

### บทที่ 3

#### ทฤษฎี

#### 3.1 ประเภทของการถ่ายเทอากาศเข้าและออกจากตัวอาคาร

โดยทั่วไปการถ่ายเทอากาศเข้าและออกจากตัวอาคารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การระบายอากาศ (Ventilation) และ การรั่วซึมของอากาศ (Infiltration) ซึ่งแต่ละประเภทจะให้ผลที่แตกต่างกันในด้าน การควบคุมการใช้พลังงาน, คุณภาพอากาศภายในอาคาร และทางด้านความรู้สึกสบายของผู้อยู่อาศัย อีกทั้งยังให้ผลในการรักษาอัตราการถ่ายเทอากาศที่ต่างกันอีกด้วย ซึ่งอัตราการถ่ายเทอากาศที่เวลาที่กำหนดใดๆ โดยทั่วไปจะรวมผลของลักษณะการถ่ายเทอากาศทั้ง 2 ประเภท และผลของลักษณะการถ่ายเทอากาศทั้ง 2 ประเภท ก็ต้องถูกพิจารณาแม้ว่าจะมีลักษณะใดลักษณะหนึ่งที่เด่นกว่าก็ตาม

3.1.1 การระบายอากาศ (Ventilation) มีลักษณะการเกิดขึ้นโดยตั้งใจ และสามารถควบคุมได้ แบ่งย่อยได้เป็น การระบายอากาศเชิงกล (Forced ventilation) และ การระบายอากาศโดยธรรมชาติ(Natural ventilation)

3.1.1.1 การระบายอากาศเชิงกล (Forced ventilation) มีประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณการถ่ายเทอากาศได้ดีที่สุด และสามารถรักษาลักษณะการกระจายอากาศภายในอาคารได้ตามต้องการ ระบบระบายอากาศที่ดีต้องสามารถที่จะควบคุมระดับของสิ่งปลอมปนในอากาศได้ และในขณะที่เดียวกันต้องไม่ทำให้เกิดการระบายอากาศที่มากเกินไป ซึ่งมีผลโดยตรงต่อปริมาณการใช้พลังงานในอาคาร และระบบระบายอากาศที่ดียังต้องรักษาความรู้สึกสบายของผู้อยู่อาศัยอีกด้วย

3.1.1.2 การระบายอากาศโดยธรรมชาติ (Natural ventilation) เกิดขึ้นโดยตั้งใจผ่านช่องเปิดของตัวอาคาร เนื่องจากลมที่พัดผ่านอาคาร และ/หรือ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายในตัวอาคาร การไหลของอากาศผ่านช่องหน้าต่าง, ประตู และช่องเปิดอื่นๆที่ออกแบบไว้ สามารถรักษาระดับการควบคุมสิ่งปลอมปนในอากาศ และ อุณหภูมิที่เพียงพอได้ แต่การถ่ายเทอากาศผ่านรอยรั่วซึมของตัวอาคาร (Infiltration) มักจะทำให้เกิดอัตราการระบายอากาศที่มากเกินไป และรบกวนลักษณะการไหลของอากาศในอาคารที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งเป็นเรื่องหนึ่งที่ผู้ออกแบบควร

ระมัดระวัง สำหรับในหนังสือบางเล่มการระบายอากาศโดยธรรมชาติจะถูกหมายความรวมกับการรั่วซึมของอากาศ แต่ในที่นี้จะแยกออกจากกัน

3.1.2 การรั่วซึมของอากาศ (Infiltration) เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศที่ไม่สามารถควบคุมได้ผ่านรอยรั่วซึมของตัวอาคาร โดยมีกลไกในการขับเคลื่อนคือ ลม, ความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายในตัวอาคาร และ ผลของการปรับความดันในตัวอาคาร การรั่วซึมของอากาศจะให้ผลที่น่าเชื่อถือได้น้อยที่สุดในการรักษาระดับการระบายอากาศที่เพียงพอ และ ลักษณะการไหลของอากาศที่ต้องการ เนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และ ตำแหน่งของรอยรั่วซึมบนตัวอาคาร การรั่วซึมของอากาศเป็นแหล่งที่มาหลักของการระบายอากาศสำหรับอาคารที่ปิดมิดชิด และ ยังเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออาคารที่มีระบบระบายอากาศเชิงกล

### 3.2 กลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศเข้าและออกจากตัวอาคาร

กลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศเข้าและออกจากตัวอาคาร ได้แก่ ความแตกต่างของความดันที่ภายในและภายนอกตัวอาคาร ซึ่งปัจจัยหลักเกิดขึ้นจาก อิทธิพลของลมที่พัดปะทะตัวอาคาร, ความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศที่ภายในและภายนอกตัวอาคาร (stack effect) และ ผลจากระบบระบายอากาศเชิงกลภายในอาคาร นอกจากนี้ยังเกิดขึ้นได้จาก ผลของการใช้อุปกรณ์ที่มีการเผาไหม้ รวมไปถึงผลของการเคลื่อนตัวขึ้นลงของลิฟท์โดยสาร (elevator piston effect)

#### 3.2.1 อิทธิพลของลมที่พัดปะทะตัวอาคาร

##### 3.2.1.1 ธรรมชาติของลม

โดยทั่วไป ความเร็วลมจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับความสูงจากพื้นดินเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของ power law ดังนี้

$$V = V_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^n \quad (3.1)$$

เมื่อ

$V$  = ความเร็วลม (m/s)

$V_0$  = ความเร็วลมที่ระดับความสูงอ้างอิง (m/s)

- $h$  = ระดับความสูงที่ความเร็ว  $V$  (m)  
 $h_0$  = ระดับความสูงอ้างอิง (m)  
 $n$  = ตัวประกอบกำลังลม (เทอมไร้หน่วย)

สำหรับการบันทึกข้อมูลลมโดยสถานีตรวจวัดอากาศนั้น ปกติจะทำการวัดความเร็วลมที่ระดับความสูงอ้างอิง 10 m (33 ft) เหนือระดับพื้นดินในบริเวณที่เป็นภูมิประเทศเปิดโล่ง โดยความเร็วลมที่ทำการวัดที่สถานีตรวจวัดอากาศ,  $V_{met}$  จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วลมที่ระดับความสูงเดียวกันในภูมิประเทศที่อาคารนั้นตั้งอยู่ ดังนี้

$$V_0 = A_0 V_{met} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$A_0 = \text{ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศที่อาคารตั้งอยู่ (ตารางที่ 3.1)}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า  $A_0$  สำหรับภูมิประเทศลักษณะต่างๆ

ลักษณะภูมิประเทศ	$A_0$
ภูมิประเทศเปิดโล่ง	1.00
ชานเมือง	0.60
เขตตัวเมือง	0.35

ค่าตัวประกอบกำลังลม แสดงอยู่ในตารางที่ 3.2 โดยค่าตัวประกอบกำลังลมจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นผิวของภูมิประเทศมีความขรุขระมากยิ่งขึ้น เช่น บริเวณตัวเมือง และสำหรับบริเวณตัวเมืองที่มีระดับความสูงของหลังคาสิ่งก่อสร้างค่อนข้างสม่ำเสมอ ลักษณะการกระจายของความเร็วลมสามารถเขียนได้เป็น

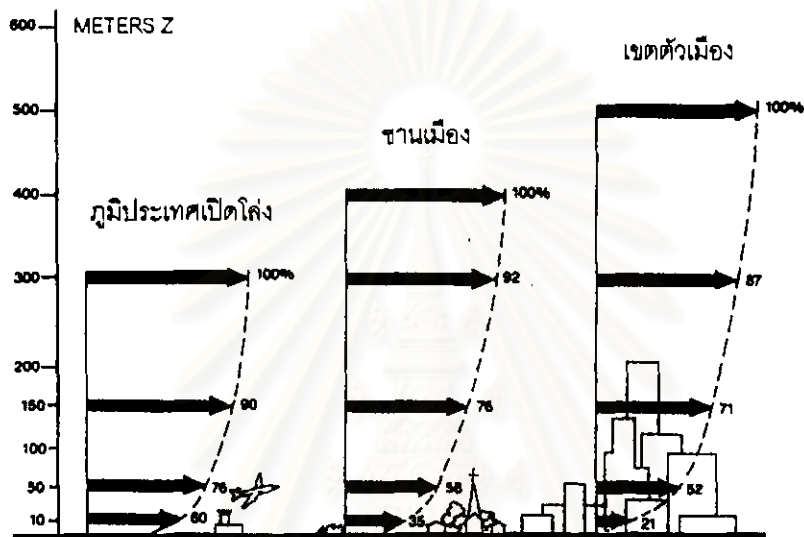
$$V = V_0 \left( \frac{h-y}{h_0} \right)^n \quad (3.3)$$

เมื่อ

- $V$  = ความเร็วลม (m/s)  
 $V_0$  = ความเร็วลมที่ระดับความสูงอ้างอิง (m/s)  
 $h$  = ระดับความสูงที่ความเร็ว  $V$  (m)  
 $h_0$  = ระดับความสูงอ้างอิง (m)  
 $y$  = ความสูงเฉลี่ยของหลังคา (m)  
 $n$  = ตัวประกอบกำลังลม (เทอมไร้หน่วย)

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตัวประกอบกำลังลม,  $n$  สำหรับภูมิภาคลักษณะต่างๆ

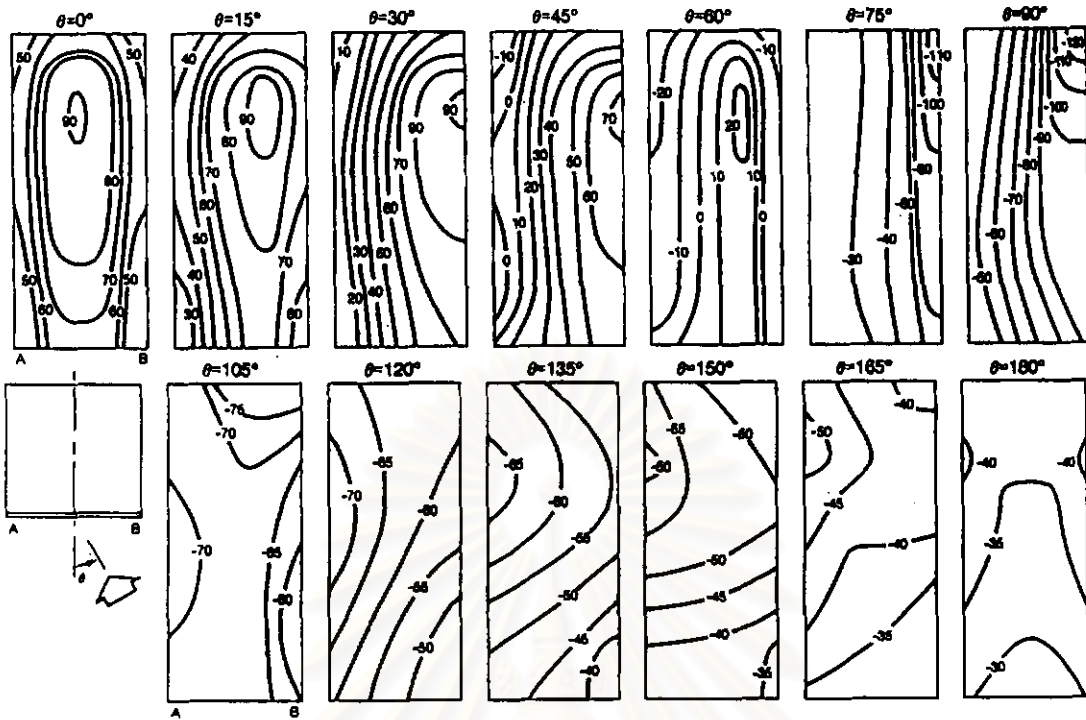
ลักษณะภูมิภาค	$n$
ภูมิภาคเปิดโล่ง	0.15
ชานเมือง	0.28
เขตตัวเมือง	0.40



รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายความเร็วของลมสำหรับภูมิภาคลักษณะต่างๆ

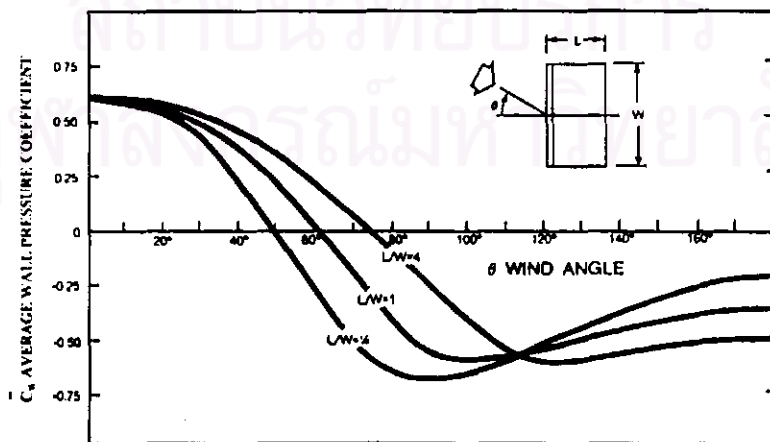
### 3.2.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความดัน

ค่าสัมประสิทธิ์ความดัน,  $C_p$ , ขึ้นอยู่กับรูปร่างของตัวอาคาร ทิศทางของลมที่กระทำกับอาคาร อิทธิพลของอาคารข้างเคียง และลักษณะภูมิภาคที่อาคารนั้นตั้งอยู่ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความดัน ที่ถูกต้องสามารถหาได้จากการทำแบบจำลองอาคารนั้นๆ และบริเวณข้างเคียง แล้วนำไปทดสอบกับอุโมงค์ลม ซึ่งจะให้ผลที่น่าเชื่อถือมากที่สุด แต่สำหรับอาคารที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน เช่น มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยม และเมื่อไม่คำนึงถึงอิทธิพลของอาคารข้างเคียง ค่าสัมประสิทธิ์ความดัน ก็สามารถหาได้จาก ข้อมูลการทดสอบอุโมงค์ลมที่เคยมีผู้ทดสอบไว้แล้ว ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่ผนังของอาคารสูงที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยภูมิภาคที่อาคารนั้นตั้งอยู่ เป็นบริเวณเขตตัวเมือง (Davenport and Hui 1982)

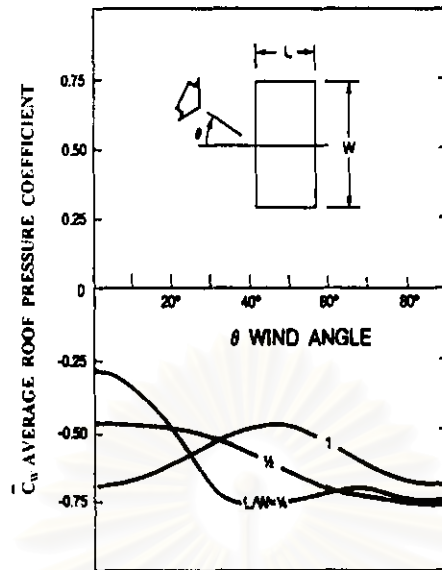


รูปที่ 3.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความดัน ( $C_{wx100}$ ) ที่ผนังของอาคารสูง เมื่อทิศทางของลมที่กระทำกับอาคารเปลี่ยนไป (Davenport and Hui 1982)

แต่สำหรับการนำค่าสัมประสิทธิ์ความดันไปใช้ในการคำนวณ เพื่อความสะดวก จึงใช้ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความดันตลอดพื้นที่บนผนังอาคารแทน ซึ่งจากการวิจัยของ Akins และคณะ (1979) ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความดันเฉลี่ยของอาคารที่มีพื้นที่หน้าตัดในแนวระดับเป็นรูปสี่เหลี่ยม เมื่อลมพัดปะทะอาคารในทิศทางต่างๆกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.3 และ 3.4 (สำหรับรายละเอียดอยู่ใน หัวข้อ 2.2)



รูปที่ 3.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความดันเฉลี่ยบนผนัง สำหรับอาคารสูง, Akins และคณะ (1979)



รูปที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันเฉลี่ยบนหลังคา สำหรับอาคารสูง (หลังคาแบนเรียบ),  
Akins และคณะ (1979)

### 3.2.1.3 ความดันที่ลมกระทำกับอาคาร

ความดัน,  $P_w$  ที่ลมกระทำบนพื้นผิวของผนังอาคารสามารถเขียนได้ในรูป

$$P_w = \frac{1}{2} C_w \rho_o V^2 \quad (3.4)$$

เมื่อ

- $C_w$  = สัมประสิทธิ์ความดัน (เทอมไร้มิติ)  
 $\rho_o$  = ความหนาแน่นของอากาศภายนอก ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $V$  = ความเร็วลม ( $\text{m/s}$ )

สำหรับอากาศที่ความหนาแน่น  $1.20 \text{ kg/m}^3$  ความสัมพันธ์นี้จึงเป็น

$$P_w = K_w C_w V^2 \quad (3.5)$$

เมื่อ

- $P_w$  = ความดันลมบนพื้นผิว (Pa)  
 $C_w$  = สัมประสิทธิ์ความดัน (เทอมไร้มิติ)  
 $V$  = ความเร็วลม ( $\text{m/s}$ )  
 $K_w$  = ค่าคงที่, 0.600

ความแตกต่างของความดันของผนังด้านหนึ่งของอาคาร กับผนังด้านอื่นๆ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของลม สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} (C_{w1} - C_{w2}) \rho_o V^2 \quad (3.6)$$

เมื่อ

- $C_{w1}$  = สัมประสิทธิ์ความดันของผนังด้านเหนือลม  
 $C_{w2}$  = สัมประสิทธิ์ความดันของผนังด้านใต้ลม

สำหรับอากาศที่มีความหนาแน่น  $1.20 \text{ kg/m}^3$  สมการ(3.6) กลายเป็น

$$\Delta P_w = K_w (C_{w1} - C_{w2}) V^2 \quad (3.7)$$

เมื่อ

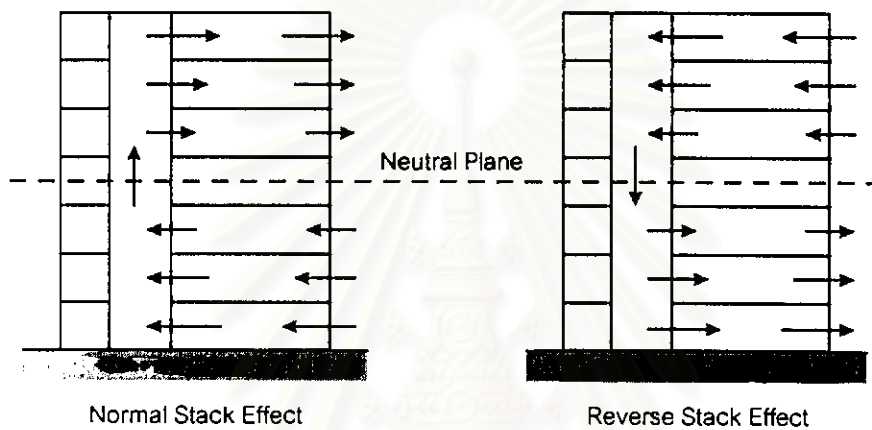
- $P_w$  = ความดันลมตกคร่อมอาคาร (Pa)  
 $C_{w1}$  = สัมประสิทธิ์ความดันของผนังด้านเหนือลม  
 $C_{w2}$  = สัมประสิทธิ์ความดันของผนังด้านใต้ลม  
 $V$  = ความเร็วลม (m/s)  
 $K_w$  = ค่าคงที่, 0.600

### 3.2.2 ความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศที่ภายในและภายนอกตัวอาคาร (Stack Effect)

ปรากฏการณ์ที่อากาศเกิดการไหลขึ้นหรือลง ภายในปล่องต่างๆ ในตัวอาคาร เช่น ปล่องบันได, ปล่องลิฟท์ อันเนื่องมาจากผลของความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอากาศ เป็นที่รู้จักกันในหลายชื่อ เช่น stack effect, stack action และ chimney effect ซึ่งชื่อเหล่านี้ได้จากการเปรียบเทียบกับควันไฟที่ไหลขึ้นไปตามปล่องไฟ

stack effect เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอากาศที่ภายในและภายนอกตัวอาคาร ซึ่งความหนาแน่นของอากาศจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะลดลงเล็กน้อยเมื่อความชื้นของอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันของอากาศจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของคอลัมน์ของอากาศ (air column) ดังนั้นในฤดูหนาวความดันอากาศที่ระดับพื้นดิน ที่ภายนอกอาคารจะสูงกว่าที่ภายในอาคาร เนื่องจากที่ภายนอกอาคาร อากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งผลของความแตกต่างของความ

ดัน ทำให้อากาศไหลเข้าสู่อาคารที่ระดับพื้นดิน และไหลขึ้นไปภายในอาคาร (สำหรับประเทศในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย จะไม่เห็นผลของปรากฏการณ์นี้ในช่วงฤดูหนาว เพราะอุณหภูมิที่ภายในและภายนอกตัวอาคารไม่แตกต่างกันมากนัก) สำหรับในช่วงฤดูร้อน เมื่ออากาศภายในอาคารมีอุณหภูมิต่ำกว่าภายนอกอาคาร จึงทำให้อากาศจากภายนอกอาคารไหลเข้าสู่อาคารที่บริเวณหลังคา และไหลลงไปตามปล่องต่างๆภายในตัวอาคาร ในที่นี้ปรากฏการณ์ที่อากาศไหลขึ้นจะเรียกว่า normal stack effect และปรากฏการณ์ที่อากาศไหลลงจะเรียกว่า reverse stack effect ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงทิศทางการไหลของอากาศเนื่องจาก normal stack effect และ reverse stack effect

ในขณะที่เกิดการไหลของอากาศขึ้นหรือลงภายในตัวอาคาร เนื่องจาก stack effect จะมีบริเวณหนึ่งในแนวความสูงของตัวอาคารที่มีความดันเท่ากับความดันอากาศที่ภายนอกตัวอาคาร ซึ่งตำแหน่งนี้จะถูกเรียกว่า ระดับที่มีความดันเป็นกลาง (neutral pressure level) ของอาคาร ซึ่งตามทฤษฎี ถ้าร้อยรั้วตามตัวอาคารและช่องเปิดต่างๆ ของอาคารกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในแนวตั้งแล้วจะทำให้ระดับที่มีความดันเป็นกลาง อยู่ที่กึ่งกลางอาคารตามความสูงของอาคารพอดี ถ้าช่องเปิดต่างๆ มีอยู่มาก บริเวณด้านบนของอาคารก็จะทำให้ระดับที่มีความดันเป็นกลางอยู่สูงขึ้นจากกึ่งกลางอาคาร เช่นเดียวกัน ถ้าช่องเปิดต่างๆ มีอยู่มากบริเวณด้านล่างของอาคาร ก็จะทำให้ระดับที่มีความดันเป็นกลางอยู่ต่ำลงจากกึ่งกลางอาคาร แต่ถ้าไม่มีข้อมูลการกระจายตัวของช่องเปิดต่างๆ อย่างแน่ชัด ก็ให้สมมติว่าระดับที่มีความดันเป็นกลางของอาคารอยู่ที่กึ่งกลางอาคาร เมื่ออาคารอยู่ภายใต้อิทธิพลของ stack effect แต่เพียงอย่างเดียว

สำหรับอาคารทั่วไป ปล่องต่างๆจะมีพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่ และผลของความดันสูญเสียสามารถตัดทิ้งได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลของความแตกต่างของความดันที่เกิดจากแรงลอยตัวของอากาศ ดังนั้น ความดันภายในปล่องสามารถเขียนได้เป็น



$$dP_s = -\rho_s g dh \quad (3.8)$$

เมื่อ

- $P_s$  = ความดันอากาศภายในปล่อง (Pa)  
 $g$  = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )  
 $h$  = ระดับความสูง (m)  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศภายในปล่อง ( $kg/m^3$ )

ภายใต้ระดับความสูงของอาคาร ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงสามารถสมมติว่าคงที่ได้ และเมื่อค่าความหนาแน่นคงที่ ทำการอินทิเกรตสมการ (3.8) จะได้

$$P_s = P_o - \rho_s g h \quad (3.9)$$

เมื่อ

- $P_o$  = ความดันที่ระดับความสูง  $h = 0$  (Pa)

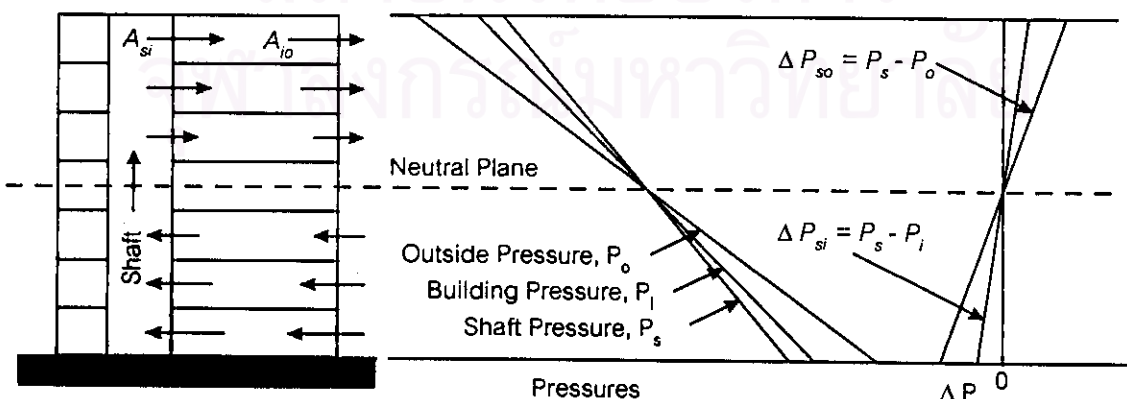
เพื่อให้การวิเคราะห์สะดวกขึ้น กำหนดให้  $P_s = P_o$  ที่  $h = 0$  ดังนั้น เมื่อไม่คิดอิทธิพลของลมที่พัดปะทะอาคาร, ความดันที่ภายนอก  $P_o$  คือ

$$P_o = P_o - \rho_o g h \quad (3.10)$$

เมื่อ

- $\rho_o$  = ความหนาแน่นของอากาศภายนอกปล่อง ( $kg/m^3$ )

ความดันภายในปล่อง และภายนอกอาคาร แสดงอยู่ในรูปที่ 3.6 สำหรับ normal stack effect



รูปที่ 3.6 แสดงค่าความดันและผลต่างความดันขณะเกิด normal stack effect

ผลต่างความดันจากภายในสู่ภายนอก,  $\Delta P_{so}$  แสดงได้โดย

$$\Delta P_{so} = P_s - P_o = (\rho_o - \rho_s) gh \quad (3.11)$$

เนื่องจากความเปลี่ยนแปลงของความดันภายในอาคารมีน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันบรรยากาศ ดังนั้น ค่าความดันบรรยากาศ,  $P_{atm}$  สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าความหนาแน่นของอากาศได้จากกฎของก๊าซสัมบูรณ์ ดังนี้

$$\rho = \frac{P_{atm}}{RT} \quad (3.12)$$

เมื่อ

- $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )
- $P_{atm}$  = ความดันบรรยากาศที่ระดับพื้นดิน (Pa)
- $R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ ( $\text{J/kg K}$ )
- $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศ (K)

ค่าคงที่ของก๊าซและค่าความดันบรรยากาศมาตรฐาน แสดงอยู่ในตารางที่ 3.3 เมื่อแทนสมการ (3.12) ลงในสมการ (3.11) แล้วจัดรูปจะได้

$$\Delta P_{so} = \frac{g P_{atm}}{R} \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) h \quad (3.13)$$

เมื่อ

- $T_o$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศภายนอก (K)
- $T_s$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศภายในปล่อง (K)

สมการ (3.13) พัฒนาขึ้นสำหรับปล่องที่เชื่อมต่อกับบริเวณภายนอก สำหรับค่าความดันบรรยากาศมาตรฐานของอากาศ สมการ (3.13) จึงกลายเป็น

$$\Delta P_{so} = K_s \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) h \quad (3.14)$$

เมื่อ

- $\Delta P_{so}$  = ผลต่างความดันระหว่างภายในปล่องกับภายนอก (Pa)
- $T_o$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศภายนอก (K)

$T_s$	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศภายในปล่อง (K)
$h$	=	ความสูงเหนือระดับที่มีความดันเป็นกลาง (m)
$K_s$	=	ค่าสัมประสิทธิ์, 3460

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าคงที่ของก๊าซและค่าความดันบรรยากาศมาตรฐาน

Acceleration of gravity at sea level, $g$	9.80665	$m/s^2$
	32.174	$ft/s^2$
Gas constant of air, $R$	287.0	$J/kg\ K$
	53.34	$ft\ lbf/lbm\ ^\circ R$
	1716	$ft\ lbf/slug\ ^\circ R$
	0.06858	$Btu/lbm\ ^\circ R$
Standard atmospheric pressure, $P_{atm}$	101325	Pa
	14.696	psi
	2116	$lbf/ft^2$
	30.00	in. Hg at $60^\circ F$
	407.3	in. $H_2O$ at $60^\circ F$
	33.94	ft $H_2O$ at $60^\circ F$

สำหรับอาคารที่แสดงในรูปที่ 3.6 การไหลของอากาศทั้งหมดในแนวดิ่งจะอยู่ในปล่อง แต่ในความเป็นจริง บริเวณพื้นของอาคารจะมีรอยรั่วซึมอยู่บ้าง ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านรอยรั่วซึมเหล่านี้ สำหรับในการวิเคราะห์แล้วจะถือว่า ปริมาณการไหลของอากาศผ่านรอยรั่วซึมระหว่างชั้นนี้น้อยกว่าปริมาณการไหลของอากาศในปล่องมาก ซึ่งการวิเคราะห์ต่อไปนี้จะแสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณด้วยสมมติฐานที่ว่า ไม่มีการไหลของอากาศผ่านรอยรั่วซึมระหว่างชั้น

สำหรับเส้นทางการไหลของอากาศ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 พื้นที่ประสิทธิผลของการไหลต่อชั้นคือ

$$A_e = \left( \frac{1}{A_{si}^2} - \frac{1}{A_{io}^2} \right)^{-1/2} \quad (3.15)$$

เมื่อ

$A_e$	=	พื้นที่ประสิทธิผลของรอยรั่วซึมระหว่างปล่อง และภายนอกอาคาร ( $m^2$ )
$A_{si}$	=	พื้นที่ของรอยรั่วซึมระหว่างปล่อง และภายในตัวอาคารต่อชั้น ( $m^2$ )
$A_{io}$	=	พื้นที่ของรอยรั่วซึมระหว่างภายในและภายนอกตัวอาคารต่อชั้น ( $m^2$ )

อัตราการไหลของมวล,  $\dot{m}$  ต่อชั้น จึงเขียนได้เป็น

$$\dot{m} = C A_c (2\rho \Delta P_{so})^{1/2} \quad (3.16)$$

เมื่อ

$C$  = สัมประสิทธิ์การไหล (เทอมไร้หน่วย) ปกติมีค่าระหว่าง 0.6 - 0.7

แต่ผลต่างความดันตกคร่อมปล่องกับบริเวณภายในอาคาร สามารถแสดงได้ดังนี้ (เนื่องจากเส้นทางการไหลเป็นแบบอนุกรม)

$$\Delta P_{si} = \Delta P_{so} \left( \frac{A_c}{A_{si}} \right)^2 \quad (3.17)$$

เมื่อแทนสมการ (3.15) ลงในความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วจัดรูปจะได้

$$\Delta P_{si} = \frac{\Delta P_{so}}{1 + (A_{si} / A_{io})^2} \quad (3.18)$$

โดยทั่วไปแล้ว อัตราส่วน  $A_{si} / A_{io}$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.7 - 7.0 และ ผลต่างความดันตกคร่อมปล่องกับบริเวณภายในอาคารจะมีค่าน้อยกว่าผลต่างความดันตกคร่อมปล่องกับบริเวณภายนอกอาคารมาก ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 3.4 แต่ถ้ามุมช่องเปิดของตัวอาคารสู่บริเวณภายนอกอยู่มาก ก็จะทำให้ค่า  $A_{io}$  มีค่ามากขึ้น และอัตราส่วน  $A_{si} / A_{io}$  มีค่าน้อยลง ดังนั้น  $\Delta P_{si}$  จึงเข้าใกล้  $\Delta P_{so}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้าอาคารมีช่องเปิดอยู่มาก จะทำให้ค่าความดันจากปล่องสู่บริเวณภายในอาคารมีค่าใกล้กับจากปล่องสู่ภายนอกอาคาร

สมการ (3.18) จะพิจารณาว่า ค่าผลต่างความดันจะมีค่าสม่ำเสมอที่ความสูงของแต่ละชั้น ซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.13) สำหรับค่า  $h$  ที่เท่ากับระยะห่างระหว่างชั้น เช่น ตัวอย่างในตารางที่ 3.4 ถ้าแต่ละชั้นอยู่สูงห่างกัน 3.1 m (10 ft) ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของสมการ (3.18) จะมีค่าประมาณ 2.5 Pa (0.01 in. H<sub>2</sub>O) ซึ่งปกติแล้วถือว่า ค่าความคลาดเคลื่อนนี้สามารถละเลยได้ สมการ (3.18) สามารถเขียนใหม่เพื่อหาค่าความดัน,  $P_i$  ที่บริเวณภายในอาคาร

$$P_i = P_s - \frac{\Delta P_{so}}{1 + (A_{si} / A_{io})^2} \quad (3.19)$$

จากการวิเคราะห์โดยพิจารณาเส้นทางกรไหลแบบอนุกรมดังที่ได้แสดงมา สามารถใช้ได้กับอาคารที่มีหลาย ๆ ปล่อง ถ้าทุกปล่องมีความดันที่เท่ากัน และทุกปล่องมีระดับความสูงเริ่มต้นและที่ปลายเท่ากัน

ผลจากการวัดค่าความดันที่อาคารจริงหลาย ๆ อาคาร (Tamura and Wilson 1966, 1967a, 1967b) สามารถยืนยันทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับปรากฏการณ์ stack effect ดังที่ได้แสดงมาได้เป็นอย่างดี และยังแสดงให้เห็นว่า สมมติฐานที่ว่าไม่มีการไหลของอากาศผ่านรอยรั่วซึมระหว่างชั้นนั้นเหมาะสมกับการคำนวณค่าผลต่างความดันที่แต่ละชั้นของอาคารอื่นเนื่องจากอิทธิพลของ stack effect

### 3.3 การไหลของอากาศผ่านรอยรั่วซึมและช่องเปิดในอาคาร

#### 3.3.1 สมการการไหล

สมการการไหลเชิงมวลของอากาศผ่านรอยรั่วซึมของอาคาร สามารถเขียนได้อยู่ในรูปฟังก์ชันของผลต่างความดันที่ตกร่อมรอยรั่วซึมนั้น สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$\dot{m} = SCA \left( |\Delta P| \right)^n \quad (3.20)$$

เมื่อ

$\dot{m}$	=	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
$S$	=	เครื่องหมายของผลต่างความดัน
$C$	=	สัมประสิทธิ์การไหล (เทอมไร้หน่วย)
$A$	=	พื้นที่ของการไหล ( $m^2$ )
$\Delta P$	=	ผลต่างความดันตกร่อมเส้นทางกรไหล (Pa)
$n$	=	ตัวประกอบกำลังของการไหล (เทอมไร้หน่วย)

ทางทฤษฎีตัวประกอบกำลังของการไหล,  $n$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1 สำหรับรอยรั่วซึมทั่วๆ ไปยกเว้นรอยรั่วซึมที่มีขนาดเล็กและแคบ โดยทั่วไปสามารถสมมติว่ามีค่าตัวประกอบกำลังของการไหลเท่ากับ 0.5 ได้ สมการที่ (3.20) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ orifice equation ได้เป็น

$$\dot{m} = SCA \sqrt{2 \rho |\Delta P|} \quad (3.21)$$

เมื่อ

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m}^3\text{)}$$

ผลต่างความดัน

$$\Delta P = P_{(i)} - P_{(j)} - \frac{g\bar{P}}{R\bar{T}}(h_{(i)} - h_{(j)}) \quad (3.22)$$

เมื่อ

$$P_{(i)} = \text{ความดันที่บริเวณ } i \text{ (Pa)}$$

$$P_{(j)} = \text{ความดันที่บริเวณ } j \text{ (Pa)}$$

$$h_{(i)} = \text{ความสูงของจุด } i \text{ (m)}$$

$$h_{(j)} = \text{ความสูงของจุด } j \text{ (m)}$$

$$g = \text{ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s}^2\text{)}$$

$$R = \text{ค่าคงที่ของก๊าซ (J/kg K)}$$

$$\bar{T} = \frac{(T_{(i)} + T_{(j)})}{2}$$

$$\bar{P} = \frac{(P_{(i)} + P_{(j)})}{2} + P_b$$

$P_b$  คือค่าคงที่ใช้สำหรับแปลงค่าความดันเกจเฉลี่ย ให้เป็นค่าความดันสัมบูรณ์เฉลี่ย,  $P$  ค่าสัมประสิทธิ์การไหลเป็นเทอมไร้หน่วย โดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 0.6 ถึง 0.7 สมการ (3.21) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น  $\dot{m} = C'(\Delta P)^{1/2}$  จากกฎของก๊าซสมบูรณ์จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่ปรับปรุงแล้ว,  $C'$  เป็น

$$C' = CA \sqrt{\frac{2P_{atm}}{RT}} \quad (3.23)$$

เมื่อ

$$P_{atm} = \text{ความดันบรรยากาศที่ระดับพื้นดิน (Pa)}$$

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศในเส้นทางการไหล (K)}$$

### 3.3.2 คุณสมบัติของรอยรั่วซึมและช่องเปิดประเภทต่างๆ

รอยรั่วซึมและช่องเปิดภายในอาคาร ได้แก่ ช่องว่างรอบบานประตูและหน้าต่าง (ทั้งเปิดและปิด), ช่องว่างหรือรอยแตกของผนังและพื้นอาคาร และช่องระบายลมต่างๆ สามารถทำการหาพื้นที่

ของการไหลได้โดยง่ายถ้าเป็นช่องเปิดขนาดใหญ่ เช่น หน้าต่างที่เปิดอยู่ แต่จะทำได้ยากขึ้นสำหรับรอยรั่วซึมที่เกิดจากคุณภาพของการสร้างอาคาร เช่น รอยรั่วซึมที่การจากการติดตั้งบานประตู, รอยแตกของผนัง ตารางที่ 3.4 แสดงค่าพื้นที่การไหลของรอยรั่วซึมบนผนังและพื้นของอาคารขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Tamura และคณะ ที่สภาวิจัยแห่งชาติของแคนาดา (National Research Council of Canada) โดยเป็นที่เชื่อกันว่าค่าพื้นที่การไหลของรอยรั่วซึมนั้นน่าจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของการสร้างอาคาร มากกว่าประเภทของวัสดุที่ใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงพื้นที่การไหลของรอยรั่วซึมที่ส่วนประกอบต่างๆของอาคาร

ส่วนประกอบของอาคาร	ระดับความแน่น	อัตราส่วนพื้นที่
ผนังด้านนอก (รวมถึงรอยแตกที่เกิดจากการก่อสร้างและรอยแตกรอบกรอบหน้าต่างและประตู)	แน่น	$0.70 \times 10^{-4}$
	เฉลี่ย	$0.21 \times 10^{-3}$
	หลวม	$0.42 \times 10^{-3}$
	หลวมมาก	$0.13 \times 10^{-2}$
ผนังของช่องบันได (รวมถึงรอยแตกที่เกิดจากการก่อสร้างแต่ไม่รวมรอยแตกรอบกรอบหน้าต่างและประตู)	แน่น	$0.14 \times 10^{-4}$
	เฉลี่ย	$0.11 \times 10^{-3}$
	หลวม	$0.35 \times 10^{-3}$
ผนังของปล่องลิฟท์ (รวมถึงรอยแตกที่เกิดจากการก่อสร้างแต่ไม่รวมรอยแตกรอบกรอบหน้าต่างและประตู)	แน่น	$0.18 \times 10^{-4}$
	เฉลี่ย	$0.84 \times 10^{-3}$
	หลวม	$0.18 \times 10^{-2}$
พื้น (รวมถึงรอยแตกที่เกิดจากการก่อสร้างและช่องว่างของช่องท่อ)	แน่น	$0.66 \times 10^{-5}$
	เฉลี่ย	$0.52 \times 10^{-4}$
	หลวม	$0.17 \times 10^{-3}$

หมายเหตุ :

- อัตราส่วนพื้นที่ที่ได้แก่ พื้นที่การไหลของรอยรั่วซึมผ่านผนังหรือพื้นหารด้วยพื้นที่ทั้งหมดของผนังหรือพื้น
- ค่าสัมประสิทธิ์การไหล,  $C$  เท่ากับ 0.65

ตารางที่ 3.5 แสดงพื้นที่การไหลผ่านช่องว่างขนาดต่างๆกันของบานประตู ซึ่งพื้นที่การไหลนี้สามารถใช้ได้กับสมการ (3.21) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การไหล,  $C$  เท่ากับ 0.65

ตารางที่ 3.5 แสดงพื้นที่การไหลผ่านช่องว่างขนาดต่างๆกันของบานประตู

ความกว้าง (m)	ช่องว่างของขอบประตูด้าน บนและด้านข้าง (m)	ช่องว่างของขอบประตู ด้านล่าง (m)	พื้นที่การไหล (m <sup>2</sup> )
.914	.000508	.000508	.0005
.914	.000508	.00635	.0073
.914	.000508	.0127	.0144
.914	.000508	.0191	.0214
.914	.00203	.00635	.0157
.914	.00203	.0127	.0227
.914	.00203	.0191	.0297
.914	.00305	.00635	.0225
.914	.00305	.0127	.0295
.914	.00305	.0191	.0364
.914	.00406	.00635	.0288
.914	.00406	.0127	.0358
.914	.00406	.0191	.0428
1.12	.000508	.000508	.0005
1.12	.000508	.00635	.0089
1.12	.000508	.0127	.0175
1.12	.000508	.0191	.0260
1.12	.00203	.00635	.0173
1.12	.00203	.0127	.0258
1.12	.00203	.0191	.0344
1.12	.00305	.00635	.0241
1.12	.00305	.0127	.0326
1.12	.00305	.0191	.0412
1.12	.00406	.00635	.0304
1.12	.00406	.0127	.0389
1.12	.00406	.0191	.0475

หมายเหตุ : ตารางนี้แสดงค่าสำหรับประตูสูง 2.13 m และหนา 0.0445 m

### 3.4 การประยุกต์กฎการอนุรักษ์มวลเข้ากับการถ่ายเทอากาศเข้าและออกจากตัวอาคาร

สำหรับบริเวณ  $i$  ใดๆภายในอาคาร

$$\sum_{j=1}^{N_r} \dot{m}_{(j,i)} + \sum_{k=1}^{N_o} \dot{m}_{o(j,k)} + \dot{m}_{f(i)} = 0 \quad (3.24)$$



และสำหรับที่ปล่อง (Shafts)

$$\sum_{i=N_1}^{N_2} \left[ \sum_{j=1}^{N_c} \dot{m}_{(i,j)} + \sum_{k=1}^{N_o} \dot{m}_{o(i,k)} + \dot{m}_{f(i)} \right] = 0 \quad (3.25)$$

เมื่อ

- $\dot{m}_{(i,j)}$  = อัตราการไหลของมวลจากบริเวณ  $i$  ไปยังบริเวณ  $j$  สำหรับห้องที่กั้นแยกจากกัน การไหลเป็นได้ทั้งในแนวระดับ และแนวตั้ง สำหรับปล่องการไหลเป็นได้เฉพาะในแนวตั้ง
- $\dot{m}_{o(i,k)}$  = อัตราการไหลของมวลจากทิศทาง  $k$  ภายนอกอาคาร ไปยังบริเวณ  $i$
- $\dot{m}_{f(i)}$  = อัตราการไหลของมวลของอากาศสุทธิ เนื่องจากระบบจ่ายลม หรือระบบปรับความดัน
- $N_c$  = จำนวนของบริเวณภายในอาคาร ที่ต่อเชื่อมกับบริเวณ  $i$
- $N_o$  = จำนวนของการต่อเชื่อมกับภายนอกอาคารของบริเวณ  $i$
- $N_1$  = ลำดับของระดับที่อยู่ต่ำสุดในปล่อง
- $N_2$  = ลำดับของระดับที่อยู่สูงสุดในปล่อง

### 3.5 การไหลภายในปล่อง

ความสัมพันธ์ต่อไปนี้จะใช้ในการคำนวณความดันเกจ,  $P_i$  ที่ชั้น  $i$  ของปล่อง ในเทอมของ  $P_{i-1}$  ที่ชั้น  $i-1$

$$P_{(i)} = P_{(i-1)} - P_z - P_f \quad (3.26)$$

เมื่อ

- $P_z$  = ผลต่างของความดันสถิตย์ (Pa)
- $P_f$  = ความดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (Pa)

ผลต่างของความดันสถิตย์สามารถคำนวณได้จาก

$$P_z = \frac{g \bar{P}}{RT} (h_{(i)} - h_{(i-1)}) \quad (3.27)$$

เมื่อ

- $h_{(i)}$  = ความสูงที่ตำแหน่ง  $i$  (m)
- $h_{(i-1)}$  = ความสูงที่ตำแหน่ง  $i-1$  (m)

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )

$R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ ( $J/kg K$ )

$$\bar{T} = \frac{(T_{(i)} + T_{(i-1)})}{2}$$

$$\bar{P} = \frac{(P_{(i)} + P_{(i-1)})}{2} + P_h$$

$P_h$  คือค่าคงที่ที่ใช้สำหรับแปลงค่าความดันเกจเฉลี่ย ให้เป็นค่าความดันสัมบูรณ์เฉลี่ย,  $\bar{P}$  และ ความดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_f = S \left( \frac{\dot{m}_u}{C_s} \right)^2 \quad (3.28)$$

เมื่อ

$\dot{m}_u$  = อัตราการไหลของมวลในทิศทางขึ้น จาก  $i-1$  ถึง  $i$  ในปล่อง ( $kg/s$ )

$C_s$  = สัมประสิทธิ์การไหลในปล่อง

$S$  = เครื่องหมายของ  $\dot{m}_u$

สัมประสิทธิ์การไหลในปล่อง,  $C_s$  นิยามโดย

$$C_s = \frac{\dot{m}}{\sqrt{P_f}} \quad (3.29)$$

เมื่อ

$\dot{m}$  = อัตราการไหลเชิงมวลภายในปล่อง ( $kg/s$ )

$P_f$  = ความดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (Pa)

### 3.5.1 ปล่องตรง

ความดันสูญเสียในปล่องตรง สามารถหาได้โดยวิธีเดียวกับความดันสูญเสียในท่อ สำหรับ ท่อกลม ความดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน หาได้จาก Darcy equation ดังนี้

$$P_f = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (3.30)$$

เมื่อ

- $f$  = ค่าประกอบความเสียดทาน (friction factor)  
 $L$  = ความยาวของท่อ (m)  
 $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของของไหลในท่อ ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $V$  = ความเร็วเฉลี่ยของของไหลในท่อ (m/s)

ค่าตัวประกอบความเสียดทาน สามารถหาได้จากแผนภาพมอดี้ (Moody diagram) หรือคำนวณจาก Colebrook equation ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.31)$$

เมื่อ

- $\text{Re}$  = ค่าเรย์โนลด์คัมเบอร์ ( $\frac{VD}{\nu}$ , เมื่อ  $\nu$  คือ ความหนืดเชิงจลน์)  
 $\varepsilon$  = ค่าความหยาบละเอียดสัมบูรณ์ของผิวท่อด้านใน (absolute roughness)

ค่า  $\varepsilon$  สำหรับวัสดุที่ใช้ทำท่อในการก่อสร้างทั่วไป มีแสดงอยู่ใน ASHRAE Handbook-1993 Fundamentals (ASHRAE 1993, Chapter 32) ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบละเอียดของผิวท่อ

Duct Material	Roughness Category	Absolute Roughness $\varepsilon$ , mm
Uncoated carbon steel, clean (Moody 1944) (0.05 mm)	Smooth	0.03
PVC plastic pipe (Swim 1982) (0.01-0.05 mm)		
Aluminum (Hutchinson 1953) (0.04-0.06 mm)		
Galvanized Steel, longitudinal seams, 1200-mm joints (Griggs et al. 1987) (0.05-0.10 mm)	Medium smooth	0.09
Galvanized Steel, continuously rolled, spiral seams, 3000-mm joints (Jones 1979) (0.06-0.12 mm)		
Galvanized Steel, spiral seam with 1, 2, and 3 ribs, 3600-mm joints (Griggs et al. 1987) (0.09-0.12 mm)		
Galvanized Steel, longitudinal seams, 760-mm joints (Wright 1945) (0.15 mm)	Average	0.15

Fibrous glass duct, rigid	Medium rough	0.9
Fibrous glass duct liner, air side with facing material (Swim 1978) (1.5 mm)		
Fibrous glass duct liner, air side spray coated (Swim 1978) (4.5 mm)	Rough	3.0
Flexible duct, metallic (1.2-2.1 mm when fully extended)		
Flexible duct, all types of fabric and wire (1.0-4.6 mm when fully extended)		
Concrete (Moody 1944) (1.3-3.0 mm)		

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า  $C_s$  สำหรับท่อกลม หาได้โดยการรวมสมการ (3.29) และ (3.30) เข้าด้วยกัน (ใช้ความสัมพันธ์  $\dot{m} = \rho VA$  เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ) จะได้

$$C_s = \frac{A^{5/4}}{\pi^{1/4}} \sqrt{\frac{4\rho}{fL}} \quad (3.32)$$

สำหรับท่อเหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (effective diameter) คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม ที่มีความดันสูญเสียเท่ากับท่อเหลี่ยมที่อัตราการไหลเท่ากัน ซึ่งจะต่างกับหลักการของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยท่อที่ใช้หลักของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก จะมีความดันสูญเสียเท่ากับท่อเหลี่ยมที่มีความเร็วเฉลี่ยของการไหลเท่ากัน Huebscher (1948) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ที่ใช้หาเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังนี้

$$D_c = 1.30 \frac{(ab)^{0.625}}{(a+b)^{0.250}} \quad (3.33)$$

เมื่อ

- $D_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลสำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อมีความยาว, ความเสียดทานของการไหล และอัตราการไหลเท่าเดิม (mm)
- $a$  = ความยาวด้านของพื้นที่หน้าตัดท่อด้านหนึ่ง (mm)
- $b$  = ความยาวด้านประชิดด้าน  $a$  (mm)

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การไหลในปล่อง,  $C_s$  (หน่วย SI)

เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	พื้นผิวภายในปล่อง	
	Galvanized Steel	Congrete
150	$0.32 \times 10^2$	$0.23 \times 10^2$
200	0.69	0.49
250	$0.13 \times 10^3$	0.90
300	0.20	$0.15 \times 10^3$
350	0.31	0.22
400	0.44	0.32
450	0.60	0.43
500	0.79	0.57
550	$0.10 \times 10^4$	0.74
600	0.13	0.93
650	0.16	$0.11 \times 10^4$
700	0.19	0.14
750	0.23	0.17
800	0.27	0.20
850	0.32	0.23
900	0.37	0.27
950	0.43	0.31
1000	0.49	0.36
1100	0.64	0.46
1200	0.80	0.58
1500	$0.14 \times 10^5$	$0.10 \times 10^5$
1800	0.23	0.17
2000	0.31	0.22
2200	0.39	0.29
2500	0.55	0.40
3000	0.88	0.65
4000	$0.19 \times 10^6$	$0.14 \times 10^6$
5000	0.33	0.25
7500	0.96	0.71
10000	$0.20 \times 10^7$	$0.15 \times 10^7$
15000	0.58	0.43
20000	$0.12 \times 10^8$	0.92
25000	0.22	$0.16 \times 10^8$

Note: Unit of  $C_s$  are  $sL s^{-1} P^{-1/2}$  where  $sL$  is standard liters at  $21^\circ C$  and one atmosphere. This table is for floor to floor heights of  $L = 3m$ . For other values of  $L$ , multiply  $C_s$  by  $(3/L)^{1/2}$ .

Heyt และ Diaz (1975) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ที่ใช้หาเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรีดังนี้

$$D_e = \frac{1.55 A^{0.625}}{P^{0.250}} \quad (3.34)$$

เมื่อ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อรูปวงรี หาได้จากสมการ

$$A = \frac{\pi b^2}{4} + b(a-b) \quad (3.35)$$

ความยาวเส้นรอบรูปของวงรี สามารถคำนวณได้จาก

$$P = \pi b 2 (a-b) \quad (3.36)$$

เมื่อ

$P$  = ความยาวเส้นรอบรูปของวงรี (mm)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อรูปวงรี (mm)

$a$  = ความยาวแกนหลัก (major dimension) ของวงรี (mm)

$b$  = ความยาวแกนรอง (minor dimension) ของวงรี (mm)

### 3.5.2 ปล่องบันได

จากการวิจัยของ Tamura and Shaw (1976) และ Achakji and Tamura (1988), ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของอากาศในปล่องบันได สามารถหาได้จากสมการ

$$C_s = K_{sw} \frac{A^{5/4}}{L^{1/2}} \quad (3.37)$$

เมื่อ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของปล่องบันได (m<sup>2</sup>)

$L$  = ระยะจากชั้นหนึ่งถึงชั้นถัดไป (m)

$K_{sw}$  = ค่าคงที่สัดส่วน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 3.8 แสดงค่า  $K_{sw}$  (หน่วย SI)

Stair Treads	Stairwell Occupancy Conditions	$K_{sw}$
open	no occupancy	160
open	high density	120
closed	no occupancy	150
closed	medium density	110
closed	high density	95

Note: Unit of  $K_{sw}$  are  $sL m^2 s^{-1} Pa^{-1/2}$  where  $sL$  is standard liters at  $21^{\circ}C$  and one atmosphere. Medium occupant density is based on 1 person per  $m^2$ , and high density is based on 2 person per  $m^2$ .

### 3.6 การวัดค่าอัตราการระบายอากาศ

การวัดค่าอัตราการระบายอากาศภายในอาคารสามารถกระทำได้โดยการติดตามระดับความเข้มข้นของเทรเซอร์ก๊าซ (tracer gas) ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นเทรเซอร์ก๊าซ ต้องมีคุณสมบัติที่สามารถตรวจับระดับความเข้มข้นได้ เป็นก๊าซเฉื่อย ไม่มีพิษ และมีระดับความเข้มข้นในอากาศต่ำ เทรเซอร์ก๊าซ และวิธีตรวจวัด แสดงอยู่ในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 แสดงประเภทของเทรเซอร์ก๊าซและการตรวจวัด

วิธีการตรวจวัด	ก๊าซ
Thermal Conductivity Detector	$H_2$ , He, $CO_2$
Electron Capture Gas Chromatograph	$SF_6$ , Refrigerants, Perfluorocarbons
Flame Ionization Gas Chromatograph	$C_2H_6$
Infrared	CO, $CO_2$ , $SF_6$ , $N_2O$ , $C_2H_6$ , $CH_4$

สำหรับการวัดค่าอัตราการระบายอากาศ โดยใช้เทรเซอร์ก๊าซสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีดังต่อไปนี้

- 1) วิธีการติดตามระดับความเข้มข้นของเทรเซอร์ก๊าซ (Concentration decay method)
- 2) วิธีการรักษาระดับความเข้มข้นของเทรเซอร์ก๊าซให้คงที่ (Constant concentration method)
- 3) วิธีการฉีดเทรเซอร์ก๊าซด้วยอัตราคงที่ (Constant tracer injection method)

ในที่นี้จะกล่าวรายละเอียดเฉพาะวิธีการติดตามระดับความเข้มข้นของเทรเซอร์ก๊าซ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

การวัดอัตราการระบายอากาศด้วยวิธีการติดตามระดับความเข้มข้นของเทรเซอร์ก๊าซ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นเทรเซอร์ก๊าซ เป็นวิธีการวัดค่าอัตราการระบายอากาศที่สะดวกที่สุด และใช้อุปกรณ์ที่ไม่ยุ่งยาก โดยเมื่อเริ่มต้นทำการทดสอบ จะฉีดคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปในห้องที่ต้องการวัดค่าอัตราการระบายอากาศ แล้วปล่อยให้คาร์บอนไดออกไซด์ ผสมกับอากาศในห้องอย่างทั่วถึงจากนั้นจึงเริ่มทำการติดตามวัดระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ในระยะเวลาที่กำหนด โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ จะหาได้จากจากกฎอนุกรมวลดังนี้

$$V \frac{dc}{dt} = -Qc \quad (3.38)$$

เมื่อ

- $V$  = ปริมาตรของห้องที่ทำการทดสอบ ( $m^3$ )  
 $Q$  = อัตราการระบายอากาศของห้องที่ทำการทดสอบ ( $m^3/s$ )  
 $c$  = ระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องที่เวลา  $t$

สมมติว่าอัตราการระบายอากาศ,  $Q$  คงที่ทำการจัดรูปสมการ (3.38) จะได้

$$\int_{c_0}^c \frac{dc}{c} = -\frac{Q}{V} \int_0^t dt \quad (3.39)$$

อินทิเกรตสมการ (3.39) จะได้

$$\ln c - \ln c_0 = -\left(\frac{Q}{V}\right)t \quad (3.40)$$

เมื่อ

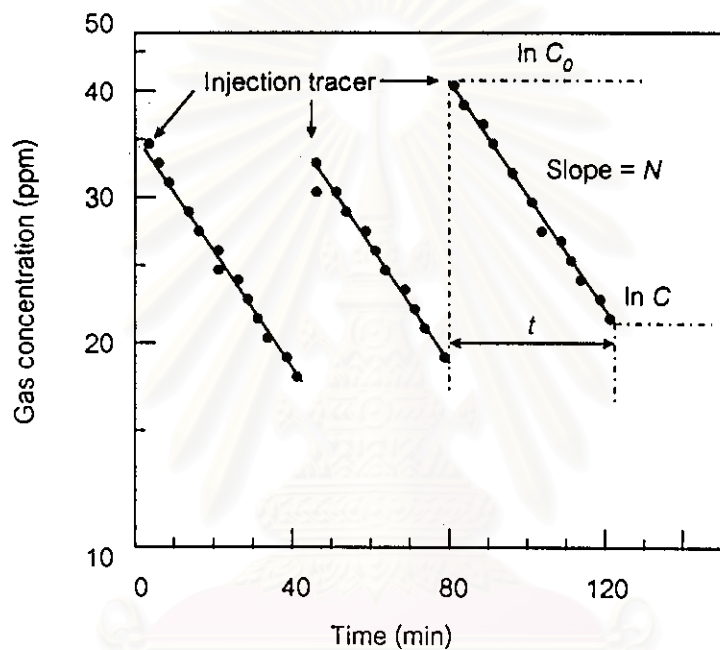
- $c_0$  = ระดับความเข้มข้นของคาร์บอน ไดออกไซด์ ที่เวลา  $t = 0$   
 $\frac{Q}{V}$  =  $N$  = อัตราการระบายอากาศต่อหนึ่งหน่วยเวลา

สมการ (3.40) สามารถเขียนได้เป็น



$$c = c_0 \exp\left[-\left(\frac{Q}{V}\right) t\right] \quad (3.41)$$

จากสมการ (3.40) จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการพล็อตค่าของ  $\ln c$  กับ เวลา ( $t$ ) จะได้กราฟเป็นเส้นตรง มีความชันเท่ากับ  $-\frac{Q}{V}$  ซึ่งก็คืออัตราการระบายอากาศในระหว่างช่วงเวลาที่ทำการทดลองนั่นเอง



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln c$  กับ เวลา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย