

## บทที่ 4

### การทดสอบในอุโมงค์ลมและวิธีการศึกษา

#### 4.1 อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ

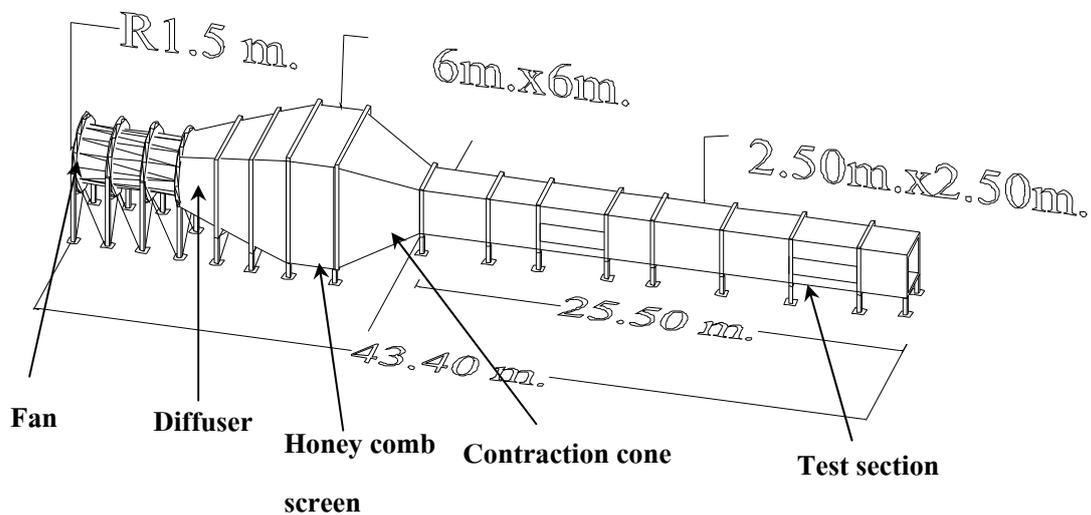
อุโมงค์ลมได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบด้านแรงลมสำหรับโครงสร้างมาเป็นเวลานาน โดยในระยะแรกๆ เป็นการทดสอบด้วยความเร็วลมสม่ำเสมอ (uniform flow) ภายใต้สมมุติฐานว่าแรงดันลมเป็นแบบสถิต และหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่าสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม ซึ่งได้จากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมกับค่าหน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (reference velocity pressure) และค่าประกอบเนื่องจากผลกระทบของลม (gust effect factor)

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ไหวของลมในธรรมชาติ พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของลมบริเวณใกล้พื้นดินจะถูกหน่วงให้ลดลง เนื่องจากสภาพขรุขระของพื้นผิวโลกและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ความสูงเกรเดียนต์ ดังนั้นการทดสอบหาค่าหน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง โดยการทดสอบในอุโมงค์ลมภายใต้ความเร็วลมสม่ำเสมอ จึงไม่เหมาะสม การทดสอบภายในอุโมงค์ลมได้พัฒนาขึ้นจนมีการจำลองสภาพลักษณะลมตามธรรมชาติ และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามความสูงจากระดับพื้นดิน ให้สอดคล้องกับแรงลมธรรมชาติ โดยการสร้างอุโมงค์ลมที่มีความยาวเพียงพอที่จะทำให้บาวคาร์เรียเตอร์ ก่อตัวขึ้นทีละน้อยจากแรงเสียดทานที่ผิวของพื้นอุโมงค์ลม ซึ่งถูกทำให้มีสภาพขรุขระ และมีผลทำให้ลมที่ถูกจำลองมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับลมตามธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มแบบจำลองของอาคารข้างเคียงในบริเวณ โดยรอบอาคารที่พิจารณา เพื่อศึกษาผลกระทบอันทำให้แรงลมที่เกิดขึ้นบนอาคารที่พิจารณาเปลี่ยนแปลงไป

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบ โดยใช้อุโมงค์ลมของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี สร้างร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (TU-AIT wind tunnel) ซึ่งมีขนาดหน้าตัดของอุโมงค์ลม กว้าง 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร และ ยาวประมาณ 25.5 เมตร มีความเร็วลมที่ใช้ทดสอบสูงสุดถึง 20 เมตรต่อวินาที และมีจุดรองรับปรับทิศทางลมได้ 2 ตำแหน่ง แต่ละจุดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร อุโมงค์ลมมีลักษณะยาว และเป็นแบบเปิด (open-circuit) โดยลมจะเข้ามาจากปลายด้านหนึ่งของอุโมงค์ และไหลผ่านบริเวณที่ทดสอบแล้วออกไปสู่ภายนอกอุโมงค์ที่ปลายอีกด้าน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 อุโมงค์ลมที่มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของอุโมงค์ลม

#### 4.2 ข้อกำหนดทางด้านความคล้ายคลึงกัน (similarity requirements)

จากการศึกษาทางด้านอากาศพลศาสตร์ พบว่าค่าหน่วยแรงลมที่เกิดขึ้นบน โครงสร้าง ซึ่งรวมถึงแรงที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นในตัวโครงสร้างเองด้วย ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของลมที่พัดเข้าสู่ตัวโครงสร้างนั้น นั่นคือลักษณะการแปรเปลี่ยนความเร็วลมตามความสูงจากระดับพื้นดิน และความแปรปรวนของลมตลอดจนลักษณะของตัวโครงสร้างเอง

เพื่อให้ผลที่ได้รับจากการทดสอบในอุโมงค์ลม สามารถเป็นตัวแทนของผลที่เกิดขึ้นในสภาพจริงได้ จึงได้มีการตั้งข้อกำหนดทางด้านความคล้ายคลึงกันขึ้นในการควบคุมตัวประกอบ

1. ข้อกำหนดทางด้านเรขาคณิต (geometric requirements) โดยการควบคุมส่วนมิติ  $D$  ของแบบจำลองและต้นแบบให้สอดคล้องกัน
  2. ข้อกำหนดทางด้านจลนศาสตร์ (kinematics requirements) โดยการควบคุมค่าค่าความเร็วลดรูป  $UDn$  ของแบบจำลองและต้นแบบให้สอดคล้องกัน
  3. ข้อกำหนดทางด้านพลศาสตร์ (dynamic requirements) โดยการควบคุมค่าตัวเลขเรโนลด์ (Reynold Number) ของแบบจำลองและต้นแบบให้สอดคล้องกัน
- ดังนั้นการควบคุมข้อกำหนดทางด้านเรขาคณิต และทางด้านจลนศาสตร์ ซึ่งก็คือการควบคุม อัตราการย่อส่วน มิติ, ความเร็ว, เวลา และความถี่ ระหว่างแบบจำลอง และต้นแบบ

#### 4.2.1 อัตราการย่อส่วนมิติ (dimension scaling)

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (4.1)$$

โดยที่

$L_m$  คือ ความกว้างของแบบจำลอง

$L_p$  คือ ความกว้างของต้นแบบ

#### 4.2.2 อัตราการย่อส่วนทางด้านเวลา (time scaling)

$$\lambda_T = \frac{T_m}{T_p} \quad (4.2)$$

โดยที่

$T_m$  คือ เวลาที่ใช้สำหรับแบบจำลอง

$T_p$  คือ เวลาที่ใช้สำหรับต้นแบบ

### 4.2.3 อัตราการย่อส่วนทางด้านความเร็ว (velocity scaling)

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} \quad (4.3)$$

โดยที่

$V_m$  คือ ความเร็วลมที่ใช้สำหรับแบบจำลอง

$V_p$  คือ ความเร็วลมที่ใช้สำหรับต้นแบบ

ความเร็วลมที่ใช้สำหรับแบบจำลองดังสมการที่ (4.4)

$$V_m = \frac{L_m}{T_m} \quad (4.4)$$

ความเร็วลมที่ใช้สำหรับต้นแบบดังสมการที่ (4.5)

$$V_p = \frac{L_p}{T_p} \quad (4.5)$$

ดังนั้น แทนสมการที่ (4.4) และ(4.5) ในสมการ(4.3)คือ

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m}{L_p} \frac{T_p}{T_m} \quad (4.6)$$

$$\lambda_v = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} \quad (4.7)$$

อัตราการย่อส่วนทางด้านมิติมักจะถูกกำหนดขึ้นจากความเหมาะสมของขนาดแบบจำลอง เปรียบเทียบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม ขณะที่อัตราการย่อส่วนทางด้านความเร็ว จะพิจารณาใช้สัดส่วนระหว่างความเร็วลมสูงสุดของแหล่งกำเนิดลม และความเร็วลมสูงสุดที่ระดับความสูงอ้างอิง ดังนั้นเวลาที่ต้องการสำหรับแบบจำลอง,  $T_m$  สามารถหาได้จากสมการที่ (4.8)

$$T_m = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} \times T_p \quad (4.8)$$

สำหรับความเร็วลมอ้างอิงที่มาจากข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมงค่าของเวลาสำหรับ ต้นแบบ,  $T_p$  จะมีค่าเป็น 1 ชั่วโมง หรือ 3600 วินาที ดังนั้นจะได้จากสมการที่ (4.8)

$$T_m = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} \times 3600 \quad (4.9)$$

ค่าของ  $T_m$  ที่ได้จากสมการที่ (4.9) จะถูกนำไปใช้ในการกำหนดจำนวนข้อมูลและระยะเวลา ในการเก็บข้อมูลที่เหมาะสมกับการทดสอบ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ในสภาพจริง

### 4.3 การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมของโครงการ อาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติ

#### 4.3.1 รายละเอียดและตำแหน่งที่ตั้งของโครงการอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติ

โครงการอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติ (national energy complex) ได้รับการจัดตั้งขึ้นเพื่อ เป็นศูนย์กลางการพลังงานของชาติตั้งอยู่บริเวณมุดถนนวิภาวดีรังสิต และพหลโยธิน ภายใน โครงการ ประกอบด้วยอาคารสูง และอาคารขนาดใหญ่จำนวน 3 อาคาร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ได้แก่ อาคาร A เป็นอาคารรูปทรงหยดน้ำมัน 2 หยด (two-dripping shape) วางเชื่อมต่อกันมีความสูง 145.35 เมตร และ 132.85 เมตร และจำนวนชั้นเท่ากับ 36 และ 33 ชั้นตามลำดับ มีความกว้างรวม 80 เมตรความลึก 60 เมตร อาคาร B ซึ่งเป็นอาคารสำนักงานสูง 25 ชั้น มีความกว้าง 58 เมตรความ ลึก 37.2 เมตร ความสูง 101.65 เมตร และอาคาร C ซึ่งเป็นส่วนpodium มีความสูง 36.85 เมตร วาง ซิดกัน โดยมีลักษณะเป็นอาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีด้านตรงจำนวน 3 ด้าน และมีการโค้งมนที่มุม อาคาร ยกเว้นด้านที่ติดกับอาคาร A ซึ่งมีลักษณะโค้งเพื่อให้มีความสอดคล้องกับรูปร่างหยดน้ำมัน ของอาคาร A กลุ่มอาคารดังกล่าวจัดเป็นอาคารที่มีความเป็นเอกลักษณ์ทางสถาปัตยกรรม อย่างไรก็ตาม ด้ในส่วนของวิศวกรรมโครงสร้าง อาคารรูปทรงหยดน้ำเป็นรูปทรงที่ซับซ้อน ซึ่งไม่สามารถหาค่า สัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมได้โดยตรง จากมาตรฐานการคำนวณหน่วยแรงลม ประกอบกับผลของ อาคารข้างเคียงและอาคารโดยรอบ ทำให้ผลของแรงลมที่มีต่อ โครงสร้างมีความซับซ้อนมากขึ้น กลุ่มวิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างและผนังกระจก จึงกำหนดให้มีการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ ลม เพื่อหาค่าหน่วยแรงลมที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบผนังภายนอกของอาคาร ให้ได้อาคารที่ มีความปลอดภัย และการออกแบบผนังภายนอกอาคารเหมาะสม



รูปที่ 4.3 โครงการอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติ

#### 4.3.2 การเตรียมแบบจำลองของโครงการ และบริเวณอาคารข้างเคียงโดยรอบโครงการ

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมทางด้านขนาดของอุโมงค์ลม ความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ และคุณสมบัติของเครื่องมือวัดแรงดันลม อัตราการย่อส่วนมิติของอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติ ได้รับการจำลองโดยใช้การย่อส่วนมิติเท่ากับ 1/200 รวมถึงอาคารข้างเคียงโดยรอบภายในรัศมี 200 เมตร อาคารที่มีความสูงมากกว่า 80 เมตร จะถูกจำลองย่อส่วนให้มีรายละเอียดของอาคารภายนอกตามสภาพความเป็นจริง ซึ่งขณะที่อาคารที่มีความสูงต่ำกว่า 80 เมตร จะถูกจำลองย่อส่วนให้มีสภาพเป็นกล่องสี่เหลี่ยมในลักษณะต่อเนื่องกันครอบคลุมพื้นที่พิจารณา และทิศทางลมของการทดสอบในอุโมงค์ลมดังแสดงในรูปที่ 4.13

แบบจำลองของอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติเป็นแบบจำลองแบบแข็ง (rigid model) ทำจากวัสดุประเภท acrylic ใสมีความหนา 3 มม. เพื่อให้สามารถมองเห็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายใน

นอกจากการจำลองรูปทรงภายนอกอาคาร โดยการใช้การย่อส่วนมิติระหว่างค่าของแบบจำลองต่อค่าของอาคารจริงเท่ากับ 1/200 แล้ว การกำหนดอัตราการย่อส่วน ความเร็ว เวลา และความถี่ ให้มีความสอดคล้องกันตามหลักการของการจำลองแบบทดสอบในอุโมงค์ลม ASCE (1999) ในการศึกษาี้ได้เลือกใช้ค่า ตามที่แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราการย่อส่วนที่ใช้ในงานศึกษาี้	
การย่อส่วน	ค่าที่ใช้ในงานศึกษาี้
การย่อส่วนมิติ	1/200
การย่อส่วนความเร็ว	$12.3/42.7=1/3.5$
การย่อส่วนเวลา	$(1/200)/(1/3.5)=1/57.1$
การย่อส่วนความถี่	57.1

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมกระทำที่ความเร็วลมเฉลี่ย 12.3 เมตรต่อวินาที ที่ความสูงเกรเดียนต์ (ที่ระดับความสูงภายในอุโมงค์ลม) การเก็บข้อมูลค่าความดันลมในแต่ละจุดจะทำการเก็บเป็นระยะเวลาทั้งสิ้นเท่ากับ  $3600 \times (1/57.1) = 63$  วินาที ซึ่งจะมีค่าเทียบเท่ากับระยะเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับอาคารจริง และอัตราการเก็บข้อมูล (sampling frequency) ได้กระทำที่ความถี่ 400 ข้อมูลต่อวินาที ซึ่งสามารถเก็บรายละเอียดความแปรปรวนของความดันลมมีความถี่เท่ากับ  $(400/2)/57.1 = 3.5$  Hz สำหรับอาคารจริงไว้ได้ ทำให้หน่วยแรงดันลมที่วัดได้สามารถออกแบบระบบโครงสร้างหลักต้านแรงลม และส่วนประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้างหลัก เช่น ผนังของอาคาร รวมทั้งอุปกรณ์ยึด เป็นต้น

### 4.3.3 การจำลองสภาพลักษณะลมธรรมชาติในอุโมงค์ลม

โครงการอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติตั้งอยู่ในบริเวณมุดถนนวิภาวดีรังสิต และพหลโยธิน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือสภาพภูมิประเทศที่มีสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่กระจายอยู่ ปัจจัยหลักที่สำคัญในการจำลองลักษณะลมธรรมชาติในอุโมงค์ลม ให้มีลักษณะเหมือน กับสภาพลมที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ตั้งของอาคารจริง การจำลองลม ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรก เป็นการจำลองลมที่ห่างจากสถานที่ก่อสร้าง (far field) มีลักษณะเป็น boundary layer flow ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองโดยใช้ spires ที่มีพื้นที่รับลมเป็นสามเหลี่ยม สูง 1.83 เมตร ฐานกว้าง 0.26 เมตร และ roughness block รูปลูกบาศก์ ขนาด 0.1 เมตร วางห่างกัน 0.6 เมตร, ขนาด 0.05 เมตรวางห่างกัน 0.3 เมตร และ 0.025 เมตร วางห่างกัน 0.15 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และแสดงการติดตั้ง spires และ roughness block ในอุโมงค์ลม ดังแสดงในรูปที่ 4.4

คุณสมบัติที่สำคัญของการจำลองสภาพลักษณะลมในอุโมงค์ ได้แก่ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆเหนือพื้นดิน (variation of mean wind speed with height) สภาพความแปรปรวนของลมที่ระดับความสูงต่างๆเหนือพื้นดิน (turbulence intensity profile) และลักษณะของลมกระโชกในช่วงความถี่ต่างๆ (power spectral density of longitudinal) ค่าความเร็วลมที่ได้จากการจำลอง ณ ความสูงต่างๆเหนือพื้นอุโมงค์ลม ได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดลมที่เรียกว่า hot wire anemometer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง เหมาะสำหรับการใช้วัดค่าความเร็วลมที่มีความแปรปรวนดังเช่นลักษณะของลมตามธรรมชาติ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยและสภาพความแปรปรวนของลมที่ความสูงต่างๆ รวมทั้งลักษณะของลมกระโชกในช่วงความถี่ต่างๆที่ได้จากการจำลองในอุโมงค์ลมเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดขึ้นจริงสำหรับสภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง และแบบชานเมืองดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง 4.12

ตามข้อกำหนดของ ASCE (1999) การจำลองช่วงที่สอง เป็นการจำลองลมบริเวณที่ก่อสร้าง (near field) โดยการจำลองอาคารข้างเคียง กลุ่มอาคารดังกล่าวตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง นอกจากนี้อาคารโดยรอบที่ตั้งอยู่ใกล้กับกลุ่มอาคาร อาจจะส่งผลกระทบต่อค่าความดันลมสำหรับลมที่กระทำในบางทิศทางได้อย่างมาก

งานวิจัยนี้ได้เลือกความสูงเกรเดียนต์เป็นตำแหน่งอ้างอิง โดยกำหนดทิศทางลมที่กระทำแบบจำลองในอุโมงค์ลม แต่ละทิศทางลมจะกระทำที่ละ 22.5 องศา รวมทั้งสิ้น 16 ทิศทาง ซึ่งการกำหนดทิศทางลมนี้มีความละเอียดเพียงพอสำหรับหาค่าหน่วยแรงดันลมสูงสุด สำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคาร

#### 4.3.4 ผลของสิ่งกีดขวางภายในอุโมงค์ลม (Blockage Effects)

จากข้อกำหนดของมาตรฐานการคำนวณแรงลม มยผ.1311-50 (2550) พื้นที่หน้าตัดบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางลม (projected area) ของอาคารและสิ่งปลูกสร้างโดยรอบทั้งหมดรวมกัน ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 8 ของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม ณ ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ มิเช่นนั้นต้องทำการปรับแก้ผลการทดสอบโดยคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นจากการปิดกั้นของลม นอกจากนี้แบบจำลองอาคารที่ทำการทดสอบควรมีความสูงไม่เกินครึ่งหนึ่งของความสูงอุโมงค์ลม และติดตั้งอยู่ตรงกลางหรือในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดศูนย์กลางของระบบพื้นหมุนภายในอุโมงค์ลม โดยที่

( $A_w$ ) คือ พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม เท่ากับ  $2.5 \times 2.5 = 6.25 \text{ m}^2$

( $A_m$ ) คือ พื้นที่หน้าตัดบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางลมของแบบจำลอง และอาคารข้างเคียง

ตารางที่ 4.2 แสดงพื้นที่หน้าตัดบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางลมของแบบจำลอง

Type	Scale 1:200 (m <sup>2</sup> )
อาคารที่จอดรถ B	0.0568225
Building B	0.091469
Podium (Building C)	0.02463825
Building A	0.2848
ตึกป.ต.ท. เก้า 1	0.00765
ตึกป.ต.ท. เก้า 2	0.013848

$$A_m = 0.47922775$$

อัตราส่วนของสิ่งกีดขวาง ( $A_m/A_w$ ) = 7.667 % ไม่ควรเกิน 8 %

#### 4.3.5 การวัดความดันลมในอุโมงค์ลม

การวัดความดันที่เกิดขึ้นบนผิวของแบบจำลอง ณ ตำแหน่งใดๆ โดยทำการเจาะรูเพื่อติดตั้งท่อส่งแรงดัน ที่จุดต่างๆที่ต้องการวัดความดันลม แล้วทำการต่อท่อพลาสติก (PVC) ไสขนาด 1.37 มม. จากท่อส่งแรงดันเข้าสู่ชุดควบคุมที่เรียกว่า pressure scanivalve ที่ทำหน้าที่เป็นตัวคัดเลือกจุดที่ทำการวัดแรงดันลมเข้าสู่เครื่องมือวัดแรงดันลม (pressure transducer) ซึ่งแรงดันลมที่วัดได้จากเครื่องมือวัดแรงดันลมจะถูกกรองหรือลดทอนสัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ โดยจะกรองสัญญาณที่มี

ตารางที่ 4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในอุโมงค์ลม

Hot-film Anemometer	เครื่องมือวัดความเร็วลมที่สามารถตรวจวัดค่าความแปรปรวนของลมที่จำลองในอุโมงค์ลม
Spires และ Roughness Elements	อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองลมให้มีลักษณะเหมือนกับสภาพลมตามธรรมชาติ
หลอดพิโทต์ความดันสถิต (Pitot static tube)	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความดันลมสถิต (static pressure) และค่าความดันพลวัต (dynamic pressure) ณ ตำแหน่งอ้างอิง
ท่อส่งแรงดัน (Pressure Taps)	อุปกรณ์วัดความดันบนแบบจำลอง มีลักษณะเป็นท่อโลหะขนาดเล็กที่ติดตั้งฉากกับผิวของแบบจำลอง
ชุดควบคุม (Pressure scanner)	อุปกรณ์สำหรับใช้ควบคุม/คัดเลือกจุดที่ทำการวัดแรงดันลมเข้าสู่เครื่องมือวัดแรงดันลม (pressure transducer)
เครื่องมือวัดแรงดันลม (Pressure transducer)	เครื่องมือวัดแรงดันลม
ตัวกรองสัญญาณ (Low Pass Filter)	อุปกรณ์กรอง ลดทอนสัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ โดยจะกรองสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ออกไป
Computer and Data acquisition device	อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลและประมวลผลการทดสอบ

ค่าความดันลมสถิต และค่าความดันพลวัตที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่เรียกว่า หลอดพิโทต์ ความดันสถิต ที่ความสูงเกรเดียนต์เป็นตำแหน่งอ้างอิง โดยต่อเข้าเครื่องมือวัดแรงดันลมจะกรองสัญญาณ และเก็บข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์

#### 4.3.6 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม

ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย โดยเป็นอัตราส่วนของค่าความดันลมที่ระดับใดๆ ต่อค่าความดันพลวัตที่ระดับอ้างอิง สำหรับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ค่าความดันลมที่ระดับใดๆ บนแบบจำลอง จะถูกทำให้เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยด้วยการหารค่าความดันลมพลวัตซึ่งที่ระดับความสูงเกรเดียนต์ของบาวคาร์ลีเออร์ในอุโมงค์ลม ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

- รูปร่างของอาคาร และอาคารข้างเคียง
- ทิศทางของแรงลมที่เข้ามากระทำของอาคาร
- ลักษณะของการจำลองลักษณะลมธรรมชาติในอุโมงค์ลม

ค่าความดันลมที่เกิดขึ้นบนผิวของแบบจำลอง ที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมจะถูกนำมาแปลงให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความดันลม  $C_p$  จากสมการที่ 4.10 และ 4.11

$$C_p = \frac{(P_x - P_o)}{q} \quad (4.10)$$

$$q = \frac{1}{2} \rho U_r^2 \quad (4.11)$$

โดยที่

$P_x$	คือ ค่าความดันลมที่วัดได้ ณ ตำแหน่งใดๆบนแบบจำลอง
$P_o$	คือ ค่าความดันลมสถิตที่ระดับความสูงเกรเดียนต์
$q$	คือ ค่าความดันลมพลวัตที่ระดับความสูงเกรเดียนต์
$\rho$	คือ ค่าความหนาแน่นของมวลอากาศ
$U_r$	คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงเกรเดียนต์

โดยค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมสามารถนำมาวิเคราะห์ทางสถิติอย่างง่ายเพื่อหาค่าสูงสุดต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยสามารถนิยามได้ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันลมสูงสุด,  $\hat{C}_p$

$$\hat{C}_p = \frac{\hat{p} - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_r^2} \quad (4.12)$$

ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมดูดสูงสุด,  $\check{C}_p$

$$\check{C}_p = \frac{\check{p} - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_r^2} \quad (4.13)$$

ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย,  $\bar{C}_p$

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{p} - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_r^2} \quad (4.14)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมแปรปรวน,  $C'_p$

$$C'_p = \sigma_{C_p} = \frac{\sqrt{\bar{p}'^2}}{\frac{1}{2} \rho U_r^2} \quad (4.15)$$

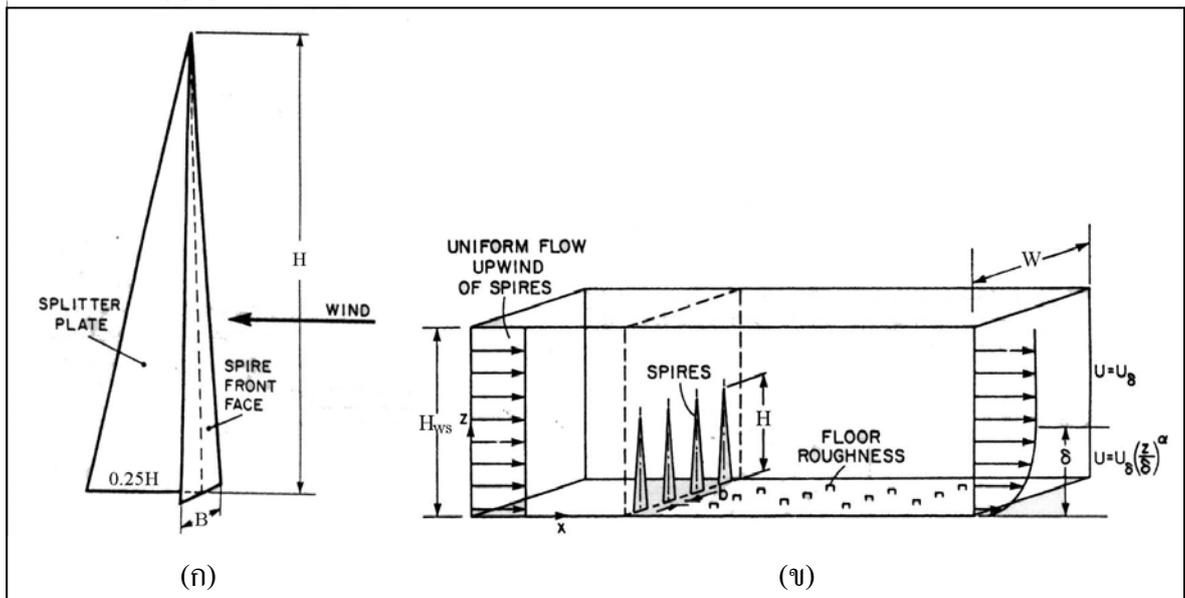
โดยที่

$\hat{p}$ ,  $\check{p}$  และ  $\bar{p}$  คือค่าหน่วยแรงดันลมสูงสุด, ค่าหน่วยแรงลมดูดสูงสุด และค่าหน่วยแรงลมเฉลี่ยที่วัดได้ ณ ตำแหน่งใดๆบนแบบจำลองในช่วงเวลา  $T_m$

$\sqrt{\bar{p}'^2}$  คือค่าความดันลมแปรปรวนที่วัดได้ ณ ตำแหน่งใดๆบนแบบจำลองในช่วงเวลา  $T_m$

$T_m$  คือระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากช่วงเวลา 1 ชั่วโมงในสภาพจริง

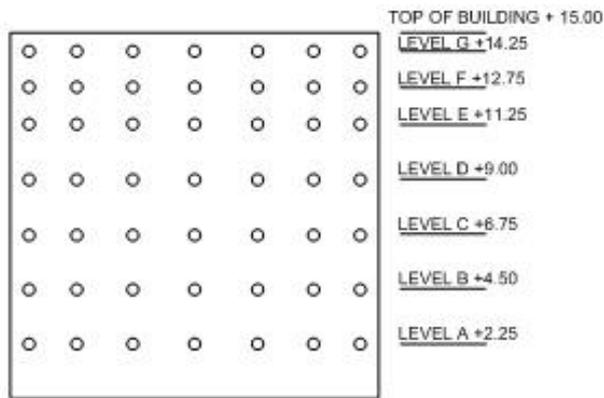
จากการผลทดสอบในลักษณะนี้ อาจจะมีการเบี่ยงเบนไปจากค่าสูงสุด เนื่องจากความแปรปรวนของค่าความดันลมตลอดระยะเวลาของการเก็บข้อมูลในระหว่างการทดสอบ ซึ่งถือเป็นพฤติกรรมของความดันลมที่เกิดขึ้นบนโครงสร้าง ดังนั้นในกรณีที่ทำค่าสูงสุดไปใช้เพื่อการออกแบบ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพิ่มเติม เพื่อหาค่าสูงสุดโดยใช้ข้อมูลดังกล่าวซึ่งจะทำให้ได้ค่าสูงสุดที่มีความถูกต้องมากขึ้น



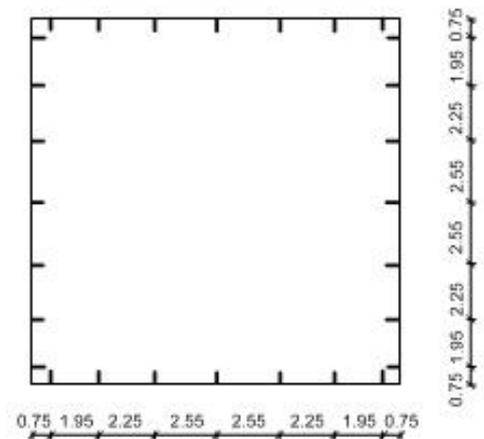
รูปที่ 4.4 แสดงการติดตั้ง spires และ roughness block ในอุโมงค์ลม

#### 4.3.7 การเทียบความถูกต้องของระบบการวัดความดัน

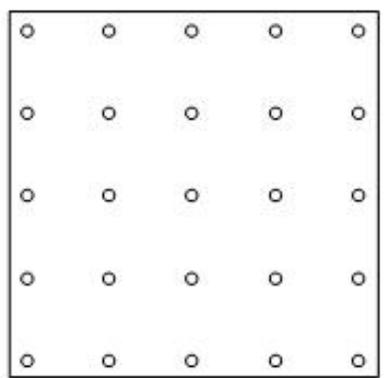
เพื่อให้ระบบการตรวจวัดความดันในอุโมงค์ลมมีความถูกต้อง จึงมีการทดสอบแบบจำลอง รูปทรงลูกบาศก์ที่มีอัตราส่วนความกว้าง ความยาว และความสูง เท่ากับ 15:15:15 ซม. (1:1:1) โดยทำการติดตั้งท่อส่งแรงดันบนด้านหน้า ด้านข้าง ด้านบน และด้านหลัง เพื่อให้สามารถวัดค่าความดันลมที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ทั้งสิ้น 7 ระดับ รวมทั้งสิ้น 221 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยของแบบจำลอง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนด้านหน้า ด้านข้าง ด้านบน และด้านหลัง เป็นค่าเฉลี่ยที่ตำแหน่งของจุดด้านซ้าย และขวาที่วัดจากกึ่งกลางของผิวด้านนอก ส่วนที่ผนังด้านข้างเป็นค่าเฉลี่ยที่ตำแหน่งเดียวกันของผนังด้านข้างซ้ายและด้านขวาของแบบจำลอง ผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 4.6 และผลการทดสอบที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมเฉลี่ยกับผลการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมของ Banies (1963) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ผนังภายนอกของแบบจำลองเชิงรูปทรงลูกบาศก์ ที่มีอัตราส่วนความกว้าง ความยาว และความสูง เท่ากับ 30:30:30 ซม. (1:1:1) ในการจำลองลมตามธรรมชาติแบบปั่นป่วน (turbulent boundary-layer flow) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย เนื่องจากการจำลองลมตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นในการทดสอบที่แตกต่างกัน แต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยที่ด้านหน้า ด้านข้าง ด้านบน และด้านหลัง มีความคล้ายคลึงกัน



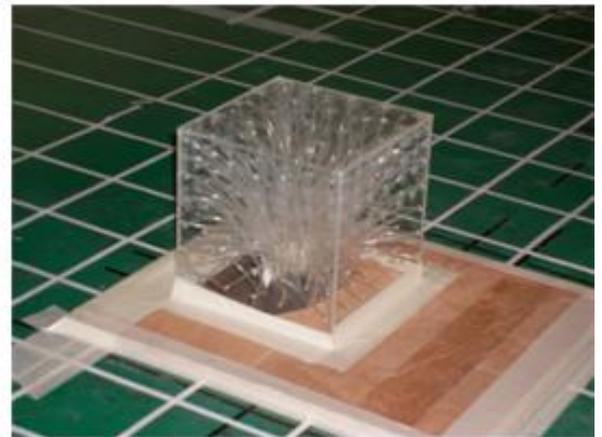
ก)



ข)



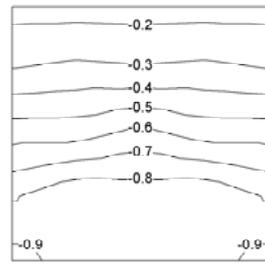
ค)



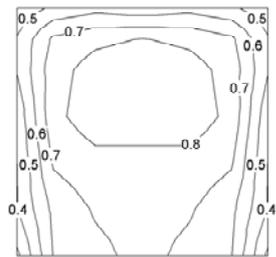
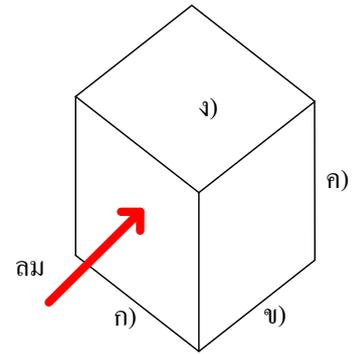
ง)

รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการติดตั้งท่อส่งแรงดันของอาคารเดี่ยว

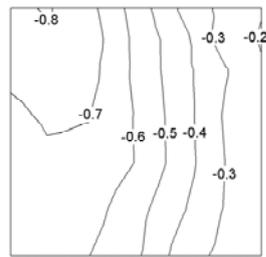
ก.) รูปด้านข้าง ข.) รูปตัด และ ค.) รูปด้านบน



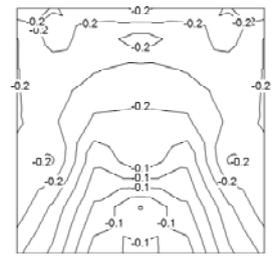
ง) หลังคา



ก) ผนังด้านต้นลม

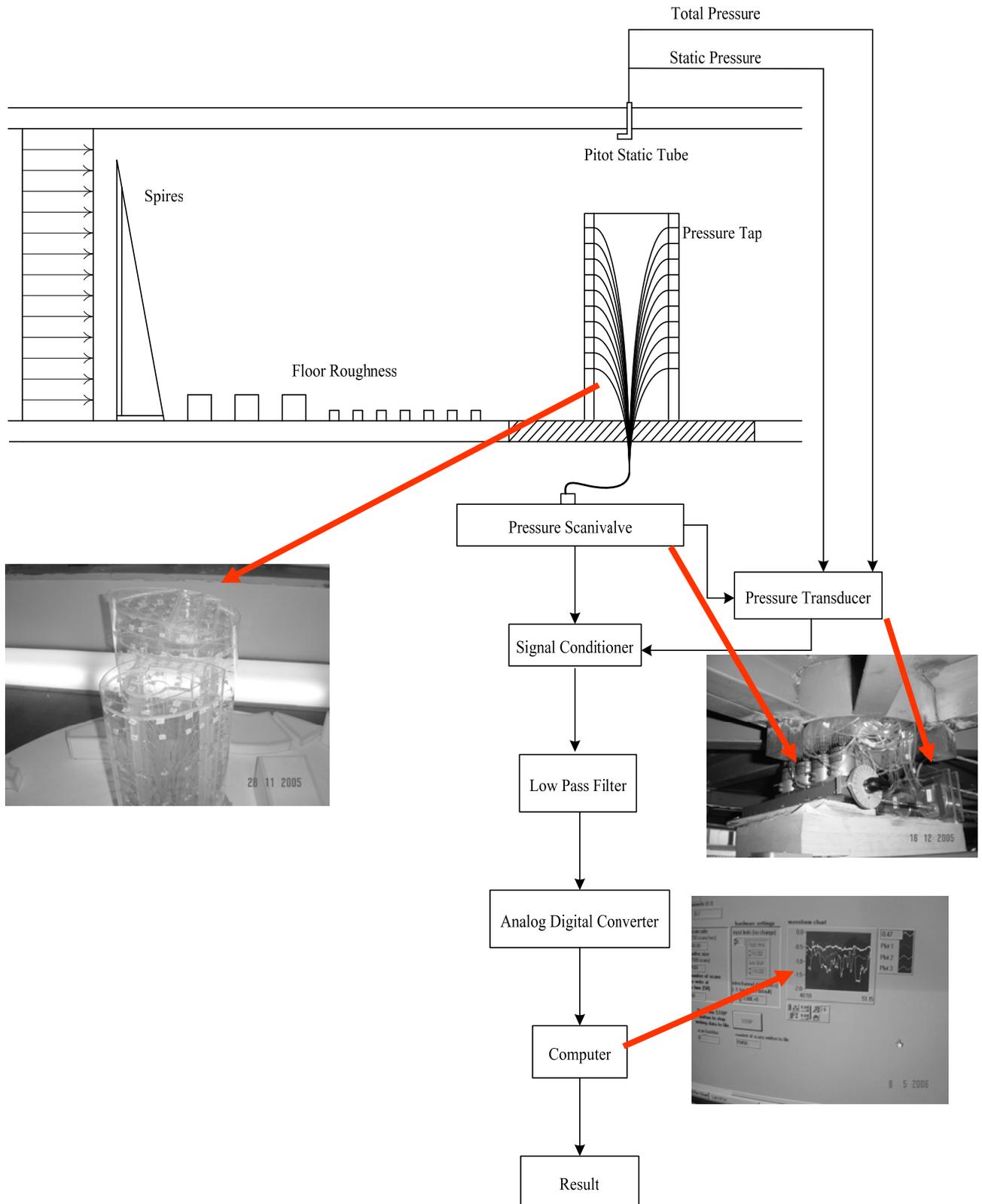


ข) ผนังด้านข้าง



ค) ผนังด้านท้ายลม

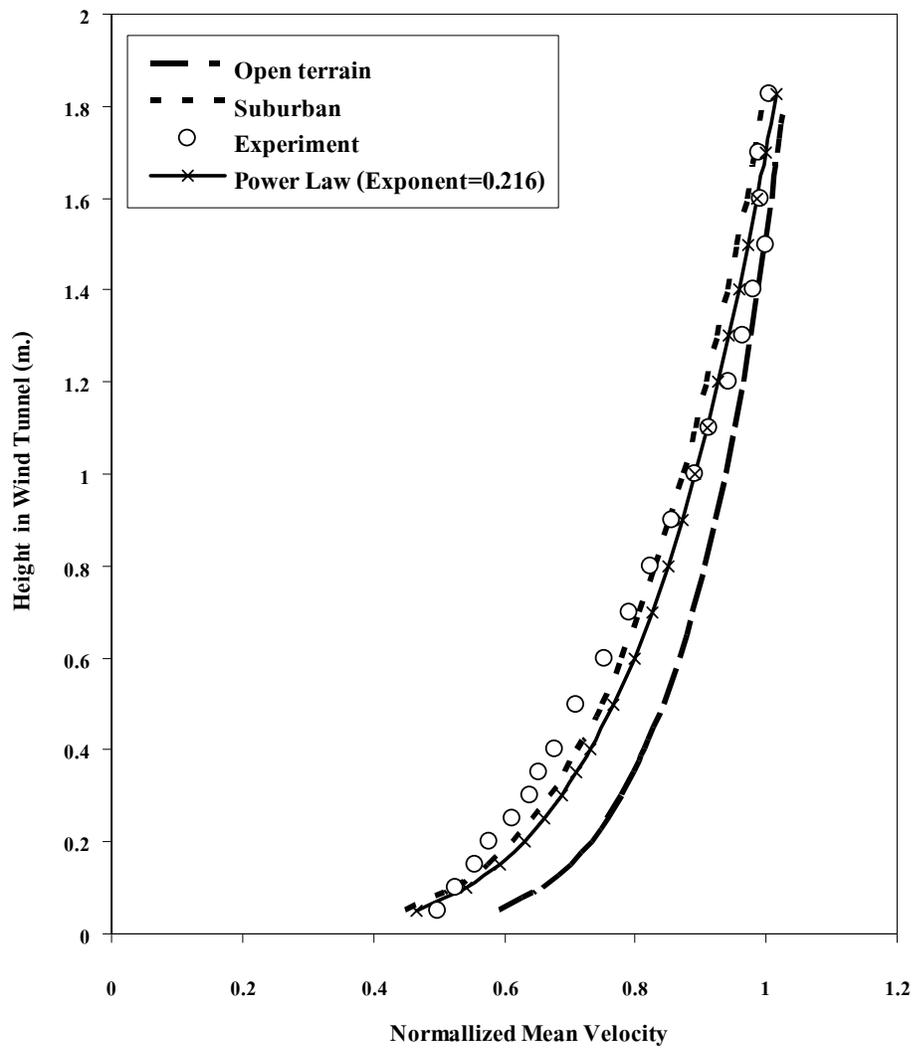
รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยของแบบจำลองรูปทรงลูกบาศก์  $15 \times 15 \times 15$  ซม.  
ที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม



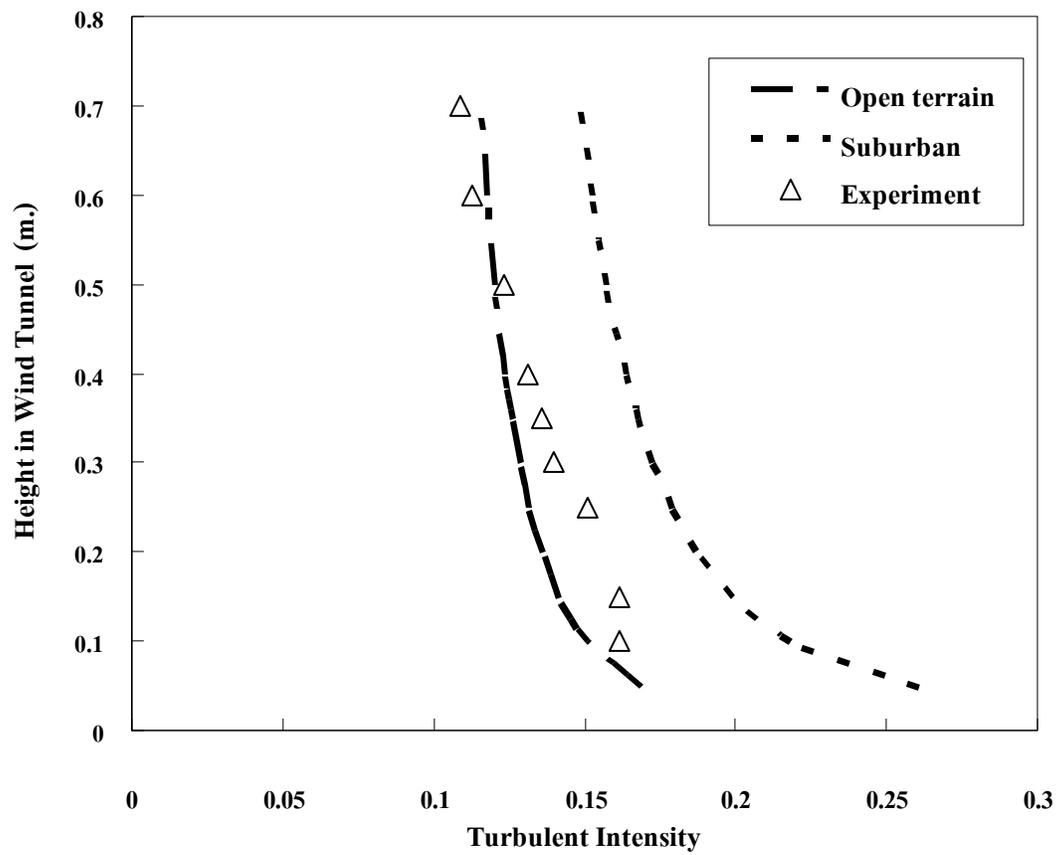
รูปที่ 4.8 ขั้นตอน และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความดันลม



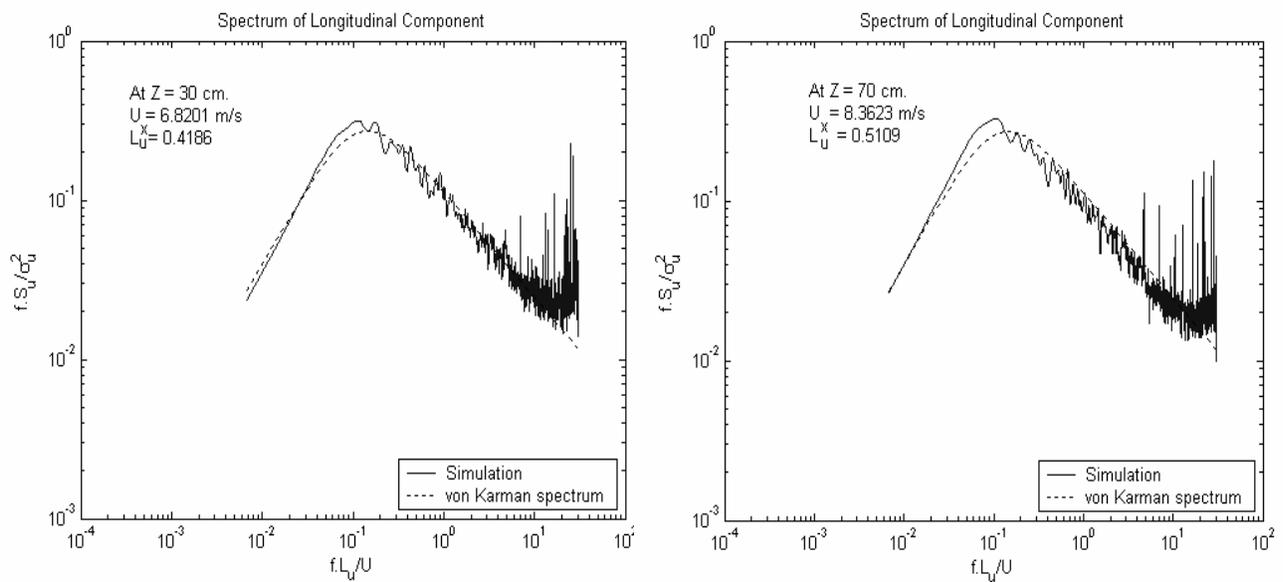
รูปที่ 4.9 Spires และ Roughness Element ที่ใช้ในการจำลองสภาพลม



รูปที่ 4.10 ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆในอุโมงค์ลม

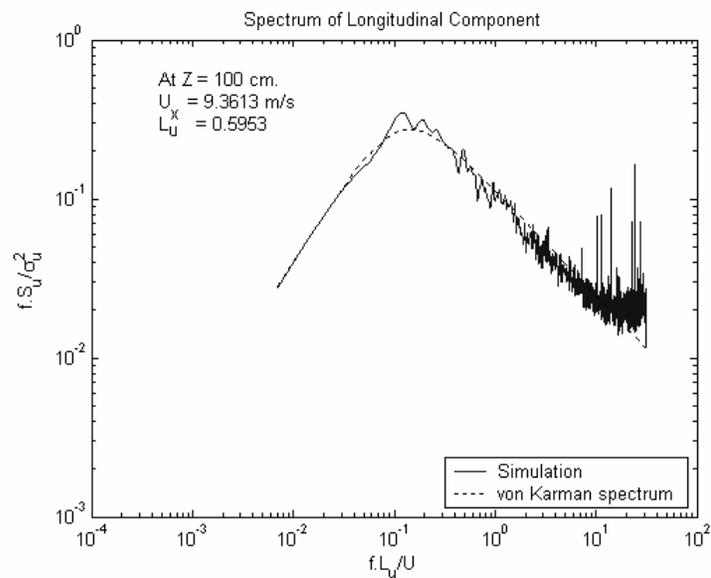


รูปที่ 4.11 สภาพความแปรปรวนของลมที่ระดับความสูงต่างๆในอุโมงค์ลม



ก)

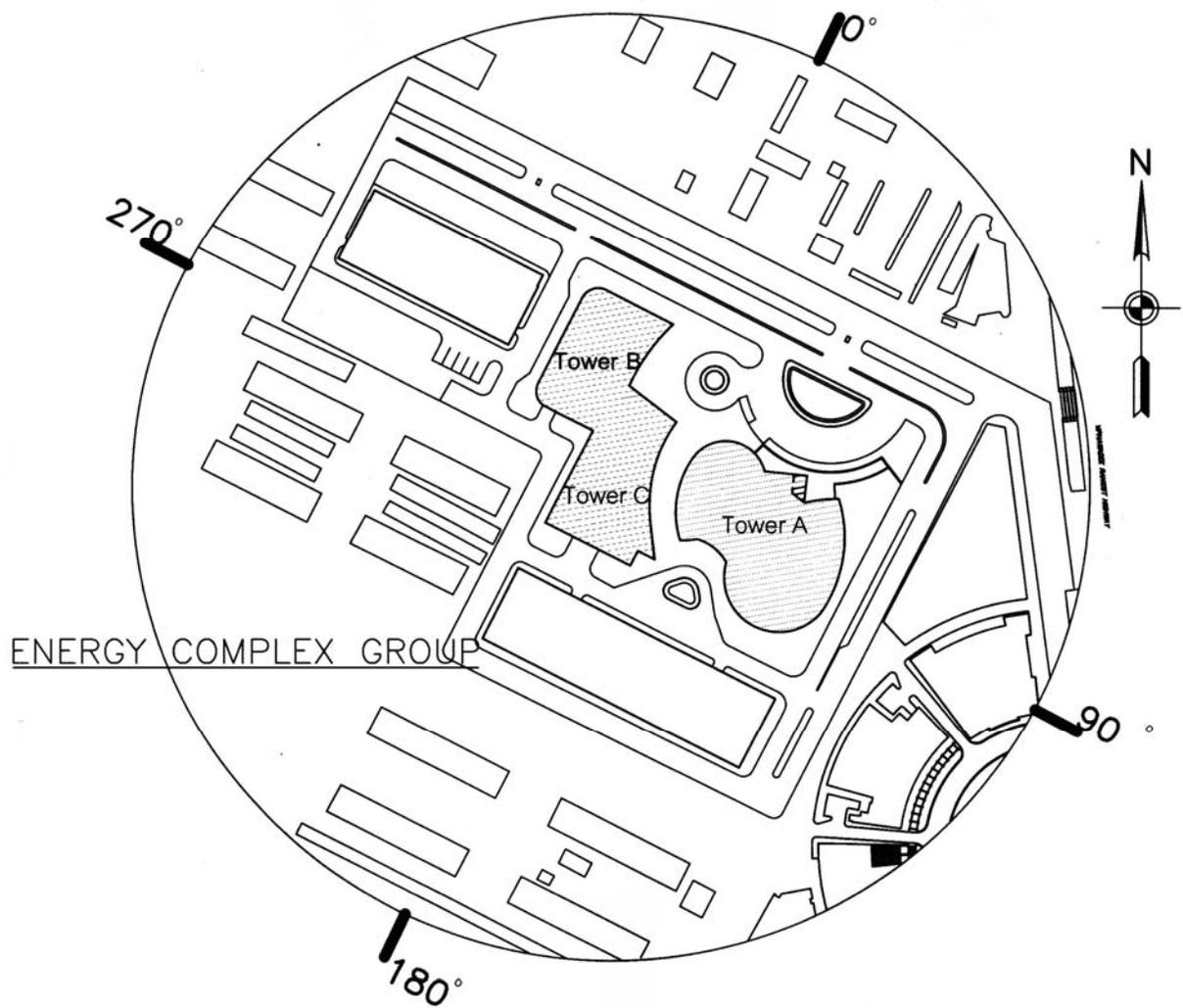
ข)



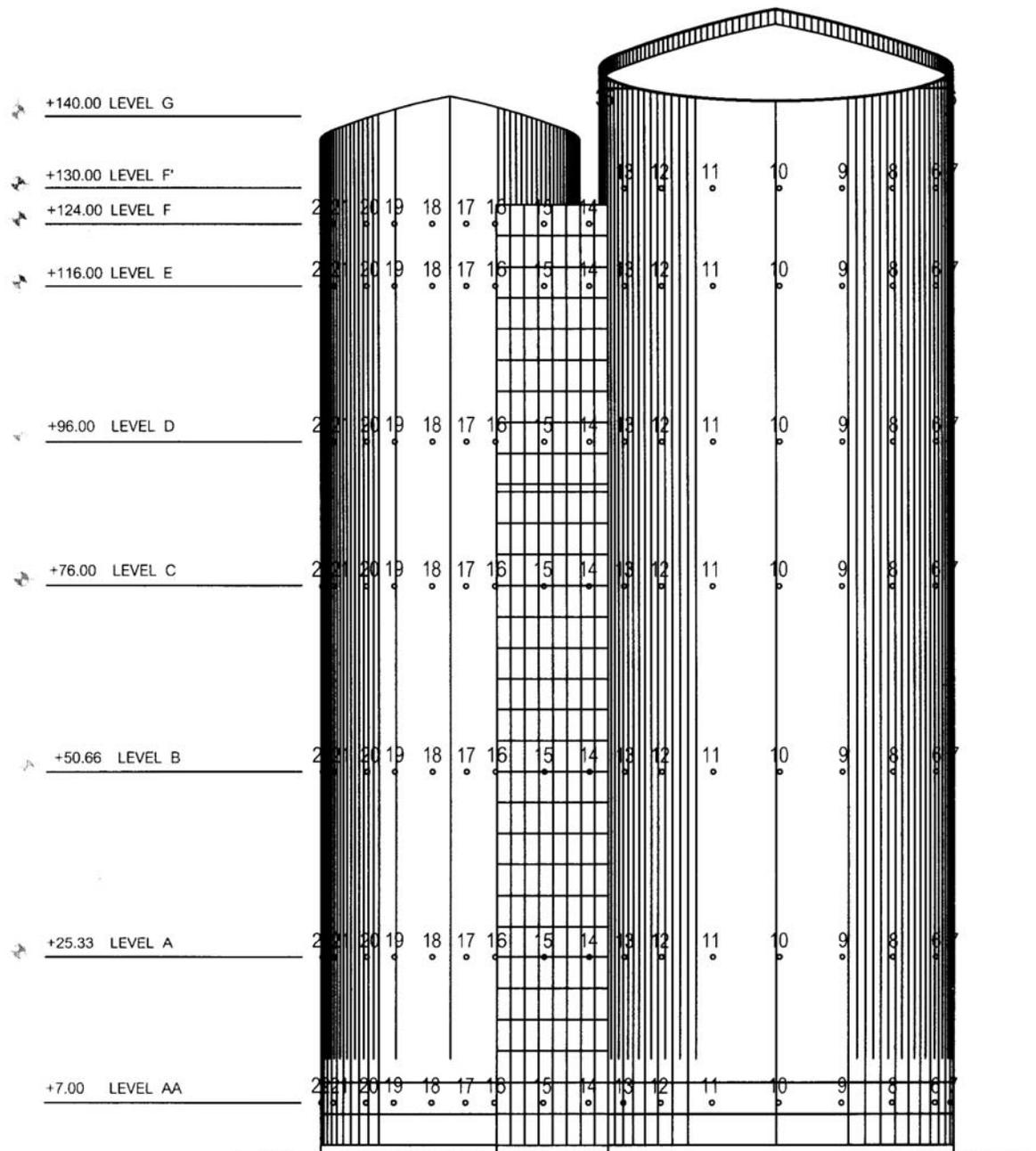
ค)

รูปที่ 4.12 สเปกตรัมของการแปรปรวนของความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆในอุโมงค์ลม

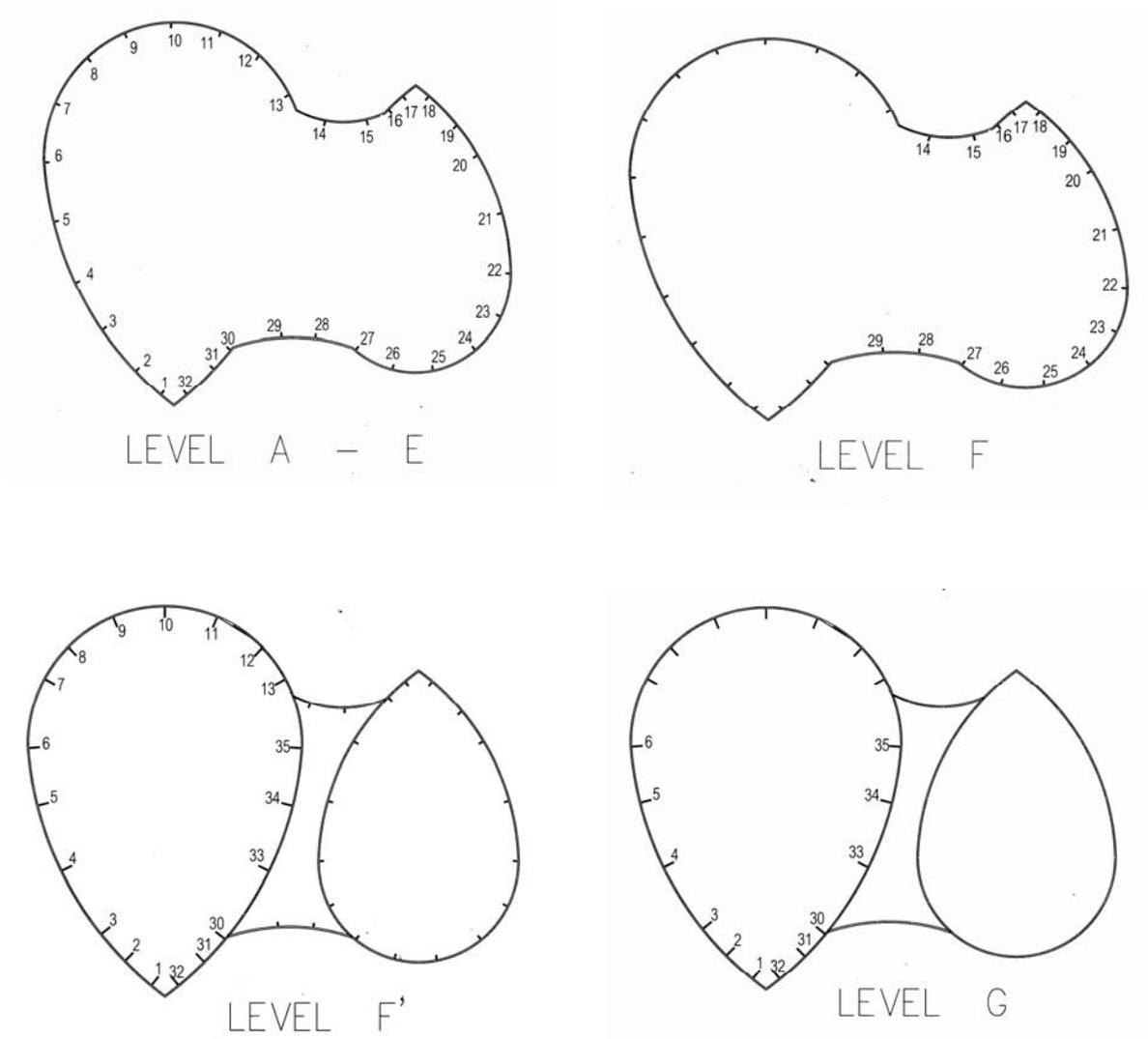
ก) ความสูง 30 ซม. ; ข) ความสูง 70 ซม. ; และ ค) ความสูง 100 ซม.



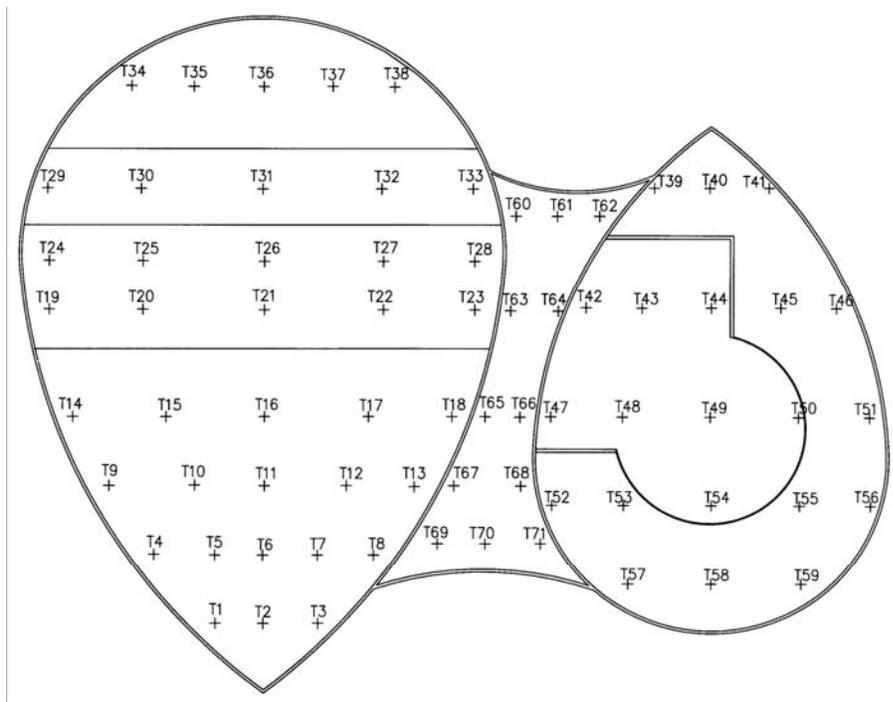
รูปที่ 4.13 รูปแปลนแสดงตำแหน่งของโครงการอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติ และอาคารข้างเคียงในรัศมี 200 เมตร และทิศทางลมของการทดสอบในอุโมงค์ลม



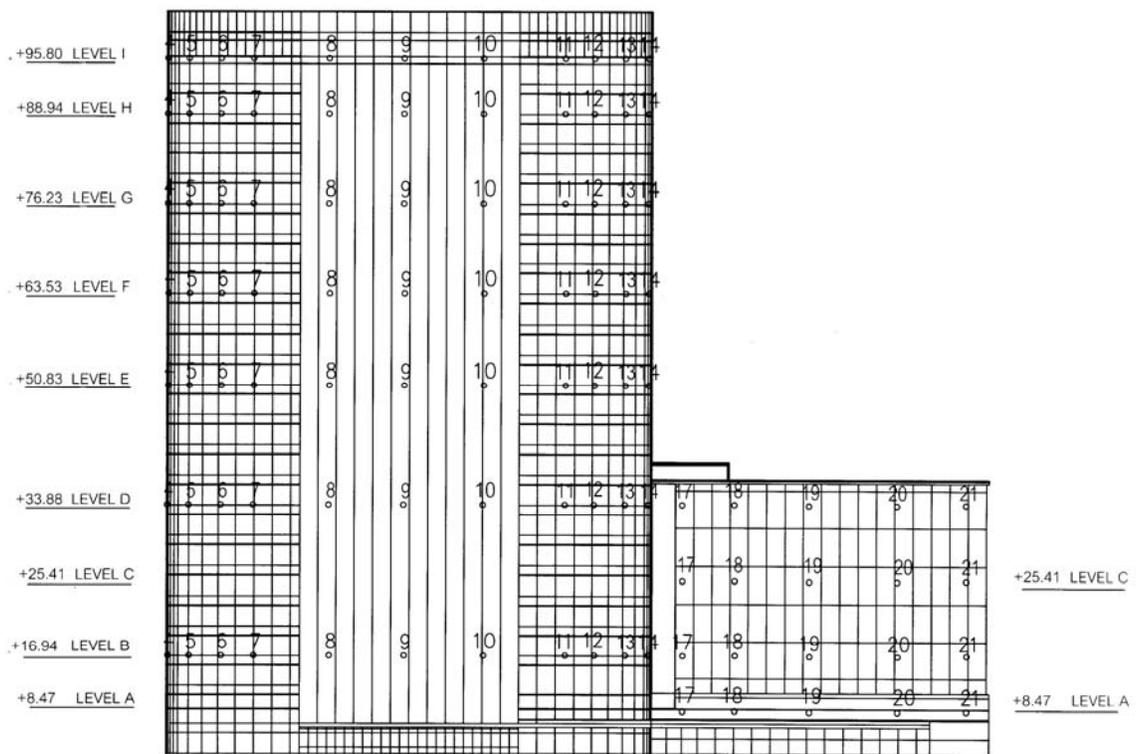
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งติดตั้งท่อส่งแรงดันของแบบจำลองอาคาร A ด้านข้าง



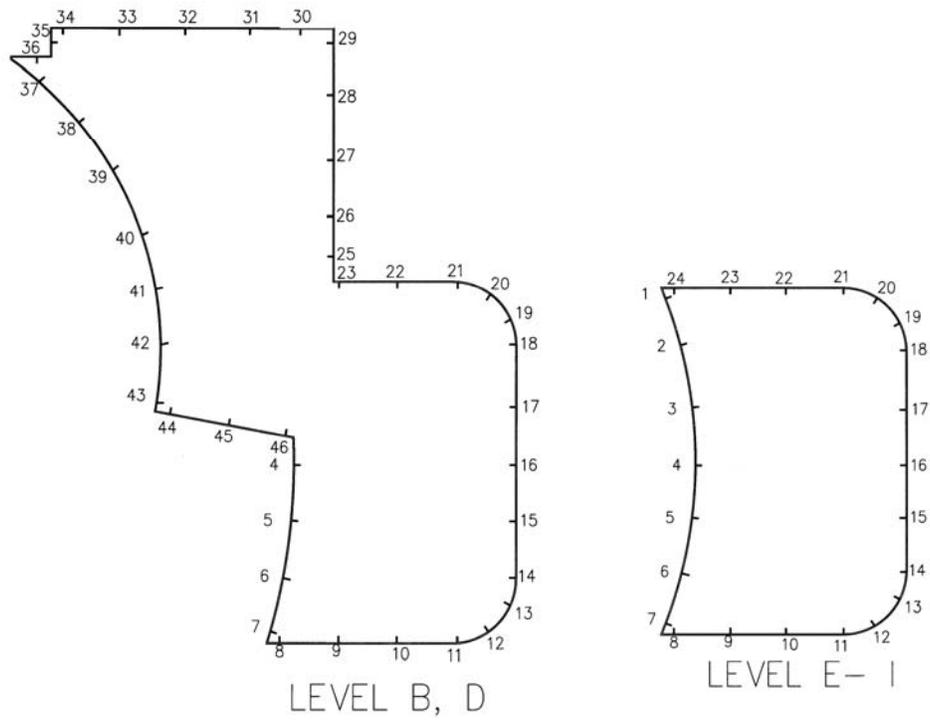
รูปที่ 4.15 ตำแหน่งติดตั้งท่อส่งแรงดันของแบบจำลองอาคาร A ที่ระดับความสูง A ถึง G



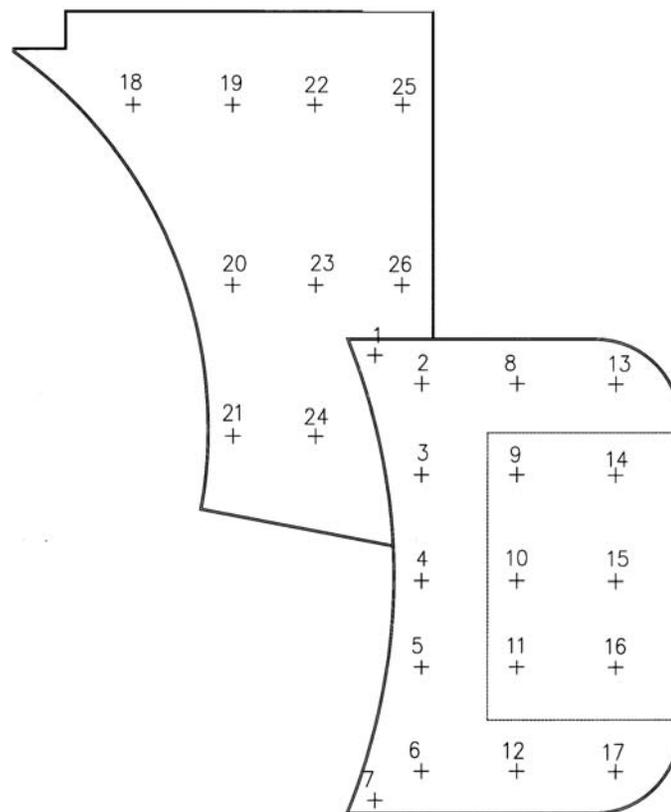
รูปที่ 4.16 ตำแหน่งติดตั้งท่อส่งแรงดันของแบบจำลองอาคาร A ที่ระดับหลังคา



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งติดตั้งท่อส่งแรงดันของแบบจำลองอาคาร B กับอาคาร C ด้านข้าง



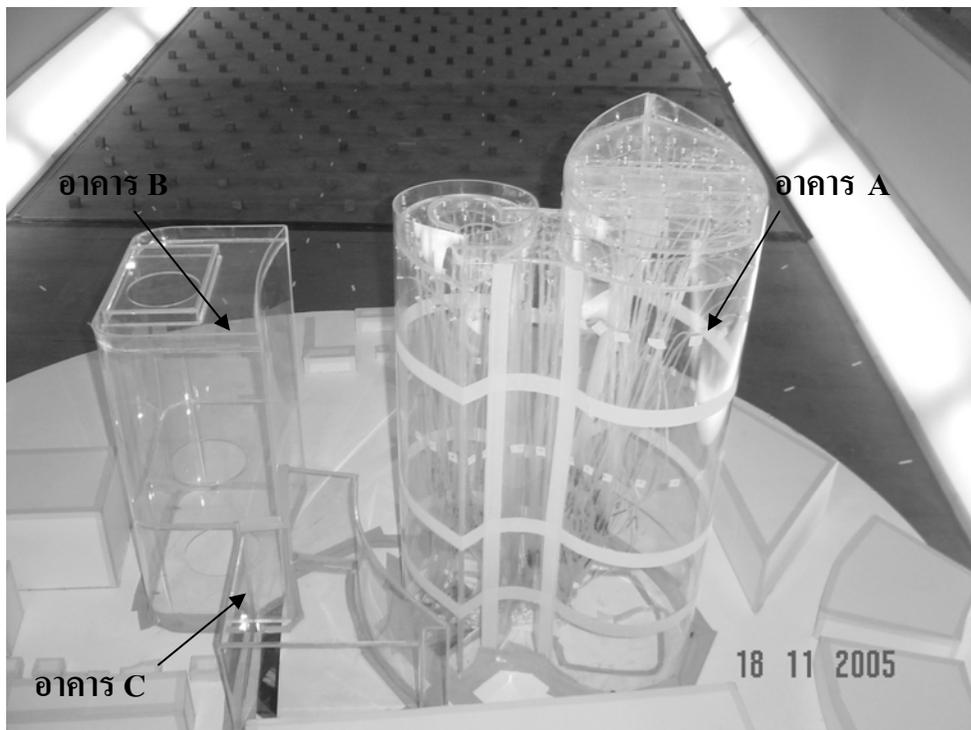
รูปที่ 4.18 ตำแหน่งติดตั้งท่อส่งแรงดันของแบบจำลองอาคาร B กับอาคาร C ที่ระดับความสูง A ถึง I



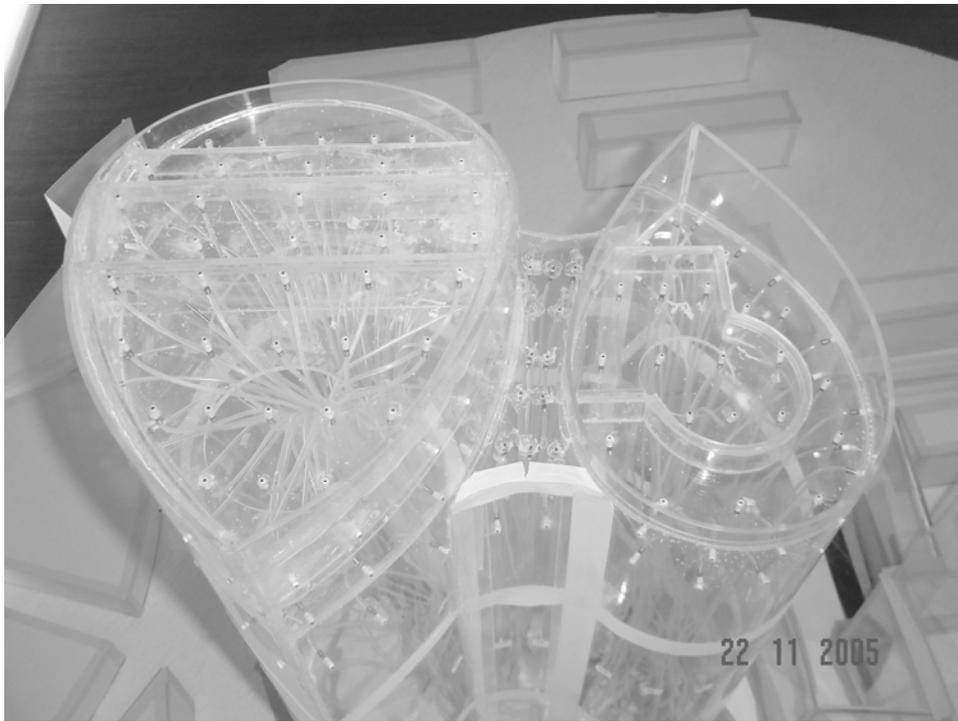
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งติดตั้งท่อส่งแรงดันของแบบจำลองอาคาร B กับอาคาร C ที่ระดับหลังคา



รูปที่ 4.20 แบบจำลองโครงการอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติ และอาคารข้างเคียง



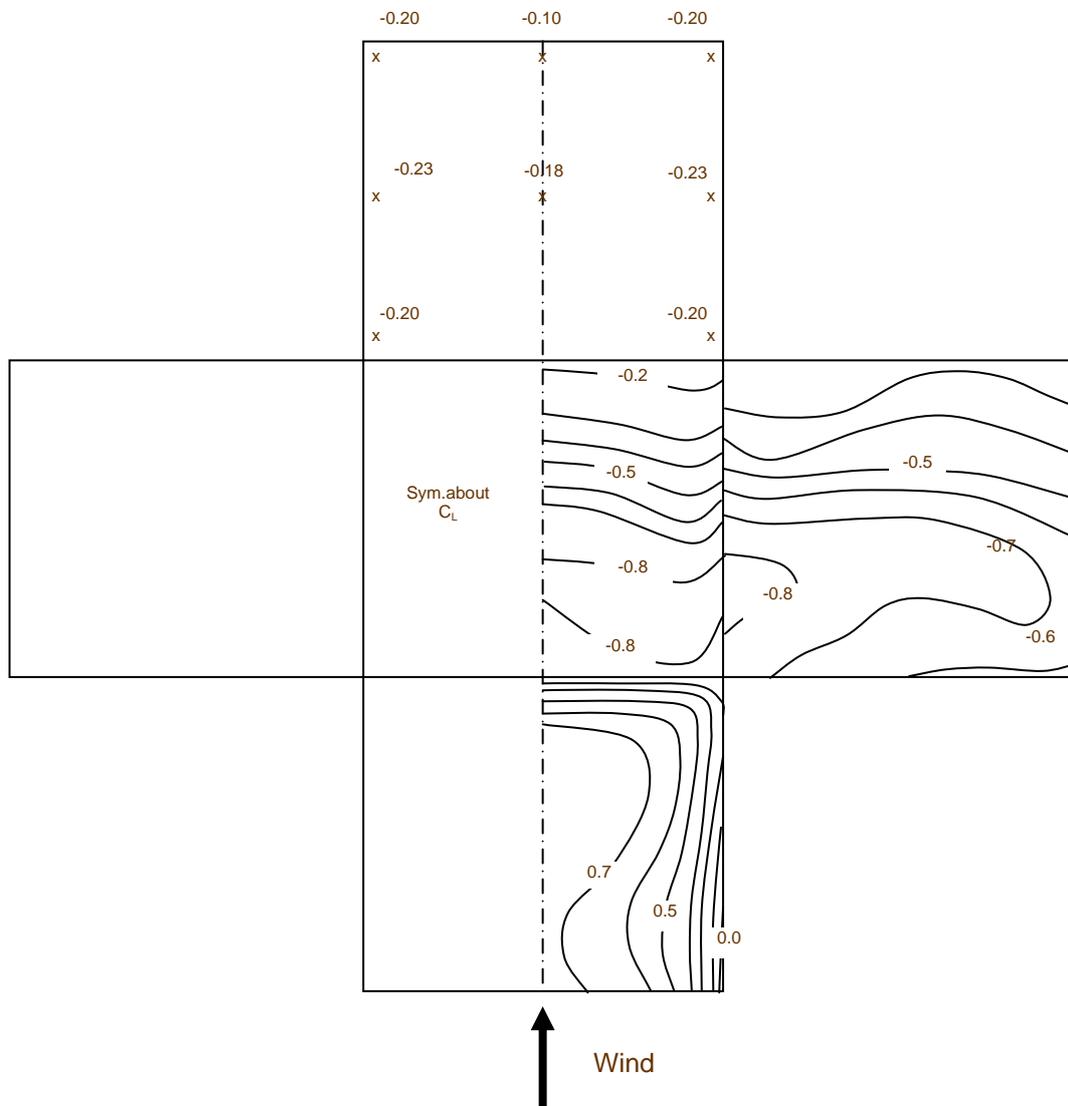
รูปที่ 4.21 รูปขยายแบบจำลองโครงการอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติ



รูปที่ 4.22 รูปขยายแบบจำลองอาคาร A



รูปที่ 4.23 รูปขยายแบบจำลองอาคาร B กับอาคาร C



รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยของแบบจำลองรูปทรงลูกบาศก์ ที่ได้จากผลการทดสอบของ Baines (1963)