

ผลจากการปิดกั้นต่อแรงลมบนแบบจำลองโครงสร้างหลังคาสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ



นายโสภณ ศุภการพิทยากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิสุตตรปริญาวิชาวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-723-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16452417

BLOCKAGE EFFECTS ON WIND LOADING OVER MODEL  
OF CHALERMPHRAKIET STADIUM ROOF STRUCTURE

MR. SOPON SOOBPHAKARNPITTAYAKOOL



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University


1995

ISBN 974-631-723-7


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลจากการปิดกั้นต่อแรงลมบนแบบจำลองโครงสร้างหลังคาสนามกีฬา  
เฉลิมพระเกียรติ  
โดย นายโสภณ ศุภการพิทยากุล  
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุขสม





บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ฤงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุขสม)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. วีรพงศ์ เสนจันทร์ฉะไชย)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



โสภณ สุภการพิทยากุล: ผลจากการปิดกั้นต่อแรงลมบนแบบจำลองโครงสร้างหลังคาสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ (BLOCKAGE EFFECTS ON WIND LOADING OVER MODEL OF CHALERMPHRAKIET STADIUM ROOF STRUCTURE) อ.ที่ปรึกษา : ศ. ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุสม, 244 หน้า. ISBN 974-631-723-7

สนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติเป็นโครงสร้างที่มีรูปทรงพิเศษ มีคานแนวกกลางที่มีช่วงยื่น 55 เมตร (วัดจากหน้าเสา) มีค่าความชะลูดมาก จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อหาแรงและโมเมนต์ที่ฐานของคานยื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงลมได้ถูกต้อง ในการทดสอบนั้นปัญหาพื้นฐานที่พบคือ การเลือกขนาดของหุ่นจำลองที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดสอบในอุโมงค์ลม หุ่นจำลองที่มีขนาดเล็กมากอาจมีปัญหาในการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ ส่วนหุ่นจำลองที่มีขนาดใหญ่สร้างได้ง่ายแต่จะรบกวนกระแสลมในอุโมงค์ลมทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นจากที่ควรจะเป็น จึงมีผลกระทบกับผลการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลจากการปิดกั้น (Blockage Effect) ในการทดสอบเพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นในคานแนวกกลางของหุ่นจำลองสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ ทำการวัดความดันด้วยวิธีเฉลี่ยแบบนิวเมติกโดยใช้แมนนิโฟลด์ (Manifold) หุ่นจำลองที่ใช้มีขนาดการย่อส่วน 3 ขนาด คือ 1:500 , 1:333 และ 1:250 ในหุ่นจำลองแต่ละขนาดได้ทดสอบสำหรับทิศทางลม 9 ทิศทาง โดยเริ่มจากทิศทางที่ลมเข้าปะทะจากด้านหน้าของโครงสร้างหลังคาขานแนวกกลาง แล้วเพิ่มขึ้นครั้งละ 22.5 องศา เพื่อหาผลกระทบกับการปิดกั้นในทิศทางลมต่างๆ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อกระแสลมเข้าปะทะจากด้านหน้าของโครงสร้างหลังคา โดยให้กระแสลมขนานไปกับคานแนวกกลาง อัมพันต์ด้านที่ไม่มีหลังคาซึ่งมีความสูงค่อนข้างมากจะรบกวนกระแสลมทำให้เกิดแรงกดลงมากที่สุด และเมื่อกระแสลมเข้าปะทะในทิศ 45 องศา จากด้านหน้า อัมพันต์ด้านที่ไม่มีหลังคามีลักษณะเป็นช่องลมทำให้เกิดแรงยกขึ้นมากที่สุด ผลของการก้ำกัจากอัมพันต์ด้านที่ไม่มีหลังคานี้ ทำให้แรงที่เกิดขึ้นบนหลังคานั้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากมาตรฐานเพื่อการออกแบบ CP3 ค่อนข้างมากราวร้อยละ 50 ในส่วนของผลจากการปิดกั้น ขนาดของหุ่นจำลองที่ใหญ่ขึ้นมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์มีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ (ที่ตั้งฉากกับทิศทางลม) ของหุ่นจำลองที่ขวางลมเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 ของพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลม โดยทั่วไปจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ทั้งโครงสร้างเพิ่มขึ้นภายในช่วงร้อยละ 15 โดยเทียบกับค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของหุ่นจำลองขนาด 1:500 ยกเว้นเมื่อกระแสลมเข้าปะทะทางด้านหน้าทำมุม 22.5 องศา และ 180 องศา กับคานแนวกกลาง อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ทั้งโครงสร้างจะลดลงประมาณร้อยละ 0.4 สำหรับค่าอัตราส่วนการปิดกั้นไม่เกินร้อยละ 3.8 ผลจากการปิดกั้นจะมีค่าภายในร้อยละ 10 โดยประมาณ

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา ..... 2537

ลายมือชื่อนิสิต ..... โสภณ สุภการพิทยากุล  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... พูลศักดิ์ เพียรสุสม

## C315371: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: WIND TUNNEL TEST / BLOCKAGE EFFECT / STADIUM ROOF  
 SOPON SOOBPHAKARNPITTAYAKOOL : BLOCKAGE EFFECTS ON WIND  
 LOADING OVER MODEL OF CHALERMPHRAKIET STADIUM ROOF  
 STRUCTURE. THESIS ADVISOR : PROF. DR. PANITAN LUKKUNAPRASIT,  
 CO-ADVISOR DR. PHOONSAK PHIANSUSOM, 244 pp. ISBN 974-631-723-7

The Chalermphrakiet Stadium is a structure of special shape, with slender roof girders cantilevering up to 55 meters (measured from column face) at the center. This necessitated wind tunnel testing to accurately determine shear forces and support moments of the girders due to wind action. A basic problem naturally faced is the selection of an appropriate model size for wind tunnel test. A very small model may be difficult to instrument. A big model, on the other hand, can be fabricated and instrumented more easily, but the bigger size obstructs more on wind flow in the wind tunnel, consequently affects the test results.

In this research, the blockage effect on wind loading over models of the Chalermphrakiet Stadium roof structure was studied. The pneumatic averaging method by means of manifold devices was used to measure forces on the central roof girder. Three model sizes with 1:500, 1:333 and 1:250 scales were tested with 9 equally spaced wind directions on half of the symmetrical models.

It was found that when the wind blowed along the center girder toward the cantilever end, the high grandstand opposite (which was not roofed) would obstruct wind flow, producing shielding effect for the cantilever roof. The resulting force was downward, and reached maximum in this direction. At the yaw angle of 45 degrees, the shape of the structure was such that a trough was formed, admitting stronger flow. Consequently maximum uplift occurred. The presence of the unroofed grandstand opposite the roofed structure resulted in smaller wind load than that calculated in accordance with the British Code of Practice, CP3 by about 50%. Regarding blockage effect, increasing model size led to increasing amplitude of the moment coefficient. Generally, when the model projected area increased by 1% of the wind tunnel cross sectional area, the moment coefficient increased within about 15% compared with that of the 1:500 scale model, except for yaw angles of 22.5 and 180 degrees where the moment coefficient decreased by about 0.4%. For a blockage ratio of 3.8% or less, the blockage effect was approximately within 10%.

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา  
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา  
 ปีการศึกษา..... 2537

ลายมือชื่อผู้ผลิต..... *สพ. สอ.บ.พิ.ต.ย.ก.อ.*  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *สพ. อ.ป.*  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *พ.ส.ค./พ.*

กิตติกรรมประกาศ



ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ อาจารย์ที่  
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งให้  
 การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และเงินทุนอุดหนุนในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พูนศักดิ์ เพียรสุสม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำ  
 แนะนำคำปรึกษา ข้อคิดเห็นกับงานวิจัยนี้ และได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ ประธานกรรมการสอบ  
 วิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์มิไชย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
 ที่ได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ Professor Dr. Alan G. Davenport , University of Western  
 Ontario , Canada ที่กรุณาเสียสละเวลา ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้ ในช่วงที่  
 มาเยือนหน่วยปฏิบัติการและวิจัยอุโมงค์ลม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนอุดหนุนการวิจัย ทำให้งาน  
 วิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคุณสุเทพ บุญปรีชา คุณนรินทร์ เอื้อสุวรรณและคุณทิวาทิพย์ จำเริญทวีทรัพย์  
 ที่ให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่กรุณามาช่วยงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชายทุก ๆ คน ที่เข้าใจ ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้เขียนในทุก ๆ ด้าน จนสำเร็จการศึกษา



สารบัญ

หน้า

|                           |   |
|---------------------------|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....     | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....  | จ |
| กิตติกรรมประกาศ .....     | ฉ |
| สารบัญ .....              | ช |
| สารบัญรูป .....           | ญ |
| สารบัญตาราง .....         | ท |
| คำอธิบายสัญลักษณ์ .....   | ณ |
| การกำหนดเครื่องหมาย ..... | ธ |
| การกำหนดมุม .....         | น |

บทที่ 1 บทนำ

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....    | 1 |
| 2. งานวิจัยที่ผ่านมา .....            | 5 |
| 3. จุดประสงค์ของงานวิจัย .....        | 6 |
| 4. ขอบข่ายงานวิจัย .....              | 6 |
| 5. ขั้นตอนการทำงานวิจัย .....         | 7 |
| 6. ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย ..... | 7 |

บทที่ 2 ทฤษฎีและเทคนิคการทดสอบ

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 1. หลักการเบื้องต้นของการไหลของของไหล ..... | 8  |
| 2. ตัวประกอบทางด้านรูปทรง .....             | 11 |
| 3. อัตราการย่อยส่วน .....                   | 12 |
| 4. ลักษณะสภาพลมในชั้นบรรยากาศ .....         | 13 |
| 5. หุ่นจำลอง .....                          | 18 |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                                   | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| 6. สมการสำหรับการหาโมเมนต์ปลายยึดแน่นสำหรับคานยื่นใดๆ .....                       | 19   |
| 7. วิธีการเฉลี่ยแบบนิวเมติก .....                                                 | 22   |
| 8. การวัดหาแรงและความดันบนหลังคา .....                                            | 34   |
| 9. ผลจากการปิดกั้น .....                                                          | 40   |
| <br>                                                                              |      |
| <b>บทที่ 3 การดำเนินงานทดลอง</b>                                                  |      |
| 1. ขั้นตอนการเตรียมการและการทดสอบ .....                                           | 46   |
| 2. ลักษณะของลมที่ใช้ในการทดสอบ .....                                              | 47   |
| 3. หุ่นจำลอง .....                                                                | 48   |
| 4. การติดตั้งจุดวัดความดัน .....                                                  | 52   |
| 5. อุปกรณ์การทดสอบ .....                                                          | 58   |
| 6. การเก็บข้อมูลและการปรับแก้ข้อมูล .....                                         | 64   |
| <br>                                                                              |      |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิจารณ์</b>                                               |      |
| 1. ผลการทดสอบ .....                                                               | 69   |
| 2. ค่าแรงลมเฉลี่ยเมื่อทิศทางลมแปรเปลี่ยนจากมุม $\theta = 0$ ถึง 180 องศา<br>..... | 79   |
| 3. ผลกระทบของอัตราส่วนโพลิตี .....                                                | 94   |
| 4. การเปรียบเทียบกับมาตรฐานการเพื่อการออกแบบ CP3 .....                            | 96   |
| 5. ผลจากการปิดกั้น .....                                                          | 100  |
| <br>                                                                              |      |
| <b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>                                                  |      |
| 1. สรุปผลการทดสอบ .....                                                           | 112  |
| 2. ข้อเสนอแนะ .....                                                               | 113  |



สารบัญ (ต่อ)

|                       | หน้า |
|-----------------------|------|
| รายการอ้างอิง .....   | 114  |
| ภาคผนวก ก .....       | 119  |
| ภาคผนวก ข .....       | 127  |
| ภาคผนวก ค .....       | 135  |
| ภาคผนวก ง .....       | 147  |
| ภาคผนวก จ .....       | 157  |
| ประวัติผู้เขียน ..... | 244  |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                                                                          | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 ทิศทางการเคลื่อนที่โดยเฉลี่ยของลมพายุไต้ฝุ่น .....                                                                                          | 2    |
| 1.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของลมพายุไต้ฝุ่นและลมพายุไซร่อน ภายในรัศมี 500 กิโลเมตร จากกรุงเทพมหานคร ในช่วงปี พ.ศ.2489-2530 .....                    | 2    |
| 1.3 ตำแหน่งแนวคานและช่องเปิดของสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ .....                                                                                    | 4    |
| 1.4 การไหลวนของกระแสลมที่เข้าทางด้านหน้าของอัฒจันทร์ .....                                                                                      | 5    |
| 2.1 แนวการไหลรอบ ๆ พื้นที่ A <sub>1</sub> และ A <sub>2</sub> .....                                                                              | 8    |
| 2.2 แนวการไหลของลมรอบวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม .....                                                                                                | 9    |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสูงสุดเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมงและคาบเวลาย้อนกลับของกรุงเทพมหานคร .....                                                 | 17   |
| 2.4 ผังการแบ่งชนิดของหุ่นจำลอง .....                                                                                                            | 18   |
| 2.5 คานยื่นทั่วไปและแรงใดๆ .....                                                                                                                | 20   |
| 2.6 รายละเอียดอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์ที่ใช้ที่ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางอุโมงค์ลม มหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตารีโอ ประเทศแคนาดา .....               | 22   |
| 2.7 แบบจำลองชุดวัดความดันด้วยอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์ .....                                                                                      | 24   |
| 2.8 แบบจำลองชุดวัดความดันด้วยอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์ที่ใช้ที่ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางอุโมงค์ลมมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตารีโอ ประเทศแคนาดา ..... | 26   |
| 2.9 ตำแหน่งการติดตั้งวัดความดันที่คานยื่น .....                                                                                                 | 27   |
| 2.10 รายละเอียดการติดตั้งวัดความดันแบบงอไว้ภายในชั้นหลังคา .....                                                                                | 28   |
| 2.11 รายละเอียดรีสตริคเตอร์ .....                                                                                                               | 29   |
| 2.12 ผลการตอบสนองของคลื่นที่ความถี่ต่างๆ ของชุดวัดความดันประกอบด้วยรีสตริคเตอร์และท่อยูรีเรน .....                                              | 30   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                            | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.13 แสดงตำแหน่งของรีสทริกเตอร์ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ทางหน่วยปฏิบัติการและวิจัยทางอุโมงค์ลม มหาวิทยาลัยเวสเทินออนตารีโอ ประเทศแคนาดา เสนอแนะ ..... | 30   |
| 2.14 ผลการตอบสนองของคลื่นที่ความถี่ต่างๆ ของชุดวัดความดันประกอบด้วยอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์ , รีสทริกเตอร์และท่อยูรีเทน .....                      | 31   |
| 2.15 รูปแบบการติดตั้งจุดวัดความดันโดยทั่วไป .....                                                                                                 | 32   |
| 2.16 เส้นระดับของ $C_p$ , mean ของหลังคาบ้านในทิศทางต่างๆ .....                                                                                   | 34   |
| 2.17 ลักษณะสนามก๊ฬาที่ Cook, N.J. ทดสอบ .....                                                                                                     | 35   |
| 2.18 ลักษณะสนามก๊ฬาที่ Melbourne และ Cheung ทดสอบ .....                                                                                           | 36   |
| 2.19 ลักษณะสนามก๊ฬาที่ H.J. Niemann ทดสอบ.....                                                                                                    | 37   |
| 2.20 เส้นระดับของ $C_p$ , mean ของหลังคาสนามก๊ฬาเฉลิมพระเกียรติ .....                                                                             | 38   |
| 2.21 ลักษณะของความดันที่กระทำต่อโครงสร้างหลังคาสนามก๊ฬาเฉลิมพระเกียรติ ....                                                                       | 39   |
| 2.22 ค่า k สำหรับแผ่นบางเรียบสี่เหลี่ยมที่มีระนาบตั้งฉากกับการไหล .....                                                                           | 41   |
| 2.23 ผลการทดสอบของ Mckeon และ Melbourne .....                                                                                                     | 41   |
| 2.24 ผลการทดสอบของ Modi และ EL-Sherbiny (1971).....                                                                                               | 42   |
| 2.25 ผลการทดสอบของ Modi และ EL-Sherbiny (1975).....                                                                                               | 43   |
| 2.26 ผลการทดสอบของ Courchesne และ Laneville .....                                                                                                 | 44   |
| 3.1 แปลนสนามก๊ฬาเฉลิมพระเกียรติ .....                                                                                                             | 49   |
| 3.2 ตำแหน่งค่าพิกัดของโครงสร้างคานหลังคาสนามก๊ฬาเฉลิมพระเกียรติ<br>ใช้คู่กับตารางที่ 3.1 .....                                                    | 50   |
| 3.3 ตำแหน่ง $X_i$ ของคานแนว 19 .....                                                                                                              | 55   |
| 3.4 จุดวัดความดันแบบงอที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ .....                                                                                               | 57   |
| 3.5 รายละเอียดการติดตั้งจุดวัดความดันแบบงอไว้ภายในชั้นหลังคาในงานวิจัยนี้ .....                                                                   | 57   |
| 3.6 ผังชุดเครื่องมือวัดความดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ .....                                                                                           | 60   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                           | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.7 รายละเอียดอุโมงค์ลมของห้องวิจัยทางอุโมงค์ลม คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ..... | 61   |
| 3.8 ผลการทดสอบหุ่นจำลองรูปทรงลูกบาศก์ ในสภาพการไหลแบบเรียบ .....                                 | 63   |
| 4.1 มุมมองด้านบนและด้านแนวกระแสลมของสนามกีฬาเมื่อ $\theta = 0 - 180$ องศา...                     | 81   |
| 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ปลายยึดแน่นเฉลี่ยกับมุม $\theta$ กรณีไม่มีช่องเปิด.             | 89   |
| 4.3 รูปแสดงขนาดและทิศของแรงลม ในมุม $\theta = 0$ องศา .....                                      | 92   |
| 4.4 รูปแสดงขนาดและทิศของแรงลม ในมุม $\theta = 22.5$ องศา .....                                   | 92   |
| 4.5 รูปแสดงขนาดและทิศของแรงลม ในมุม $\theta = 45$ องศา .....                                     | 93   |
| 4.6 รูปแสดงขนาดและทิศของแรงลม ในมุม $\theta = 180$ องศา .....                                    | 93   |
| 4.7 ค่า $C_m$ ที่ผิวล่างของคานแนว 19 เมื่อใช้หุ่นจำลอง 3 ขนาด .....                              | 101  |
| 4.8 ค่า $C_m$ ทั้งโครงสร้างของคานแนว 19 เมื่อใช้หุ่นจำลอง 3 ขนาด .....                           | 102  |
| 4.9 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 0.0$ องศา .....                                  | 104  |
| 4.10 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 22.5$ องศา .....                                | 104  |
| 4.11 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 45.0$ องศา .....                                | 105  |
| 4.12 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 67.5$ องศา .....                                | 105  |
| 4.13 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 90.0$ องศา .....                                | 106  |
| 4.14 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 112.5$ องศา .....                               | 106  |
| 4.15 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 135.0$ องศา .....                               | 107  |
| 4.16 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 157.5$ องศา .....                               | 107  |
| 4.17 ผลการทดสอบและการจำลองสมการ ของมุม $\theta = 180.0$ องศา .....                               | 108  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                        | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------|------|
| 4.18   | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K$ กับ มุม $\theta$ .....  | 109  |
| 4.19   | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Pi$ กับมุม $\theta$ ..... | 110  |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                                                | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 แสดงค่าของ $\alpha$ และ $Z_g$ ที่แบ่งโดยมาตรฐานเพื่อการออกแบบ ANSI และ Davenport .....                                                              | 14   |
| 2.2 ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ความสูงเกรเดียน สำหรับในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร มหานคร โดยมีความสูงเกรเดียนต์อยู่ในช่วง 400 ถึง 500 เมตร .....     | 17   |
| 2.3 ค่าความผิดพลาดในการคำนวณหาโมเมนต์จากวิธีเฉลี่ยนิวเมติก โดยมีการจัดจุดวัดความดันต่างกัน โดยเทียบกับค่าจริง สำหรับคานกว้างคงที่ $b$ .....             | 33   |
| 3.1 ค่าพิกัดแนวราบและแนวตั้งของโครงสร้างหลังคาสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติในสภาพจริง .....                                                                   | 51   |
| 3.2 สรุปรูปตำแหน่งของจุดวัดความดัน สำหรับกรณีวัด 10 จุด .....                                                                                           | 53   |
| 3.3 สรุปรูปตำแหน่งของจุดวัดความดัน สำหรับกรณีวัด 5 จุด .....                                                                                            | 54   |
| 3.4 ค่าความผิดพลาดในการคำนวณหาโมเมนต์จากวิธีเฉลี่ยนิวเมติก โดยมีการจัดจุดวัดความดันแบบแถวเดียว 5 จุด และ 10 จุด โดยเทียบกับค่าจริงสำหรับคานแนว 19 ..... | 56   |
| 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบหุ่นจำลองขนาด 1:250 ไม่มีช่องเปิด                                                                            | 69   |
| 4.2 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบหุ่นจำลองขนาด 1:250 ไม่มีช่องเปิด .....                                                                | 71   |
| 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบหุ่นจำลองขนาด 1:333 ไม่มีช่องเปิด                                                                            | 72   |
| 4.4 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบหุ่นจำลองขนาด 1:333 ไม่มีช่องเปิด .....                                                                | 73   |
| 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบหุ่นจำลองขนาด 1:500 ไม่มีช่องเปิด                                                                            | 75   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า                                                                                                                        |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.6      | ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบหุ่นจำลองขนาด 1:500 มีช่องเปิด . 77                                                  |
| 4.7      | ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบหุ่นจำลองขนาด 1:500 ..... 78                                                   |
| 4.8      | ค่าโมเมนต์ปลายยึดแน่นเฉลี่ยของคานยื่นแนว 19 กรณีไม่มีช่องเปิด ..... 89                                                      |
| 4.9      | ค่าเฉลี่ย $C_m$ จากการทดสอบหุ่นจำลอง 1:500 กรณี $\theta = 0$ องศา ..... 94                                                  |
| 4.10     | ค่าเฉลี่ย $C_m$ จากการทดสอบหุ่นจำลอง 1:500 กรณี $\theta = 45$ องศา ..... 95                                                 |
| 4.11     | เปรียบเทียบในรายละเอียดที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงและโมเมนต์ ..... 97                                                            |
| 4.12     | การเปรียบเทียบแรงที่ได้จากการทดสอบ ..... 98                                                                                 |
| 4.13     | การเปรียบเทียบโมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบ ..... 99                                                                             |
| 4.14     | อัตราส่วนของแรงหรือโมเมนต์เฉลี่ยของงานวิจัยนี้เมื่อเทียบกับมาตรฐานเพื่อ<br>การออกแบบ CP3 ในสภาพลมแบบ Uniform Flow ..... 100 |
| 4.15     | ค่ามุม $\theta$ ที่เกิดแรงยกขึ้นหรือกดลงมากที่สุด ..... 100                                                                 |
| 4.16     | ค่าพื้นที่ที่ขวางแนวกระแสลมของสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติและหุ่นจำลอง .... 103                                                  |
| 4.17     | สรุปค่า $K$ และ $\Pi$ จากการทดสอบหุ่นจำลองขนาด 1: 500 , 1:333 และ<br>1: 250 ..... 108                                       |

## คำอธิบายสัญลักษณ์

|           |   |                                                                                    |
|-----------|---|------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_i$     | = | พื้นที่ที่จุดวัดความดันตัวที่ $i$ ครอบคลุมถึง                                      |
| $A_T$     | = | พื้นที่ที่รับแรงทั้งหมดของคานตัวที่เรากำลังพิจารณา                                 |
|           | = | 545.85 เมตร <sup>2</sup> สำหรับคานแนว 19                                           |
| $b$       | = | ค่าคงที่ใดๆ                                                                        |
| $C$       | = | พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม                                                         |
|           | = | 2.56 ตารางเมตร                                                                     |
| $C_D$     | = | ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลาก (Drag force)                                              |
| $C_{DC}$  | = | ค่าสัมประสิทธิ์การแก้ไขให้เป็นสภาพการไหลแบบอิสระของแรงลาก                          |
| $C_{PC}$  | = | ค่าสัมประสิทธิ์การแก้ไขให้เป็นสภาพการไหลแบบอิสระของความดัน                         |
| $C_f$     | = | สัมประสิทธิ์แรง                                                                    |
| $C_m$     | = | สัมประสิทธิ์โมเมนต์                                                                |
| $C_m$     | = | $K\varepsilon + b$ เมื่อทำการจำลองสมการโดยวิธีถดถอยเชิงเส้น<br>(Linear Regression) |
| $C_p$     | = | สัมประสิทธิ์ความดัน                                                                |
| $f_{int}$ | = | ความถี่สูงสุดของคลื่นการทดสอบที่สนใจ                                               |
| $f_{sp}$  | = | ความถี่การเก็บข้อมูล                                                               |
| $F$       | = | ค่าแรงลมที่กระทำต่อคานที่ระยะ $X_T$                                                |
| $F_{BOT}$ | = | ค่าแรงลมที่กระทำต่อคานที่ผิวล่างที่ระยะ $X_T$                                      |
| $F_{TOP}$ | = | ค่าแรงลมที่กระทำต่อคานที่ผิวบนที่ระยะ $X_T$                                        |
| $F_{TOT}$ | = | ค่าแรงลมที่กระทำต่อคานทั้งโครงสร้างที่ระยะ $X_T$                                   |
| $k$       | = | ค่าตัวประกอบการปิดกั้น (Blockage Factor)                                           |
| $K$       | = | $\frac{\Delta C_m}{\Delta \varepsilon}$                                            |
|           | = | ค่า $C_m$ ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อ $\varepsilon$ เพิ่มขึ้น 1%                           |
| $l_1$     | = | ความยาวที่อยู่ริเวณจากจุดวัดความดันถึงรีสตริกเตอร์                                 |
| $l_2$     | = | ความยาวที่อยู่ริเวณจากรีสตริกเตอร์ถึงอุปกรณ์เฉลี่ยแมนนิโฟลด์                       |



## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

|             |   |                                                                                                                   |
|-------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $l$         | = | ความยาวโดยรวมของท่อยูริเทน                                                                                        |
| $L_m$       | = | ขนาดความกว้าง , ยาวของแบบจำลอง                                                                                    |
| $L_p$       | = | ขนาดความกว้าง , ยาวของต้นแบบ                                                                                      |
| $L_i$       | = | ความยาวท่อที่ $i$                                                                                                 |
| $M$         | = | โมเมนต์ปลายยึดแน่นของคานยี่น                                                                                      |
| $M_{BOT}$   | = | โมเมนต์ปลายยึดแน่นของคานยี่นที่เกิดจากแรงกระทำที่ผิวล่างของคานยี่น                                                |
|             | = | $C_{mBOT} A_T X_T q$                                                                                              |
| $M_{ERROR}$ | = | ค่าผิดพลาดของโมเมนต์ลัพท์ปลายยึดแน่นของคานยี่นเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงกับค่าที่ได้จากการใช้วิธีเฉลี่ยแบบนิวเมติก |
| $M_{TOP}$   | = | โมเมนต์ปลายยึดแน่นของคานยี่นที่เกิดจากแรงกระทำที่ผิวบนของคานยี่น                                                  |
|             | = | $C_{mTOP} A_T X_T q$                                                                                              |
| $M_{TOT}$   | = | โมเมนต์ลัพท์ปลายยึดแน่นของคานยี่น                                                                                 |
|             | = | $C_{mTOT} A_T X_T q$                                                                                              |
|             | = | $M_{TOP} + M_{BOTTOM}$                                                                                            |
| $n$         | = | จำนวนจุดวัดความดันทั้งหมดหรือพื้นที่ย่อยทั้งหมดของโครงสร้าง ที่ต้องการหาค่าโมเมนต์                                |
| $p(x)$      | = | ขนาดความดันที่ตำแหน่ง $x$ ใดๆ ของความดันแบบสามเหลี่ยม                                                             |
|             | = | $P$ สำหรับความดันแบบสม่ำเสมอ                                                                                      |
|             | = | $xP/L$ สำหรับความดันแบบสามเหลี่ยมที่มีค่ามาก ", $P$ " อยู่ที่ปลายยี่น                                             |
|             | = | $1 - xP/L$ สำหรับความดันแบบสามเหลี่ยมที่มีค่ามาก ", $P$ " อยู่ที่ปลายยึดแน่น                                      |
| $P_i$       | = | ความดันที่จุดวัดความดันตัวที่ $i$                                                                                 |

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

|                  |   |                                      |                                                                                                                                                                                                      |
|------------------|---|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\bar{P}$        | = | $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$       |                                                                                                                                                                                                      |
|                  | = |                                      | ค่าความดันเฉลี่ยที่เฉลี่ยจากจุดวัดความดันจำนวน n ตัว ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้วิธีการเฉลี่ยแบบนิวเมติก (Pneumatic Averaging) โดยอาศัยแมนนิโฟลด์                                                           |
| $\bar{P}_M$      | = | $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{P}_i$ |                                                                                                                                                                                                      |
| $\bar{P}_i$      | = |                                      | ค่าความดันสถิตย์จากท่อเข้าที่ i                                                                                                                                                                      |
| $P_o$            | = |                                      | ค่าความดันสถิตย์ที่ระดับความสูงเกรเดียนต์                                                                                                                                                            |
| q                | = |                                      | ความดันพลวัตที่ระดับอ้างอิง                                                                                                                                                                          |
|                  | = | $0.5 \rho V^2$                       |                                                                                                                                                                                                      |
| $\Delta q$       | = |                                      | ค่าที่เพิ่มขึ้นของความดันพลวัตเนื่องจากการปิดกั้น                                                                                                                                                    |
| $\bar{Q}_{in_i}$ | = |                                      | อัตราการไหลเข้าของท่อที่ i                                                                                                                                                                           |
| $\bar{Q}_{out}$  | = |                                      | อัตราการไหลออก                                                                                                                                                                                       |
| R                | = |                                      | รัศมีภายในของท่อที่ i                                                                                                                                                                                |
| S                | = |                                      | พื้นที่ด้านหน้าของหุ่นจำลองที่ตั้งฉากกับกระแสลม                                                                                                                                                      |
| SR               | = |                                      | อัตราส่วนโซลิดิตี (Solidity Ratio)                                                                                                                                                                   |
| $T_m$            | = |                                      | เวลาในการบันทึกข้อมูลในอุโมงค์ลม เทียบเท่าของจริง 1 ชั่วโมง                                                                                                                                          |
|                  | = |                                      | 48 วินาที สำหรับหุ่นจำลองขนาดการย่อส่วน 1:250                                                                                                                                                        |
|                  | = |                                      | 36 วินาที สำหรับหุ่นจำลองขนาดการย่อส่วน 1:333                                                                                                                                                        |
|                  | = |                                      | 24 วินาที สำหรับหุ่นจำลองขนาดการย่อส่วน 1:500                                                                                                                                                        |
| $T_p$            | = |                                      | เวลา 1 ชั่วโมงในสภาพจริง (3600 วินาที)                                                                                                                                                               |
| V                | = |                                      | ความเร็วลมเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ระดับอ้างอิง โดยทั่วไปจะวัดที่ระดับฟรีสตรีม (Free Stream) เหนือระดับบาวดาร์เรเยอร์ในกรณีนี้ที่เทียบกับความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ที่ระดับความสูงเกรเดียนต์ในขนาดของจริง |
| $V_{BOT}$        | = |                                      | ความเร็วลมที่พัดผ่านผิวล่างของหลังคา                                                                                                                                                                 |

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

|                  |   |                                                                                                                                                                                           |
|------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_g$            | = | ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงเกรเดียนต์                                                                                                                                                 |
| $V_r$            | = | ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงเฉลี่ยของโครงสร้างหลังคา                                                                                                                                   |
| $V_m$            | = | ความเร็วลมเฉลี่ยในการทดสอบ ที่ระดับความสูงเฉลี่ยของโครงสร้างหลังคา<br>ของหุ่นจำลองโดยเทียบเท่ากับความเร็วเฉลี่ย $V_p$ ในสภาพจริงการทดสอบนี้<br>วัดได้ 12 เมตรต่อวินาที                    |
| $V_p$            | = | ความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุด (Hourly Mean Wind Speed) ที่ระดับความสูง<br>เกรเดียนต์เท่ากับ 40 เมตรต่อวินาที                                                                                     |
| $V_{TOP}$        | = | ความเร็วลมที่พัดผ่านผิวบนของหลังคา                                                                                                                                                        |
| $\bar{V}_{in_i}$ | = | ความเร็วลมเฉลี่ยการไหลเข้าของท่อที่ $i$                                                                                                                                                   |
| $x$              | = | ระยะใดๆ จากจุดปลายยึดแน่นไปถึงตำแหน่งที่กำลังพิจารณา                                                                                                                                      |
| $X_i$            | = | ระยะจากจุดวัดความดันตัวที่ $i$ ไปถึงจุดจึ่งของคานยื่นในที่นี้เป็นแนวกึ่งกลาง<br>เสาที่รับคานยื่น โดยที่จุดวัดความดันตัวที่ $i$ จะอยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์กลาง<br>(Centroid) ของพื้นที่ $A_i$ |
| $X_T$            | = | ระยะจากจุดศูนย์กลางของพื้นที่ $A_T$ ไปถึงแนวกึ่งกลางเสาที่รับคานตัวที่เรา<br>กำลังพิจารณา                                                                                                 |
| $Z_g$            | = | ความสูงเกรเดียนต์                                                                                                                                                                         |
| $Z_r$            | = | ความสูงเฉลี่ยของโครงสร้างหลังคา<br>= 55 เมตร                                                                                                                                              |
| $\rho$           | = | ความหนาแน่นของอากาศ<br>= 1.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร                                                                                                                                     |
| $\epsilon$       | = | Blockage Ratio , S/C                                                                                                                                                                      |
| $\lambda_L$      | = | อัตราการย่อส่วนของความยาว                                                                                                                                                                 |
| $\lambda_V$      | = | อัตราการย่อส่วนของความเร็ว                                                                                                                                                                |
| $\lambda_T$      | = | อัตราการย่อส่วนของเวลา                                                                                                                                                                    |

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

|             |   |                                                                                                                                    |
|-------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$    | = | ค่าตัวประกอบเพอร์เวอร์ (Power Factor)                                                                                              |
| $\beta$     | = | ค่าตัวประกอบในการแก้ไขผลจากการปิดกั้น (Blockage Factor)                                                                            |
| $\Pi$       | = | $\frac{K}{C_m}$                                                                                                                    |
|             | = | $\frac{\Delta C_m}{C_m \Delta \epsilon}$                                                                                           |
|             | = | อัตราส่วนของค่า $C_m$ ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับค่า $C_m(1:500)$ ซึ่งผิดพลาดน้อยที่สุด เมื่อ $\epsilon$ เพิ่มขึ้น 1 %               |
| $\Pi_{BOT}$ | = | อัตราส่วนของค่า $C_m$ ผิวล่าง ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับค่า $C_m(1:500)$ ซึ่งผิดพลาดน้อยที่สุด เมื่อ $\epsilon$ เพิ่มขึ้น 1 %       |
| $\Pi_{TOP}$ | = | อัตราส่วนของค่า $C_m$ ผิบบน ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับค่า $C_m(1:500)$ ซึ่งผิดพลาดน้อยที่สุด เมื่อ $\epsilon$ เพิ่มขึ้น 1 %         |
| $\Pi_{TOT}$ | = | อัตราส่วนของค่า $C_m$ ทั้งโครงสร้าง ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับค่า $C_m(1:500)$ ซึ่งผิดพลาดน้อยที่สุด เมื่อ $\epsilon$ เพิ่มขึ้น 1 % |
| $i$         | = | ตัวเลขระบุตำแหน่งหรือลำดับของพื้นที่ , ระยะ หรือ ความดัน                                                                           |

การกำหนดเครื่องหมายต่าง ๆ

การกำหนดเครื่องหมายของ Cf, Cm

เมื่อพิจารณาที่พื้นผิว หรือทั้งโครงสร้างคานหลังคา

Cf, Cm เป็น + เมื่อแรงกระทำมีทิศขึ้น  
- เมื่อแรงกระทำมีทิศลง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การกำหนดเครื่องหมายของมุม  $\theta$  รอบอาคาร

มุม  $\theta = 0$  องศา จากแนวกึ่งกลางของอัมจันทร์ด้านที่ไม่มีหลังคาไปยังจุดศูนย์กลางสนามกีฬา

มุม  $\theta = 180$  องศา จากแนวกึ่งกลางของอัมจันทร์ด้านมีหลังคาไปยังจุดศูนย์กลางสนามกีฬา

โดยที่มุม  $\theta$  จะเพิ่มขึ้นในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเมื่อมองจากด้านบน

