

## บทที่ 3

### อุโมงค์ลม (Wind Tunnel)

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับตัวของอุโมงค์ลม ชนิด รูปแบบ รวมถึง ส่วนประกอบและลักษณะพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุโมงค์ลม ที่จะใช้ประกอบพิจารณาในการออกแบบ และจัดสร้าง โดยเนื้อหาส่วนนี้จะนำไปสู่วิธีการเริ่มต้นของการกำหนดลักษณะตัวอุโมงค์ลม ซึ่งได้อธิบายเป็นข้อ ๆ ไว้แล้ว ดังนี้

#### 3.1 ชนิดของอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. **ประเภทความดันปกติ** อุโมงค์ลมประเภทนี้จะใช้อากาศที่มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งทำได้โดยการใช้พัดลมดูดหรือเป่าอากาศผ่านวัสดุทดสอบ

2. **ประเภทความดันสูง** อุโมงค์ลมประเภทนี้จะใช้อากาศที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศทำได้โดยการใช้ถังลมอัดอากาศแล้วเป่าผ่านวัสดุทดสอบ

โดยอุโมงค์ลมประเภทนี้ยังสามารถแบ่งประเภทได้ตามความเร็วของของไหล(ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นลม) ที่เข้าสู่ห้องทดสอบ (Test Section) ได้ดังนี้

- 2.1) **Transonic Wind Tunnels:** โดยอุโมงค์ลมประเภทนี้จะทำความเร็วลมภายในห้องทดสอบ (Test Section) ที่น้อยกว่าความเร็วเสียง

- 2.2) **Supersonic Wind Tunnels:** อุโมงค์ลมประเภทนี้จะทำความเร็วลมภายในห้องทดสอบที่ได้ความเร็วลมถึง เลขมัคที่มีค่าเท่ากับ 5 ( Mach Number = 5 ) ซึ่งจะได้ทำได้โดยการปรับรูปแบบเพิ่มหรือลดขนาดของตัวหัวปล่อลม (Nozzles.)

- 2.3) **Hypersonic Wind Tunnels.:** อุโมงค์ลมประเภทนี้จะทำความเร็วลมที่เลขมัคระหว่าง 5-15 โดยในระหว่างการขยายการไหลก็จะทำให้เกิดความร้อนที่เกิดขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องมีการป้องกัน การหลอมละลายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ด้วย

- 2.4) **Hot Shot Wind Tunnels:** อุโมงค์ลมประเภทนี้จะสามารถทำความเร็วลมที่เลขมัคได้ 27 โดยจะต้องใช้การวิเคราะห์ ตัวแปรต่างๆ ก่อนข้างละเอียด และจะเกิดการส่งผ่านความร้อนที่สูงในระหว่างการทดสอบ [4]

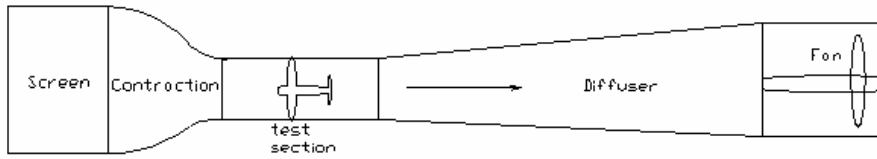
นอกจากนี้แล้วอุโมงค์ลมทั้งสองประเภทข้างต้นยังสามารถแบ่งได้เป็นอีก ๒ แบบ คือ

- 1.) อุโมงค์ลมแบบเปิด อุโมงค์ลมประเภทนี้จะให้อากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนปฏิบัติงานแล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง โดยในส่วนของห้องติดตั้ง ส่วนของตัวกำลังขับลมนั้น ( เช่น มอเตอร์ดีดใบพัด) จะสามารถติดตั้งไว้ที่ทางด้านใดด้านหนึ่งของตัวอุโมงค์ลม ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละการออกแบบนั้น ๆ ว่าสามารถติดตั้งในส่วนทางใดทางหนึ่งแล้ว จะให้ผลสมรรถนะดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 1(ข) และ รูปที่ 1 (ค)

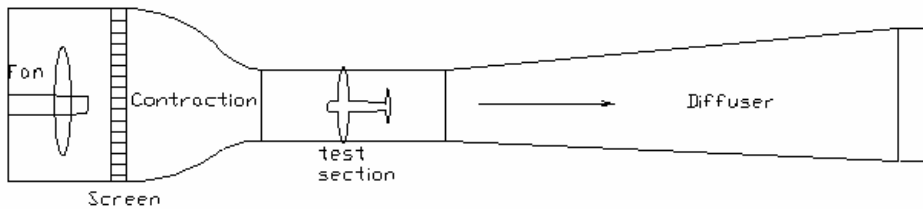


รูปที่3.1(ก) ลักษณะของอุโมงค์ลม

- ข้อดี**
1. งบประมาณในการจัดสร้างน้อยกว่าอุโมงค์ลมแบบปิด
  2. ถ้าหากมีการทดสอบโดยใช้แบบควัน (Smoke Test) ก็สามารทำได้เลยโดยไม่มีเตรียมการเรื่องของอากาศ
- ข้อเสีย**
1. ในกรณีห้องสถานที่ตั้งอุโมงค์ลม จำเป็นต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับตัวของอุโมงค์ลม และมีฉนวนกันสภาวะของลมตามธรรมชาติ เพื่อจะได้ประสิทธิภาพในการทดสอบ
  2. ขนาด และความเร็วภายในอุโมงค์ลม จะต้องใช้พลังงานในการเดินเครื่องมากกว่าอุโมงค์ลมแบบปิด
  3. เกิดเสียงดังกว่าอุโมงค์ลมแบบปิด



รูปที่3.1(ข) อุโมงค์ลมแบบเปิด ติดตั้งตัวขับใบพัดส่วนหลัง (แบบดูดลม)



รูปที่3.1(ค) อุโมงค์ลมแบบเปิด ติดตั้งตัวขับใบพัดส่วนหน้า (แบบเป่าลม)

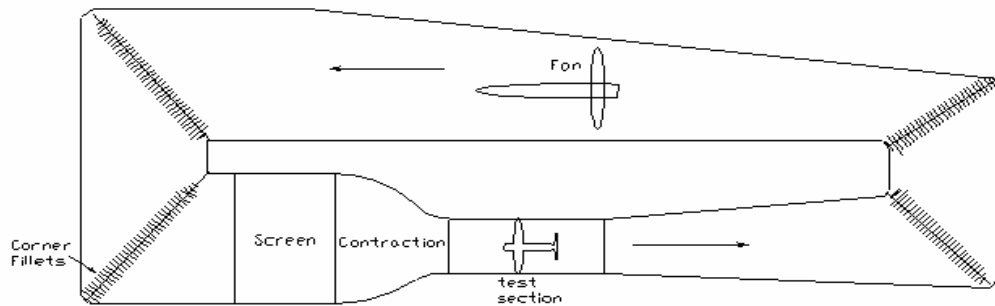
- 2.) อุโมงค์ลมแบบปิด อุโมงค์แบบนี้จะให้อากาศไหลหมุนเวียนอยู่ภายในตลอดเวลาซึ่งจะมีทั้งแบบขนาดระบบเล็ก จนถึงขนาดที่มีระบบใหญ่

**ข้อดี**

1. ใช้พลังงานในการสร้างความเร็วลมให้กับห้องทดสอบน้อย
2. เกิดเสียงที่ไม่ดังทำให้ไม่เกิดมลภาวะทางเสียง

**ข้อเสีย**

1. งบประมาณในการจัดสร้างค่อนข้างสูง
2. ถ้าต้องการอุโมงค์ลมที่ดีหรือมีประสิทธิภาพการทำงานสูงจะต้องมีขบวนการแลกเปลี่ยนอากาศและมีการทำความสะอาดให้กับเครื่องด้วย [3]



รูปที่ 3.2 (ก) อุโมงค์ลมแบบปิด



รูปที่ 3.2 (ข) อุโมงค์ลมแบบปิด

### 3.2 ขนาดของตัวอุโมงค์ลม

การกำหนดขนาดของอุโมงค์ลมส่วนใหญ่จะเรียกหรือถูกกำหนดขนาดโดยขนาดห้องทดสอบ (Test Section Size) ที่ใช้งาน และขนาดของตัวอุโมงค์ลมนั้นไม่ได้ถูกจำกัดขนาดที่แน่นอน โดยจะขึ้นอยู่กับความต้องการของการใช้งานในการทดสอบ หรือขนาดของสิ่งที่จะนำมาทดสอบว่ามีขนาดเล็ก หรือใหญ่ขนาดไหน ซึ่งในปัจจุบันมีขนาดของห้องทดสอบที่มีตั้งแต่ พื้นที่หน้าตัด 1 ft. x 1 ft (หรืออาจจะมีเล็กกว่าแต่ก็น้อยมาก) ถึงขนาดที่สามารถนำรถยนต์หรือเครื่องบินขนาดใหญ่เข้าไปได้ภายในห้องทดสอบเพื่อทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลมได้ เช่น อุโมงค์ลมที่สถาบัน NASA เป็นต้น



รูปที่ 3.3 อุโมงค์ลมขนาดกลางและขนาดเล็ก [5]

แต่อย่างไรก็ตาม ขนาดของตัวอุโมงค์ลมที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดของห้องทดสอบ (Test Section Size) ที่เท่ากัน ก็มีใช้ว่าจะมีขนาดโดยรวมทั้งหมดของตัวอุโมงค์ลมที่เท่ากันเสมอไป โดยขนาดโดยรวมก็จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบอื่นๆ อีกเช่นกัน แล้วแต่กรณีของการออกแบบ เช่น ความยาวของห้องทดสอบและส่วนอื่นๆ ขนาดของพื้นที่หน้าตัดส่วนแพร์เข้า (Contraction) ต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดห้องทดสอบ (Test Section) หรือขนาดของพื้นที่หน้าตัดส่วนแพร์ออก (Diffuser) ต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดห้องทดสอบ (Test Section) เป็นต้น

เรื่องของลักษณะของตัวอุโมงค์ลมก็ไม่ได้ถูกกำหนดไว้เป็นลักษณะรูปร่างที่แน่นอนตายตัว แต่จะขึ้นอยู่กับกรอกแบบนั้น ๆ เช่น ลักษณะของส่วนที่อากาศแพร์ออก (Diffuser) ที่จะมีรูปร่างต่างกันไป ไม่ว่าจะเป็นทรงกระบอกกลม หรือแม้แต่ว่ารูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมยาว ดังรูปที่ 3.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 รูปร่างของอุโมงค์ลมที่มีส่วนอากาศแพร่ออก เป็นสี่เหลี่ยมยาว (ก)  
และกระบอกกลม (ข)

### 3.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของอุโมงค์ลมแบบเปิด

#### 3.3.1 ส่วนปรับสภาพลมก่อนเข้า (Settling Chamber หรือ Screen)

ส่วนปรับสภาพลมก่อนเข้าเป็นส่วนที่อยู่ข้างหน้าสุด ซึ่งอุโมงค์ลมบางชนิดอาจไม่มีการจัดทำก็ได้ แต่สภาพของลมที่เข้าไปสู่ส่วนอื่น ๆ จนถึงห้องทดสอบอาจมีสภาพสถานะที่ไม่ดีพอ คือ ไม่มีความสม่ำเสมอและราบเรียบมากพอ เนื่องจากหน้าที่หลักของส่วนนี้ คือ การทำให้สภาพลมก่อนเข้าห้องทดสอบมีสภาพที่สม่ำเสมอและราบเรียบที่สุด โดยตัวปรับสภาพลมก่อนเข้านี้จะมีตัวของ รังผึ้ง (Honeycomb) ประกอบอยู่ภายใน อาจมีลักษณะของตัวแผ่นแต่ละแผ่นเป็นลักษณะสี่เหลี่ยม หรือวงกลม แล้วแต่การออกแบบ ส่วนใหญ่จะออกแบบที่ ขนาดความยาวของเซลล์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6-8.

ผลที่เกิดจากการติดตั้งรังผึ้ง (Honeycomb) นั้น ก็มีตามมาอยู่บ้าง เช่น เกิดการสูญเสียความดันซึ่งส่งผลไปในการสร้างความเร็วลมภายในห้องทดสอบให้ลดลงมา เกิดการสูญเสียกำลังในส่วน of ตัวขับ และค่าที่วุ่นนี้สามารถหาได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ซึ่งหาได้จากสมการ

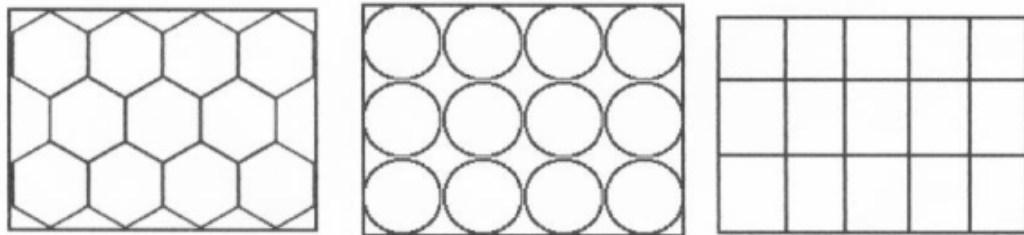
$$K_h = \lambda_h \left( \frac{L_h}{D_h} \right) \left( \frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left( \frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ

$$\lambda_h = 0.375 \left( \frac{\Delta}{D_h} \right)^{0.4} R_e \Delta ; R_e \Delta \leq 275$$

$$\lambda_h = 0.214 \left( \frac{\Delta}{D_h} \right)^{0.4} R_e \Delta ; R_e \Delta > 275$$

- โดย  $R_e \Delta$  เป็น ค่า Reynolds Number ของ รังผึ้งที่ขึ้นอยู่กับผิว  
 $D_h$  เป็นค่า Hydraulic Diameter ของแต่ละเซลล์ของรังผึ้ง  
 $L_h$  เป็นค่าความหนาของรังผึ้ง  
 $\beta_h$  เป็นค่า Honeycomb Porosity



รูปที่ 3.5 ลักษณะของรังผึ้ง (Honeycomb) แบบต่างๆ

### 3.3.2 ส่วนที่อากาศแพร่เข้า ( Effuser or Contraction Cone )

ส่วนแรกของอุโมงค์ลมคือ ส่วนของ Contraction Cone ซึ่งมีหน้าที่การทำงานคล้ายกับหัวฉีด อากาศจะไหลเข้าอุโมงค์ลมทางส่วนนี้ก่อนเข้าภายในห้องทดสอบ (Test Section) โดยลมที่เข้ามาจะมีปริมาตรที่ใหญ่แต่ก็จะถูกลดปริมาตรลงเรื่อยๆ และลมที่ไหลเข้ามาก็จะถูกทำให้มีความราบเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น ดังนั้นจากการพิจารณาสมการในหนึ่งมิติเราจะได้ว่า

$$C_{pls} = \frac{(p - p_{ts})}{(1/2)\rho V_{ts}^2} \quad (3.2)$$

$$C_{pts} = 1 - \left[ \frac{A_{ts}}{A(x)} \right]^2 \quad (3.3)$$

โดยที่  $A_{ts}$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของส่วนทดสอบ  
 $A(x)$  เป็นพื้นที่หน้าตัดใหญ่ของ Contraction  
 $V_{ts}$  เป็นความเร็วของลมที่ไหลในห้องทดสอบ

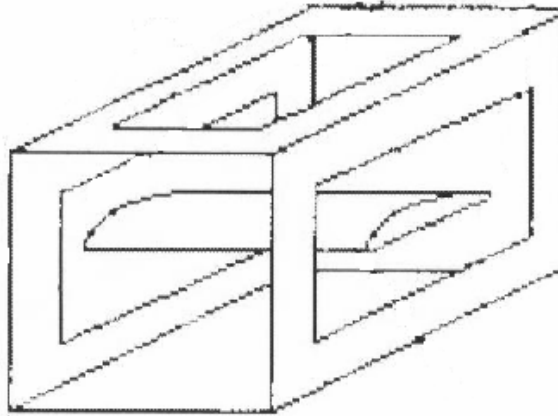
ในการออกแบบนั้นขนาดหน้าตัดใหญ่ของส่วนที่อากาศแพร่เข้านั้นนิยมออกแบบตามคุณลักษณะของขนาดหน้าตัดของห้องทดสอบ (Test Section) โดยอัตราส่วนของหน้าตัดใหญ่ของส่วนอากาศแพร่เข้า ( Effuser or Contraction cone ) ต่อขนาดหน้าตัดของห้องทดสอบ (Test Section) ส่วนมากนิยมใช้ที่ 10:1 หรืออยู่ระหว่าง 8-12:1 แล้วแต่การออกแบบนั้นๆ และถ้าหากเราใช้ที่ 10:1 สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า [3]

$$\frac{\text{พื้นที่หน้าตัดใหญ่ของส่วนอากาศแพร่เข้า}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของห้องทดสอบ}} = \frac{10}{1}$$

### 3.3.3 ห้องทดสอบ (Test Section)

สิ่งแรกที่เป็นตัวกำหนดในการใช้งานอุโมงค์ลมนั้น เราต้องรู้มิติต่าง ๆ ของแบบจำลองหรือสิ่งที่เรานำมาทดสอบ รวมถึงค่า Reynolds Number ที่เราต้องการใช้ในการทดสอบด้วย แต่วก่อนอื่นใดในการที่จะออกแบบอุโมงค์ลมเราจะต้องทราบว่า เราต้องการขนาดของห้องทดสอบ (Test Section) และสามารถสร้างความเร็วลม (Velocity) ภายในห้องทดสอบได้เท่าใด





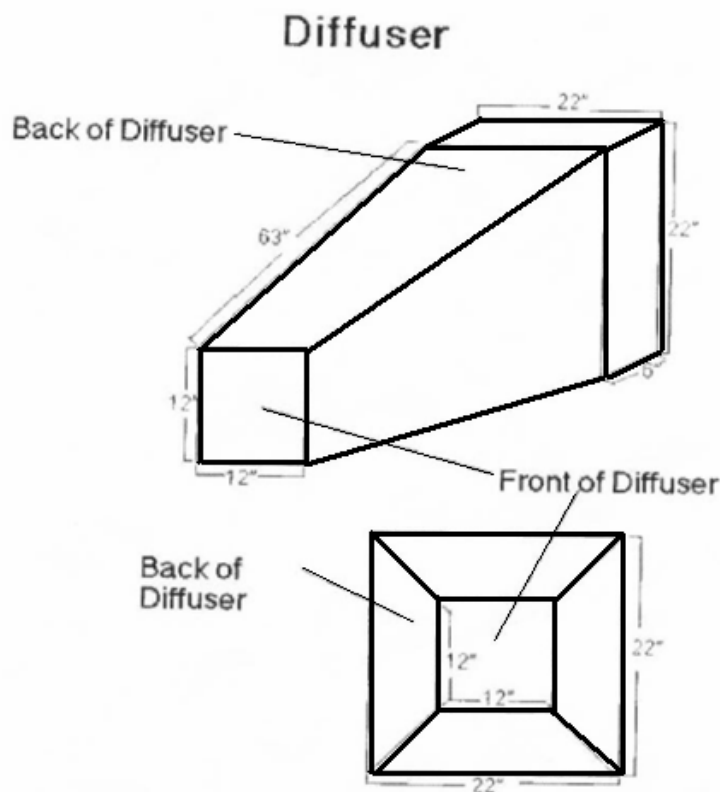
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของห้องทดสอบ (Test Section)

โดยขนาดห้องทดสอบ (Test Section) นั้นจะต้องมีความเหมาะสมกับความเร็วลมที่เราต้องการ เนื่องจากถ้าหากขนาดของห้องทดสอบ (Test section) นั้นมีขนาดใหญ่เกินไปแล้ว ก็จะส่งผลถึงความต้องการในการใช้พลังงานของชุดตัวขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นตามขนาดของห้องทดสอบ (Test Section) ที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าขนาดของห้องทดสอบ (Test Section) มีความสำคัญที่เราจะต้องออกแบบให้มีความเหมาะสมที่สุดในการออกแบบอุโมงค์ลม

ขนาดของห้องทดสอบที่ใหญ่ขึ้นจะสามารถช่วยในการทดสอบแบบจำลองหรือชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดใหญ่ได้ และส่วนใหญ่มักจะสามารถช่วยในเรื่องการพิจารณาของมุมมองหรือภาพของการเคลื่อนที่ของลมได้เป็นอย่างดี และในอีกทางหนึ่งคือ ขนาดของห้องทดสอบที่มีขนาดเล็ก เรื่องการพิจารณามุมมองหรือภาพต่างๆ ของการเคลื่อนที่ของลมก็จะถูกตัดออกไป แต่จะสามารถลดค่าความปลอดภัยในเรื่องอุปกรณ์การสร้างได้ เช่น พวกกระฉก เป็นต้น

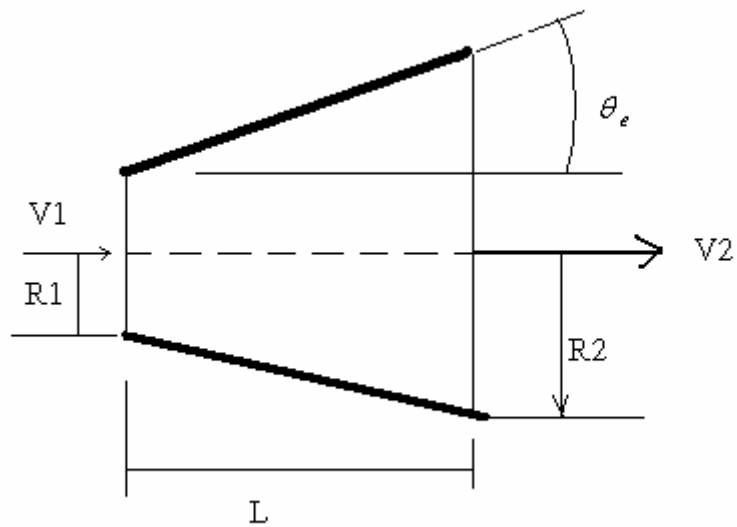
### 3.3.4 ส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser)

ส่วนของอากาศแพร่ออก (Diffuser) นี้ เป็นส่วนที่รับของไหลต่อจากส่วนของห้องทดสอบ และจะมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความยาวของส่วน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างของส่วนอากาศแพร่ออก(Diffuser)

ส่วนของอากาศแพร่ออก (Diffuser) นี้จะทำหน้าที่ในการลดความเร็วของลมหรือของไหลที่จะไหลออกจากตัวอุโมงค์ลม เนื่องจากลมที่ไหลออกถ้าหากไม่ได้ผ่านส่วนอากาศแพร่ออกนี้แล้วจะทำให้ลมที่ไหลออกมีความเร็วที่สูง ก่อให้เกิดเสียงดัง และส่วนที่อากาศแพร่ออกนี้ยังเป็นตัวช่วยในการลดการใช้พลังงานในชุดของตัวขับลมอีกด้วย โดยเป็นการเพิ่มความเร็วลมในส่วนของห้องทดสอบลมไปในตัว และขนาดหน้าตัดที่นิยมใช้กันของส่วนนี้ก็สามารถคำนวณได้จากสมการต่างๆ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันกับขนาดอื่นๆของห้องทดสอบด้วย



รูปที่ 3.8 ค่าต่าง ๆ ของส่วนที่แพร่ออกที่นำไปประกอบการคำนวณ

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R - 1}}{L/D_1}\right) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$R_1$  คือ รัศมีหน้าตัดตรงทางเข้า หรือ รัศมีหน้าตัดของห้องทดสอบ (Test Section)

$R_2$  คือ รัศมีหน้าตัดตรงทางออกของส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser)

$L$  คือ ความยาวของส่วนอากาศแพร่ออก

$D_1$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้า

หรือถ้าพิจารณาที่อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดระหว่างของส่วนที่แพร่ออกต่อส่วนของห้องทดสอบ จะนิยมใช้ที่ประมาณ 5:1 หรือ 6:1 และจะได้ว่า

$$A_R = A_1/A_2 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $A_R$  คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด

$A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดของส่วนแพร่ออก

$A_2$  คือ พื้นที่หน้าตัดของส่วนห้องทดสอบ

### สัมประสิทธิ์ความสูญเสียของส่วนแพร่ออก

ในส่วนของการแพร่ออกนั้นจะมีการสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นในส่วนของความเสียดทานที่เกิดตรงผนัง และจากการขยายพื้นที่หน้าตัด เราสมมติให้การไหลเป็นแบบหนึ่งมิติ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิว และความหนาแน่นเป็นค่าคงที่ ดังนั้นเราจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผนัง( $K_p$ ) ได้โดยจากสมการ

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R^2}\right) \frac{f}{8 \sin \theta} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $f$  คือ ค่า ตัวประกอบความเสียดทาน

$A_R$  และ  $\theta_e$  สามารถหาได้จากค่าสมการ (3.4) และสมการ (3.5)

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการขยายหน้าตัด ( $K_{ex}$ ) สามารถหาได้จากสมการ

$$K_{ex} = K_c(\theta) \left(\frac{A_R - 1}{A_R}\right)^2 \quad (3.7)$$

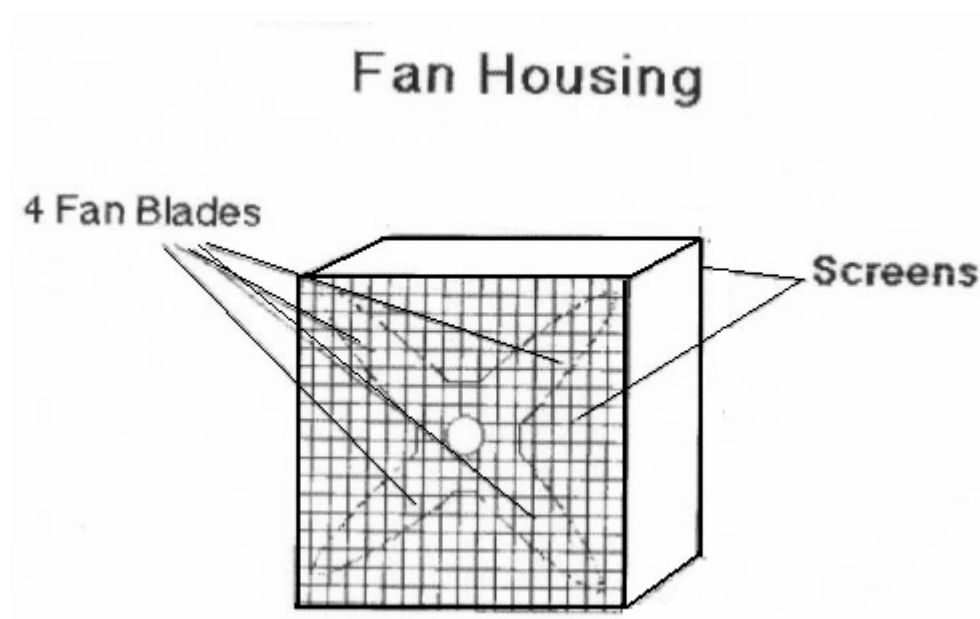
เมื่อ  $K_c(\theta)$  สามารถหาได้จากข้อมูลดังนี้ [3]

$$\begin{aligned} K_{e(\text{circle})} &= 0.1033 - 0.02389 \theta \quad \text{เมื่อ } 0 < \theta < 1.5^\circ \\ &= 0.1709 - 0.1170 \theta^2 + 0.001078 \theta^3 - 0.0009076 \theta^4 - 0.00001331 \theta^5 \\ &\quad + 0.00001345 \theta^6 \quad \text{เมื่อ } 1.5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ &= -0.09661 + 0.04672 \theta \quad \text{เมื่อ } 5^\circ < \theta \\ K_{e(\text{square})} &= 0.09623 - 0.004152 \theta \quad \text{เมื่อ } 0 < \theta < 1.5^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 0.1222 - 0.04590 \theta + 0.02203 \theta^2 + 0.003269 \theta^3 - 0.0006145 \theta^4 \\
&\quad - 0.00002800 \theta^5 + 0.02203 \theta^6 \text{ เมื่อ } 1.5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\
&= -0.01322 + 0.05866 \theta \text{ เมื่อ } 5^\circ < \theta
\end{aligned}$$

### 3.3.5 ส่วนของตัวขับ (Drive Section)

ปกติแล้วตัวส่วนของตัวขับนี้ (Drive Section) สามารถที่จะอยู่เป็นส่วนเดียวกับส่วนของการแพร่ออกได้ โดยจะติดตั้งไว้ตรงปลายของส่วนแพร่ออก หรือไม่ก็สร้างไว้แยกเป็นส่วนหนึ่งอีกต่างหาก และพื้นที่หน้าตัดจะมีขนาดพอดีกับพื้นที่หน้าตัดของส่วนที่แพร่ออก และสามารถใส่ชุดตัวขับได้เป็นอย่างดี ได้ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการสร้างส่วนของตัวขับ (Drive Section)

ดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในบทที่ 3 นี้เป็นส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการใช้ทำการออกแบบของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ ซึ่งสามารถนำเอาหลักการต่าง ๆ นี้ไปประกอบกับการออกแบบหลักๆ ของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำได้ แต่หากทำการปรับปรุงได้ตามความเหมาะสมที่นอกเหนือจากหลักการต่างๆ ได้ตามความต้องการ