บทที่ 3
อุโมงค์ลม (Wind Tunnel)

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับตัวของอุโมงค์ลม ชนิด รูปแบบ รวมถึงส่วนประกอบและลักษณะพื้นฐานต่าง 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 เลขมัค(Mach Number = 5) ที่มีค่าเท่ากับ 5 ซึ่งจะทำได้โดยการปรับรูปแบบเพิ่มหรือลดขนาดของตัวหัวปล่อยลม (Nozzles.)

2.3) Hypersonic Wind Tunnels.: อุโมงค์ลมประเภทนี้จะทำความเร็วลมที่เลขมัคระหว่าง 5-15 โดยในระหว่างการขยายการไหลก็จะทำให้เกิดความร้อนที่เกิดขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องมีการป้องกันการหลอมละลายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ด้วย

2.4) Hot Shot Wind Tunnels: อุโมงค์ลมประเภทนี้จะสามารถทำความเร็วลมที่เลขมัคได้ 27 โดยจะต้องใช้การวิเคราะห์ ตัวแปรต่างๆ ค่อนข้างละเอียด และจะเกิดการส่งผ่านความร้อนที่สูงในระหว่างการทดสอบ [4]

นอกจากนี้แล้วอุโมงค์ลมทั้งสองประเภทข้างต้นยังสามารถแบ่งได้เป็นอีก ๒ แบบ คือ

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

รูปที่3.1(ก) ลักษณะของอุโมงค์ลม

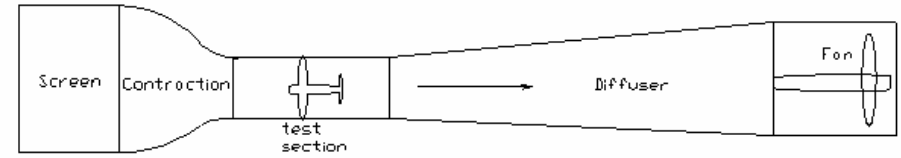
ข้อดี 1. งบประมาณในการจัดสร้างน้อยกว่าอุโมงค์ลมแบบปิด

2. ถ้าหากมีการทดสอบโดยใช้แบบควัน (Smoke Test) ก็สามารถทำได้เลยโดยไม่มีเตรียมการเรื่องของอากาศ

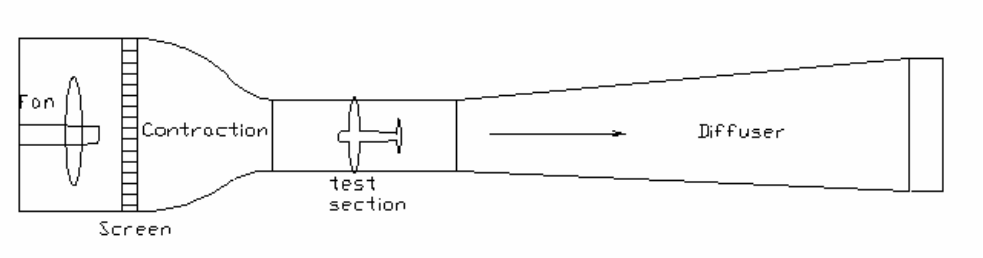
ข้อเสีย 1. ในกรณีห้องสถานที่ตั้งอุโมงค์ลม จำเป็นต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับตัวของอุโมงค์ลมและมีฉากกั้นสภาวะของลมตามธรรมชาติ เพื่อจะได้ประสิทธิภาพในการทดสอบ

2. ขนาด และความเร็วภายในอุโมงค์ลม จะต้องใช้พลังงานในการเดินเครื่องมากกว่าอุโมงค์ลมแบบปิด

3. เกิดเสียงดังกว่าอุโมงค์ลมแบบปิด



รูปที่3.1(ข) อุโมงค์ลมแบบเปิด ติดตั้งตัวขับใบพัดส่วนหลัง (แบบดูดลม)



รูปที่3.1(ค) อุโมงค์ลมแบบเปิด ติดตั้งตัวขับใบพัดส่วนหน้า (แบบเป่าลม)

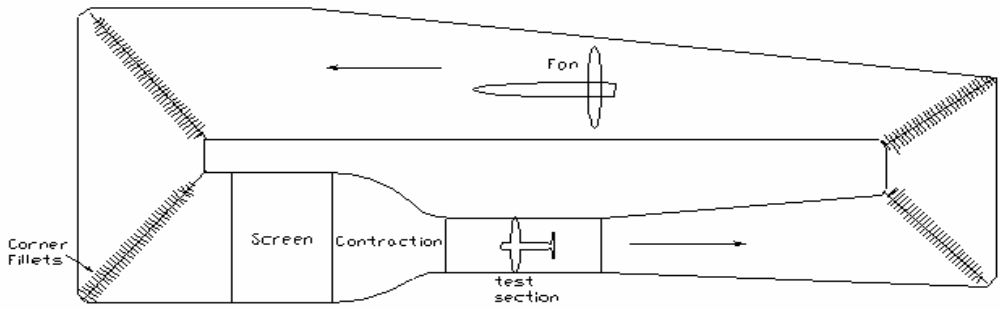
2.) *อุโมงค์ลมแบบปิด* อุโมงค์แบบนี้จะให้อากาศไหลหมุนเวียนอยู่ภายในตลอดเวลาซึ่งจะมีทั้งแบบขนาดระบบเล็ก จนถึงขนาดที่มีระบบใหญ่

ข้อดี

1. ใช้พลังงานในการสร้างความเร็วลมให้กับห้องทดสอบน้อย
2. เกิดเสียงที่ไม่ดังทำให้ไม่เกิดมลภาวะทางเสียง

ข้อเสีย

1. งบประมาณในการจัดสร้าง ค่อนข้างสูง
2. ถ้าต้องการอุโมงค์ลมที่ดีหรือมีประสิทธิภาพการทำงานสูงจะต้องมีขบวนการแลกเปลี่ยนอากาศและมีการทำความเย็นให้กับเครื่องด้วย [3]



รูปที่3. 2 (ก) อุโมงค์ลมแบบปิด

รูปที่ 3.2 (ข) อุโมงค์ลมแบบปิด

3.2 ขนาดของตัวอุโมงค์ลม

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

รูปที่ 3.3 อุโมงค์ลมขนาดกลางและขนาดเล็ก [5]

แต่อย่างไรก็ตาม ขนาดของตัวอุโมงค์ลมที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดของห้องทดสอบ (Test Section Size) ที่เท่ากัน ก็มิใช่ว่าจะมีขนาดโดยรวมทั้งหมดของตัวอุโมงค์ลมที่เท่ากันเสมอไป โดยขนาดโดยรวมก็จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบอื่นๆ อีกเช่นกัน แล้วแต่กรณีของการออกแบบ เช่น ความยาวของห้องทดสอบและส่วนอื่นๆ ขนาดของพื้นที่หน้าตัดส่วนแพร่เข้า (Contraction) ต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดห้องทดสอบ (Test Section) หรือขนาดของพื้นที่หน้าตัดส่วนแพร่ออก (Diffuser) ต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดห้องทดสอบ (Test Section) เป็นต้น

เรื่องของลักษณะของตัวอุโมงค์ลมก็ไม่ได้ถูกกำหนดไว้เป็นลักษณะรูปร่างที่แน่นอนตายตัว แต่จะขึ้นอยู่กับการออกแบบนั้น ๆ เช่น ลักษณะของส่วนที่อากาศแพร่ออก (Diffuser) ที่จะมีรูปร่างต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นทรงกระบอกกลม หรือแม้แต่รูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมยาว 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 เกิดการสูญเสียกำลังในส่วนของตัวขับ และค่าที่ว่านี้สามารถหาได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ซึ่งหาได้จากสมการ

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

เมื่อ

$$\lambda_h = 0.375\left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0.4} \mathrm{R}^2 e\Delta \;;\quad \mathrm{R}e\Delta \leq 275$$

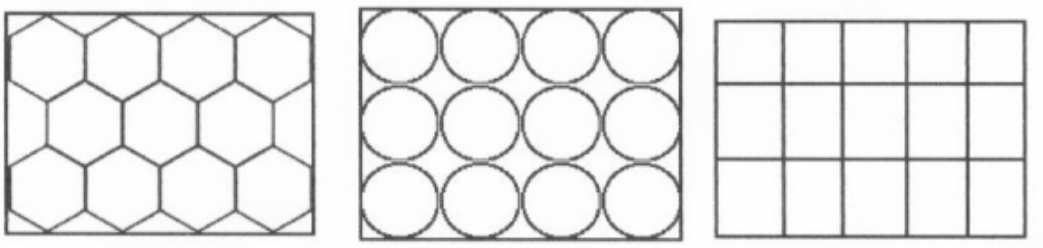
$$\lambda_h = 0.214\left(\frac{\Delta}{D_h}\right)^{0.4} \mathrm{R}^2 e\Delta \;;\quad \mathrm{R}e\Delta > 275$$

โดย $R_e\Delta$ เป็น ค่า Reynolds Number ของ รังผึ้งที่ขึ้นอยู่กับผิว

D_h เป็นค่า Hydraulic Diameter ของแต่ละเซลล์ของรังผึ้ง

L_h เป็นค่าความหนาของรังผึ้ง

β_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) โดยลมที่เข้ามามีปริมาตรที่ใหญ่แต่ก็จะถูกลดปริมาตรลงเรื่อยๆ และลมที่ไหลเข้ามาก็จะถูกทำให้มีความราบเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น ดังนั้นจากการพิจารณาสมการในหนึ่งมิติเราจะได้ว่า

$$\mathrm{C}_{\mathrm{pts}} = \frac{(p - p_{ts})}{(1/2)\rho V_{ts}^{\ 2}} \tag{3.2}$$

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

โดยที่ A_{ts} เป็นพื้นที่หน้าตัดของส่วนทดสอบ

$A(x)$ เป็นพื้นที่หน้าตัดใหญ่ของ Contraction

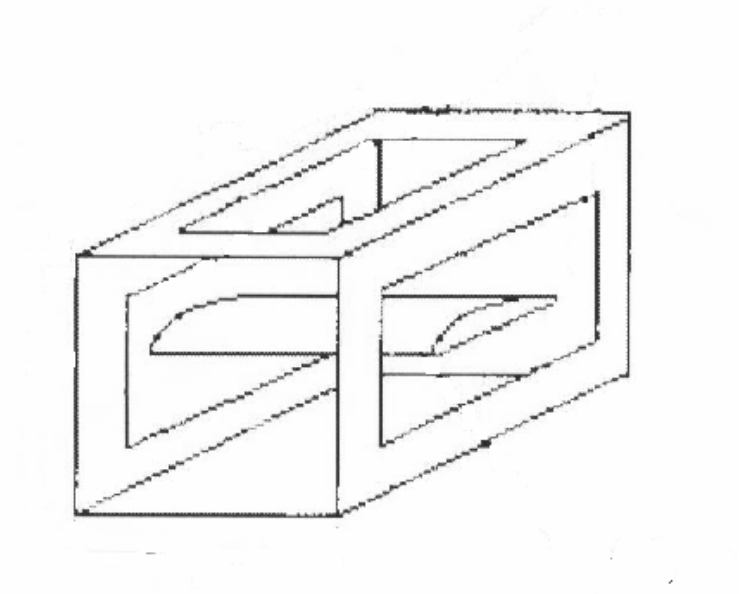
V_{ts} เป็นความเร็วของลมที่ไหลในห้องทดสอบ

ในการออกแบบนั้นขนาดหน้าตัดใหญ่ของส่วนที่อากาศแพร่เข้านั้นนิยมออกแบบตามคุณลักษณะของขนาดหน้าตัดของห้องทดสอบ(Test Section) โดยอัตราส่วนของหน้าตัดใหญ่ของส่วนอากาศแพร่เข้ า(Effuser or Contraction cone) ต่อ ขนาดหน้าตัดของห้องทอสอบ(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 แต่ว่าก่อนอื่นใดในการที่จะออกแบบอุโมงค์ลมเราจะต้องทราบว่า เราต้องการขนาดของห้องทดสอบ (Test Section) และสามารถสร้างความเร็วลม (Velocity) ภายในห้องทดสอบได้เท่าใด



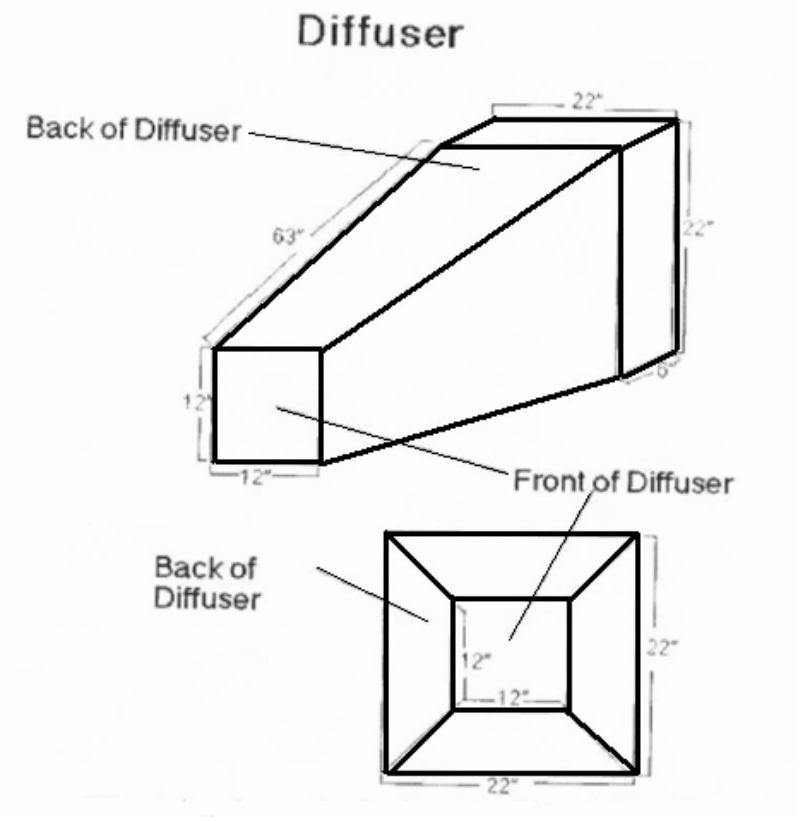
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของห้องทดสอบ (Test Section)

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

ขนาดของห้องทดสอบที่ใหญ่นั้นจะสามารถช่วยในการทดสอบแบบจำลองหรือชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดใหญ่ได้ และส่วนใหญ่จะสามารถช่วยในเรื่องการพิจารณาของมุมมองหรือภาพของการเคลื่อนที่ของลมได้เป็นอย่างดี และในอีกทางหนึ่งคือ ขนาดของห้องทดสอบที่มีขนาดเล็กเรื่องการพิจารณามุมมองหรือภาพต่างๆ ของการเคลื่อนที่ของลมก็จะถูกตัดออกไป แต่จะสามารถลดค่าความปลอดภัยในเรื่องอุปกรณ์การสร้างได้ เช่น พวกกระจก เป็นต้น

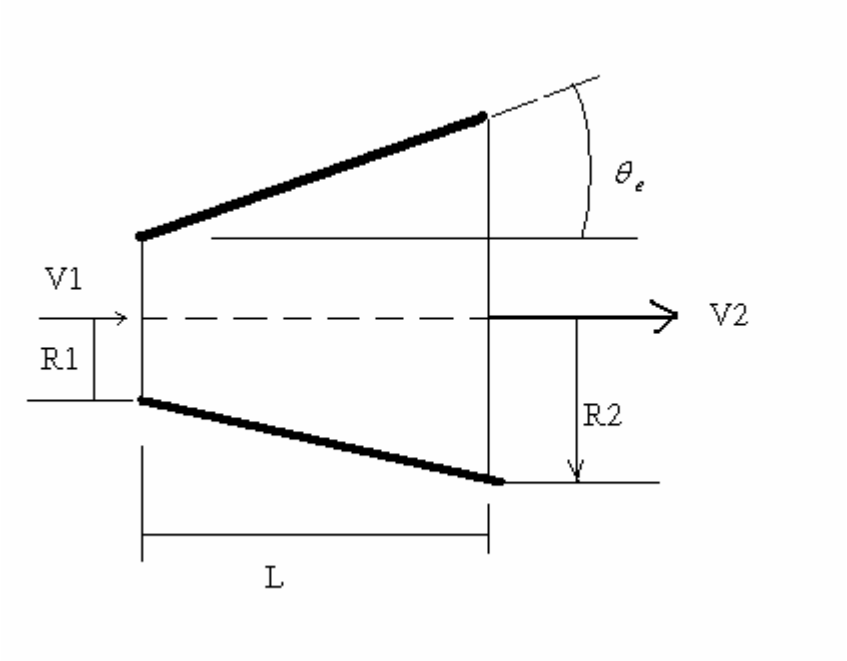
3.3.4 ส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser)

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

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

เมื่อ

R_1 คือ รัศมีหน้าตัดตรงทางเข้า หรือ รัศมีหน้าตัดของห้องทดสอบ (Test Section)

R_2 คือ รัศมีหน้าตัดตรงทางออกของส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser)

L คือ ความยาวของส่วนอากาศแพร่ออก

D_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้า

หรือถ้าพิจารณาที่อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดระหว่างของส่วนที่แพร่ออกต่อส่วนของห้องทดสอบ จะนิยมใช้ที่ประมาณ 5:1หรือ 6:1 และจะได้ว่า

$$A_R = A_1/A_2 \tag{3.5}$$

เมื่อ A_R คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของส่วนแพร่ออก

A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของส่วนห้องทดสอบ

สัมประสิทธิ์ความสูญเสียของส่วนแพร่ออก

ในส่วนของการแพร่ออกนั้นจะมีการสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นในส่วนของความเสียดทานที่เกิดตรงผนัง และจากการขยายพื้นที่หน้าตัด เราสมมติที่การไหลเป็นแบบหนึ่งมิติ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิว และความหนาแน่นเป็นค่าคงที่ ดังนั้นเราจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผนัง(K_f) ได้โดยจากสมการ

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

เมื่อ f คือ ค่า ตัวประกอบความเสียดทาน

A_R และ θ_e สามารถหาได้จากค่าสมการ (3.4) และสมการ (3.5)

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการขยายหน้าตัด(K_{ex}) สามารถหาได้จากสมการ

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

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

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

$$K_{e(square)} = 0.09623 - 0.004152\theta \quad \text{เมื่อ } 0 < \theta < 1.5^{\circ}$$

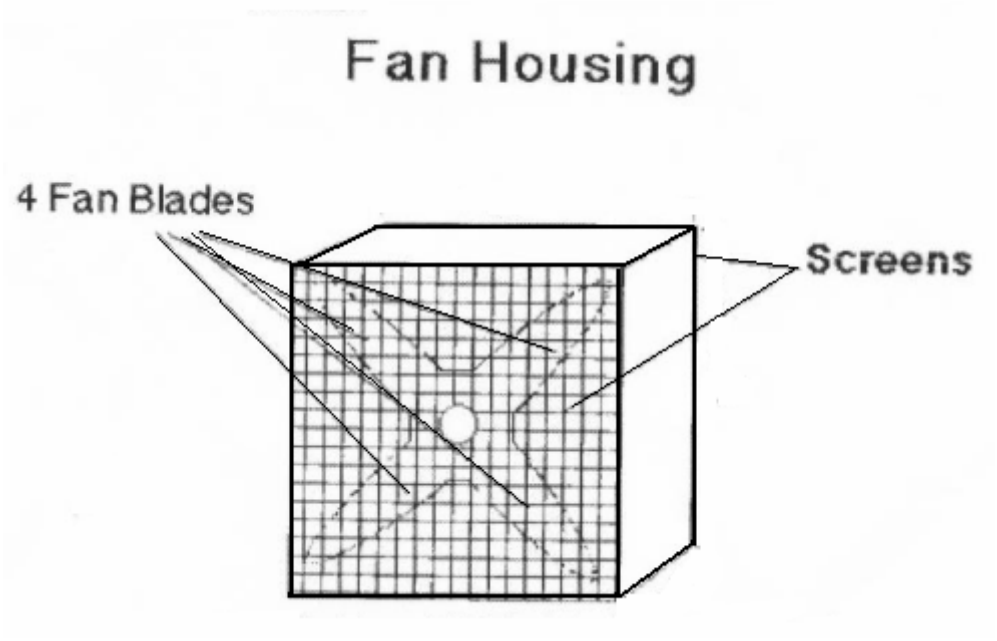
$$= 0.1222 - 0.04590\ \theta + 0.02203\theta^2 + 0.003269\theta^3 - 0.0006145\theta^4$$

$$- 0.00002800\theta^5 + 0.02203\theta^6 \quad \text{เมื่อ } 1.5^{\circ} \le \theta \le 5^{\circ}$$

$$= - 0.01322 + 0.05866\theta \quad \text{เมื่อ } 5^{\circ} < \theta$$

3.3.5 ส่วนของตัวขับ (Drive Section)

ปกติแล้วตัวส่วนของตัวขับนี้ (Drive Section) สามารถที่จะอยู่เป็นส่วนเดียวกับส่วนของการแพร่ออกได้ โดยจะติดตั้งไว้ตรงปลายของส่วนแพร่ออก หรือไม่ก็สร้างไว้แยกเป็นส่วนหนึ่งอีกต่างหาก และพื้นที่หน้าตัดจะมีขนาดพอดีกับพื้นที่หน้าตัดของส่วนที่แพร่ออก และสามารถใส่ชุดตัวขับได้เป็นอย่างดี ได้ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการสร้างส่วนของตัวขับ (Drive Section)

ดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในบทที่ 3 นี้เป็นส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการใช้ทำการออกแบบของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ ซึ่งสามารถนำเอาหลักการต่างๆนี้ไปประกอบกับการออกแบบหลักๆของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำได้ แต่หากทำการปรับปรุงได้ตามความเหมาะสมที่นอกเหนือจากหลักการต่างๆ ได้ตามความต้องการ