความดันสถิต,Pa

$P_v$ คือ ความดันไดนามิค,Pa

สำหรับความดันสูญเสียรวมของระบบท่อลมสามารถหาได้จากการแบ่งท่อลมออกเป็นท่อนย่อย ๆ ซึ่งสามารถคำนวณหาความเสียดทานและความสูญเสียไดนามิค(dynamic loss) สำหรับท่อลมแต่ละท่อนด้วยสมการ

$$\Delta P_{t_i} = \Delta P_{f_i} + \sum_{j=1}^{m} \Delta P_{ij} + \sum_{k=1}^{n} \Delta P_{ik} \quad , i = 1,2,\ldots,n_{up} + n_{dn} \qquad (2.8)$$

โดยที่ $\Delta P_{t_i}$ คือ การเปลี่ยนแปลงความดันรวมสุทธิของท่อลมย่อย-i,Pa

$\Delta P_{f_i}$ คือ ความดันสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานของท่อลมย่อย-i,Pa

$\Delta P_{ij}$ คือ ความดันสูญเสียเนื่องจากข้อต่อต่าง ๆ ของท่อลมย่อย-i,Pa

$\Delta P_{ik}$ คือ ความดันสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ของท่อลมย่อย-i,Pa

m คือ จำนวนของข้อต่อ

n คือ จำนวนของอุปกรณ์

$n_{dn}$ คือ จำนวนของท่อลมย่อยในส่วน downstream ของพัดลม

$n_{up}$ คือ จำนวนของท่อลมย่อยในส่วน upstream ของพัดลม

และสมการความดันสูญเสียรวมของระบบท่อลมสามารถแสดงได้โดย

$$\Delta P_t = \sum_{i \in F_{up}} \Delta P_{t_i} + \sum_{i \in F_{dn}} \Delta P_{t_i} \quad , i = 1,2,\ldots, n_{up} + n_{dn} \qquad (2.9)$$

โดยที่ $F_{up}$ และ $F_{dn}$ คือจำนวนท่อลมย่อยในช่วง upstream และ downstream ของพัดลม

จากสมการ (2.8) ความดันสูญเสียในระบบท่อลมสามารถแบ่งออกเป็น 1) ความดันสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานของท่อลม และ 2) ความดันสูญเสียไดนามิค

- ความดันสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานของท่อลม (Frictional losses)

ความดันสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานของท่อลมเกิดขึ้นเมื่อ อากาศไหลผ่านท่อลมจะมีความต้านทานเนื่องจากผลจากความหนืดของของไหล และผลของการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลและอนุภาคในการไหลของของไหลผ่านท่อตรง ซึ่งความดันสูญเสียภายในท่อเนื่องจากความเสียดทานสามารถคำนวณได้จากสมการของดาร์ซี-ไวส์บาค (Darcy-weisbach) ดังนี้

$$\Delta P = f(\frac{L}{D_h})(\rho\frac{V^2}{2}) \qquad (2.10)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของท่อลม,m

$\rho$ คือ ความหนาแน่นของของไหล,$kg/m^3$

V คือ ความเร็วของของไหล,m/s

f คือ ตัวประกอบความเสียดทาน

$D_h$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค,m ( $D_h = 4A / P$ )

และตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor, f) สามารถหาได้จากสมการซึ่งได้จากความสัมพันธ์ของของไหลและคุณสมบัติของท่อกับความเร็วเฉลี่ยของไหล, V ดังนี้

Colebrook's equation(1938-39)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.87\ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7D_h}+\frac{2.52}{Re\sqrt{f}}\right) \qquad (2.11)$$

Altshul's modified equation(1975)

$$f' = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_h}+\frac{68}{Re}\right)^{0.25} \qquad (2.12)$$

ถ้า $f' \geq 0.018$ แล้ว $f = f'$

ถ้า $f' < 0.018$ แล้ว $f = 0.85f' + 0.0028$

โดยที่ $\varepsilon / D_h$ = อัตราส่วนระหว่างความหยาบผิวกับเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค

Re = Reynolds number ($Re = V \cdot D_H / \nu$)

- ความดันสูญเสียไดนามิค (Dynamic losses)

เป็นผลเนื่องจาก การไหลถูกรบกวนเมื่อของไหลไหลผ่าน ข้อต่อต่าง ๆ ซึ่งมีผลทำให้ทิศทางของการไหลหรือพื้นที่ของการไหลภายในท่อลมเปลี่ยนไป การคำนวณค่าความดันสูญเสียไดนามิคสามารถหาได้โดยใช้พารามิเตอร์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความดันสูญเสียรวม ต่อความดันเนื่องจากความเร็วที่ภาคตัดอ้างอิง

$$C = \frac{\Delta P_j}{\rho \cdot V^2/2} \qquad (2.13)$$

ดังนั้นความสูญเสียไดนามิคเนื่องจากการไหลของอากาศผ่าน ข้อต่อต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta P_j = C_o P_{v,o} \qquad (2.14)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- ความดันสูญเสียภายในท่อลมย่อย (Ductwork sectional losses)

ความดันสูญเสียรวมในท่อลมย่อยสามารถคำนวณได้โดยการรวมสมการ (2.10) และ (2.14) ในเทอมของ $\Delta P$ , ซึ่ง $\Sigma C$ คือ ผลรวมของสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเฉพาะที่ภายในท่อลมย่อย โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเฉพาะที่ของข้อต่อต่าง ๆ ต้องอ้างอิงถึงความดันไดนามิคของหน้าตัดที่ใช้อ้างอิง

$$\Delta P = \left[ f\left(\frac{L}{D_h}\right) + \Sigma C \right]\left(\rho \frac{V^2}{2}\right) \qquad (2.14)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.2 โปรแกรมวิเคราะห์พลังงานในอาคาร(Energy Simulation Program)

โปรแกรมวิเคราะห์พลังงานในอาคาร เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยในการคำนวณหาค่าการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายในอาคารหลังหนึ่ง ๆ ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พลังงานในอาคารโดยทั่วไป จะคำนวณค่าภาระความร้อนของการถ่ายความร้อนผ่านกรอบอาคารเป็นแบบรายชั่วโมง และประมาณค่าการใช้พลังงานของอาคารในส่วนของการทำงานของระบบปรับอากาศ (HVAC system) เป็นแบบรายชั่วโมงเช่นกัน

สำหรับขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรมวิเคราะห์พลังงานในอาคารโดยทั่วไป เราสามารถแบ่งขั้นตอนของการคำนวณออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การประมาณค่าภาระความร้อน (Load calculation)
2. การประมาณค่าพลังงานในระบบจ่ายลมเย็น (Secondary system simulation)
3. การประมาณค่าพลังงานในระบบเครื่องทำน้ำเย็น (Primary system simulation)

### 2.2.1 การประมาณค่าภาระความร้อน (Load calculation)

การประมาณค่าภาระความร้อน เป็นการคำนวณหาค่าความร้อนที่ สูญเสีย / ได้รับ ของพื้นที่การปรับอากาศภายในอาคารสำหรับระบบปรับอากาศ เพื่อที่จะรักษาสภาพความสบายทางอุณหภูมิเอาไว้ โดยการคำนวณค่าความร้อนซึ่งพิจารณาเป็นภาระความร้อนของระบบปรับอากาศจะแยกได้เป็น

- ความร้อนจากดวงอาทิตย์ (Solar heat gains) คือความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ผ่านกระจกเข้ามาภายในอาคาร
- ความร้อนผ่านกรอบอาคาร (Heat transmission) คือการนำความร้อนผ่านกรอบของอาคาร
- แหล่งกำเนิดความร้อนภายในอาคาร (Heat Generated) ได้แก่ คน, แสงสว่าง, และอุปกรณ์ต่าง ๆ
- การระบายอากาศและการซึมของอากาศผ่านกรอบอาคาร (Ventilation and air infiltration)

จากค่าความร้อนที่ถ่ายเทและเกิดขึ้นภายในอาคาร ณ ขณะนั้น จะคำนวณโดยกำหนดให้อุณหภูมิภายในอาคาร (indoor temperature) มีค่าคงที่ และเมื่อพิจารณาผลของการสะสมความร้อนภายในวัสดุต่าง ๆ ภายในอาคาร ค่าอัตราความร้อนที่จะต้องนำออกไปจากห้องเพื่อรักษาอุณหภูมิของอากาศภายในห้องให้มีค่าคงที่เรียกว่า ค่าภาระการทำความเย็น (cooling load) แต่ในความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิภายในอาคารมีการแกว่งตัว เนื่องจากผลของคุณลักษณะของระบบควบคุม ซึ่งเราเรียกอัตราความร้อนของระบบปรับอากาศนี้ว่า "Heat Extraction rate"

**2.2.2 การประมาณค่าพลังงานในระบบจ่ายลมเย็น (Secondary system simulation)**

เป็นขั้นตอนในการคำนวณค่าประมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบจ่ายลมเย็น โดยค่าภาระความร้อนจากการคำนวณในส่วนของการประมาณค่าภาระความร้อน (Load calculation) จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณลมเย็นของระบบจ่ายลมเย็น เพื่อใช้ในการคำนวณร่วมกับคุณสมบัติเฉพาะของระบบจ่ายลมเย็นแต่ละแบบ เพื่อพิจารณาหาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบจ่ายลมเย็น

**2.2.3 การประมาณค่าพลังงานในระบบเครื่องทำน้ำเย็น (Primary system simulation)**

เป็นขั้นตอนในการคำนวณค่าประมาณการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบเครื่องทำความเย็น เช่น เครื่องทำน้ำเย็น, เครื่องทำน้ำร้อน, และหอผึ่งลม เป็นต้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการประมาณค่าการใช้พลังงานคือ ค่าภาระการทำความเย็นที่ต้องการของระบบจ่ายลมเย็นและคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละอุปกรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์พลังงานในอาคารที่นำมาใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์ในที่นี้คือ โปรแกรม BLN-ESP1[5] โดยเป็นโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย นายบุญชัย เลิศนุวัฒน์ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าภาระความร้อนแบบรายชั่วโมงของระบบปรับอากาศ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้ในการคำนวณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบจ่ายลมเย็นแบบปริมาตรอากาศแปรผันต่อไป

เหตุผลในการเลือกโปรแกรม BLN-ESP1 มาใช้ในการศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบจ่ายลมเย็นแบบปริมาตรอากาศแปรผัน ซึ่งใช้การควบคุมแบบ Inlet guide vanes flow control ของอาคารสำนักงานตัวอย่างศึกษา มีดังนี้

- โปรแกรมนี้มี source code ของโปรแกรม ทำให้ง่ายต่อการปรับปรุงโปรแกรมให้เหมาะสมกับการประมาณค่าการใช้พลังงานของระบบจ่ายลมเย็นแบบปริมาตรอากาศแปรผัน

- ข้อมูลอากาศอยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการแก้ไข

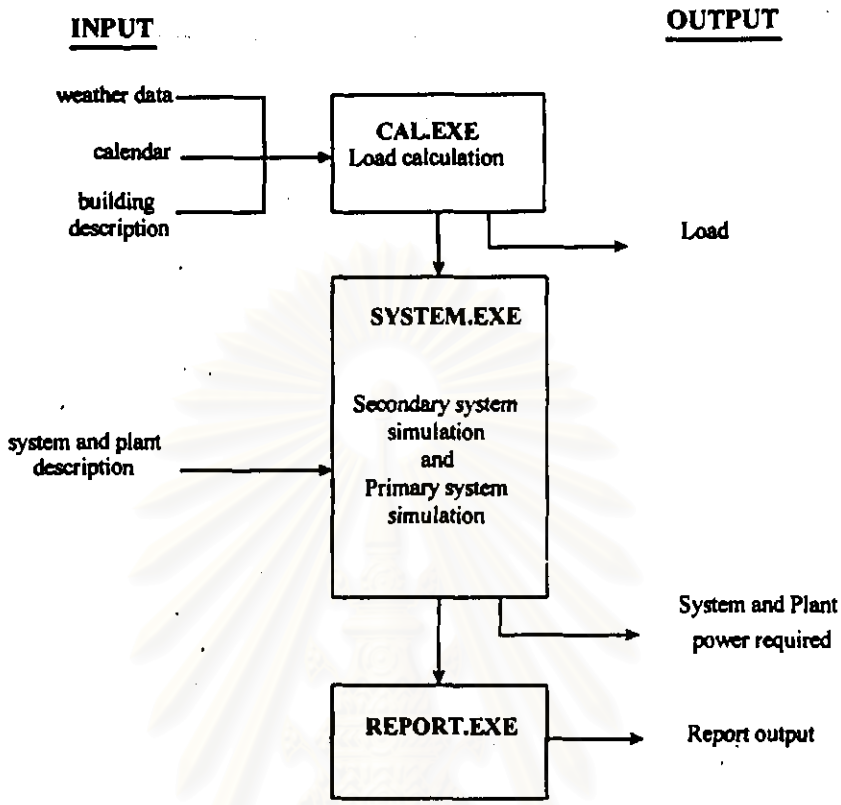
**ขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรม BLN-ESP1**

ในส่วนการทำงานของโปรแกรม BLN-ESP1 จะแบ่งขั้นตอนการคำนวณออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) Load calculation 2) Secondary system simulation 3) Primary system simulation โดยแยกการทำงานของโปรแกรมออกเป็น 3 ไฟล์ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรมด้วยแผนผังการทำงานต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

---

5 บุญชัย เลิศนุวัฒน์. การพัฒนาโปรแกรมจำลองรูปแบบการใช้พลังงานสำหรับอาคารในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.




รูปที่ 2.7 แผนผังการทำงานของโปรแกรม BLN-ESP1

ขั้นตอนการใส่ข้อมูล (Input) จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนการใส่ข้อมูลรายละเอียดของอาคารเบื้องต้น (Building description input)

- ขั้นตอนการใส่ข้อมูลของระบบส่งจ่ายลมเย็นและระบบทำน้ำเย็น (System and Plant description input)

- ขั้นตอนการใส่ข้อมูลรายละเอียดของอาคาร

ข้อมูลอาคารเบื้องต้น เป็นข้อมูลสำหรับใช้ในการคำนวณค่าภาระความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารเพื่อคำนวณหาค่าพลังงานที่ต้องการ สำหรับการรักษาอุณหภูมิและสภาวะความสบายภายในอาคาร โดยลักษณะของอาคารและรายละเอียดต่าง ๆ พอสรุป ได้ดังนี้

- ชนิดวัสดุก่อสร้างที่ใช้สำหรับ กำแพง , พื้น , หลังคาและผนัง
- ตำแหน่งที่ตั้งและทิศทางของอาคาร

- จำนวนโซน และตำแหน่งที่ตั้งของแต่ละโซนในอาคาร
- ขนาด , โครงสร้าง และตำแหน่งของพื้นที่ผิวผนังภายนอก , ภายใน และพื้น
- คุณสมบัติทางความร้อน(Thermo properties) ของแต่ละโซน
- จำนวนคนในแต่ละโซน
- ข้อมูลแสงสว่าง , อุปกรณ์ต่าง ๆ ในแต่ละโซน
- ข้อมูลของการระบายอากาศและปริมาณอากาศซึมผ่านกรอบอาคาร
- ตารางกำหนดการของผู้อาศัย ในอาคาร
- ตารางกำหนดการเปิด/ปิด ของระบบแสงสว่าง และ อุปกรณ์ต่าง ๆ

- ขั้นตอนการใส่ข้อมูลของระบบส่งจ่ายลมเย็นและระบบทำน้ำเย็น (System and Plant description input)

ข้อมูลในส่วนของระบบส่งจ่ายลมเย็นและระบบทำน้ำเย็น จะถูกนำมาใช้ประกอบในการประมาณการใช้พลังงานของระบบทั้งสอง โดยรายละเอียดของข้อมูลที่จำเป็นพอสรุปได้ดังนี้

- ชนิดของระบบส่งจ่ายลมเย็นและระบบทำน้ำเย็น
- ขนาด และข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะของระบบส่งจ่ายลมเย็นและระบบทำน้ำเย็น
- ตารางกำหนดการเปิด/ปิด การทำงานของระบบปรับอากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.2.4 แนวทางการพัฒนาโปรแกรมประมาณค่าการใช้พลังงานในระบบปริมาตรอากาศแปรผัน(VAV)

ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปริมาตรอากาศแปรผัน ซึ่งใช้ Inlet Guide Vanes และ Variable Speed Drive เป็นอุปกรณ์สำหรับแปรเปลี่ยนปริมาณลมของพัดลม เป็นการสร้างโปรแกรมย่อยขึ้นในส่วนการคำนวณของระบบส่งจ่ายลมเย็นของโปรแกรม BLN-ESP1 โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ได้ตั้งชื่อว่า VAV-CAL โดยจะประกอบด้วยโปรแกรมย่อยหลายโปรแกรมที่มีหน้าที่ต่าง ๆ กัน ส่วนรายละเอียดและขั้นตอนการทำงานที่สำคัญของโปรแกรมที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วย

ก) ขั้นตอนการคำนวณหาอัตราการส่งจ่ายลมเย็น โดยในขั้นตอนนี้จะรับเอาค่า Heat extraction rate พื้นที่และอุณหภูมิแบบรายชั่วโมงของโซนการปรับอากาศ จากโปรแกรม BLN-ESP1 มาเพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการส่งจ่ายลมเย็น ตามสมการ (2.5)

ข) ขั้นตอนการอ่านข้อมูลเริ่มต้นของระบบท่อลม และพัดลมในระบบปริมาตรอากาศแปรผัน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเรียกใช้โปรแกรมย่อย READ_DAT สำหรับการอ่านข้อมูลเริ่มต้นของปัญหาจากอินพุทไฟล์

ค) ขั้นตอนการคำนวณค่าความดันสูญเสียภายในท่อลม เนื่องจากอัตราการส่งจ่ายลมเย็นจากข้อ ก) ในขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณหาสมการแสดงคุณลักษณะของท่อลม (System characteristic curve) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียภายในท่อลม โดยจะเรียกใช้โปรแกรมย่อย DUCT ซึ่งภายในโปรแกรมมีทางเลือกให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้สมการแสดงคุณลักษณะของท่อลม 2 ทางเลือกคือ

- เลือกใช้สมการที่กำหนดไว้ให้ภายในโปรแกรม ซึ่งจะแบ่งสมการตามภาระของการส่งจ่ายลมเย็น โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของพื้นที่ต่อภาระทำความเย็น (ตารางเมตร ต่อ ตันความเย็น) 3 สมการ คือ 1. ภาระการส่งจ่ายสูง 2. ภาระการส่งจ่ายปานกลาง และ 3. ภาระการส่งจ่ายต่ำ

- ใช้สมการซึ่งคำนวณจากข้อมูลเริ่มต้นของระบบท่อลมที่ผู้ใช้กำหนดเอง

ง) ขั้นตอนการคำนวณกำลังงานที่ใช้ในการหมุนเพลาของพัดลม เพื่อเอาชนะค่าความดันสูญเสียภายในท่อลมเนื่องจากการส่งจ่ายลมเย็นผ่านท่อลม ในขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณหาสมการแสดงสมรรถนะการทำงานของพัดลม (Fan performance curve) เพื่อใช้ในการคำนวณหากำลัง

งานที่ใช้ของพัดลม โดยเรียกใช้โปรแกรมย่อย FAN ซึ่งภายในโปรแกรมจะมีขั้นตอนการทำงานที่สำคัญ 2 ขั้นตอนคือ

1. การเลือกพัดลมที่ใช้ในระบบส่งจ่ายลมเย็น จะประกอบด้วย

- พัดลมที่กำหนดให้ภายในโปรแกรม โดยจะเป็นสมการแสดงสมรรถนะของพัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (Centrifugal Fan) ยี่ห้อ.YORK (BI DWDI) ซึ่งกำหนดไว้ 3 ขนาด คือ ขนาดใบพัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30นิ้ว , 24.5 และ 18.25 นิ้ว ตามลำดับ

- พัดลมที่ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดเอง ในส่วนนี้เป็นการคำนวณหาสมการแสดงสมรรถนะของพัดลมตามความต้องการของผู้ใช้ โดยให้ผู้ใช้กรอกชุดข้อมูลของพัดลมจากผู้ผลิตลงในอินพุทไฟล์ ซึ่งข้อมูลที่ต้องการสำหรับการคำนวณ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด , ความกว้างของใบพัด , พื้นที่ขาออกของพัดลม (Fan-housing outlet area) , ความเร็วรอบของพัดลม , อัตราการส่งจ่ายลมเย็น , ความดันสถิตที่พัดลมสร้างขึ้น (Static pressure gain) และ กำลังงานของเพลาตามลำดับ

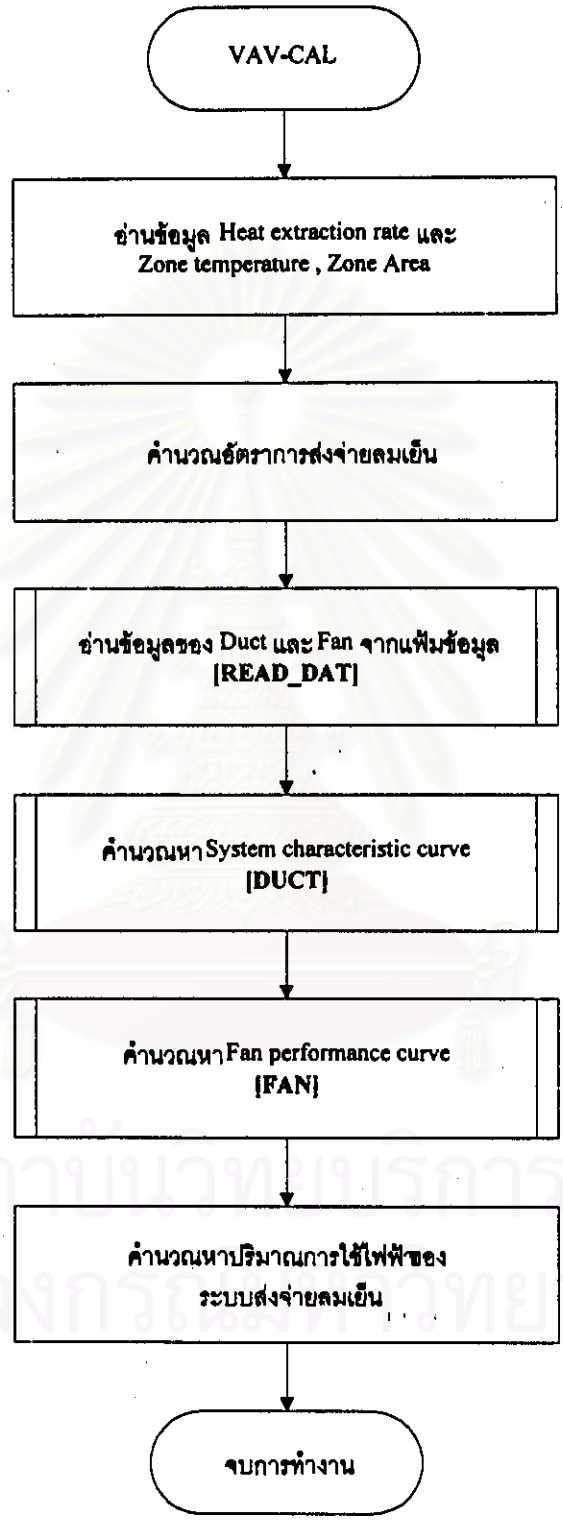
2. การเลือกอุปกรณ์แปรเปลี่ยนปริมาณลม (Flow modulator) ภายในโปรแกรมจะทางเลือกในการเลือกใช้ Flow modulator 2 ทางเลือก คือ การใช้ Inlet Guide Vanes และ การใช้ Variable Speed Drive ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเรียกใช้โปรแกรมย่อย 2 โปรแกรมคือ

- โปรแกรมย่อย [IGV]

- โปรแกรมย่อย [VSD]

จ) ขั้นตอนการคำนวณหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมในระบบส่งจ่ายลมเย็นจากกำลังงานที่ใช้ในการหมุนเพลาของพัดลม

ซึ่งในขั้นตอนโดยสรุปทั้งหมดสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเขียนเป็นแผนผังแสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 2.8 ส่วนลักษณะรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และเพื่อความเข้าใจถึงการทำงานของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถอธิบายหน้าที่และรายละเอียดของโปรแกรมย่อยต่าง ๆ ที่ประดิษฐ์ขึ้นได้ดังต่อไปนี้




**รูปที่ 2.8** แผนผังแสดงลำดับการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมย่อย READ_DAT [Subroutine READ_DAT]

มีหน้าที่ในการอ่านข้อมูลเบื้องต้นของปัญหาภายในอินพุทไฟล์ โดยแบ่งข้อมูลการอ่านข้อมูลภายในอินพุทไฟล์ ออกเป็น 3 ส่วน คือ ข้อมูลของระบบท่อลม , ข้อมูลของพัดลม และข้อมูลการเลือกใช้ Flow modulator สำหรับข้อมูลของระบบท่อลม และข้อมูลของพัดลม ผู้ใช้จะเป็นผู้กำหนดเองว่าต้องการสมการแสดงคุณลักษณะของท่อลม และสมการแสดงสมรรถนะของพัดลม ซึ่งกำหนดไว้ให้ภายในโปรแกรม หรือหากต้องการเป็นผู้กำหนดระบบท่อลมและพัดลมที่ใช้ขึ้นเองนั้นโปรแกรมจะต้องการชุดข้อมูลของระบบท่อลม และข้อมูลแสดงสมรรถนะของพัดลมจากผู้ผลิตเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

โปรแกรมย่อย DUCT [Subroutine DUCT]

มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าความดันสูญเสียภายในท่อลม โดยมีแผนผังแสดงการลำดับการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.9 สำหรับภายในโปรแกรมจะเริ่มต้นการทำงานจากรับเอาข้อมูลระบบท่อลมของอินพุทไฟล์ เพื่อหาสมการแสดงคุณลักษณะของท่อลม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ทางเลือก คือ

- ระบบท่อลมที่กำหนดให้ภายในโปรแกรม เรียกใช้โปรแกรมย่อย DUCT_SYSTEM จะต้องการพารามิเตอร์ในการตัดสินใจเลือกสมการแสดงคุณลักษณะของท่อลม คือ อัตราส่วนของพื้นที่ต่อ ตันของภาระทำความเย็น เป็นตัวแปร ในการตัดสินใจเลือกสมการซึ่งกำหนดให้

- ระบบท่อลมที่ผู้ใช้กำหนดเองต้องการชุดข้อมูลเบื้องต้น ซึ่งใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณหาสมการแสดงคุณลักษณะของท่อลม ซึ่งในการคำนวณจะเลือกเอาท่อทางเดินที่มีระยะทางเดินของท่อลมยาวที่สุด (longest run duct) โดยรายละเอียดของระบบท่อลมที่ต้องการสำหรับอินพุทไฟล์ ได้แก่ จำนวนท่อนของท่อลม , ชนิดของท่อลม , ขนาด , อัตราการไหลผ่านท่อลม , ความยาวท่อลม และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ตามลำดับ สำหรับการคำนวณค่าความดันสูญเสียของท่อลมจะคำนวณตามสมการ (2.9) โดยจะเรียกใช้โปรแกรมย่อย SECTION เพื่อใช้ในการคำนวณความดันสูญเสียในท่อลมแต่ละท่อน และสร้างสมการแสดงคุณลักษณะของท่อลม โดยเรียกใช้โปรแกรมย่อย 2 โปรแกรมคือ โปรแกรมย่อย GEN-DAT และ โปรแกรมย่อย L_SQUARE

จากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น เมื่อได้สมการแสดงคุณลักษณะของท่อลม ก็จะนำไปคำนวณหาค่าความดันสูญเสียภายในท่อลมเนื่องจากอัตราการไหลของลมส่งจ่ายต่อไป

โปรแกรมย่อย FAN [Subroutine FAN]

มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่ากำลังงานที่ใช้ขับการหมุนของใบพัด โดยมีแผนผังแสดงการลำดับการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.10 สำหรับภายในโปรแกรมเริ่มต้นการทำงานจากการรับเอาข้อมูลเบื้องต้นของพัดลม และการเลือกใช้อุปกรณ์แปรเปลี่ยนปริมาณลมจากอินพุทไฟล์ เพื่อใช้ในการหาสมการแสดงสมรรถนะของพัดลมดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ ง) ข้างต้น

การเลือกพัดลมที่ใช้ จะแบ่งออกเป็น 2 ทางเลือก คือ พัดลมที่กำหนดให้ภายในโปรแกรม จะเป็นการจำลองฟังก์ชันแสดงสมรรถนะของพัดลม โดยวิธีของ David K. Eads,1981[6] ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้แสดงสมรรถนะของพัดลม ในที่นี้คือฟังก์ชันแสดงประสิทธิภาพทางกลของพัดลม และ ฟังก์ชันหามุมเฉลี่ยของลมทางขาออกของพัดลม และในส่วนของการกำหนดพัดลมของผู้ใช้เอง จะต้องการชุดข้อมูลแสดงสมรรถนะของพัดลมจากผู้ผลิตบางส่วน โดยกำหนดไว้ภายในอินพุทไฟล์ เพื่อใช้ในการคำนวณหา ฟังก์ชันที่ใช้แสดงสมรรถนะของพัดลมที่ผู้ใช้กำหนดให้

นอกจากนี้ภายในโปรแกรมยังต้องการทราบถึงอุปกรณ์แปรเปลี่ยนปริมาณลมซึ่งใช้ในการควบคุมปริมาณการส่งจ่ายลมเย็น โดยมีโปรแกรมย่อย 2 โปรแกรมคือ โปรแกรมย่อย IGV และโปรแกรมย่อย VSD ซึ่งรับเอาฟังก์ชันแสดงสมรรถนะของพัดลมจากโปรแกรม FAN เพื่อใช้ในการคำนวณค่ากำลังงานที่ใช้ขับการหมุนของใบพัดต่อไป

โปรแกรมย่อย IGV [Subroutine IGV]

เป็นโปรแกรมย่อยหนึ่ง ในโปรแกรมย่อย FAN มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่ากำลังงานที่ใช้ขับการหมุนของใบพัด เมื่อพัดลมทำงานอยู่ในช่วงภาระการทำงานบางส่วน (part load) โดยการใช้ Inlet Guide Vanes เป็น flow modulator ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม จะเริ่มจากการรับเอาฟังก์ชันแสดงประสิทธิภาพทางกลของพัดลม และ ฟังก์ชันหามุมเฉลี่ยของลมทางขาออกของพัดลม ซึ่งแสดงสมรรถนะการทำงานของพัดลมจากโปรแกรมย่อย FAN มาคำนวณค่ากำลังงานสูงสุดของการทำงานของพัดลม จากนั้นคำนวณค่ากำลังงานของพัดลมในช่วงการทำงานในช่วง part load

---

6 David K.Eads. Establishing a centrifugal-fan performance curve. Chemical Engineering. (March 23,1981):201-208.

โดยใช้แบบจำลองฟังก์ชันการทำงานของ Inlet Guide Vanes* ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{P_E}{P_{E,max}} = 1.7868 \cdot PLR^3 - 2.6639 \cdot PLR^2 + 1.5067 \cdot PLR + 0.3705$$

$P_E$ = กำลังงานของพัดลมในช่วงการทำงานในช่วง part load

$P_{E,max}$ = กำลังงานของพัดลมในช่วงการทำงานสูงสุด

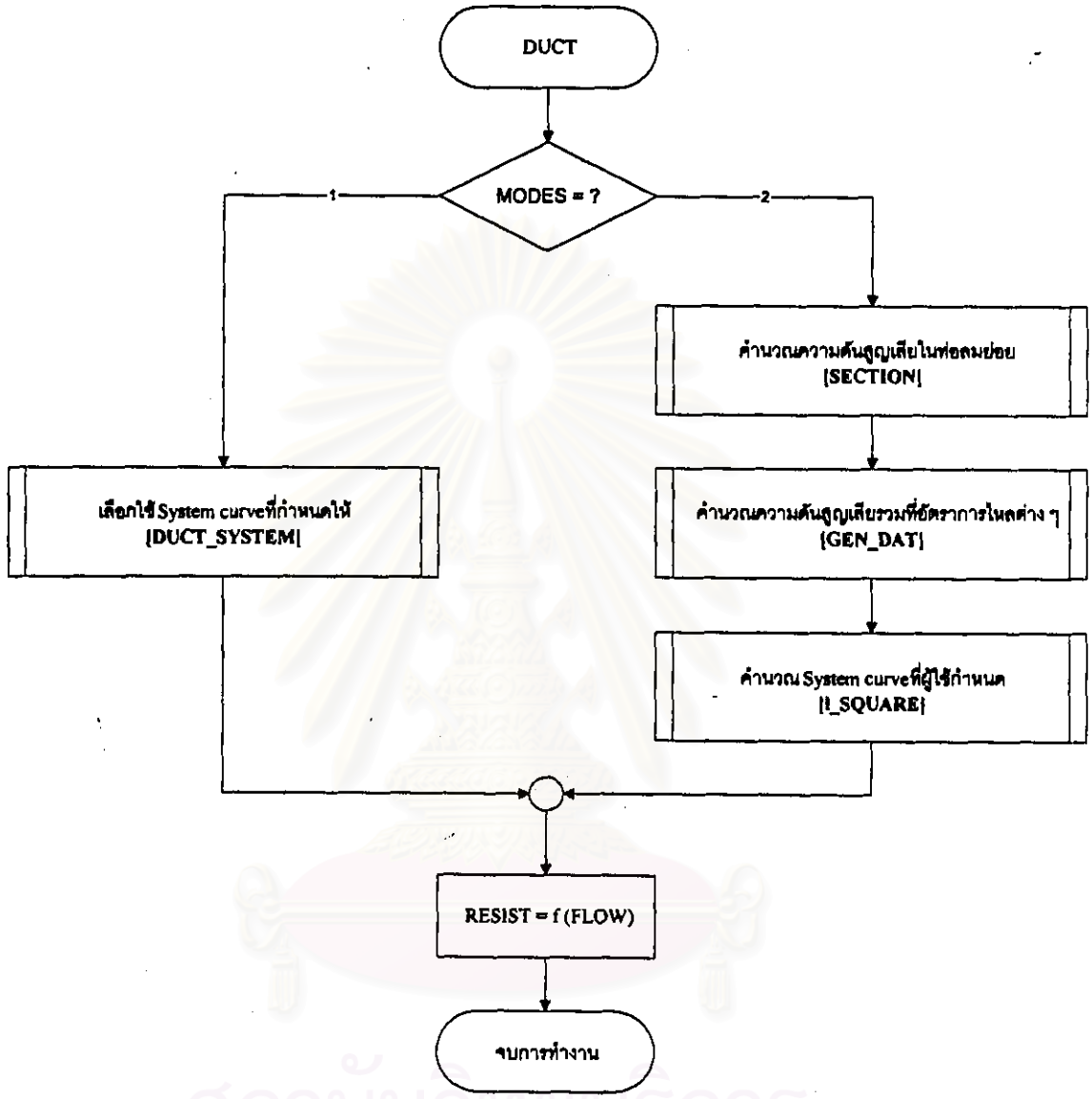
PLR = อัตราส่วนระหว่างปริมาณการส่งจ่ายลมเย็นในช่วง part load ต่อ ปริมาณการส่งจ่ายลมเย็นสูงสุด

โปรแกรมย่อย VSD [Subroutine VSD]

เป็นโปรแกรมย่อยหนึ่ง ในโปรแกรมย่อย FAN มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่ากำลังงานที่ใช้ขับการหมุนของใบพัด เมื่อพัดลมทำงานอยู่ในช่วงภาระการทำงานบางส่วน (part load) โดยการใช้ Variable Speed Drive เป็น flow modulator โดยขั้นตอนในการทำงานจะคล้ายกับโปรแกรมย่อย IGV คือรับเอาฟังก์ชันแสดงประสิทธิภาพทางกลของพัดลม และฟังก์ชันหามุมเฉลี่ยของลมทางขาออกของพัดลม ซึ่งแสดงสมรรถนะการทำงานของพัดลมจากโปรแกรมย่อย FAN มาใช้ในการคำนวณสมรรถนะการทำงานของพัดลมตามวิธีการของ David K. Eads,1981 ซึ่งในการทำงานของพัดลมในช่วง part load ใช้การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของใบพัดเพื่อควบคุมอัตราการส่งจ่ายลม

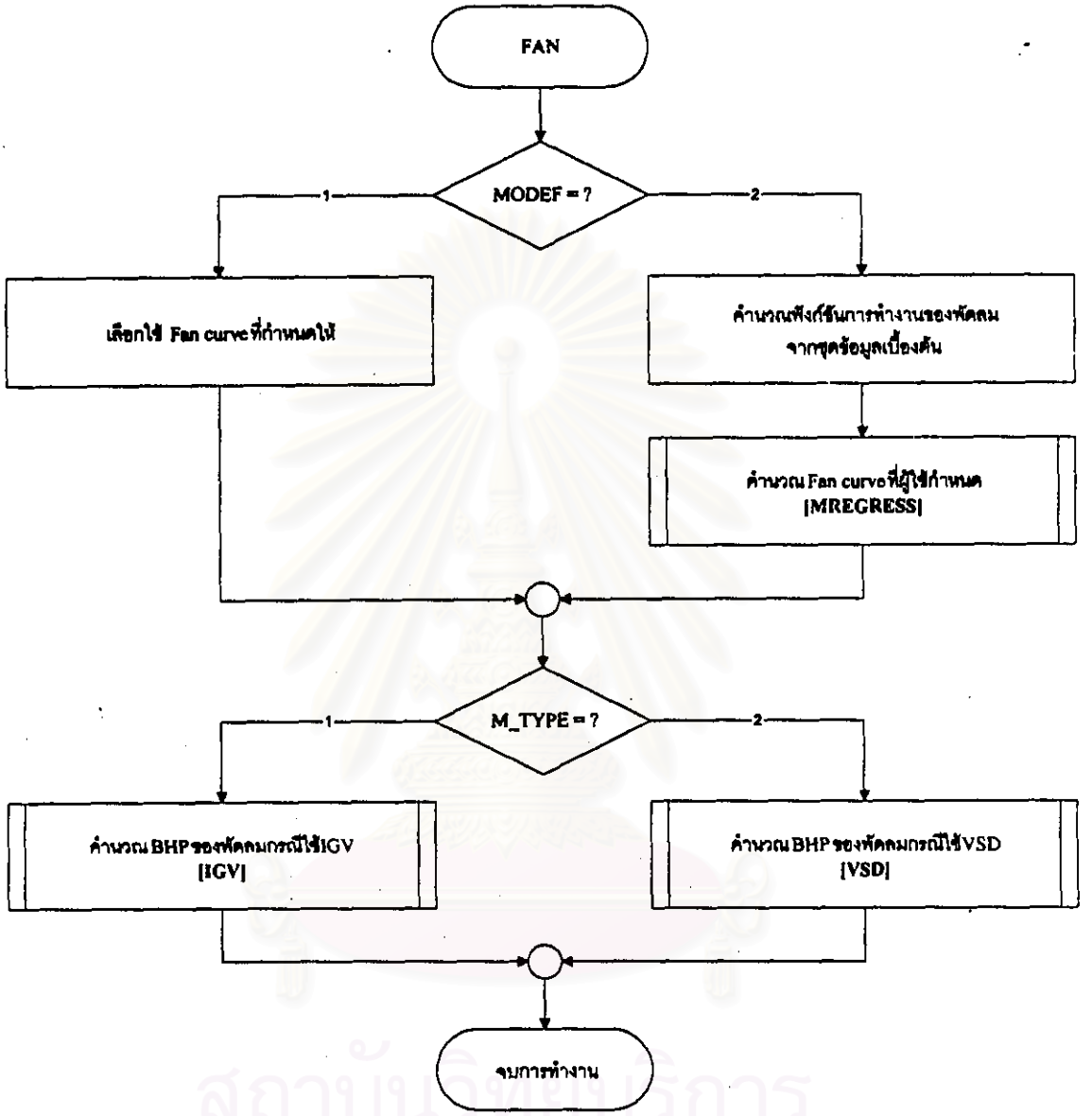
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* แบบจำลองฟังก์ชันแสดงคุณลักษณะเฉพาะของ Inlet Guide Vanes สำหรับกรณีศึกษา ได้จากการตรวจวัดการทำงานจริง ณ สภาวะทำงานต่าง ๆ




**รูปที่ 2.9** แผนผังแสดงลำดับการคำนวณ System characteristic curve ของท่อลม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 2.10** แผนผังแสดงลำดับการคำนวณ Fan Performance curve ของพัดลม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย