



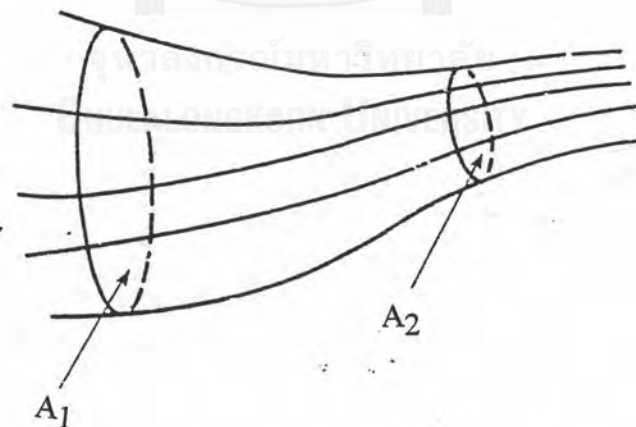
บทที่ 2

ทฤษฎีและเทคนิคการทดสอบ

1. หลักการเบื้องต้นของการไหลของของไหล (Fluid Flow)

1.1 การไหลแบบสตรีมไลน์ (Streamline Flow) และการปิดกั้น

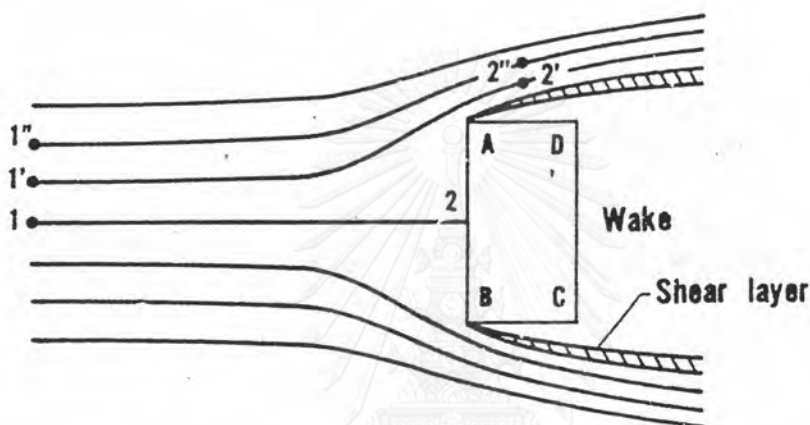
หลักการพื้นฐาน คือ ในช่วงเวลาหนึ่งมวลของของไหลที่ไหลเข้าปริมาตรวัดหนึ่งๆ จะเท่ากับมวลของของไหลที่ไหลออกจากปริมาตรนั้น และเนื่องจากหลักการพื้นฐานนี้ทำให้ความเร็วของการไหล เมื่อไหลผ่านพื้นที่ A_2 สูงกว่า เมื่อไหลผ่านพื้นที่ A_1 โดยที่ A_1 มากกว่า A_2 ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แนวการไหลรอบ ๆ พื้นที่ A_1 และ A_2

ดังนั้นเมื่อประยุกต์หลักการเบื้องต้นของการไหลเข้ากับการไหลของลมในอุโมงค์ลม เมื่อลมไหลผ่านบริเวณที่มีหุ่นจำลองวางอยู่ พื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่านได้ในบริเวณนั้นจึงลดลง ทำให้การไหลของกระแสลมเปลี่ยนแปลงไป โดยความเร็วจะเพิ่มขึ้นจากที่ควรจะเป็นเมื่อเทียบกับสภาพจริง ทำให้ความดัน หน่วยแรงดูดหรือแรงที่กระทำกับหุ่นจำลองมีขนาดเพิ่มขึ้น

1.2 พฤติกรรมการเกิดความดันและหน่วยแรงดูด



รูปที่ 2.2 แนวการไหลของลมรอบวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 2.2 ดูเส้นแนวการไหล (Streamline) 1-2 จุดที่ 1 เป็นจุดที่อยู่ด้านต้นลมมวลของอากาศเมื่อไหลเข้าใกล้จุดที่ 2 ความเร็วจะลดลง เมื่อถึงจุดที่ 2 ความเร็วก็จะเป็นศูนย์ ค่าความดันที่จุดที่ 2 นี้ สามารถคำนวณได้จากสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) โดยที่ความเร็วของการไหลที่จุด 1, u_1 จะเท่ากับความเร็วของการไหลที่ไม่โดนรบกวน แทนด้วย u_0 และความดันที่จุด 1, P_1 มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ แทนด้วย P_0 ความดันที่ด้านรับลม AB จะสูงกว่า P_0 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$0.5 \rho u_2^2 + P_2 = 0.5 \rho u_1^2 + P_1$$

$$P_2 = 0.5 \rho u_0^2 + P_0 \dots\dots\dots(2.1)$$

จากรูปสมการที่ 2.1 P_2 จะมากกว่า P_0 จึงเกิดสภาพความดัน

สำหรับเส้นการไหล 1'-2' เราสามารถเขียนสมการเบอร์นูลี ได้ดังนี้

$$0.5 \rho u_2'^2 + P_2' = 0.5 \rho u_1'^2 + P_1'$$

$$0.5 \rho u_2'^2 + P_2' = 0.5 \rho u_0^2 + P_0$$

$$P_2' - P_0 = 0.5 \rho u_0^2 - 0.5 \rho u_2'^2 \dots\dots\dots(2.2)$$

เนื่องจาก $u_2' > u_0$

ดังนั้น

$$P_2' - P_0 < 0$$

$$P_2' < P_0$$

ดังนั้น ความดันที่จุด 2', P_2' จึงน้อยกว่าความดันบรรยากาศ P_0 ในสภาพเช่นนี้เรียกว่าเกิดสภาพความดันออกจากพื้นผิวของวัตถุ ในที่นี้เรียกว่า หน่วยแรงดูด (Suction) เช่น ด้าน AD, BC และ CD ดังรูปที่ 2.2

โดยที่

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของอากาศ}$$

$$P_1 = \text{ความดันที่จุด 1}$$

$$P_2 = \text{ความดันที่จุด 2}$$

$$P_1' = \text{ความดันที่จุด 1'}$$

$$P_2' = \text{ความดันที่จุด 2'}$$

$$u_1 = \text{ความเร็วของการไหลที่จุด 1}$$

$$u_2 = \text{ความเร็วของการไหลที่จุด 2 เท่ากับศูนย์}$$

$$u_1' = \text{ความเร็วของการไหลที่จุด 1'}$$

$$u_2' = \text{ความเร็วของการไหลที่จุด 2'}$$

2. ตัวประกอบทางด้านรูปทรง (Shape Factor)

แรงลมนั้นจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเร็วลมกำลังสอง

$$F = 0.5 \rho C V^2 \dots \dots \dots (2.3)$$

โดยที่

$$F = \text{แรงลม}$$

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของอากาศ}$$

$$C = \text{ค่าตัวประกอบทางด้านรูปทรง (Shape Factor)}$$

$$V = \text{ความเร็วลม}$$

ค่า C จะเป็นผลสืบเนื่องมาจากลักษณะรูปทรงของวัตถุนั้นๆ ถ้าหากว่าวัตถุมีรูปทรงที่เหมือนกัน จะมีค่า C ที่เหมือนกัน ยกเว้นในวัตถุรูปทรงบางจำพวก เช่น แท่งทรงกระบอกกลม ค่า C จะขึ้นกับค่าเลขเรโนลด์ (Renold Number, Re) ด้วย โดยปกติแล้วค่า C จะหาได้จากการทดสอบ

ค่าตัวประกอบทางด้านรูปทรง แบ่งได้ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์ความดัน (Pressure Coefficient, Cp)
2. สัมประสิทธิ์แรง (Force Coefficient, Cf)
3. สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (Moment Coefficient, Cm)

ค่าตัวประกอบทางด้านรูปทรง เป็นค่าที่ไร้หน่วยโดยเป็นอัตราส่วนของความดัน, แรงลม หรือโมเมนต์ของอาคารต่อความดันพลวัตของลมที่ระดับอ้างอิง ความดันบนผิวของอาคารจะมีความสัมพันธ์กับ [4] รูปทรงอาคาร, ทิศทางลมที่พัดเข้าหาอาคารและการกระจายความเร็วลมตามความสูงจาก (Wind Profile)

ค่าตัวประกอบทางด้านรูปทรง นิยามไว้ดังนี้

$$P - P_0 = q \cdot C_p$$

$$F = q \cdot C_f \cdot A$$

$$M = q \cdot C_m \cdot A \cdot D$$

โดยที่

A = พื้นที่รับแรงลมเมื่อทิศทางที่ลมพัดเข้าเป็นศูนย์กลางและจะยังคงใช้ค่านี้เมื่อทิศทางที่ลมเข้าปะทะเปลี่ยนไป [5]

D = ความกว้างหรือความยาวอ้างอิงของโครงสร้าง

F = แรง

M = โมเมนต์

P = ความดัน

P_0 = ความดันสถิตยที่ระดับอ้างอิง

q = ความดันพลวัตที่ระดับอ้างอิง

$$= 0.5 \rho V^2$$

ในเมื่อ

V = ความเร็วลมที่ระดับอ้างอิง

ดังนั้น

$$C_p = \frac{(P - P_0)}{q} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$C_f = \frac{F}{qA} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$C_m = \frac{M}{qAD} \dots\dots\dots(2.6)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. อัตราการย่อส่วน (Scaling)

3.1 อัตราการย่อส่วนทางด้านความยาว (Dimension Scaling), λ_L

$$\lambda_L = L_m / L_p \dots\dots\dots(2.7)$$

L_m = ความยาวใดๆ ของหุ่นจำลอง

L_p = ความยาวใดๆ ของอาคารจริง

3.2 อัตราการย่อส่วนทางด้านเวลา (Time Scaling), λ_T

$$\lambda_L = T_m / T_p \dots \dots \dots (2.8)$$

T_m = เวลาในโมเดลเทียบเท่าเวลาในสภาพจริง

T_p = เวลาในสภาพจริง

3.3 อัตราการย่อส่วนทางด้านความเร็ว (Velocity Scaling), λ_V

$$\lambda_V = \frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m}{T_m} \frac{L_p}{T_p} = \lambda_L / \lambda_T \dots \dots \dots (2.9)$$

V_m = ความเร็วลมในโมเดล

V_p = ความเร็วลมในสภาพจริง

4. ลักษณะสภาพลมในชั้นบรรยากาศ

ลมเป็นการไหลเวียนของอากาศเหนือผิวโลก ความขรุขระของผิวโลก (Roughness) ทำให้เกิดแรงเสียดทานซึ่งทำให้ความเร็วของลมลดลงเมื่ออยู่ใกล้ผิวโลก และทำให้ลมเกิดการไหลแบบกรวย (Turbulent Flow) ผลกระทบจากแรงเสียดทานของผิวโลกจะลดลงขณะที่ความสูงจากผิวโลกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความสูงระดับหนึ่ง ซึ่งผลกระทบจากความขรุขระของผิวโลกจะน้อยมากจนกระทั่งไม่ต้องนำมาพิจารณา ความสูงนี้เรียกว่า ความสูงเกรเดียนต์ (Gradient Height) ชั้นของอากาศที่อยู่ระหว่างผิวโลกและความสูงเกรเดียนต์เรียกว่า บาวดารีเลเยอร์ (Boundary Layer) ความหนาของชั้นอากาศบาวดารีเลเยอร์จะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศซึ่งจะมีค่าประมาณ 270 เมตร สำหรับสภาพภูมิประเทศที่เป็นที่โล่ง (Open Country) และประมาณ 500 เมตร สำหรับสภาพภูมิประเทศที่เป็นเมือง (Urban Area) [6] ความเร็วลมเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศ จะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อความสูงจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและทิศทางของความเร็วลมเฉลี่ยจะหมุนเบี่ยงเบนไปเล็กน้อยในทิศตามเข็มนาฬิกาสำหรับซีกโลกเหนือเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับทิศทางความเร็วลมเฉลี่ยที่ผิวโลก Davenport [7] และ Mcnamara [8] ได้กล่าวว่าอัตราส่วนของความเร็วลมที่ผิวดินกับที่ความสูงเกรเดียนต์ไม่ได้มีความสัมพันธ์กับเส้นละติจูด (Latitude) ความเร็วลมเฉลี่ยและ

ความสูงเกรเดียนต์ แต่จะมีความสัมพันธ์กับสภาพความขรุขระของภูมิประเทศด้านเหนือลม (Upstream) ของจุดที่กำลังพิจารณา

ในปี ค.ศ.1916 G. Hellman [1] ได้เสนอรูปแบบความสัมพันธ์ของความเร็วลมเฉลี่ยกับความสูงภายในชั้นบรรยากาศบาวดาร์เลเยอร์ ในรูปแบบจำลองกฎยกกำลัง (Power Law) ดังนี้

$$\frac{V_z}{V_g} = \left[\frac{Z}{Z_g} \right]^\alpha \quad (2.10)$$

โดยที่

- V_g = ความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์
- V_z = ความเร็วลมที่ความสูง Z
- Z = ความสูงใดๆที่ต้องการรู้ค่าความเร็วลม
- Z_g = ความสูงเกรเดียนต์
- α = ค่าตัวประกอบเพาเวอร์ (Power Factor)

ค่าของ Z_g และ α จะขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศ ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของ α และ Z_g ที่แบ่งโดยมาตรฐานเพื่อการออกแบบ ANSI [9] และ Davenport [11]

	พื้นที่ชายฝั่ง Coastal Area	ที่โล่ง Open Terrain	ชานเมือง Suburban Terrain	ใจกลางเมืองใหญ่ Center of Large Cities
--	--------------------------------	-------------------------	---------------------------------	--

ค่า α

A.G. Davenport		0.16	0.28	0.4
ANSI	1/10	1/7	1/4.5	1/3

ค่า Z_g (หน่วย เป็น เมตร)

A.G. Davenport		275	400	520
ANSI	215	275	370	460

การแบ่งลักษณะภูมิประเทศนั้น ในที่นี้จะแสดงถึงการแบ่งและการนิยาม โดย

1. มาตรฐานเพื่อการออกแบบ ANSI (American National Standard, A58.1, ค.ศ.1982) [9]
2. มาตรฐานเพื่อการออกแบบ CP3 (Code of Practice CP3) [10]
3. มาตรฐานเพื่อการออกแบบ NBC (National Building Code of Canada, ค.ศ.1990) [4]

4.1 ลักษณะภูมิประเทศที่แบ่งโดยมาตรฐานเพื่อการออกแบบ ANSI (American National Standard A58.1,ค.ศ.1982) [9] แบ่งได้ดังนี้

1. ใจกลางเมืองใหญ่ คือ ศูนย์กลางของเมือง มีอาคารที่สูงเกิน 21 เมตร (70 ฟุต) อย่างน้อย 50 % โดยพิจารณาลักษณะภูมิประเทศด้านเหนือลงเป็นระยะทางที่น้อยที่สุด 800 เมตร (0.5 ไมล์) หรือ 10 เท่า ของความสูงของโครงสร้างโดยใช้ค่าที่มากกว่า
2. ชานเมือง คือ พื้นที่รอบชานเมือง ,พื้นที่ป่าหรือสภาพภูมิประเทศที่มีสิ่งกีดขวาง อยู่ใกล้ชิดกัน โดยพิจารณาลักษณะภูมิประเทศด้านเหนือลงเป็นระยะทางที่น้อยที่สุด 460 เมตร (1500 ฟุต) หรือ 10 เท่าของความสูงของโครงสร้างโดยใช้ค่าที่มากกว่า
3. ที่โล่ง คือ สภาพภูมิประเทศที่สิ่งกีดขวางมีความสูงน้อยกว่า 9 เมตร (30 ฟุต) รวมทั้งพื้นที่ทุ่งราบ ทุ่งหญ้า
4. พื้นที่ชายฝั่ง คือ พื้นที่ชายฝั่งที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยที่พิจารณาลักษณะภูมิประเทศด้านที่เป็นพื้นดินเป็นระยะทางที่น้อยที่สุด 460 เมตร (1500 ฟุต) หรือ 10 เท่าของความสูงของโครงสร้าง โดยใช้ค่าที่มากกว่า

4.2 ลักษณะภูมิประเทศที่แบ่งโดยมาตรฐานเพื่อการออกแบบ CP3 (Code of Practice) [10] ลักษณะภูมิประเทศจะถูกเรียกว่าความขรุขระของพื้นผิว (Ground Roughness) แบ่งได้ดังนี้

1. Ground Roughness 1 พื้นที่ที่เป็นที่โล่ง บริเวณชายฝั่ง ทุ่งหญ้า

2. Ground Roughness 2 พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางอยู่เป็นหย่อม ๆ เช่น มีพุ่มไม้ หรือ อาคารอยู่บ้าง เช่น พื้นที่ฟาร์ม และพื้นที่ตามชนบท

3. Ground Roughness 3 พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่อยู่เป็นจำนวนมาก เช่น บริเวณเมือง ชานเมือง เขตพื้นที่รอบนอกของเมืองใหญ่ กำหนดโดยคร่าว ๆ ว่าระดับของหลังคาของสิ่งกีดขวางอยู่ที่ประมาณ 10 เมตร

4. Ground Roughness 4 พื้นที่ที่มีอาคารขนาดใหญ่อยู่เป็นจำนวนมาก ระดับของหลังคาของอาคารอยู่ที่ประมาณ 25 เมตร โดยที่อาคารเหล่านี้จะอยู่ชิดกันด้วย

4.3 ลักษณะภูมิประเทศที่แบ่งโดยมาตรฐานเพื่อการออกแบบ NBC (National Building Code of Canada, ค.ศ.1990) [4] แบ่งได้ดังนี้

1. Exposure A คือ พื้นที่ผิวน้ำ ชายฝั่ง พื้นที่ราบที่มีอาคาร ต้นไม้หรือสิ่งกีดขวางกระจาย

2. Exposure B คือ พื้นที่เขตชานเมือง เขตป่า หรือเขตใจกลางเมืองเล็กๆ

3. Exposure C คือ พื้นที่เขตใจกลางเมืองใหญ่มีอาคารสูงอยู่หนาแน่นต้องมี ปริมาณอาคารที่สูงเกิน 4 ชั้น อย่างน้อยร้อยละ 50

สำหรับ Exposure A หรือ B จะต้องพิจารณาสภาพภูมิประเทศทางด้านเหนือลมอย่างน้อย 1.5 กิโลเมตร

4.4 ความเร็วลมสำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานคร

D. Surry [2] ได้ทำการศึกษาข้อมูลลมในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและพื้นที่ใกล้เคียงพบว่า ลมส่วนใหญ่ที่พัดเข้าสู่กรุงเทพมหานครนั้น ส่วนใหญ่จะมาจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือและทิศ ตะวันออกเฉียงใต้ โดยที่มมีความเร็วดังในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ความสูง 10 เมตร ในภูมิประเทศที่โล่ง (Open Terrain) โดยวิธีของ Gumbel สำหรับในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร [2]

คาบเวลาย้อนกลับ (ปี)	ความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ยต่อชั่วโมง (เมตรต่อวินาที) ที่ความสูง 10 เมตร ในที่โล่ง
5	17.3
10	19.2
25	21.5
50	23.4
100	25.3
1000	31.4



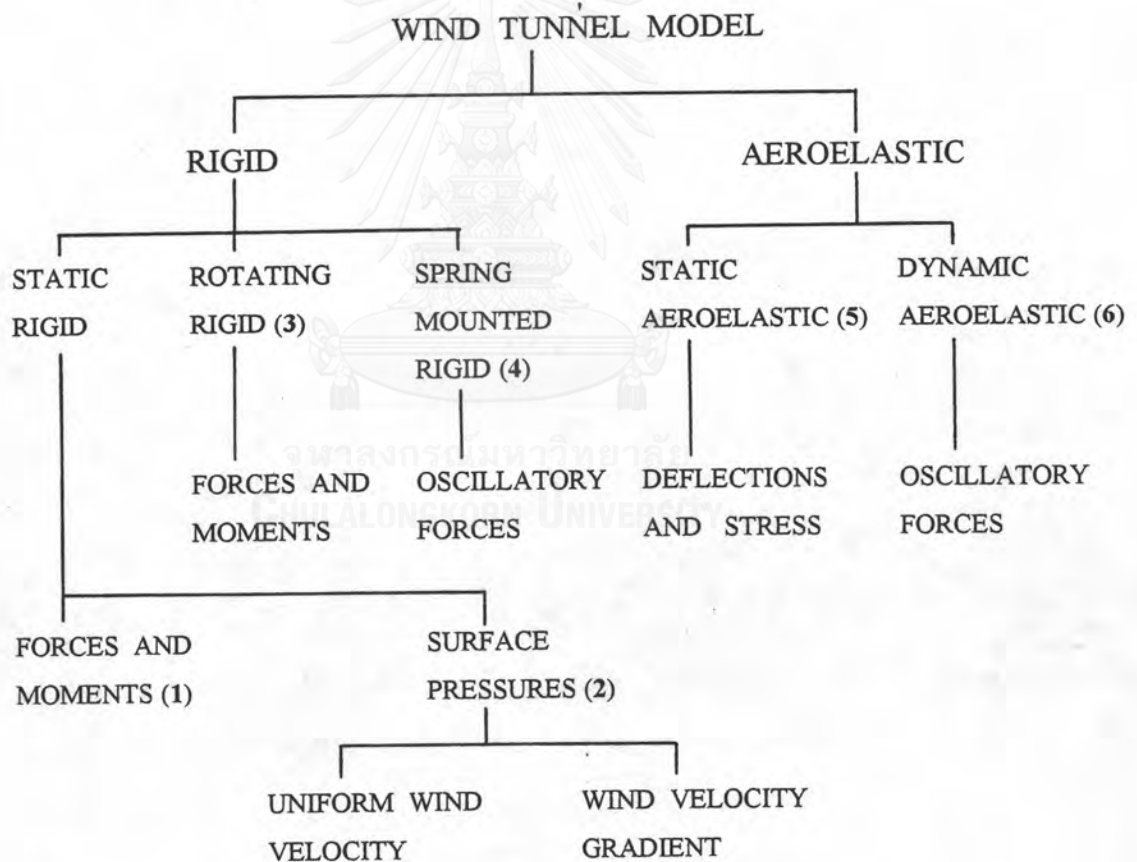
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ความสูง 10 เมตร ในสภาพภูมิประเทศแบบที่โล่ง (Open Terrain) และคาบเวลาย้อนกลับของกรุงเทพมหานคร [2]

ค่าความเร็วสูงสุดเฉลี่ยต่อชั่วโมง 40 เมตรต่อวินาที สำหรับคาบเวลาย้อนกลับ 50 ปี หมายถึง โอกาสที่ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยต่อชั่วโมงจะเท่ากับหรือมากกว่า 40 เมตรต่อวินาที มี 63 % ในช่วงระยะเวลา 50 ปี

5. หุ่นจำลอง (Model)

ขนาดของหุ่นจำลองที่ดีที่สุด คือ ขนาดที่เล็กเท่าที่จะเป็นไปได้ในการติดท่อวัดความดัน รายละเอียดเล็กๆ ต่างๆ ของโครงสร้างไม่เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับหุ่นจำลองรูปทรงบ้าน ทุ่ ยกเว้นตรงบริเวณที่มีสภาพเป็นมุม , เหลี่ยม , เป็นขอบ หุ่นจำลองที่ใช้เพื่อการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยทั่วไปนั้นแบ่งเป็น 6 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

รูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหุ่นจำลองแบบแข็ง (Rigid Model) และทำการวัดหาโมเมนต์หรือแรงเฉือนโดยแปลงจากค่าความดันที่วัดได้



รูปที่ 2.4 ผังการแบ่งชนิดของหุ่นจำลอง [5]

ค่าที่วัดได้จากการทดสอบโดยใช้หุ่นจำลองแข็ง คือ ค่าความดันเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของความดัน จะไม่สามารถวัดหาพฤติกรรมการตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic Response Characteristics) ของโครงสร้างได้

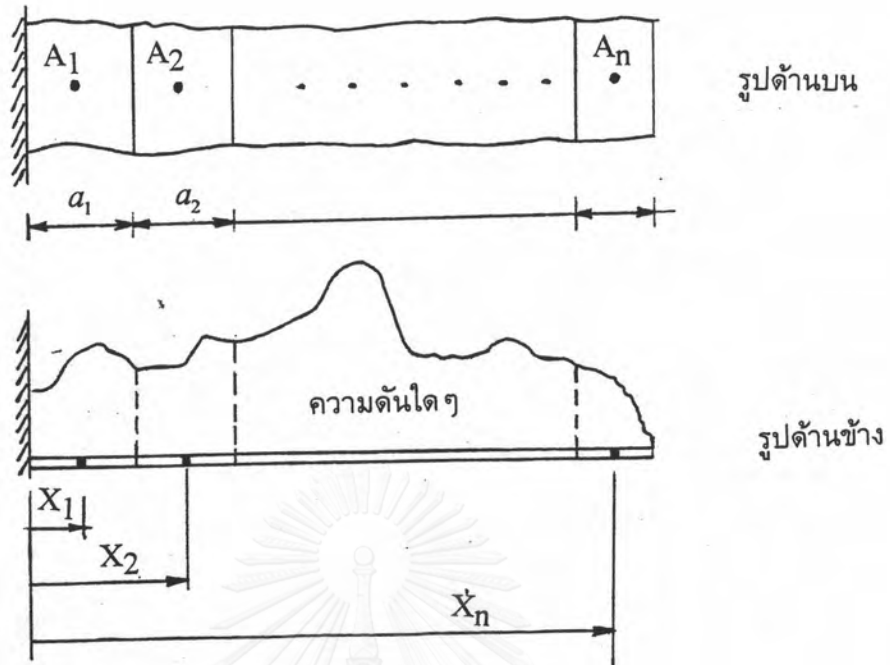
6. สมการสำหรับการหาโมเมนต์ปลายยึดแน่นสำหรับคานยื่นใด ๆ

รูปที่ 2.5 แสดงคานยื่นซึ่งติดที่วัดความดันที่จุด X_1, X_2, \dots, X_n จะได้โมเมนต์ปลายยึดแน่นหาได้จาก

$$M = \int_0^A p(x) \cdot x \, dA \dots\dots\dots(2.11)$$

โดยที่ $p(x)$ = ขนาดความดัน(หรือหน่วยแรงจุด)ที่ตำแหน่ง x ใด ๆ
 x = ระยะใด ๆ จากจุดปลายยึดแน่นไปถึงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพื้นที่ dA

สำหรับโครงสร้างที่เป็นคานยื่นใด ๆ เราสามารถแบ่งพื้นที่รับแรงทั้งหมดเป็นพื้นที่ย่อยจำนวน n พื้นที่ โดยที่ในพื้นที่ย่อย A_i นั้นเรากำหนดให้ P_i เป็นความดันที่เป็นตัวแทนของความดันจริงที่กระทำตลอดบนพื้นที่ A_i โดยความดัน P_i นี้กระทำที่ X_i ซึ่งเป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพื้นที่ A_i นั้นหมายถึงว่า เป็นการสมมติให้มีความดันแบบสม่ำเสมอขนาด P_i กระทำที่จุดศูนย์กลางของพื้นที่ A_i จะเห็นว่า ถ้าหากว่ามีการแบ่งพื้นที่ทั้งหมดเป็นพื้นที่ย่อย ๆ จำนวนยิ่งมากเท่าไร ผลการคำนวณจากข้อกำหนดข้างต้นนี้ก็ยิ่งมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เนื่องจากว่าลักษณะของความดันที่นำมาใช้ในการคำนวณ จะมีลักษณะใกล้เคียงกับความจริงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.5 คานยื่นทั่วไปและแรงใด ๆ

จากค่าความดันที่วัดได้ที่ n จุดนี้ เราสามารถนำมาใช้หาโมเมนต์ปลายยึดแน่นได้ดังนี้

$$M = \sum_{i=1}^n (P_i A_i X_i) \dots\dots\dots(2.12)$$

- โดยที่
- P_i = ความดันที่จุดวัดความดันตัวที่ i
 - A_i = พื้นที่ที่จุดวัดความดันตัวที่ i ครอบคลุมถึง
 - X_i = ระยะจากจุดวัดความดันตัวที่ i ไปถึงจุดยึดของคานยื่นในที่นี้เป็นแนวกึ่งกลางเสา โดยที่จุดวัดความดันตัวที่ i จะอยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของพื้นที่ A_i
 - i = ตัวเลขระบุตำแหน่งหรือลำดับของพื้นที่, ระยะ หรือ ความดัน
 - n = จำนวนพื้นที่ย่อยทั้งหมด

หากกำหนดให้ผลคูณของ $A_i X_i$ เป็นค่าคงที่ จะแปลงสมการ(2.12) เป็นรูปแบบง่าย
ขึ้นได้ดังนี้

$$M = \sum_{i=1}^n A_i X_i P_i$$

$$= n A_i X_i \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \right] \dots\dots\dots(2.13)$$

$$= n A_i X_i \bar{P}$$

$$= \bar{P} A_T X_T \dots\dots\dots(2.14)$$

$$= F X_T \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \dots\dots\dots(2.16)$$

= ความดันเฉลี่ยที่เฉลี่ยมาจากความดันจำนวน n พื้นที่ ใน
เวลาเดียวกัน

โดยที่

A_T = พื้นที่ที่รับแรงทั้งหมดของคานตัวที่เรากำลังพิจารณา

X_T = ระยะจากจุดศูนย์กลางของพื้นที่ A_T ไปถึงแนวกึ่งกลางเสาที่
รับคานตัวที่เรากำลังพิจารณา

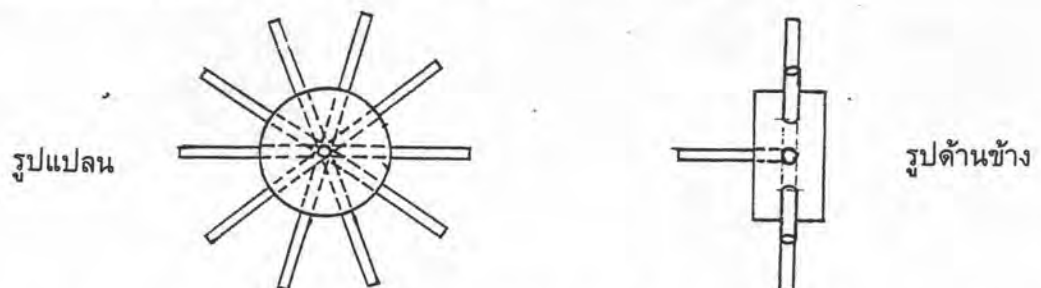
F = ค่าแรงลมที่กระทำต่อคานที่ระยะ X_T

7. วิธีการเฉลี่ยแบบนิวเมติก (Pneumatic Averaging)

7.1 วิธีการ อุปกรณ์และข้อกำหนด

จากสมการที่ 2.13 - 2.15 ในการหาแรงที่กระทำกับโครงสร้าง เราสามารถกระทำได้ โดยการวัดหาความดันที่แต่ละจุด แล้วนำเอามาคำนวณหาแรงลัพธ์ที่กระทำต่อโครงสร้างได้ แต่ความดันที่วัดในแต่ละจุดนั้นจะต้องเป็นความดันที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ถ้าหากเรานำเอาค่าความดันสูงสุดที่วัดได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นคนละเวลามาคำนวณหาแรงลัพธ์แล้ว จะทำให้ค่าที่ออกมาสูงกว่าความเป็นจริง หากเราจะใช้วิธีต่อความดันแต่ละจุดเข้ากับชุดอุปกรณ์วัดความดัน 1 ชุด แล้วจึงนำไปคำนวณหาแรงลัพธ์ จะต้องใช้ชุดอุปกรณ์วัดความดันเป็นจำนวนมาก (ขึ้นกับความละเอียดที่ต้องการได้) ทำให้ไม่เป็นการประหยัด เนื่องจากอุปกรณ์แต่ละชุดจะมีราคาแพง ดังนั้นจึงมีนักวิจัยเสนอวิธีการเฉลี่ยแบบนิวเมติก(Pneumatic Averaging) โดยอาศัยหลักการพื้นฐานที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว กล่าวคือ หากทำการติดตั้งท่อวัดความดันบนพื้นที่ย่อยๆ ในลักษณะที่กล่าวมาแล้ว จะคำนวณแรงลัพธ์ได้โดยนำเอาค่าความดันเฉลี่ย ($P = \frac{\sum P_i}{n}$) คูณกับตัวคูณที่เกี่ยวข้อง (ดูสมการที่ 2.14 และ 2.15)

D. Surry และ T. Stathopoulos [12] ได้ทำการทดสอบ โดยนำเอาท่อที่ต่อจากท่อรับความดันของแต่ละจุดมาต่อเข้าด้วยกันโดยต่อเข้ากับ "อุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์" (Manifold) ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งทำหน้าที่เฉลี่ยความดันของท่อที่เข้ามาทั้งหมด พบว่าการใช้วิธีการเฉลี่ยแบบนี้ให้ค่าเฉลี่ยและค่ารากที่สองของผลรวมค่ากำลังสองได้ดี เนื่องจากปริมาตรที่บริเวณท่อเข้ามาพบกันนั้นมีขนาดเล็กมาก อุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์จะให้คำตอบสนองด้านความถี่ (Frequency Response) ก่อนข้างจะราบเรียบโดยอาจจะมีสภาพไม่เชิงเส้น (Non-linearity) เล็กน้อย



รูปที่ 2.6 รายละเอียดอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการและวิจัยทางอุโมงค์ลม มหาวิทยาลัยเวสเทินออนดารีโอ ประเทศแคนาดา [12]

D.Surry และ T.Stathopoulos [12] ได้เสนอว่าในการเฉลี่ยแบบนิวเมติกจะต้องมีการควบคุมสภาพของการทดสอบดังนี้

1. สภาพการไหลของอากาศในท่อต่างๆในระบบต้องเป็นการไหลแบบลามินาร์ (Larminar Flow) Renold ได้สรุปลักษณะการไหลแบบลามินาร์ภายในท่อดังนี้ [13]

ถ้าหากว่าค่า Renold Number , Re น้อยกว่า 2000 การไหลภายในท่อจะเป็นแบบลามินาร์ เสมอ นั่นคือ

$$\text{Renold Number} = \frac{\rho VD}{\mu} < 2000 \dots\dots\dots(2.17)$$

ดังนั้น	V	<	$\frac{\mu (Re)}{\rho D}$
โดยที่	V	=	ความเร็วของการไหลภายในท่อ
	μ	=	Absolute Viscosity = 1.8*10 ⁻⁵ นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร สำหรับอากาศ[13]
	Re	=	Renold Number
	ρ	=	ความหนาแน่นของของไหลในท่อ = 1.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับอากาศ
	D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อสำหรับท่อที่นิยมใช้ทั่วไป D = 0.0015875 เมตร
จะได้	V	<	$\frac{(1.8 \cdot 10^{-5})(2000)}{(0.0015875)(1.25)}$ < 18.14 เมตรต่อวินาที

2. ท่อต่างๆจะต้องยาวพอที่จะทำให้การสูญเสียที่ปลายท่อ (End Effects Losses) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ Stephen J. Gumley [13] กล่าวว่าปัญหานี้สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ ถ้าหากกำหนดให้ท่อแต่ละช่วงมีความยาว, L มากกว่า 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ กล่าวคือ

$$L > 10 D \dots\dots\dots(2.18)$$

$$> 10 * 0.0015875 = 0.015875 \text{ เมตร}$$

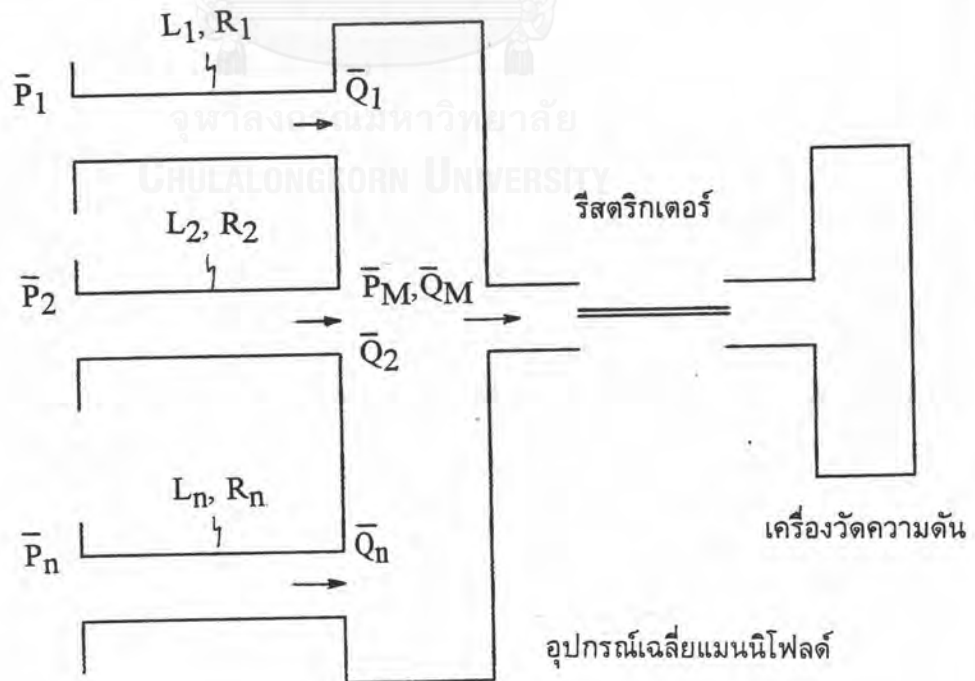
- 3. ท่อต่าง ๆ จะต้องมีรูปทรงและขนาดเดียวกัน
- 4. การไหลภายในท่อนั้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับการไหลภายนอกท่อ

7.2 ผลการเฉลี่ยความดันของอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์โดยรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในปี ค.ศ.1981 Stephen J. Gumley [14] ได้แสดงแบบจำลองชุดวัดความดันด้วยอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์ดังรูปที่ 2.7 และถ้าหากว่าไม่คิดผลกระทบของปลายท่อ (End Effect) การไหลเฉลี่ยแบบลาร์มินาร์ในแต่ละ ท่อนี้จะได้จากกฎ Poiseuille's Law คือ

$$\bar{V}_{in i} = \frac{(\bar{P}_i - \bar{P}_M) R_i^2}{8 \mu L_i} \dots, i = 1, 2, \dots, n \dots\dots(2.19)$$

= ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อเข้าของท่อที่ i



รูปที่ 2.7 แบบจำลองชุดวัดความดันด้วยอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์ [14]



$$\bar{Q}_{in\ i} = \frac{(\bar{P}_i - \bar{P}_M) \pi R_i^4}{8 \mu L_i} \dots, i = 1, 2, \dots, n \dots \dots (2.20)$$

= อัตราการไหลของของไหลในการไหลเข้าของท่อที่ i

$$\bar{Q}_{out} = 0 \dots \dots \dots (2.21)$$

= อัตราการไหลของของไหลในการไหลออก

โดยที่ \bar{P}_M = ค่าความดันเฉลี่ยในอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโพลด์

\bar{P}_i = ค่าความดันสถิตยจากท่อเข้าที่ i

L_i = ความยาวท่อที่ i

R_i = รัศมีภายในของท่อที่ i

ดังนั้นจึงเกิดสมดุลของมวลที่อุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโพลด์ ทำให้

$$\sum_{i=1}^n \bar{Q} = 0 \dots \dots \dots (2.22)$$

ดังนั้น

$$\frac{\pi (\bar{P}_1 - \bar{P}_M) R_1^4}{8 \mu L_1} + \frac{\pi (\bar{P}_2 - \bar{P}_M) R_2^4}{8 \mu L_2} + \dots + \frac{\pi (\bar{P}_n - \bar{P}_M) R_n^4}{8 \mu L_n} = 0$$

$$\bar{P}_M = \frac{\frac{\bar{P}_1 R_1^4}{L_1} + \frac{\bar{P}_2 R_2^4}{L_2} + \dots + \frac{\bar{P}_n R_n^4}{L_n}}{\frac{R_1^4}{L_1} + \frac{R_2^4}{L_2} + \dots + \frac{R_n^4}{L_n}} \dots \dots \dots (2.23)$$

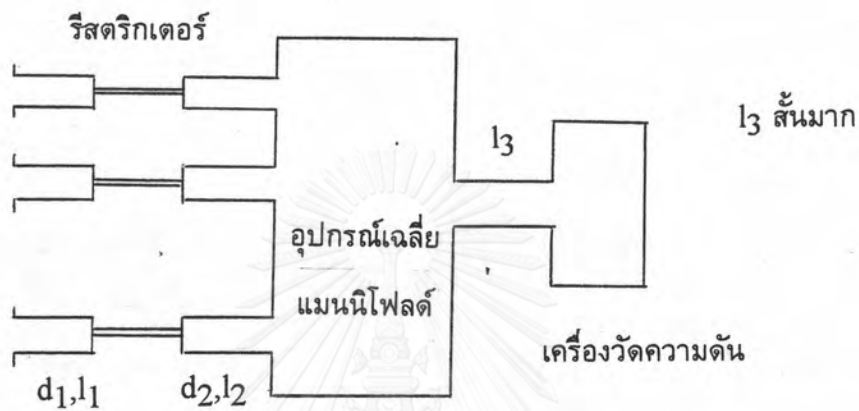
ถ้าหากท่อทุกท่อที่มีลักษณะรูปทรงต่าง ๆ เหมือนกัน ดังนั้น

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n$$

$$L_1 = L_2 = \dots = L_n$$

$$\bar{P}_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{P}_i \dots \dots \dots (2.24)$$

จากรูปสมการ 2.24 หมายถึงว่าอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโพลด์ สามารถที่จะทำหน้าที่เฉลี่ยความดันจากท่อเข้าทั้งหมดได้ Stephen J. Gumley [14] ได้กล่าวถึงชุดวัดความดันด้วยอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโพลด์ที่ใช้ที่ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางอุโมงค์ลม มหาวิทยาลัยเวสเทินออนตารีโอ ดังรูปที่ 2.8 ว่าเป็นรูปแบบการจัดที่ประสบความสำเร็จ ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.8 แบบจำลองชุดวัดความดันด้วยอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโพลด์ที่ใช้ที่ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางอุโมงค์ลม มหาวิทยาลัยเวสเทินออนตารีโอ ประเทศแคนาดา [14]

7.3 การประยุกต์ใช้สมการหาโมเมนต์ปลายยึดแน่นของคานยื่นจากการทดสอบ

Stephen J. Gumley [14] ได้แสดงตัวอย่างการหาโมเมนต์ของคานยื่นดังรูปที่ 2.9 โดยติดจุดวัดความดันเรียงเป็นแถวเดียว และมีการจัดตำแหน่งจุดวัดความดันให้กระจายแบบพาราโบลา เพื่อให้ผลลัพธ์ของความดันที่ได้ออกมาจากอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์ มีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงกับโมเมนต์ที่ฐาน (Fixed End Moment)



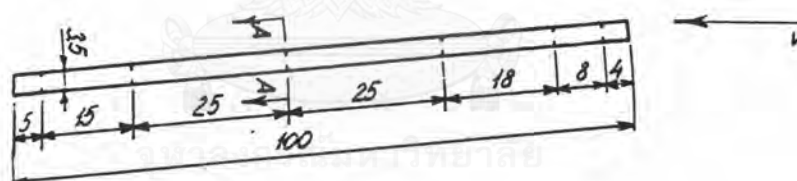
รูปที่ 2.9 ตำแหน่งการติดจุดวัดความดันที่คานยื่น [14]

ในการทดสอบนั้นจะทำการแบ่งพื้นที่รับแรงลมเป็นพื้นที่ย่อยจำนวน n พื้นที่ และติดตั้งจุดวัดความดันแบบแถวเดียว โดยให้จุดวัดความดันติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อย X_i จากค่าความดันของพื้นที่ย่อยต่าง, P_i ได้ จะนำมาคำนวณหาค่าโมเมนต์ที่ฐานได้ จากสมการที่ 2.12 - 2.14 ในหัวข้อที่ 6 ดังได้กล่าวมาแล้วในวิธีการเฉลี่ยนิวเมติก จะต้องกำหนดให้ $A_i X_i$ เป็นค่าคงที่ จากสมการพื้นฐานของการหาจุดศูนย์ถ่วง เราได้ความสัมพันธ์

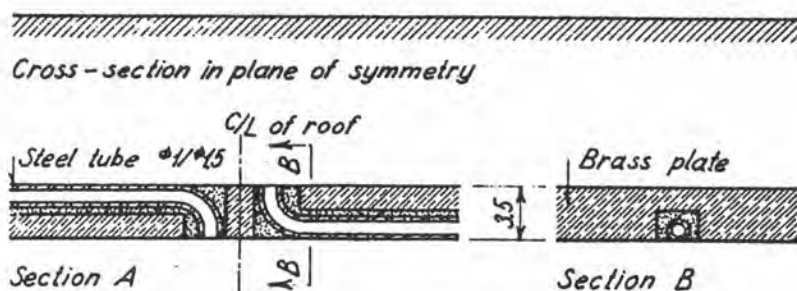
$$A_i X_i = \frac{A_T X_T}{n} \dots \dots \dots (2.25)$$

ลักษณะการจัดตำแหน่งจุดวัดความดันตามสมการที่ 2.25 นี้ สอดคล้องกับที่ G.P. Tilly [15] เสนอ คือ การวัดหาโมเมนต์สำหรับกรณีโครงสร้างแบบความเย็น ท่อรับความดันที่บริเวณปลายคานเย็นจะถูกจัดให้อยู่ชิดกันและจะยิ่งห่างมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อเข้าไปใกล้ด้านปลายยึดแน่นของคาน โดยผลคูณของพื้นที่กับระยะจากจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่นั้นๆ (จุดที่วางท่อรับความดัน) ไปถึงจุดยึดแน่นจะต้องเป็นค่าคงที่เสมอ การจัดวางตำแหน่งแบบนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเฉลี่ยแบบมีการถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) D.Surry และ T.Stathopoulos [12] กล่าวว่าถ้าหากเราไปใช้วิธีการแปรเปลี่ยนความยาวของท่อยูรีเทน ก็จะเป็นวิธีการเฉลี่ยแบบมีการถ่วงน้ำหนักอีกแบบหนึ่ง

นอกจากการจัดวางตำแหน่งของจุดวัดความดันบนหลังคาจะต้องเป็นไปตามที่กล่าวมาแล้ว การติดตั้งจุดวัดความดันยังต้องให้ซ่อนไว้ภายในชั้นความหนาของหลังคา เพื่อไม่ให้ตัวของจุดวัดความดัน ท่อยูรีเทน รวมทั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ มารบกวนกระแสลม หรือรบกวนให้น้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงรายละเอียดการติดตั้งจุดวัดความดันแบบงอไว้ภายในชั้นหลังคาโดย Martin Jensen และ Niels Franck [16]



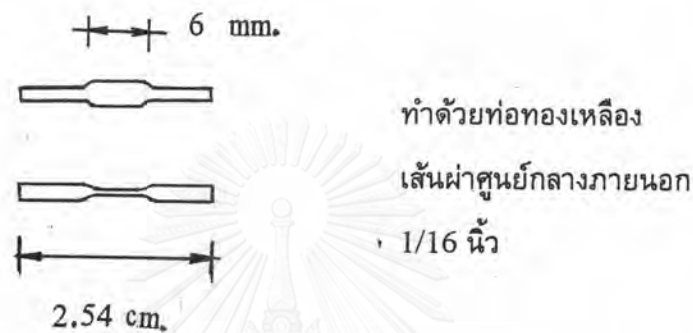
หน่วยความยาว เป็น มิลลิเมตร



รูปที่ 2.10 รายละเอียดการติดตั้งจุดวัดความดันแบบงอไว้ภายในชั้นหลังคาที่ [16]

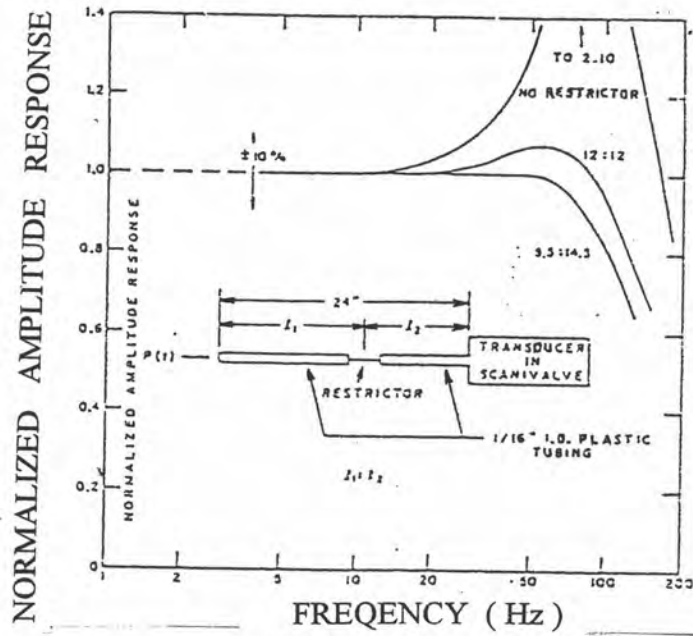
7.4 ระบบท่อของชุดวัดความดัน

รีสตรัคเตอร์ (Restrictor) เป็นท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 0.0625 นิ้ว โดยมีส่วนของท่อที่อยู่ตรงกลางซึ่งถูกบีบให้แบนดังรูปที่ 2.11 อุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่ไปหน่วง, ด้านทาน การเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ของกระแสลมในท่อยูรีเทน

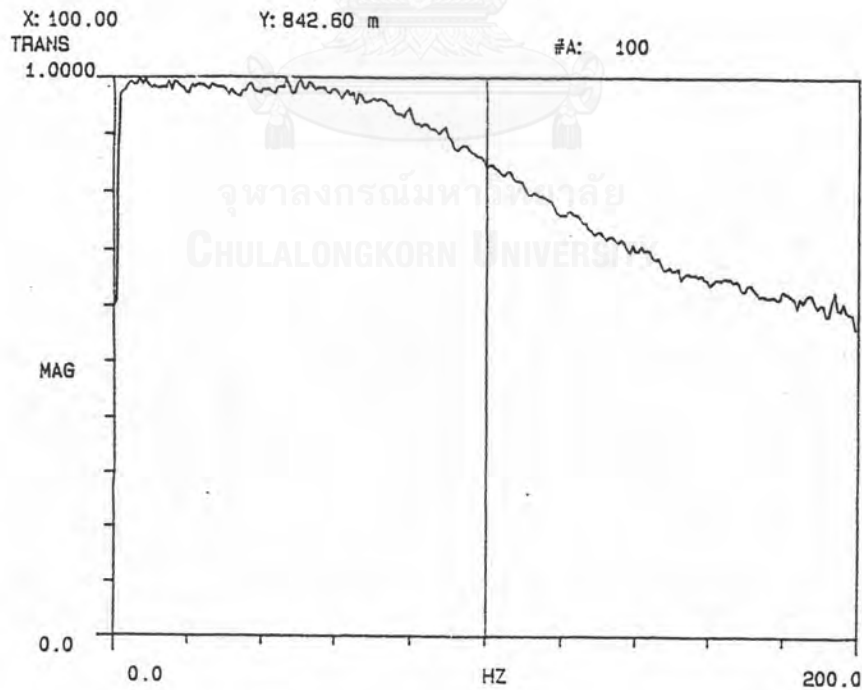


รูปที่ 2.11 รายละเอียดรีสตรัคเตอร์ (Restrictor)

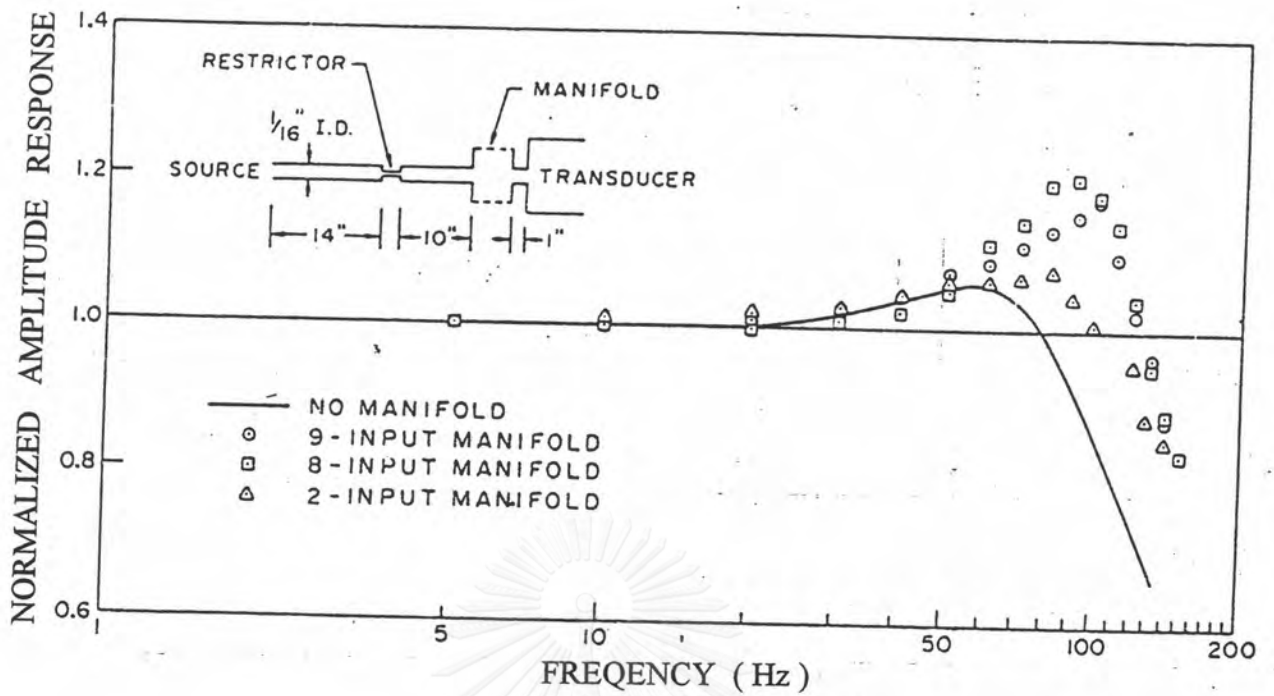
D.Surry และ N. Isyumov [17] ได้แสดงถึงการใช้ท่อยูรีเทนความยาวท่อโดยรวม 24 นิ้ว โดยมีการจัดรีสตรัคเตอร์ไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วย เพื่อหาผลกระทบของตำแหน่งรีสตรัคเตอร์ โดยในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของคลื่นที่ความถี่ต่างๆจะราบเรียบภายในช่วงความถี่ 40 เฮิรตซ์ เมื่อมีการใช้รีสตรัคเตอร์ และหน่วยปฏิบัติการและวิจัยทางอุโมงค์ลม มหาวิทยาลัย เวสเทิน ออนตาริโอเสนอแนะให้จัดท่อยูรีเทนและรีสตรัคเตอร์ ดังรูปที่ 2.13 พบว่าค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) สำหรับการจัดท่อแบบนี้จะให้ผล 0.99 ในช่วงความถี่ 0 – 50 เฮิรตซ์ สอดคล้องกับการกำหนด ค่าความถี่สูงสุดที่สนใจในงานวิจัยนี้ ซึ่งกำหนดไว้ที่ 40 เฮิรตซ์ (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 6.2 ของบทที่ 3) เมื่อรวมอุปกรณ์เฉลี่ยความดันแมนนิโฟลด์แบบท่อเข้า 8, 9 ท่อเข้าไปแล้ว [15] ดังรูปที่ 2.14 พบว่าผลการตอบสนองของคลื่นที่ความถี่ต่างๆจะราบเรียบภายในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ และค่าทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์ มีค่าประมาณ 1.04



รูปที่ 2.12 ผลการตอบสนองของคลื่นที่มีความถี่ต่างๆของชุดวัดความดันประกอบด้วยรีสตริกเตอร์ และท่อยูริเทน [17]



รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งของรีสตริกเตอร์และทรานสเฟอ์ฟั่งชั้นที่ทางหน่วยปฏิบัติการ และวิจัยทางอุโมงค์ลม มหาวิทยาลัยเวสเทินออนดารีโอ ประเทศแคนาดา แนะนำ

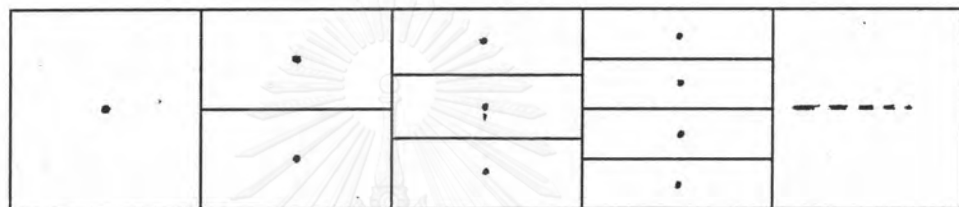


รูปที่ 2.14 ผลการตอบสนองของคลื่นที่ความถี่ต่างๆของชุดวัดความดันประกอบด้วยอุปกรณ์
เจ็ลลีแมนนิโฟลด์, รีสตริกเตอร์ และท่อยูริเทน [15]

7.5 รูปแบบการติดตั้งจุดวัดความดันและประสิทธิภาพ

รูปแบบการติดตั้งจุดวัดความดันโดยทั่วไป ผู้วิจัยแบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ

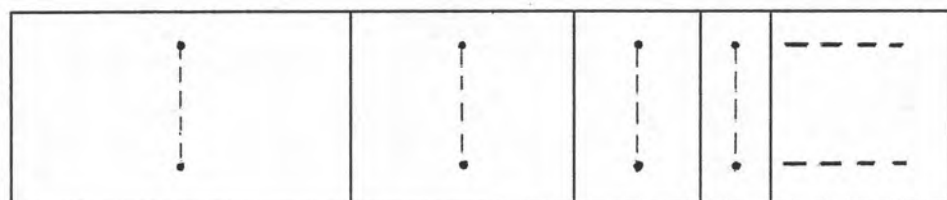
1. แบบอนุกรม
2. แบบแถวเดียว
3. แบบหลายแถว



ก. แบบอนุกรม



ข. แบบแถวเดียว

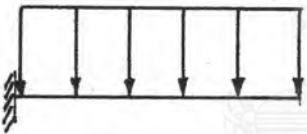
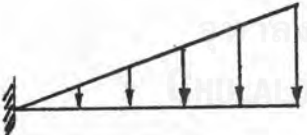
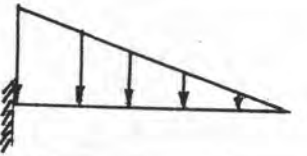


ค. แบบหลายแถว

รูปที่ 2.15 รูปแบบการติดตั้งจุดวัดความดันโดยทั่วไป

เมื่อคำนวณโมเมนต์พื้นฐานโดยวิธีเฉลี่ยนิวเมติกเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบอนุกรมและรูปแบบแถวเดี่ยวแล้วสำหรับคานกว้างคงที่ b นั้นพบว่าการจัดจุดวัดความดันแบบแถวเดี่ยวมีประสิทธิภาพดีกว่าการจัดจุดวัดความดันแบบอนุกรมดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3

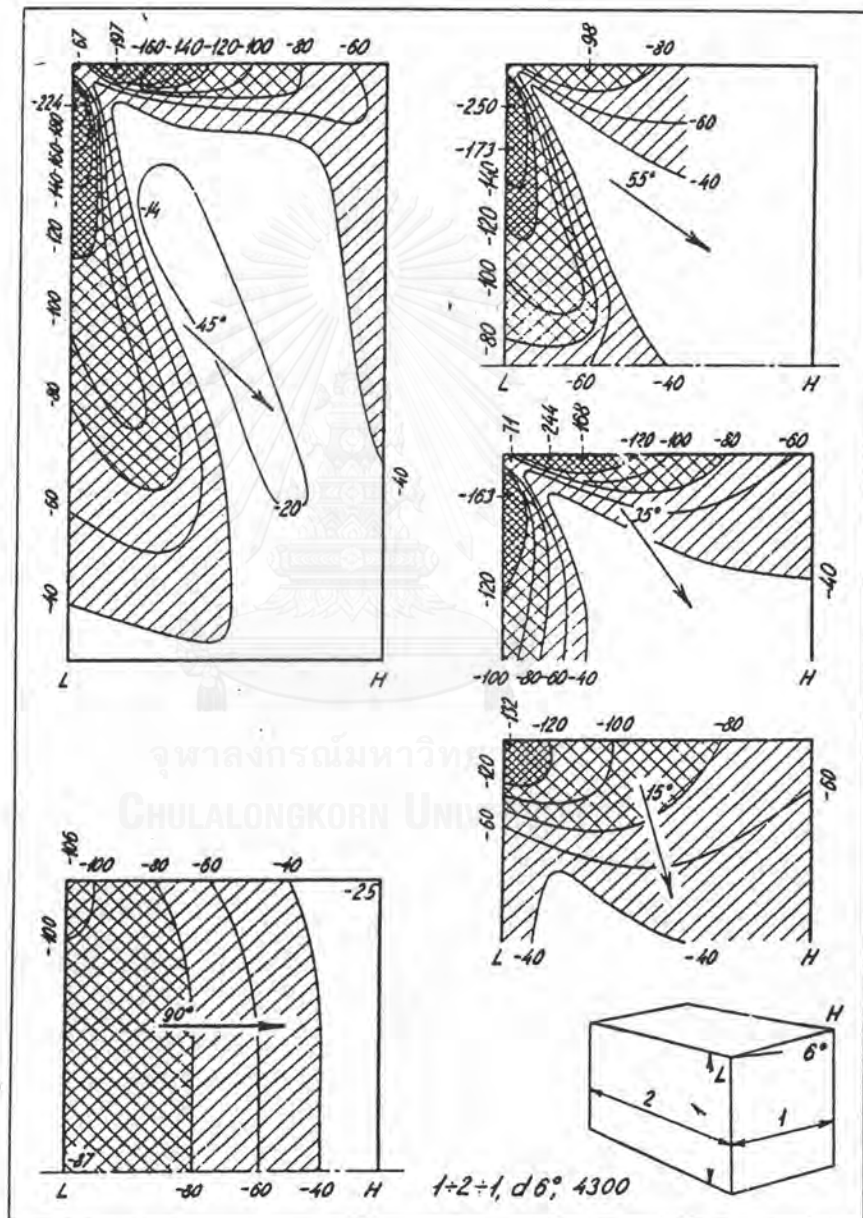
ตารางที่ 2.3 ค่าความผิดพลาดในการคำนวณหาโมเมนต์จากวิธีเฉลี่ยนิวเมติกโดยมีการจัดจุดวัดความดันแบบอนุกรมและแบบแถวเดี่ยว โดยเทียบกับค่าจริง สำหรับคานกว้างคงที่ b

ลักษณะรูปแบบความดัน ที่กระทำกับคานยื่น	ค่าความผิดพลาดในการหาโมเมนต์เทียบกับค่าจริง	
	แบบอนุกรม	แบบแถวเดี่ยว
	0 %	0 %
	-1.7 %	-0.9 %
	+3.4 %	+1.8 %

ดูรายละเอียดที่ภาคผนวก ก

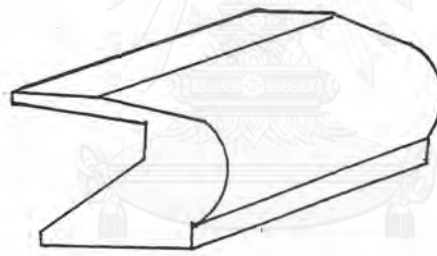
8. การวัดหาแรงและความดันบนหลังคา

ในปี ค.ศ.1965 Martin Jensen และ Niels Franck [16] แสดงให้เห็นว่า รูปแบบความดันบนพื้นที่รับแรงลมของโครงสร้างหลังคา จะเปลี่ยนตามแนวคานมากกว่าทางด้านกว้างของคานดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เส้นระดับของ $C_{p,mean}$ ของหลังคาบ้านในทิศทางต่างๆ. [16]

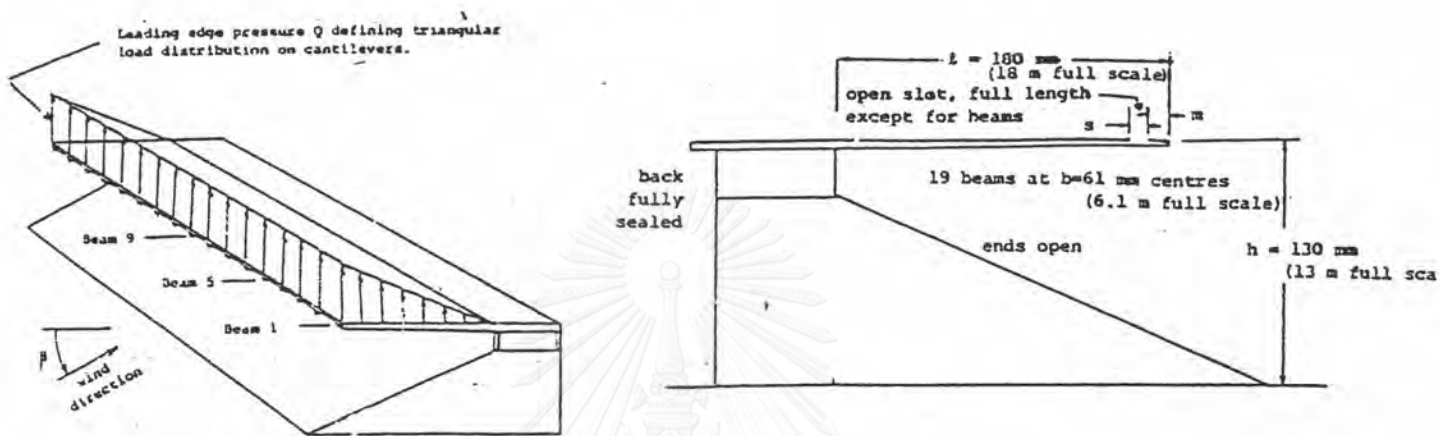
ในปี ค.ศ.1982 Cook [18] ได้ทดสอบหาแรงที่กระทำต่อหลังคาสนามกีฬาเนื่องจากลมโดยใช้อัตราการย่อส่วนทางด้านความยาวของหุ่นจำลอง 1:200 อัตราการย่อส่วนทางด้านความเร็ว 1:2 หลังคาที่มีความลาดชัน 7 องศา ทำมุมเงยขึ้นจากด้านหลังไปด้านหน้าของอิมพัลส์ โครงสร้างส่วนหลังคายื่นออกไป 50 เมตร ที่บริเวณใต้ด้านหลังของหลังคาไม่มีช่องเปิด ที่บริเวณส่วนปลายของหลังคาจะมีการเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยม หุ่นจำลองที่นำมาทดสอบนั้นจำลองมาแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.17 ทดสอบเฉพาะลมที่เข้าทางด้านหน้าของอิมพัลส์และมุมที่เอียงไป 30 องศา ผลที่ได้คือที่ผิวด้านบนของชายคาจะเกิดหน่วยแรงดูด แรงมีทิศยกขึ้น ส่วนที่ผิวด้านล่างของชายคา จะเกิดสภาพความดันที่มีทิศทางเข้าหาพื้นผิวทั้ง 2 ทิศ ทำให้แรงมีทิศยกขึ้นเช่นกัน ดังนั้นแรงลัพธ์ที่กระทำต่อหลังคาจึงมีทิศยกขึ้น Cook เสนอผลการทดสอบในรูปของความดันเฉพาะที่ (Local Pressure) และพบว่า การเจาะช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่ส่วนปลายของหลังคามีผลทำให้ หน่วยแรงดูดและความดันที่บริเวณขอบของหลังคาลดลง



รูปที่ 2.17 ลักษณะสนามกีฬาที่ Cook, N.J. ทดสอบ [18]

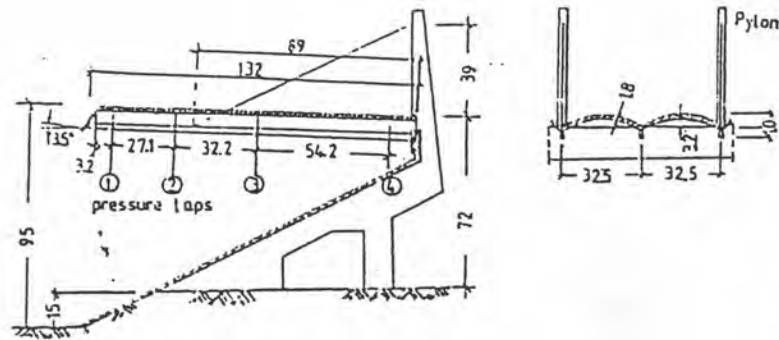
ในปี ค.ศ.1987 Melbourne และ Cheung [19] ได้ทดสอบหาแรงที่กระทำต่อหลังคาสนามกีฬาเนื่องจากลมโดยใช้อัตราการย่อส่วนทางด้านความยาวของหุ่นจำลอง 1:100 อัตราการย่อส่วนทางด้านความเร็ว 1:2 เป็นหุ่นจำลองแอโรอัสติก (Aeroelastic Model) หลังคาไม่มีความลาดชัน โครงสร้างส่วนหลังคายื่นออกไป 18 เมตร ที่บริเวณส่วนปลายของหลังคามีการเจาะช่องสี่เหลี่ยมที่บริเวณด้านใต้ด้านหลังของหลังคาไม่มีช่องเปิด แบบจำลองที่นำมาทดสอบนั้นจำลองแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.18 ทำการทดสอบโดยแปรเปลี่ยนลมที่เข้าทุกทิศทางความเร็วลม ความกว้างของช่อง

เปิดบนหลังคา ตำแหน่งของช่องเปิด โดยที่วัดการเคลื่อนที่ของปลายหลังคา ผลการทดสอบพบว่าในกรณีที่ความกว้างของช่องเปิดเป็น 5 % ของความยาวของระยะยื่นของหลังคาจะสามารถลดการสั่นที่ปลายหลังคาได้ 25 % และมีการเสนอรูปแบบของแรงรวมที่กระทำบนหลังคาโดยการประมาณแบบง่ายเป็นแรงสถิตย์เทียบเท่าเป็นรูปสามเหลี่ยม

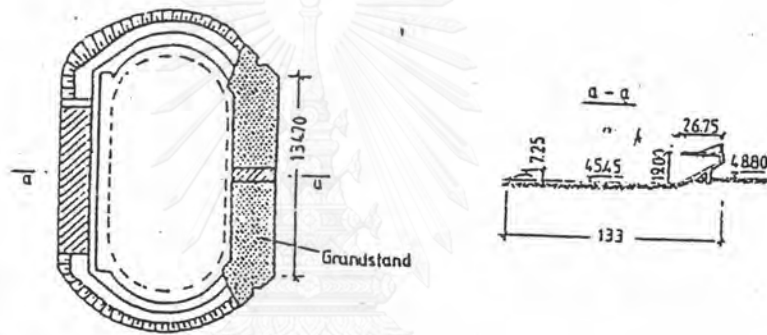


รูปที่ 2.18 ลักษณะสนามก๊ฬาที่ Melbourne และ Cheung ทดสอบ [19]

ในปี ค.ศ.1987 Niemann, H.J. [20] ได้ทดสอบหาน้ำหนักที่กระทำต่อหลังคาสนามกีฬาเนื่องจากแรงลม โดยใช้อัตราการย่อส่วนทางด้านความยาวของแบบจำลอง 1:200 หลังคามีความลาดชัน 1:16.5 ทำมุมเงยขึ้นจากด้านหลังไปด้านหน้าของอัฒจันทร์ โครงสร้างส่วนหลังคายื่นออกไป 26.75 เมตร ที่บริเวณใต้ด้านหลังของหลังคามีช่องเปิด หุ่นจำลองที่นำมาทดสอบนั้นจำลองมาเฉพาะส่วนที่อยู่ตรงกลางของอัฒจันทร์กว้าง 6.5 เมตร ดังรูปที่ 2.19 และทดสอบเฉพาะลมที่เข้าทางด้านหน้าของอัฒจันทร์ ผลที่ได้คือที่ผิวด้านบนของชายคาจะเกิดหน่วยแรงดูด แรงมีทิศยกขึ้น ส่วนที่ผิวด้านล่างของชายคาจะเกิดสภาพความดันที่มีทิศทางเข้าหาพื้นผิว แรงมีทิศยกขึ้น แรงลัพท์ที่กระทำต่อหลังคาจึงมีทิศยกขึ้น



(ก) รูปตัดของหุ่นจำลองสนามกีฬา, หน่วยเป็น มิลลิเมตร

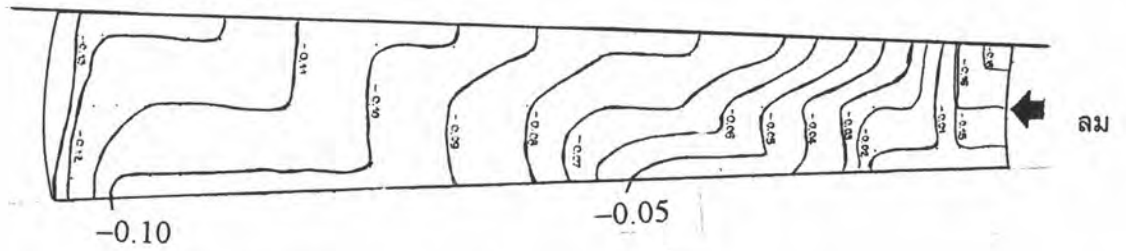


(ข) สนามกีฬา, หน่วยเป็น เมตร

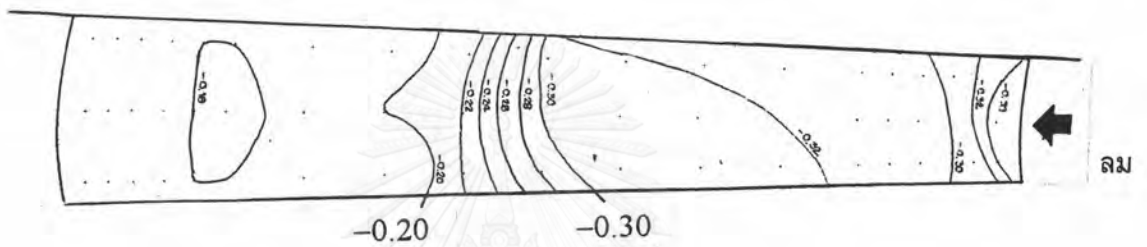
รูปที่ 2.19 ลักษณะสนามกีฬาที่ H.J. Niemann ทดสอบ [20]

ในปี พ.ศ.2535 (คศ.1992) สมศักดิ์ อนงค์เลขา, อภิชาติ เจริญพิวัฒนพงษ์ และไพฑูรย์ สรุจิกำจรวิวัฒนะ [21] ได้ทดสอบหุ่นจำลองสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติโดยมีขนาดการย่อส่วนเท่ากับ 1:500 ความหนาของหลังคา 1.5 มิลลิเมตร จำนวนแนวโครงสร้างใช้เพียง 1/4 ของจำนวนแนวทั้งหมด ทำให้ลักษณะของอิมพัลส์และพื้นหลังคาไม่โค้งเหมือนของจริง และใช้วิธีวัดความดันแบบวัดที่ละจุด พบว่าค่าเฉลี่ยของความดันที่ผิวบนมีค่าการแปรปรวน มากกว่าที่ผิวล่าง ดังรูปที่ 2.20 และ 2.21

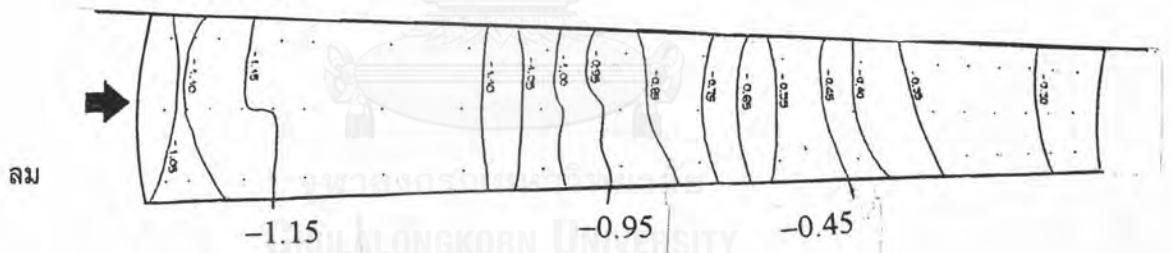
ค่า Cp ที่ผิวบน ลมเข้าทิศ 0 องศา
คานแนว 19



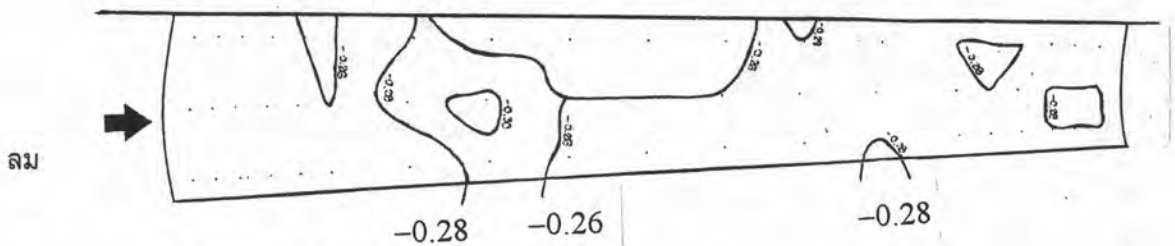
ค่า Cp ที่ผิวล่าง ลมเข้าทิศ 0 องศา
คานแนว 19



ค่า Cp ที่ผิวบน ลมเข้าทิศ 180 องศา
คานแนว 19

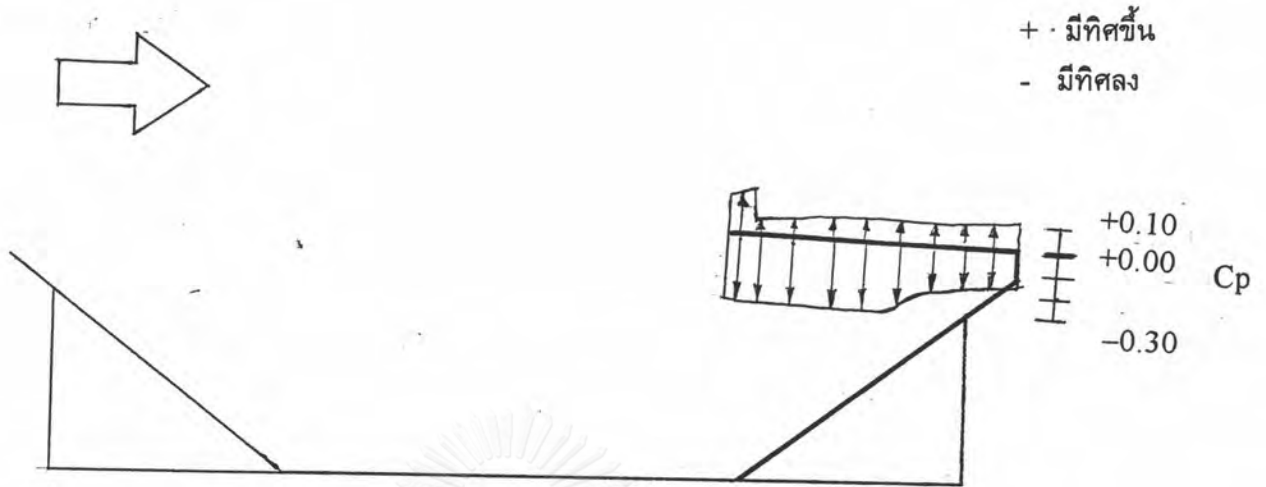


ค่า Cp ที่ผิวล่าง ลมเข้าทิศ 180 องศา

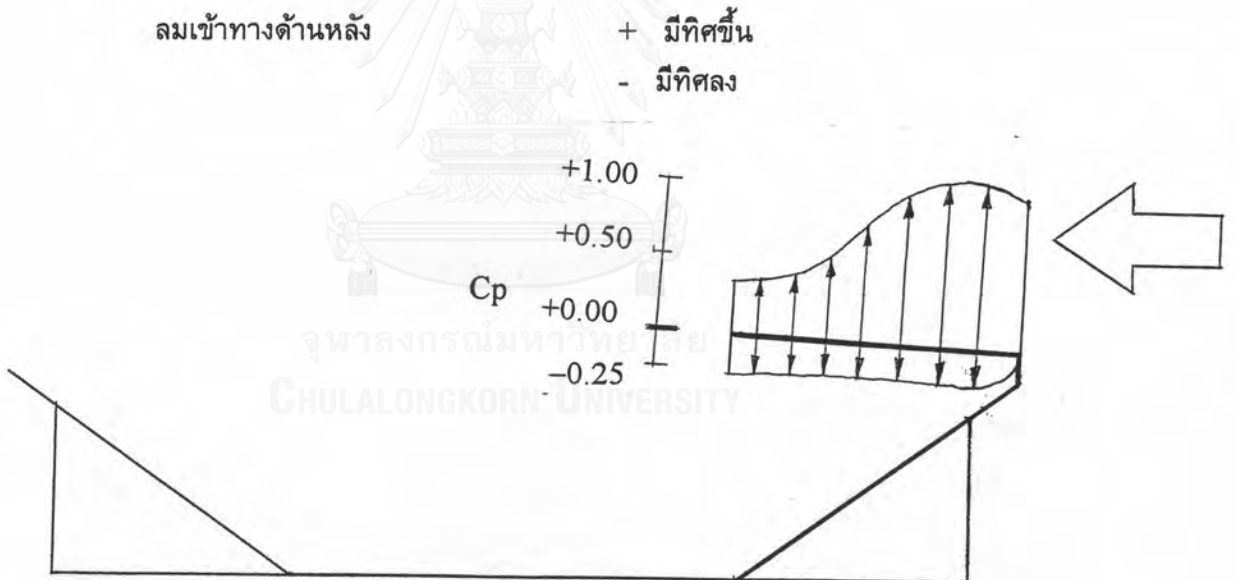


รูปที่ 2.20 เส้นระดับของ Cp, mean ของหลังคาสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ ที่ สมศักดิ์
อนงค์เลขา, อภิชาติ เจริญนิวัฒน์พงษ์ และไพฑูรย์ สรุจิกิจารวัฒน์นะ พ.ศ.2535 (คศ.1992) ทดสอบ
[21]

ลมเข้าทางด้านหน้า



ลมเข้าทางด้านหลัง



รูปที่ 2.21 ลักษณะของความดันที่กระทำต่อโครงสร้างหลังคาสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ
แนวที่ 19 ที่ สมศักดิ์ อนุวงศ์เลขา, อภิชาติ เจริญนิวัฒน์พงษ์และไพฑูรย์ สรุจิกำจรวัฒน์
ทำการทดสอบ (พ.ศ.2535) [21]

9. ผลจากการปิดกั้น (Blockage Effect)

ในปี ค.ศ.1933 H. Glauert [22] ได้ศึกษาถึงการรบกวนของหุ่นจำลองต่อรูปแบบ ของการไหลของกระแสลมในอุโมงค์ลม

ในปี ค.ศ.1952 E.C. Pankhurst และ D.W. Holder [23] ได้กล่าวว่าผลจากการปิดกั้นนั้นมีผลสำคัญ แต่จะมีผลน้อยสำหรับกรณีที่หุ่นจำลองมีรูปร่างที่ทำให้กระแสลมเกิดการไหลเวียนแบบไม่แยกตัว (Non Separated Flow)

ในปี ค.ศ.1963 Maskell [24] พบว่าผลจากการปิดกั้นของหุ่นจำลองใด ๆ นั้น จะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับรูปร่างของหุ่นจำลองที่มีผลทำให้กระแสลมแยกตัวมากกว่ารูปร่างวัตถุซึ่งไม่ทำให้กระแสลมแยกตัว และ Maskell ได้ทดสอบแผ่นบางเรียบสี่เหลี่ยมโดยที่ระนาบของแผ่น จะตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลม

Maskell ได้เสนอสมการในการแก้ไขผลจากการปิดกั้น โดยที่มีข้อสมมติว่า ความดันที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดขึ้นเท่า ๆ กันตลอดวัตถุ ดังนี้

$$\frac{\Delta q}{q} = k C_D \frac{S}{C} \quad (2.26)$$

โดยที่

Δq = ค่าที่เพิ่มขึ้นของความดันพลวัตเนื่องจากการปิดกั้น

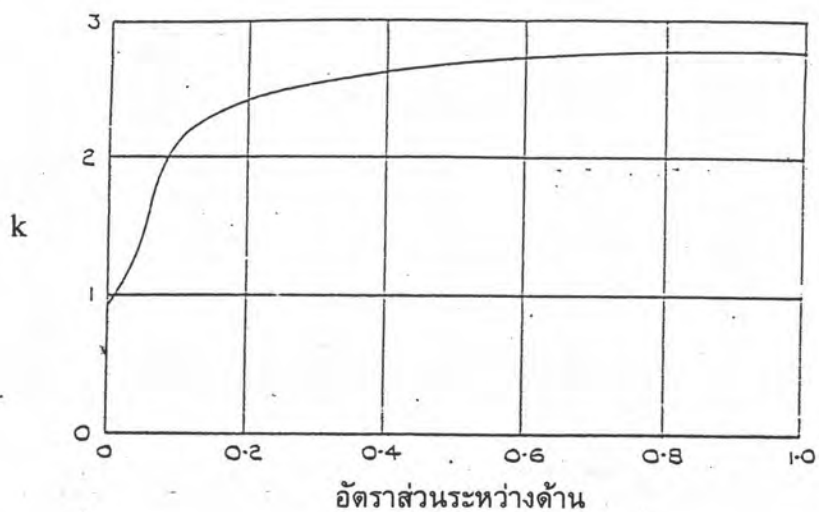
q = ความดันพลวัตที่ระดับอ้างอิง

k = ค่าตัวประกอบการปิดกั้น (Blockage Factor) ดูได้จากรูปที่ 2.22

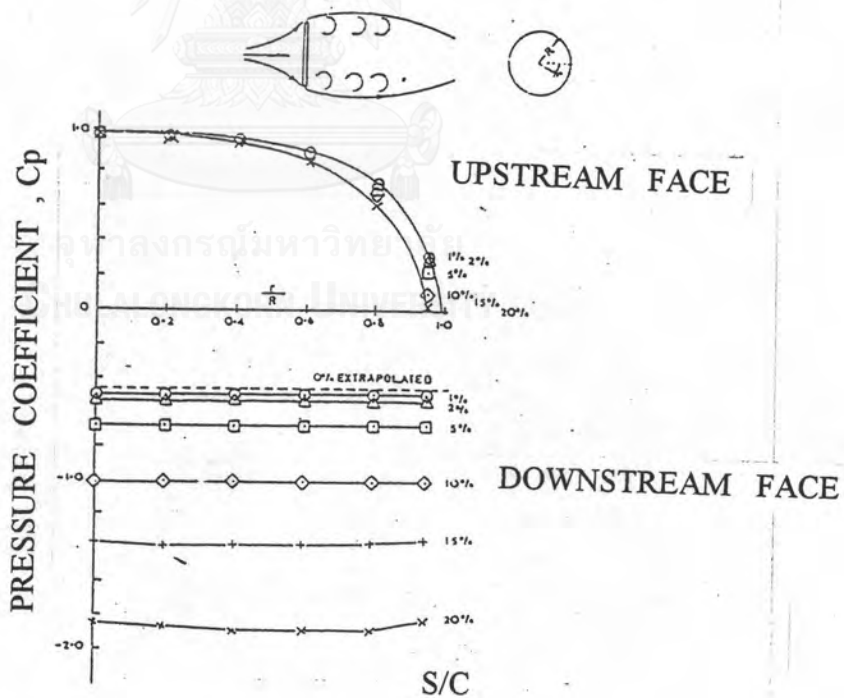
C_D = สัมประสิทธิ์แรงลาก (Drag Coefficient)

S = พื้นที่ด้านหน้าของที่ตั้งฉากกับกระแสลมของหุ่นจำลอง

C = พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม



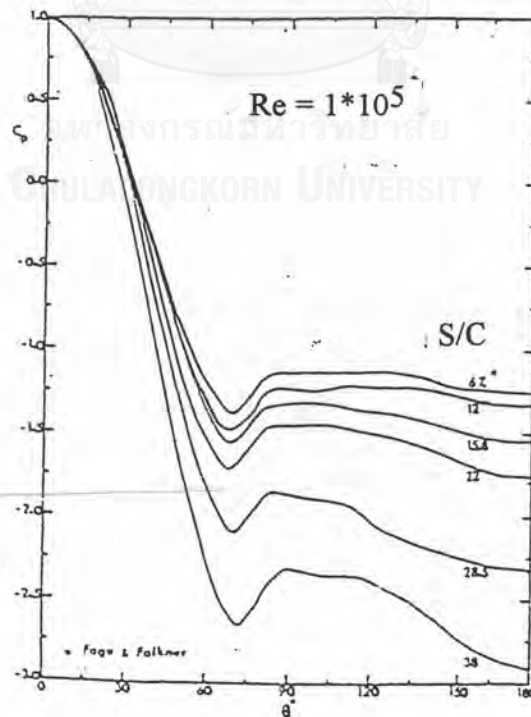
รูปที่ 2.22 ค่า k สำหรับแผ่นบางเรียบสี่เหลี่ยมที่มีระนาบตั้งฉากกับการไหล [24]



รูปที่ 2.23 ผลการทดสอบของ Mckeon และ Melbourne [24]

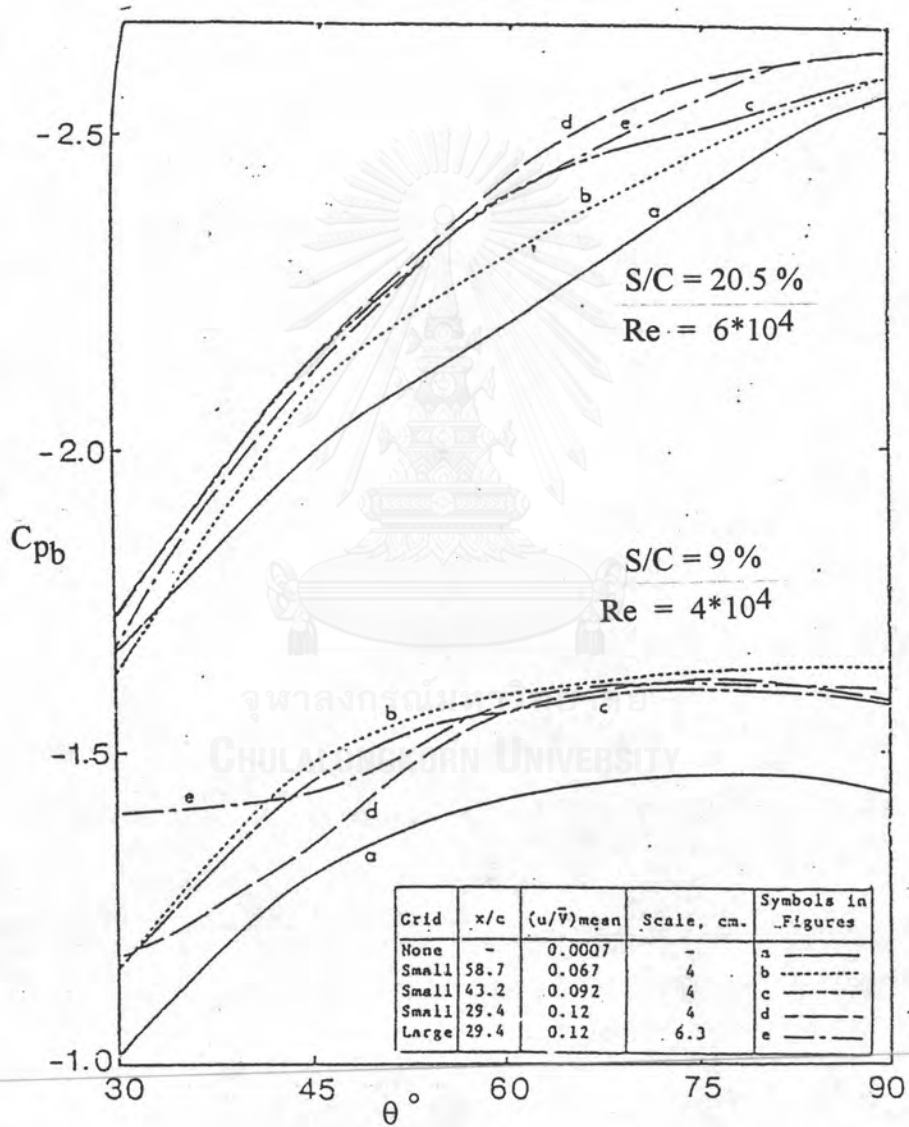
ในปี ค.ศ.1971 McKeon และ Melbourne [25] ได้อธิบายถึงข้อจำกัดของวิธีการของ Maskell และได้แสดงผลจากการปิดกั้นในรูปของแรงลาก (Drag Force) และความดันพื้นฐานของหุ่นจำลองที่เป็นแผ่นกลมบางเรียบ ในการไหลแบบบาวตารีเลเยอร์ โดยที่ระนาบของแผ่นตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของลมพื้นที่ที่รับลมในแนวตั้งฉากกับลมจะแปรเปลี่ยนระหว่าง 1- 20 % ของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม จากการทดสอบพบว่าที่ด้านหลังของแผ่นผลจากการปิดกั้นจะเกิดขึ้นเกือบสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นและอาจมีผลมากในกรณีที่อัตราส่วนการปิดกั้นมีค่าเกิน 5 % ขึ้นไป ที่ด้านหน้าของแผ่นพบว่าจะไม่มีความดันที่จุดศูนย์กลางของแผ่น แต่จะค่อยๆ มีผลกระทบมากขึ้นเรื่อยโดยขึ้นกับระยะที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่น ดังรูปที่ 2.23

ใน ค.ศ.1971 Modi และ El-Sherbiny [26] ได้ศึกษาผลจากการปิดกั้นโดยใช้หุ่นจำลองทรงกระบอกกลมในการไหลแบบที่มีการปั่นป่วนเล็กน้อย (Low Turbulence) โดยที่ Re มีค่า $1 \cdot 10^5$ ผลที่ได้เสนอเป็นค่าความดันเฉลี่ยที่เกิดขึ้นกับอัตราส่วนการปิดกั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลจากการปิดกั้นจะมีผลต่อหน่วยแรงดูดที่เกิดขึ้นมาก หากอัตราส่วนการปิดกั้นมีค่ามากกว่าประมาณ 12 % ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.24



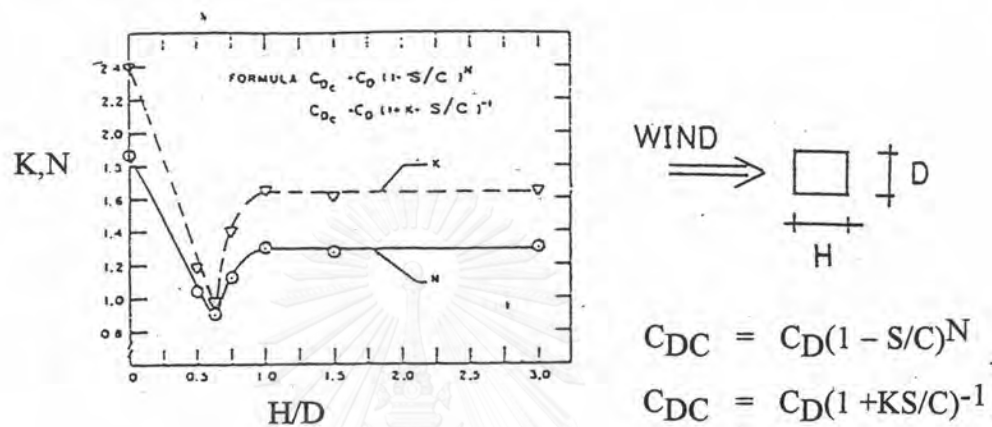
รูปที่ 2.24 ผลการทดสอบของ Modi และ EL-Sherbiny [26]

ในปี ค.ศ.1975 Modi และ El-Sherbiny [27] ได้ทดสอบแผ่นบางเรียบซึ่งวางในแนวตั้ง ผลการศึกษาพบว่า การกระจายของความดันสถิตยไม่ได้ขึ้นกับค่า Re ใน ช่วงของ Re ระหว่าง $2 \cdot 10^4$ กับ $16 \cdot 10^4$ และผลการปิดกันทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความดันมีค่าตัวเลขมากขึ้น



รูปที่ 2.25 ผลการทดสอบของ Modi และ EL-Sherbiny [26]

ในปี ค.ศ.1979 Courchesne และ Laneville [28] ได้ทดสอบวัตถุทรงกระบอกยาวหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม (2D Rectangular Cylinder) ในการไหลแบบที่มีการไหลวนขนาดเล็กผลการศึกษาก็ได้แสดงเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนความลึกต่อความสูงของแท่งทรงกระบอก ดังในรูปที่ 2.26 ผู้วิจัยได้สรุปว่าจะนำค่าการแก้ไขสำหรับแผ่นบางเรียบ มาปรับแก้สำหรับวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมไม่ได้



รูปที่ 2.26 ผลการทดสอบของ Courchesne และ Laneville [28]

ในปี ค.ศ.1980 Cheung และ Melbourne [29] ได้ทดสอบวัตถุทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมในการไหลแบบไหลวน จนกระทั่งค่า Re เท่ากับ $1 \cdot 10^6$ และสรุปได้ว่า ค่าการแก้ไขของการปิดกั้น (Blockage Correction) จะมีความสัมพันธ์กับการไหลวนและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ เช่นในกรณีค่าการปิดกั้น 2% ความเข้มของการไหลวน 9% จะได้ค่าแก้ไขของการปิดกั้นดังนี้

$$\Delta C_p = -0.28 \quad \text{สำหรับ } Re = 7 \cdot 10^4$$

$$\Delta C_p = -0.03 \quad \text{สำหรับ } Re = 6 \cdot 10^5$$

ค่าการแก้ไขของการปิดกั้นสามารถให้ผลที่เป็นลบได้ และการเพิ่มอัตราส่วนการปิดกั้น (Blockage Ratio) จะทำให้เพิ่มแรงลากสำหรับการไหลแบบที่มีการไหลวนมากขึ้น

ในปี ค.ศ.1981 Laneville และ Melbourne [30] ได้สรุปว่าค่าแก้ไขตัวประกอบการปิดกั้น (Blockage Correction Factor) สำหรับแผ่นวงกลมบางเรียบจะสัมพันธ์กับความเข้มของการไหลวน (Turbulence Intensity)

ในปี ค.ศ.1982 Melbourne [31] ได้สรุปผลการทดสอบที่ผ่านมาในการไหลแบบ ไหลวนหลาย ๆ ขนาด และได้เสนอสมการเพื่อหาค่าแก้ไขตัวประกอบการปิดกั้นในแบบเชิงเส้น (Linear Form) ดังนี้

$$\Delta C_D = C_D - C_{DC} = \beta C_D \varepsilon \dots \dots \dots (2.21)$$

$$\Delta C_p = C_p - C_{pC} = \beta C_p \varepsilon \dots \dots \dots (2.22)$$

$$\varepsilon = \frac{S}{C} \dots \dots \dots (2.23)$$

โดยที่

$$C_D = \text{สัมประสิทธิ์ของแรงลาก (Drag Force)}$$

$$C_{DC} = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การแก้ไขให้เป็นสภาพการไหลแบบอิสระของแรงลาก}$$

$$C_{pC} = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การแก้ไขให้เป็นสภาพการไหลแบบอิสระของความดัน}$$

$$\beta = \text{ค่าตัวประกอบในการแก้ไขผลจากการปิดกั้น}$$

ค่า β จำเป็นที่จะต้องหาจากกรณีเฉพาะของรูปทรงของวัตถุ ลักษณะการไหลของอากาศ และรูปทรงของอุโมงค์ลม

การแก้ไขของการปิดกั้นในแบบเชิงเส้น (Linear Form) ใช้ไม่ได้ผลเมื่อมีเชิอร์เลเยอร์รีแอตทachment (Shear Layer Reattachment) เข้ามาเกี่ยวข้อง หรือเมื่อค่าอัตราส่วนการปิดกั้น (Blockage Ratio , ε) มีค่าสูงมาก