บทที่ 3

ทฤษฎี

ในการออกแบบช่องบันไดหนีไฟที่สามารถควบคุมความดันภายในได้โดยวิธีอัดอากาศ มีจุดประสงค์คือ ในขณะเกิดเพลิงไหม้สามารถใช้เป็นเส้นทางหลบหนีได้อย่างปลอดภัย โดยควันไม่สามารถแทรกซึมเข้ามาในช่องบันไดหนีไฟได้ ไม่ว่าประตูหนีไฟจะเปิดหรือปิดอย่างไรก็ตามและพนักงานดับเพลิงสามารถใช้เป็นเส้นทางเข้าไปดับเพลิงในอาคารได้อย่างปลอดภัย ก่อนจะออกแบบระบบควบคุมควันผู้ออกแบบจำเป็นจะต้องเข้าใจถึงตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของควันก่อนดังนี้

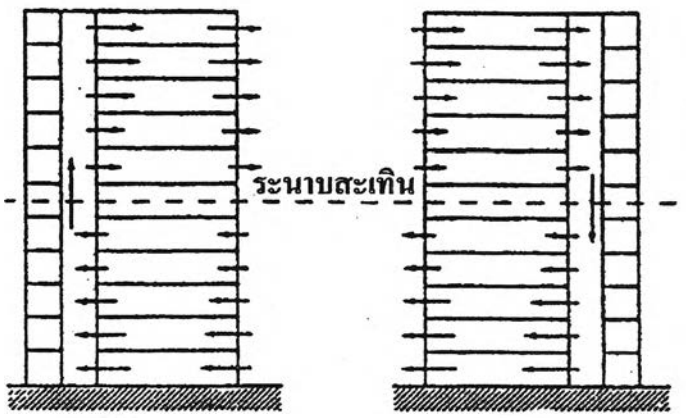
3.1 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของควัน

- **ปรากฏการณ์ลมลอยตัว** (Stack effect)

เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นอากาศระหว่างภายในกับภายนอกอาคารเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่างกัน ในกรณีที่อากาศภายนอกเย็นกว่าภายในอาคาร อากาศในอาคารซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า (ความหนาแน่นน้อยกว่า) จะลอยสูงขึ้นเนื่องจาก แรงยกตัว (buoyant force) ทำให้อากาศเคลื่อนที่ขึ้นภายในช่องเปิดต่าง ๆ ของอาคารส่งผลให้ควันสามารถแพร่ไปยังส่วนต่าง ๆ ของอาคารได้รวดเร็วขึ้น ปรากฏการณ์ลมลอยตัวนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. กรณีที่อากาศภายนอกมีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในอาคาร อากาศภายในอาคารจะเคลื่อนที่ขึ้นเรียกว่า ปรากฏการณ์ลมลอยตัวแบบปกติ (normal stack effect)

2. กรณีที่อากาศภายนอกมีอุณหภูมิสูงกว่าภายในอาคาร อากาศภายในอาคารจะเคลื่อนที่ลงเรียกว่า ปรากฏการณ์ลมลอยตัวแบบผันกลับ (reverse stack effect)



รูป 3.1 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศในอาคารเนื่องจากปรากฏการณ์ลมลอยตัว

ผลต่างความดันระหว่างอากาศในช่องท่อและอากาศภายนอกอาคารซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ลมลอยตัวสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_{SO} = k_S \left(\frac{1}{T_O} - \frac{1}{T_S} \right) h \qquad \ldots\ldots (3.1)$$

เมื่อ k_S คือ ค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ 3460 (7.64 ,I-P UNIT) ที่มา : เอกสารอ้างอิง (8)

$$\text{หน่วย} \left(\frac{\text{พาสคัล} * \text{องศาเคลวิน}}{\text{เมตร}} \right) \quad , \left[\frac{\text{นิ้วWG.} * \text{องศาแรงคิน}}{\text{ฟุต}} \right]$$

T_O คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศภายนอกอาคาร

หน่วย องศาเคลวิน (องศาแรงคิน)

T_S คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศภายในช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย องศาเคลวิน (องศาแรงคิน)

ΔP_{SO} คือ ผลต่างความดันระหว่างช่องบันไดกับภายนอกอาคาร

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

h คือ ระยะแนวดิ่งวัดจากระนาบสะเทิน (Neutral Plane) ภายในช่องบันได

หน่วย เมตร (ฟุต)

หมายเหตุ ระนาบสะเทิน คือ ระนาบซึ่งความดันอากาศภายในช่องบันไดมีค่าเท่ากับความดันอากาศภายนอกอาคาร

- **การลอยตัวของแก๊สเผาไหม้**

ควันที่มีอุณหภูมิสูงจะมีแรงยกตัวอันเนื่องมาจากความหนาแน่นของอากาศที่ลดลง การวิเคราะห์หาความดันที่เกิดขึ้นทำได้เช่นเดียวกับปรากฏการณ์ลมลอยตัว

- **การขยายตัวของแก๊สเผาไหม้**

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะทำให้อากาศขยายตัวอย่างรวดเร็ว ควันร้อนจะไหลออกในขณะที่อากาศภายนอกจะไหลเข้า

- **อิทธิพลของลมภายนอกอาคาร**

ลมภายนอกอาคารอาจจะมีผลสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของควันที่เกิดจากเพลิงไหม้ ถ้ามีหน้าต่างแตกในระดับซึ่งลมมีความเร็วสูง โดยทั่วไปความเร็วของลมจะเพิ่มขึ้นตามความสูงจากพื้นดิน

- **ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ**

ในขณะที่เกิดเพลิงไหม้ ควันอาจจะแพร่ไปยังพื้นที่ต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วผ่านทางท่อลมของระบบปรับอากาศและระบายอากาศ ดังนั้นในขณะที่เกิดเพลิงไหม้จึงจำเป็นจะต้องมีการจัดการระบบปรับอากาศอย่างเหมาะสม

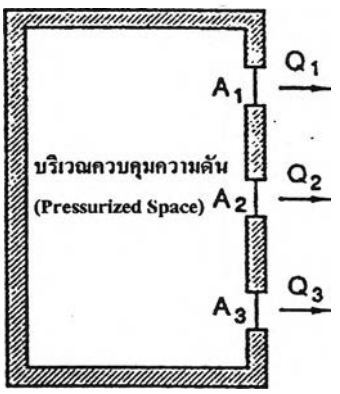
ก่อนที่จะพิจารณาถึงการออกแบบระบบ จะพิจารณาถึงลักษณะการไหลของอากาศผ่านช่องเปิดภายในอาคารก่อน

การไหลของอากาศจะมีลักษณะคล้ายๆกับการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทาน คือ จะมีทั้งแบบอนุกรม,แบบขนานและแบบผสม ในการวิเคราะห์เบื้องต้นจะใช้สมมติฐานต่างๆ ดังนี้

- สัมประสิทธิ์การไหล (flow coefficient) คงที่ตลอดเส้นทางการไหล
- อุณหภูมิของอากาศคงที่

3.2 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านช่องเปิดภายในอาคาร

3.2.1.แบบขนาน (Parallel Paths)



รูป 3.2 แสดงเส้นทางการไหลของอากาศแบบขนาน

จากรูปจะเห็นว่าผลต่างความดันบริเวณช่องทางออกทั้ง 3 ช่อง จะเท่ากัน ดังนั้นอัตราการไหลรวมจะเท่ากับอัตราการไหลของแต่ละช่องทางออกรวมกัน นำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \qquad \text{..... (3.2)}$$

เมื่อ Q_T คือ อัตราการไหลรวมของบริเวณควบคุมความดัน

หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ,CFM)

Q_1 คือ อัตราการไหลบริเวณช่องทางออกที่ 1

หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ,CFM)

Q_2 คือ อัตราการไหลบริเวณช่องทางออกที่ 2

หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที,CFM)

Q_3 คือ อัตราการไหลบริเวณช่องทางออกที่ 3

หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ,CFM)

ถ้านิยามให้ A_e (Effective area) คือ พื้นที่ที่อัตราการไหลของอากาศเทียบเท่ากับอัตราการไหลของอากาศรวมทั้งระบบโดยที่ผลต่างความดันระหว่างพื้นที่นี้เท่ากับผลต่างความดันของระบบกับภายนอก หน่วย ตารางเมตร (ตารางฟุต)

สมการที่ใช้วิเคราะห์หาอัตราการไหลของอากาศคือ

$$Q = KCA\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad \text{..... (3.3)}$$

เมื่อ C คือ สัมประสิทธิ์การไหล (dimensionless flow coefficient) โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.7

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ 1 (776,I-P UNIT) ที่มา : เอกสารอ้างอิง (8)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลผ่าน หน่วย ตารางเมตร (ตารางฟุต)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศผ่านพื้นที่หน้าตัด หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ,CFM)

ΔP คือ ผลต่างความดันระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลผ่าน หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

ดังนั้นสามารถหา Q_T ได้ดังนี้

$$Q_T = KCA_e\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad \text{..... (3.4)}$$

และอัตราการไหลผ่านช่องทางออกต่างๆ ก็จะเป็นดังนี้

$$Q_1 = KCA_1\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

$$Q_2 = KCA_2\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

$$Q_3 = KCA_3\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

จากสมการ (3.2) $Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$

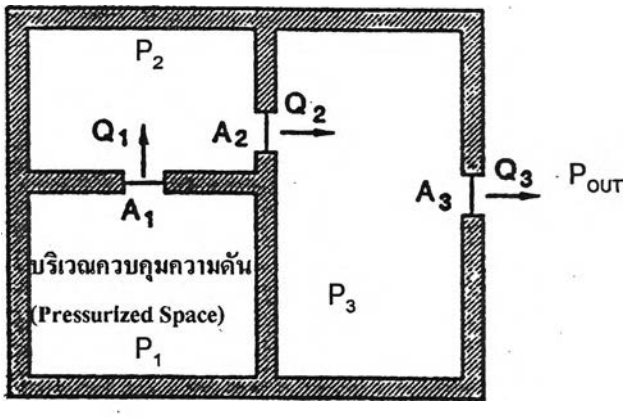
$$Q_T = KC(A_1 + A_2 + A_3)\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad \text{..... (3.5)}$$

แต่ สมการ (3.4) = สมการ (3.5)

จะได้ $A_e = (A_1 + A_2 + A_3)$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า A_e จะเท่ากับผลรวมของพื้นที่ช่องทางออกในกรณีที่เป็นการไหลแบบขนาน หรือ $A_e = \sum_{i=1}^{n} A_i$

3.2.2 แบบอนุกรม (Series Paths)



รูป 3.3 แสดงเส้นทางการไหลของอากาศแบบอนุกรม

จากรูปจะพบว่า ผลต่างความดันระหว่างบริเวณควบคุมความดันกับภายนอก คือ P_1-P_{out} หรือเขียนได้ในรูปผลรวมของผลต่างความดันได้ดังนี้

$$\Delta P_T = P_1 - P_{out} = (P_1 - P_2) + (P_2 - P_3) + (P_3 - P_{out})$$

$$= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

ดังนั้น $\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$ ..... (3.6)

เมื่อ P_1, P_2, P_3, P_{out} คือ ความดันในบริเวณ 1,2,3 และ ภายนอก ตามลำดับ
หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ΔP_1 คือ ผลต่างความดันระหว่างบริเวณควบคุมความดันกับบริเวณที่ 2
หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ΔP_2 คือ ผลต่างความดันระหว่างบริเวณที่ 2 กับบริเวณที่ 3
หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ΔP_3 คือ ผลต่างความดันระหว่างบริเวณที่ 3 กับภายนอก
หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ΔP_T คือ ผลต่างความดันระหว่างบริเวณควบคุมความดันกับภายนอก
หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ในการไหลแบบอนุกรม $Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3$

โดย
$$Q_T = KCA_e\sqrt{\frac{2\Delta P_T}{\rho}}$$

$$\Delta P_T = \left[\frac{Q}{(KCA_e)}\right]^2 \frac{\rho}{2}$$

จะได้ผลต่างความดันบริเวณต่าง ๆ ดังนี้

$$\Delta P_1 = \left[\frac{Q}{(KCA_1)}\right]^2 \frac{\rho}{2}$$

$$\Delta P_2 = \left[\frac{Q}{(KCA_2)}\right]^2 \frac{\rho}{2}$$

$$\Delta P_3 = \left[\frac{Q}{(KCA_3)}\right]^2 \frac{\rho}{2}$$

จากสมการ (3.6) จะได้ว่า

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$[\frac{Q}{(KCA_e)}]^2 \frac{\rho}{2} = [\frac{Q}{(KCA_1)}]^2 \frac{\rho}{2} + [\frac{Q}{(KCA_2)}]^2 \frac{\rho}{2} + [\frac{Q}{(KCA_3)}]^2 \frac{\rho}{2}$$

$$\frac{1}{A_e^2} = \frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2}$$

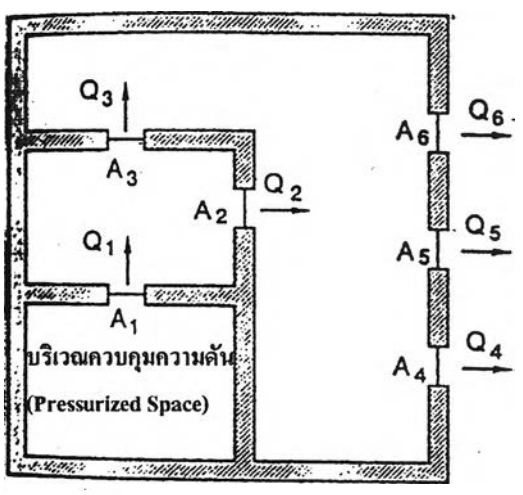
$$A_e = (\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2})^{-1/2}$$

จากการพิสูจน์ที่ผ่านมาสำหรับการไหลแบบอนุกรม A_e มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$A_e = (\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{A_i^2})^{-1/2}$$

3.2.3 แบบผสม (Combination of Paths in Parallel and Series)

คือ มีทั้งการไหลแบบขนานและแบบอนุกรม



รูป 3.4 แสดงตัวอย่างเส้นทางการไหลของอากาศแบบผสม

ในการวิเคราะห์การไหลแบบผสมจะคิดโดยแบ่งเป็นส่วนๆ คือ จะคิดการไหลแบบอนุกรมแยกกับการไหลแบบขนานแล้วจึงนำมารวมกัน เช่น จากรูป 3.4

ช่องทางออก 2 กับ 3 เป็นแบบขนาน ดังนั้น

$$A_{23e} = A_2 + A_3$$

ช่องทางออก 4,5 และ 6 เป็นแบบขนานเช่นกัน ดังนั้น

$$A_{456e} = A_4 + A_5 + A_6$$

เมื่อพิจารณา A_1 , A_{23e} , A_{456e} จะเห็นว่าเป็นแบบอนุกรม ดังนั้น

$$A_{e\,รวม} = \left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_{23e}^2} + \frac{1}{A_{456\,e}^2}\right)^{-1/2}$$

เมื่อได้ $A_{e\,รวม}$ ก็นำไปแทนในสมการหาอัตราการไหล ดังนี้

$$Q = KCA_{e\,รวม}\sqrt{\frac{2\Delta P_T}{\rho}}$$

โดยทั่วไปการวิเคราะห์โดยกำหนดให้อุณหภูมิของอากาศและสัมประสิทธิ์การไหลคงที่ก็ให้ค่าที่เหมาะสมเพียงพอแล้ว

3.3 การวิเคราะห์ผลต่างความดันภายในช่องบันไดหนีไฟ

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมความดันในช่องบันไดหนีไฟโดยทั่วไป ความเร็วในการไหลของอากาศในแนวดิ่งภายในช่องบันไดหนีไฟจะน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถไม่คำนึงถึงผลของการสูญเสียแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลของอากาศในแนวดิ่งได้ และในกรณีที่ยังไม่มีการเปิดประตูหนีไฟ ค่าความดันภายในช่องบันไดหนีไฟ จะมีความสัมพันธ์แบบ hydrostatic ดังนี้

$$P_S = P_{Sb} + K_\rho \rho_s y \qquad \text{..... (3.7)}$$

เมื่อ P_S คือ ความดันสัมบูรณ์ของอากาศภายในช่องบันไดหนีไฟที่ความสูง y เมตร (ฟุต)

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

P_{Sb} คือ ความดันสัมบูรณ์ของอากาศภายในช่องบันไดหนีไฟที่ด้านล่างสุดของช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

K_ρ คือ ค่าคงที่ เท่ากับ 9.8 (0.192 ,I-P UNIT) ที่มา : เอกสารอ้างอิง (8)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของอากาศภายในช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

y คือ ระดับความสูงภายในช่องบันไดหนีไฟโดยวัดจากด้านล่างสุดของช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย เมตร (ฟุต)

ในกรณีที่ความเร็วลมของอากาศภายนอกอาคารต่ำมาก(ประมาณศูนย์) ค่าความดันสัมบูรณ์ของอากาศภายนอกจะมีความสัมพันธ์แบบ hydrostatic ดังนี้

$$P_O = P_{Ob} + K_\rho \rho_o y \qquad \text{.....(3.8)}$$

เมื่อ P_O คือ ความดันสัมบูรณ์ของอากาศภายนอกช่องบันไดหนีไฟที่ความสูง y เมตร (ฟุต)

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

P_{Ob} คือ ความดันสัมบูรณ์ของอากาศภายนอกช่องบันไดหนีไฟที่ด้านล่างสุดของอาคาร

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ρ_o คือ ความหนาแน่นของอากาศภายนอกช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

จากสมการ (3.7) และ (3.8) จะสามารถหาความสัมพันธ์ของ ΔP_{SO} เมื่อ $\Delta P_{SO} = P_S - P_O$ ได้ดังนี้

$$\Delta P_{SO} = \Delta P_{SOb} + K_\rho(\rho_O - \rho_S)y \qquad \text{.....(3.9)}$$

เมื่อ ΔP_{SO} คือ ผลต่างความดันระหว่างช่องบันไดหนีไฟกับภายนอกอาคารที่ความสูง y เมตร (ฟุต)

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ΔP_{SOb} คือ ผลต่างความดันระหว่างช่องบันไดหนีไฟกับภายนอกอาคารที่ด้านล่างสุดของช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

การวิเคราะห์นี้จะกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของอากาศคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูง ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงเล็กน้อย ยกตัวอย่างเช่น ในอาคารที่สูง 100 ชั้น ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่า 4%

จากกฎของแก๊สสำหรับแก๊สอุดมคติ $P = \rho RT$

เมื่อ P คือ ความดันสัมบูรณ์ของแก๊สอุดมคติ

หน่วย พาสคัล (ปอนด์ต่อตารางฟุต)

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊สอุดมคติ

หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

หน่วย จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน (ปอนด์ต่อปอนด์มวลแรงคิน)

T คือ อุณหภูมิของแก๊สอุดมคติ

หน่วย องศาเคลวิน (องศาแรงคิน)

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในอาคารมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ดังนั้นจึงสามารถหาความหนาแน่นของอากาศได้จาก $\rho = \frac{P_{atm}}{RT}$

เมื่อ P_{atm} คือ ความดันสัมบูรณ์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

เท่ากับ 101325 (2116,I-P UNIT) ที่มา : เอกสารอ้างอิง (8)

หน่วย พาสคัล (ปอนด์ต่อตารางฟุต)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ในกรณีนี้คืออากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ 287 (53.34,I-P UNIT) ที่มา : เอกสารอ้างอิง (8)

หน่วย จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน (ปอนด์ต่อปอนด์มวลแรงคิน)

สามารถหาค่า ρ_o และ ρ_s ได้จาก $\rho_o = \frac{P_{atm}}{RT_O}$ และ $\rho_S = \frac{P_{atm}}{RT_S}$

นำมาแทนลงในสมการ (3.9) จะได้สมการดังนี้

$$\Delta P_{SO} = \Delta P_{SOb} + K_\rho(\rho_O - \rho_S)y \qquad .....(3.9)$$

พลศาสตร์ 21

$$\Delta P_{SO} = \Delta P_{SOb} + K_{\rho}\left(\frac{P_{atm}}{RT_O} - \frac{P_{atm}}{RT_S}\right)y$$

$$\Delta P_{SO} = \Delta P_{SOb} + K_{\rho}\frac{P_{atm}}{RT}\left(\frac{1}{T_O} - \frac{1}{T_S}\right)y$$

กำหนดให้ $k_S = \dfrac{K_{\rho}P_{atm}}{R}$ แทนค่าจะได้ค่า k_S

โดยที่ k_S คือ ค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ 3460 (7.64 ,I-P UNIT) ที่มา : เอกสารอ้างอิง (8)

$$\text{หน่วย} \left(\frac{\text{พาสคัล} * \text{องศาเคลวิน}}{\text{เมตร}}\right), \left[\frac{\text{นิ้วWG.} * \text{องศาแรงคิน}}{\text{ฟุต}}\right]$$

กำหนดให้

$$b = k_S\left(\frac{1}{T_O} - \frac{1}{T_S}\right) \qquad \text{.....(3.10)}$$

เมื่อ b คือ ตัวประกอบอุณหภูมิ (temperature factor)

$$\text{หน่วย} \left(\frac{\text{พาสคัล}}{\text{เมตร}}\right), \left[\frac{\text{นิ้วWG.}}{\text{ฟุต}}\right]$$

จากสมการ (3.10) พบว่า ค่า b เป็นได้ทั้งบวกและลบ

กรณีที่ $T_O > T_S$ หรือ อุณหภูมิภายนอกอาคารมากกว่าภายในช่องบันไดหนีไฟ ค่า b จะเป็นลบ

กรณีที่ $T_O < T_S$ หรือ อุณหภูมิภายนอกอาคารน้อยกว่าภายในช่องบันไดหนีไฟ ค่า b จะเป็นบวก

เมื่อแทนพจน์ต่างๆ ลงไป สุดท้ายจะได้ความสัมพันธ์ของสมการ (3.9) ดังนี้

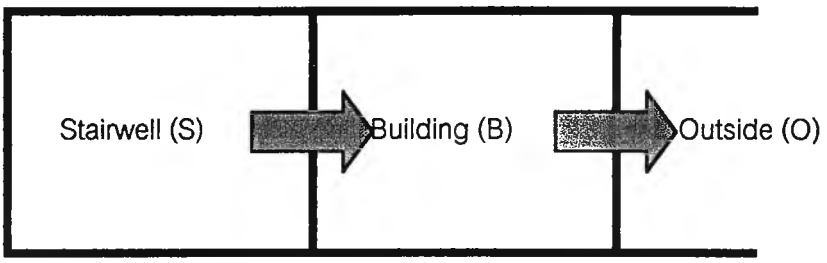
$$\Delta P_{SO} = \Delta P_{SOb} + by \qquad \text{.....(3.11)}$$

จากทฤษฎีการไหลแบบอนุกรม สามารถนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่าง ΔP_{SO} กับ ΔP_{SB} ได้

เมื่อ ΔP_{SB} คือ ผลต่างความดันระหว่างช่องบันไดหนีไฟกับภายในอาคารที่ความสูง

y เมตร (ฟุต)

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)



รูป 3.5 จำลองการไหลของอากาศจากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายนอกอาคาร

จากทฤษฎีการไหลแบบอนุกรม จะได้

$$A_{SO}^2 = \left(\frac{1}{A_{SB}^2} + \frac{1}{A_{BO}^2}\right)$$

$$A_{SO}^2 = \left(\frac{A_{SB}^2 A_{BO}^2}{A_{SB}^2 + A_{BO}^2}\right) \qquad \text{.....(3.12)}$$

เมื่อ A_{SO} คือ พื้นที่ที่มีผลต่อการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศจากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายนอกอาคารใน 1 ชั้นของอาคาร

หน่วย ตารางเมตร (ตารางฟุต)

เมื่อ A_{SE} คือ พื้นที่ระหว่างช่องบันไดหนีไฟกับอาคารที่อากาศไหลผ่านต่อ 1 ชั้น

หน่วย ตารางเมตร (ตารางฟุต)

A_{BO} คือ พื้นที่ระหว่างอาคารกับภายนอกอาคารที่อากาศไหลผ่านต่อ 1 ชั้น

หน่วย ตารางเมตร (ตารางฟุต)

$$\Delta P_{SO} = (P_S - P_B) + (P_B - P_O)$$

$$\Delta P_{SO} = \Delta P_{SB} + \Delta P_{BO}$$

$$\Delta P_{SB} = \Delta P_{SO} - \Delta P_{BO}$$

$$\Delta P_{SB} = \Delta P_{SO}\left(1 - \frac{\Delta P_{BO}}{\Delta P_{SO}}\right) \qquad \text{.....(3.13)}$$

เมื่อ $\Delta P_{BO} = \left[\frac{Q}{KCA_{BO}}\right]^2 \frac{\rho}{2}$ และ $\Delta P_{SO} = \left[\frac{Q}{KCA_{SO}}\right]^2 \frac{\rho}{2}$

แทนค่า ΔP_{BO} และ ΔP_{SO} ลงในสมการ (3.13) แล้วจัดรูปจะได้

$$\Delta P_{SB} = \Delta P_{SO}(1 - \frac{A_{SO}^2}{A_{BO}^2})$$

แทนค่า A_{SO}^2 จากสมการ (3.12) แล้วจัดรูปจะได้

$$\Delta P_{SB} = \Delta P_{SO}(\frac{1}{1+(\frac{A_{SB}}{A_{BO}})^2}) \qquad .....(3.14)$$

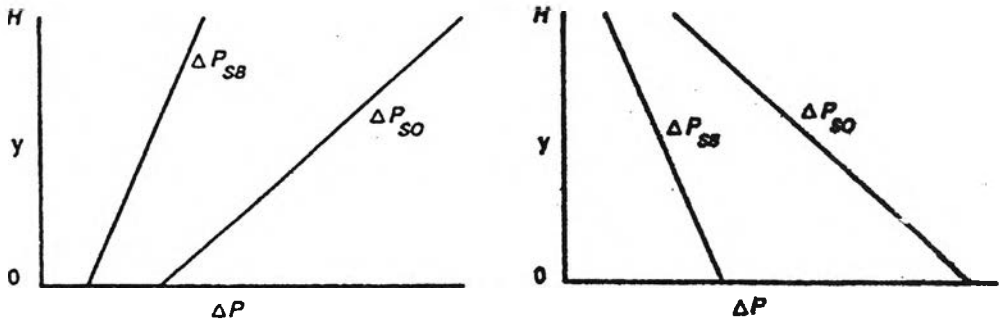
จากสมการ (3.11) และ (3.14) เมื่อนำมาจัดรูปจะได้ความสัมพันธ์ของ ΔP_{SB} ดังนี้

$$\Delta P_{SB} = \Delta P_{SBb} + \frac{b}{1+(\frac{A_{SB}}{A_{BO}})^2}y \qquad .....(3.15)$$

เมื่อ ΔP_{SBb} คือ ผลต่างความดันระหว่างช่องบันไดหนีไฟกับภายในอาคารที่ด้านล่างสุดของช่องบันได

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

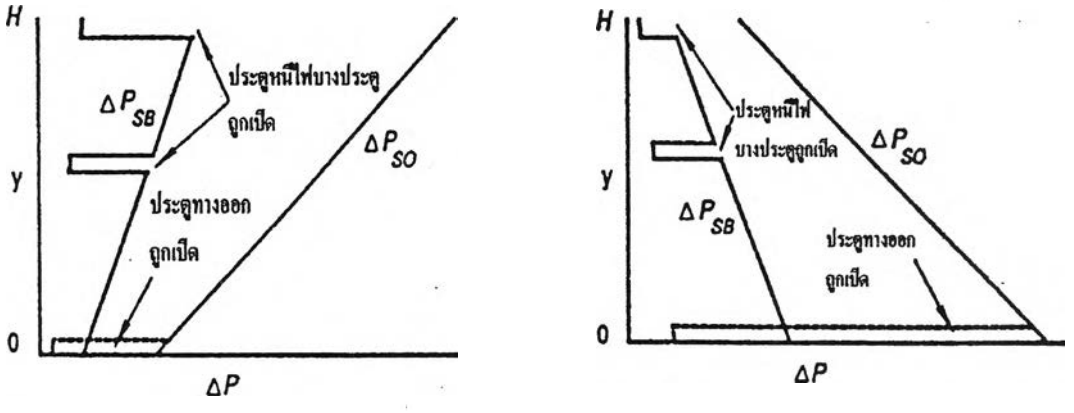
ถ้านำผลต่างความดันกับความสูงของอาคารในกรณีที่ประตูหนีไฟทุกบานปิดมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้กราฟลักษณะดังนี้



เมื่อค่า b เป็นบวก ($T_O < T_S$) เมื่อค่า b เป็นลบ ($T_O > T_S$)

รูป 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดันกับความสูงของอาคารในกรณีที่ประตูหนีไฟทุกบานปิด

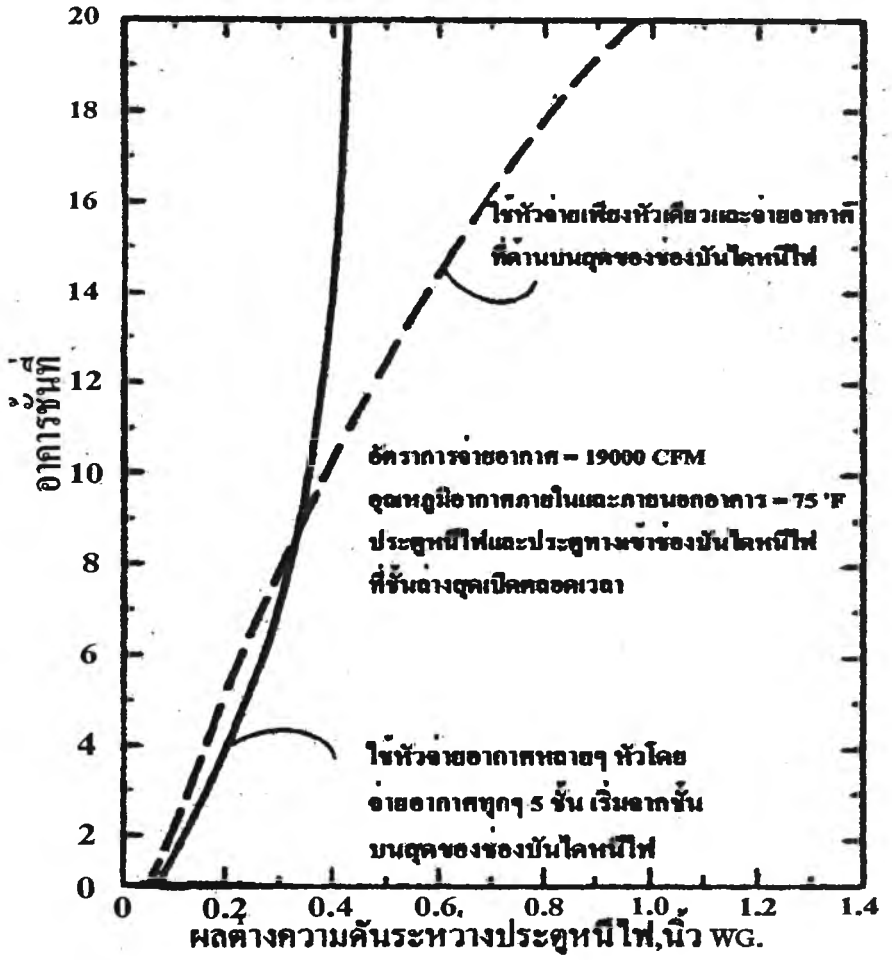
ในกรณีที่ประตูหนีไฟบางบานถูกเปิดจะทำให้ผลต่างความดันระหว่างช่องบันไดหนีไฟลดลง (pressure drop) ดังรูป



เมื่อค่า b เป็นบวก ($T_o < T_s$) เมื่อค่า b เป็นลบ ($T_o > T_s$)

รูป 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดันกับความสูงของอาคารในกรณีที่มีการเปิดประตูหนีไฟบางบาน

จากการศึกษางานที่ผ่านมาพบว่า การใช้หัวจ่ายอากาศหลายๆ หัว (multiple - injection) จะมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้หัวจ่ายอากาศเพียงหัวเดียว เพราะว่าการใช้หลายหัวจ่าย ลมที่จ่ายจะค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งช่องบันไดและยังช่วยลดผลต่างความดันระหว่างประตูหนีไฟไม่ให้มากเกินกำหนดอีกด้วย ในขณะที่การใช้หัวจ่ายหัวเดียวจะมีผลทำให้ผลต่างความดันระหว่างประตูหนีไฟบางบานมีค่าสูงเกินกว่าค่าผลต่างความดันสูงสุดที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูป



รูป 3.8 แสดงผลต่างความดันระหว่างประตูหนีไฟ เมื่อ

—— แทนการใช้หัวจ่ายหลายหัวและติดตั้งทุกๆ 5 ชั้น

---- แทนการใช้หัวจ่ายหัวเดียวและติดตั้งชั้นบนสุด

ที่มา : เอกสารอ้างอิง (3)

ในรูปนี้ประตูทางออกและประตูหนีไฟชั้นล่างสุดจะถูกเปิด ระบบถูกออกแบบให้มีผลต่างความ ดันสูงสุดไม่เกิน 0.4 นิ้ว WG.

หลักการเบื้องต้นในการออกแบบ คือ ผลต่างของความดันระหว่างประตูหนีไฟทุกบานจะต้องเพียงพอที่จะไม่ทำให้ควันแทรกซึมเข้ามาในช่องบันไดหนีไฟได้ไม่ว่าประตูหนีไฟจะเปิดหรือปิด และผลต่างความดันจะต้องไม่ทำให้เกิดความยากลำบากในการเปิดประตูหนีไฟ

3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณอากาศที่ต้องอัดเข้าไปยังช่องบันไดหนีไฟ

สมการที่ใช้วิเคราะห์หาอัตราการไหลของอากาศมีดังนี้

$$Q = KCA\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad \text{.....(3.16)}$$

เมื่อ C คือ สัมประสิทธิ์การไหล (dimensionless flow coefficient)
โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.7

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ 1 (776 ,I-P UNIT) ที่มา : เอกสารอ้างอิง (8)

$$\text{หน่วย} \left(\frac{\text{กิโลกรัม}}{\text{พาสคัล * เมตร * วินาที}^2}\right)^{1/2}, \left[\frac{\text{ปอนด์}}{\text{นิ้วWG. * ฟุต * นาที}^2}\right]^{1/2}$$

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลผ่าน
หน่วย ตารางเมตร (ตารางฟุต)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศผ่านพื้นที่หน้าตัด
หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที , CFM)

ΔP คือ ผลต่างความดันระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลผ่าน
หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ
หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)

สมการ (3.16) จะใช้คำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ไหลจากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายนอกอาคารโดยตรง

ในกรณีที่ช่องบันไดหนีไฟมีความดันสูงกว่าบริเวณโดยรอบตลอดทั้งความสูงของช่องบันได อัตราการไหลของอากาศจากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายนอกอาคารสามารถเขียนในรูปดิฟเฟอเรนเชียลได้ดังนี้

$$dQ = CA_{he}\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}\,dy \qquad \text{.....(3.17)}$$

เมื่อ A_{he} คือ พื้นที่ที่มีผลต่อการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศจากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายนอกอาคารต่อหนึ่งหน่วยความสูง (เมตรหรือฟุต)

หน่วย ตารางเมตร (ตารางฟุต)

ค่า A_{he} หาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$A_{he} = \frac{NA_{SBOe}}{H} \qquad .....(3.18)$$

เมื่อ N คือ จำนวนชั้นของอาคาร

H คือ ความสูงของช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย เมตร (ฟุต)

A_{SBOe} คือ พื้นที่ที่มีผลต่อการคำนวณอัตราการไหลของอากาศ (effective area) จากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายนอกอาคารต่อหนึ่งชั้นของอาคาร

หน่วย ตารางเมตร (ตารางฟุต)

ค่า A_{SBOe} หาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$A_{SBOe} = \frac{A_{SB}A_{BO}}{\sqrt{\left(A_{SB}^2 + A_{BO}^2\right)}} \qquad .....(3.19)$$

จากสมการที่ (3.17) ถ้าแทนค่าผลต่างความดันจากสมการที่ (3.11) แล้วนำมาอินทิเกรตตลอดความสูงของช่องบันไดหนีไฟ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{SBO} = \frac{2}{3} NC\, A_{SBOe} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \left[\frac{\Delta P_{SOt}^{3/2} - \Delta P_{SOb}^{3/2}}{\Delta P_{SOt} - \Delta P_{SOb}} \right] \qquad .....(3.20)$$

เมื่อ ΔP_{SOt} คือ ผลต่างความดันระหว่างช่องบันไดหนีไฟกับภายนอกอาคารที่ชั้นบนสุดของช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

Q_{SBO} คือ อัตราการไหลของอากาศจากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายนอกอาคาร

หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที , CFM)

จากสมการ (3.14) ถ้าแทนความสัมพันธ์ระหว่าง ΔP_{Sob} กับ ΔP_{SBb} ลงในสมการ (3.20) จะสามารถหาอัตราการไหลของอากาศจากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายในอาคารได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_{SB} = \frac{2}{3} NC A_{SB} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \left[\frac{\Delta P_{SBt}^{3/2} - \Delta P_{SBb}^{3/2}}{\Delta P_{SBt} - \Delta P_{SBb}} \right] \quad ...(3.21)$$

เมื่อ ΔP_{SBt} คือ ผลต่างความดันระหว่างช่องบันไดหนีไฟกับภายในอาคารที่ชั้นบนสุดของช่องบันไดหนีไฟ

หน่วย พาสคัล (นิ้ว WG.)

Q_{SB} คือ อัตราการไหลของอากาศจากช่องบันไดหนีไฟไปยังภายในอาคาร

หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที , CFM)

แต่จากสมมติฐานที่ว่าไม่มีรอยรั่วในแนวดิ่ง ดังนั้น $Q_{SB} = Q_{SBO}$

3.5 ความสามารถในการเปิดประตูหนีไฟ

ความสามารถในการเปิดประตูหนีไฟขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความแข็งแรงของแต่ละบุคคล ตำแหน่งของลูกบิดประตู ความแข็งของสปริงดึงประตูกลับคืน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นกับพื้นรองเท้า และลักษณะการเปิดประตูว่าเป็นการผลักหรือดึง

Read และ Shipp (1979) ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลุ่มบุคคลที่อาจจะเกิดปัญหาในการออกแรงเปิดประตูหนีไฟโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มอายุน้อย (5 –6 ปี) และกลุ่มผู้สูงอายุ (60 – 75 ปี) โดยการออกแรงจะใช้มือเพียงข้างเดียว ผลการศึกษาแสดงไว้ในตาราง

ตาราง 3.1: แสดงแรงที่ใช้ในการเปิดประตูหนีไฟของกลุ่มบุคคลอายุระหว่าง 5-6 ปี

ลักษณะการเปิดประตู	เพศ	แรงที่ใช้ในการเปิดประตู			เปอร์เซ็นไทล์ที่5
		ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	
		N (lb)	N (lb)	N (lb)	N (lb)
ผลัก	ชาย	90 (20)	155 (26)	32 (7.2)	36 (8.1)
	หญิง	73 (16)	126 (28)	29 (6.5)	46 (10)
ดึง	ชาย	120 (27)	184 (41)	77 (17)	82 (18)
	หญิง	86 (19)	141 (32)	39 (8.7)	48 (11)

หมายเหตุ: ค่าในตารางเป็นค่าที่ได้จากการออกแรงเปิดประตูโดยใช้มือเพียงข้างเดียว
ถ้าออกแรงโดยใช้มือทั้งสองข้างหรือใช้มือผลักหรือดึงประตูอย่างรวดเร็วจะช่วยเพิ่มแรงในการเปิดประตูหนีไฟได้

ตาราง 3.2: แสดงแรงที่ใช้ในการเปิดประตูหนีไฟของกลุ่มบุคคลอายุระหว่าง 60-75 ปี

ลักษณะการเปิดประตู	เพศ	แรงที่ใช้ในการเปิดประตู			เปอร์เซ็นไทล์ที่5
		ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	
		N (lb)	N (lb)	N (lb)	N (lb)
ผลัก	ชาย	237 (53)	540 (121)	92 (21)	101 (23)
	หญิง	162 (36)	309 (70)	83 (19)	91 (20)
ดึง	ชาย	306 (69)	786 (177)	102 (23)	102 (23)
	หญิง	201 (45)	407 (91)	95 (21)	100 (22)

หมายเหตุ: ค่าในตารางเป็นค่าที่ได้จากการออกแรงเปิดประตูโดยใช้มือเพียงข้างเดียว ถ้าออกแรงโดยใช้มือทั้งสองข้างหรือใช้มือผลักหรือดึงประตูอย่างรวดเร็วจะช่วยเพิ่มแรงในการเปิดประตูหนีไฟได้

เปอร์เซ็นไทล์ที่ 5 หมายถึง ถ้ามีข้อมูล 100 ข้อมูล เรียงค่าจากน้อยไปมาก เปอร์เซ็นไทล์ที่ 5 คือ ข้อมูลตัวที่ 5 นับจากค่าต่ำสุด

Life Safety Code ใน NFPA (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION) 1991C แนะนำว่าแรงที่ต้องใช้ในการเปิดประตูหนีไฟไม่ควรจะเกิน 133 นิวตัน (30 ปอนด์) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Read และ Shipp

ในกรณีที่แรงที่ใช้ในการเปิดประตูเท่ากับ 133 นิวตัน (30 ปอนด์) ข้อมูลของผลต่างความดันสูงสุดกับขนาดประตู แสดงในตาราง

ตาราง 3.3: แสดงผลต่างความดันสูงสุดในกรณีที่ใช้แรงในการเปิดประตูหนีไฟเท่ากับ 133 นิวตัน (30ปอนด์)

(ข้อมูลจาก NFPA 92A [1988])

แรงสปริงดึงประตูกลับ (door closing force) N (lb)	ผลต่างความดันสูงสุดระหว่างประตูหนีไฟ , พาสคัล (นิ้ว WG.) ความกว้างของประตู , m (in.)				
	0.813 (32)	0.914 (36)	1.02 (40)	1.12 (44)	1.17 (46)
26.7 (6)	112 (0.45)	100.5 (0.40)	92.1 (0.37)	84.6 (0.34)	77.1 (0.31)
35.6 (8)	102 (0.41)	92.1 (0.37)	84.5 (0.34)	77.1 (0.31)	69.7 (0.28)
44.5 (10)	92.1 (0.37)	84.5 (0.34)	74.6 (0.30)	69.7 (0.28)	64.7 (0.26)
53.4 (12)	84.5 (0.34)	74.6 (0.30)	67.2 (0.27)	62.2 (0.25)	57.2 (0.23)
62.3 (14)	74.6 (0.30)	67.2 (0.27)	59.7 (0.24)	45.7 (0.22)	52.2 (0.21)

หมายเหตุ ค่าในตารางคำนวณโดยกำหนดให้ประตูมีความสูง 2.13 เมตร (7ฟุต)

NFPA 92A (NFPA 1988) แนะนำค่าผลต่างความดันต่ำสุดที่จะป้องกันไม่ให้ควันเข้ามาภายในช่องบันไดหนีไฟไว้ดังนี้

ตาราง 3.4: แนะนำค่าผลต่างความดันต่ำสุดระหว่างประตูหนีไฟ

(ข้อมูลจาก NFPA 92A [1988])

ลักษณะอาคาร	ความสูงของเพดาน m (ft)	ค่าผลต่างความดันต่ำสุดที่ควรออกแบบ Pa (in.H_2O)
AS	ไม่กำหนด	12.4 (0.05)
NS	2.7 (9)	24.9 (0.10)
NS	4.6 (15)	34.8 (0.14)
NS	6.4 (21)	44.8 (0.18)

หมายเหตุ AS คือ อาคารที่ติดตั้งหัวจ่ายดับเพลิง (Sprinkler)

NS คือ อาคารที่ไม่ได้ติดตั้งหัวจ่ายดับเพลิง (Nonsprinkler)

หน่วยงานต่างๆ ได้กำหนดเกณฑ์ในการออกแบบระบบควบคุมควันในช่องบันไดหนีไฟไว้ดังนี้

ตาราง 3.5:แสดงข้อกำหนดในการออกแบบระบบควบคุมควันในช่องบันไดหนีไฟของหน่วยงานต่างๆ

ตารางแสดงข้อกำหนดในการออกแบบระบบควบคุมควันในช่องบันไดหนีไฟของหน่วยงานต่างๆ					
	Australian Standard	British Standard	New York City Standard	Canadian Standard	หมายเหตุ
อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	11.3+0.09n	4.7+0.09x	n คือ จำนวนชั้น x คือ จำนวนประตูที่เปิด
ความเร็วเฉลี่ยต่ำสุดของอากาศบริเวณประตูเปิด (เมตรต่อวินาที)	1	ไม่กำหนด	2#	ไม่กำหนด	#เมื่อผลต่างความดันต่ำสุดเท่ากับ13 พาสคัล
ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของอากาศบริเวณประตูเปิด (เมตรต่อวินาที)	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	10& 15*	ไม่กำหนด	&ประตูหนีไฟเปิด 1 บาน * คือ ความเร็วสูงสุดบริเวณหัวจ่าย
แรงสูงสุดที่ต้องใช้ในการเปิดประตู (นิวตัน)	110	ไม่กำหนด	110	ไม่กำหนด	
ผลต่างความดันสูงสุดระหว่างประตูหนีไฟ (พาสคัล)	50	50	100	100	
ผลต่างความดันต่ำสุดระหว่างประตูหนีไฟ (พาสคัล)	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	25& 13*	ไม่กำหนด	& เมื่อประตูหนีไฟทุกบานเปิด *เมื่อมีการเปิดประตูหนีไฟ 3บาน

ที่มา : เอกสารอ้างอิง (1)