

การศึกษาแรงลมและการตอบสนองของอาคารสูงในบริเวณศูนย์กลางของ
กรุงเทพมหานคร ด้วยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

อรรถกร เภรีฤกษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

พ.ศ. 2561

**A Study of Wind Load and Response of Tall Building
in the Center of Bangkok by Wind Tunnel Test**

Arttakon Periroek

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
College of Innovative Technology and Engineering
Dhurakij Pundit University**

2018



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

วิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแรงลมและผลตอบสนองของอาคารสูงในบริเวณศูนย์กลางของ
กรุงเทพมหานครด้วยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

เสนอโดย นายอรรถกร เกียรติฤกษ์

สาขาวิชา การจัดการทางวิศวกรรม

วิชาเอก การจัดการทรัพยากรอาคาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ ผดุงศิลป์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดยคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์แล้ว

.....ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์)

.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ ผดุงศิลป์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกรีชัย วรรณันท์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ บุญฤทธิบุญ)

วิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์เดช กิรติพรานนท์)

คณบดีวิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 18 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแรงลมและการตอบสนองของอาคารสูงในบริเวณศูนย์กลาง ของกรุงเทพมหานคร ด้วยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม
ชื่อผู้เขียน	อรรถกร เกริกฤกษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ ผดุงศิลป์
สาขาวิชา	การจัดการทางวิศวกรรม
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบขนาดแรงลมที่กระทำต่ออาคารและการสั่นไหวของอาคารในลักษณะดังกล่าว โดยได้ทำการจำลองอาคารด้วยอัตราส่วน 1:400 และกำหนดให้อาคารตั้งอยู่ในบริเวณศูนย์กลางของกรุงเทพมหานคร เพื่อเป็นตัวแทนของอาคารขนาดความกว้าง 40 เมตร ความยาว 40 เมตร ความสูงบนยอดอาคารตำแหน่งสูงสุด 304 เมตร ตำแหน่งต่ำสุด 272 เมตร การคำนวณความเร็วลมที่ยอดอาคารสำหรับการออกแบบด้านกำลังและเสถียรภาพที่คาบกลับ 50 ปี มีค่า 36.39 เมตร/วินาที และความเร็วลมที่ยอดอาคารสำหรับการออกแบบด้านการใช้งานใช้คาบกลับ 10 ปี มีค่า 29.48 เมตร/วินาที

ผลการวิจัยด้านแรงลม พบว่า ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ฐานอาคารมีผลมาจากผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมเป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการคำนวณแรงลม และพบว่าค่าแรงลมสถิตเทียบเท่า (\hat{P}) ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมที่ยอดอาคาร \hat{P}_x มีค่า 440 kN (หรือ 2.89 kN/m²), \hat{P}_y มีค่า 414 kN (หรือ 2.72 kN/m²) และ \hat{P}_z มีค่า 2,432 kN-m ซึ่งน้อยกว่าการคำนวณตามมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยผ.1311-50 ของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย คิดเป็น 0.59 เท่า 0.55 เท่า และ 0.51 เท่า ตามลำดับ

ผลการวิจัยด้านอัตราเร่งสูงสุด พบว่า อัตราเร่งในแนวราบสูงสุดจากแรงลมในทิศทางลมและในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมมีค่า 0.057 เมตร/วินาที² และ 0.121 เมตร/วินาที² ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าการคำนวณตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 คิดเป็น 0.80 เท่า และ 0.64 เท่า ตามลำดับ

ความแตกต่างนี้มีผลมาจากรูปทรงของอาคารที่ไม่ได้มีความสม่ำเสมอบนยอดอาคาร และผลจากจำลองอาคารข้างเคียง จึงเห็นได้ว่าการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมมีความจำเป็นในการยืนยันความถูกต้องในกรณีที่อยู่นอกเหนือขอบเขตของมาตรฐานการคำนวณ ซึ่งการทดสอบในอุโมงค์ลมนี้สามารถใช้แทนการคำนวณแรงลมตามมาตรฐานได้ และอาจทำให้ภาพรวมของค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมีค่าน้อยลง

Thesis Title	A Study of Wind Load and Response of Tall Building in the Center of Bangkok by Wind Tunnel Test
Author	Arttakon Periroek
Thesis Advisor	Asst.Prof. Aumnad Phudungsilp, Ph.D.,Tekn.Dr.
Department	Engineering Management
Academic Year	2017

ABSTRACT

This research was conducted to compare the wind load acting to the building and wind-induced vibration on the 1:400 scale model, which is located at the center of Bangkok with the dimension of 40 m-wide, 40 m-long, and the heights of each segment are 272 m and 304 m, respectively. The 50-year returned period wind velocity at the highest of building, for strength and stability design, is 36.39 meter/second and the 10-year returned period wind velocity, for serviceability design, is 29.48 meter/second.

The result in wind load study was found that the peak base moment response is caused by the across-wind load, which is corresponding with wind loading calculation standard, and it was found that the equivalent static wind load (\hat{P}) from the test at the top of the building with $\hat{P}_x = 440$ kN (2.89 kN/m^2), $\hat{P}_y = 414$ kN (2.72 kN/m^2), and $\hat{P}_z = 2,432$ kN-m. The results are less than the Standard No. 1311-50, "Wind Loading Calculation and Response of Buildings", of the Department of Public Works and Town & Country Planning, Thailand, by 0.59, 0.55 and 0.51, respectively.

The result in wind-induced vibration study was found that the maximum horizontal acceleration from along-wind and across-wind load are $0.057 \text{ meter/second}^2$ and $0.121 \text{ meter/second}^2$, respectively, which is lower than the Standard No. 1311-50 by 0.80 and 0.64, respectively.

These differences are resulted from the irregular shape at the rooftop of the building and its surrounding areas. The study of wind tunnel test is shown its accuracy and reliable calculation. Therefore, the wind tunnel test can be used instead of the standard and may reduce the construction cost.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณท่านที่มีส่วนช่วยเหลือดังนี้ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ ผดุงศิลป์ ที่ให้คำปรึกษาเสนอแนะในการเขียนงานวิจัย ส่งเสริมให้ผู้จัดทำมีความกล้า เชื่อมั่นในการนำเสนอทั้งในด้านงานวิจัยและในการปฏิบัติงาน รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาด้านพลศาสตร์โครงสร้างและการทดสอบในอุโมงค์ลมและให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์ ผู้อำนวยการหลักสูตรการจัดการทางวิศวกรรม ที่คอยกระตุ้นและบ่มเพาะผู้จัดทำให้ประสบความสำเร็จด้านการศึกษา ท่านอาจารย์ ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์ ที่ให้ข้อคิดและมุมมองอย่างกว้างในการจัดงานวิจัยให้มีความครอบคลุมรอบด้านและตอบสนองความต้องการของสังคม

นอกจากนี้ ขอขอบคุณคุณคุณเด่นชัย มณีบุญ นักศึกษาปริญญาเอก หลักสูตรการจัดการทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ที่ช่วยถ่วงถ่วงและให้คำปรึกษาแนวทางการจัดทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดและคุณชรรณชนก เจริญทรัพย์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการจัดเรียงวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาประเภททุนสำหรับข้าราชการ พนักงานรัฐวิสาหกิจ เจ้าหน้าที่ของรัฐและธุรกิจเอกชนแก่ผู้จัดทำ

อรรถกร เกร็ดฤกษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ฅ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	34
3.1 การทดสอบในอุโมงค์ลม.....	34
3.2 การวัดความเร็วลมและความเร็วปั่นป่วน (Wind-speed and Wind-turbulent Measurement).....	39
3.3 เครื่องมือวัดแรงพื้นฐานแบบจำลอง.....	39
3.4 แบบจำลอง.....	40
3.5 สมมติฐานและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	42
4. ผลการวิจัย.....	44
ผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม.....	44
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ย (Mean Wind Force Coefficient).....	44
4.2 ผลการคำนวณสเปกตรัมด้านอากาศพลศาสตร์ของโมเมนต์และ โมเมนต์บิดพื้นฐานของแบบจำลอง.....	44

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง ของความผันผวนของโมเมนต์และโมเมนต์บิดที่ฐานของแบบจำลอง (Standard Devaion or Root Mean Square of Fluctuating Base Moment and Torques).....	47
4.4 ผลการคำนวณแรงลม.....	50
4.5 ผลการคำนวณการสั่นไหวของอาคาร.....	61
ผลการคำนวณตามมาตรฐาน มยผ.1311-50.....	61
4.6 ผลการคำนวณแรงลม.....	68
4.7 ผลการคำนวณการสั่นไหวของอาคาร.....	70
การเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและการคำนวณ ตามมาตรฐาน มยผ.1311-50.....	70
4.8 การเปรียบเทียบแรงลม.....	71
4.9 การเปรียบเทียบการสั่นไหวของอาคาร.....	73
4.10 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	74
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก.....	84
ก. ผลการคำนวณสเปกตรัมด้านพลศาสตร์ของโมเมนต์และโมเมนต์บิดที่ฐาน ของแบบจำลอง.....	85
ข. การคำนวณแรงลมและผลตอบสนองของอาคาร ตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 โดยใช้โปรแกรมหางนกยูง 2.1.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	124

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่า Turbulent Intensity , $I_u(z)$ ตามภูมิประเทศแบบต่าง ๆ	10
4.1 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ย (Mean Wind Force Coefficient).....	45
4.2 ตารางแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของ ความผันผวนของโมเมนต์และโมเมนต์บิดที่ฐาน.....	48
4.3 ตารางแสดงโมเมนต์รอบแกน Y ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}_y).....	51
4.4 ตารางแสดงโมเมนต์รอบแกน X ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}_x).....	53
4.5 ตารางแสดงโมเมนต์รอบแกน Z (โมเมนต์บิด) ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}_z).....	55
4.6 ตารางแสดงค่าสัมบูรณ์ของ โมเมนต์ที่ฐานสูงสุดและพฤติกรรมหลักของ แต่ละกรณี.....	58
4.7 ตารางแสดงโมเมนต์ที่ฐานจากส่วนสั้นพ้อง (M_R).....	62
4.8 ตารางแสดงอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร.....	65
4.9 ตารางแสดงโมเมนต์ที่ฐานสูงสุด.....	68
4.10 ตารางแสดงอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคาร.....	75
4.11 ตารางแสดงการเปรียบเทียบโมเมนต์ที่ฐานสูงสุดในทิศทาง.....	71
4.12 ตารางแสดงการเปรียบเทียบโมเมนต์ที่ฐานสูงสุดของแต่ละแกน.....	72
4.13 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงลมสถิตเทียบเท่าที่ยอดอาคาร.....	72
4.14 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารในทิศทางเมื่อ ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) = 300 kg/m ³	73
4.15 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารในทิศทางเมื่อ ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) = 400 kg/m ³	74
4.16 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารในทิศทางเมื่อ ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) = 500 kg/m ³	74
4.17 ตารางแสดงการเปรียบเทียบโมเมนต์ที่ฐานสูงสุดระหว่างงานวิจัยนี้และ งานวิจัยของ Zhou et al. (2003)	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารระหว่างงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Zhou et al. (2003) เมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร $(m) = 300 \text{ kg/m}^3$	76



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงการพังทลายของอาคารหล่อเย็น โรงไฟฟ้าเฟอร์รี่บริดจ์.....	2
2.1 แสดงระบบที่มีระดับขั้นความอิสระเท่ากับ 1 (SDOF).....	5
2.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่า คุณสมบัติทางพลวัตน์ (DMF) และอัตราส่วนความถี่ (β).....	7
2.3 แสดงลักษณะความเร็วมเฉลี่ยที่ความสูงต่าง ๆ.....	8
2.4 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมตามความสูงจากพื้นดิน.....	9
2.5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง.....	11
2.6 แสดงแรงลัพธ์ของแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง.....	12
2.7 แสดงการแยกฟุ้งกั้นแบบสุ่มด้วยอนุกรมฟูเรียร์.....	13
2.8 แสดง Power Spectral Density (PSD).....	14
2.9 แสดงลักษณะของความเร็วม.....	14
2.10 แสดง Aerodynamic admittance สำหรับแผ่นสี่เหลี่ยมเสนอโดย Vickery (1965)...	17
2.11 แสดงแผนภาพวิธีการหาการเสีรูปของ โครงสร้างเมื่อมีแรงลมมากระทำ.....	19
2.12 แสดงส่วนของ Background และ Resonant ของ PSD ของผลตอบสนอง.....	20
2.13 แสดงการเสีรูปของ โครงสร้างเนื่องจากแรงลมที่เวลาใด ๆ.....	21
3.1 แสดงลักษณะของอุโมงค์ลมช่วงยาวแบบเปิดของ TU-AIT.....	35
3.2 แสดงการติดตั้ง Spires และ Roughness Element ภายในอุโมงค์ลม.....	36
3.3 แสดงความเร็วมในรูปแบบการแปรเปลี่ยนของความเร็วมเฉลี่ยตามความสูง.....	36
3.4 แสดงความเข้มข้นของการปั่นป่วนของลม.....	37
3.5 แสดงสเปกตรัมของความปั่นป่วนที่ความสูง 30 , 60 และ 100 ซม.	38
3.6 แสดง Hot-Sphere Anemometer.....	39
3.7 แสดงเครื่องมือวัดแรงที่ฐาน.....	40
3.8 แสดงขอบเขตที่ทำการศึกษา.....	41
3.9 แสดงลักษณะแบบจำลองอาคารสูงและแกนอ้างอิง.....	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ย (Mean Wind Force Coefficient).....	47
4.2 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของ ความผันผวนของโมเมนต์และโมเมนต์บิดที่ฐาน.....	50
4.3 แสดงโมเมนต์ที่ฐานสูงสุด (ก) \hat{M}_y และ (ข) \hat{M}_x	57
4.4 แสดงโมเมนต์บิดที่ฐานสูงสุด \hat{M}_z	58
4.5 แสดงแรงลมสถิตเทียบเท่า \hat{P}_x (คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์ที่ฐานสูงสุด จากมุม 270 องศา).....	59
4.6 แสดงแรงลมสถิตเทียบเท่า \hat{P}_y (คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์ที่ฐานสูงสุด จากมุม 170 องศา).....	59
4.7 แสดงโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า \hat{P}_z (คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์บิดที่ฐาน สูงสุดจากมุม 70 องศา).....	60
4.8 แสดงโมเมนต์ที่ฐานจากส่วนสั้นพ้อง (M_{R-Y}) และ (M_{R-X}).....	64
4.9 แสดงโมเมนต์บิดที่ฐานจากส่วนสั้นพ้อง (M_{R-Z}).....	64
4.10 แสดงอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร.....	67
4.11 แสดงแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม.....	69
4.12 แสดงแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม.....	69
4.13 แสดงโมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า.....	70

บทที่ 1

บทนำ

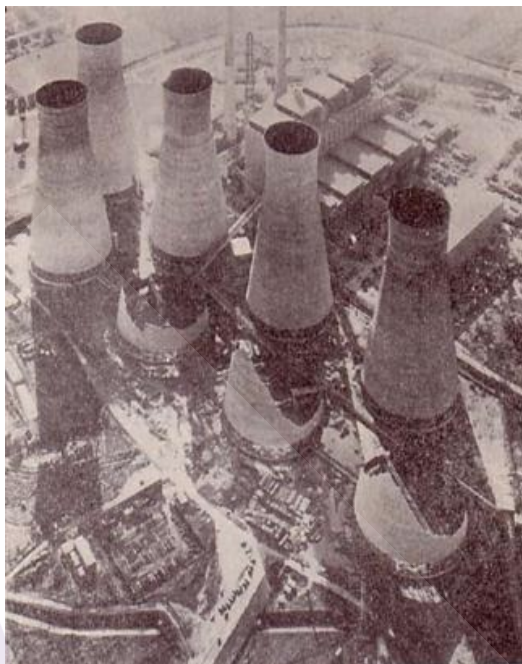
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอาคารสูงในกรุงเทพมหานครมีแนวโน้มที่จะสูงมากขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านพื้นที่และเทคโนโลยีการก่อสร้างที่ทันสมัย การออกแบบโครงสร้างอาคารจะต้องออกแบบให้มีกำลัง (Strength) และเสถียรภาพ (Stability) ที่สูงเพียงพอต่อการรับแรงกระทำต่าง ๆ และแรงลมเป็นแรงประเภทหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึง

แรงลมเป็นพลังงานที่สามารถสร้างความเสียหายให้แก่โครงสร้างอาคารได้ หากโครงสร้างไม่ได้รับการออกแบบที่สามารถรับแรงลมที่ได้อาจนำมาซึ่งความเสียหายในชีวิตและทรัพย์สินดังที่เกิดขึ้นในอดีต โดยเมื่ออาคารรับแรงลมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมรอบ ๆ กับ โครงสร้างเป็นผลทำให้เกิดแรงดันหรือแรงดูดกระทำกับโครงสร้างในตำแหน่งต่าง ๆ

ตัวอย่างการพังทลายของอาคารจากแรงลม เช่น ในกรณีของโรงไฟฟ้าเฟอร์รี่บริดจ์ (Ferrybridge Powerplant Station) ดังแสดงในภาพที่ 1.1





ภาพที่ 1.1 การพังทลายของอาคารหล่อเย็นโรงไฟฟ้าเฟอร์รี่บริดจ์

ที่มา: <https://tonyfaceless.wordpress.com/2012/01/18/cooling-towers/>

โรงไฟฟ้างัดกล่าวประกอบด้วยอาคารหล่อเย็นจำนวน 8 อาคาร สูง 375 ฟุต (114.3 เมตร) ลักษณะอาคารเป็นแบบแผ่นโค้ง (Shell Surface) อาคารแต่ละอาคารอยู่ใกล้กันมาก ในวันที่ 1 พฤศจิกายน ค.ศ. 1965 ได้เกิดลมที่มีความเร็วสูงพัดผ่านและได้ทำให้อาคารดังกล่าวพังทลายลง 3 อาคาร มีการรายงานถึงสาเหตุการพังทลายของอาคารดังกล่าวหลายสาเหตุ เช่น การคำนวณความเร็วลมท้องถิ่นผิดพลาด การออกแบบให้มีอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยเกินไป นอกจากนี้พบว่าหนึ่งในสาเหตุของการพังทลายที่สำคัญ คือ อาคารดังกล่าวขณะออกแบบได้มีการจำลองอาคารเดี่ยวในการทดสอบในอุโมงค์ลม แต่ไม่ได้มีการจำลองอาคารเป็นกลุ่มอาคาร วิศวกรออกแบบจึงไม่ทราบว่ากรณีที่อาคารรายล้อมเป็นกลุ่มสามารถก่อให้เกิดการปั่นป่วนของแรงลมจนกระทั่งสามารถก่อให้เกิดความเสียหายจนกระทั่งอาคารพังทลายได้ ภายหลังได้มีการทดสอบเพื่อหาสาเหตุดังกล่าว พบว่าที่แรงลมท้องถิ่นเฉลี่ย 45 ไมล์ต่อชั่วโมง (72.42 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) มีการประมาณความเร็วลมกรรโชกสูงสุดที่ฐานอาคารได้ 85 ไมล์ต่อชั่วโมง (136.80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) สามารถประมาณความเร็วลมที่ยอดอาคารได้ประมาณ 100 ไมล์ต่อชั่วโมง (160.93 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งเป็นความเร็วลมที่สูงพอให้เกิดความเสียหายต่ออาคาร

การออกแบบโครงสร้างอาคาร นอกจากจะต้องออกแบบให้มีกำลังและเสถียรภาพที่สูงเพียงพอที่จะสามารถต้านทานแรงลมได้อย่างปลอดภัยดังที่กล่าวมาแล้ว ยังต้องมีการคำนึงถึงสถานะจำกัดด้านการใช้งาน (Serviceability) อีกด้วย ซึ่งได้แก่ การสั่นไหวของอาคารที่เกิดจากแรงลม โดยจะต้องมีระดับที่ต่ำเพียงพอที่จะไม่ทำให้ผู้ใช้อาคารรู้สึกไม่สบายหรือเกิดอาการวิงเวียน ความรุนแรงของการสั่นไหวของอาคารที่มีผลต่อผู้ใช้อาคารสามารถวัดได้ในรูปของอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบ (Maximum Horizontal Acceleration)

ทั้งนี้ ในการออกแบบทั้งด้านกำลัง เสถียรภาพ และด้านการใช้งาน วิศวกรผู้ออกแบบสามารถใช้วิธีการคำนวณแรงลมตามมาตรฐานต่าง ๆ ประกอบการออกแบบ เช่น ในกรณีประเทศไทย ใช้การคำนวณตามมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยผ.1311-50 (สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2550) แต่มาตรฐานดังกล่าวยังไม่ครอบคลุมการหลายกรณี เช่น อาคารที่มีความอ่อนตัวสูง อาคารที่มีรูปทรงไม่ปกติ หรือ อาคารที่มีอาคารสูงอื่นอยู่ข้างเคียง เป็นต้น ในประเด็นดังกล่าวนี้อาจมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมเพื่อหาหน่วยแรงลมที่เหมาะสมที่กระทำต่อโครงสร้างและระดับการสั่นไหวของอาคาร หนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมในความถูกต้องและน่าเชื่อถือในปัจจุบัน คือ วิธี High Frequency Force Balance (HFFB) ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกโดยจะทำการจำลองเฉพาะรูปทรงภายนอกของอาคารเท่านั้น จากนั้นจึงทำการประมาณค่าแรงและการสั่นไหวของอาคารโดยใช้คุณสมบัติทางด้านมวล สติเฟสและความหน่วงของโครงสร้าง (สุกิต, 2547)

ดังนั้น จากการศึกษาความสูงของอาคารในกรุงเทพมหานครมีแนวโน้มที่จะสูงมากยิ่งขึ้น โดยพบว่า จากข้อมูลใน Wikipedia พบว่า 100 อันดับแรกของอาคารในประเทศไทยในปี พ.ศ.2560 มีความสูงตั้งแต่ 155 – 314 เมตร มีอาคารมหานครซึ่งเป็นอาคารที่ก่อสร้างแล้วเสร็จและสูงที่สุดมีความสูงอยู่ที่ประมาณ 314 เมตร ทำให้มีความน่าสนใจในการศึกษาอาคารที่มีความสูงในระดับที่ใกล้เคียงกับอาคารมหานคร ที่มักมีอาคารสูงอื่นอยู่ใกล้เคียงว่าจะมีแรงลมกระทำต่ออาคารและผลของการสั่นไหวของอาคารเป็นอย่างไร โดยได้จำลองอาคารให้มีรูปทรงค่อนข้างปกติลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมที่ไม่ได้มีความโดดเด่นด้านสถาปัตยกรรมและมีความไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยบนยอดอาคารที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป และทำการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณตามมาตรฐานของประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบแรงลมของอาคารสูง ระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลม และมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยผ.1311-50 โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย

2. ศึกษาเปรียบเทียบการสั่นไหวของอาคารสูง ระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลม และมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยผ.1311-50 โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้พิจารณาผลกระทบของแรงลมต่อโครงสร้างที่มีลักษณะแบบ Bluff Body โดยไม่พิจารณาพฤติกรรม Aeroelastic ที่รวมผลปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างลมและโครงสร้างเข้าไป ด้วย การทดสอบใช้หลักการของ HFFB

2. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณทั้งวิธีการทดสอบในอุโมงค์ลมและการคำนวณตามมาตรฐานแรงลม กำหนดให้ใช้ค่าแนะนำตามมาตรฐาน มยผ.1311-50

3. คำนวณแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงจากผลการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยพิจารณาผลกระทบของอาคารข้างเคียง (Surrounded Buildings) เนื่องจากกำหนดให้อาคารตั้งอยู่ในบริเวณศูนย์กลางเมืองใหญ่ที่มีอาคารอื่นรวมเป็นองค์ประกอบรวมอยู่ในการทดสอบ

4. ศึกษาเปรียบเทียบผลการศึกษาแรงลมและการสั่นไหวของอาคารสูงระหว่างการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม และ มาตรฐาน มยผ.1311-50

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงขนาดแรงลมและระดับการสั่นไหวของอาคารสูงในบริเวณศูนย์กลางของกรุงเทพมหานครที่มักได้รับผลกระทบจากแรงละลอกลมอันเนื่องมาจากอาคารข้างเคียงจากวิธีการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

2. ทำให้ทราบถึงแนวทางการประยุกต์ใช้การคำนวณแรงลมและผลตอบสนองของอาคารสูงตามมาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย

3. ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์แก่วิศวกรผู้ออกแบบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการคำนวณขนาดแรงลมและระดับการสั่นไหวของอาคาร

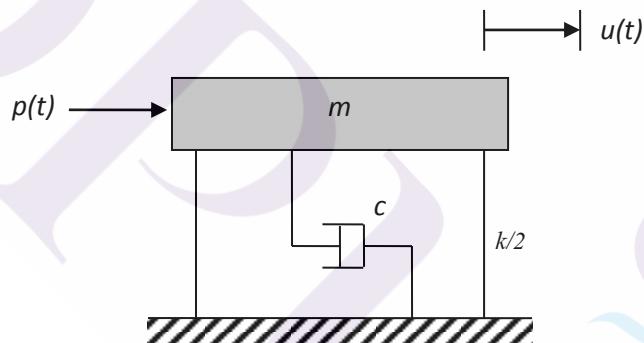
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 พื้นฐานพลศาสตร์โครงสร้าง

ระบบที่มีระดับขั้นความอิสระเท่ากับ 1 (Single Degree of Freedom , SDOF) ซึ่งมีมวล (mass , m) สติฟเนส (stiffness, k) และ ความหน่วง (damping , c) ได้รับแรงกระทำ $p(t)$ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ระบบที่มีระดับขั้นความอิสระเท่ากับ 1 (SDOF)

กรณี ระบบ SDOF ดังกล่าว กรณีที่ไม่มีแรงกระทำ $p(t)$ สามารถเขียนสมการสมดุลของการเคลื่อนที่ที่มีการสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) ได้ดังสมการที่ 2.1

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ $u(t)$, $\dot{u}(t)$ และ $\ddot{u}(t)$ คือ การเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่งที่เวลา t ใด ๆ ตามลำดับ

$$\text{กำหนดให้ } \omega \text{ คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบ} = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\xi \text{ คือ อัตราส่วนความหน่วงของระบบ} = \frac{c}{2m\omega}$$

สมการที่ 2.1 สามารถจัดรูปได้ใหม่ดังสมการที่ 2.2

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega \dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = 0 \quad (2.2)$$

กรณี ระบบ SDOF ดังกล่าวได้รับแรงกระทำ $p(t) = p_0 \sin(\bar{\omega}t)$ สามารถเขียนสมการสมดุลการเคลื่อนที่แบบได้รับแรงกระทำ (Forced Vibration) ได้ดังสมการที่ 2.3

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) = p_0 \sin(\bar{\omega}t) \quad (2.3)$$

การแก้สมการที่ 2.3 ได้คำตอบออกมา 2 ส่วน คือ คำตอบแบบทั่วไป (General Solution) ซึ่งเป็นผลตอบสนองแบบชั่วคราวของระบบ และคำตอบแบบเฉพาะ (Particular Solution) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงที่มากระทำต่อระบบ

โดยทั่วไปแล้วในด้านพลศาสตร์ จะสนใจกับส่วนของคำตอบแบบเฉพาะ เนื่องจากเป็นผลตอบสนองของระบบในระยะยาว หรือเรียกว่า ผลตอบสนองแบบคงตัว (Steady-state Response)

กรณีกำหนดสถานะเริ่มต้นให้มีสภาพเริ่มหยุดนิ่งซึ่งคือ $u(0) = \dot{u}(0) = 0$ และสนใจเฉพาะผลตอบสนองแบบคงตัว จะได้คำตอบการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 2.4

$$u(t) = \rho \sin(\bar{\omega}t - \theta) \quad (2.4)$$

เมื่อ ρ คือ แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่มีค่าดังสมการที่ 2.5

$$\rho = \frac{p_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - (\bar{\omega}/\omega)^2)^2 + (2\xi(\bar{\omega}/\omega))^2}} \quad (2.5)$$

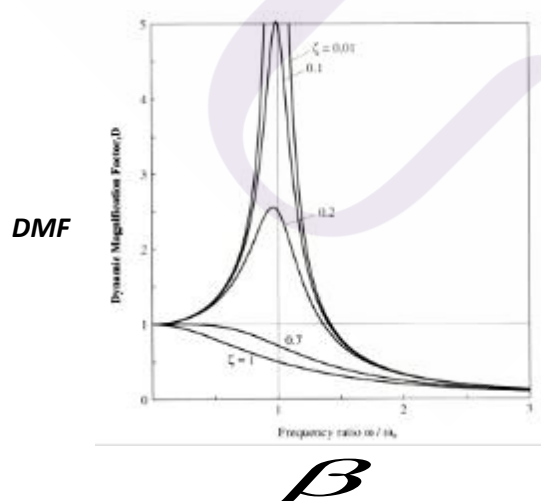
กำหนดให้อัตราส่วนความถี่ $\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega}$ และสนใจค่าสูงสุดของผลตอบสนองซึ่งเกิดขึ้น และหากกำหนดให้เทอม $\sin(\bar{\omega}t - \theta)$ ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 จะได้ค่า คณขยายทางพลวัตน์ (Dynamic Magnification Factor , DMF) ดังสมการที่ 2.6

$$DMF = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (2.6)$$

สามารถจัดรูปสมการที่ 2.5 และ 2.6 ได้ดังสมการที่ 2.7

$$\rho = \frac{p_0}{k} DMF \quad (2.7)$$

พิจารณาสมการที่ 2.7 จะเห็นว่าส่วน $\frac{p_0}{k}$ คือ ผลตอบสนองของโครงสร้างแบบสถิตย์ และสามารถอธิบายได้ว่า DMF เป็นตัวคูณเพื่อขยายผลตอบสนองของโครงสร้างแบบสถิตย์ของระบบให้เป็นค่าสูงสุด เมื่อระบบถูกกระทำด้วยแรงที่มีลักษณะกระทำซ้ำไปซ้ำมาด้วยความถี่ $\bar{\omega}$ และหากพิจารณาสมการที่ 2.6 และภาพที่ 2.2 พบว่าเมื่อ ค่าอัตราส่วนความถี่ β มีค่าใกล้ 1 ค่า DMF จะมีค่าสูงมาก เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่าการสั่นพ้องหรือการกำทอน (Resonance)



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่า คณขยายทางพลวัตน์ (DMF) และ อัตราส่วนความถี่ (β)

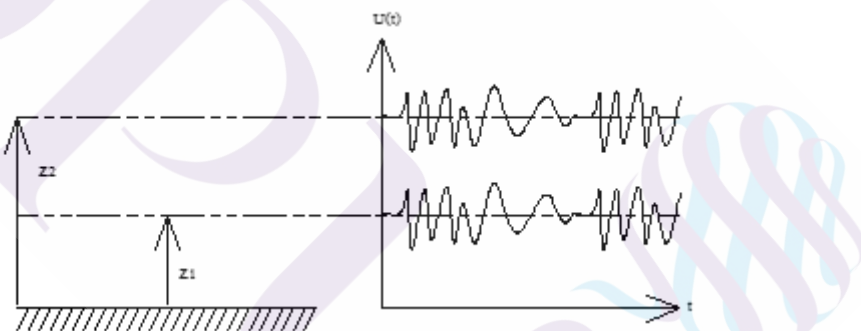
2.1.2 ลักษณะของแรงลมและผลกระทบต่อโครงสร้าง

2.1.2.1 ลักษณะของลมตามธรรมชาติ

สิ่งที่สำคัญของลักษณะของแรงลมมี 3 ประเด็น คือ ความเร็วลมเฉลี่ย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมตามแนวตั้ง และลักษณะของค่าความแปรปรวนหรือความผันผวนของความเร็วลม

ก. ความเร็วลมเฉลี่ย

ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับพื้นดิน มีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูง ความเร็วลมเฉลี่ยจะมีค่าค่อนข้างแน่นอนตลอดเวลาในช่วงที่บันทึกค่าและ แอมพลิจูดของส่วนความแปรปรวนของลมสามารถประมาณให้มีค่าเท่า ๆ กันในทุกความสูง z จากพื้นดิน แสดงดังภาพที่ 2.3

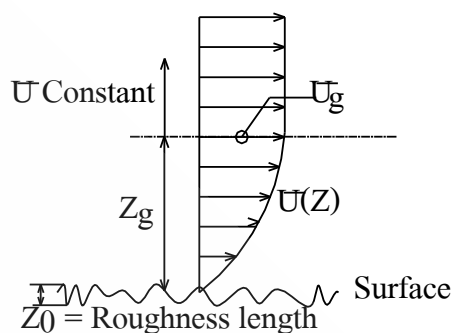


ภาพที่ 2.3 ลักษณะความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูงต่าง ๆ

ข. ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามความสูงจากพื้นดิน

ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นตามความสูงจากพื้นดิน มีผลจากคุณสมบัติความหนืดของอากาศ ซึ่งเป็นของไหลชนิดหนึ่ง การเคลื่อนที่ของอากาศในบริเวณระดับพื้นดินจะมีค่าน้อยมากสามารถกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะส่งผลต่อการไหลของอากาศในชั้นบนที่อยู่ติดกัน โดยความเร็วเฉลี่ยของอากาศจะเพิ่มขึ้นตามความสูงจนถึงระดับความสูงระดับหนึ่งความเร็วลมเฉลี่ยจะมีค่าคงที่ตามภาพที่ 2.4 เรียกระดับความสูงนี้ว่า ความสูงเกรเดียนท์ (Gradient Height, Z_g) มีค่าประมาณ 500 – 1,000 เมตร ความแตกต่างกันนี้เป็นไปตามสภาพความขรุขระของพื้นผิวดิน การคำนวณ

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ยตามความสูง สามารถหาได้จากทฤษฎีลักษณะของความเร็วเฉลี่ย (Theoretical of Mean Velocity Profile) ด้วยกฎของลอการิทึม ดังสมการที่ 2.8 ซึ่งโดยทั่วไปความเร็วเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆ สามารถประมาณค่าด้วยกฎเลขยกกำลัง ดังสมการที่ 2.9



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมตามความสูงจากพื้นดิน

$$\frac{\bar{U}(Z)}{\bar{U}(Z_r)} = \frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(Z_r/Z_0)} \quad (2.8)$$

$$\frac{\bar{U}(Z)}{\bar{U}(Z_r)} = \left(\frac{Z}{Z_r}\right)^\alpha \quad \text{โดยที่ } (0 < Z < Z_g) \quad (2.9)$$

ค. การเปลี่ยนแปลงของค่าความแปรปรวนของความเร็วลม

ความเร็วลมจะแปรเปลี่ยนตามความสูง z และมีค่าเปลี่ยนไปตามเวลา t สามารถแสดงความเร็วลมได้ดังสมการที่ 2.10 และสามารถคำนวณความเร็วลมเฉลี่ย $\bar{U}(z)$ ได้จากสมการที่ 2.11 และสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean square) ของความเร็วลมส่วนที่แปรปรวนจากค่าเฉลี่ยได้จากสมการที่ 2.12

$$U(z,t) = \bar{U}(z) + u(z,t) \quad (2.10)$$

$$\bar{U}(z) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} U(z,t) dt \quad (2.11)$$

$$\sigma_u^2(z) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u(z,t)^2 dt \quad (2.12)$$

ค่าความแปรปรวนของความเร็วลมนิยมนิยามเขียนในรูป ของ Turbulence Intensity, $I_u(z)$ ซึ่ง
มีค่าดังสมการที่ 2.13

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{\bar{U}(z)} \quad (2.13)$$

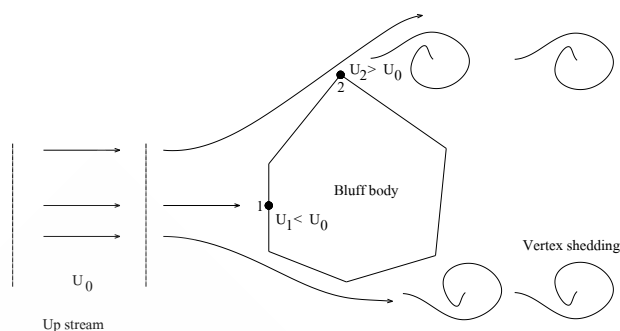
ค่า $I_u(z)$ โดยทั่วไปจะมีค่าแตกต่างกันตามแต่ละภูมิประเทศดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า Turbulence Intensity, $I_u(z)$ ตามภูมิประเทศแบบต่าง ๆ

สภาพภูมิประเทศ	$I_u(z)$
แบบเปิดโล่ง	7 - 9 %
แบบชานเมือง	10 - 20 %
แบบในเมือง	15 - 25 %

2.1.2.2 ผลกระทบของแรงลมต่อโครงสร้าง

จากทฤษฎีของการไหล เมื่ออากาศไหลผ่านบริเวณที่มีสิ่งกีดขวาง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลของอากาศขึ้นรอบ ๆ สิ่งกีดขวาง ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมเมื่อไหลผ่านสิ่งกีดขวาง

สามารถคำนวณแรงที่กระทำกับสิ่งกีดขวางได้จากสมการการไหลของเบอร์นูลลีโดยผลรวมของความดันที่จุดใด ๆ มีค่าคงที่ได้ตามสมการที่ 2.14

$$\frac{1}{2} \rho U_0^2 + P_0 = \frac{1}{2} \rho U_1^2 + P_1 \quad (2.14)$$

กำหนดให้ $\Delta P = P_1 - P_2$ จะได้สมการที่ 2.15

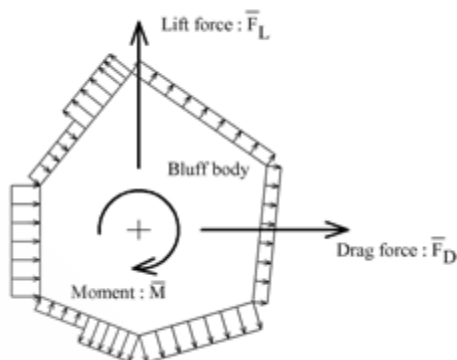
$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho (U_0^2 - U_1^2) \quad (2.15)$$

จากสมการ ที่ 2.15 จะได้ว่า

$U_1 < U_0$ ทำให้ ΔP เป็นบวก หมายถึงเกิดแรงผลัก (Pressure) กระทำกับผิวภายนอกของสิ่งกีดขวาง

$U_2 > U_0$ ทำให้ ΔP เป็นลบ หมายถึงเกิดแรงดูด (Suction) กระทำกับผิวภายนอกของสิ่งกีดขวาง

หากพิจารณารวมแรงที่กระทำกับผิวภายนอกทั้งหมดเป็นแรงใน 3 ทิศทาง คือ แรงในทิศทางลม (Drag force) แรงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมหรือแรงลอยตัว (Lift force) และโมเมนต์บิด (Torsion) จะได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แรงลัพธ์ของแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง

สำหรับแรงใน 3 ทิศทางจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 – 2.18 ดังนี้

$$\bar{F}_D = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 A C_D \quad (2.16)$$

$$\bar{F}_L = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 A C_L \quad (2.17)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 A B C_M \quad (2.18)$$

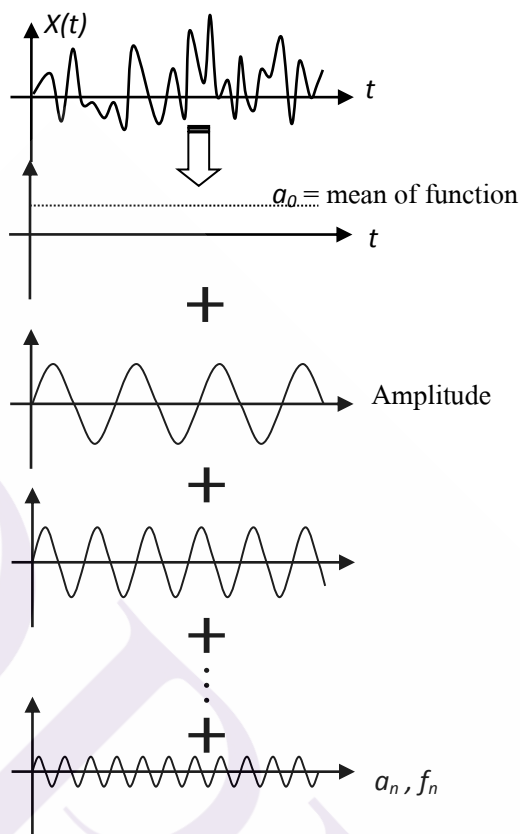
โดยที่ C_D , C_L และ C_M เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลม หาได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม มีค่าต่างกันขึ้นกับลักษณะรูปทรงของสิ่งกีดขวาง และ ρ คือความหนาแน่นอากาศมีค่า 1.25 kg/m^3

2.1.3 ทฤษฎีการสั่นแบบสุ่ม

แรงลมเป็นแรงที่มีลักษณะเป็นแรงแบบสุ่ม ซึ่งลักษณะของฟังก์ชันแบบสุ่มนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

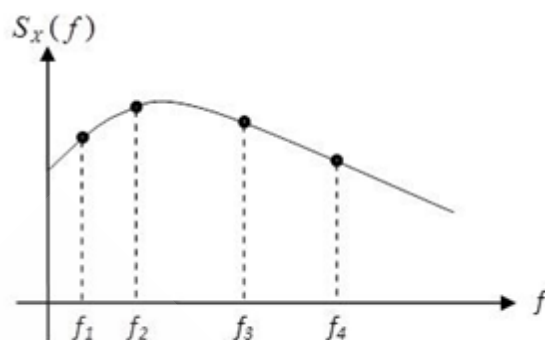
ก. ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันแบบสุ่ม (Mean)

ข. ค่าในส่วนความแปรปรวนจากค่าเฉลี่ย (Fluctuation) ซึ่งเป็นฟังก์ชันตรีโกณมิติอย่างง่ายที่มีแอมพลิจูด a และความถี่ f หลาย ๆ ค่ารวมกันตามหลักการของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การแยกฟังก์ชันแบบสุ่มด้วยอนุกรมฟูเรียร์

ปัญหาทางด้านวิศวกรรมโยธา นิยมเขียนฟังก์ชันแบบสุ่มในส่วนของความแปรปรวนในรูปของ Power Spectral Density PSD ซึ่ง เป็นความสัมพันธ์ของสัดส่วนค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean square, $S_x(f)$) ของความแปรปรวนของฟังก์ชัน ในช่วงความถี่ f ถึง $f+df$ ซึ่ง PSD สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.8 และค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square) ของฟังก์ชันแบบสุ่มในส่วนของความแปรปรวนสามารถหาได้จากสมการที่ 2.19



ภาพที่ 2.8 Power Spectral Density (PSD)

$$\sigma_x^2 = \int_0^{\infty} S_x(f) df \quad (2.19)$$

2.1.4 ผลการตอบสนองของแรงลมในทิศทางลม

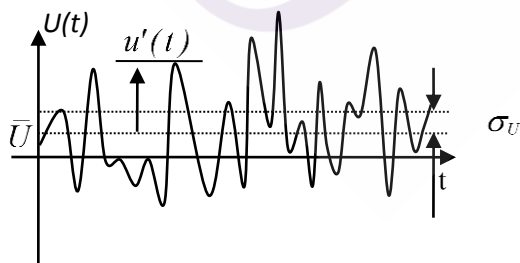
2.1.4.1 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง

พิจารณาความเร็วลม $u(t)$ ที่ระดับความสูงใด ๆ ดังภาพที่ 2.9 ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบสุ่ม สามารถเขียนความเร็วลมได้ดังสมการที่ 2.20

$$u(t) = \bar{U} + u'(t) \quad (2.20)$$

เมื่อ \bar{U} คือ ความเร็วลมเฉลี่ย

$u'(t)$ คือ ความแปรปรวนของความเร็วลมจากค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของความเร็วลม

พิจารณาแรงในทิศทางลมกระทำต่อโครงสร้าง $F_D(t)$ จะได้ดังสมการที่ 2.21

$$\begin{aligned} F_D(t) &= \frac{1}{2} \rho A C_D u^2(t) \\ &= \frac{1}{2} \rho A C_D (\bar{U} + u'(t))^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho A C_D (\bar{U}^2 + 2\bar{U}u'(t) + (u'(t))^2) \end{aligned} \quad (2.21)$$

พิจารณาว่า $(u'(t))^2 \rightarrow 0$ จะสามารถเขียน Drag Force ได้ดังสมการที่ 2.22

$$F_D(t) = \frac{1}{2} \rho A C_D \bar{U}^2 + \rho A C_D \bar{U} u'(t) \quad (2.22)$$

จาก แรงในทิศทางลมเฉลี่ย (Mean Drag Force, \bar{F}_D) ซึ่งมีค่าตามสมการที่ 2.16 และ แรงในทิศทางลมจากส่วนความแปรปรวน (Fluctuating Drag Force, $F'_D(t)$) มีค่าตามสมการ 2.23

$$F'_D(t) = \rho A C_D \bar{U} u'(t) \quad (2.23)$$

ได้แรงในทิศทางลมกระทำต่อโครงสร้าง ตามสมการที่ 2.24

$$F_D(t) = \bar{F}_D + F'_D(t) \quad (2.24)$$

พิจารณาสมการที่ 2.23 สามารถหาค่า Mean Square ของแรงลมในทิศทางลมจากส่วนของ Fluctuating Drag Force, $F'_D(t)$ ได้เป็น $\bar{F_D'^2}$ ตามสมการที่ 2.25

$$\bar{F_D'^2} = \left(\rho A C_D \bar{U} \right)^2 \overline{u'^2(t)} \quad (2.25)$$

เมื่อ $\overline{u'^2(t)} =$ Mean square of fluctuation velocity

และจากสมการที่ 2.16 จะสามารถจัดรูปใหม่ ได้ดังสมการที่ 2.26

$$\frac{2\bar{F}_D}{\bar{U}^2} = \rho AC_D \quad (2.26)$$

แทนค่า ρAC_D จากสมการที่ 2.26 ในสมการที่ 2.25 จะสามารถเขียน $\bar{F}_D'^2$ ได้ดังสมการที่ 2.27

$$\bar{F}_D'^2 = \frac{4(\bar{F}_D)^2}{\bar{U}^2} \times \bar{u}'^2 \quad (2.27)$$

สมการที่ 2.27 ค่า $\bar{F}_D'^2$ และ \bar{u}'^2 คือค่า Mean square ของความแปรปรวนในส่วนองแรงลมในทิศทางลม และความเร็วลม ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ PSD ได้ตามสมการที่ 2.28

$$S_D(f) = \frac{4(\bar{F}_D)^2}{\bar{U}^2} \times S_u(f) \quad (2.28)$$

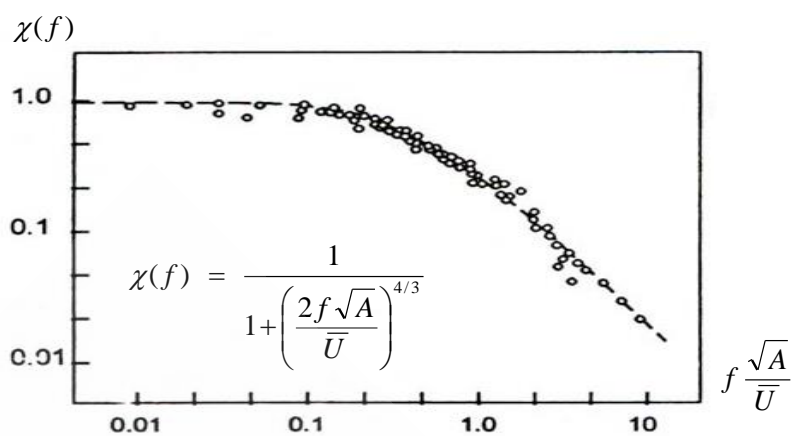
เมื่อ $S_D(f)$ คือ Power Spectral Density ของแรงลมในทิศทางลม
และ $S_u(f)$ คือ Power Spectral Density ของความเร็วลม

สมการที่ 2.28 ใช้สมมติฐานว่าทุกส่วนของโครงสร้างเกิดแรงลมขึ้นพร้อมกันซึ่งเป็นจริงเฉพาะในโครงสร้างที่ขนาดเล็ก แต่ให้ผลที่มากเกินไปจริงสำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งแรงลมไม่ได้กระทำพร้อมกันทุกตำแหน่งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นจึงปรับแก้สมการ 2.28 ด้วยค่าตัวคูณลดซึ่งเรียกว่า Aerodynamic admittance ($\chi^2(f)$) ได้ตามสมการที่ 2.29

$$S_D(f) = \frac{4(\bar{F}_D)^2}{\bar{U}^2} \times \chi^2(f) \times S_u(f) \quad (2.29)$$

ค่า Aerodynamic admittance $\chi^2(f)$ หาได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม และใช้การประมาณค่าเชิงตัวเลข ดังเช่นตัวอย่างที่ทดสอบสำหรับโครงสร้างแผ่นรูปสี่เหลี่ยม โดย Vickery (1965) ได้เสนอการหาค่า $\chi^2(f)$ ไว้ดังสมการที่ 2.30 และภาพที่ 2.10

$$\chi(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2f\sqrt{A}}{\bar{U}} \right)^{4/3}} \quad (2.30)$$



ภาพที่ 2.10 Aerodynamic admittance สำหรับแผ่นสี่เหลี่ยม เสนอโดย Vickery (1965)

2.1.4.2 ผลตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากแรงลม

การเสียรูปของโครงสร้างที่เกิดจากแรงลม ในทิศทางลมสามารถแยกเป็น 2 ส่วน คือ จากส่วนของแรงลมเฉลี่ย และจากส่วนของความแปรปรวนของลม ดังสมการที่ 2.31

$$X(t) = \bar{X} + x'(t) \quad (2.31)$$

โดย $\bar{X} = \frac{\bar{F}_D}{k}$ เป็นส่วนของการเสียภาพที่เกิดจากแรงลมเฉลี่ย, \bar{F}_D

และ $x'(t)$ เป็นส่วนของการเสียภาพที่เกิดจาก Fluctuation Drag Force, $\overline{F_D^2}$

พิจารณาส่วน $x'(t)$ จากหลักการของพลศาสตร์โครงสร้าง ในสมการที่ 2.7 ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mean square ของ แรงลมและการเสียรูป ในส่วนของ Fluctuation ได้ดังสมการที่ 2.32

$$S_x(f) = \frac{1}{k^2} |H(f)|^2 S_b(f) \quad (2.32)$$

โดย $|H(f)|^2 = \text{Dynamic Magnification Factor function}$ หรือ $\text{Mechanical Admittance}$ มีค่าดังสมการที่ 2.33

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{(1 - (\bar{f}/f)^2)^2 + (2\xi(\bar{f}/f))^2} \quad (2.33)$$

แทนค่า $S_D(f)$ จากสมการที่ 2.28 ในสมการที่ 2.32 ได้ดังสมการที่ 2.34

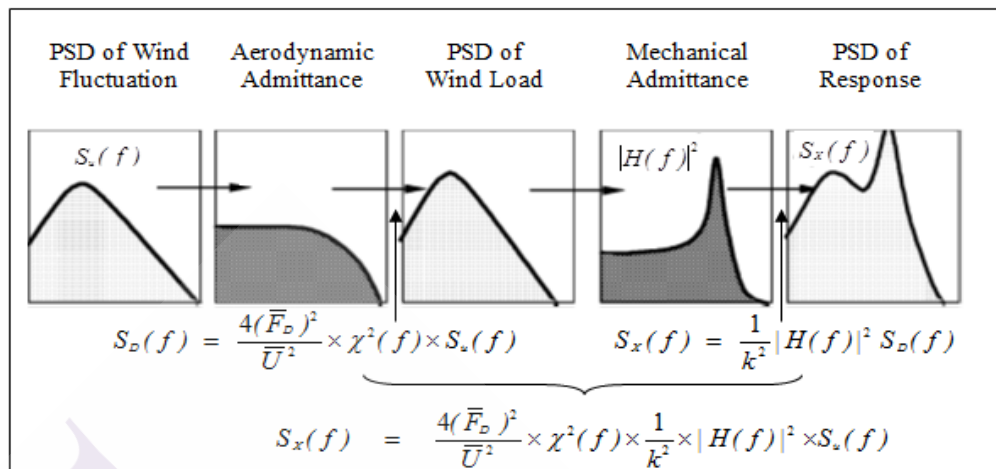
$$S_x(f) = \frac{4(\bar{F}_D)^2}{U^2} \times \chi^2(f) \times \frac{1}{k^2} \times |H(f)|^2 \times S_u(f) \quad (2.34)$$

สมการ 2.34 แสดงถึงการหา PSD ของการเสียรูปของโครงสร้างเมื่อมีแรงลมมากระทำ โดยอธิบายได้ดังภาพที่ 2.11 และสามารถจัดรูป $\bar{X} = \frac{\bar{F}_D}{k}$ ได้ดังสมการที่ 2.35

$$S_x(f) = \frac{4\bar{X}^2}{U^2} \times \chi^2(f) \times |H(f)|^2 \times S_u(f) \quad (2.35)$$

เมื่อรวมผลของ ทุกความถี่ ของแรงลมที่กระทำ และ การเสียรูปที่เกิดขึ้นจะได้ดังสมการที่ 2.36

$$\int_0^\infty S_x(f) df = \frac{4\bar{X}^2}{U^2} \times \int_0^\infty (\chi^2(f) \times |H(f)|^2 \times S_u(f)) df \quad (2.36)$$



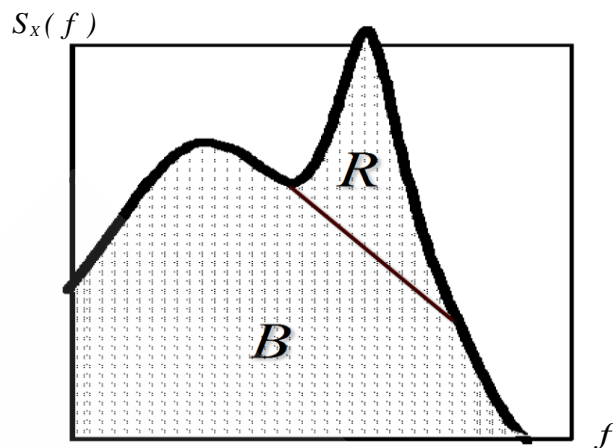
ภาพที่ 2.11 แผนภาพวิธีการหาค่าการเสถียรของโครงสร้างเมื่อมีแรงลมมากระทำ

จากสมการ 2.36 จัดรูปใหม่จะได้ ดังสมการ 2.37

$$\sigma_x^2 = \frac{4\bar{X}^2}{\bar{U}^2} \times \int_0^\infty (\chi^2(f) \times |H(f)|^2 \times S_u(f)) df$$

$$\sigma_x^2 = \frac{4\bar{X}^2 \sigma_u^2}{\bar{U}^2} \times \int_0^\infty \left(\chi^2(f) \times |H(f)|^2 \times \frac{S_u(f)}{\sigma_u^2} \right) df \quad (2.37)$$

จากสมการ 2.37 จะได้ว่า ค่าของ $\int_0^\infty \left(\chi^2(f) \times |H(f)|^2 \times \frac{S_u(f)}{\sigma_u^2} \right) df$ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของ Background และ Resonance ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงส่วนของ Background และ Resonant ของ PSD ของผลตอบสนอง

สามารถประมาณค่า σ_x^2 ด้วยสมการที่ 2.38

$$\sigma_x^2 \approx \frac{4\bar{X}^2 \sigma_u^2}{U^2} \times [B + R] \quad (2.38)$$

เมื่อ B คือ Background Component เป็นส่วนของ σ_x^2 เมื่อไม่คิดผลทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง คือให้ $|H(f)|^2 = 1$ ดังนั้นจะหาค่า B ได้จากสมการ 2.39

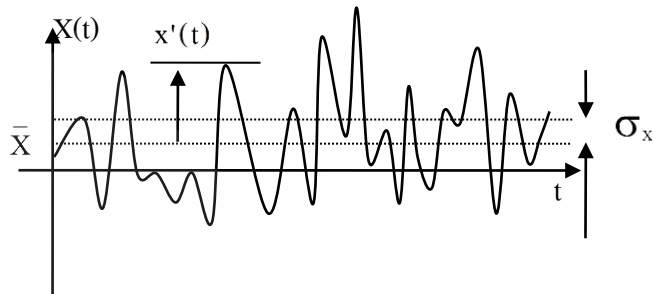
$$B = \int_0^{\infty} \left(\chi^2(f) \times \frac{S_u(f)}{\sigma_u^2} \right) df \quad (2.39)$$

และ R คือ Resonant Component เป็นส่วนของ σ_x^2 เมื่อรวมผลทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้างในส่วนของการกำทอนที่เกิดขึ้น ได้ดังสมการที่ 2.40

$$R = \chi^2(f_n) \times \frac{S_u(f_n)}{\sigma_u^2} \int_0^{\infty} |H(f)|^2 df \quad (2.40)$$

เมื่อ f_n คือความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง หน่วยเป็น Hz

2.1.4.3 การหาค่าสูงสุดของผลตอบสนองของโครงสร้างเนื่องจากแรงลม



ภาพที่ 2.13 การเสีรูปของโครงสร้างเนื่องจากแรงลมที่เวลาใด ๆ

พิจารณาการเสีรูปของโครงสร้างเนื่องจากแรงลมดังภาพที่ 2.13 สามารถประมาณค่าสูงสุดของการเสีรูปได้ดังสมการที่ 2.41

$$X_{max} = \bar{X} + g_p \sigma_x \quad (2.41)$$

เมื่อ g_p คือ Peak Factor เสนอโดย Davenport (1967) ดังสมการที่ 2.42

$$g_p = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (2.42)$$

v = Effective frequency or cycling rate

(อาจใช้ค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งจะให้ค่าที่ปลอดภัย)

T = ระยะเวลาที่ใช้ในการเฉลี่ยความเร็วลม

= 3600 สำหรับ Hourly wind speed

= 600 สำหรับ 10-min wind speed

พิจารณา สมการ 2.40 โดยทั่วไปในหลายมาตรฐานจะนิยามค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการกระโชกของลม (Gust Response Factor, G) ดังสมการที่ 2.43

$$\begin{aligned} G &= \frac{X_{max}}{\bar{X}} \\ &= \frac{\bar{X} + g_p \sigma_x}{\bar{X}} \\ &= 1 + g_p \frac{\sigma_x}{\bar{X}} \end{aligned} \quad (2.43)$$

จากสมการ 2.38, $\sigma_x \approx \sqrt{\frac{4\bar{X}^2}{U^2} \times [B+R]}$ และ $I_u = \frac{\sigma_u}{U}$ สามารถหาค่าของ G ได้ดังสมการ 2.44 ซึ่งเป็นรูปสมการที่ใช้กันทั่วไปในมาตรฐานแรงลมหลายประเทศ

$$G = 1 + 2g_p I_u \sqrt{B+R} \quad (2.44)$$

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของ Kareem et al. (2003) ได้กล่าวถึงมีข้อจำกัดของหลักการหาค่าสูงสุดตามสมการที่ 2.44 ไว้ 2 ประเด็น คือ

1. หลักการหาค่า G แบบนี้ พิจารณาจากอัตราส่วนการเลี้ยวรูปสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยการเลี้ยวรูปของโครงสร้าง ทำให้การประมาณค่าสูงสุดอาจผิดพลาดได้ เนื่องจากใช้เพียงค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของการเลี้ยวรูปในโหมดแรกเท่านั้น ซึ่งทำให้ได้ค่า G เป็นค่าคงที่สำหรับโครงสร้างหนึ่งๆ เมื่อนำค่า G นี้ไปหาแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างเพื่อการออกแบบจะได้ลักษณะการกระจายตัวของแรงลมตามลักษณะของค่าเฉลี่ยของแรงลมที่ระดับต่างๆ ของโครงสร้าง จึงขัดแย้งกับข้อเท็จจริงสำหรับอาคารสูงและโครงสร้างที่มีลักษณะอ่อนตัวได้ง่าย ซึ่งการกระจายตัวของแรงลมควรมีลักษณะขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของมวล และ Mode shape ของโครงสร้าง

2. หลักการหาค่า G แบบนี้ไม่สามารถนำไปใช้หาค่าสูงสุดของแรงหรือผลตอบสนองได้ เมื่อค่าเฉลี่ยของแรงหรือผลตอบสนองมีค่าเป็นศูนย์ เช่น แรงหรือผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิด

2.1.5 ผลตอบสนองของแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิด

แรงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิด จะมีลักษณะแตกต่างจากแรงในทิศทางของแรงลม คือ

2.1.5.1 ลักษณะแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม

- แรงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม เกิดจาก Wake เมื่อลมพัดผ่านโครงสร้าง

- เกิดการสั่นแบบ Vortex Excitation

- ค่าเฉลี่ยของแรงและผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมมีค่าน้อยมาก จนสามารถกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์

2.1.5.2 ลักษณะแรงลมในทิศทางโมเมนต์บิด

- เกิดจากแรงลมที่กระทำไม่พร้อมกันอย่างสมบูรณ์ในโครงสร้าง

- ในกรณีโครงสร้างซึ่งมีความซับซ้อนมากและมีจุดศูนย์กลางมวลไม่ตรงกับจุดศูนย์กลางความแข็งแรงทำให้เกิดแรงบิดขึ้นเมื่อโครงสร้างรับแรงลม

- ค่าเฉลี่ยของแรงและผลตอบสนองของโมเมนต์บิด มีค่าน้อยมากจนสามารถกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์

2.1.5.3 การหาค่าสูงสุดของผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมและโมเมนต์บิด

การหาแรงและผลตอบสนองของแรงลมในทิศทางตั้งฉากและโมเมนต์บิด จะใช้ผลการทดสอบจากอุโมงค์ลมเป็นหลัก และไม่สามารถใช้หลักการเหมือนกับการหาแรงและผลตอบสนองเช่นเดียวกับในทิศทางลมได้

Kareem et al. (2003) ได้เสนอการหาค่า G ใหม่โดยใช้พื้นฐานจากแรงลัพธ์ที่ฐานของแบบจำลองจากการทดสอบในอุโมงค์ลม แทนการใช้พื้นฐานจากการเสียรูป โดยพิจารณาหาค่าสูงสุดของโมเมนต์ที่ฐาน ดังสมการที่ 2.45

$$\hat{M} = \bar{M} + g\sigma_M \quad (2.45)$$

เมื่อ g คือ Peak Factor

σ_M คือ ค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) จากส่วนของการ fluctuation ของโมเมนต์ที่ฐาน มีค่าดังสมการที่ 2.46

$$\sigma_M = \sqrt{\int_0^\infty S_M(f) df} \quad (2.46)$$

$S_M(f)$ คือ Power Spectral Density (PSD) จากส่วนของการ fluctuation ของโมเมนต์ที่ฐาน มีค่าดังสมการที่ 2.47

$$S_M(f) = S_m(f) \times |H_1(f)|^2 \quad (2.47)$$

$S_m(f)$ คือ PSD ของส่วน External Aerodynamic Base Moment ซึ่งรวมผลของรูปร่างของแบบจำลองอย่างเดียวนอกจากการทดสอบในอุโมงค์ลม

$|H_1(f)|^2$ คือ Structural First Mode Transfer Function มีค่าดังสมการ 2.48

$$|H_1(f)|^2 = \frac{1}{(1 - (f/f_1)^2 + (2\xi(f/f_1))^2)} \quad (2.48)$$

f_1 คือ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างใน Mode ที่ 1

ξ คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง

จากสมการที่ 2.45 ในส่วนของ $g\sigma_M$ จะพิจารณาแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วน Background, \hat{M}_B และ ส่วน Resonance, \hat{M}_R โดย

1. \hat{M}_B คือ ผลตอบสนองในส่วนของแรงแบบสถิต โดยให้ $|H(f)|^2 = 1$ ดังนั้นจะหาค่า \hat{M}_B ได้จากสมการ 2.49

$$\hat{M}_B = g_B \sigma_m \quad (2.49)$$

g_B = Background peak factor $\approx 3 - 4$

$$\sigma_m = \sqrt{\int_0^\infty S_m(f) df}$$

2. \hat{M}_R ใช้สมมุติฐานว่าผลตอบสนองจะมีค่ามากและเด่นชัดบริเวณความถี่ธรรมชาติ (White noise, wide band around the natural frequency) สามารถคำนวณ \hat{M}_R ได้จากสมการที่ 2.50

$$\hat{M}_R = g_R \sqrt{\frac{\pi}{4\xi_1} f_1 S_m(f_1)} \quad (2.50)$$

$$\text{เมื่อ } g_R = \sqrt{2 \ln(f_1 T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(f_1 T)}}$$

จากสมการที่ 2.50 สามารถกระจายโมเมนต์พื้นฐานจากส่วนก้ำทอนนี้ไปยังตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างได้จาก สมการที่ 2.51 สำหรับโมเมนต์พลิกคว่ำ และสมการที่ 2.52 สำหรับโมเมนต์บิด

$$\hat{P}_R(z) = \hat{M}_R \times \frac{m(z)\phi_1(z)}{\int_0^H m(z)\phi_1(z) \cdot z dz} \quad (2.51)$$

$$\hat{P}_R(z) = \hat{M}_R \times \frac{I(z)\phi_1(z)}{\int_0^H I(z)\phi_1(z) dz} \quad (2.52)$$

เมื่อ $I(z)$ คือ มวลต่อหน่วยความสูง

$\phi_1(z)$ คือ Fundamental Mode shape ในด้านที่พิจารณา

เมื่อได้ผลตอบสนองของทั้งส่วนของ Background และ Resonance แล้วพิจารณารวมผลด้วยวิธีการ Square Root of the Sum of the Squares (SRSS) ได้ดังสมการที่ 2.53

$$\hat{r} = \bar{r} + \sqrt{\hat{r}_B^2 + \hat{r}_R^2} \quad (2.53)$$

อัตราเร่งสูงสุด (\ddot{Y}_{Peak}) คำนวณได้ดังสมการ 2.54

$$\ddot{Y}_{Peak(D,L)}(z) = \frac{\int_0^H P_{R(D,L)}(z)\phi_{1(D,L)} dz}{\int_0^H m(z)\phi_{1(D,L)}^2 dz} \phi_{1(D,L)} ; \quad \ddot{Y}_{Peak(T)}(z) = \frac{\int_0^H P_{R(T)}(z)\phi_{1(T)} dz}{\int_0^H I(z)\phi_{1(T)}^2 dz} \phi_{1(T)} \quad (2.54)$$

2.1.5.6 การทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี High Frequency Force Balance (HFFB)

วิธี HFFB เป็นวิธีทดสอบในอุโมงค์ลม ใช้ในการหาแรงลัพธ์พื้นฐานของแบบจำลองอาคารและโครงสร้างต่อแรงลมและผลตอบสนองเพื่อใช้ในการออกแบบอาคาร โดยแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ HFFB เป็นแบบจำลองที่มีลักษณะแข็งมากและมีความถี่ธรรมชาติสูง โดยวิธีนี้

ได้พัฒนามากว่า 30 ปี และใช้กันอย่างกว้างขวางในงานวิจัยต่าง ๆ (สุกิต, 2547) และเป็นทางเลือกในการหาแรงและผลตอบสนองต่อโครงสร้าง สำหรับมาตรฐานต่างๆ ด้วยแต่แม้วิธีนี้จะมีข้อดีมาก แต่ก็ยังมีข้อเสีย คือ ผลที่ได้เป็นเพียงผลรวมที่ฐานของแบบจำลองเท่านั้น ส่วนแรงบริเวณตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง จะต้องประมาณจากรูปแบบการเคลื่อนไหว (Mode Shape) ของแบบจำลอง จึงทำให้ไม่สามารถทราบขนาดแรงที่แท้จริงที่กระทำกับโครงสร้างในตำแหน่งต่าง ๆ ได้

การหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จากแบบจำลองแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

(1) ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์อ้างอิง

$$\bar{M}'_x = \frac{1}{2} \rho_m \bar{U}_{Hm}^2 B_m H_m^2 \quad (2.55)$$

$$\bar{M}'_y = \frac{1}{2} \rho_m \bar{U}_{Hm}^2 D_m H_m^2 \quad (2.56)$$

$$\bar{M}'_z = \frac{1}{2} \rho_m \bar{U}_{Hm}^2 B_m D_m H_m \quad (2.57)$$

โดยที่ \bar{M}'_x , \bar{M}'_y และ \bar{M}'_z คือ โมเมนต์อ้างอิงในทิศทางลม ตั้งฉากกับลม และโมเมนต์บิด ตามลำดับ

ρ_m คือ ความหนาแน่นของอากาศ

U_{Hm} คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดของแบบจำลอง

B_m , D_m , H_m คือ ความกว้าง ความลึก และความสูงของแบบจำลอง

ตามลำดับ

(2) ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของหน่วยแรงลม และค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำซึ่งได้จากการทดสอบแรงลมในแต่ละทิศทาง

$$C_x = \frac{\bar{M}_{ym} (2 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} B_m H_m^2} \quad (2.58)$$

$$C_y = \frac{\bar{M}_{xm} (2 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} D_m H_m^2} (-1) \quad (2.59)$$

$$C_z = \frac{\bar{M}_{zm} (1 + 2\alpha_m)}{q_{Hm} B_m D_m H_m} \quad (2.60)$$

$$\sigma_{cmx} = \frac{\sigma_{mx}}{M'_x} \quad (2.61)$$

$$\sigma_{cmy} = \frac{\sigma_{my}}{M'_y} \quad (2.62)$$

$$\sigma_{cmz} = \frac{\sigma_{mz}}{M'_z} \quad (2.63)$$

โดยที่ C_x , C_y และ C_z คือค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของหน่วยแรงลม ในทิศทางตามลม ตั้งฉากกับลม แลทิศทางบิด ตามลำดับ

\bar{M}_{xm} , \bar{M}_{ym} , \bar{M}_{zm} คือ ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์รวมที่ฐานรอบแกน x, y และ z ตามลำดับ

α_m คือ เลขยกกำลังตามสภาพภูมิประเทศที่จำลองใน อุโมงค์ลม

σ_{cmx} , σ_{cmy} และ σ_{cmz} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความผันผวนของโมเมนต์พลิกคว่ำรอบแกน x, y และ z ตามลำดับ

การคำนวณค่าโมเมนต์ที่ฐาน แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

(1) โมเมนต์เฉลี่ย ; \bar{M}

$$\bar{M}_x = \frac{C_y q_{Hp} D_p H_p^2}{(2 + 2\alpha_p)} (-1) \quad (2.64)$$

$$\bar{M}_y = \frac{C_x q_{Hp} B_p H_p^2}{(2 + 2\alpha_p)} \quad (2.65)$$

$$\bar{M}_z = \frac{C_z q_{Hp} B_p D_p H_p^2}{(1 + 2\alpha_p)} \quad (2.66)$$

โดยที่ \bar{M}_x , \bar{M}_y และ \bar{M}_z คือ ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์รวมที่ฐานของอาคารจริงรอบแกน x, y และ z

α_p คือ เลขยกกำลังตามสภาพภูมิประเทศจริง

(2) โมเมนต์ส่วนกึ่งสถิต ; \bar{M}_B

$$M_{Bx} = g_{Bx} \times \sigma_{cmx} \times \bar{M}'_x \quad (2.67)$$

$$M_{By} = g_{By} \times \sigma_{cmy} \times \bar{M}'_y \quad (2.68)$$

$$M_{Bz} = g_{Bz} \times \sigma_{cmz} \times \bar{M}'_z \quad (2.69)$$

(3) โมเมนต์ส่วนกำกับหรือสั้นพ้อง ; \bar{M}'_R

$$M_{Rx} = g_{Rx} \times \sigma_{cmx} \times \bar{M}'_x \times \sqrt{\frac{\pi}{4\xi} Cm(f_x)} \quad (2.70)$$

$$M_{Ry} = g_{Ry} \times \sigma_{cmy} \times \bar{M}'_y \times \sqrt{\frac{\pi}{4\xi} Cm(f_y)} \quad (2.71)$$

$$M_{Rz} = g_{Rz} \times \sigma_{cmz} \times \bar{M}'_z \times \sqrt{\frac{\pi}{4\xi} Cm(f_z)} \quad (2.72)$$

2.1.5.7 การจำลองแบบโครงสร้าง

การจำลองแบบจำลองให้เหมือนจริงนั้นต้องทำการย่อส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างให้สัมพันธ์กัน โดยพิจารณาถึงความเหมาะสมของขนาดอุโมงค์ลม ซึ่งสามารถคำนวณความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้ โดยต้องคำนึง ดังนี้

(1) อิทธิพลของผนังรอบ ๆ ภายในอุโมงค์ลม (Effect of Wind Tunnel Blockage)

ในการจำลองแบบจำลอง จะต้องคำนึงถึงมาตราส่วนที่เหมาะสมที่จะใช้ในการจำลอง เพราะหากแบบจำลองมีขนาดใหญ่เกินไป ลมจะไปกระทบกับผนังอุโมงค์ลมทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้น ลมที่ได้จะไม่เป็นไปตามลมธรรมชาติที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้น คู่มือและรายงานของสมาคมวิศวกรรมโยธาของประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society of Civil Engineers , ASCE 1999) จึงกำหนดให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแบบจำลองด้านที่รับแรงตามทิศทางลมต่อพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม (Blockage ratio , BR) ไม่เกิน 5% เพื่อหลีกเลี่ยงผลของผนังรอบ ๆ อุโมงค์ลม

(2) อัตราส่วนความยาว (Length Scale)

คำนวณได้จากอัตราส่วนความยาวของแบบจำลองต่อความยาวต้นแบบ

$$\lambda_L = \frac{D_m}{D_p} \quad (2.73)$$

โดยที่ D_m คือ ความกว้างของแบบจำลอง

D_p คือ ความกว้างของต้นแบบ

(3) อัตราส่วนความเร็ว (Velocity Scale)

คำนวณได้จากอัตราส่วนความเร็วลมที่กระทำกับแบบจำลองต่อความเร็วลมที่กระทำกับต้นแบบ

$$\lambda_v = \frac{U_m}{U_p} \quad (2.74)$$

โดยที่ U_m คือ ความเร็วลมที่กระทำกับแบบจำลอง
 U_p คือ ความเร็วลมที่กระทำกับต้นแบบ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการหาค่าแรงลมและผลตอบสนองของอาคาร

Davenport (1967) ได้เสนอหลักการวิธีประมาณค่าสูงสุดของแรงลมที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง ซึ่งรวมผล 3 ส่วน คือ 1. จากค่าเฉลี่ยของแรงลม 2. ค่าจากส่วนกึ่งสถิต (Quasi-static) ซึ่งเกิดจากความผันผวนของลมความถี่ต่ำ และ 3. จากส่วนกำทอน (Resonant) จากความผันผวนของลมความถี่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติ โดยแรงทั้งสามส่วนนี้ เกิดจากผลการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ในทิศทางลมจากความปั่นป่วน (Turbulence) ในชั้นบรรยากาศของลมที่ปะทะโครงสร้าง

Tschanz และ Davenport (1983) ได้ใช้วิธีการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยวิธี High Frequency Force Balance เพื่อนำมาใช้ในการหาแรงลมที่กระทำต่ออาคารสูงที่ไม่มีพฤติกรรมการสั่นไหวร่วมกันในแต่ละ Mode Shape ของอาคาร ทำให้สามารถหาผลตอบสนองเกิดขึ้นกับอาคารในแต่ละทิศทางได้ แต่เทคนิคการทดสอบในอุโมงค์ลมนี้จะต้องใช้ค่า Mode Shape Correction Factor มาปรับแก้ผลการทดสอบ

Kareem และ Zhou (2003) ได้กล่าวถึงหลักการและแนวคิดเกี่ยวกับการประมาณค่าสูงสุดของแรงลมและผลตอบสนองของโครงสร้าง ด้วยหลักการของค่าประกอบเนื่องจากการกระชอกของลม (Gust loading factor, GLF) ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันและแนวทางในอนาคต ซึ่งเน้นไปที่หลักการของ GLF ที่ได้จากโมเมนต์พื้นฐานของแบบจำลอง ซึ่งเสนอโดย Zhou และ Kareem (2001) เป็นหลัก ในบทความของ Kareem เริ่มจาก GLF ที่ใช้ในมาตรฐานทั่วไปอย่างกว้างขวางทั่วโลก แบบแรกที่เสนอโดย Davenport (1967) ซึ่งมีข้อเสียอยู่ 2 ประการคือ 1. GLF แบบนี้พิจารณาจาก อัตราส่วนการเสียรูปสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยการเสียรูป ของโครงสร้างทำให้การประมาณค่าสูงสุดอาจผิดพลาดได้เนื่องจากใช้เพียงค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของการเสียรูปในโหมดแรกเท่านั้น ซึ่งทำให้ได้ค่า GLF เป็นค่าคงที่ สำหรับโครงสร้างหนึ่งๆ เมื่อนำค่า GLF นี้ไปหาแรงลมที่กระทำกับ

โครงสร้างเพื่อการออกแบบจะได้ลักษณะการกระจายตัวของแรงลม ตามลักษณะของค่าเฉลี่ยของแรงลมที่ระดับต่างๆ ของโครงสร้าง จึงขัดแย้งกับข้อเท็จจริงสำหรับอาคารสูง และโครงสร้างที่มีลักษณะอ่อนตัวได้ง่าย ซึ่งการกระจายตัวของแรงลมควรมีลักษณะขึ้นอยู่กับกระจ่ายตัวของมวลและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง และ 2. GLF แบบนี้ไม่สามารถนำไปใช้หาค่าสูงสุดของแรงหรือ ผลตอบสนอง เมื่อค่าเฉลี่ยของแรง หรือผลตอบสนอง มีค่าเป็น ศูนย์ เช่น แรง หรือผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และ โมเมนต์บิด ด้วยข้อเสียที่กล่าวมาทำให้การใช้หลักการของ GLF แบบเดิมมีข้อผิดพลาดในการนำไปใช้งานในหลายๆ กรณี ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทความของ Zhou และคณะ (1999) ทำให้ต่อมาได้มีการพัฒนาปรับปรุงหลักการของ GLF ขึ้นโดย A.G. Davenport (1999) , C. Drybre, S.O. Hansen (1967) และ J.D. Holmes (2001) แต่ยังมีข้อจำกัดและความไม่สะดวกในการใช้งานอีกหลายประการ ต่อมาจึงมีการนำเสนอในบทความของ Zhou และ Kareem (2001) ซึ่งได้เปลี่ยนแนวทางของ GLF จากพื้นฐานของการเสียรูปของโครงสร้างเป็นโมเมนต์ที่ฐานจากการทดสอบของแบบจำลองในอุโมงค์ลมมาประมาณค่าสูงสุดของแรงลม และผลตอบสนองของโครงสร้างจริง โดยกระจายจากแรงที่ฐานไปสู่ชั้นต่างๆ เหมือนกับการกระจายแรงเฉือนที่ฐานของแรงแผ่นดินไหว ซึ่งทำให้สามารถใช้ได้กับแรงและผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และ โมเมนต์บิดได้

Zhou et al. (2003) ได้จัดทำ Interactive database รวบรวมข้อมูล ผลการทดสอบแบบจำลองแบบอาคารเดี่ยวที่ไม่มีอาคารข้างเคียงโดยการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยหลักการ High-Frequency Force Balance ไว้ใน website www.nd.edu/~nathaz. โดยเสนอในรูปของ Non-dimensional Aerodynamic Loads ซึ่งสามารถนำไปใช้หาผลตอบสนองของอาคารสูงที่ไม่มีพฤติกรรมการสั่นไหวร่วมกันในแต่ละรูปแบบการสั่นไหว และได้อธิบายถึงการหลักการ สมการในการคำนวณและวิธีการนำไปใช้เพื่อหาแรงลมและผลตอบสนองของโครงสร้าง

อลงกรณ์ กฤตธีรพันธ์ (2545) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์การคำนวณหน่วยแรงลม และการตอบสนองของอาคารเนื่องจากลม โดยใช้การคำนวณตามมาตรฐานต่าง ๆ ได้แก่ 1. มาตรฐานของแรงลมสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2546 ซึ่งอ้างอิง NBC Code 1996 ของแคนาดา 2. มาตรฐาน ASCE7-95 ของสหรัฐอเมริกา 3. ข้อเสนอ Architectural Institute 1996 ของญี่ปุ่น 4. มาตรฐาน Eurocode1 ของยุโรป 5. มาตรฐาน AS1170-1789 ของออสเตรเลีย โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยใช้อาคารที่มีความสูง 50 , 182.28 และ 317.5 เมตร และ 1 อาคารเดี่ยว ผลการศึกษาพบว่า 1. หน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำต่ออาคารสูง 182.88 เมตร ของมาตรฐานทวีปยุโรป > มาตรฐานสหรัฐอเมริกา > มาตรฐานไทย แคนาดา > มาตรฐานออสเตรเลีย > มาตรฐานญี่ปุ่น 2. การตอบสนองของอาคารด้านอัตราเร่งสูงสุดของอาคารในทิศทางลม มาตรฐาน

สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่นและทวีปยุโรปให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองในอุโมงค์ลม ส่วนมาตรฐาน ไทย แคนาดา และออสเตรเลียให้ผลค่อนข้างสูง 2.การตอบสนองของอาคารด้านอัตราเร่งสูงสุดของอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม มาตรฐาน ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย ไทย,แคนาดา ให้ผลทดลองที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองในอุโมงค์ลม

พงศกร วังกาญจน์ศิริกุล และ วิโรจน์ บุญญภิญโญ (2556) ได้ประยุกต์ใช้วิธี HFFB เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงลมจากการปรับแต่งรูปทรงบริเวณมุมอาคารของอาคารเดี่ยวที่ไม่มีอาคารข้างเคียง โดยใช้แบบจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยมและแบบจำลองที่มีการปรับแต่งรูปทรงแบบเว้า เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของด้านรับ พบว่า การปรับแต่งมุมมีผลทำให้ค่าสูงสุดของโมเมนต์ที่ฐานเมื่อพิจารณาจากทุกทิศทางมีค่าลดลง โดยที่ค่าสูงสุดของ M_x ของแบบจำลองที่มีอัตราส่วนด้านลึกต่อด้านยาว 1:1, 1:1.5, 1:2, 1.5:1 และ 2:1 มีค่าลดลงร้อยละ 18, 25, 14, 3 และ 2 ตามลำดับ ส่วนค่าสูงสุดของ M_y มีค่าลดลงร้อยละ 13, 16, 14, 18 และ 10 ตามลำดับ และค่าสูงสุดของ M_z ของแบบจำลองขนาด 1:1, 1:1.5, 1.5:1 และ 2:1 มีค่าลดลงร้อยละ 51, 12, 42 และ 29 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองขนาด 1:2 พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 28

2.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลจากอาคารข้างเคียง

Thepmongkorn et al. (2002) ได้ทำการทดสอบผลจากอาคารข้างเคียงที่มีต่ออาคารมาตรฐาน CAARC ภายในอุโมงค์ลมโดยได้จำลองแบบจำลองนี้แบบ 3-degree-of-freedom base-hinge assembly (BHA) ทำให้สามารถทราบผลตอบสนองการสั่นร่วมกันของการสั่นในแนวราบและแนวบิดได้ พบว่าเมื่อแรงลมพัดในทิศทางตั้งฉากกับด้านรับแรงลม ที่ Critical Reduced Wind Speed ผลตอบสนองจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยที่ความถี่ของ shed vortices เกิดขึ้นจากผลของอาคารข้างเคียงไปตรงกับความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองอาคาร และสรุปเพิ่มเติมว่า ผลตอบสนองในทิศทางลม ตั้งฉากกับลม และโมเมนต์บิดจะเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ในแนวทแยงที่ทิศเหนือลม (Diagonal Upstream) และยังสรุปเพิ่มเติมอีกว่า สำหรับผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับลมจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออาคารข้างเคียงวางที่ตำแหน่งเหนือลมโดยตรง (Directly Upstream)

สุวรรณสาม ศรีวิเชียร (2546) ได้ทำการศึกษาและวิจัยคำนวณหน่วยแรงลมสำหรับป้ายโฆษณา แล้วเปรียบเทียบผลของแต่ละมาตรฐานพบว่าหน่วยแรงลมในกรณีที่ตั้งอยู่ในลักษณะภูมิประเทศแบบพื้นที่โล่งมีสิ่งกีดขวางน้อยและชายทะเล มีค่ามากกว่าหน่วยแรงลมตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527 นอกจากนั้นบางมาตรฐานได้คำนึงผลของโมเมนต์บิดรอบแกนเสาซึ่งไม่ได้กำหนดไว้ในกฎกระทรวง และทำการทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมที่กระทำกับแผ่นป้าย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของป้าย ความสูงของป้ายต่อความสูงของป้ายจากพื้นดิน และสิ่งกีดขวางต่อ

โครงสร้างป้าย สำหรับป้ายที่ตั้งอยู่บนพื้นดิน พบว่าเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของป้ายมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์จะลดลง แต่สำหรับป้ายที่ตั้งอยู่บนพื้นดินเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของป้ายมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์จะมากขึ้น และในกรณีของสิ่งกีดขวางพบว่าเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ด้านท้ายลมจะทำให้สัมประสิทธิ์ของลมเพิ่มขึ้นถึง 30%

ชาญณรงค์ พุศกุล (2547) ทำการทดสอบแบบจำลองของอาคารคู่แฝดในอุโมงค์ลม เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลในการรับแรงลมของอาคารคู่แฝด ได้แก่ 1. รูปแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการปรับเปลี่ยนลักษณะของรูปร่างอาคารเป็นแบบมุมเว้า มุมตัด และ โค้งมน 2. ระยะห่างอาคารตั้งแต่ 1 ถึง 4 เท่าของความกว้างอาคารมีทิศทางที่ใช้ทดสอบ 49 ตำแหน่ง 3. ทิศทางของลมที่กระทำกับอาคาร คือ 0 15 30 และ 45 องศา พบว่าอิทธิพลของรูปแบบหน้าตัด ทิศทางลม และระยะห่างระหว่างอาคารคู่แฝดมีผลต่อการรับแรงและการตอบสนองของโครงสร้างในแต่ละกรณีแตกต่างกันมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง มีลักษณะไม่แน่นอนเนื่องจากพฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณมุมอาคาร (Separation Process) การไหลของกระแสลมบริเวณรอบอาคาร และกลไก Vortex Shedding Process ซึ่งมีผลต่อค่าแรงและการแอ่นตัวของอาคารในทิศทางตามกระแสลม ทิศทางตั้งฉากกับกระแสลม และทิศทางการบิดของอาคารแสดงผลในรูปแบบ Contour

บัญชา คำวอน (2549) ได้ศึกษาผลกระทบด้านราคาของโครงสร้างอาคารสูงที่ออกแบบด้านทานแรงลมตามข้อกำหนดของกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) เปรียบเทียบกับหน่วยแรงลมตามร่างที่จะนำเสนอแก้ไขกฎกระทรวง โดย กรมโยธาธิการ และผังเมือง โดยเลือกตัวอย่างเป็นอาคารสูง 30 ชั้น ซึ่งมีระบบโครงสร้างแบบ กำแพง-โครงข้อแข็ง (Wall-Frame Structure) และทำการจำลองโครงสร้างในเชิง 3 มิติ และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในส่วนของผลการวิเคราะห์หน่วยแรงภายในที่เกิดกับส่วนต่างๆ ของโครงสร้างจากแรงที่กระทำทางด้านข้างพบว่าแรงเฉือนและโมเมนต์คดที่กระทำกับโครงสร้างจะถูกรับด้วยส่วนของ Lift Core เป็นส่วนมาก

วิโรจน์ บุญญกัญญา และคณะ (2549) ได้ทำการทดสอบอุโมงค์ลมโครงการศูนย์พลังงานแห่งชาติ ประกอบด้วยกลุ่มอาคาร คือ อาคาร A เป็นอาคารรูปทรงหยดน้ำ 2 หอคอย อาคาร B เป็นอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม และอาคาร C เป็นส่วนPodium อาคารรูปทรงหยดน้ำเป็นรูปทรงที่ซับซ้อนซึ่งไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมได้โดยตรงจากมาตรฐานการคำนวณหน่วยแรงลม ประกอบกับผลกระทบของอาคารข้างเคียงและอาคารโดยรอบ ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องทำการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม เพื่อหาค่าหน่วยแรงลมที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคาร ให้ได้อาคารที่มีความปลอดภัย และประหยัด ขั้นตอนงานวิจัยประกอบไปด้วย การจำลองลักษณะลมธรรมชาติในอุโมงค์ลม การออกแบบและจัดทำแบบจำลองย่อส่วนของอาคาร

การทดสอบเพื่อตรวจวัดค่าความดันลมภายนอกอาคารภายใต้แรงลมกระทำในแต่ละทิศทางลม 22.5 องศา รวมทั้งสิ้น 16 ทิศทาง และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้ผลของความเร็วมที่มีคาบการกลับของลม 50 ปี ค่าหน่วยแรงดันลมสูงสุดเฉพาะจุด (Peak Local Pressures) ที่บริเวณส่วนต่างๆของอาคาร A และอาคาร B-C มีค่าอยู่ระหว่าง 80-110 กก./ม² และ 50-100 กก./ม² ตามลำดับ ขณะที่ค่าหน่วยแรงดูดสูงสุดเฉพาะจุด (Peak Local Suctions) ที่บริเวณส่วนใหญ่ของอาคาร A และอาคาร B-C มีค่าอยู่ระหว่าง 140-340 กก./ม² และ 100-300 กก./ม² ตามลำดับ

วิโรจน์ บุญญภิญโญ (2558) ได้ทดสอบ โครงการ Ashton Asoke อาคารที่ทำการจำลอง มีจำนวน 50 ชั้น ความสูง 193.65 เมตร การวิเคราะห์ห้ด้านกำลังใช้คุณสมบัติด้านพลศาสตร์สำหรับอาคาร 3 ชุด ($0.8f_0$, f_0 , $1.2f_0$) อัตราความหน่วงของอาคาร 2 ค่า คือ 0.02 และ 0.01 ความเร็วลมอ้างอิงสำหรับคาบเวลากลับ 50 ปี พบว่า สำหรับผลการวิเคราะห์ด้านกำลังจากคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ f_0 และความหน่วง = 0.01 ได้ $\hat{M}_y = -440$ MN-m ที่มุม 30 องศา, $\hat{M}_x = -1,923$ MN-m ที่มุม 250 องศา และ $\hat{M}_z = 200$ MN-m ที่มุม 200 องศา การวิเคราะห์อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบใช้คุณสมบัติด้านพลศาสตร์ f_0 และความหน่วง = 0.01 ความเร็วลมอ้างอิงสำหรับคาบเวลากลับ 10 ปี และค่าตัวประกอบทิศทางลม 0.85 ได้อัตราเร่งรวมสูงสุด 0.143 เมตร/วินาที² เกิดขึ้นเมื่อลมพัดในทิศ 180 องศา (วิโรจน์ บุญญภิญโญ., 2558)

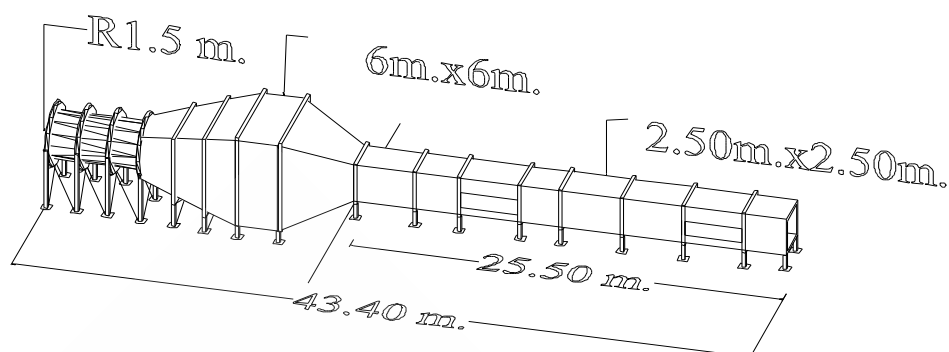
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การทดสอบในอุโมงค์ลม

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมได้ทำการทดสอบที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต (TU-AIT Wind Tunnel) ซึ่งเป็นอุโมงค์ลมช่วงยาวแบบเปิด (Open Circuit Long Wind Tunnel) ลักษณะและแบบของอุโมงค์ลมแสดงในภาพที่ 3.1 โดยมีความยาวช่วงทดสอบ 25.5 เมตร ขนาดหน้าตัดของอุโมงค์ คือ กว้าง 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร ความเร็วลมที่ใช้ทดสอบระหว่าง 0.5 ถึง 20 เมตรต่อวินาที และมีจุดรองรับโครงสร้างที่ปรับทิศทางรับลมได้ 2 ตำแหน่ง ประกอบกับเครื่องมือวัดและประมวลผลพื้นฐานที่จำเป็นต่างๆ องค์ประกอบสำคัญของอุโมงค์ลม ประกอบด้วย

- ใบพัดและมอเตอร์ ที่ใช้ขับเคลื่อนให้พาอากาศถูกพัดเป็นลมที่มีความเร็วที่สามารถควบคุมได้
- Diffuser เป็นส่วนที่ขยายขนาดของหน้าตัดที่ลมเคลื่อนตัว และลดความเร็วลมลงเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน
- Honey comb และ Screen เพื่อใช้กรองกระแสนลมที่มีส่วนผสมของความแปรปรวนให้เรียบขึ้น
- Contraction cone คือบริเวณที่หน้าตัดลดขนาดลงเพื่อเร่งความเร็วลม ซึ่งเมื่อลมออกไปจากส่วนนี้จะเป็นลมที่เรียบและมีความเร็วตามที่ต้องการ



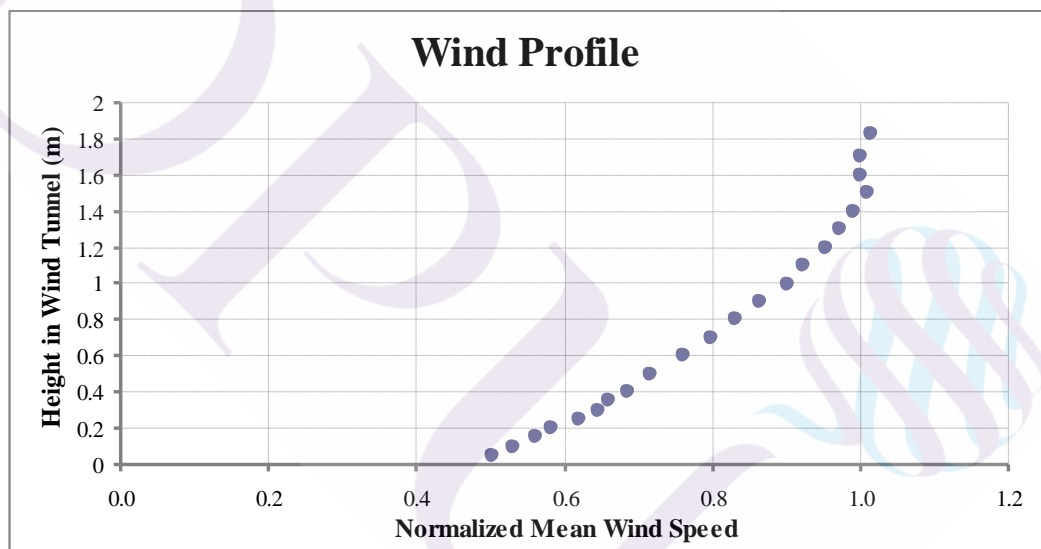
ภาพที่ 3.1 ลักษณะของอุโมงค์ลมช่วงยาวแบบเปิดของ TU-AIT

การจำลองลมตามสภาพภายในอุโมงค์ลมให้มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพลมตามธรรมชาติใช้การติดตั้ง Spires และ Roughness Element ภายในอุโมงค์ลมดังภาพที่ 3.2 เพื่อสร้าง Boundary Layer ที่อัตราส่วน 1/400 สามารถแสดงความเร็วลมในรูปแบบการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง (Mean Wind Velocity Profile) ได้ดังภาพที่ 3.3 ซึ่งได้ค่ายกกำลัง (Exponent) = 0.216

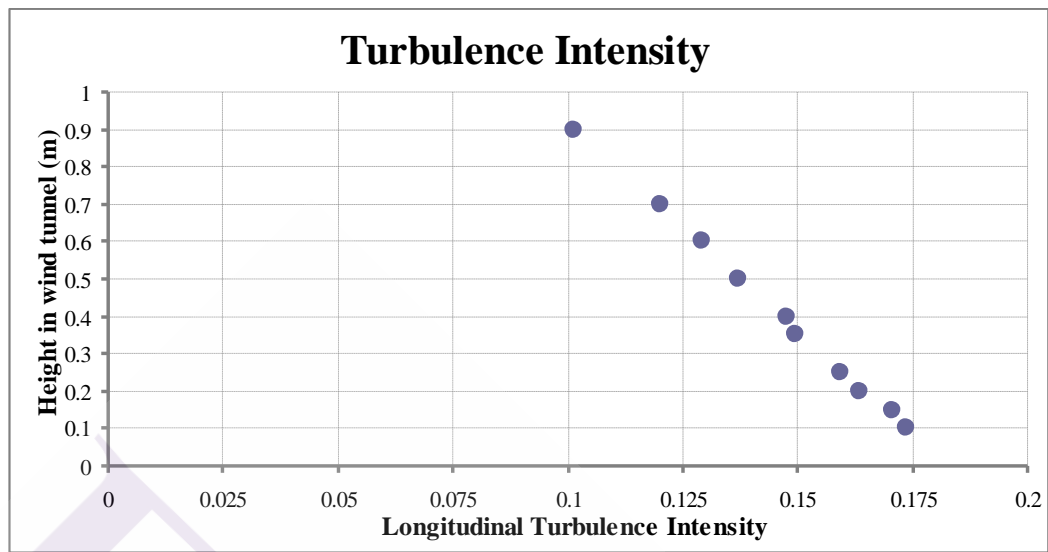
สำหรับลักษณะความปั่นป่วนของลมในรูปแบบความเข้มข้นของการปั่นป่วนของลม (Turbulence Intensity) ได้แสดงไว้ตามความสูงถึง 0.90 เมตร แสดงดังภาพที่ 3.4 และได้ทำการแสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของความปั่นป่วน (Spectrum of Turbulent wind) ที่ความสูง 0.30 , 0.60 และ 1.00 เมตร ระหว่างค่าที่วัดได้ในอุโมงค์ลมกับสเปกตรัมของ Von Karman แสดงตามภาพที่ 3.5 จึงสามารถสรุปได้ว่าการจำลองลมตามสภาพภายในอุโมงค์ลมให้มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพลมตามธรรมชาติมีความเหมาะสม



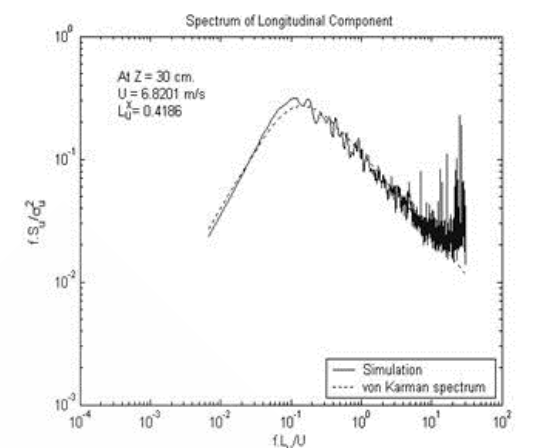
ภาพที่ 3.2 การติดตั้ง Spires และ Roughness Element ภายในอุโมงค์ลม



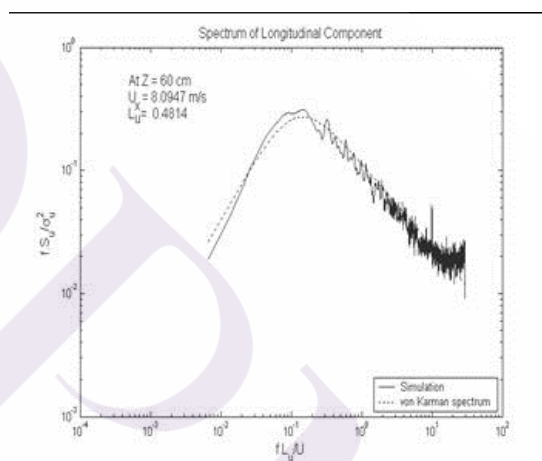
ภาพที่ 3.3 แสดงความเร็วลมในรูปแบบการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง



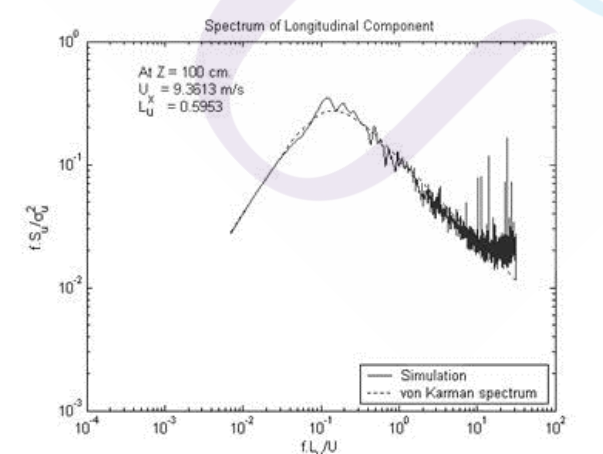
ภาพที่ 3.4 ความเข้มข้นของการปั่นป่วนของลม



(A)



(B)



(C)

ภาพที่ 3.5 สเปกตรัมของความปั่นป่วนที่ความสูง 30 , 60 และ 100 ซม.

3.2 การวัดความเร็วลมและความเร็วลมปั่นป่วน (Wind-speed and Wind-turbulence Measurement)

การวัดความเร็วลมราบเรียบเฉลี่ย (Mean wind velocity in smooth flow) ใช้ Pressure transducer (VaLidyne system, Model no.DP45-14) ร่วมกับ pitot-static tube และใช้ Hot-sphere Anemometer วัดความเร็วลมแนวราบ แสดงในภาพที่ 3.6 ส่วนการวัดความเร็วลมเฉลี่ยแนวราบ และการวัดความเร็วลมผันผวนทั้งในแนวตั้ง (w) และแนวราบ (u) จะใช้ Hot-wire X-probe

ในการทดสอบในอุโมงค์ลมด้วยวิธี HFFB ได้ทำการวัดข้อมูลความเร็วลมที่บริเวณยอดของแบบจำลองเพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไป

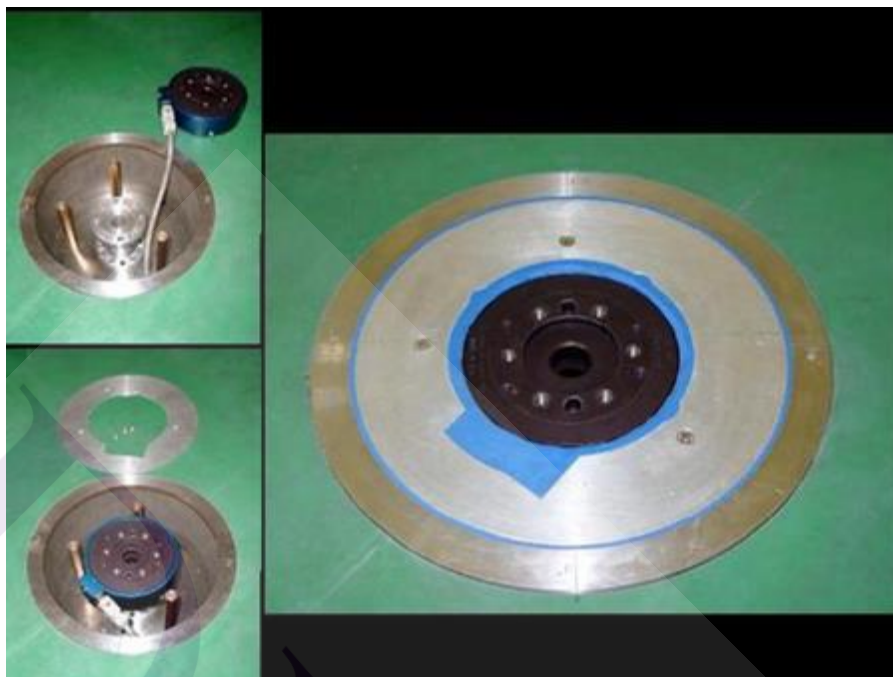


ภาพที่ 3.6 Hot-sphere Anemometer

3.3 เครื่องมือวัดแรงที่ฐานแบบจำลอง

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดแรงและโมเมนต์ 3 แกนที่ตั้งฉากกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.4 ซม. และหนา 3.8 ซม. แสดงในภาพที่ 3.7 หลักการทำงานจะมี Strain gage ในการรับแรงแล้วส่งเป็นสัญญาณไฟฟ้าไปยังเครื่องรับสัญญาณผ่านสายสัญญาณ โดยสัญญาณของ Strain gage ถูกขยายและรวมกันเพื่อสร้างเป็นสัญญาณของแรงรวมทั้งโมเมนต์ของทุกแกน แรงลัพธ์ที่ได้จากเครื่องนี้สัมพันธ์ตามกฎมือขวา สามารถวัดแรงตามแนว $F_x \pm 80 \text{ N}$, $F_y \pm 80 \text{ N}$, $F_z \pm 160 \text{ N}$ และ $M_x \pm 10 \text{ N-m}$, $M_y \pm 10 \text{ N-m}$, $M_z \pm 10 \text{ N-m}$

ในการทดสอบในอุโมงค์ลมด้วยวิธี HFFB จะใช้เฉพาะค่าโมเมนต์ที่ฐานที่ได้จากการทดสอบเพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไป



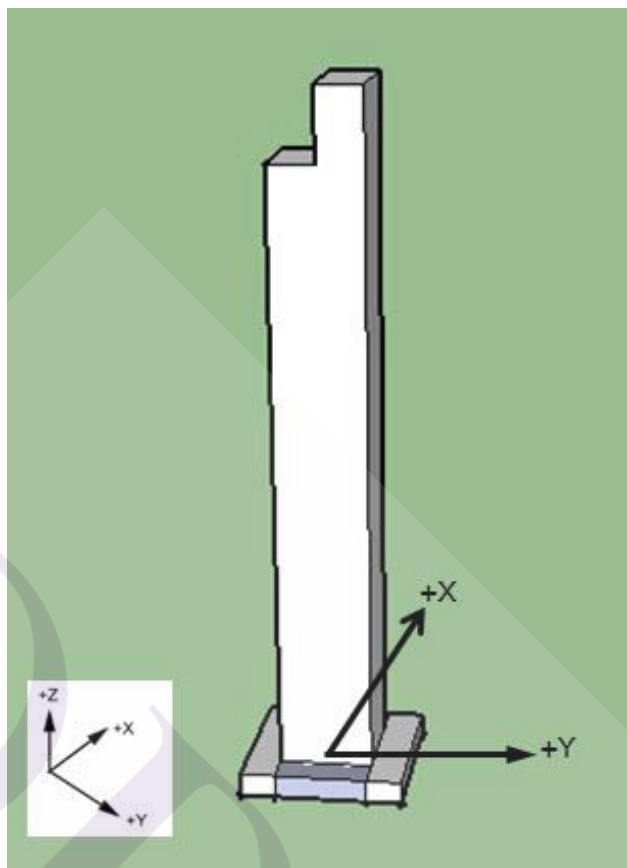
ภาพที่ 3.7 เครื่องมือวัดแรงที่ฐาน

3.4 แบบจำลอง

แบบจำลองอาคารสูงที่ใช้มีมาตราส่วน 1:400 มีความกว้าง 10 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร ความสูงบนยอดอาคารตำแหน่งสูงที่สุด 76 เซนติเมตร ต่ำสุด 68 เซนติเมตร โดยจำลองให้ตั้งอยู่ในเขตบางรัก กรุงเทพมหานคร ขอบเขตที่ทำการศึกษา แสดงในภาพที่ 3.8 บริเวณดังกล่าวเป็นย่านที่มีอาคารสูงเป็นจำนวนมาก ผลการทดสอบที่ได้รวมอิทธิพลจากอาคารข้างเคียงเนื่องจากได้จำลองอาคารข้างเคียงไว้ด้วย การทดสอบได้ทำการหมุนโต๊ะหมุน (Turn Table) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ครั้งละ 10 องศาเพื่อจะได้มีข้อมูลละเอียดเพียงพอในด้านอิทธิพลจากอาคารข้างเคียง และทำการทดสอบโดยการจำลองสภาพภูมิประเทศแบบเมืองใหญ่ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดอาคารตำแหน่งสูงที่สุด เท่ากับ 8.15 เมตรต่อวินาที ลักษณะแบบจำลองอาคาร แสดงในภาพที่ (2.1) และ ภาพที่ (2.2) ตามลำดับ การวัดแรงที่ฐานจะมี Strain Gage ในการรับแรงแล้วส่งเป็นสัญญาณไฟฟ้าไปยังเครื่องรับสัญญาณผ่านสายสัญญาณ โดยสัญญาณของ Strain Gage ถูกขยายและรวมกันเพื่อสร้างเป็นสัญญาณของแรงรวมทั้งโมเมนต์ของทุกแกน ทำการวัดแรงต่าง ๆ ที่ฐานของแต่ละมุมโดยเก็บข้อมูลเป็นเวลา 5 นาที ใช้อัตราเก็บตัวอย่าง (Sampling Rate) = 400 Hz ทำให้ได้ชุดข้อมูล 120,000 ข้อมูลต่อการวัด 1 ครั้ง



ภาพที่ 3.8 ขอบเขตที่ทำการศึกษา



ภาพที่ 3.9 ลักษณะแบบจำลองอาคารสูงและแกนอ้างอิง

3.5 สมมติฐาน ขนาดและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

ก. มิติของอาคาร

ความกว้าง (building width) $B = 40 \text{ m}$

ความลึก (building depth) $D = 40 \text{ m}$

ความสูงอาคาร (building height) $H = 304 \text{ m}$

ความสูงแต่ละชั้น (floor-to-floor height) $\Delta H = 3.8 \text{ m}$

ข. ความถี่ธรรมชาติของอาคารสำหรับรูปแบบสั่นไหวพื้นฐาน (f_0) ใช้ค่าแนะนำตาม

มาตรฐาน มยผ.1311-50

$$f_0: f_x = 0.145 \text{ Hz}, f_y = 0.145 \text{ Hz}, f_z = 0.181 \text{ Hz}$$

ค. รูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (Mode shapes exponent) ใช้ค่าภายใต้ข้อสมมติฐานว่ารูปแบบการสั่นไหวเป็นเส้นตรง (linear mode shape) เลือกใช้ $\beta = 1$ ทุกทิศทาง

ง. อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio, ξ) สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ใช้ตามค่าแนะนำตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 ที่อยู่ระหว่าง 0.005 – 0.015 โดยเลือกใช้ที่ 0.015

จ. ความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (Building bulk density) สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ใช้ตามค่าแนะนำตามมาตรฐาน มอผ.1311-50 ที่อยู่ระหว่าง 150 – 300 kg/m³ โดยเลือกใช้ที่ 300 kg/m³

ฉ. รัศมีจายเรชั่นเฉลี่ย (Average radius of gyration) = 16.32 m

ช. ความหนาแน่นของมวลอากาศ (Air density) $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$



บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม

4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ย (Mean Wind Force Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ย (C) อาศัยหลักการคำนวณตามงานวิจัยของ Kwon et al. (2008) ที่แสดงไว้ในสมการ 2.58 – 2.60 ดังตามตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 โดยสำหรับแรงลมทั้งในทิศทางลมและตั้งฉากทิศทางลม (C_x , C_y) มีค่าอยู่ระหว่าง -1.230 ถึง 1.18 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยสูงสุด (C_y) เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา ซึ่งคือค่าสูงสุดกรณีนี้ได้รับอิทธิพลหลักมาจากแรงลมในทิศทางลม นอกจากนี้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยในทิศทางหลัก (0, 90, 180 และ 270 องศา) จะมีความสูงเฉพาะผลจากแรงลมในทิศทางลมเท่านั้น ส่วนสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยของแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมและสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิดเฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

4.2 ผลการคำนวณสเปกตรัมด้านอากาศพลศาสตร์ของโมเมนต์และโมเมนต์บิดที่ฐานของแบบจำลอง (Spectra of Aerodynamic Base Moments and Torques)

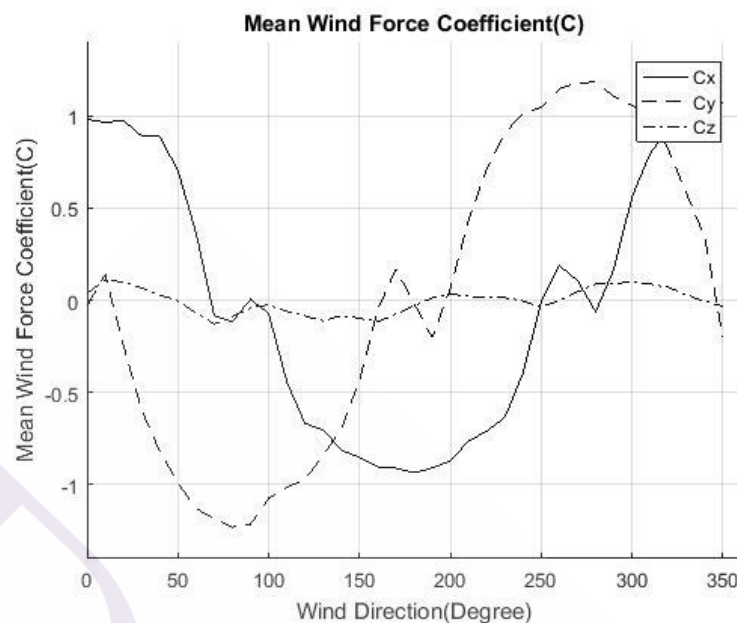
สเปกตรัมจากความปั่นป่วนของโมเมนต์ที่ฐานแสดงในค่าสัมประสิทธิ์ไร้มิติ ($C_M(f_{r1}) = f_{r1} \times S_M(f_{r1}) / \sigma_M^2$) ตามภาคผนวก ก โดยที่ S_x , S_y , S_z หมายถึง สเปกตรัมที่วิเคราะห์จากแรงลมพัดในแนวแกน X, แกน Y และแกน Z ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ย (Mean Wind Force Coefficient)

มุม	C_x	C_y	C_z
0	0.980	-0.032	0.037
10	0.963	0.139	0.109
20	0.974	-0.242	0.099
30	0.890	-0.593	0.066
40	0.886	-0.817	0.029
50	0.703	-0.990	-0.003
60	0.365	-1.129	-0.070
70	-0.084	-1.181	-0.129
80	-0.116	-1.230	-0.089
90	0.005	-1.213	-0.042
100	-0.072	-1.073	-0.025
110	-0.443	-1.014	-0.061
120	-0.668	-0.970	-0.085
130	-0.703	-0.840	-0.113
140	-0.812	-0.697	-0.083
150	-0.852	-0.432	-0.098
160	-0.902	-0.053	-0.117
170	-0.910	0.169	-0.076

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ย (Mean Wind Force Coefficient) (ต่อ)

มุม	C_x	C_y	C_z
180	-0.935	-0.018	-0.030
190	-0.909	-0.203	0.012
200	-0.870	0.065	0.034
210	-0.762	0.432	0.021
220	-0.710	0.714	0.016
230	-0.634	0.905	0.014
240	-0.394	1.014	-0.005
250	-0.008	1.043	-0.038
260	0.187	1.146	-0.001
270	0.106	1.177	0.045
280	-0.063	1.181	0.089
290	0.168	1.104	0.088
300	0.560	1.055	0.101
310	0.797	0.991	0.087
320	0.924	0.816	0.070
330	1.024	0.576	0.028
340	1.066	0.343	-0.006
350	1.070	-0.204	-0.034



ภาพที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมเฉลี่ย (Mean Wind Force Coefficient)

4.3 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของความผันผวนของโมเมนต์พื้นฐานและโมเมนต์บิดของแบบจำลอง (Standard Deviation or Root Mean Square of Fluctuating Base Moments and Torques)

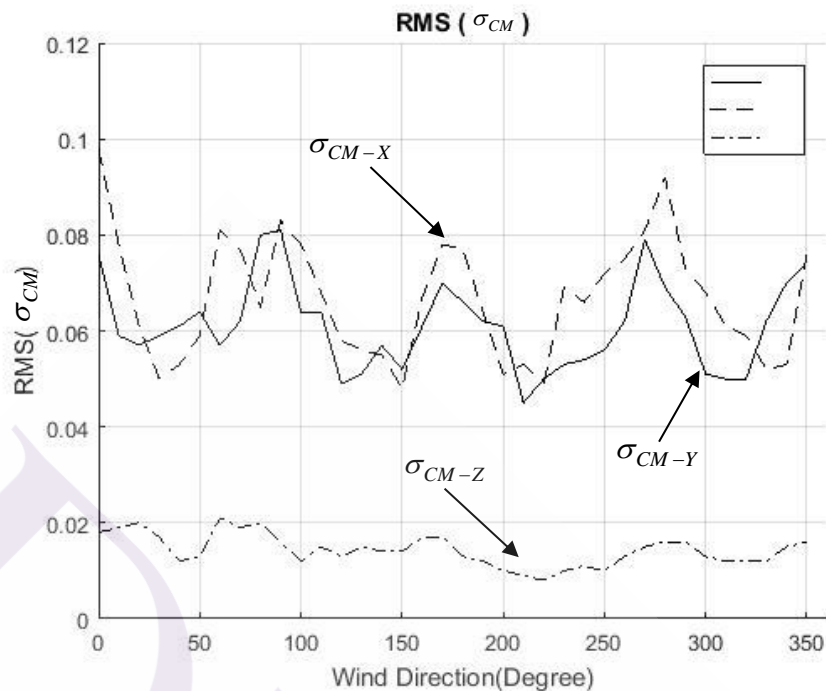
ค่าไว้มีตราบเฉลี่ยกำลังสองจากความปั่นป่วนของโมเมนต์ (σ_{CM}) ได้ผลดังตามตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.2 โดยที่ σ_{CM-Y} , σ_{CM-X} , σ_{CM-Z} หมายถึง RMS ที่จากความปั่นป่วนของโมเมนต์พลิกคว่ำรอบแกน Y (หรือแรงลมพัดในทิศแกน X) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.045 – 0.081 , รอบแกน X (หรือแรงลมพัดในทิศแกน Y) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.048 – 0.098 และ โมเมนต์บิดรอบแกน Z มีค่าอยู่ระหว่าง 0.008 – 0.021

ตารางที่ 4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของความผันผวนของโมเมนต์
และโมเมนต์บิดที่ฐาน

มุม	σ_{CM}		
	แกน Y	แกน X	แกน Z
0	0.076	0.098	0.018
10	0.059	0.078	0.019
20	0.057	0.061	0.020
30	0.059	0.050	0.017
40	0.061	0.053	0.012
50	0.064	0.059	0.013
60	0.057	0.081	0.021
70	0.062	0.077	0.019
80	0.080	0.065	0.020
90	0.081	0.083	0.016
100	0.064	0.078	0.012
110	0.064	0.068	0.015
120	0.049	0.058	0.013
130	0.051	0.056	0.015
140	0.057	0.055	0.014
150	0.052	0.048	0.014
160	0.061	0.067	0.017
170	0.070	0.078	0.017

ตารางที่ 4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของความผันผวนของโมเมนต์
และโมเมนต์บิดที่ฐาน (ต่อ)

มุม	σ_{CM}		
	แกน Y	แกน X	แกน Z
180	0.066	0.077	0.013
190	0.062	0.064	0.012
200	0.061	0.051	0.010
210	0.045	0.053	0.009
220	0.050	0.049	0.008
230	0.053	0.069	0.010
240	0.054	0.066	0.011
250	0.056	0.072	0.010
260	0.062	0.075	0.013
270	0.079	0.081	0.015
280	0.069	0.092	0.016
290	0.063	0.073	0.016
300	0.051	0.068	0.013
310	0.050	0.061	0.012
320	0.050	0.059	0.012
330	0.062	0.052	0.012
340	0.070	0.053	0.015
350	0.074	0.076	0.016



ภาพที่ 4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของความผันผวนของโมเมนต์และโมเมนต์บิดที่ฐาน

4.4 ผลการคำนวณแรงลม

การคำนวณแรงลม ใช้ความเร็วลมอ้างอิงตามมาตรฐาน มยพ.1311-50 ซึ่งคือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง 10 ม. จากพื้นดินในสภาพเปิดโล่งสำหรับคาบเวลากลับ 50 ปี โดยในกรุงเทพมหานครมีค่า 25 เมตรต่อวินาที มีค่า Typhoon Factor (TF) = 1

สำหรับกรณีที่ทำการศึกษา มีสภาพภูมิประเทศเป็นแบบบริเวณศูนย์กลางเมืองใหญ่ (ภูมิประเทศแบบ C) สามารถคำนวณความเร็วลมที่ยอดอาคาร $\overline{U_H} = 36.39$ เมตรต่อวินาที

4.4.1 โมเมนต์ที่ฐานสูงสุด

การคำนวณโมเมนต์ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}) ใช้พารามิเตอร์ตามหัวข้อ 3.5 โดยใช้ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 50 ปีในการคำนวณ สำหรับโมเมนต์ได้ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4 และ ภาพที่ 4.3 สำหรับโมเมนต์บิดได้ผลแสดงในตารางที่ 4.5 และ ภาพที่ 4.4 พบว่า \hat{M}_y มีค่าอยู่ระหว่าง -3,595 ถึง 3,576 MN-m ค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่มุม 270 องศา มีพฤติกรรมหลักเป็นการสั่นในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม, \hat{M}_x มีค่าอยู่ระหว่าง -3,150 ถึง 3,395 MN-m ค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่มุม 170 องศา มีพฤติกรรมหลักเป็นการสั่นในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมเช่นกัน,

\hat{M}_z มีค่าอยู่ระหว่าง -103 ถึง 86 MN-m ค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่มุม 70 องศา ค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์สูงสุดที่ฐานสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.3 โมเมนต์รอบแกน Y ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}_y)

Moment about Y-axis						
มุม (องศา)	M mean (MN-m)	M back (MN-m)	M Reso (MN-m)	M dyn (MN-m)	M mean - M dyn (MN-m)	M mean + M dyn (MN-m)
0	-1,102	-862	-1,309	1,567	-2,669	465
10	-1,083	-667	-952	1,163	-2,246	80
20	-1,096	-649	-958	1,157	-2,252	61
30	-1,001	-668	-1,002	1,205	-2,206	203
40	-996	-693	-1,111	1,309	-2,306	313
50	-791	-722	-1,450	1,619	-2,410	828
60	-410	-651	-1,593	1,721	-2,131	1,311
70	94	705	2,062	2,179	-2,085	2,274
80	130	903	2,948	3,083	-2,953	3,213
90	-6	-914	-3,463	3,582	-3,588	3,576
100	81	721	2,618	2,715	-2,634	2,796
110	498	724	1,767	1,909	-1,412	2,407
120	751	549	1,222	1,340	-589	2,091
130	791	583	1,028	1,182	-391	1,973
140	913	650	1,094	1,273	-360	2,186
150	959	589	931	1,102	-143	2,060
160	1,014	686	1,032	1,239	-225	2,254
170	1,024	787	1,224	1,455	-432	2,479

ตารางที่ 4.3 โมเมนต์รอบแกน Y ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}_y) (ต่อ)

Moment about Y-axis						
มุม (องศา)	M mean (MN-m)	M back (MN-m)	M Reso (MN-m)	M dyn (MN-m)	M mean - M dyn (MN-m)	M mean + M dyn (MN-m)
180	1,051	744	1,216	1,426	-374	2,477
190	1,022	706	1,098	1,305	-283	2,328
200	978	687	1,066	1,268	-290	2,247
210	857	514	938	1,070	-213	1,926
220	798	568	1,080	1,221	-422	2,019
230	713	605	1,410	1,534	-821	2,248
240	443	613	1,590	1,705	-1,261	2,148
250	9	637	2,134	2,227	-2,218	2,236
260	-211	-702	-2,833	2,919	-3,129	2,708
270	-119	-889	-3,360	3,476	-3,595	3,356
280	71	781	3,012	3,111	-3,040	3,182
290	-189	-719	-1,925	2,055	-2,243	1,866
300	-630	-579	-1,613	1,714	-2,344	1,084
310	-897	-571	-1,332	1,449	-2,346	552
320	-1,039	-565	-1,015	1,161	-2,200	122
330	-1,152	-708	-1,010	1,233	-2,385	82
340	-1,199	-788	-1,078	1,335	-2,534	136
350	-1,204	-833	-1,294	1,539	-2,743	334

ตารางที่ 4.4 โมเมนต์รอบแกน X ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}_x)

Moment about X-axis						
มุม (องศา)	M mean (MN-m)	M back (MN-m)	M Reso (MN-m)	M dyn (MN-m)	M mean - M dyn (MN-m)	M mean + M dyn (MN-m)
0	-36	-1,106	-2,880	3,085	-3,121	3,049
10	156	879	2,819	2,953	-2,797	3,109
20	-273	-687	-1,561	1,705	-1,978	1,432
30	-667	-561	-1,239	1,360	-2,027	693
40	-919	-601	-1,279	1,414	-2,333	494
50	-1,113	-667	-1,099	1,285	-2,399	172
60	-1,270	-916	-1,641	1,879	-3,150	609
70	-1,329	-869	-1,361	1,615	-2,944	286
80	-1,384	-741	-1,125	1,347	-2,731	-37
90	-1,364	-938	-1,437	1,716	-3,080	352
100	-1,207	-886	-1,389	1,647	-2,854	441
110	-1,141	-771	-1,409	1,606	-2,747	465
120	-1,091	-654	-1,254	1,414	-2,505	324
130	-944	-639	-1,213	1,371	-2,315	427
140	-784	-626	-1,376	1,511	-2,296	727
150	-486	-544	-1,366	1,470	-1,956	984
160	-60	-764	-2,062	2,198	-2,258	2,138
170*	190	885	3,080	3,205	-3,015	3,395*

ตารางที่ 4.4 โมเมนต์รอบแกน X ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}_x) (ต่อ)

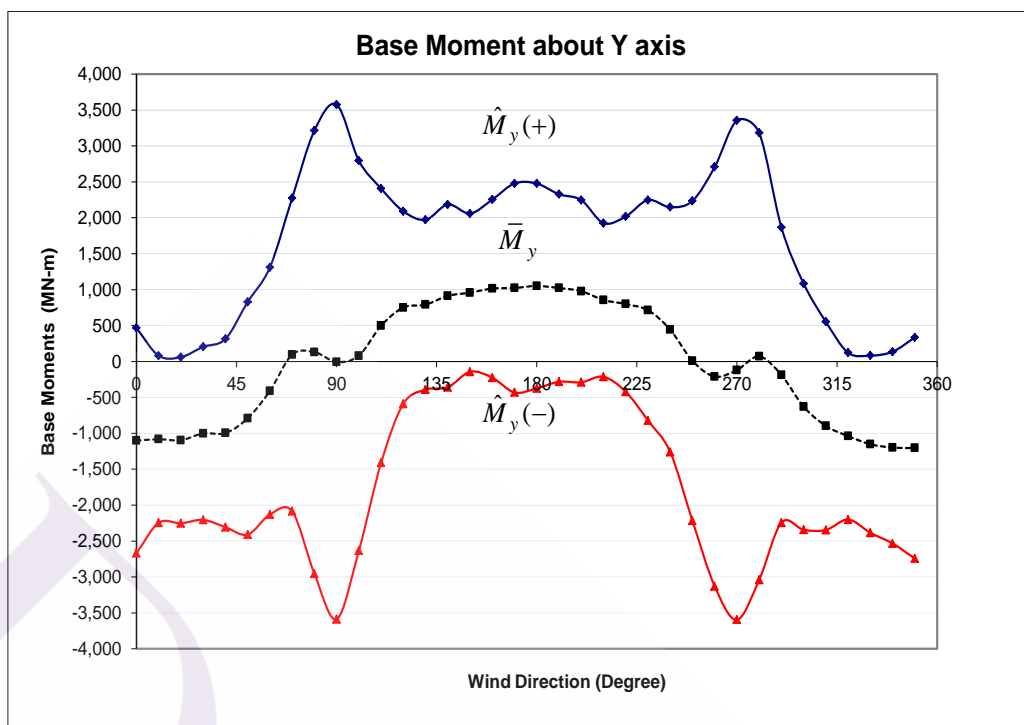
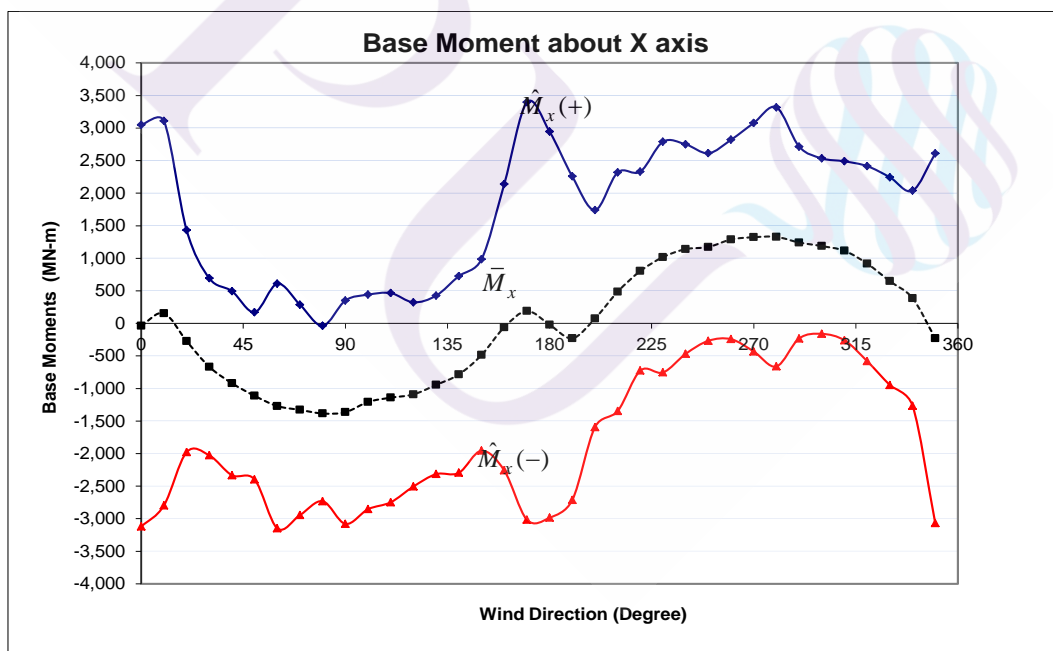
Moment about X-axis						
มุม (องศา)	M mean (MN-m)	M back (MN-m)	M Reso (MN-m)	M dyn (MN-m)	M mean - M dyn (MN-m)	M mean + M dyn (MN-m)
180	-20	-873	-2,835	2,966	-2,986	2,945
190	-228	-721	-2,379	2,486	-2,714	2,257
200	73	582	1,562	1,667	-1,594	1,740
210	485	596	1,734	1,834	-1,349	2,320
220	804	549	1,426	1,528	-725	2,332
230	1,018	785	1,589	1,772	-754	2,790
240	1,141	747	1,425	1,609	-467	2,750
250	1,173	817	1,187	1,440	-267	2,614
260	1,289	851	1,274	1,532	-243	2,821
270	1,324	915	1,498	1,755	-432	3,079
280	1,329	1,044	1,695	1,990	-662	3,319
290	1,242	822	1,223	1,473	-231	2,716
300	1,187	772	1,105	1,348	-161	2,535
310	1,115	695	1,186	1,375	-260	2,489
320	917	671	1,340	1,498	-581	2,416
330	648	584	1,486	1,597	-949	2,245
340	386	605	1,538	1,652	-1,266	2,038
350	-229	-861	-2,706	2,840	-3,069	2,610

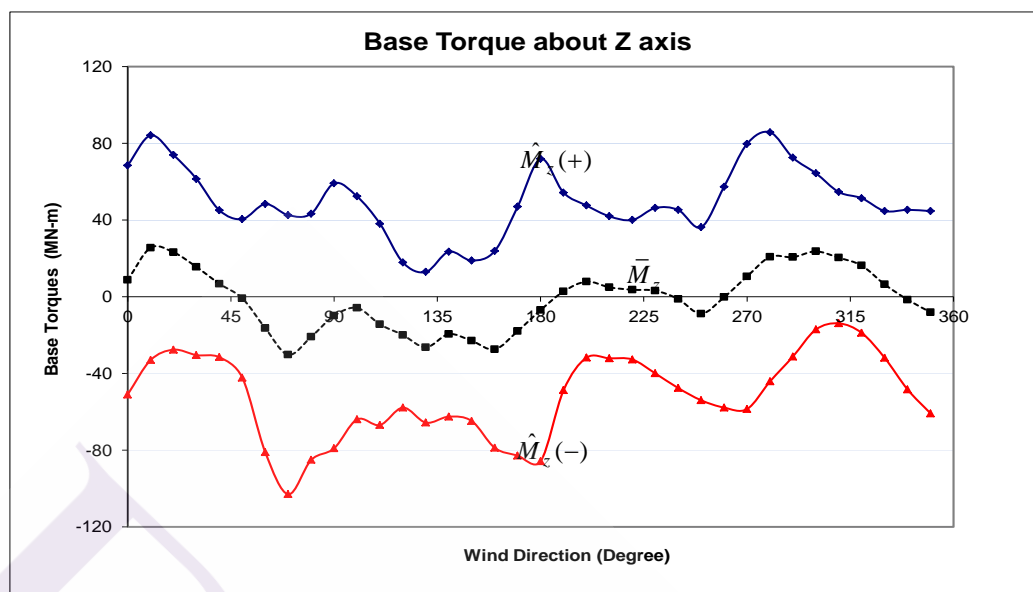
ตารางที่ 4.5 โมเมนต์รอบแกน Z (โมเมนต์บิด) ที่ฐานสูงสุด (\hat{M}_z)

Moment about Z-axis						
มุม (องศา)	M mean (MN-m)	M back (MN-m)	M Reso (MN-m)	M dyn (MN-m)	M mean - M dyn (MN-m)	M mean + M dyn (MN-m)
0	9	28	53	60	-51	69
10	26	29	51	59	-33	84
20	23	30	41	51	-28	74
30	16	26	38	46	-30	62
40	7	18	34	38	-32	45
50	-1	-20	-36	41	-42	41
60	-16	-32	-56	65	-81	48
70*	-30	-28	-67	73	-103*	43
80	-21	-30	-57	64	-85	43
90	-10	-24	-65	69	-79	59
100	-6	-18	-55	58	-64	52
110	-14	-23	-47	52	-67	38
120	-20	-19	-32	38	-58	18
130	-26	-22	-33	39	-66	13
140	-19	-22	-37	43	-63	24
150	-23	-22	-36	42	-65	19
160	-27	-25	-45	51	-79	24
170	-18	-25	-60	65	-83	47

ตารางที่ 4.5 โมเมนต์รอบแกน Z (โมเมนต์บิด) ที่ฐานสูงสุด (\dot{M}_z) (ต่อ)

Moment about Z-axis						
มุม (องศา)	M mean (MN-m)	M back (MN-m)	M Reso (MN-m)	M dyn (MN-m)	M mean - M dyn (MN-m)	M mean + M dyn (MN-m)
180	-7	-19	-76	79	-86	72
190	3	18	48	52	-49	54
200	8	16	37	40	-32	48
210	5	14	34	37	-32	42
220	4	13	34	36	-33	40
230	3	14	41	43	-40	46
240	-1	-17	-43	46	-48	45
250	-9	-16	-42	45	-54	36
260	0	-20	-54	58	-58	57
270	11	22	65	69	-59	80
280	21	24	61	65	-44	86
290	21	24	46	52	-31	73
300	24	20	35	41	-17	64
310	20	18	29	34	-14	55
320	16	19	30	35	-19	51
330	6	18	34	38	-32	45
340	-2	-22	-41	47	-48	45
350	-8	-24	-47	53	-61	45

(ก) โมเมนต์ที่ฐานสูงสุด \hat{M}_y (ข) โมเมนต์ที่ฐานสูงสุด \hat{M}_x ภาพที่ 4.3 โมเมนต์ที่ฐานสูงสุด (ก) \hat{M}_y และ (ข) \hat{M}_x



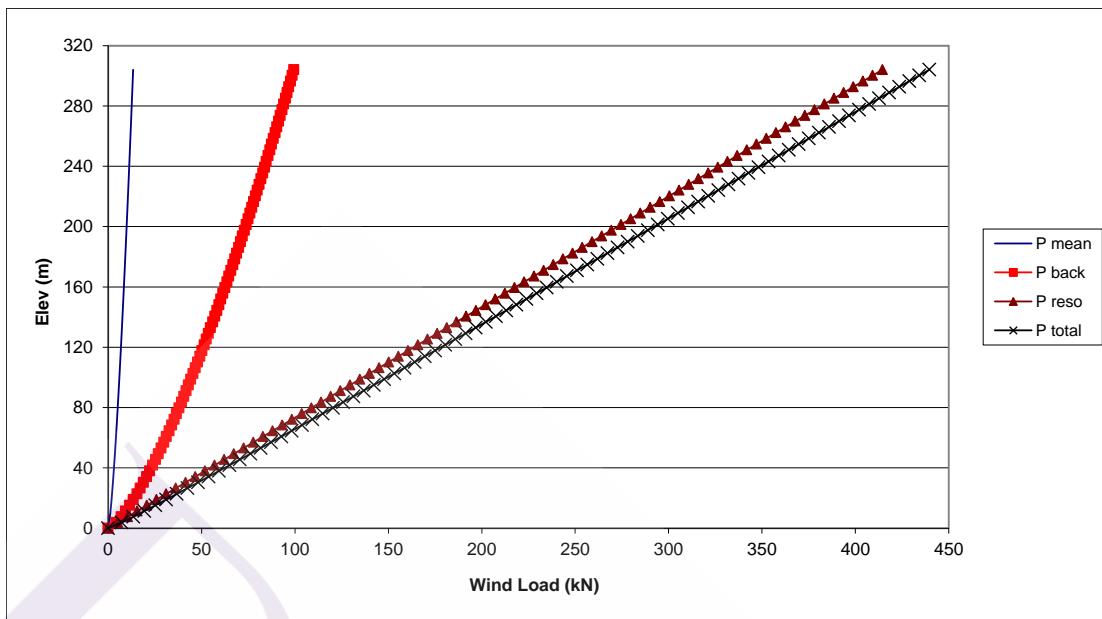
ภาพที่ 4.4 โมเมนต์บิดที่ฐานสูงสุด \hat{M}_z

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์ที่ฐานสูงสุดและพฤติกรรมหลักของแต่ละกรณี

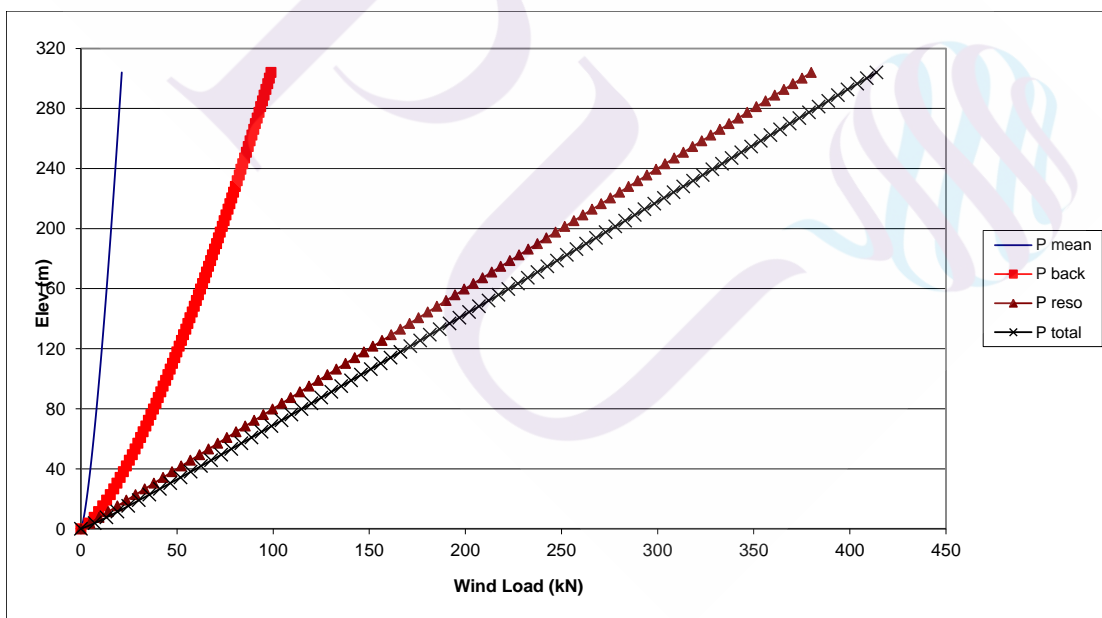
โมเมนต์ที่ฐาน	ค่าสูงสุด		พฤติกรรมหลัก
	(องศา)	(MN-m)	
\hat{M}_y	270	3,595	Across-wind
\hat{M}_x	170	3,395	Across-wind
\hat{M}_z	70	103	Torsion

4.4.2 แรงลมสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Wind Load, ESWL)

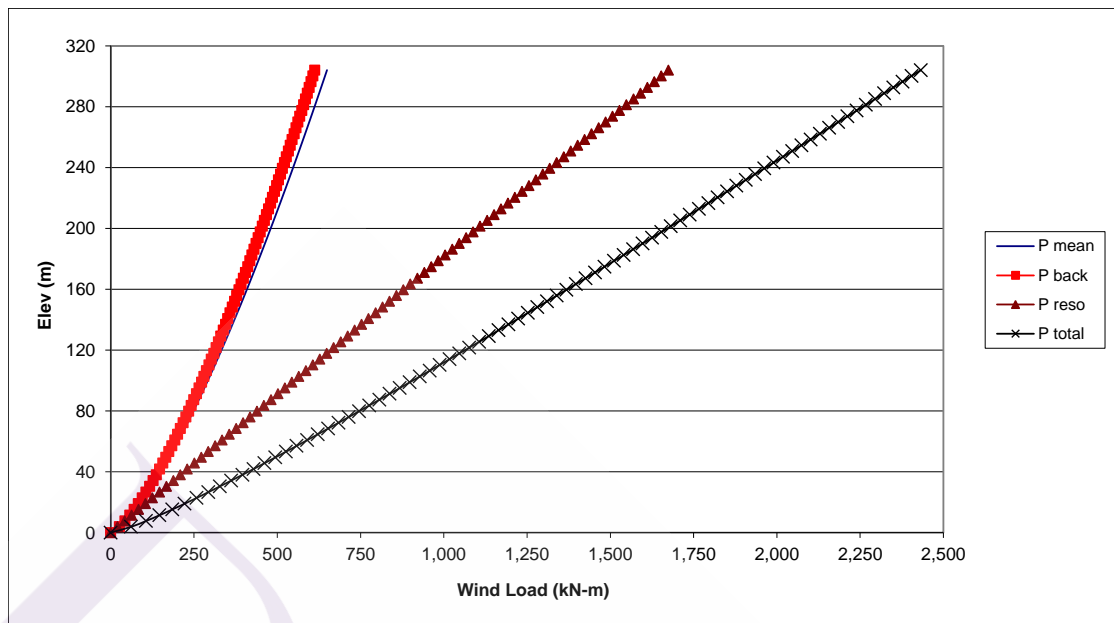
แรงลมสถิตเทียบเท่าแสดงในรูปแบบแรงลมรวมสูงสุด (\hat{P}) จากมุมที่เกิดโมเมนต์ที่ฐานสูงสุด สำหรับแรงลมรวมสูงสุดได้ผลแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6 และ สำหรับโมเมนต์บิดรวมสูงสุดได้ผลแสดงภาพที่ 4.7 โดย \hat{P}_x คำนวณจากมุม 270 องศา มีค่าสูงสุดที่ยอดอาคาร 440 kN (หรือ 2.89 kN/m²) \hat{P}_y คำนวณจากมุม 170 องศา มีค่าสูงสุดที่ยอดอาคาร 414 kN (หรือ 2.72 kN/m²) และ \hat{P}_z คำนวณจากมุม 70 องศา มีค่าสูงสุดที่ยอดอาคาร 2,432 kN-m



ภาพที่ 4.5 แรงลมสถิตเทียบเท่า \hat{P}_x (คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์ที่ฐานสูงสุดจากมุม 270 องศา)



ภาพที่ 4.6 แรงลมสถิตเทียบเท่า \hat{P}_y (คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์ที่ฐานสูงสุดจากมุม 170 องศา)



ภาพที่ 4.7 โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า \hat{P}_z (คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์บิดที่ฐานสูงสุดจากมุม 70 องศา)

4.5 ผลการคำนวณการสั่นไหวของอาคาร

การคำนวณการสั่นไหวของอาคาร ใช้ความเร็วลมอ้างอิงตามมาตรฐาน มยพ.1311-50 ซึ่งคือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง 10 ม. จากพื้นดินในสภาพเปิดโล่งสำหรับคาบเวลากลับ 10 ปี โดยในกรุงเทพมหานครมีค่า 25 เมตรต่อวินาที มีค่า Typhoon Factor (TF) = 1

สำหรับกรณีที่ทำการศึกษา มีสภาพภูมิประเทศเป็นแบบบริเวณศูนย์กลางเมืองใหญ่ (ภูมิประเทศแบบ C) สามารถคำนวณความเร็วลมที่ยอดอาคาร $\overline{U}_H = 29.48$ เมตรต่อวินาที

4.5.1 ผลการคำนวณ โมเมนต์พื้นฐานจากส่วนสั้นพ้อง

การคำนวณโมเมนต์พื้นฐานจากส่วนสั้นพ้อง (M_R) ใช้พารามิเตอร์ตามหัวข้อ 3.5 และใช้ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 10 ปีในการคำนวณ ได้ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.8 สำหรับ โมเมนต์ และภาพที่ 4.9 สำหรับ โมเมนต์บิด พบว่า \hat{M}_y มีค่าอยู่ระหว่าง 505 ถึง 1,794 MN-m ค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่มุม 90 องศา มีพฤติกรรมหลักเป็นการสั่นในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม, \hat{M}_x มีค่าอยู่ระหว่าง 611 ถึง 1,680 MN-m ค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่มุม 0 องศา มีพฤติกรรมหลักเป็นการสั่นในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมเช่นกัน, \hat{M}_z มีค่าอยู่ระหว่าง 18 ถึง 44 MN-m ค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่มุม 180 องศา

4.5.2 ผลการคำนวณอัตราเร่งสูงสุด

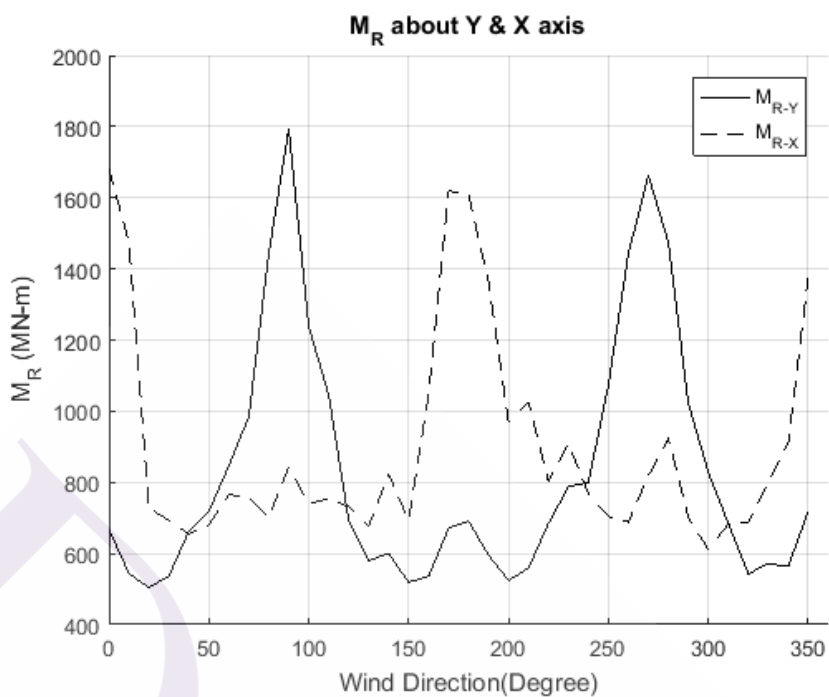
อัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.10 ทั้งใน 3 ทิศทางการสั่นไหว คือ ในแนวแกน X, Y และ Z จากนั้นสามารถรวมค่าให้เป็นอัตราเร่งรวมสูงสุดในแนวราบโดยใช้หลักการรวมแบบ Square Root of the Sum of the Squares (SRSS) ผลการทดสอบจากอูโมงค์ลม พบว่า อัตราเร่งรวมในแนวราบสูงสุด มีค่า 0.145 เมตร/วินาที² เกิดขึ้นเมื่อแรงลมกระทำที่มุม 90 องศา ซึ่งเป็นผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมเป็นหลัก เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน มยพ.1311-50 พบว่า มีค่าผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้โดยมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กรณีอาคารที่พักอาศัยเล็กน้อย (0.15 เมตร/วินาที²) แต่ต่ำกว่าเกณฑ์กรณีอาคารพาณิชย์ค่อนข้างมาก (0.25 เมตร/วินาที²)

ตารางที่ 4.7 โมเมนต์ที่ฐานจากส่วนสั้นพ้อง (M_R)

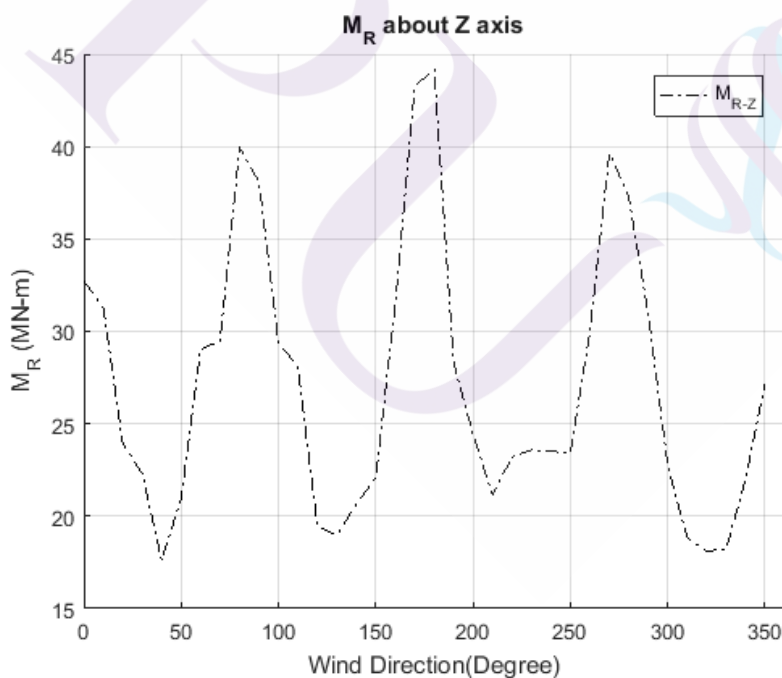
มุม (องศา)	M_{R-Y} (MN-m)	M_{R-X} (MN-m)	M_{R-Z} (MN-m)
0	668	1,680	33
10	543	1,476	31
20	505	727	24
30	536	693	22
40	663	655	18
50	718	679	21
60	847	766	29
70	985	756	29
80	1,444	702	40
90	1,794	842	38
100	1,238	741	29
110	1,045	753	28
120	694	732	19
130	580	678	19
140	600	824	21
150	519	694	22
160	536	1,047	31
170	671	1,619	43

ตารางที่ 4.7 โมเมนต์พื้นฐานจากส่วนสั้นพ้อง (M_R) (ต่อ)

มุม (องศา)	M_{R-Y} (MN-m)	M_{R-X} (MN-m)	M_{R-Z} (MN-m)
180	691	1,609	44
190	595	1,363	28
200	525	970	24
210	559	1,024	21
220	685	803	23
230	788	909	24
240	800	768	24
250	1,073	704	23
260	1,443	689	30
270	1,662	818	40
280	1,475	924	37
290	1,023	700	31
300	829	611	23
310	685	683	19
320	543	688	18
330	571	802	18
340	563	910	22
350	718	1,377	27



ภาพที่ 4.8 โมเมนต์พื้นฐานจากส่วนสั้นพ้อง (M_{R-Y}) และ (M_{R-X})



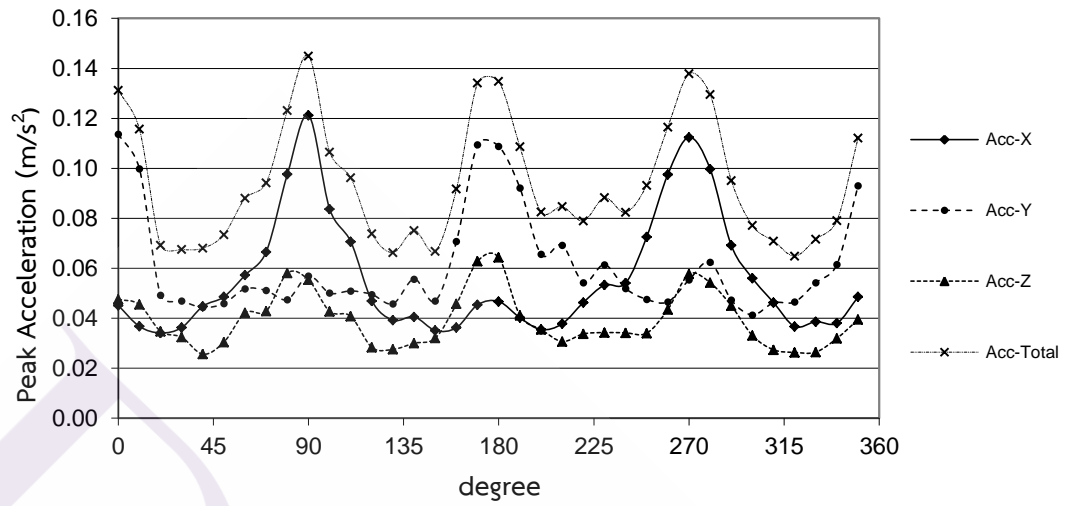
ภาพที่ 4.9 โมเมนต์บิดพื้นฐานจากส่วนสั้นพ้อง (M_{R-Z})

ตารางที่ 4.8 อัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร

มุม (องศา)	X-dir (m/s ²)	Y-dir (m/s ²)	Z-dir		Total Lat (m/s ²)
			(rad/s ²)	(m/s ²)	
0	0.045	0.114	0.00168	0.048	0.131
10	0.037	0.100	0.00161	0.045	0.116
20	0.034	0.049	0.00123	0.035	0.069
30	0.036	0.047	0.00115	0.032	0.068
40	0.045	0.044	0.00091	0.026	0.068
50	0.049	0.046	0.00108	0.030	0.073
60	0.057	0.052	0.00149	0.042	0.088
70	0.067	0.051	0.00152	0.043	0.094
80	0.098	0.048	0.00205	0.058	0.123
90	0.121	0.057	0.00196	0.055	0.145
100	0.084	0.050	0.00151	0.043	0.107
110	0.071	0.051	0.00144	0.041	0.096
120	0.047	0.050	0.00100	0.028	0.074
130	0.039	0.046	0.00097	0.028	0.066
140	0.041	0.056	0.00106	0.030	0.075
150	0.035	0.047	0.00113	0.032	0.067
160	0.036	0.071	0.00162	0.046	0.092
170	0.045	0.109	0.00222	0.063	0.134

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

มุม (องศา)	X-dir (m/s ²)	Y-dir (m/s ²)	Z-dir		Total Lat (m/s ²)
			(rad/s ²)	(m/s ²)	
180	0.047	0.109	0.00227	0.064	0.135
190	0.040	0.092	0.00145	0.041	0.109
200	0.035	0.066	0.00126	0.036	0.083
210	0.038	0.069	0.00109	0.031	0.085
220	0.046	0.054	0.00119	0.034	0.079
230	0.053	0.061	0.00121	0.034	0.088
240	0.054	0.052	0.00121	0.034	0.082
250	0.073	0.048	0.00120	0.034	0.093
260	0.098	0.047	0.00154	0.044	0.117
270	0.112	0.055	0.00204	0.058	0.138
280	0.100	0.062	0.00192	0.054	0.130
290	0.069	0.047	0.00159	0.045	0.095
300	0.056	0.041	0.00117	0.033	0.077
310	0.046	0.046	0.00097	0.027	0.071
320	0.037	0.047	0.00093	0.026	0.065
330	0.039	0.054	0.00094	0.026	0.072
340	0.038	0.062	0.00113	0.032	0.079
350	0.049	0.093	0.00140	0.039	0.112



ภาพที่ 4.10 อัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร

ผลการคำนวณตามมาตรฐาน มยผ.1311-50

การคำนวณแรงลมและผลตอบสนองของอาคารได้คำนวณตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 โดยวิธีการอย่างละเอียด โดยใช้โปรแกรมหางนกยูง 2.1 (Hang Nok Yoong 2.1) พัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ช่วยในการคำนวณ การคำนวณแรงลมใช้ความเร็วลมที่คาบกลับ 50 ปี ส่วนการคำนวณการสั่นไหวใช้ความเร็วลมที่คาบกลับ 10 ปี พารามิเตอร์ต่าง ๆ ใช้ตามหัวข้อ 3.5 รายละเอียดการนำเข้าข้อมูลและผลการคำนวณที่เกี่ยวข้องแสดงไว้ในภาคผนวก ข

4.6 ผลการคำนวณแรงลม

4.6.1 โมเมนต์พื้นฐานสูงสุด

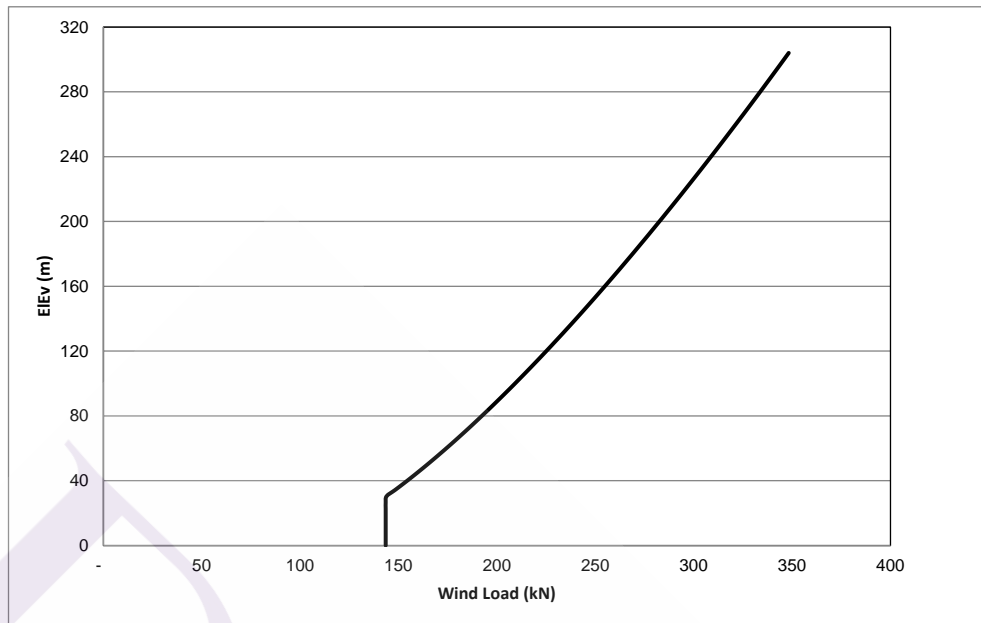
โมเมนต์พื้นฐานสูงสุดสามารถจำแนกได้เป็น 3 ทิศทาง คือ โมเมนต์พื้นฐานจากแรงในทิศทางลม โมเมนต์พื้นฐานจากแรงในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์พื้นฐานในทิศทางปิด ผลการคำนวณที่ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 โมเมนต์พื้นฐานสูงสุด

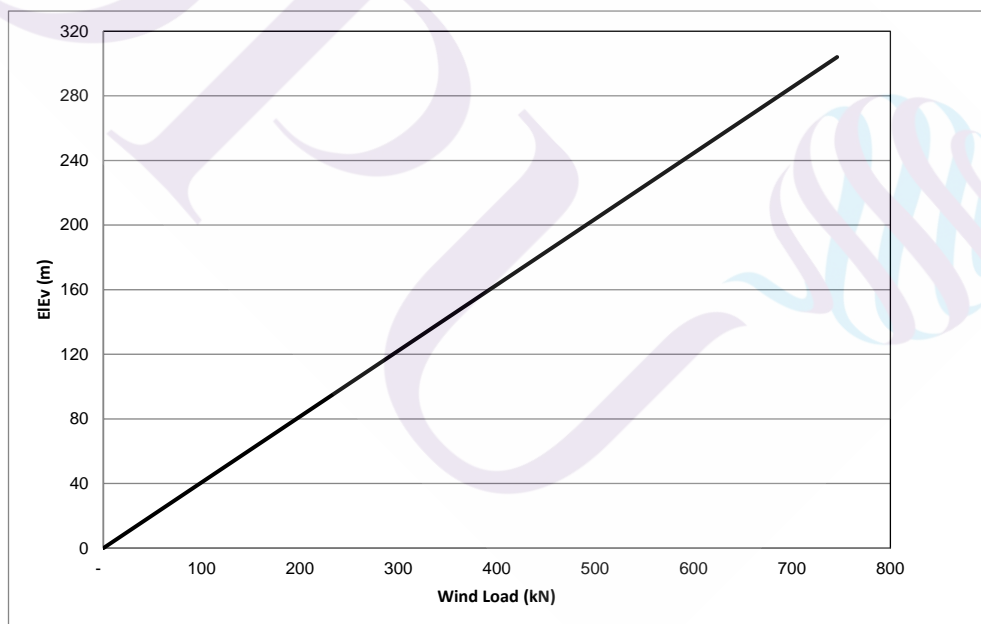
โมเมนต์พื้นฐาน	ผลการคำนวณ (MN-m)
โมเมนต์พื้นฐานจากแรงในทิศทางลม	3,424
โมเมนต์พื้นฐานจากแรงในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม	6,046
โมเมนต์พื้นฐานในทิศทางปิด	189

4.6.2 แรงลมสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Wind Load, ESWL)

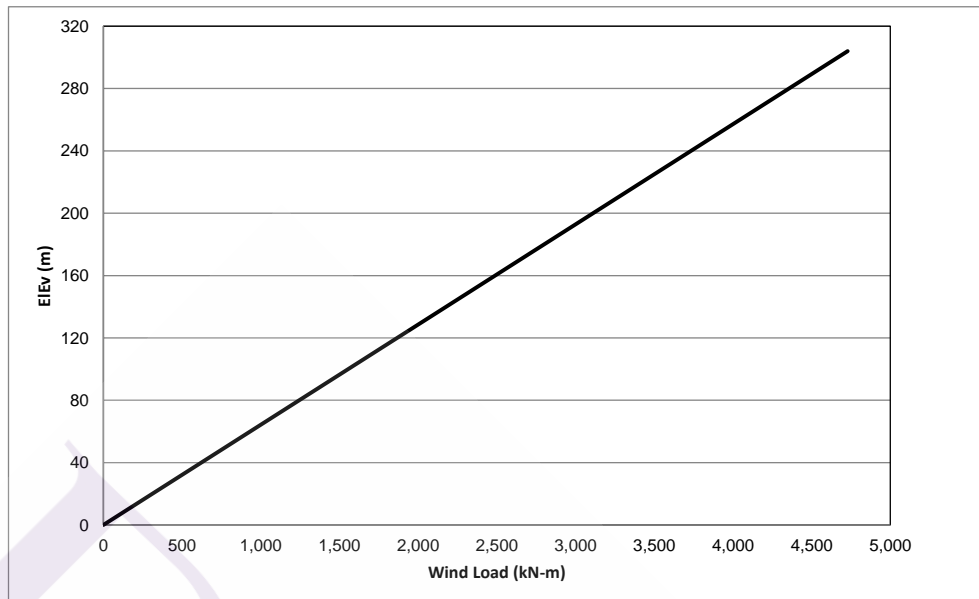
แรงลมสถิตเทียบเท่าสามารถจำแนกได้เป็นแรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม มีค่าสูงสุดที่ยอดอาคาร 348 kN (หรือ 2.29 kN/m²), แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม มีค่าสูงสุดที่ยอดอาคาร 746 kN (หรือ 4.91 kN/m²) และโมเมนต์ปิดสถิตเทียบเท่ามีค่าสูงสุดที่ยอดอาคาร 4,728 kN-m ผลการคำนวณที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ตามภาพที่ 4.11 ภาพที่ 4.12 และ ภาพที่ 4.13 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.11 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศทางลม



ภาพที่ 4.12 แรงลมสถิตเทียบเท่าในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม



ภาพที่ 4.13 โมเมนต์บิดสถิตเทียบเท่า

4.7 ผลการคำนวณการสั่นไหวของอาคาร

การคำนวณการสั่นไหวของอาคาร ใช้ความเร็วลมที่คาบกลับ 10 ปี และใช้ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม $I_w = 1$ ผลการคำนวณการสั่นไหวของอาคารในรูปอัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศทางลม อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 ทั้งนี้ อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารกรณีทิศทางบิดมาตรฐาน มยผ.1311-50 ไม่ได้ระบุวิธีการคำนวณไว้จึงไม่สามารถคำนวณได้

ตารางที่ 4.10 อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคาร

อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคาร	ผลการคำนวณ (m/s^2)
อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศทางลม	0.071
อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม	0.188
อัตราเร่งสูงสุดในแนวราบที่ยอดอาคารในทิศทางบิด	-

การเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและการคำนวณตามมาตรฐาน มยผ.1311-50

4.8 การเปรียบเทียบแรงลม

4.8.1 โมเมนต์พื้นฐานสูงสุดในทิศหลัก

การเปรียบเทียบโมเมนต์พื้นฐานระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลมกับมาตรฐาน มยผ. 1311-50 ในทิศหลัก (0 , 90 , 180 , 270 องศา) สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.11 สำหรับพฤติกรรม ในทิศทางลม พบว่า ค่าโมเมนต์พื้นฐานสูงสุดจากการทดสอบในอุโมงค์ลม (เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา) เทียบกับค่าคำนวณจากมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกันมากคือคิดเป็น 0.90 เท่า สำหรับพฤติกรรมในทิศ ตั้งฉากกับทิศทางลม พบว่า ค่าโมเมนต์พื้นฐานสูงสุดจากการทดสอบในอุโมงค์ลม (เกิดขึ้นที่มุม 270 องศา) มีค่าต่างกันพอสมควร คือคิดเป็น 0.59 เท่า และสำหรับพฤติกรรมในทิศทางบิด พบว่า ค่า โมเมนต์พื้นฐานสูงสุดจากการทดสอบในอุโมงค์ลม (เกิดขึ้นที่มุม 180 องศา) มีค่าต่างกันพอสมควร เช่นกัน คือคิดเป็น 0.46 เท่า

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบโมเมนต์พื้นฐานสูงสุดในทิศหลัก

พฤติกรรม การสั่นไหว	โมเมนต์พื้นฐานสูงสุด จากการทดสอบในอุโมงค์ลม		โมเมนต์พื้นฐานสูงสุดจาก มยผ.1311-50 (MN-m)	เปรียบเทียบ (เท่า)
	ทิศทางลมพัด	(MN-M)		
Along-wind	\hat{M}_x ลมพัดทิศ 90^0	3,080	3,424	0.90
Across-wind	\hat{M}_y ลมพัดทิศ 270^0	3,595	6,046	0.59
Torsion	\hat{M}_z ลมพัดทิศ 180^0	86	189	0.46

4.8.2 โมเมนต์พื้นฐานสูงสุดของแต่ละแกน

ในด้านการออกแบบโครงสร้าง จะต้องใช้ค่าโมเมนต์สูงสุดของแต่ละแกนในการพิจารณาออกแบบเพื่อความปลอดภัย การเปรียบเทียบโมเมนต์พื้นฐานสูงสุดของแต่ละแกนระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลมกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.12 ซึ่งพบว่า โมเมนต์สูงสุดพื้นฐานเป็นพฤติกรรมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลมทั้งของ \hat{M}_y และ \hat{M}_x เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดสอบในอุโมงค์ลมกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 พบว่า มีค่าต่างกัน

พอสมควร คือ คิดเป็น 0.59 และ 0.56 เท่าตามลำดับ สำหรับ \hat{M}_z นั้น พบว่า มีค่าต่างกันพอสมควร เช่นกัน คือ คิดเป็น 0.54 เท่า

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบโมเมนต์ที่ฐานสูงสุดของแต่ละแกน

พฤติกรรม การสั่นไหว	โมเมนต์ที่ฐานสูงสุด จากการทดสอบในอุโมงค์ลม		โมเมนต์ที่ฐานสูงสุดจาก มยพ.1311-50 (MN-m)	เปรียบเทียบ (เท่า)
	ทิศทางลมพัด	(MN-M)		
Across-wind	\hat{M}_y ลมพัดทิศ 270°	3,595	6,046	0.59
Across-wind	\hat{M}_x ลมพัดทิศ 170°	3,395	6,046	0.56
Torsion	\hat{M}_z ลมพัดทิศ 70°	103	189	0.54

4.8.3 แรงลมสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Wind Load, ESWL)

การเปรียบเทียบแรงลมสถิตเทียบเท่าระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลมกับมาตรฐาน มยพ.1311-50 จากมุมที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ฐานของแต่ละแกนสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.13 ซึ่งพบว่า แรงสูงสุดบนยอดอาคาร \hat{P}_x , \hat{P}_y และ \hat{P}_z จากการทดสอบในอุโมงค์ลมมีค่าน้อยกว่าการคำนวณตามมาตรฐาน มยพ.1311-50 คิดเป็น 0.59 เท่า 0.55 เท่า และ 0.51 เท่า ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับกรณีที่เปรียบเทียบกับโมเมนต์ที่ฐานสูงสุดดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบแรงลมสถิตเทียบเท่าที่ยอดอาคาร

แรงสูงสุดบนยอด อาคาร	จากการทดสอบในอุโมงค์ ลม (kN)	จาก มยพ.1311-50 (kN)	เปรียบเทียบ (เท่า)
\hat{P}_x	440	746	0.59
\hat{P}_y	414	746	0.55
\hat{P}_z	2,432	4,728	0.51

4.9 การเปรียบเทียบการสั่นไหวอาคาร

4.9.1 อัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารในทิศทางหลัก

การเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลมกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 ในทิศทางหลัก (0 , 90 , 180 องศา) เมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) = 300 kg/m³ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.14 สำหรับพฤติกรรมในทิศทางลม อัตราเร่งในแนวราบของการทดสอบในอุโมงค์ลม (เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา) เทียบกับค่าคำนวณจากมาตรฐาน มยผ.1311-50 คิดเป็น 0.80 เท่า และ สำหรับพฤติกรรมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม อัตราเร่งในแนวราบของการทดสอบในอุโมงค์ลม (เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา) เทียบกับค่าคำนวณจากมาตรฐาน มยผ.1311-50 คิดเป็น 0.64 เท่า ทั้งนี้ สำหรับอัตราเร่งในแนวราบจากทิศทางบิดนั้นไม่สามารถเปรียบเทียบได้ เนื่องจาก มาตรฐาน มยผ.1311-50 ไม่ได้ระบุวิธีในการคำนวณไว้

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคารในทิศทางหลักเมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) = 300 kg/m³

พฤติกรรม การสั่นไหว	อัตราเร่งสูงสุด จากการทดสอบในอุโมงค์ลม		อัตราเร่งสูงสุดจาก มยผ.1311-50 (m/s ²)	เปรียบเทียบ (เท่า)
	ทิศทางลมพัด	(m/s ²)		
Along-wind	90 ⁰	0.057	0.071	0.80
Across-wind	90 ⁰	0.121	0.188	0.64
Torsion	180 ⁰	0.064	-	-

นอกจากนี้ ได้ศึกษาเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร โดยทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) เพิ่มเติม เพื่อให้สอดคล้องกับความหนาแน่นเฉลี่ยจริงของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศไทย คือ 400 kg/m³ และ 500 kg/m³ และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลมและมาตรฐาน มยผ. 1311-50 พบว่ามีความแตกต่างเท่ากับกรณี $m = 300$ kg/m³ คือ อัตราเร่งในแนวราบของการทดสอบในอุโมงค์ลม (เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา) เทียบกับค่าคำนวณจากมาตรฐาน มยผ.1311-50 คิดเป็น 0.80 เท่า และ สำหรับพฤติกรรมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม อัตราเร่งในแนวราบของการทดสอบใน

อุโมงค์ลม (เกิดขึ้นที่มุม 90 องศา) เทียบกับค่าคำนวณจากมาตรฐาน มยผ.1311-50 คิดเป็น 0.64 เท่า แสดงไว้ตามตารางที่ 4.15 และตารางที่ 4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอคอาคารในทิศทางเมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) = 400 kg/m³

พฤติกรรม การสั่นไหว	อัตราเร่งสูงสุด จากการทดสอบในอุโมงค์ลม		อัตราเร่งสูงสุดจาก มยผ.1311-50 (m/s ²)	เปรียบเทียบ (เท่า)
	ทิศทางลมพัด	(m/s ²)		
Along-wind	90 ⁰	0.043	0.054	0.80
Across-wind	90 ⁰	0.091	0.141	0.64
Torsion	180 ⁰	0.048	-	-

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอคอาคารในทิศทางเมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) = 500 kg/m³

พฤติกรรม การสั่นไหว	อัตราเร่งสูงสุด จากการทดสอบในอุโมงค์ลม		อัตราเร่งสูงสุดจาก มยผ.1311-50 (m/s ²)	เปรียบเทียบ (เท่า)
	ทิศทางลมพัด	(m/s ²)		
Along-wind	90 ⁰	0.034	0.043	0.80
Across-wind	90 ⁰	0.073	0.113	0.64
Torsion	180 ⁰	0.039	-	-

4.10 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากการที่ผลการวิจัยของงานนี้มีค่าแตกต่างกับผลการคำนวณตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมกับงานวิจัยของ Zhou et al. (2003) ซึ่งสามารถทำการคำนวณแรงลมและผลตอบสนองได้จากเว็บไซต์ www.nd.edu/~nathaz. โดยได้ใช้พารามิเตอร์เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5 เลือกศึกษากรณีใช้ผลการทดสอบจากแบบจำลองขนาด 4 นิ้ว x 4 นิ้ว x 24

นี้ ศึกษากรณีภูมิประเทศเป็นเมืองใหญ่ (Urban) ใช้ $C_D = 1.3$ และ ใช้ความเร็วลมอ้างอิงโดยการแปลงความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง เป็นความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 3 วินาที โดยใช้แฟกเตอร์แปลงค่าที่อยู่ในรูปที่ อ.2.3 ของมาตรฐาน มยพ.1311-50 มีค่า 1.52 ดังนั้น จากความเร็วลมอ้างอิงที่ใช้ 25 เมตรต่อวินาทีในงานวิจัยนี้จะเทียบเท่ากับกับความเร็วลม $1.52 \times 25 = 38$ เมตรต่อวินาที

4.10.1 การเปรียบเทียบแรงลม (โมเมนต์สูงสุดที่ฐาน)

จากการเปรียบเทียบ พบว่า ผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยสำหรับพฤติกรรมในทิศทางลม ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางบิด ผลการทดสอบในอุโมงค์ลมของงานวิจัยนี้ มีค่าเป็น 0.86 , 0.76 และ 0.81 เท่า ของค่าที่ได้จากการงานวิจัยของ Zhou et al. ตามลำดับ รายละเอียดแสดงไว้ตามตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบ โมเมนต์ที่ฐานสูงสุดระหว่างงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Zhou et al. (2003)

พฤติกรรม การสั่นไหว	โมเมนต์ที่ฐานสูงสุด จากการทดสอบในอุโมงค์ลม		โมเมนต์ที่ฐานสูงสุดจาก Zhou et al. (2003) (MN-m)	เปรียบเทียบ (เท่า)
	ทิศทางลมพัด	(MN-M)		
Along-wind	\hat{M}_x ลมพัดทิศ 90°	3,080	3,595	0.86
Across-wind	\hat{M}_y ลมพัดทิศ 270°	3,595	4,712	0.76
Torsion	\hat{M}_z ลมพัดทิศ 180°	86	106	0.81

4.10.2 การเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร

จากการเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร พบว่า ผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน โดยสำหรับพฤติกรรมในทิศทางลม ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางบิด ผลการทดสอบในอุโมงค์ลมของงานวิจัยนี้ มีค่าเป็น 0.70 , 0.72 และ 0.85 เท่า ของค่าที่ได้จากการงานวิจัยของ Zhou et al. (2003) ตามลำดับ รายละเอียด แสดงไว้ตามตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยึดอาคารระหว่างงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Zhou et al. (2003) เมื่อความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร (m) = 300 kg/m³

พฤติกรรม การสั่นไหว	อัตราเร่งสูงสุด จากการทดสอบในอุโมงค์ลม		อัตราเร่งสูงสุดจาก Zhou et al.(2003) (m/s ²)	เปรียบเทียบ (เท่า)
	ทิศทางลมพัด	(m/s ²)		
Along-wind	90 ⁰	0.057	0.082	0.70
Across-wind	90 ⁰	0.121	0.167	0.72
Torsion	180 ⁰	0.064	0.075	0.85

จากการเปรียบเทียบผลการศึกษางานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Zhou et al. (2003) ทั้งในด้านแรงลมและอัตราเร่งสูงสุดของอาคาร ในภาพรวม พบว่า มีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน โดยที่งานวิจัยนี้ให้ค่าที่ต่ำกว่างานวิจัยของ Zhou et al. (2003) จึงเห็นได้ว่า ผลการทดสอบในอุโมงค์ลมจากงานวิจัยนี้มีความเชื่อถือได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาเปรียบเทียบแรงลมและอัตราการสั่นไหวสูงสุดที่ยอดอาคารระหว่างการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมและการคำนวณตามมาตรฐานแรงลม มยพ.1311-50 ของอาคารที่มีความอ่อนตัวสูงและมีรูปทรงไม่สม่ำเสมอบนยอดอาคาร โดยใช้แบบจำลองมาตราส่วน 1:400 เป็นตัวแทนอาคารขนาดความกว้าง 40 เมตร ความยาว 40 เมตร ความสูงบนยอดอาคารตำแหน่งสูงสุด 304 เมตร ตำแหน่งต่ำสุด 272 เมตร และจำลองให้อาคารตั้งอยู่ในเขตบางรัก กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นย่านบริเวณศูนย์กลางของกรุงเทพมหานครที่มักมีอาคารสูงอื่นอยู่ใกล้เคียง

5.1.1 สรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบแรงลม โดยใช้โมเมนต์สูงสุดที่ฐานเป็นค่าเปรียบเทียบ แบ่งเป็น 3 ทิศทาง คือ ในทิศทางลม ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางบิด ผลการทดสอบในอุโมงค์ลม มีค่าเป็น 0.90 , 0.59 และ 0.46 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน มยพ.1311-50 ตามลำดับ โดยพบว่าโมเมนต์ที่ฐานกรณีตั้งฉากกับทิศทางลม และกรณีโมเมนต์บิดมีความแตกต่างกันมาก ผู้วิจัยวิเคราะห์ว่ามีสาเหตุมาจาก

5.1.1.1 ค่าที่ได้จากมาตรฐาน มยพ.1311-50 ได้มาจากการทดสอบอาคารเดี่ยว (Isolated Building) ซึ่งไม่มีการจำลองอาคารข้างเคียงไว้ด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ได้จำลองอาคารข้างเคียงไว้ซึ่งอาจเป็นผลให้อาคารมีผลตอบสนองน้อยกว่าค่าจากการคำนวณตามมาตรฐาน

5.1.1.2 ผลจากจากรูปทรงด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Shape) ของตัวอาคารที่บริเวณยอดอาคารซึ่งความสูงแตกต่างกัน 272 - 304 เมตร มีสมรรถนะด้านอากาศพลศาสตร์ที่ดีกว่ารูปทรงแบบปกติ

5.1.1.3 สาเหตุจากอิทธิพลของอาคารข้างเคียงอาจมีความสูงไม่มากพอหรืออยู่ในตำแหน่งระยะห่างที่ไม่ทำให้เกิดแรงลมสูงจากช่องว่างระหว่างอาคารแต่กลับเป็นการช่วยลดการปะทะและลดผลกระทบจากระลอกลม

5.1.2 สรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดที่ยอดอาคาร ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบเฉพาะอัตราการสั่นไหวในแนวราบสูงสุดของพฤติกรรมในทิศทางลม และทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ผลการทดสอบในอุโมงค์ลมมีค่าเป็น 0.80 และ 0.64 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน มยพ.1311-50 ตามลำดับ โดยพบว่าอัตราเร่งสูงสุดในทิศทางลมมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย

แต่อัตราเร่งสูงสุดในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลมมีความแตกต่างกันบ้าง ผู้วิจัยวิเคราะห์ว่ามีสาเหตุ เช่นเดียวกับกรณีการศึกษาเปรียบเทียบด้านแรงลมดังที่กล่าวไว้แล้ว อนึ่ง สำหรับอัตราเร่งทิศทาง บิด ไม่สามารถศึกษาเปรียบเทียบได้ เนื่องจาก มาตรฐาน มยผ.1311-50 ไม่ได้ระบุวิธีคำนวณไว้

จากการตรวจสอบเพิ่มเติม โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบแบบจำลอง ในอุโมงค์ลมจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Zhou et al. (2003) ในภาพรวม พบว่า มีความ สอดคล้องใกล้เคียงกันซึ่งงานวิจัยนี้ให้ค่าที่ต่ำกว่างานวิจัยของผู้วิจัยดังกล่าว ผลการเปรียบเทียบด้าน แรงลม สำหรับพฤติกรรมในทิศทางลม ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และทิศทางบิด มีค่าเป็น 0.86 , 0.76 และ 0.81 เท่า ตามลำดับ ส่วนผลการเปรียบเทียบอัตราเร่งสูงสุดของอาคาร มีค่าเป็น 0.70 , 0.72 และ 0.85 เท่า ตามลำดับ จึงเห็นได้ว่า ผลการทดสอบในอุโมงค์ลมจากงานวิจัยนี้มีความเชื่อถือ ได้

งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมมีความจำเป็นในด้านการ ยืนยันความถูกต้องของการออกแบบของอาคารที่มีความอ่อนตัวรวมถึงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตของมาตรฐานการคำนวณ และ สรุปได้ว่า การคำนวณตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 ให้ค่าแรงลมและการสั่นไหวที่มากกว่า (Conservative) จึงมีความปลอดภัยมากกว่าค่าที่ได้ จากการทดลองในอุโมงค์ลม อย่างไรก็ตาม กรณีออกแบบโครงสร้างหลักโดยเลือกใช้ค่าที่ได้จากผล การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ซึ่งสามารถใช้แทนการคำนวณแรงลมตามมาตรฐาน ได้ (สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2550) อาจทำให้ภาพรวมของ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมีค่าน้อยลง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยมีความเห็นเพิ่มเติมว่า กรณีอาคารที่มีความสูงมาก (มีความอ่อนตัวสูง) อาคารที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นปกติ รวมถึงกรณีที่มีอาคารสูงอื่นในระดับใกล้เคียงกันอยู่ ข้างเคียง หรือเป็นกรณีที่แน่ชัดว่าไม่อยู่ในขอบข่ายของมาตรฐานการคำนวณแรงลมมีความจำเป็น อย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบแบบจำลองอาคารในลักษณะดังกล่าวในอุโมงค์ลม เนื่องจากผลการ คำนวณที่ได้จากการทดสอบจะสะท้อนถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของอาคารเมื่อมีแรงลมมากระทำ หากผู้ออกแบบเลือกใช้ผลการคำนวณจากมาตรฐานการคำนวณ นอกจากจะได้ผลการคำนวณที่ไม่ สะท้อนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงแล้ว อาจทำให้โครงสร้างของอาคารไม่ปลอดภัยเพียงพอหรืออาคาร อาจสั่นไหวมากจนส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตประจำวันของผู้ใช้อาคารก็เป็นได้ ในทางตรงกัน ข้าม หากผู้ออกแบบไม่สามารถตัดสินใจในการเลือกใช้ค่าแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารที่ เหมาะสม และเลือกออกแบบตามมาตรฐานการคำนวณ โดยเพิ่มค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) เข้าไปเกินความจำเป็นจะทำให้ค่าก่อสร้างมีมูลค่าสูงขึ้นกว่าที่ควรจะเป็น แม้ว่าอาคารจะมี ความปลอดภัยเพียงพอก็ตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการศึกษาเปรียบเทียบด้านแรงลมระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลมกับมาตรฐาน มยผ. 1311-50 ที่พบว่าโมเมนต์สูงสุดที่ฐานมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะในกรณีของแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และในทิศทางบิด มีความแตกต่างกันมากถึง 0.46 และ 0.59 เท่า ตามลำดับ นั้นควรมีการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมเพิ่มเติมเพื่อยืนยันว่า มีสาเหตุมาจากรูปทรงของตัวอาคารเองเป็นหลัก ซึ่งอิทธิพลในด้านการลดแรงแลมจากรูปทรงดังกล่าวจะต้องมากกว่าอิทธิพลจากอาคารข้างเคียง ทั้งนี้ กรณีที่สามารถดำเนินการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันได้ นั้น ตามข้อกำหนดของ ASCE 7-10 ได้ยอมให้สามารถใช้แรงลมสูงสุดในการออกแบบโครงสร้างอาคารหลักเพื่อต้านทานแรงลมได้ต่ำถึง 0.5 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน

5.2.2 ในทางปฏิบัติ หากไม่สามารถดำเนินการทดสอบเพื่อยืนยันได้ ตามข้อกำหนดของ ASCE 7-10 ได้กำหนดให้การออกแบบโครงสร้างอาคารหลักเพื่อต้านทานแรงลม จะต้องใช้แรงลมไม่น้อยกว่า 0.8 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน

5.2.3 งานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ด้านพลศาสตร์ เช่น ความถี่ธรรมชาติของอาคาร หรืออัตราส่วนความหน่วง เป็นต้น โดยได้สมมติเป็นอย่างง่ายอ้างอิงจากมาตรฐาน มยผ.1311-50 แต่กรณีที่อาคารจริงมีค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแตกต่างออกไป จะมีผลต่อการคำนวณแรงลมและผลตอบสนองของอาคารด้วย ดังนั้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการคำนวณวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) จากตัวแปรด้านพลศาสตร์ดังกล่าวด้วย



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- ชาญณรงค์ ฟุสกุล. (2547). พฤติกรรมการรับแรงลมและการตอบสนองของอาคารคู่แฝดที่มี
การปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ).
กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- ณัฐพล มากเทพพงษ์. (2553). วิธีรวมผลแรงลมของอาคารสูง (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ).
กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- บัญชา คำวอน. (2549). การเปรียบเทียบผลกระทบด้านราคาของโครงสร้างอาคารสูงที่ออกแบบ
ด้านทานแรงลมตามข้อกำหนดของกฎกระทรวง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ).
กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พงศกร วัชฌายณ์ศิริกุล และ วิโรจน์ บุญญฤทธิบุญ. (2556). การลดแรงลมและผลตอบสนองของ
อาคารสูงโดยการปรับแต่งรูปทรง. ใน การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ
ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 ณ โรงแรมดิเอ็มเพลส จังหวัดเชียงใหม่.
กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- วิโรจน์ บุญญฤทธิบุญ. (2558). การศึกษาแรงลมของโครงการ Ashton Asoke โดยการทดสอบใน
อุโมงค์ลม. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
จาก <https://dspace.library.tu.ac.th/handle/6625644440/240>
- วิโรจน์ บุญญฤทธิบุญ, พิเชษฐ์ กกล้าหาญ และ กำธร เจนสุขเสรี. (2549). หน่วยแรงลมสำหรับ
ออกแบบผนังภายนอกอาคารศูนย์พลังงานแห่งชาติโดยการทดสอบอุโมงค์ลม.
ใน การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11 ,
กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. (2550). โครงการการวิเคราะห์หน่วย
แรงลมที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของอาคารตามสภาพแวดล้อม เพื่อปรับปรุงกฎกระทรวง
ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ข้อ 17. รายงานฉบับสุดท้าย เสนอสำนักควบคุมและตรวจสอบ
อาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง.

- สุกิตย์ เทพมังกร. (2547), การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมโดยวิธี high frequency force balance เพื่อการประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร. ใน *การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติครั้งที่ 9*, 19 - 21 พฤษภาคม 2547. โรงแรมริเจนท์ ชะอำ, เพชรบุรี.
 กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- สุวรรณสาม ศรีวิเชียร.(2546). *แรงลมสำหรับการออกแบบ โครงสร้างป้ายโฆษณาสูง* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2550). *มาตรฐานการคำนวณ แรงลมและการตอบสนองของอาคาร. (พิมพ์ครั้งที่ 1)*.
 กรุงเทพฯ: เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด.
- อลงกรณ์ กฤตธีรชานันท์ (2545). *การเปรียบเทียบแรงลมระหว่างมาตรฐานต่าง ๆ กับข้อมูลการ ทดลองในอุโมงค์ลม* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต).
 กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ภาษาอังกฤษ

- American Society of Civil Engineers. (2010). *Minimum Design Loads on Buildings and Other Structures*, ASCE 7-10.
- Davenport, A.G. (1967). *Gust loading factors. Journal of the Structural Division*. 93(3), 11–34.
- Kareem, A., Zhou, Yin. (2003). Gust loading factor—past, present and future. *Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 91, 1301–1328.
- Kwon, D., Kijewski-Correa, T., and Kareem, A. (2008). e-Analysis of High-Rise Buildings Subjected to Wind Loads. *Journal of structural engineering-ASCE*. 134, paper no.7, 1139-1153.
- S. Thepmongkorn , G.S. Wood and K.C.S. Kwok. (2002). Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building. *Journal Wind Engineering and industrial Aerodynamics*. 90, 1807-1815.
- Tschanz, T., and Davenport A.G. (1983). The base balance technique for the determination of dynamic wind loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 13(1-3), 429-439. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167610583901629>

Zhou, Y., Kijewski, T., and Kareem, A. (2003). Aerodynamic Loads on Tall Buildings: Interactive Database. *Journal of structural engineering-ASCE*. 129, paper no.3, 394-404.



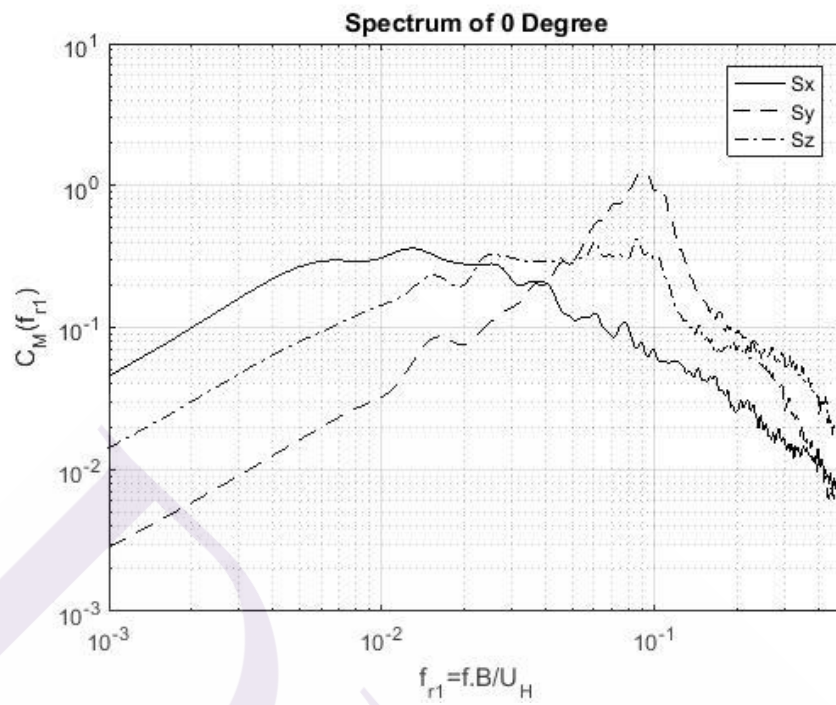


ภาคผนวก

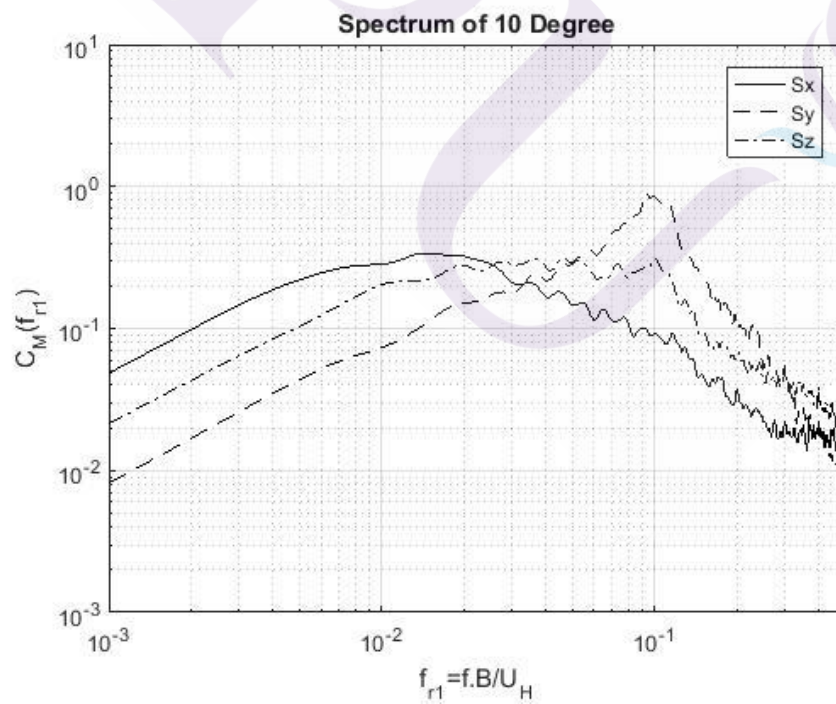
ภาคผนวก ก

ผลการคำนวณสเปกตรัมด้านอากาศพลศาสตร์ของโมเมนต์
และโมเมนต์บิดที่ฐานของแบบจำลอง

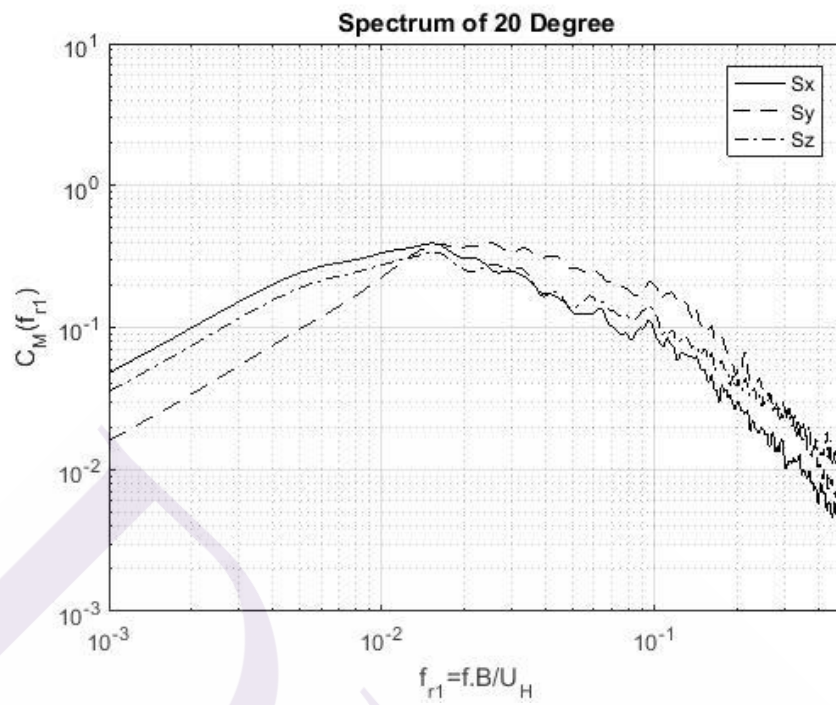




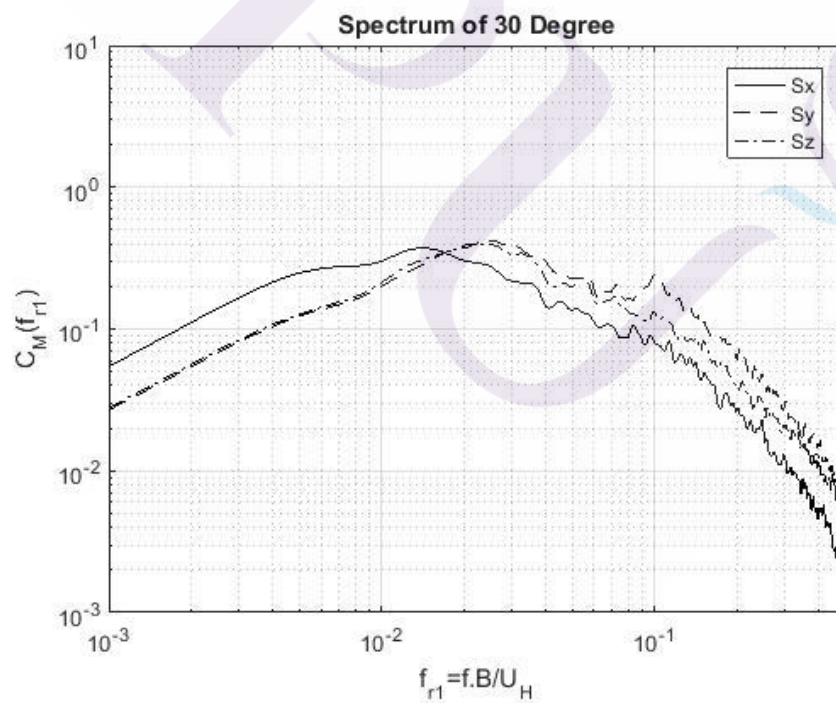
ภาพที่ ก.1 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 0°



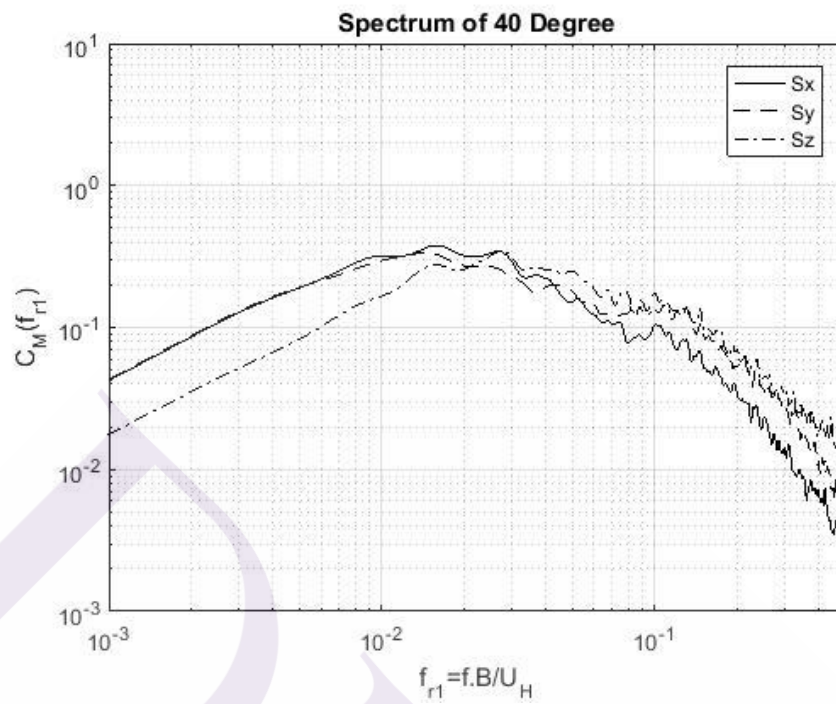
ภาพที่ ก.2 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 10°



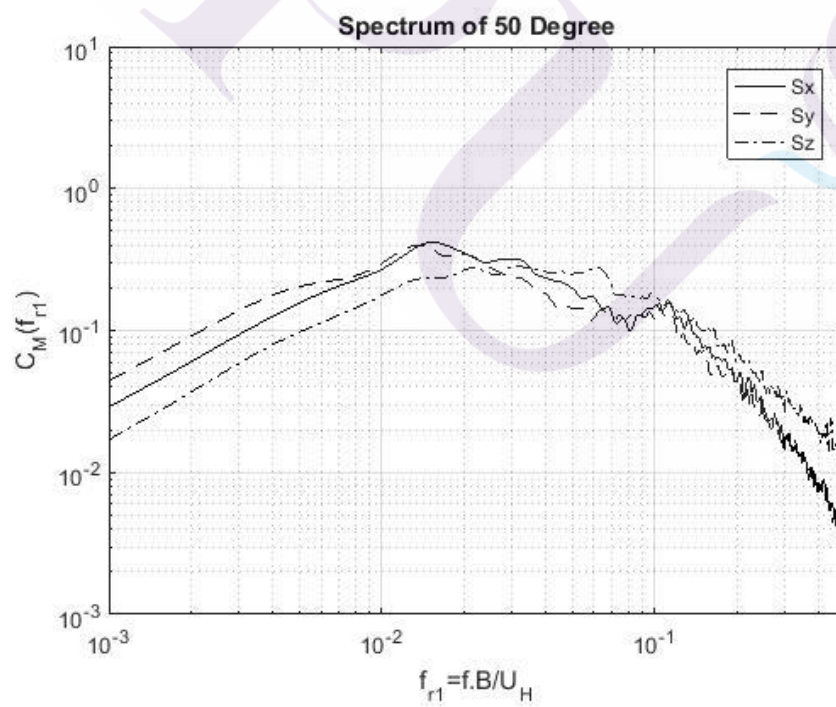
ภาพที่ ก.3 สเปกตรัมเมื่อทิศทางการกระทำที่ 20°



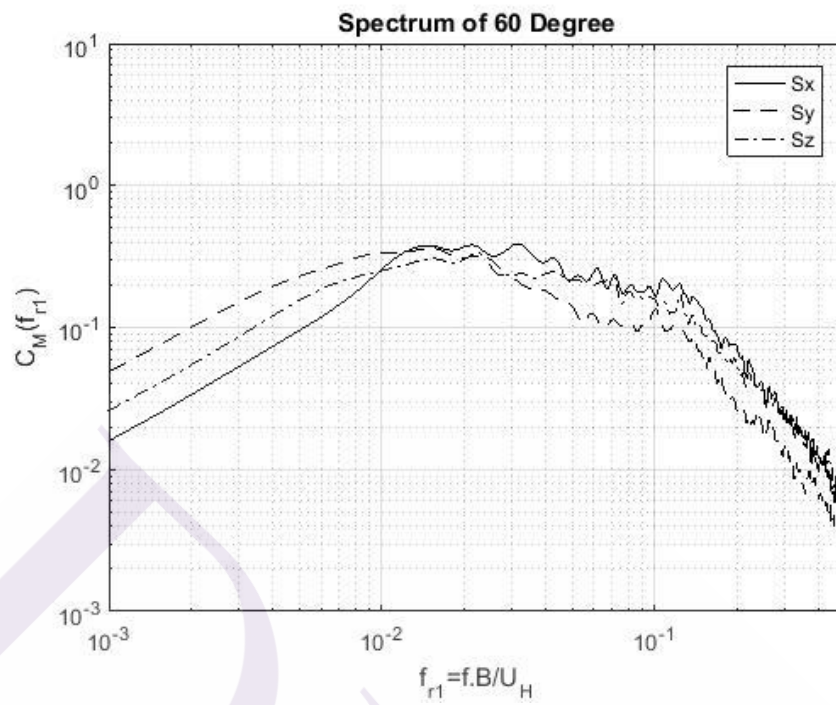
ภาพที่ ก.4 สเปกตรัมเมื่อทิศทางการกระทำที่ 30°



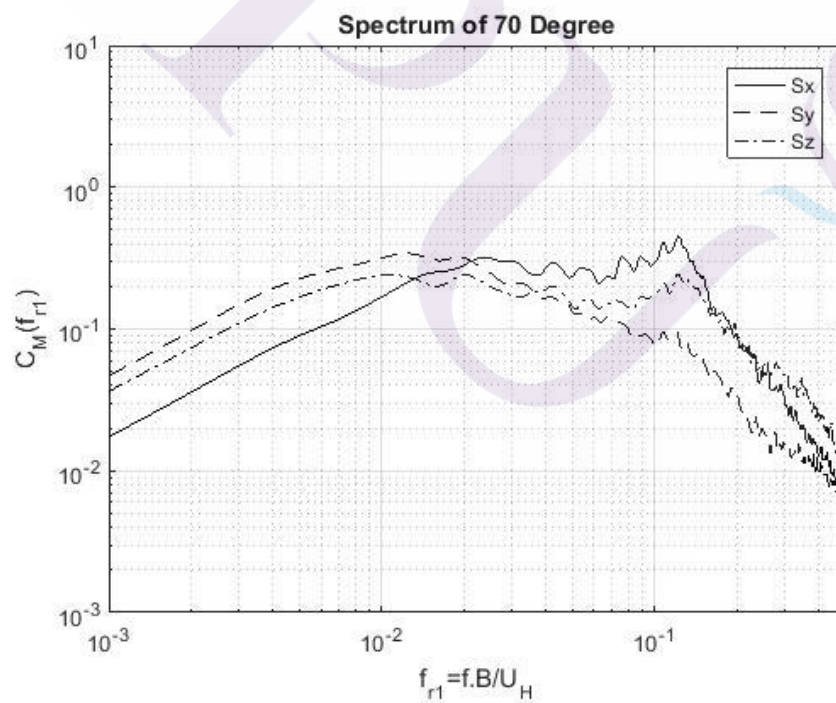
ภาพที่ ก.5 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 40°



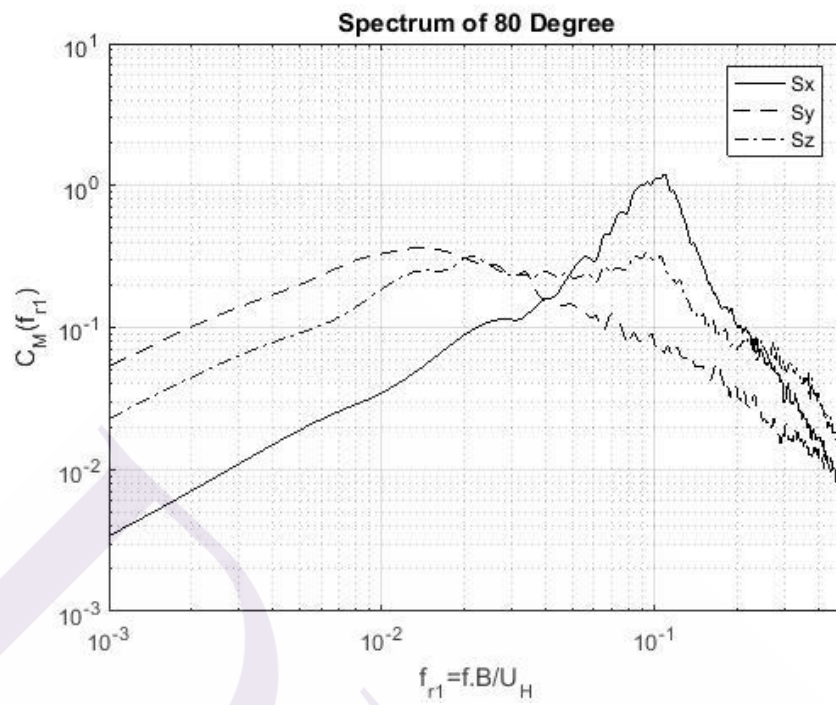
ภาพที่ ก.6 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 50°



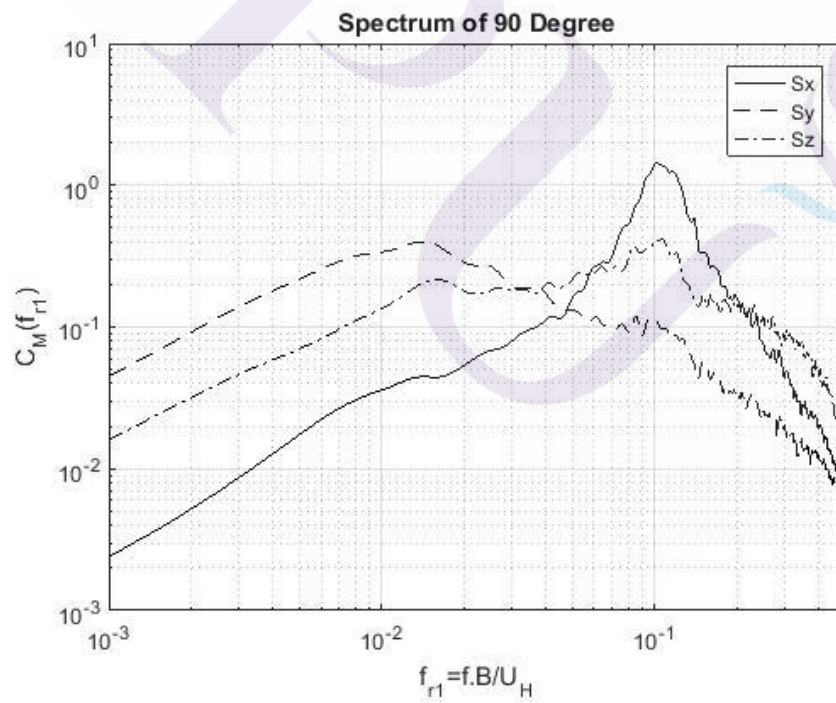
ภาพที่ ก.7 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 60°



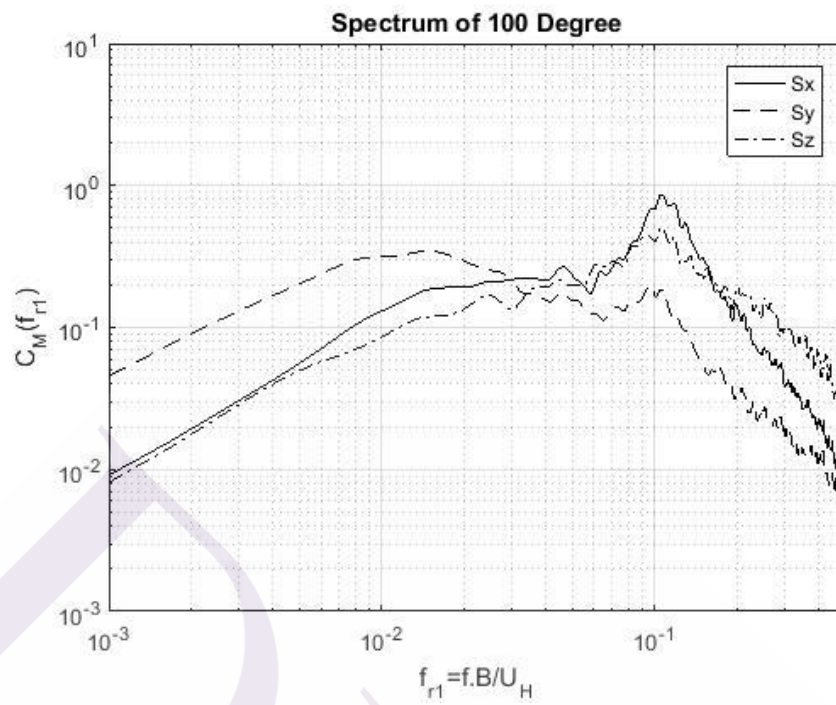
ภาพที่ ก.8 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 70°



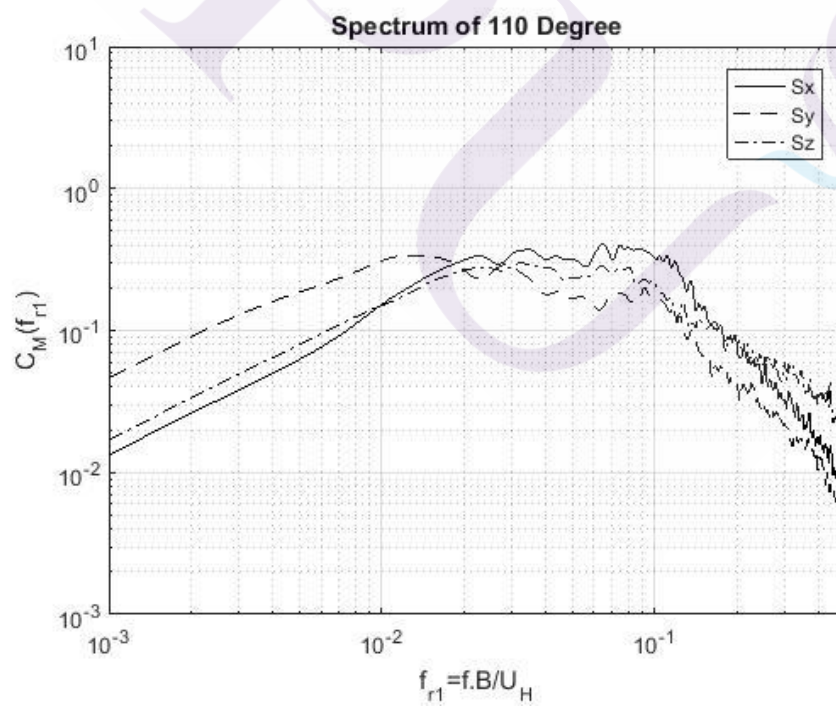
ภาพที่ ก.9 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 80°



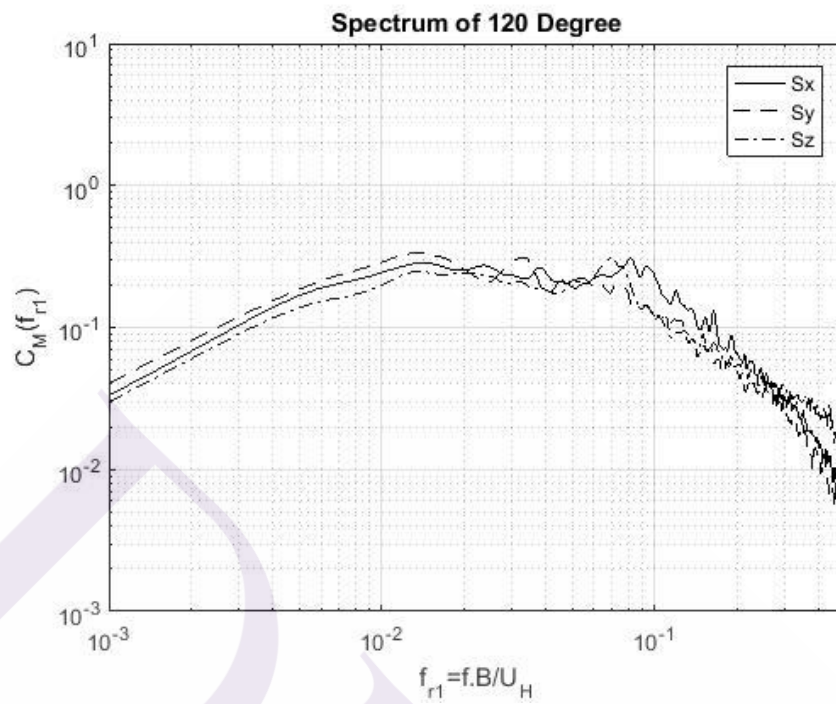
ภาพที่ ก.10 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 90°



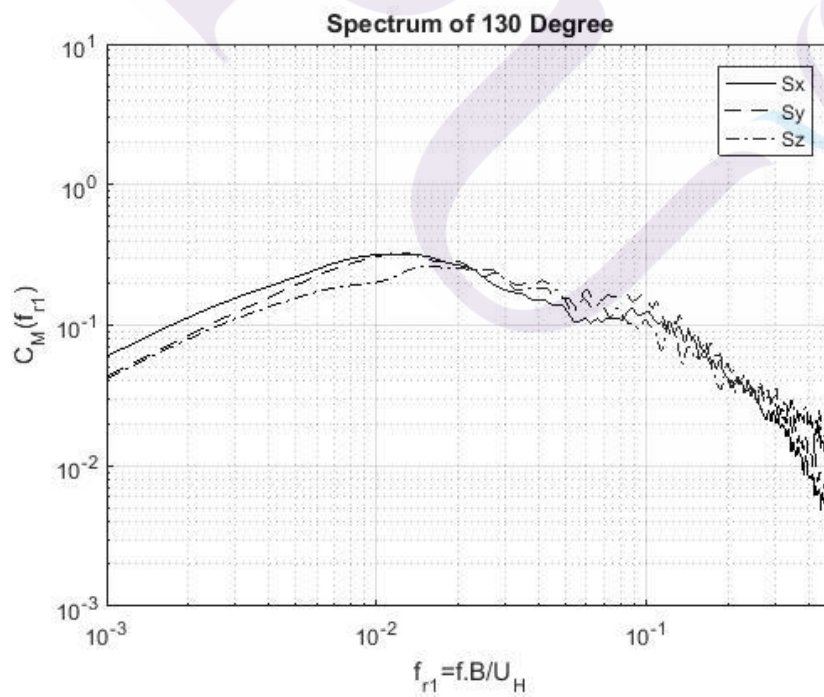
ภาพที่ ก.11 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 100°



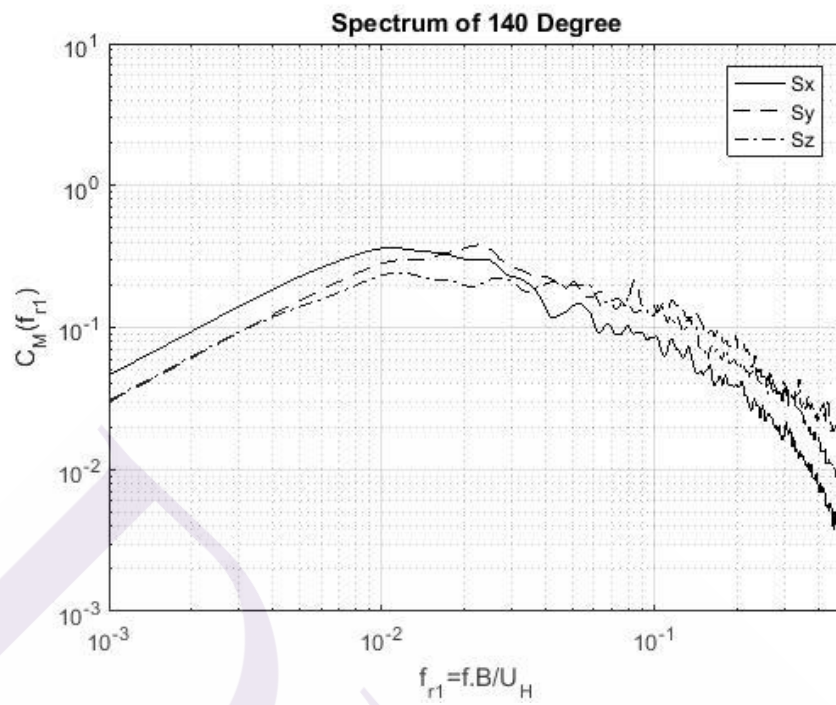
ภาพที่ ก.12 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 110°



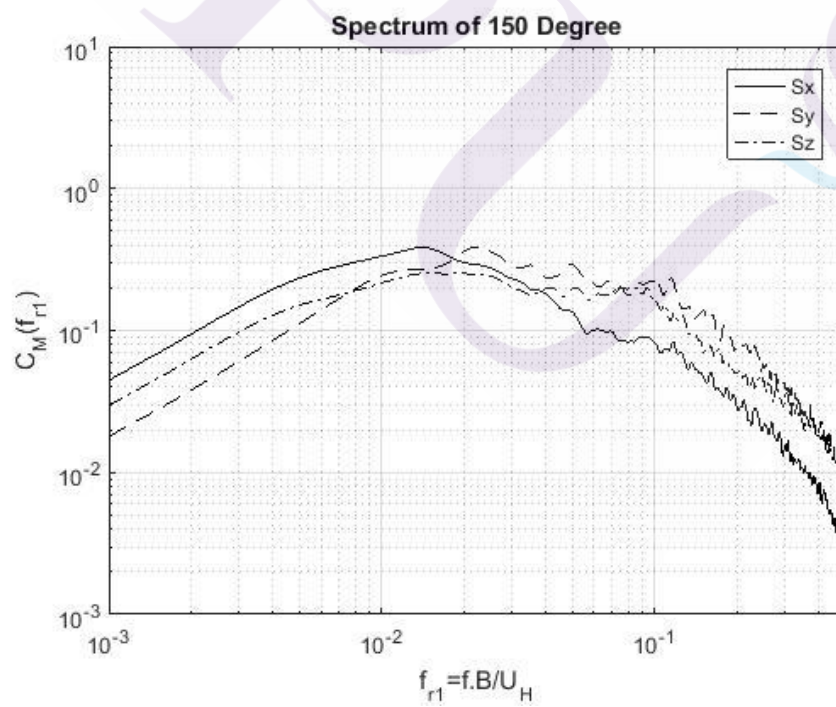
ภาพที่ ก.13 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 120°



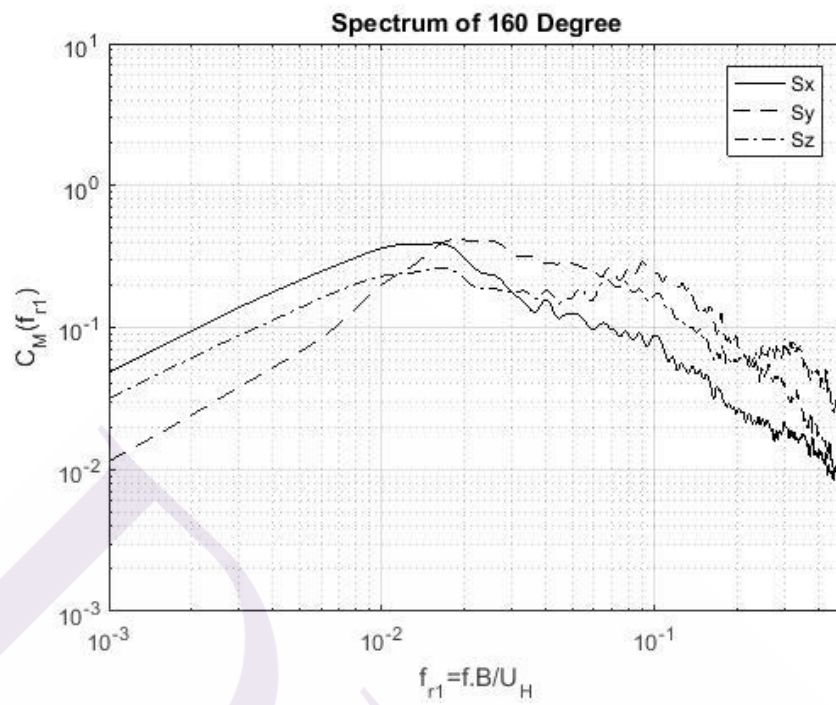
ภาพที่ ก.14 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 130°



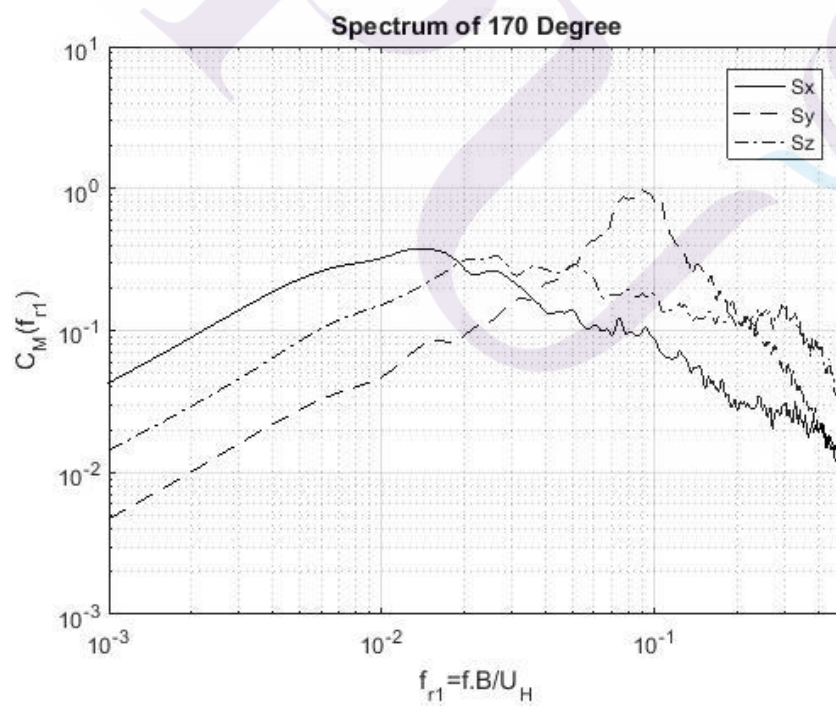
ภาพที่ ก.15 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 140°



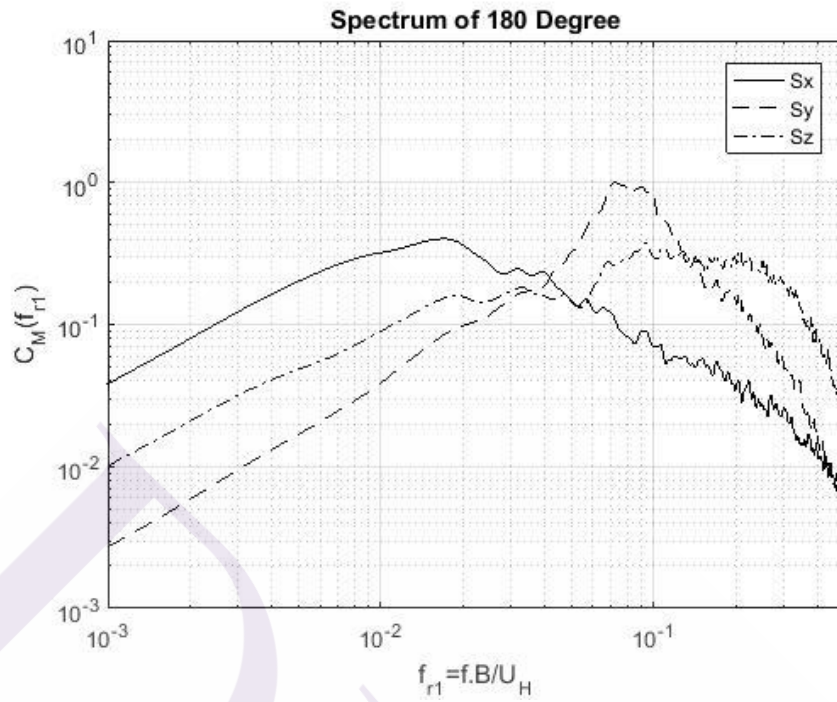
ภาพที่ ก.16 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 150°



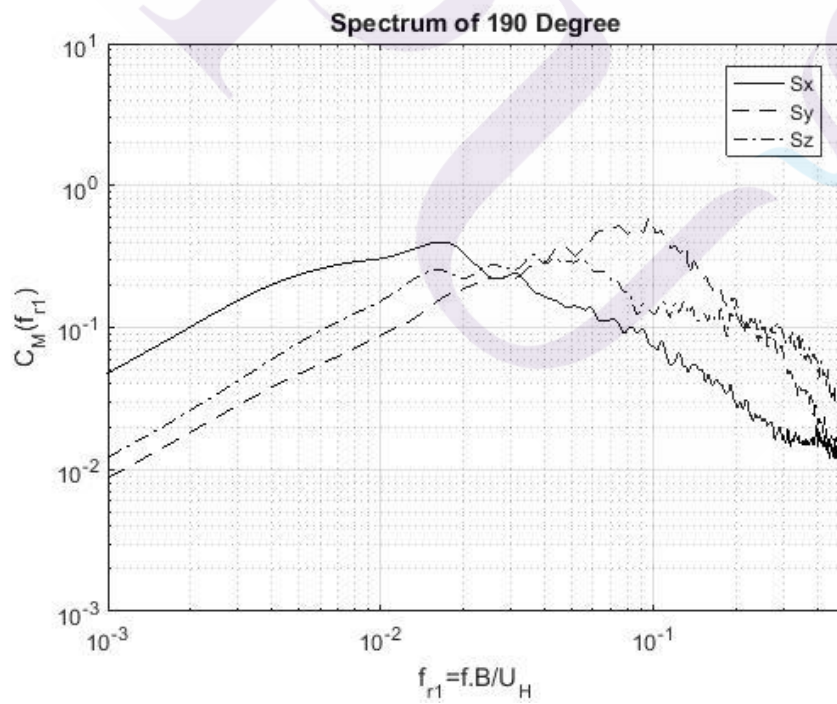
ภาพที่ ก.17 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 160°



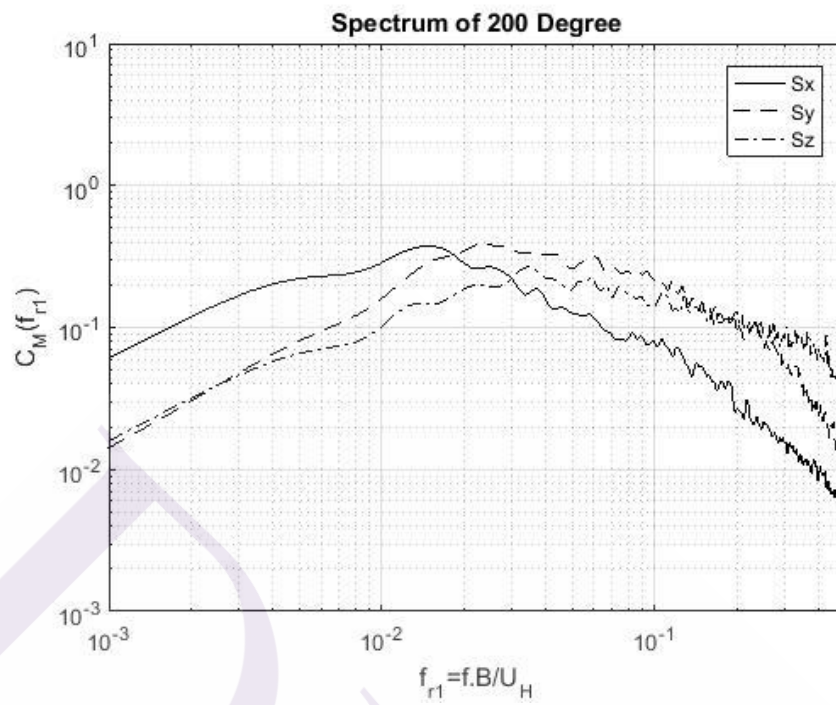
ภาพที่ ก.18 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 170°



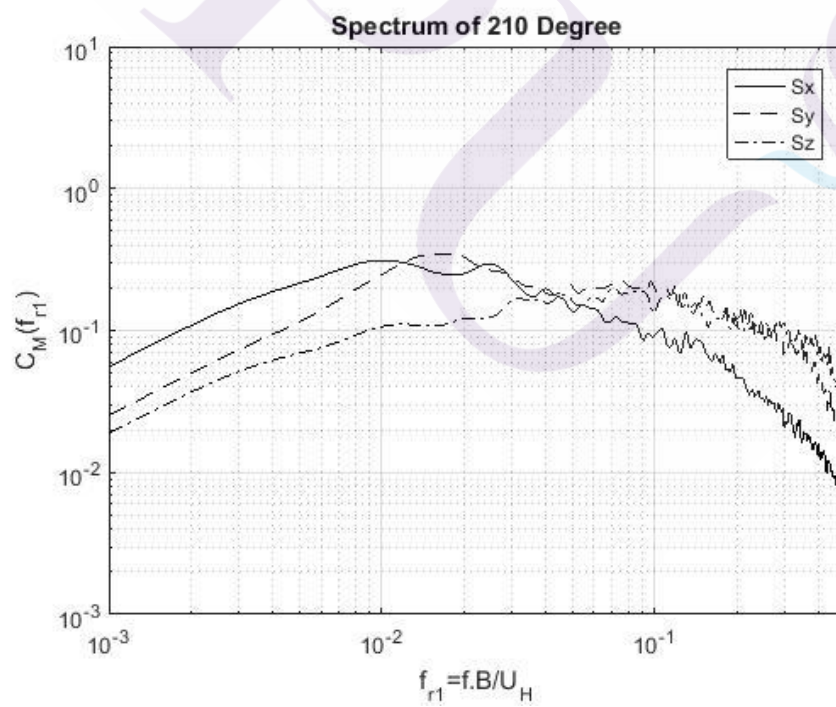
ภาพที่ ก.19 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 180°



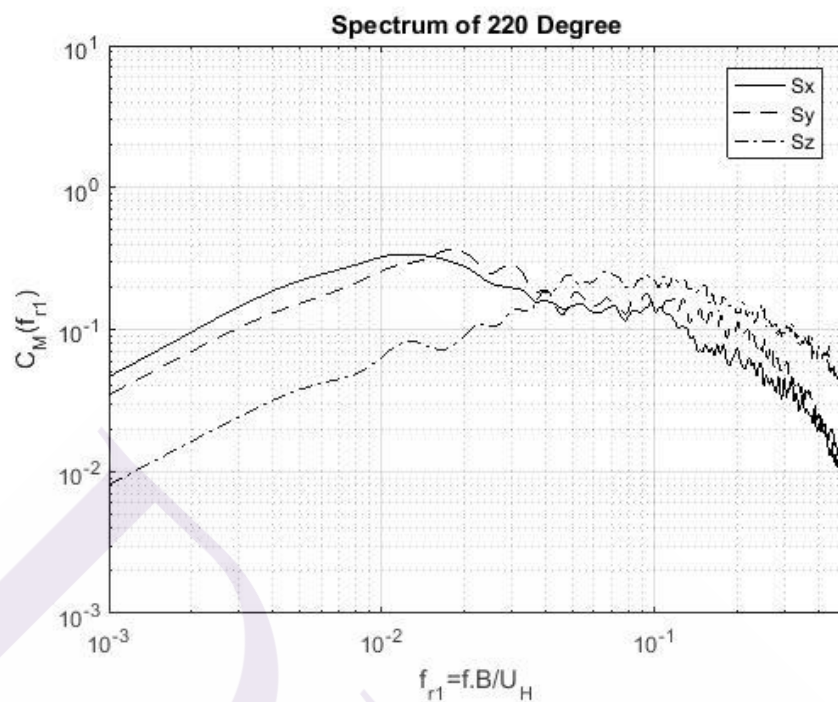
ภาพที่ ก.20 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 190°



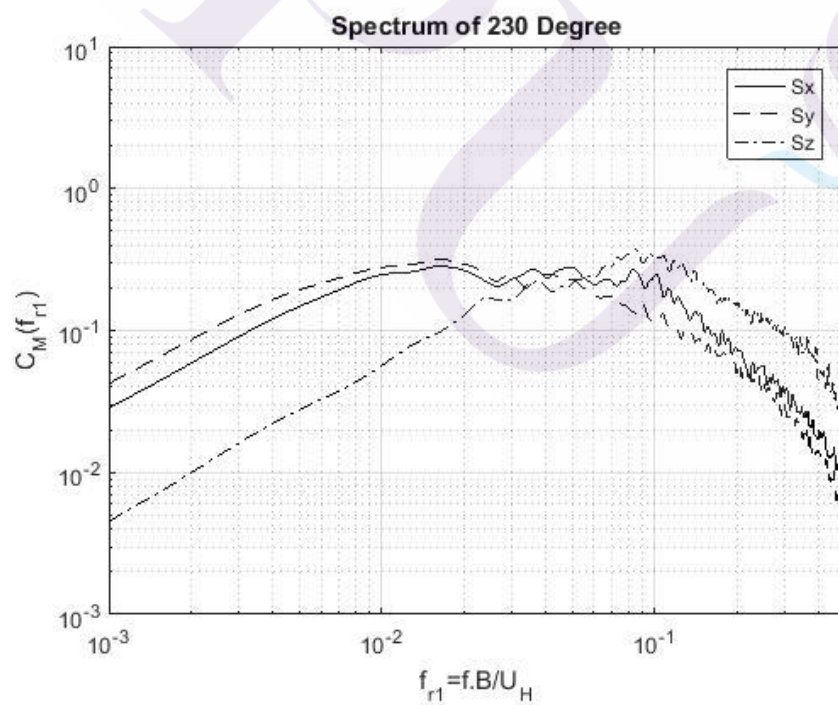
ภาพที่ ก.21 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 200°



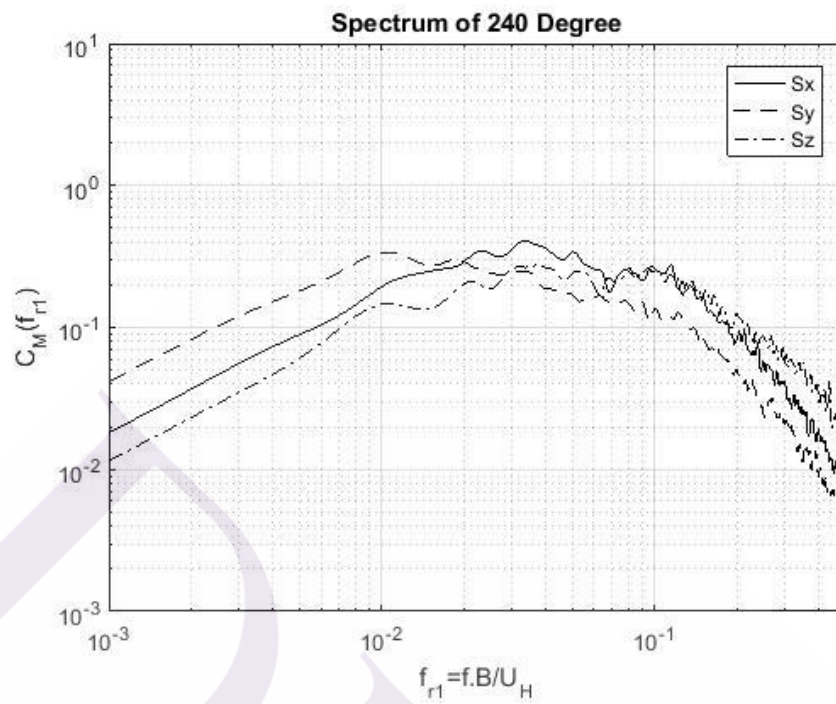
ภาพที่ ก.22 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 210°



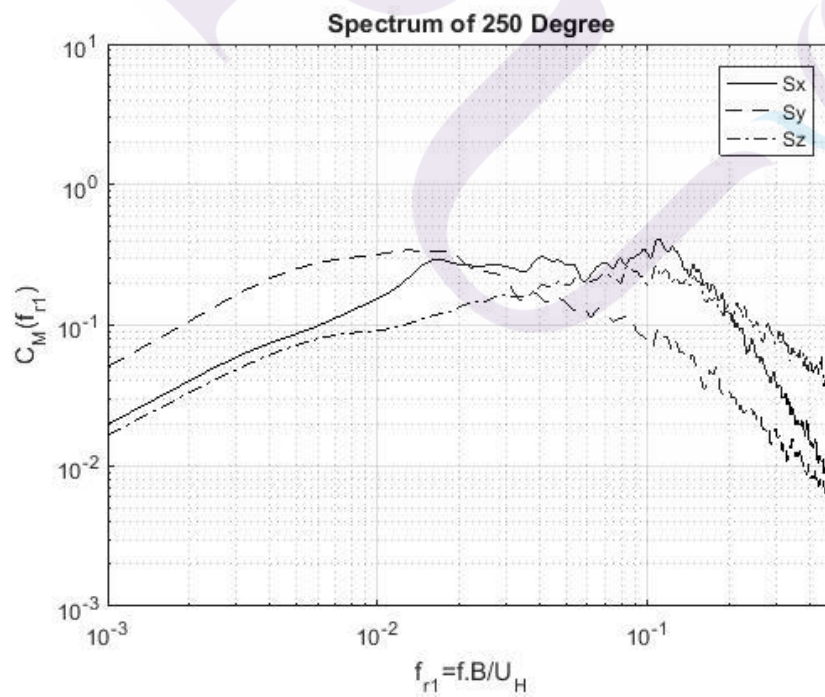
ภาพที่ ก.23 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 220°



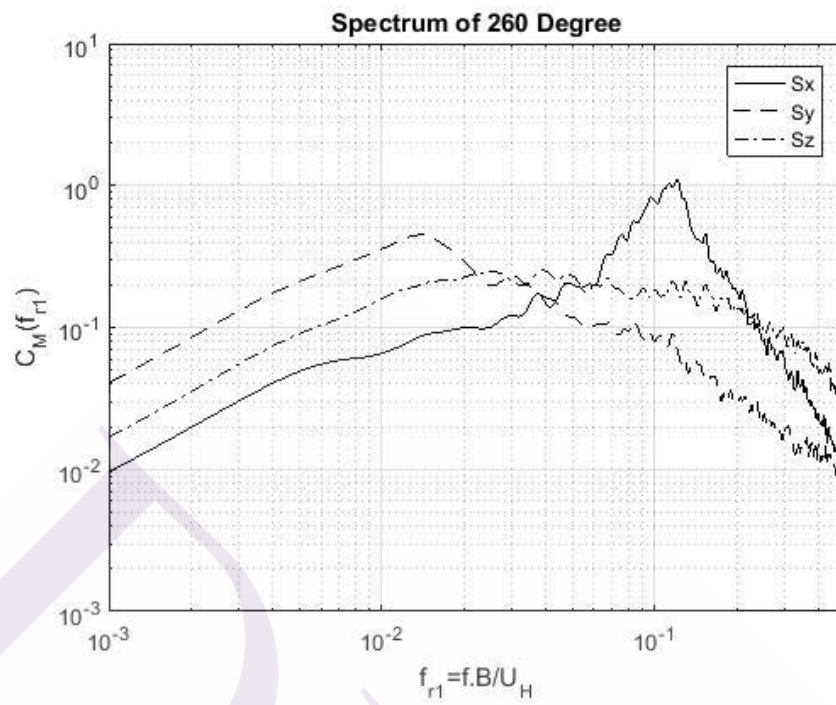
ภาพที่ ก.24 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 230°



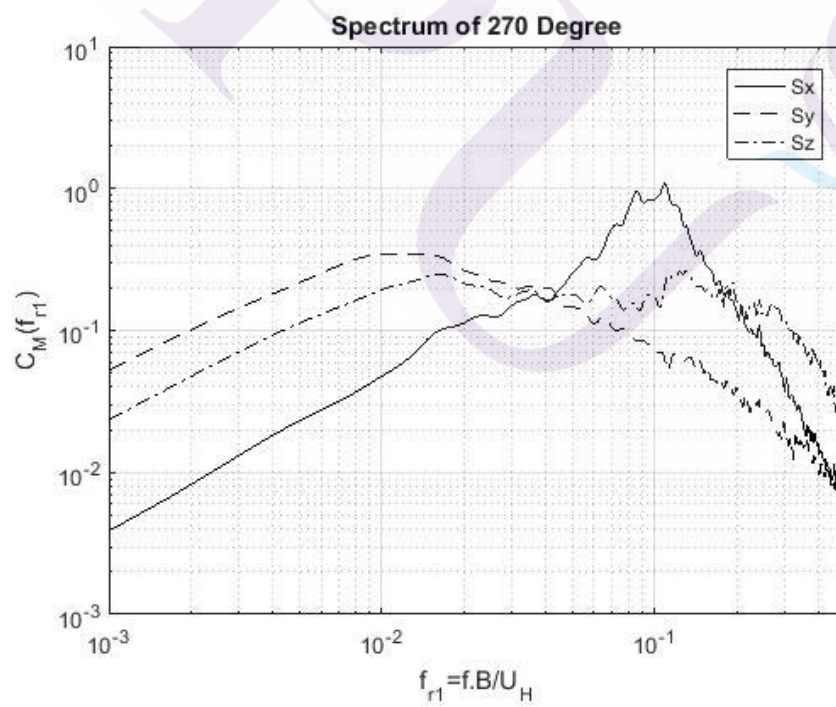
ภาพที่ ก.25 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 240°



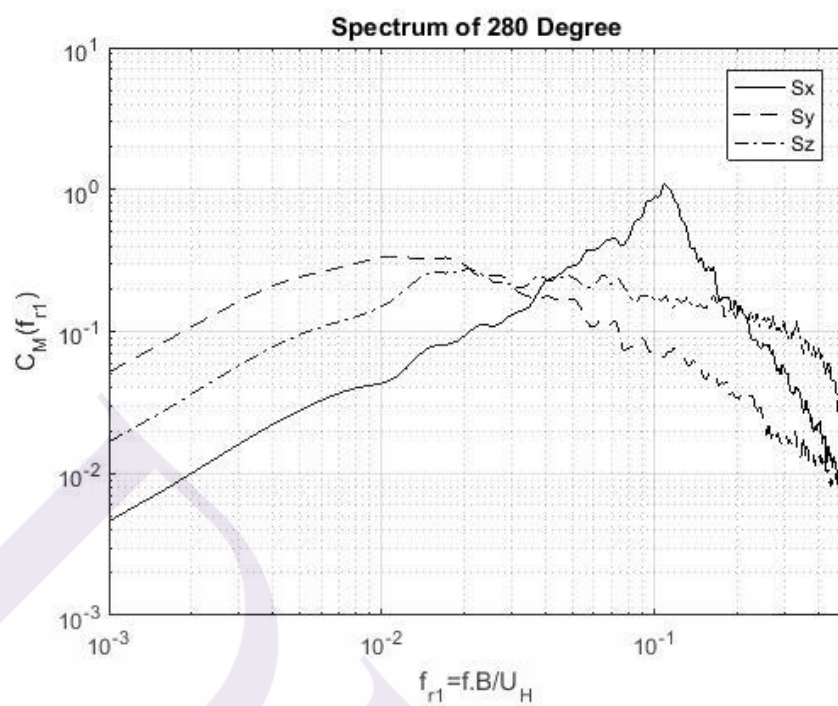
ภาพที่ ก.26 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 250°



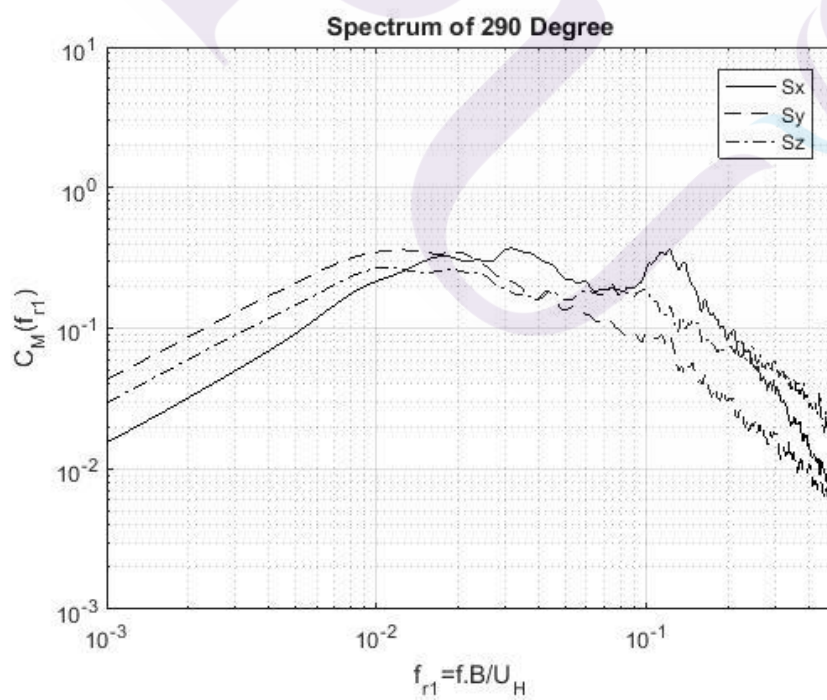
ภาพที่ ก.27 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 260°



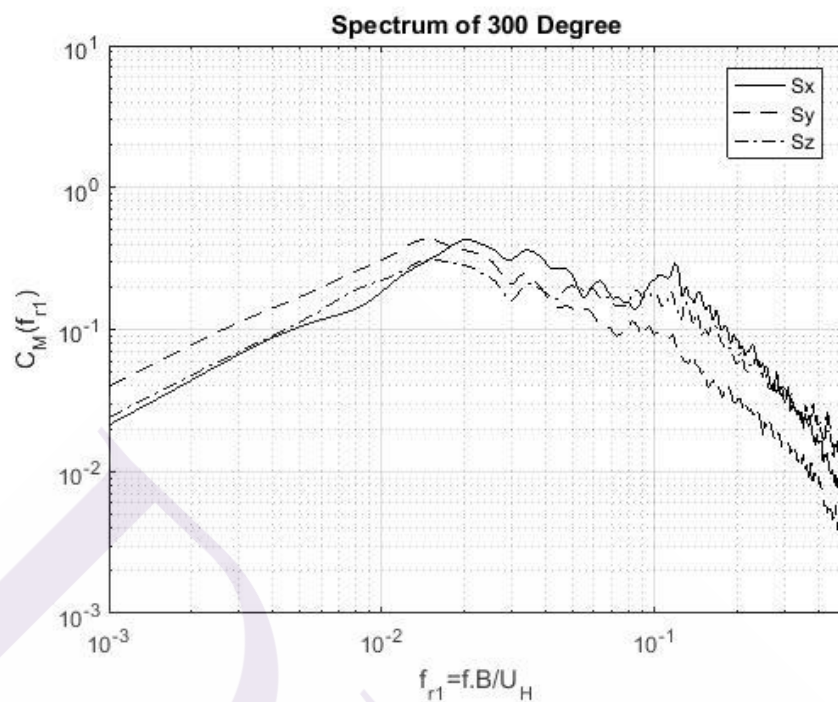
ภาพที่ ก.28 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 270°



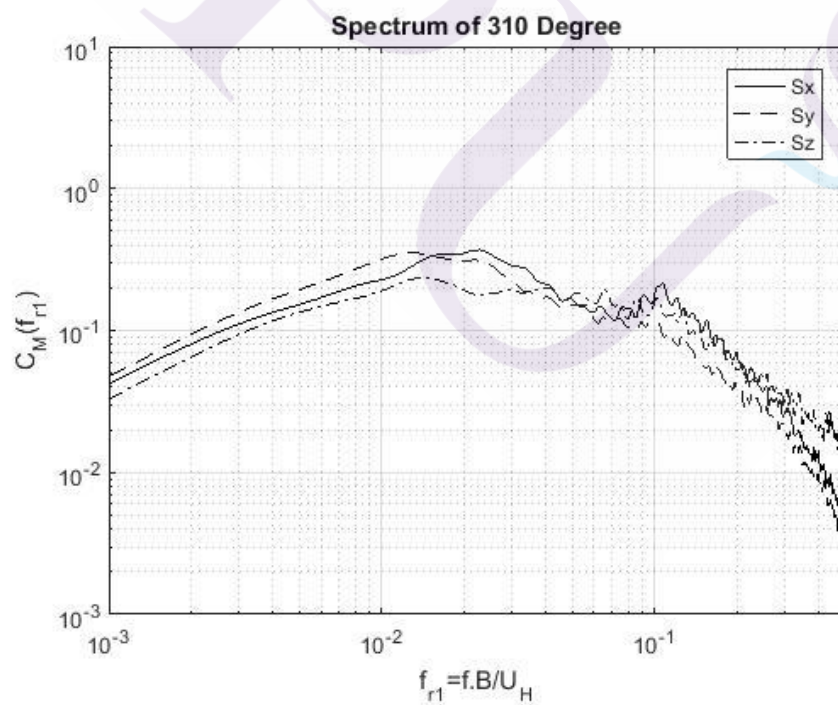
ภาพที่ ก.29 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 280°



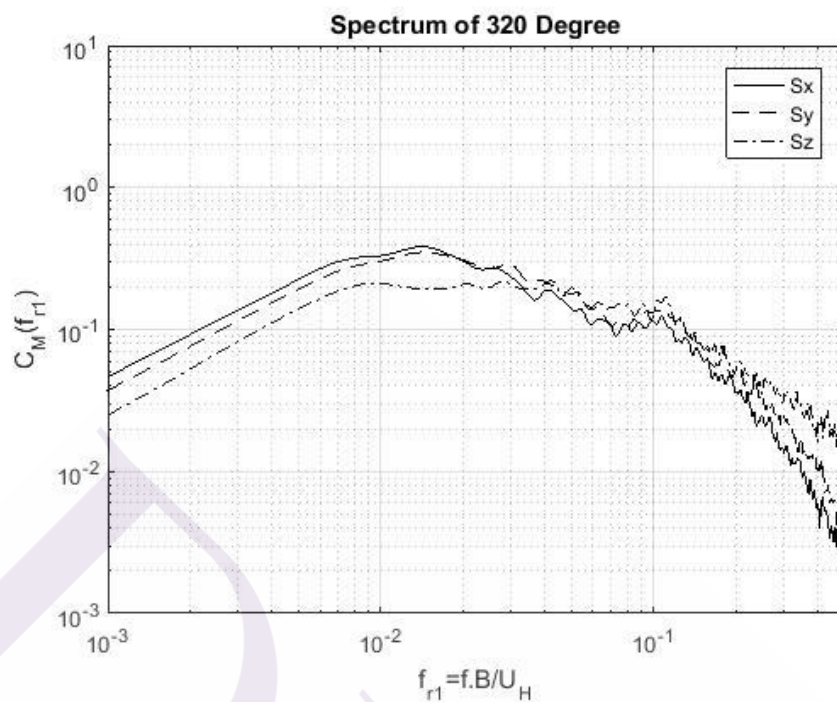
ภาพที่ ก.30 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 290°



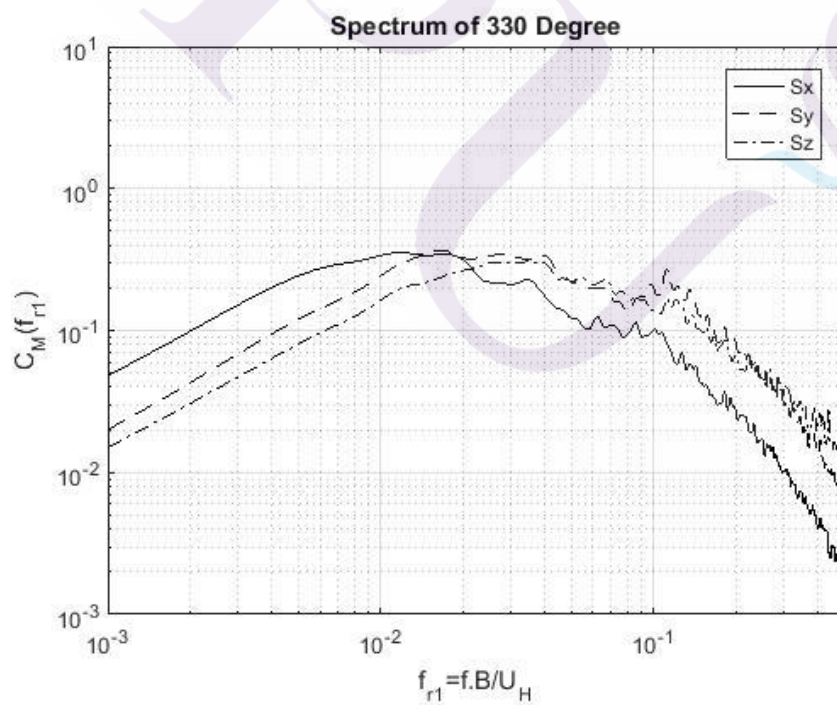
ภาพที่ ก.31 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 300°



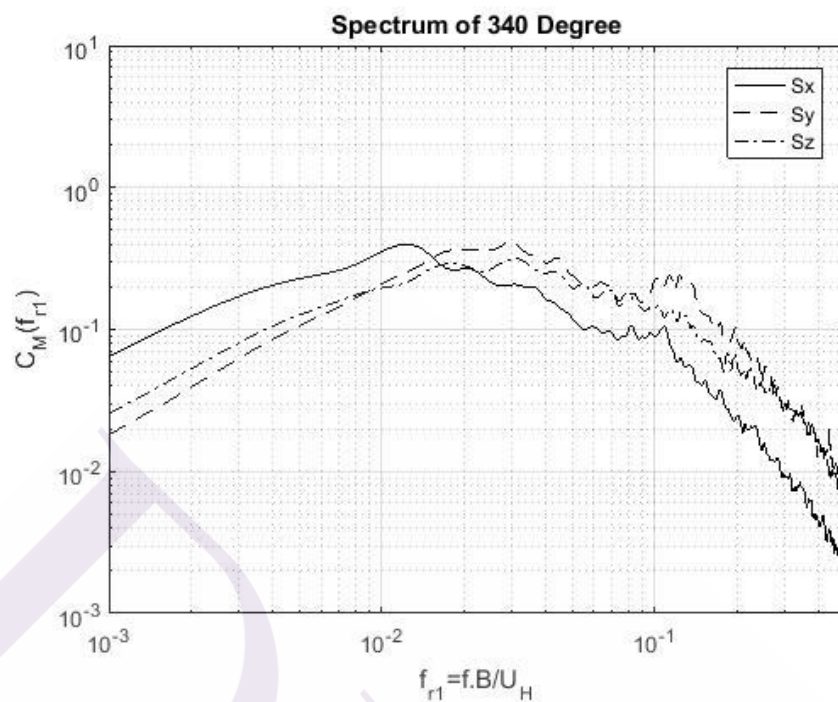
ภาพที่ ก.32 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 310°



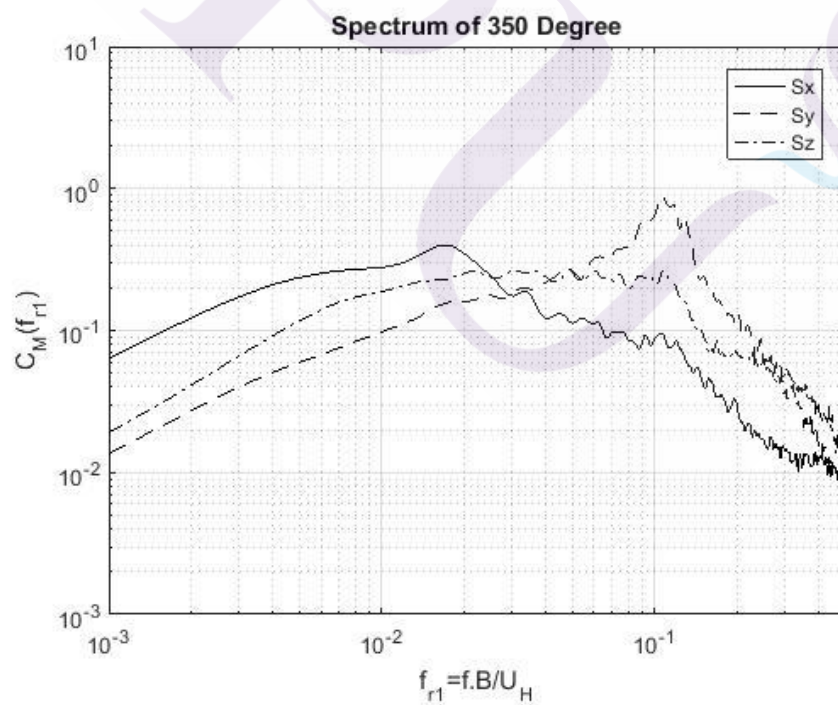
ภาพที่ ก.33 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 320°



ภาพที่ ก.34 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 330°



ภาพที่ ก.35 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 340°



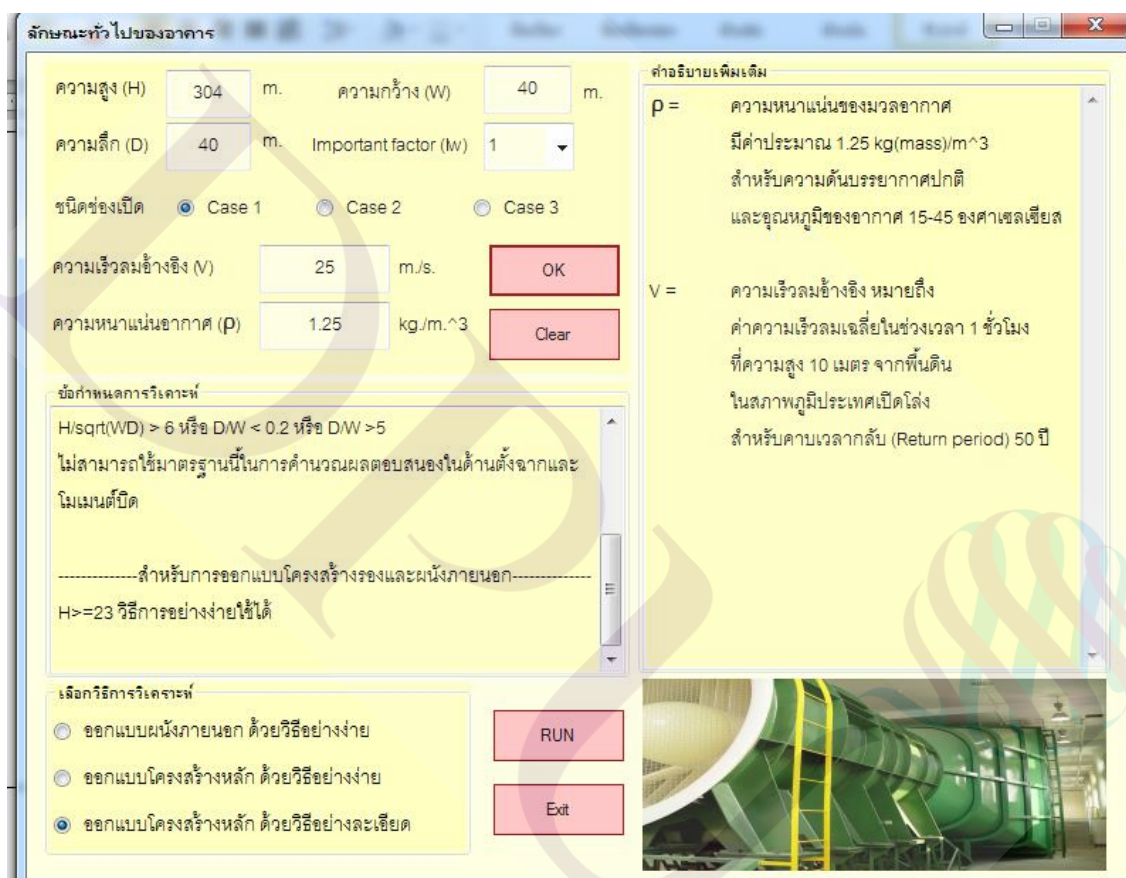
ภาพที่ ก.36 สเปกตรัมเมื่อทิศทางลมกระทำที่ 350°

ภาคผนวก ข

**การคำนวณแรงลมและผลตอบสนองของอาคารตามมาตรฐาน
มยพ. 1311-50 โดยใช้โปรแกรมหางนกยูง 2.1**

ข.1 การนำเข้าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณโดยโปรแกรมหางนกยูง 2.1 (Hang Nok Yoong 2.1)

โปรแกรมหางนกยูง (Hang Nok Yoong 2.1) พัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ช่วยในการคำนวณ การคำนวณแรงลมใช้ความเร็วลมที่คาบกลับ 50 ปี ส่วนการคำนวณการสั่นไหวใช้ความเร็วลมที่คาบกลับ 10 ปี พารามิเตอร์ต่าง ๆ ใช้ตามหัวข้อ 3.5 การนำเข้าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแสดงตามภาพที่ ข.1



ภาพที่ ข.1 ภาพแสดงการนำเข้าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

วิธีขยงละเอียด สำหรับจกแบบโครงสร้างหลัก

สภาพภูมิประเทศ

- สภาพภูมิประเทศแบบ A (ภูมิประเทศเปิดโล่ง)
- สภาพภูมิประเทศแบบ B (ภูมิประเทศแบบชานเมือง)
- สภาพภูมิประเทศแบบ C (ภูมิประเทศแบบกลางเมืองใหญ่)

คุณสมบัติของอาคาร

ความหนาแน่นเฉลี่ยของอาคาร kg(mass)/m³

อัตราส่วนความห่องในทิศทางลม

อัตราส่วนความห่องในทิศทางตั้งฉาก

อัตราส่วนความห่องในทิศทางบิต

ประมาณความถี่ธรรมชาติ (Hz)

	ทิศทางลม	ตั้งฉาก	ทิศทางบิต
<input type="radio"/> กำหนดค่าเอง	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input checked="" type="radio"/> มาตรฐานประเทศไทย 2550	0.145	0.145	0.181

ความสูงที่ใช้ในการคำนวณ

H = 304 m.

Step m

Specific m

ค่าอธิบายเพิ่มเติม

ใส่ค่า ช่วงระยะความสูงของอาคารที่จะคำนวณแรงลม แล้วกดปุ่ม Add step

304
300.2
296.400024
292.800037
288.800049
285.000061
281.200073
277.4001

ภาพที่ ข.1 ภาพแสดงการนำเข้าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ (ต่อ)

ข.2 ผลการคำนวณโดยโปรแกรมหางนกยูง 2.1 (Hang Nok Yoong 2.1)

ผลการคำนวณโดยโปรแกรมหางนกยูง สามารถบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์สกุล .xls และสามารถทำการคัดลอกผลลัพธ์ดังกล่าวลงในโปรแกรม Microsoft Word ได้ ผลการคำนวณที่ได้ แบ่งออกเป็นแรงลมและผลตอบสนองในทิศทางลม แรงลมและผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และ โมเมนต์บิตและผลตอบสนอง ผลการคำนวณด้านแรงลมได้แสดงไว้ตามตาราง โดยที่ ตาราง ข.1 แสดงแรงลมในทิศทางลมบริเวณด้านหน้าลม ซึ่งสามารถรวมเป็นแรงลมสุทธิได้โดยการนำแรงลมด้านท้ายลมเข้ามารวม ตาราง ข.2 แสดงแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และตาราง ข.3 แสดงโมเมนต์บิต นอกจากการคำนวณด้านแรงลมแล้ว โปรแกรมยังสามารถคำนวณอัตราเร่งสูงสุดได้ด้วย โดยได้แสดงผลลัพธ์ที่ได้ไว้ตามรายละเอียดที่ปรากฏในแต่ละหัวข้อ

ข.2.1 ผลการคำนวณแรงลมและผลตอบสนองในทิศทางลม

ข้อมูลการออกแบบ

H =	304 m.
W =	40 m.
D =	40 m.
I _w =	1
ลักษณะช่องเปิด	1
ความเร็วลม	25 m/s
ความหนาแน่นอากาศ	1.25 kg(mass)/m ³
ลักษณะภูมิประเทศ	C

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง

q =	39.82 kgf/m ²
ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลอาคาร	300 kg(mass)/m ³

สัมประสิทธิ์ความดันภายใน

C _{pi} สำหรับแรงดัน	0
C _{pi} สำหรับแรงดูด	-0.15

สัมประสิทธิ์ความดันภายนอก

C _p ด้านหน้าลม	0.8
C _p บริเวณด้านท้ายลม	-0.5
C _p บริเวณหลังคา	-1

หน่วยแรงลมภายในเมื่อ C_{pi} = -0.15 คือ -15.37 kgf/m²

หน่วยแรงลมภายในเมื่อ $C_{pi} = 0.00$ คือ	0	kgf/m^2	
ค่านวณ C_g			
$C_{gi} =$	2		
ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 50 ปี	25	m/s	
ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 10 ปี	20.25	m/s	
ความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน ของอาคาร ในทิศทางลม, nD	0.145	Hz	
อัตราส่วนความหน่วง ในทิศทางลม, bD	0.015	Hz	
ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ: K	0.14		
	$I_w = 0.75$	$I_w = 1$	
	$V = V_{50}$	$V = V_{10}$	
Wind velocity at top building: V_H	36.39	29.48	
Reduced frequency of structure	1.2112	1.4953	
Size reduction factor: S	0.0955	0.0708	
Wave number per meter: nD/v_H	0.004	0.0049	
Gust energy ratio at the nD : F	0.3298	0.292	
Background turbulence factor: B	0.4507	0.4507	
Average fluctuation rate: v (Hz)	0.1316	0.1259	
Statistical peak factor: g_p	3.6745	3.6625	
Σ/μ	0.4104	0.3475	
Gust effect factor, C_g	2.51	2.27	
รวมผลแรงลมกระทำภายนอกอาคาร ในทิศทางลม			
Total baseshear	1994.4	Tonf	
Overtuning alongwind	349034.6	Tonf.m	
ผลตอบสนองของอาคาร ในทิศทางลม			
	$I_w = 0.75$	$I_w = 1$	
	$V = V_{50}$	$V = V_{10}$	
การแอ่นตัวที่ยอดอาคาร	0.224	0.1776	m
ความเร่งที่ยอดอาคาร ; a_W	0.1015	0.0717	m/s^2

ผลการคำนวณหน่วยแรงลม

บริเวณ	Ce	P ext kgf/m ²
บริเวณหลังคา		
บริเวณกลางหลังคา	2.119	-211.66
บริเวณด้านท้ายลม		
ทุกความสูง	1.287	-64.25

ตารางที่ ข.1 แรงลมในทิศทางลมบริเวณด้านหน้าลม

ระยะ z จากพื้น (m)	Ce	P ext (kgf/m ²)
304	2.119	169.33
300.2	2.1	167.8
296.4	2.081	166.27
292.6	2.062	164.73
288.8	2.043	163.19
285	2.023	161.64
281.2	2.004	160.09
277.4	1.984	158.53
273.6	1.965	156.96
269.8	1.945	155.39
266	1.925	153.81
262.2	1.905	152.22
258.4	1.885	150.63
254.6	1.865	149.03
250.8	1.845	147.43
247	1.825	145.82
243.2	1.805	144.2
239.4	1.784	142.57
235.6	1.764	140.94
231.8	1.743	139.3
228	1.723	137.65
224.2	1.702	135.99
220.4	1.681	134.33
216.6	1.66	132.66

ตารางที่ ข.1 แรงลมในทิศทางลมบริเวณด้านหน้าลม (ต่อ)

ระยะ z จากพื้น (m)	Ce	P ext (kgf/m ²)
212.8	1.639	130.98
209	1.618	129.29
205.2	1.597	127.59
201.4	1.576	125.89
197.6	1.554	124.17
193.8	1.533	122.45
190	1.511	120.72
186.2	1.489	118.97
182.4	1.467	117.22
178.6	1.445	115.46
174.8	1.423	113.68
171	1.401	111.9
167.2	1.378	110.1
163.4	1.355	108.29
159.6	1.333	106.47
155.8	1.31	104.64
152	1.287	102.8
148.2	1.263	100.94
144.4	1.24	99.07
140.6	1.216	97.19
136.8	1.193	95.29
133	1.169	93.38
129.2	1.145	91.45
125.4	1.12	89.5

ตารางที่ ข.1 แรงลมในทิศทางลมบริเวณด้านหน้าลม (ต่อ)

ระยะ z จากพื้น (m)	Ce	P ext (kgf/m ²)
121.6	1.096	87.54
117.8	1.071	85.56
114	1.046	83.57
110.2	1.021	81.55
106.4	0.995	79.52
102.6	0.97	77.46
98.8	0.944	75.39
95	0.917	73.29
91.2	0.891	71.16
87.4	0.864	69.02
83.6	0.837	66.84
79.8	0.809	64.64
76	0.781	62.41
72.2	0.753	60.15
68.4	0.724	57.85
64.6	0.695	55.52
60.8	0.665	53.15
57	0.635	50.73
53.2	0.604	48.27
49.4	0.573	45.77
45.6	0.541	43.2
41.8	0.508	40.58
38	0.474	37.89
34.2	0.44	35.12

ตารางที่ ข.1 แรงลมในทิศทางลมบริเวณด้านหน้าลม (ต่อ)

ระยะ z จากพื้น (m)	Ce	P ext (kgf/m ²)
30.4	0.404	32.27
26.6	0.4	31.96
22.8	0.4	31.96
19	0.4	31.96
15.2	0.4	31.96
11.4	0.4	31.96
7.6	0.4	31.96
0	0.4	31.96

ข.2.2 ผลการคำนวณแรงลมและผลตอบสนองในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

ผลการคำนวณในทิศทางตั้งฉากและโมเมนต์บิด นอกขอบข่ายมาตรฐาน

ผลการคำนวณในทิศทางตั้งฉากและโมเมนต์บิด

แรง และ ผลการตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม

$$vH/(nW*(W*D)^{0.5}) = 6.27 \quad \text{อัตราส่วนมีค่า } \leq 10$$

ผลการคำนวณค่าที่เกี่ยวข้อง

ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 50 ปี 25 m/s

ความเร็วลมที่คาบเวลากลับ 10 ปี 20.25 m/s

ความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ; 0.145 Hz

nW

อัตราส่วนความหน่วงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ; bW 0.015

$I_w = 0.75$

$I_w = 1$

$V = V_{50}$

$V = V_{10}$

หน่วยแรงลมอ้างอิง q_H ที่ระดับความสูงยอดอาคาร 84.39 55.37 kgf/m^2

RMS ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ; CL' 0.157 0.157

Statistical Peak factor ; g_L 3.701 3.701

ค่าสเปกตรัมของแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม ; FL 0.2011 0.1077

ค่าตอบสนองแบบก้ำกอน ; RL 10.534 5.64

ความเร่งในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ที่ระดับยอดอาคาร ; 0.293 0.188 m/s^2

aW

ตารางที่ ข.2 แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม

ระยะความสูงจากพื้นดิน	P (kgf/m ²)
304	500.215
300.2	493.962
296.4	487.709
292.6	481.457
288.8	475.204
285	468.951
281.2	462.699
277.4	456.446
273.6	450.193
269.8	443.941
266	437.688
262.2	431.435
258.4	425.183
254.6	418.93
250.8	412.677
247	406.425
243.2	400.172
239.4	393.919
235.6	387.667
231.8	381.414
228	375.161
224.2	368.908
220.4	362.656
216.6	356.403

ตารางที่ ข.2 แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (ต่อ)

ระยะความสูงจากพื้นดิน	P (kgf/m ²)
212.8	350.15
209	343.898
205.2	337.645
201.4	331.392
197.6	325.14
193.8	318.887
190	312.634
186.2	306.382
182.4	300.129
178.6	293.876
174.8	287.624
171	281.371
167.2	275.118
163.4	268.865
159.6	262.613
155.8	256.36
152	250.107
148.2	243.855
144.4	237.602
140.6	231.349
136.8	225.097
133	218.844
129.2	212.591
125.4	206.339

ตารางที่ ข.2 แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (ต่อ)

ระยะความสูงจากพื้นดิน	P (kgf/m ²)
121.6	200.086
117.8	193.833
114	187.581
110.2	181.328
106.4	175.075
102.6	168.822
98.8	162.57
95	156.317
91.2	150.064
87.4	143.812
83.6	137.559
79.8	131.306
76	125.054
72.2	118.801
68.4	112.548
64.6	106.296
60.8	100.043
57	93.79
53.2	87.538
49.4	81.285
45.6	75.032
41.8	68.78
38	62.527
34.2	56.274

ตารางที่ ข.2 แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม (ต่อ)

ระยะความสูงจากพื้นดิน	P (kgf/m ²)
30.4	50.021
26.6	43.769
22.8	37.516
19	31.263
15.2	25.011
11.4	18.758
7.6	12.505
0	0

ข.2.3 ผลการคำนวณ โมเมนต์บิดและผลตอบสนอง

โมเมนต์บิดสถิตย์เทียบเท่า

$$vH/(nT*(W*D)^{0.5}) =$$

5.03 : อัตราส่วน
มีค่า ≤ 10

ผลการคำนวณค่าที่เกี่ยวข้อง

ความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน ในแนวนอน ; nT

0.181 Hz

อัตราส่วนความหน่วงในแนวนอน ; bT

0.015

RMS ในแนวนอน ; Ct

0.05

Statistical Peak factor ; gT

3.76

ค่าสเปกตรัมของแรงลมในแนวนอน ; FT

0.1267

ค่าตอบสนองแบบก้ำทอน ; RT

6.639



ตารางที่ ข.3 โมเมนต์บิด

ระยะความสูงจากพื้นดิน	MT (kgf.m) ต่อ ความสูง 1 เมตร
304	126845.32
300.2	125259.77
296.4	123674.2
292.6	122088.64
288.8	120503.07
285	118917.52
281.2	117331.96
277.4	115746.39
273.6	114160.83
269.8	112575.27
266	110989.71
262.2	109404.15
258.4	107818.58
254.6	106233.02
250.8	104647.45
247	103061.88
243.2	101476.31
239.4	99890.75
235.6	98305.18
231.8	96719.61
228	95134.04
224.2	93548.47
220.4	91962.91
216.6	90377.34

ตารางที่ ข.3 โมเมนต์บิด (ต่อ)

ระยะความสูงจากพื้นดิน	MT (kgf.m) ต่อ ความสูง 1 เมตร
212.8	88791.77
209	87206.2
205.2	85620.63
201.4	84035.07
197.6	82449.5
193.8	80863.94
190	79278.37
186.2	77692.8
182.4	76107.23
178.6	74521.66
174.8	72936.1
171	71350.53
167.2	69764.96
163.4	68179.39
159.6	66593.82
155.8	65008.26
152	63422.69
148.2	61837.12
144.4	60251.55
140.6	58665.99
136.8	57080.42
133	55494.85
129.2	53909.28
125.4	52323.71

ตารางที่ ข.3 โมเมนต์บิด (ต่อ)

ระยะความสูงจากพื้นดิน	MT (kgf.m) ต่อ ความสูง 1 เมตร
121.6	50738.15
117.8	49152.58
114	47567.01
110.2	45981.44
106.4	44395.87
102.6	42810.31
98.8	41224.74
95	39639.17
91.2	38053.6
87.4	36468.03
83.6	34882.47
79.8	33296.9
76	31711.33
72.2	30125.76
68.4	28540.2
64.6	26954.63
60.8	25369.06
57	23783.49
53.2	22197.93
49.4	20612.36
45.6	19026.8
41.8	17441.23
38	15855.66
34.2	14270.1

ตารางที่ ข.3 โมเมนต์บิด (ต่อ)

ระยะความสูงจากพื้นดิน	MT (kgf.m) ต่อ ความสูง 1 เมตร
30.4	12684.53
26.6	11098.97
22.8	9513.4
19	7927.83
15.2	6342.27
11.4	4756.7
7.6	3171.13
0	0

ชื่อ-นามสกุล ประวัติการศึกษา	ประวัติผู้เขียน อรรถกร เกียรติฤกษ์ พ.ศ. 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน พ.ศ. 2550 บริหารธุรกิจบัณฑิต (การจัดการงานก่อสร้าง) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช พ.ศ. 2553 รัฐประศาสนศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน	หัวหน้าส่วนออกแบบงานโยธา กองออกแบบงานโยธา ฝ่ายออกแบบระบบผลิต ส่งน้ำและงานโยธา การประปานครหลวง
ผลงานทางวิชาการ	อรรถกร เกียรติฤกษ์ และ อำนาจ ผดุงศิลป์ (2560) การศึกษาแรงลมของอาคารสูงในบริเวณศูนย์กลางของ กรุงเทพมหานครด้วยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ ลม การประชุมวิชาการและการนำเสนอผลงานวิจัย บัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 45 จัดโดยมหาวิทยาลัย ราชภัฏนครราชสีมา อรรถกร เกียรติฤกษ์ และ อำนาจ ผดุงศิลป์ (2561) การศึกษาการสั่นไหวของอาคารสูงเนื่องจากแรงลมใน บริเวณศูนย์กลางของกรุงเทพมหานครด้วยการทดสอบ แบบจำลองในอุโมงค์ลม การประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2561 (ครั้งที่ 3) ด้านสารสนเทศ การเกษตร การ จัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี จัดโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์