

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการสร้างแบบจำลองของสะพานเพื่อใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม

A STUDY OF SCALE MODEL OF BRIDGES FOR WIND TUNNEL



โดย

นายทัศนัย ไชยชนะ  
นายวุฒิชัย จันทร์อินทร์  
นายอัศวรัตน์ อรรถ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 58568

วัน,เดือน,ปี..... 25 ส.ค. 2549

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ถ้ามีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF SCALE MODEL OF BRIDGES FOR WIND TUNNEL**

MR.THATSANAI CHAICHANA

MR.WUTTICHAJ CHAN-IN

MR.AKKAWAT ORACHORN



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการสร้างแบบจำลองของสะพานเพื่อใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม  
นักศึกษา นายทัศนัย ไชยชนะ รหัสประจำตัว 43010635  
นายวุฒิชัย จันทร์อินทร์ รหัสประจำตัว 43010771  
นายอัศวินทร์ อรชร รหัสประจำตัว 43010839  
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายเซ็น
1. รศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ		
2. ผศ.ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง		
3. อ.สมชาย สำลีรางค์กุล		
4. อ.ทรงกลด แซ่เอ็ง		

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

( ผศ.สุพจน์ ศรีนิล )

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ เดือน พ.ศ. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการสร้างแบบจำลองของสะพานเพื่อใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม	
	A STUDY OF SCALE MODEL OF BRIDGES FOR WIND TUNNEL	
นักศึกษา	นายทัศนัย	ไชยชนะ
	นายวุฒิชัย	จันทร์อินทร์
	นายอัศวิน	อรชร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ศิริวัฒน์	ไชยชนะ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์	
ปีการศึกษา	2546	

## บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองย่อส่วนของสะพานที่มีช่วงยาว 100 เมตร เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบในอุโมงค์ลม อีกทั้งได้มีการรวบรวมข้อมูลลมพายุที่เคยเกิดขึ้นในรอบ 15 ปี และใช้คาบการกลับ 50 ปีมาคำนวณแรงลม โดยใช้มาตรฐาน Uniform Building Code (UBC) เนื่องจากหน่วยแรงลมที่กำหนดให้ทางพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังไม่เหมาะสมหลายประการเพราะคำนึงถึงความสูงของอาคารแต่เพียงอย่างเดียวจึงไม่เหมาะสมสำหรับอาคารบางแบบและพื้นที่บางแห่งในประเทศไทย

ในส่วนของการสร้างแบบจำลองนั้นได้อาศัยทฤษฎีของ Cauchy number และ Froude number เป็นหลัก มาใช้ในการกำหนดอัตราส่วนที่ใช้ย่อทั้งขนาดรูปร่างและคุณสมบัติของสะพาน โครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title : A STUDY OF SCALE MODEL OF BRIDGES FOR WIND TUNNEL TESTING

Name : MR.THATSANAI CHAICHANA  
MR.WUTTICHAJ CHAN-IN  
MR.AKKAWAT ORACHORN

Field : CIVIL ENGINEERING

Faculty : ENGINEERING

Advisor : ASSOC.PROF.SIRIWAT CHAICHANA

## ABSTRACT

This project was to present the constructive method of scale model of 100-metre-length bridges for wind tunnel testing, collect data of hurricane which has occurred for 15 last years, and apply 50-year-return period to calculate the wind load with Uniform Building Code (UBC). As the wind load specified in B.E. 2522 Decree of building construction, considered only the height of buildings which is inappropriate for some buildings and areas in Thailand now.

The theories of Cauchy number and Froude number were used as principle of ratio setting to scale the size of shape and property of the bridge, the project of short cut way to the south of Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ไม่มีคำกล่าวใดที่สามารถใช้บ่งบอกถึงความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ ไชยชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ได้ ตลอดระยะเวลาของงานศึกษานี้ ท่านได้ให้ คำแนะนำและการสั่งสอนที่มีค่ามากมายนอกเหนือจากขอบข่ายทางวิศวกรรม ท่านได้เน้นให้ ประพฤติ ตน โดยอุทิศให้กับงานและการปรับปรุงเกี่ยวกับภาษาและการนำเสนองาน ซึ่งถือเป็นสิ่งอันมีค่าที่ผู้ ประพันธ์ได้จากการศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นอกเหนือจาก ปริญญาอันสูงส่ง ขอกล่าวคำขอบคุณอย่างซาบซึ้งและนับถือแด่ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ ไชยชนะ

ถือเป็นเกียรติอันสูงส่งแก่ผู้ประพันธ์ที่ได้รับจากคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่าน ด้วยคำแนะนำและข้อคิดเห็นที่ กระจ่างชัดของท่านถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับความสำเร็จในงานนี้ ผู้ประพันธ์ได้เรียนรู้สิ่งต่าง ๆ มากมายจากท่าน ขอกล่าวคำขอบคุณอย่างยิ่ง สำหรับความเข้าใจ ข้อคิดเห็น และคำชี้แนะที่ท่านมอบให้ สำหรับโครงการนี้ในฐานะกรรมการสอบ โครงการพิเศษ

ขอขอบคุณอย่างซาบซึ้ง สำหรับความร่วมมือ และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งที่ผู้ ประพันธ์ได้รับจากท่านผู้ซึ่งช่วยให้โครงการพิเศษนี้ได้สำเร็จดุล่วงโดยสมบูรณ์ ซึ่งท่านเหล่านั้นได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สกล ห่อวโนทยาน ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาเรื่องของทฤษฎี การสร้างแบบจำลองย่อส่วน ขอขอบคุณ บริษัท KINETIC ที่ได้ให้คำปรึกษาเรื่องอุโมงค์ลม ขอขอบคุณท่านเหล่านี้อย่างยิ่ง ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมชั้นเรียนที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจแก่ผู้ ประพันธ์อย่างดีเสมอมา

ท้ายที่สุดแต่ไม่ใช่น้อยที่สุดสำหรับคำขอบคุณอันพิเศษสุดที่มอบให้แก่สมาชิกครอบครัวทุกคนที่มอบความรัก ความห่วงใยและให้การช่วยเหลืออย่างต่อเนื่องตลอดการศึกษาของผู้ ประพันธ์และขอบคุณห้องสมุด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สำหรับหนังสือและแหล่งข้อมูลอันทรงค่า สำหรับงานศึกษานี้

นายทัศนัย ไชยชนะ

นายวุฒิชัย จันทรอินทร์

นายอัศวินทร์ อรรถ

ผู้ประพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอวมติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ฎ
	สารบัญรูป	ฏ
	คำอธิบายสัญลักษณ์	ฑ
1	บทนำ	
	1.1. ความนำ	1
	1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
	1.3. ขอบเขตของโครงการ	2
2	รายละเอียดโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้	
	2.1. ข้อมูลสะพานในโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้	3
	2.1.1. ลักษณะของโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้	3
	2.1.2. การศึกษาการออกแบบโครงสร้างสะพานในทะเล	4
	2.1.2.1. แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างสะพานในทะเล	4
	2.1.2.2. รูปแบบของโครงสร้างสะพานในทะเล	7
	2.2. ข้อมูลลมบริเวณที่ตั้งโครงการ	11
	2.2.1. การวิเคราะห์ข้อมูลลม	13
	2.2.2. สภาพลมที่เกิดขึ้นในประเทศไทย	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่ เรื่อง	หน้า
2.2.2.1. ลมมรสุม	14
2.2.2.2. ลมพายุ	15
2.2.3. ลักษณะทั่วไปของพายุหมุนเขตร้อน	16
<b>3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์</b>	
3.1. ทฤษฎีทางด้านอากาศพลศาสตร์	27
3.2. สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)	27
3.3. กฎยกกำลัง (POWER LAW)	28
3.4. คาบการกลับ(Return Period)	31
3.5. การศึกษาแบบจำลอง	31
3.5.1. ข้อกำหนดทางด้านความคล้ายคลึงกัน (Similarity Requirements)	31
3.5.2. กฎความคล้ายทางชลศาสตร์ (Principle of Hydraulic Similitude)	33
3.5.2.1. ความคล้ายเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity)	33
3.5.2.2. ความคล้ายเชิงจลน์ (Kinematic similarity)	34
3.5.2.3. ความคล้ายเชิงพลวัต (Dynamic similarity)	35
3.5.3. แบบจำลองย่อส่วนที่ใช้ในอุโมงค์ลม	36
3.5.4. แบบจำลอง โครงสร้างที่นำมาใช้วิเคราะห์ การเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงลม	38
3.5.5. ปραกฏการณ์ที่มีแรงโน้มถ่วงเป็นค่านัยสำคัญ	42
3.5.6. ทฤษฎีการย่อส่วน	43
3.6. การจำลองสภาพลมบริเวณที่ตั้งโครงการ	46
3.6.1. ความเร็วลมสูงสุด (Extreme Maximum wind , Knots)	47
3.6.2. พายุที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทย	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
4	การศึกษาผลกระทบของแรงลมต่อสะพาน	
4.1.	อาคารกับแรงลม	50
4.1.1.	แรงลม	50
4.1.2.	ผลกระทบแรงลมต่ออาคาร	51
4.1.2.1.	แรงในแนวราบของอาคาร	51
4.1.2.2.	แรงลมต่อส่วนยื่นของอาคาร	51
4.1.2.3.	การบิดตัวของอาคาร	52
4.1.2.4.	ความคั่นบวกและความคั่นลบ	52
4.1.2.5.	การแกว่งตัวของอาคาร	52
4.2.	สะพานกับแรงลม	53
4.2.1.	Flutter (การสูญเสียเสถียรภาพ)	53
4.2.2.	Vortex (การสั่นเนื่องจากลมหมุนวน)	53
4.3.	รูปแบบพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของสะพาน	55
4.3.1.	การโก่งดัดตามแนวยาว (Longitudinal bending)	55
4.3.2.	การโก่งดัดตามแนวขวาง (Transverse bending)	58
4.3.3.	การบิด (Torsion)	59
4.3.4.	การเปลี่ยนรูป(Distortion)	61
5	ขั้นตอนการดำเนินงาน	
5.1.	ทบทวนวรรณกรรมปริทัศน์เกี่ยวกับการทดสอบแบบจำลองโดยอุโมงค์ลม	64
5.2.	การทดสอบภายในอุโมงค์ลม	65
5.2.1.	ความนำ	65
5.2.2.	ประเภทของอุโมงค์ลม	65
5.2.2.1.	อุโมงค์ลมสำหรับการทดสอบทางด้านการบิน (Aeronautical Tunnels)	65
5.2.2.2.	อุโมงค์ลมช่วงยาว (Long Tunnels)	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	5.2.2.3. อุโมงค์ที่มีอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Tunnels with Passive Devices)	66
	5.2.2.4. อุโมงค์ที่มีอุปกรณ์แบบแอคทีฟ (Tunnels with Active Devices)	66
	5.2.3. ประเภทของแบบจำลอง	68
	5.2.3.1. แบบจำลองแบบแข็ง(Rigid Model)	68
	5.2.3.2. แบบจำลองแบบยืดหยุ่น(Aeroelastic Model)	68
5.3.	การคำนวณแรงลม	68
	5.3.1. Uniform Building Code (UBC) มาตรฐานการก่อสร้างแห่งสหรัฐอเมริกา	68
5.4.	วิธีการสร้างแบบจำลอง	70
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	
	6.1. สรุป	71
	6.2. ข้อเสนอแนะ	74
	หนังสืออ้างอิง	75
	บรรณานุกรม	76
	ภาคผนวก ก.	ผก1
	ภาคผนวก ข.	ผข1
	ภาคผนวก ค.	ผค1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1.	ตาราง หน้าตัดของคานรูปกล่องเบื้องต้นของสะพาน ในช่วงความยาว 100 เมตร เพื่อการสัญจรของเรือประมง และยกสูงรวม 6 ช่องทาง (Double-cell)	8
2.2.	ตาราง Segment Length of Bridge (Span 100 m.)	9
3.1.	ตารางที่รายละเอียดลักษณะภูมิประเทศ ตามข้อกำหนดของ Davenport	29
3.2.	ตารางรายละเอียดลักษณะภูมิประเทศ ตามข้อกำหนดของ ANSI A58.1-1982	30
3.3.	ตารางแสดงคาบการกลับสำหรับประเภทของ โครงสร้างต่าง ๆ	31
3.4.	ตารางมิติของหน่วยตัวแปรในวิศวกรรมชลศาสตร์	32
3.5.	ตารางสรุป Scale Ratio ของคุณสมบัติที่นำมาสร้างแบบจำลองสะพาน	46
3.6.	ตารางExtreme Maximum wind , Knots (PHETCHABURI STATION)	47
3.7.	ตารางExtreme Maximum wind , Knots (PILOT STATION)	48
5.1.	ตารางหน่วยแรงลมที่กำหนดให้ตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 (กฎกระทรวงฯ)	69
6.1.	ตารางสรุปอัตราส่วนที่ใช้ในแบบจำลอง	71
6.2.	ตารางขนาดหน้าตัดของคานรูปกล่องของแบบจำลองสะพาน	72
6.3.	ตารางSegment Length of Model ( Span 2 m. )	73
ผ.ก.1.	UBC 1994 [ ตารางที่ 16-G สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับค่าความสูง,แรงดันลม และแรงลม ( $C_e$ ) ]	ผก1
ผ.ก.2.	UBC 1994 [ ตารางที่ 16-H สัมประสิทธิ์แรงดันลม ( $C_q$ ) ]	ผก2
ผ.ก.3.	UBC 1994 [ ตารางที่ 16-L คือ สัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคาร (I) ]	ผก3
ผ.ค.1.	ค่าความเร็วลมสูงสุดของพายุที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทย พ.ศ. 2531-2545	ผค1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.1.	รูปแผนที่ตั้งบริเวณ โครงการ	5
2.2.	รูปการก่อสร้างสะพานช่วงยาว	6
2.3.	รูปตัดสะพานที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบ	7
2.4.	รูปด้านยาวของสะพานในทะเลช่วง 100 เมตร	9
2.5.	รูปตัดแสดงระบบฐานรากของสะพานในทะเลสูง 10 เมตร	10
2.6.	รูปพื้นที่ศึกษาสภาพลมบริเวณ โครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้	11
2.7.	รูปแสดงทิศทางลมมรสุมและลมจรที่พัดผ่านประเทศไทย	12
2.8.	รูปแสดงที่ตั้งสถานีวัดลมและระดับน้ำในบริเวณอ่าวไทยตอนบน	13
2.9.	รูปแหล่งกำเนิดพายุหมุนเขตร้อน (ลูกศรแสดงทิศทางเคลื่อนตัว)	16
2.10.	รูปผังการกระจายลมรายปีที่สถานีน้ำร่อง ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545	18
2.11.	รูปผังการกระจายลมรายปีที่สถานีเพชรบุรี ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545	18
3.1.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วลมและความสูงจากระดับพื้นดิน สำหรับภูมิประเทศแบบต่าง ๆ โดยยกยกกำลัง	30
3.2.	รูปแบบจำลองที่ใช้สำหรับการทดสอบทางด้านไดนามิกในอุโมงค์ลม	41
3.3.	multi – degree of freedom	42
4.1.	รูปแสดงการไหลของลมผ่านสิ่งกีดขวาง	50
4.2.	รูปแรงลมต่อส่วนอื่นของอาคาร	51
4.3.	รูปแรงบิดที่เกิดขึ้นกับอาคารแบบต่าง	52
4.4.	รูปแรงดันบวกและลบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของอาคาร	53
4.5.	รูปลักษณะลมที่ทำให้สะพานเคลื่อนที่ขึ้นลงหรือบิดซ้ายขวา	54
4.6.	รูปลักษณะการไหลของลมแบบหมุนวน	54
4.7.	Principal modes of deformation:(a) total; (b) longitudinal bending; (c) transverse bending; (d) torsion; and (e) distortion.	55
4.8.	Cellular deck split up into I-beams by cuts along centres of cells.	56
4.9.	Flexure of edge beam about its own neutral axis : (a) bending stresses and (b) shear flow.	56
4.10.	Relative end displacement of beams with different neutral axis.	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.11.	Cellular deck split up into I-beams with common neutral axis.	57
4.12.	Flexure of edge beam with centroid on neutral axis of deck : (a) bending stresses and (b) shear flow.	58
4.13.	Transverse bending.	59
4.14.	Torsion forces on cross – section of twisted deck and grillage: (a) shear flows in deck and (b) torques and shear forces in deck.	60
4.15.	Equilibrium of transverse torque and shear forces in edge grillage member.	60
4.16.	Statically equivalent torsion forces in deck and grillage.	61
4.17.	Non-Uniform torsion of (a) deck and (b) grillage.	62
4.18.	(a) Distortion of box-girder deck ; (b) out-of-plane bending moments ; and (c) in-plane bending (warping) stresses.	62
4.19.	(a) Eccentric load ; (b) antisymmetric component ; (c) symmetric component ; (d) = (b) ; (e) pure torsion shear flows ; and (f) distortion shear flows.	63
5.1.	รูปอุโมงค์ที่มีอุปกรณ์แบบพาสซีฟ	66
5.2.	รูปอุโมงค์ลมที่มีอุปกรณ์แบบแอคทีฟ	67
5.3.	รูปอุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ	67
6.1.	รูปหน้าตัดของคานารูปกล่องของแบบจำลองสะพาน	72
6.2.	รูปด้านยาวของแบบจำลองสะพาน	73
6.3.	รูปตัวอย่างแบบจำลองที่ได้จากการย่อส่วน	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คำอธิบายสัญลักษณ์

## สัญลักษณ์

## ความหมาย

$H_G$	ค่าความสูงเกรเดียนต์
$V_G$	ค่าความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์
$\rho$	ความหนาแน่นของของไหล
$V$	ความเร็วของของไหล
$D$	มิติของแบบจำลอง
$n$	ค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลอง
$\mu$	ค่าความหนืดของของไหล
$g$	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก
$d$	การเท่ากันทางด้านขนาด
$L_p$	ความยาวของแบบจริง
$L_p$	ความยาวของแบบจริง
$L_m$	ความยาวของแบบจำลอง
$A_p$	พื้นที่ของแบบจริง
$A_m$	พื้นที่ของแบบจำลอง
$Vol_p$	ปริมาตรของแบบจริง
$Vol_m$	ปริมาตรของแบบจำลอง
$V_z$	ค่าความเร็วลมที่ความสูง $Z$
$U', V', W'$	ค่าความเร็วลมกรรโชกในแนวยาว, ด้านข้าง, และ แนวตั้ง ตามลำดับ
$L$	มิติของแบบจำลอง
$n$	ค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลอง
$E$	โมดูลัสยืดหยุ่น
$\rho_s$	ความหนาแน่นของโครงสร้าง
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
$\rho$	ความหนาแน่นของอากาศ
$\mu$	ความหนืดของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คำอธิบายสัญลักษณ์

## สัญลักษณ์

## ความหมาย

$L_s$	มิติของโครงสร้าง
$n_s$	ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง
$\delta$	สัดส่วนค่าการสลายพลังงานของโครงสร้าง
$I$	โมเมนต์ความเฉื่อย
$I_M$	โมเมนต์ความเฉื่อยของมวล
$I_{Mr}$	อัตราส่วนโมเมนต์ความเฉื่อยของมวล
$T_r$	อัตราส่วนของเวลา
$F_r$	อัตราส่วนแรง
$V_r$	อัตราส่วนความเร็ว
$L_r$	อัตราส่วนขนาด
$M_r$	อัตราส่วนโดยมวล
$p_s$	ความหนาแน่นของโครงสร้าง
$p_f$	ความหนาแน่นของไหล
$S_M$	แรงเฉือนในแนวตั้งของคานรูปตัวไอเนื่องจากการค้ำ
$P$	ความดันสถิตย์กระทำที่ผิวภายนอกของอาคาร
$C_e$	สัมประสิทธิ์ความสูงของอาคารและพื้นที่โดยรอบตาม
$C_q$	สัมประสิทธิ์ความดันสำหรับโครงสร้างตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ความนำ

ปัจจุบันวงการก่อสร้างของประเทศไทยมีความก้าวหน้าอย่างมาก การก่อสร้างโครงการระดับชาติจึงมีความจำเป็นเพื่อรองรับเศรษฐกิจที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจมีโครงการถนนหรือสะพานที่สามารถย่นระยะทางจากภาคหนึ่งสู่อีกภาคหนึ่ง ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาความสูญเสียทางเศรษฐกิจ ลดอุบัติเหตุ และมีการคมนาคมที่สะดวกมากขึ้น อาทิ การสร้างสะพานข้ามทะเลในบริเวณอ่าวไทย เป็นต้น

โดยปกติแล้วการสร้างสะพานที่มีการตัดผ่านท้องทะเลน้ำลึกจะได้รับผลกระทบต่างๆ นอกจากกระแสน้ำแล้วยังมีแรงลมในทะเลอ่าวไทย ที่มีความแปรปรวนอยู่เสมอ ซึ่งอาจสร้างความเสียหายให้กับสะพานได้ ดังนั้นหลักการที่ผู้ออกแบบจะต้องให้ความสำคัญก็คือ

- โครงสร้างสะพานสามารถรับแรงลมได้
- โครงสร้างมี Stiffness มากพอที่จะควบคุมไม่ให้ Deflection ของสะพานมากเกินกว่าค่าที่กำหนด
- โครงสร้างสามารถรับแรงที่กระทำที่มีการเคลื่อนที่จากยานพาหนะได้

สำหรับโครงสร้างสะพานที่มีขนาดใหญ่ ได้มีการใช้งานจริงอยู่ในปัจจุบันแล้วทำให้การทดสอบโดยตรงกระทำได้ยากลำบาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาแบบจำลองสำหรับการทดสอบสะพานเส้นทางการลัดสู่ภาคใต้ ภายใต้แรงลมในอุโมงค์ลม ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะสามารถนำมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆ ของตัวสะพานตลอดจนถึงพฤติกรรมการตอบสนองของตัวสะพานได้

การทดสอบอุโมงค์ลม (Wind Tunnel test) สะพานเส้นทางการลัดสู่ภาคใต้ซึ่งจะมีช่วงความยาวสะพานมากและจะมีความอ่อนไหวต่อผลของแรงลมมาก เมื่อผู้ออกแบบได้รูปแบบและหน้าตัดของสะพานในเบื้องต้นแล้วจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบ โดยจำลองย่อส่วนสะพานให้เล็กลงในสัดส่วนทางวิศวกรรม และกำหนดให้ลมพัดผ่าน หรือปะทะ แบบจำลองดังกล่าวภายในอุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมต่างๆ ในลักษณะและทิศทางต่างๆ โดยสังเกตพฤติกรรมของสะพานจำลองเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับปรับปรุงการออกแบบสะพานจริง เพื่อให้ไม่ให้เกิดการสั่นไหว แก้วง หรือสะบัด เกินกว่าค่ามาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1. ศึกษาการทำแบบจำลองย่อส่วนในสัดส่วนทางวิศวกรรมเพื่อให้ได้คล้ายคลึงกับ สะพานจริงทั้งทางรูปร่างและคุณสมบัติทางพลศาสตร์
- 1.2.2. ศึกษาแรงลมที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของ โครงสร้างสะพาน

## 1.3. ขอบเขตของโครงการ

จากวัตถุประสงค์ของการทำโครงการ สามารถทำการกำหนดขอบเขตของการทำโครงการได้ว่า จะทำการการศึกษาโดยครอบคลุมเนื้อหาในเรื่องต่าง ๆ ดังนี้

- 1.3.1. ศึกษาเฉพาะผลกระทบเนื่องจากแรงลมที่มีผลต่อ โครงสร้างสะพาน
- 1.3.2. ใช้ข้อมูลความเร็วลมพายุบริเวณอ่าวไทย จากกรมอุตุนิยมวิทยาตั้งแต่ปี 2531-2545
- 1.3.3. ใช้กับแบบก่อสร้างสะพานเส้นทางลัดสู่ภาคใต้ที่มี ช่วงตอม่อกว้าง 100 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# รายละเอียดโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้

### 2.1. ข้อมูลสะพานในโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้

โครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้(สมุทรสาคร-แหลมผักเบี้ย-ชะอำ) เป็นโครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) ขนาด 3 ช่องจราจร รวมไป-กลับ 6 ช่องจราจร ก่อสร้างโดยยกระดับตลอดเส้นทาง เริ่มต้นที่บ้านแหลมบัว(นครปฐม) จากแนวเส้นทางหลวงพิเศษบางใหญ่-บ้านโป่ง ตัดผ่านถนนพระราม 2 ลงอ่าวไทยที่บ้านบางขุน อ.เมืองสมุทรสาคร โดยสร้างเป็นสะพานยาวประมาณ 47 กม. มีจุดห่างจากชายฝั่งมากที่สุด จากปากแม่น้ำแม่กลอง 16 กม. ขึ้นบกที่บ้านมะขามช้าง และสิ้นสุดโครงการที่ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี ความยาวตลอดเส้นทางประมาณ 128 กม. ดังรูปที่ 2.1.

#### 2.1.1. ลักษณะของโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้

เส้นทางลัดสู่ภาคใต้ มีความยาวรวม 128 กม. แบ่งการก่อสร้างออกเป็น 3 ช่วงโครงการ ดังนี้

โครงการช่วงที่ 1 เริ่มจากทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง สายบางใหญ่-บ้านโป่ง บริเวณบ้านแหลมบัว แนวทางมุ่งสู่ทิศใต้ตัดกับถนนเพชรเกษม (ทางหลวงหมายเลข 4 กม. 47+000) ที่ประมาณ กม.5 แล้วมีเส้นทางแยกเพื่อไปบรรจบกับถนนปิ่นเกล้า-นครชัยศรี(ทางหลวงหมายเลข35 กม. 35+500) ประมาณ กม.36 ลักษณะของถนนจะเป็นทางยกระดับกว้างประมาณ 26 เมตร สูงจากพื้นดินประมาณ 10 เมตร ระยะห่างช่วงเสาประมาณ 25 เมตร รวมระยะทางทั้งสิ้นประมาณ 36 กม.

โครงการช่วงที่ 2 เริ่มจากถนนพระราม 2 มุ่งหน้าไปทางทิศใต้ เพื่อจะลงทะเลที่บริเวณวัดกระเช้าขาว จาก กม. 36 ถึง กม. 44 จะมีการเพิ่มความกว้างของถนนเป็น 39 เมตร เพื่อให้มีทางขนานเชื่อมจากถนนพระราม 2 ไปสู่ศูนย์บริการทางหลวง (Service Center) เป็นจุดพักรถริมทะเลก่อนขึ้นสะพาน ซึ่งประชาชนในท้องถิ่นสามารถเข้าไปใช้บริการได้โดยไม่ต้องเสียค่าผ่านทาง (ระยะทาง 8 กม.) ในช่วงอ่าวไทย ก่อสร้างถนนในรูปแบบของสะพานที่มีความกว้าง 25 เมตร ระยะห่างช่วงเสา 100 เมตร สูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด 17 เมตร ช่วงระยะทางประมาณ 47 กม. ในระหว่างทางจะมีที่พักริมทาง (Rest Area) ที่กม. 68 เพื่อให้ประชาชนเป็นจุดพักรถและจุดชมวิว ที่ กม. 70 จะมีช่วงสะพานกว้าง 150 เมตร จำนวน 2 ช่อง และยกระดับสูงจากระดับน้ำสูงสุด 40 เมตร เพื่อให้เรือสินค้าเข้าสู่ปากแม่น้ำแม่กลอง สะพานจะไปขึ้นฝั่งทางทิศตะวันออกของแหลมผักเบี้ยประมาณ 3 กม. จุดสิ้นสุดของช่วงนี้จะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานที่บริการทางหลวง (Service Area) ที่จะตัดกับถนนเพชรบุรี-หาดเจ้าสำราญ(ทางหลวงหมายเลข 3117 กม. 11+450) รวมระยะทางในช่วงนี้ทั้งสิ้นประมาณ 62 กม.

โครงการช่วงที่ 3 เริ่มจากทางหลวงหมายเลข 3117 มุ่งหน้าสู่ทิศใต้ขนานกับคันกั้นน้ำเดิมของกรมชลประทาน ประมาณ 1-2 กม. เส้นทางตัดกับทางหลวงหมายเลข 3187 และหมายเลข 314 ไปเชื่อมกับถนนเพชรเกษม (เดิม) เพื่อเข้าอำเภอชะอำที่ กม.124 และไปเชื่อมต่อกับถนนเพชรเกษม (เลี่ยงเมือง) ที่จะไปสู่ภาคใต้ที่กม. 128 ลักษณะโครงสร้างถนนจะเป็นทางยกระดับเช่นเดียวกับโครงการในช่วงที่ 1 โดยมีระยะทางรวมทั้งสิ้นประมาณ 30 กม.

### 2.1.2. การศึกษาการออกแบบโครงสร้างสะพานในทะเล

ในการศึกษาและออกแบบโครงสร้างในทะเลในโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพานนั้นนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากความยาวรวมของโครงสร้างสะพานในทะเลมีปริมาณสูงถึงเกือบร้อยละ 40 ของความยาวถนนทั้งหมด ในโครงการนี้ นอกจากจะกล่าวถึงขอบเขตของงานการศึกษานี้แล้ว ยังจะนำเสนอถึงผลการออกแบบเบื้องต้นของโครงสร้างสะพานในทะเล ซึ่งได้แก่หน้าตัดเบื้องต้นของโครงสร้างส่วนบนของสะพาน ตอม่อ (Pier) ฐานรากและเสาเข็มอีกด้วย

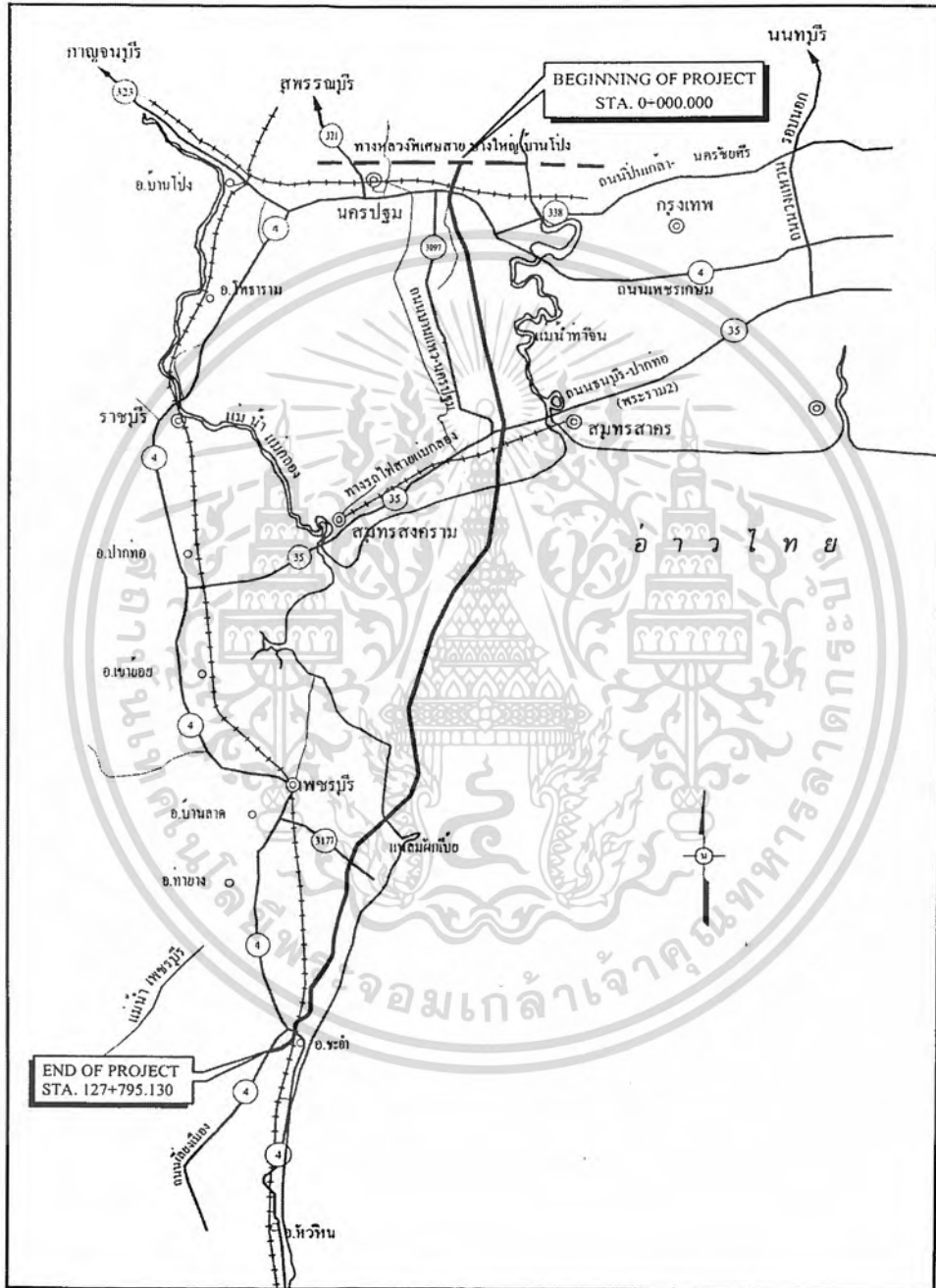
#### 2.1.2.1. แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างสะพานในทะเล

โดยทั่วไปการกำหนดรูปแบบโครงสร้าง (Structural Form) ของสะพานขึ้นอยู่กับความยาวช่วง (Span Length) ของสะพานที่จำแนกออกเป็น สะพานช่วงสั้น สะพานช่วงปานกลางและ สะพานช่วงยาว สำหรับสะพานในทะเลของโครงการนั้น พบว่าข้อมูลที่ได้รับจากงานด้านมวลชนสัมพันธ์เบื้องต้นจะมีการเข้าใช้ทะเลและชายฝั่งของกลุ่มประมงและราษฎรที่อาศัยในแถบนั้น โดยเบื้องต้นของงานด้านมาตรฐานการจัดการด้านอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมตลอดจนข้อเสนอแนะด้านอุทกศาสตร์ ทำให้การกำหนดช่วงของสะพานในทะเลของโครงการต้องมีความยาวตั้งแต่ 100-150 เมตร และจัดว่าเป็น สะพานช่วงยาวมาก

#### ก. รูปแบบโครงสร้างของสะพานช่วงยาวในทะเล

รูปแบบของโครงสร้างสะพานที่จะทำการก่อสร้างในทะเล นอกจากจะพิจารณารูปแบบโครงสร้างไปตามประเภทของสะพานที่จำแนกไปตามความยาวช่วงแล้ว ยังต้องคำนึงถึงการก่อสร้างด้วย ทั้งนี้วิธีการก่อสร้างนอกจากจะต้องพิจารณาให้มีความประหยัด สะดวกและรวดเร็วแล้ว การก่อสร้างยังต้องมีวิธีการที่จะทำให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและวิถีชีวิตของผู้เกี่ยวข้องให้น้อยที่สุด ดังนั้นการก่อสร้างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวจะดำเนินงานโดยให้มีการหล่อคอนกรีตน้อยที่สุด โดยจะใช้เป็นชิ้นสำเร็จรูป (Precast Units) เป็นส่วนใหญ่ และหากสามารถกำหนดช่วงความยาวของสะพานไว้เท่า ๆ กันจะทำให้เป็นการก่อสร้างในระบบพิกัดซ้ำ (Modular Construction) มีผลทำให้ราคาก่อสร้างของสะพานระบบนี้ยิ่งต่ำลงอีก



รูปที่ 2.1. แผนที่ตั้งบริเวณโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้การก่อสร้างสะพานช่วงยาวในทะเลเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งกลางมาข้างต้น ในโครงการนี้จึงกำหนดให้เป็นสะพานระบบคาน (Girder-type Bridge) ที่มีหน้าตัดรูปกล่อง (Box Girder or Via-Duct) ที่จะสามารถดำเนินการได้สะดวกรวดเร็วโดยพิจารณาวิธีการก่อสร้างโดยใช้ชิ้นย่อยสำเร็จรูป (Segment) และเนื่องจากกำหนดความยาวช่วงไว้มากที่ 100-150 เมตร จึงต้องใช้วิธีการก่อสร้างแบบ Segmental Precast Balanceing Cantiliver Construction ซึ่งการก่อสร้างอาจจะดำเนินการไปโดยใช้ปั้นจั่นยกของแบบหอสถูง (Tower Crane) ยกชิ้นย่อยสำเร็จรูปประกอบกันขึ้นจากตอม่อ (Piers) ของสะพานทั้งสองด้านเท่า ๆ กันดังตัวอย่างโครงการหนึ่งใน รูปที่ 2.2.



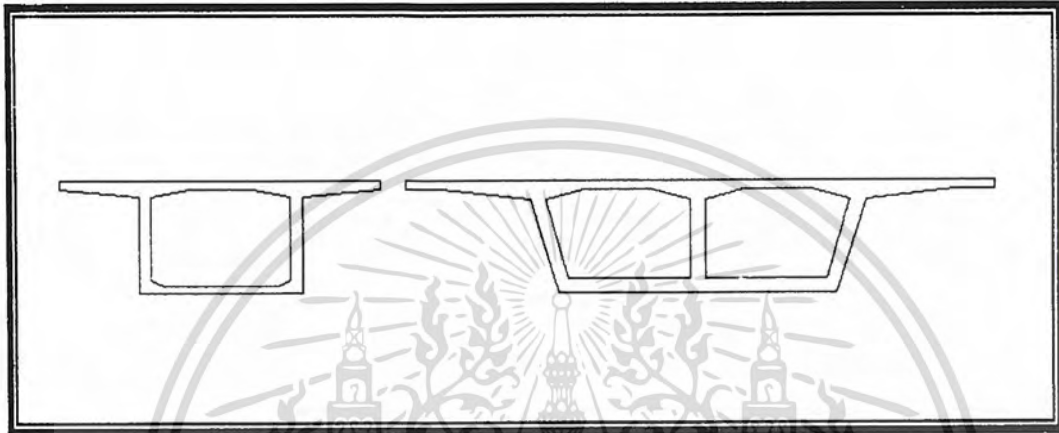
รูปที่ 2.2. การก่อสร้างสะพานช่วงยาว

อย่างไรก็ตามการก่อสร้างของโครงสร้างคานระบบกล่องนี้ ยังมีวิธีการอื่น ๆ อีกมากมาย วิธีการหนึ่งซึ่งเหมาะสมกับสะพานที่มีความยาวมาก ๆ อาจดำเนินการโดยใช้โครงเหล็กที่สามารถเคลื่อนตาม (Travelling Frame หรือ Follower Frame) ไปติดตั้งบนชิ้นส่วนที่ยกติดตั้งไว้ก่อนแล้ว และยกชิ้นส่วนขึ้นต่อ ๆ ไปเรื่อย ๆ สลับกัน ซึ่งทั้งหมดนี้ก็จะเห็นว่าวิธีการก่อสร้างจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในขบวนการออกแบบในรายละเอียด ซึ่งหมายรวมถึงการพิจารณากำหนดการในการก่อสร้าง (Scheduling) ด้วย

#### ข. รายละเอียดของสะพานในทะเล

สะพานในโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้ จะได้รับการพิจารณาออกแบบโดยอาศัยข้อมูลเบื้องต้นของการสำรวจปริมาณการจราจรที่กำหนดช่องจราจร (Road-Way) ไว้ 2 ช่องทางต่อทิศทาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเดินรถ และจะตีเส้นแบ่งเป็น 3 ช่องทางในแต่ละทิศทางในอนาคต (Ultimate Design) และเพื่อเป็นการตอบสนองต่อการใช้และเป็นข้อมูลที่พิจารณาร่วมกับงานด้านสิ่งแวดล้อมและอุทกศาสตร์ รวมทั้งพิจารณาถึงความเหมาะสมของหน้าตัดสะพานเพื่อลดค่าก่อสร้างแล้ว ผลการศึกษาพบว่าสะพานแบบรวมกล่องคู่ (Double-Cell) ดัง รูปที่ 2.3. มีความเหมาะสมมากกว่าแบบสะพานแยกกล่องเดี่ยว



(ก) สะพานกล่องเดี่ยว (ข) สะพานกล่องคู่

รูปที่ 2.3. รูปตัดสะพานที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบ

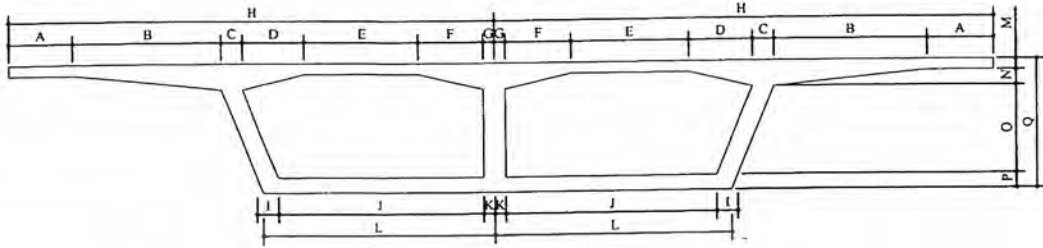
### 2.1.2.2. รูปแบบของโครงสร้างสะพานในทะเล

#### ก. โครงสร้างส่วนบน

ออกแบบหน้าตัดของคานรูปกล่องเบื้องต้นของสะพานในช่วงความยาว 100 เมตร ซึ่งเป็นหน้าตัดของสะพานทั่วไป (Typical Section) โดยจัดให้เป็นสะพานที่มีความประสงค์จะเปิดเป็นช่องกว้างเพื่อการสัญจรของเรือประมงและยกสูงรวม 6 ช่องทาง (Double-cell) ได้จัดแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1. ทั้งนี้ขนาดที่ระบุมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร โดยหน้าตัดที่จัดแสดงไว้เป็นหน้าตัดที่ตำแหน่งเหนือตอม่อ (Over-pier Section) หน้าตัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ และหน้าตัดที่กึ่งกลางช่วง (Mid-span Section)

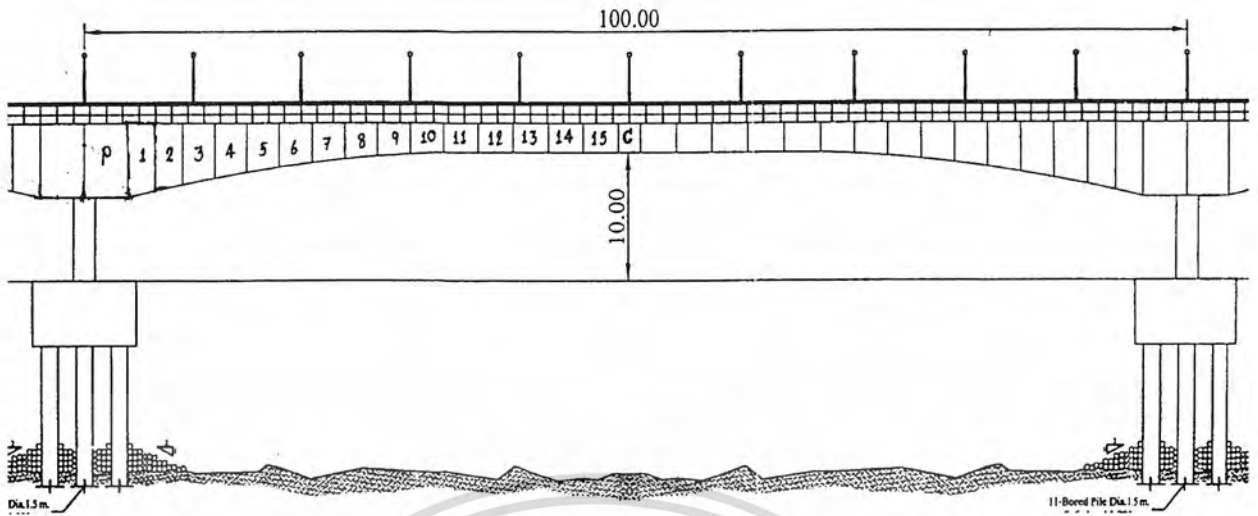
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1. หน้าตัดของคานรูปกล่องเบื้องต้นของสะพานในช่วงความยาว 100 เมตร เพื่อการสัญจรของเรือประมงและยกสูงรวม 6 ช่องทาง (Double-cell)



Span Length	Dimension (mm.)																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
100 (m)	AT PIER	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	3618	250	3933	250	350	4900	1000	6500
		1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	3618	250	3933	250	350	4900	1000	6500
	1	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	3618	250	3933	250	350	4900	1000	6500
		1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	3746	250	4090	250	350	4615	935	6150
	2	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	3746	250	4090	250	350	4615	935	6150
		1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	3874	250	4246	250	350	4330	870	5800
	3	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	3874	250	4246	250	350	4330	870	5800
		1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4001	250	4403	250	350	4050	805	5450
	4	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4001	250	4403	250	350	4050	805	5450
		1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4129	250	4560	250	350	3760	740	5100
	5	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4129	250	4560	250	350	3760	740	5100
		1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4257	250	4717	250	350	3475	675	4750
	6	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4257	250	4717	250	350	3475	675	4750
		1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4385	250	4873	250	350	3190	610	4400
	7	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4385	250	4873	250	350	3190	610	4400
		1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4513	250	5030	250	350	2905	545	4050
8	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4513	250	5030	250	350	2905	545	4050	
	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4640	250	5187	250	350	2620	480	3700	
9	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4640	250	5187	250	350	2620	480	3700	
	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4768	250	5343	250	350	2335	415	3350	
10	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4768	250	5343	250	350	2335	415	3350	
	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4896	250	5500	250	350	2050	350	3000	
11,12,13,14,15	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4896	250	5500	250	350	2050	350	3000	
	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4896	250	5500	250	350	2050	350	3000	
Closure Pour	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4896	250	5500	250	350	2050	350	3000	
	1500	3500	500	1500	2750	1500	250	11500	500	4896	250	5500	250	350	2050	350	3000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4. รูปด้านยาวของสะพานในทะเลช่วง 100 เมตร

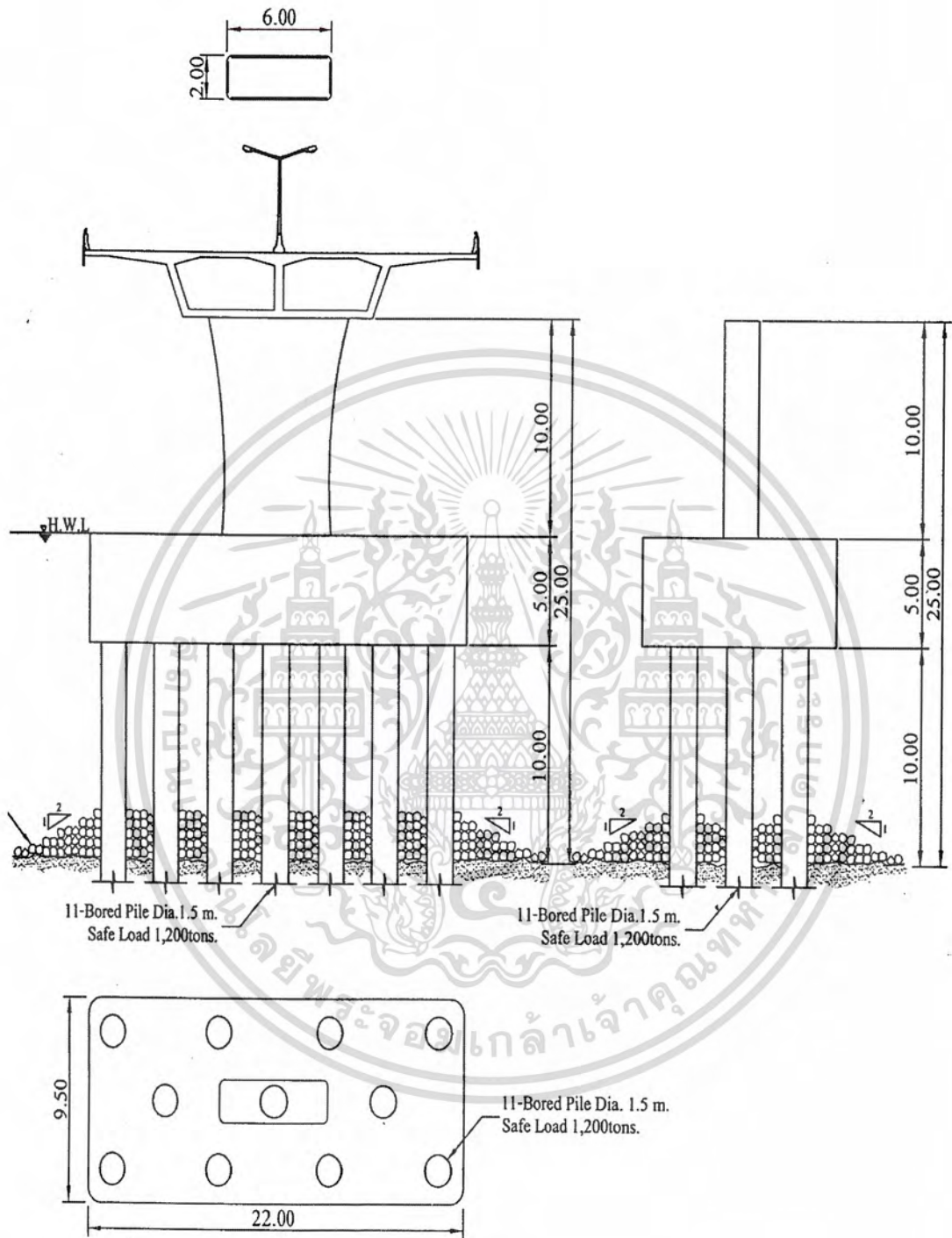
ตารางที่ 2.2. Segment Length of Bridge (Span 100 m.)

Span Length (100 m.)	AT PIER (P)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Closure Pour (C)
Segment Length (m.)	4.35	2.50	2.50	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	2.00

#### ข. โครงสร้างส่วนล่าง

ออกแบบเบื้องต้นของโครงสร้างส่วนล่าง ซึ่งประกอบไปด้วย ตอม่อ (Pier) ฐานราก (Pier-cap) และเสาเข็ม ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5. ทั้งนี้สำหรับสะพานช่วงทั่วไปที่ 100 เมตร จะยกผิวทางสูงจากระดับน้ำทะเลสูงสุด +17.00 เมตร และสำหรับสะพานช่วงยาว 150 เมตร ที่กำหนดให้เป็นตำแหน่งของการเดินเรือขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งใกล้กับแม่น้ำแม่กลองจะยกสูงถึง 40 เมตรที่ตำแหน่งเหนือตอม่อ ซึ่งจะสามารถรองรับเรือขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในปัจจุบันได้ในอนาคตสำหรับฐานของสะพานจะใช้เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตรและมีความยาวพอเพียงที่จะฝังลงไปในชั้นดินแข็งและกำหนดน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยไว้ที่ 1200 เมตริกตันต่อต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

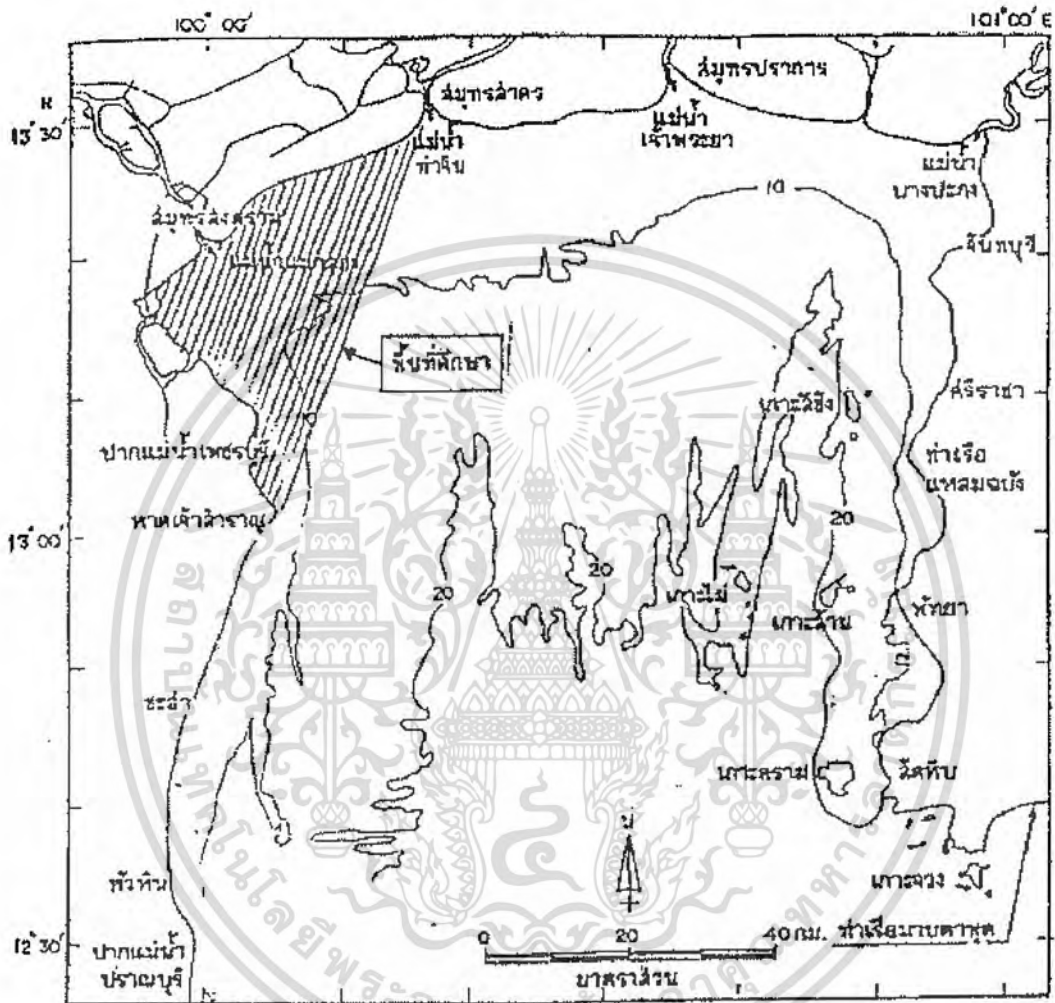


รูปที่ 2.5. รูปตัดแสดงระบบฐานรากของสะพานในทะเลสูง 10 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2. ข้อมูลลมบริเวณที่ตั้งโครงการ

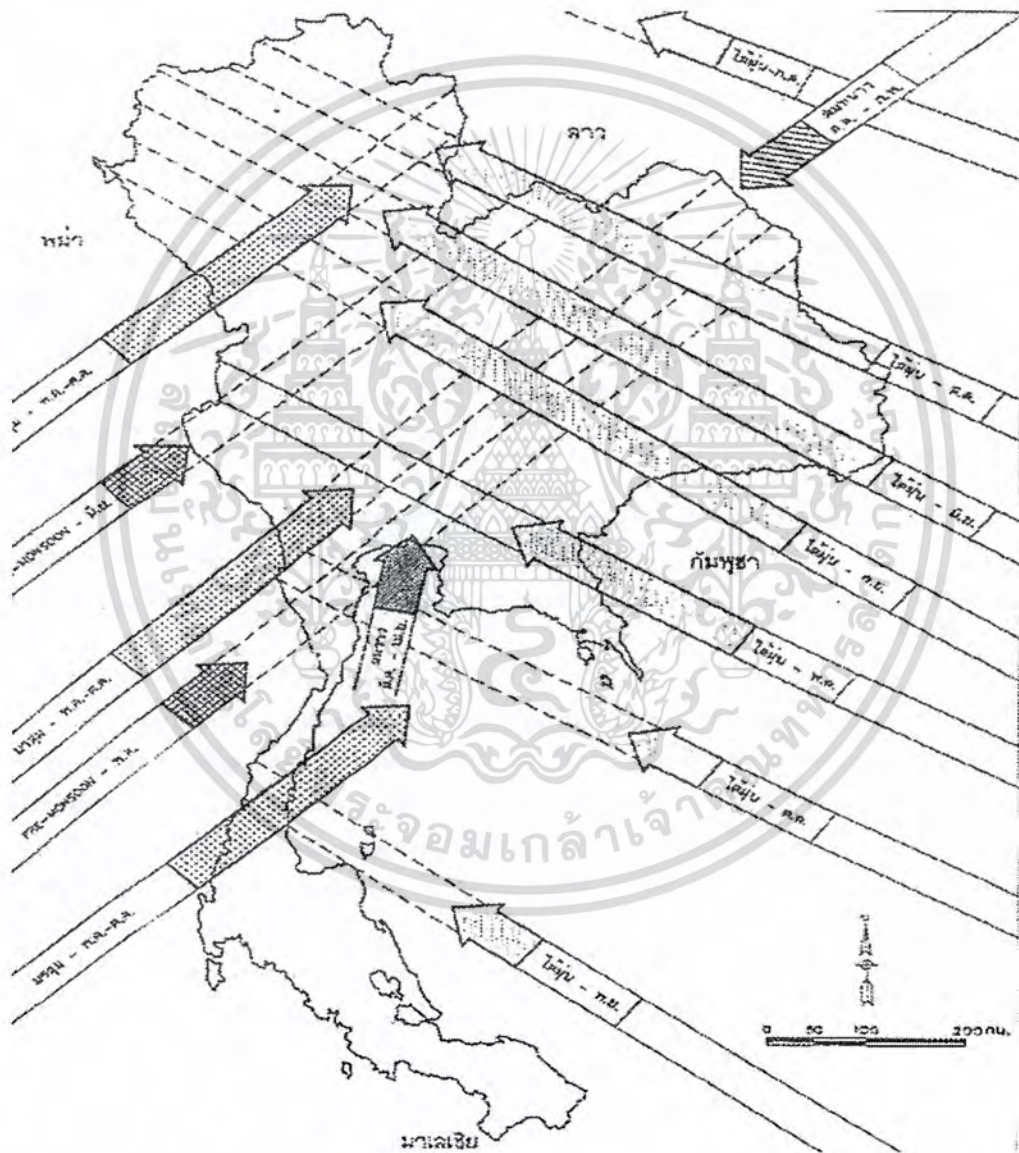
การศึกษาสภาพลมบริเวณที่ก่อสร้างโครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้



รูปที่ 2.6. พื้นที่ศึกษาสภาพลมบริเวณ โครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้

ประเทศไทยตั้งอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรระหว่างเส้นรุ้งที่ 6 องศา ถึง 20 องศา เหนือ จึงมีสภาพภูมิอากาศเขตร้อนอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายน ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดพาความชื้นมาทำให้เกิดฝนตกชุกบริเวณทะเลอันดามันและชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทยตอนบนจะมีคลื่นลมแรง ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม กระแสลมจะเปลี่ยนทิศทางมาเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ พัดพาความหนาวเย็นมาปกคลุมประเทศไทย บริเวณชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทยจะมีคลื่นลมแรง ส่วนในภาคใต้จะมีฝนตกชุกเนื่องจากความชื้นจากอ่าวไทยและทะเลจีนใต้ นอกจากลมมรสุมแล้ว ยังมีพายุหมุนเขตร้อนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่พัดผ่านประเทศไทย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพายุดีเปรสชันแต่บางครั้งก็มีกำลังแรงมากถึงขั้นเป็นพายุโซนร้อน พายุเหล่านี้เกิดขึ้นในบริเวณทะเลจีนใต้ใกล้หมู่เกาะฟิลิปปินส์ เคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือไปขึ้นฝั่งที่ประเทศเวียดนามหรือประเทศจีนตอนล่าง เมื่อเคลื่อนตัวมาถึงประเทศไทยก็ได้อ่อนกำลังลงมาก โดยเฉลี่ยจะมีพายุพัดมาประเทศไทยปีละ 1 ถึง 2 ลูกเท่านั้น พายุที่เคลื่อนเข้ามาในอ่าวไทยจะเกิดขึ้นระหว่างเดือนตุลาคมถึงธันวาคม มีผลทำให้คลื่นลมแรงและฝนตกหนักจนเกิดน้ำท่วมฉับพลัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจังหวัดในภาคใต้ ซึ่งทำความเสียหายเป็นอย่างมาก



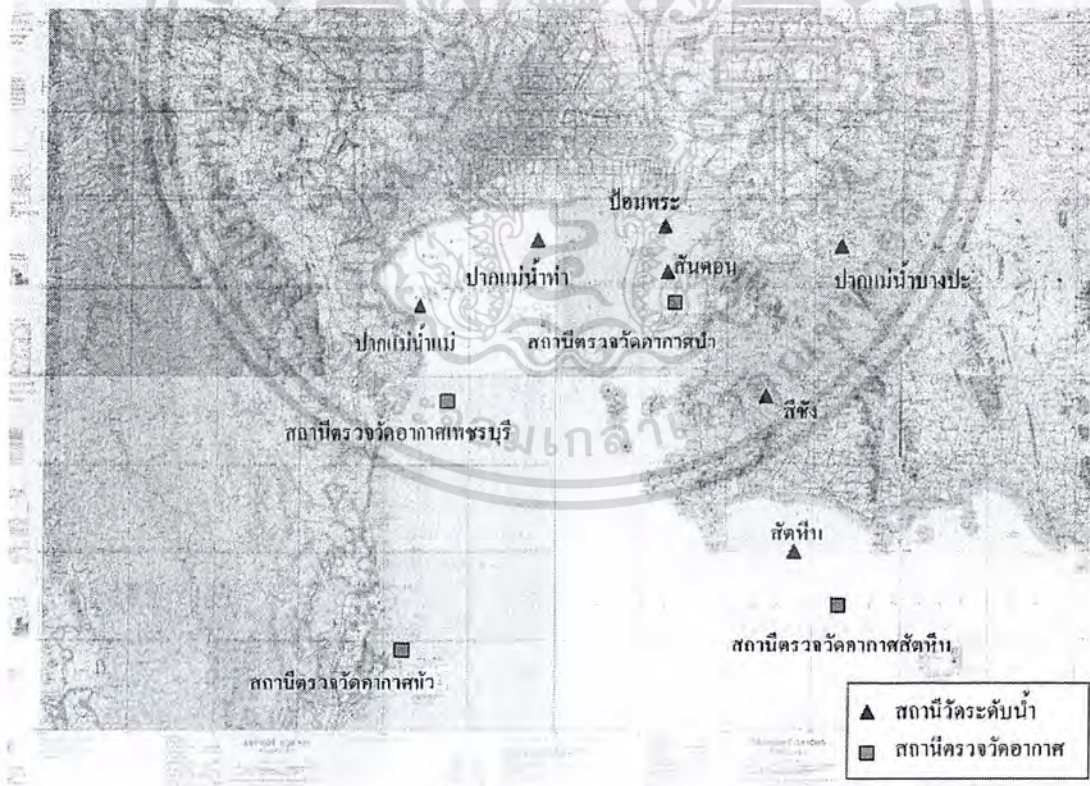
รูปที่ 2.7. แสดงทิศทางลมมรสุมและลมจรที่พัดผ่านประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1. การวิเคราะห์ข้อมูลลม

ข้อมูลลมมีความสำคัญต่อการออกแบบ โครงสร้างของทางหลวงพิเศษที่อยู่ในทะเลให้สามารถต้านทานแรงลมและไม่เกิดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากลมได้ นอกจากนี้ข้อมูลลมยังมีความสำคัญต่อรถยนต์ที่ใช้ทางหลวงพิเศษ

เนื่องจากในพื้นที่โครงการ ไม่มีสถานีวัดลมอยู่เลยดังนั้นข้อมูลลมที่คาดว่าจะเกิดในพื้นที่ศึกษาจึงจำเป็นต้องประเมินจากข้อมูลลมของสถานีวัดลมที่อยู่ในบริเวณอ่าวไทยตอนบนและอยู่ใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษา ตำแหน่งที่มีการวัดลมในบริเวณอ่าวไทยตอนบนโดยกรมอุตุนิยมวิทยาแสดงดังรูปที่ 2.8. สถานีวัดลมที่อยู่ใกล้เคียงกับพื้นที่โครงการมากที่สุด ซึ่งจะนำมาใช้ประเมินความเร็วลมและทิศทางในพื้นที่โครงการคือสถานีเพชรบุรีและสถานีน้ำร้อน (บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา) ได้นำผลการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลลมราย 3 ชม. ที่สถานีเพชรบุรีและที่สถานีน้ำร้อนมาคำนวณความถี่ของความเร็วและทิศทางรายปีตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545 ผลการวิเคราะห์ได้แสดงอยู่ในรูปผังกระจายลม (Windrosd) ดังแสดงในรูปที่ 2.10. และ 2.11. ตามลำดับ



รูปที่ 2.8. แสดงที่ตั้งสถานีวัดลมและระดับน้ำในบริเวณอ่าวไทยตอนบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2. สภาพลมที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

### 2.2.2.1. ลมมรสุม

ความแตกต่างของภูมิอากาศและความแตกต่างของความกดอากาศระหว่างเหนือพื้นดินกับเหนือพื้นน้ำ ทำให้เกิดลมพัดจากแผ่นดินออกสู่ทะเล และลมพัดจากทะเลเข้าสู่แผ่นดิน ซึ่งพัดเป็นบริเวณกว้างขวางและพัดเป็นระยะเวลานานเรียกว่าลมมรสุม มี 2 ชนิดด้วยกัน คือ ลมมรสุมฤดูร้อนและลมมรสุมฤดูหนาว

#### ก. ลมมรสุมฤดูร้อน

เป็นลมที่พัดจากทะเลและมหาสมุทรเข้าสู่ภาคพื้นทวีป ในฤดูร้อนอากาศบนแผ่นดินภาคพื้นทวีปซึ่งเป็นบริเวณกว้างใหญ่ มีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำในทะเลและมหาสมุทร ส่วนความกดของอากาศเหนือภาคพื้นทวีปต่ำกว่าความกดอากาศเหนือน้ำทะเลและมหาสมุทร จึงเกิดเป็นลมมรสุมฤดูร้อนพัดเข้าหาแผ่นดินภาคพื้นทวีป ลมมรสุมฤดูร้อนจะพาฝนมาสู่ดินแดนต่าง ๆ ที่ลมนี้พัดผ่าน และจะพัดอยู่เป็นระยะเวลาประมาณเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ระยะเวลาดังกล่าวนี้อาจผิดเพี้ยนไปขึ้นอยู่กับละติจูดของพื้นที่ที่ลมพัดผ่าน ลมมรสุมฤดูร้อนในภาคพื้นทวีปเอเชียมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ มรสุมตะวันออกเฉียงใต้ ” ที่เป็นเช่นนี้เพราะในฤดูร้อนอากาศบริเวณซึ่งอยู่ทางตะวันตกเฉียงเหนือของอินเดีย เอเชียใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และเอเชียตะวันออก มีอุณหภูมิของอากาศสูงกว่าอุณหภูมิเหนือมหาสมุทรอินเดียและทะเลจีน จึงเกิดเป็นลมพัดจากมหาสมุทรอินเดียและทะเลจีนเข้าสู่ดินแดนเอเชียใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียตะวันออก

#### ข. ลมมรสุมฤดูหนาว

เป็นลมที่เกิดจากการที่อุณหภูมิของอากาศบนภาคพื้นทวีปลดต่ำลงมากกว่าอุณหภูมิของอากาศเหนือน้ำทะเลและมหาสมุทร และในขณะเดียวกันนี้ความกดของอากาศบนภาคพื้นทวีปสูงกว่าความกดอากาศเหนือทะเลและมหาสมุทร จึงเป็นเหตุให้เกิดลมพัดจากใจกลางทวีปไปสู่บริเวณที่มีความกดอากาศต่ำกว่า คือ อากาศบริเวณทะเลและมหาสมุทร เรียกว่า มรสุมฤดูหนาว เนื่องจากลมนี้พัดในฤดูหนาวจากภาคพื้นทวีปจึงนำความเย็นและความแห้งแล้งมาสู่ดินแดนต่าง ๆ ที่ลมนี้พัดผ่าน แต่อาจจะนำความชื้นและฝนมาให้บ้างถ้าลมมรสุมนั้นพัดผ่านทะเลก่อนที่จะเข้าสู่แผ่นดิน โดยทั่วไปแล้วลมมรสุมฤดูหนาวจะพัดในระหว่างเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ระยะเวลาดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับละติจูดของพื้นที่ที่ลมพัดผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลมมรสุมฤดูหนาวในเอเชียมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ” ลมนี้จะพัดจากใจกลางทวีปเอเชียออกสู่ทะเลจีน เอเชียตะวันออก เอเชียตะวันออกเฉียงและใต้เอเชียใต้ ลมนี้จะนำความเย็นและความแห้งแล้งมาให้บริเวณที่พัดผ่าน บางแห่งที่ลมนี้พัดผ่านจะเป็นฤดูหนาวนาน บางแห่งก็เป็นฤดูหนาวสั้น และเป็นฤดูแล้งเสียหลายเดือน เช่น ประเทศไทย เป็นต้น

#### 2.2.2.2. ลมพายุ

ลมพายุ หมายถึง ลมแปรปรวนที่เกิดขึ้นในทันทีทันใด พัดแรง หากเกิดในแถบร้อนก็มักจะเกิดจากการที่มีความกดอากาศต่ำเกิดขึ้นในทันทีทันใด ทำให้เกิดลมจากบริเวณรอบ ๆ ซึ่งมีความกดอากาศสูงกว่าพัดเข้ามาแทนที่ ลักษณะของลมพายุอาจจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

##### ก. ลมพายุฝนฟ้าคะนอง (thunderstorm)

เป็นลมพายุที่ไม่ค่อยรุนแรง เกิดขึ้นในบริเวณไม่กว้างขวางนักและเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้น แล้วก็สลายตัวหายไป ขณะที่ลมพายุฝนฟ้าคะนองนี้มักมีฝนตก มีพายุโหมเป็นระยะ ๆ และมีฟ้าคะนอง แต่กำลังแรงของลมที่พัดไม่ถึงกับทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากมายแต่ประการใด ลมพายุชนิดนี้เกิดขึ้นได้ทุกหนทุกแห่งและมักจะเกิดขึ้นใน ฤดูร้อน เกิดขึ้นในเขตร้อนมากกว่าเขตอบอุ่น เกิดบนแผ่นดินมากกว่าในทะเล เกิดในแถบภูเขาและที่ราบสูงมากกว่าในที่ราบ

##### ข. ลมพายุหมุน (cyclone)

เป็นพายุที่เกิดขึ้นในบริเวณกว้างรอบบริเวณศูนย์กลางของความกดอากาศต่ำ มีชื่อเรียกต่าง ๆ กันตามท้องถิ่น เช่น พายุหมุนที่เกิดขึ้นในแถบมหาสมุทรอินเดียเรียกว่า ไชโคลน(cyclone) ถ้าเกิดบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์เรียกว่า ลมบาเกียว(baguio) ถ้าเกิดขึ้นในแถบทะเลจีนเรียกว่า ลมไต้ฝุ่น(typhoon) ถ้าเกิดขึ้นในหมู่เกาะอินเดียตะวันตกเรียกว่า ลมสลาตัน (hurricand) ถ้าเกิดในสหรัฐอเมริกาภาคใต้แล้วเคลื่อนไปถึงเขตอบอุ่นเรียกว่า ลมทอร์นาโด(tornado) เป็นลมพายุที่มีลักษณะรุนแรง โดยเฉพาะบริเวณศูนย์กลางของลมจะทำอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินอย่างมาก

##### ค. ลมแอนตี้ไชโคลน(anticyclone)

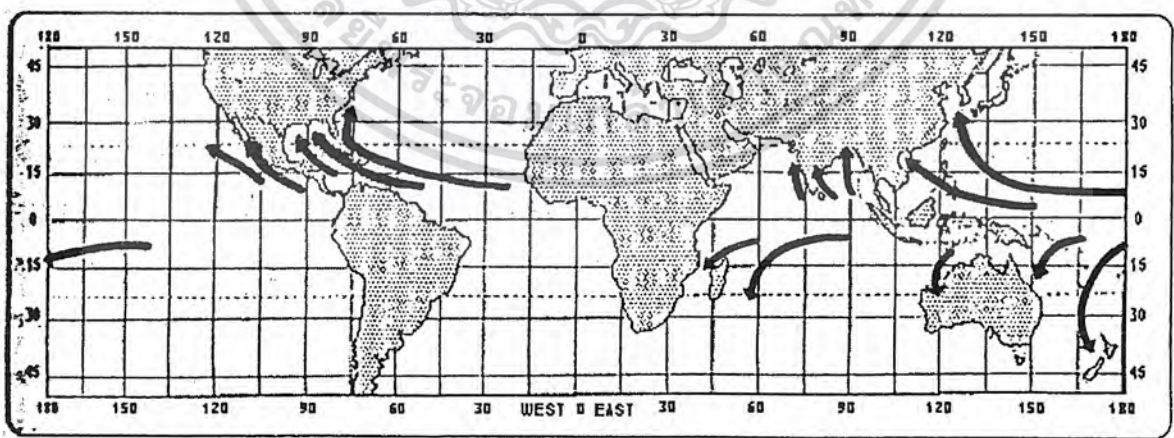
เป็นลมที่พัดหมุนเวียนออกจากเขตความกดอากาศสูงเคลื่อนที่ในบริเวณแคบๆ หรือลมที่เกิดจากบริเวณที่มีความกดอากาศสูง ไปสู่บริเวณที่มีความกดอากาศต่ำจะเกิดลมชนิดนี้พัดชั่วขณะหนึ่ง เป็นลมที่ไม่ร้ายแรงเท่าใดนัก มีลักษณะอากาศดี ท้องฟ้าแจ่มใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3. ลักษณะทั่วไปของพายุหมุนเขตร้อน

พายุหมุนเขตร้อนเป็นคำทั่วไปที่ใช้สำหรับเรียกพายุหมุนหรือพายุไซโคลน (cyclone) ที่มีถิ่นกำเนิดเหนือมหาสมุทรในเขตร้อนแถบละติจูดต่ำ แต่อยู่นอกเขตบริเวณเส้นศูนย์สูตร เพราะยังไม่เคยปรากฏว่ามีพายุหมุนเขตร้อนเกิดขึ้นที่เส้นศูนย์สูตร พายุนี้เกิดขึ้นในมหาสมุทรหรือทะเลที่มีอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 26° ซ. หรือ 27° ซ. ขึ้นไป และมีปริมาณไอน้ำสูง เมื่อเกิดขึ้นแล้วมักเคลื่อนตัวตามกระแสลมส่วนใหญ่จากทิศตะวันออกมาทางทิศตะวันตก และค่อยโค้งขึ้นไปทางละติจูดสูง แล้วเวียนโค้งกลับไปทางทิศตะวันออกอีก พายุหมุนเขตร้อนเกิดขึ้นได้หลายแห่งในโลกและมีชื่อเรียกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดบริเวณที่มีพายุหมุนเขตร้อนเกิดขึ้นเป็นประจำ ได้แก่

- มหาสมุทรแปซิฟิกเหนือด้านตะวันตก ทางตะวันตกของลองจิจูด 170° ตะวันออก เมื่อมีกำลังแรงสูงสุด เรียกว่า “ไต้ฝุ่น” เกิดมากที่สุดในเดือนกรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และ ตุลาคม
- มหาสมุทรแอตแลนติกเหนือแถวทะเลแคริบเบียนและอ่าวเม็กซิโก เรียกว่า “เฮอริเคน” เกิดมากในเดือนสิงหาคม กันยายน และตุลาคม
- มหาสมุทรแปซิฟิกเหนือ ฝั่งตะวันออกของประเทศเม็กซิโก เรียกว่า “เฮอริเคน”
- บริเวณมหาสมุทรอินเดียเหนือ อ่าวเบงกอล เรียกว่า “ไซโคลน”
- บริเวณมหาสมุทรอินเดียเหนือ ทะเลอาระเบีย เรียกว่า “ไซโคลน”
- มหาสมุทรอินเดียใต้ ตะวันตกของลองจิจูด 90° ตะวันออก เรียกว่า “ไซโคลน”
- มหาสมุทรอินเดียใต้ ตะวันตกเฉียงเหนือของทวีปออสเตรเลีย เรียกว่า “วิลลีวิลลี”



รูปที่ 2.9. แหล่งกำเนิดพายุหมุนเขตร้อน (ลูกศรแสดงทิศทางการเคลื่อนตัว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พายุหมุนเขตร้อนเมื่ออยู่ในสถานะที่เจริญเติบโตที่จะเป็นพายุที่มีความรุนแรงที่สุดชนิดหนึ่งในบรรดาพายุที่เกิดขึ้นในโลก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 100 กิโลเมตรขึ้นไป และเกิดขึ้นพร้อมกับลมที่พัดแรงมาก ระบบการหมุนเวียนของลมเป็นไปโดยพัดพัดเวียนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเข้าสู่ศูนย์กลางของพายุในซีกโลกเหนือ ส่วนในซีกโลกใต้พัดเวียนตามเข็มนาฬิกา ยิ่งใกล้ศูนย์กลางลมจะหมุนเกือบเป็นวงกลมและมีความเร็วสูงที่สุด

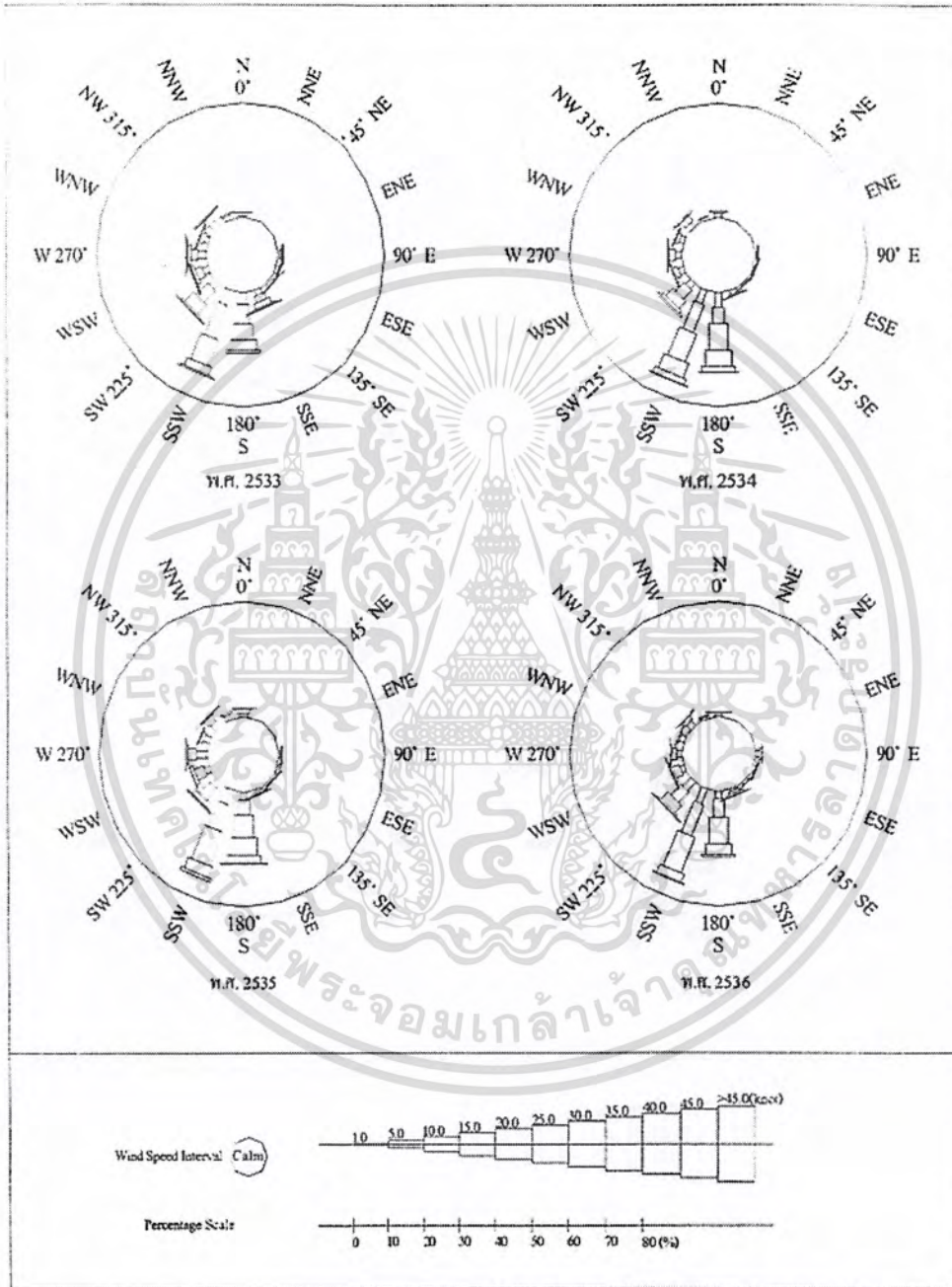
ความเร็วลมสูงสุดที่บริเวณใกล้ศูนย์กลางนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความรุนแรงของพายุ ซึ่งในย่านมหาสมุทรแปซิฟิกเหนือด้านตะวันตกและทะเลจีนใต้มีการแบ่งตามข้อตกลงระหว่างประเทศดังนี้

- พายุดีเปรสชันเขตร้อน (tropical depression) ความเร็วลมใกล้ศูนย์กลางไม่ถึง 34 นอต (63 กม./ชม.)
- พายุโซนร้อน (tropical storm) ความเร็วลมใกล้ศูนย์กลาง 34 นอต (63 กม./ชม.) ขึ้นไปแต่ไม่ถึง 64 นอต (188 กม./ชม.)
- ใต้ฝุ่น (typhoon) ความเร็วลมสูงสุดใกล้ศูนย์กลางตั้งแต่ 64 นอต (188 กม./ชม.) ขึ้นไป

พายุดีเปรสชันเป็นพายุที่มีระดับความรุนแรงน้อยที่สุด ส่วนใต้ฝุ่นเป็นพายุที่มีระดับความรุนแรงสูงสุด เส้นผ่านศูนย์กลางอาจถึงพันกิโลเมตรหรือมากกว่านั้น ความเร็วลมใกล้ศูนย์กลางอาจสูงถึง 250 หรือ 300 กม./ชม. อันตรายจากน้ำท่วมหรือคลื่นลมแรงจึงมีมาก ใต้ฝุ่นในระยะเริ่มแรกจะมีลมพัดเข้าหาศูนย์กลางอย่างรุนแรง ทำให้ความกดอากาศบริเวณศูนย์กลางต่ำมาก การพัดเข้าหาศูนย์กลางอย่างรุนแรงของลมทำให้เกิดการหมุนเวียนของลมในระดับสูงขึ้นไปด้วย การหมุนเวียนที่เกิดขึ้นสังเกตได้จากกำแพงเมฆหนารอบๆ ตาพายุ ซึ่งมีลมพัดรุนแรง ฝนตกหนัก และมีการปลดปล่อยความร้อนจำนวนมาก ส่วนบริเวณถัดเข้ามาจากกำแพงเมฆจะมีลมค่อนข้างอ่อน (น้อยกว่า 12 นอต หรือประมาณ 22 กม./ชม.) บริเวณนี้เรียกว่า “ตาพายุ” ไม่มีฝน และแสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านได้ ตาพายุมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-50 กิโลเมตร

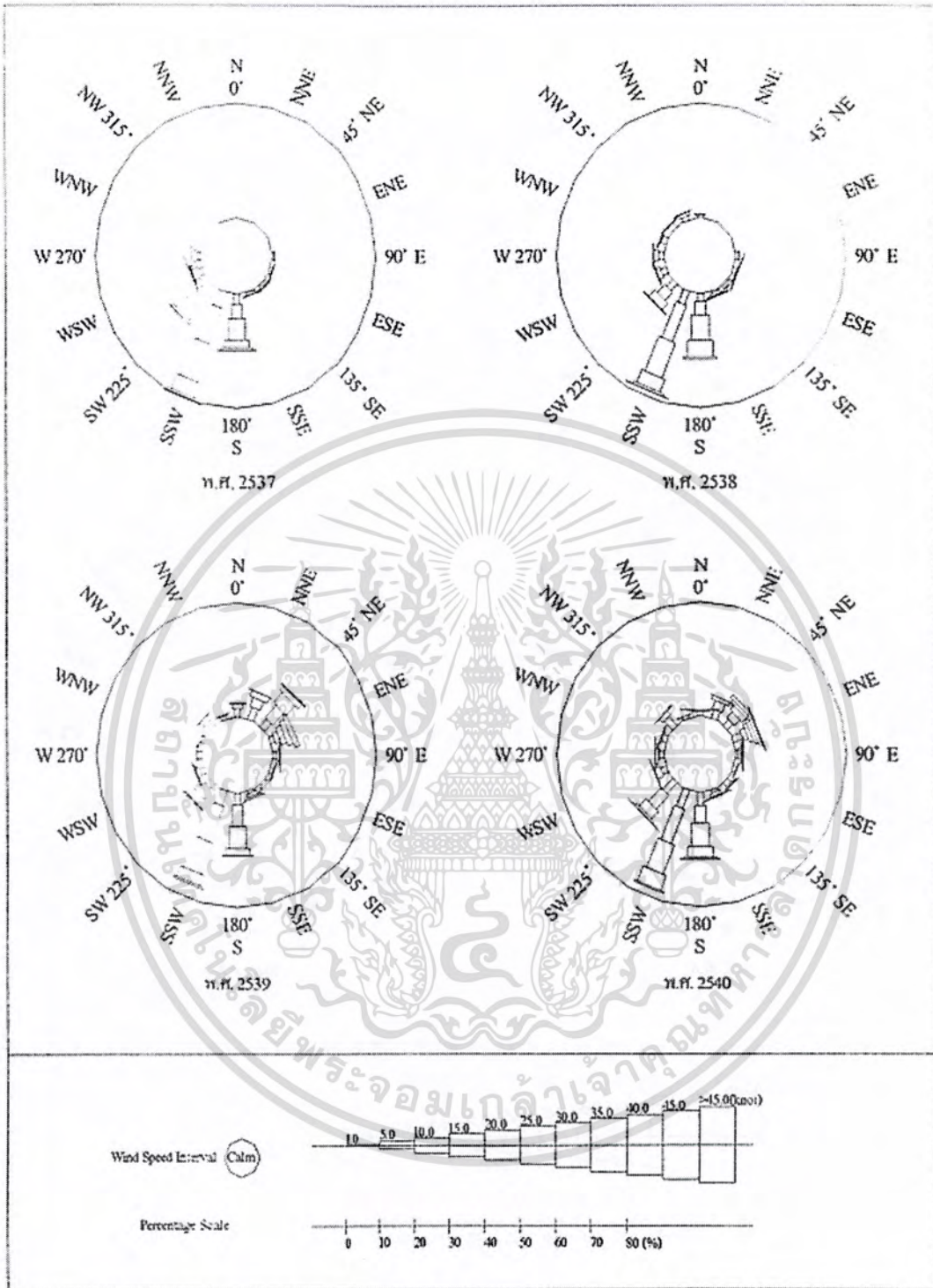
ใต้ฝุ่นมีพลังมากมายมหาศาล โดยได้รับพลังงานมาจากพลังงานความร้อนแฝงซึ่งไอน้ำในทะเลกลั่นตัวเป็นน้ำ ในหนึ่งวันใต้ฝุ่นสามารถผลิตพลังงานได้เท่ากับลูกระเบิดไฮโดรเจนขนาด 1 ล้านตันของ ที เอ็น ที ได้มากกว่า 10,000 ลูก ด้วยเหตุนี้เมื่อใต้ฝุ่นเคลื่อนขึ้นฝั่ง ผ่านพื้นดิน และภูเขา จึงขาดพลังงานเสริมทำให้พายุอ่อนกำลังลง หรือเมื่อมีมวลอากาศเย็นมาผสมผสาน พลังงานของใต้ฝุ่นจะลดลงและค่อยๆ สลายตัว จากเหตุผลดังกล่าวพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนตัวเข้าสู่ประเทศไทยส่วนใหญ่จึงมีกำลังแรงในขั้นพายุดีเปรสชัน โดยเฉพาะประเทศไทยตอนบน ซึ่งล้อมรอบด้วยประเทศเพื่อนบ้าน ได้แก่ พม่า ประเทศเวียดนาม ประเทศลาว และประเทศกัมพูชา ส่วนภาคใต้เป็นพื้นที่เปิดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดฝั่งทะเลเมื่อมีพายุหมุนเขตร้อนก่อตัวหรือเคลื่อนตัวเข้ามาทางอ่าวไทยจึงมีโอกาสเคลื่อนขึ้นฝั่งภาคใต้ได้ ในขณะที่ยังมีกำลังแรงและก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สินทั้งบนฝั่งและในอ่าวไทยซึ่งจะมีคลื่นแรงลมแรงจัดจนเป็นอันตรายอย่างมากต่อการเดินเรือ



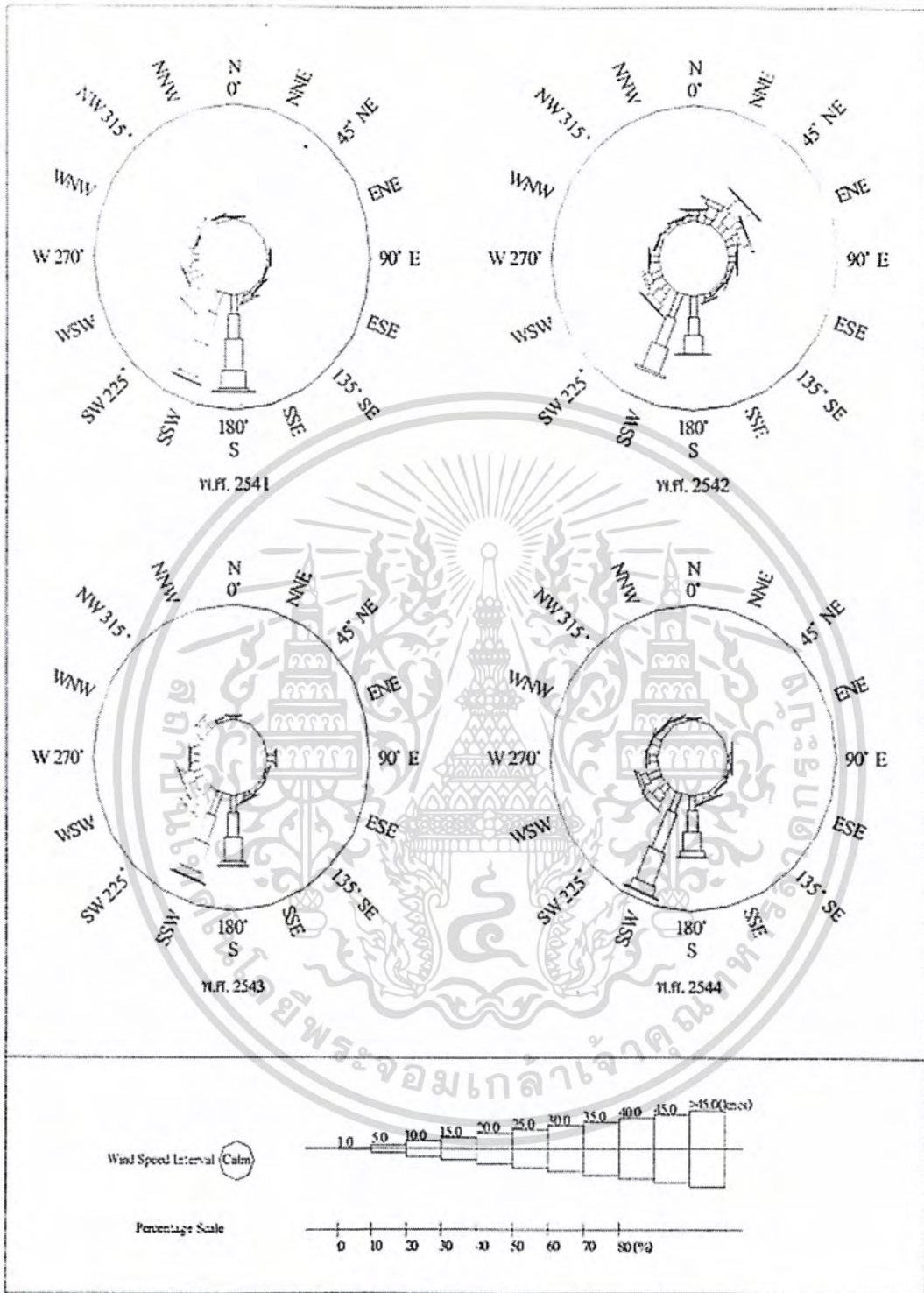
รูปที่ 2.10. ฝั่งการกระจายลมรายปีที่สถานีนำร่อง ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



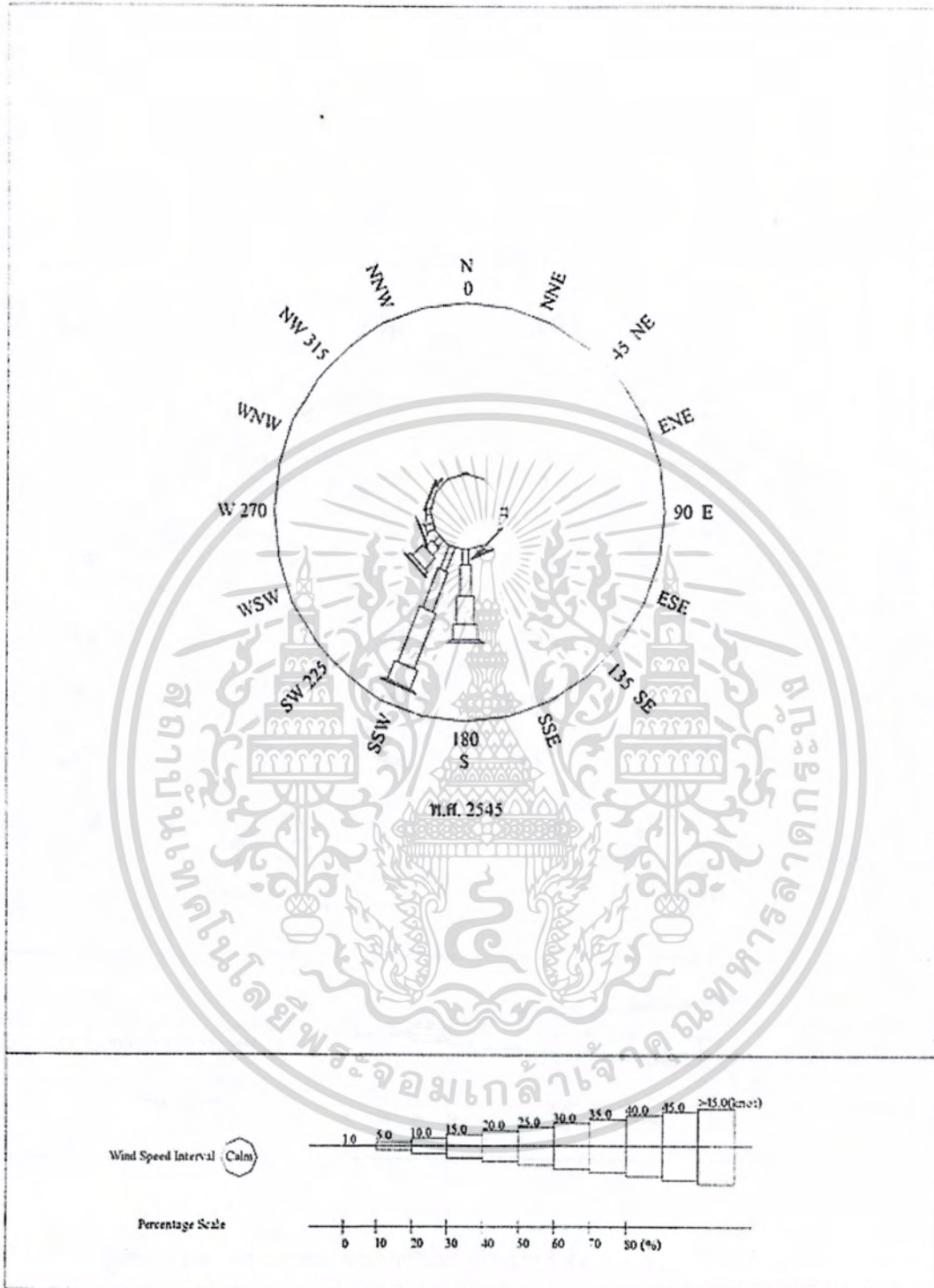
รูปที่ 2.10. พังการกระจายลมรายปีที่สถานีนำร่อง ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



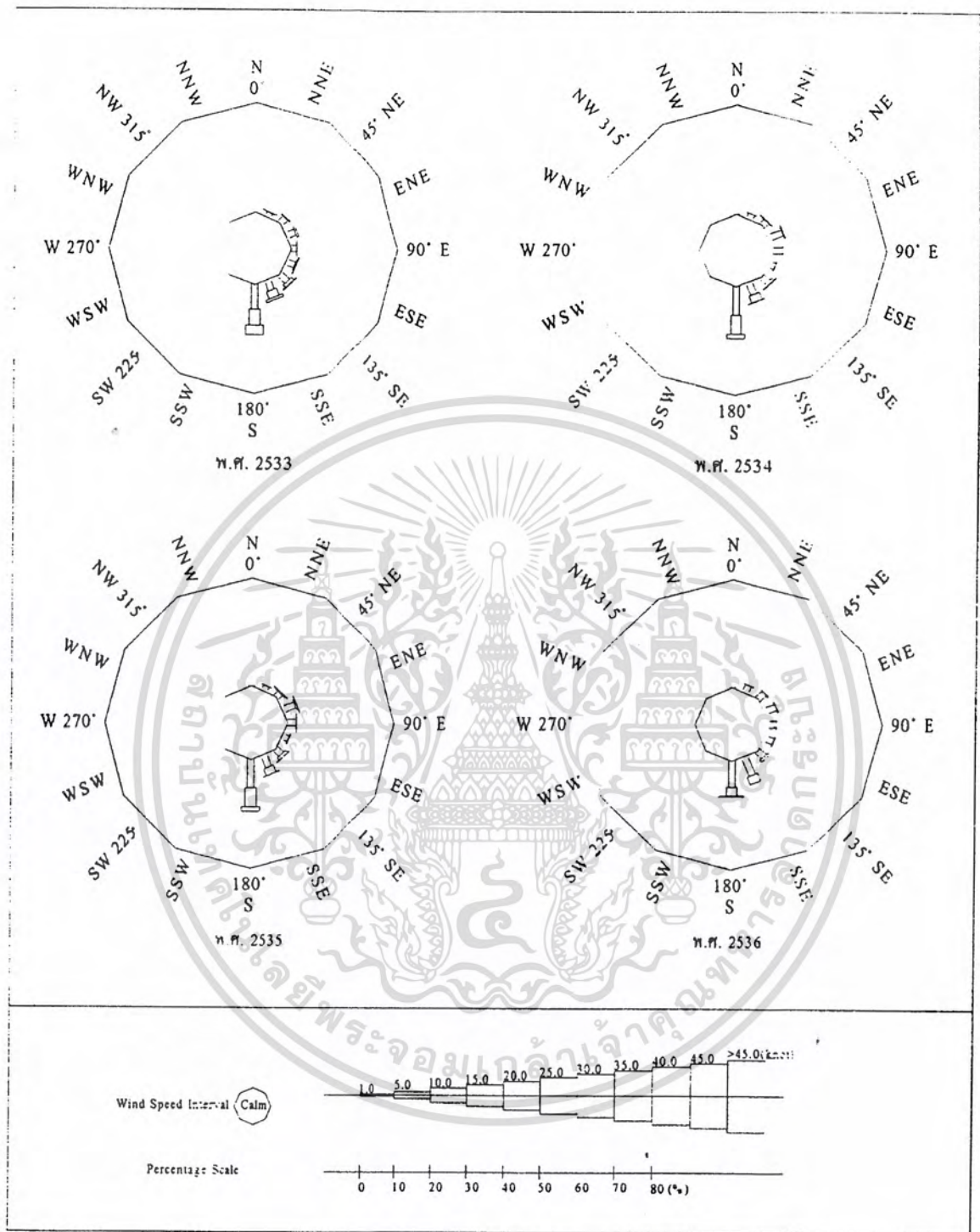
รูปที่ 2.10. พังการกระจายลมรายปีที่สถานีนำร่อง ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



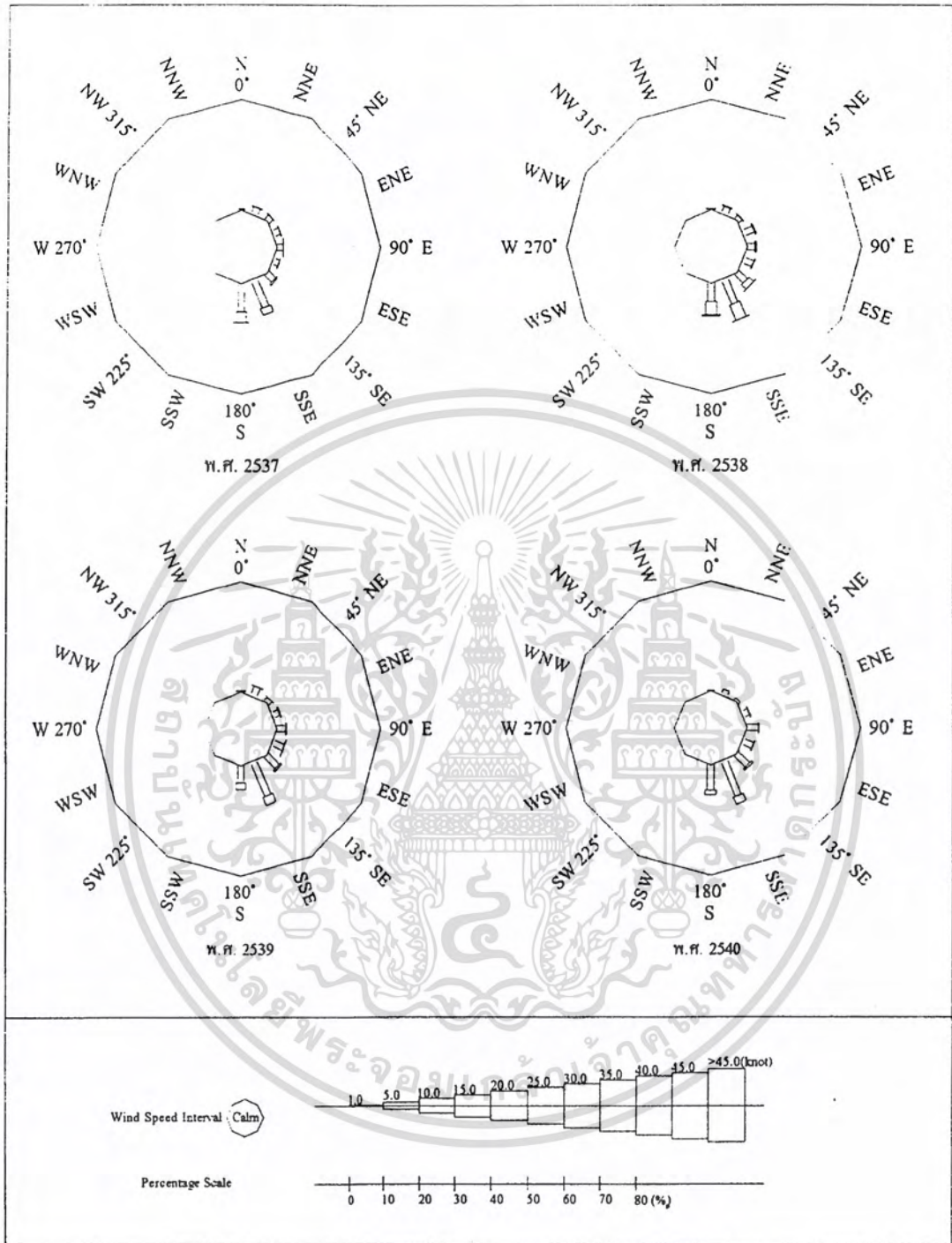
รูปที่ 2.10. ผังการกระจายลมรายปีที่สถานีนำร่อง ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



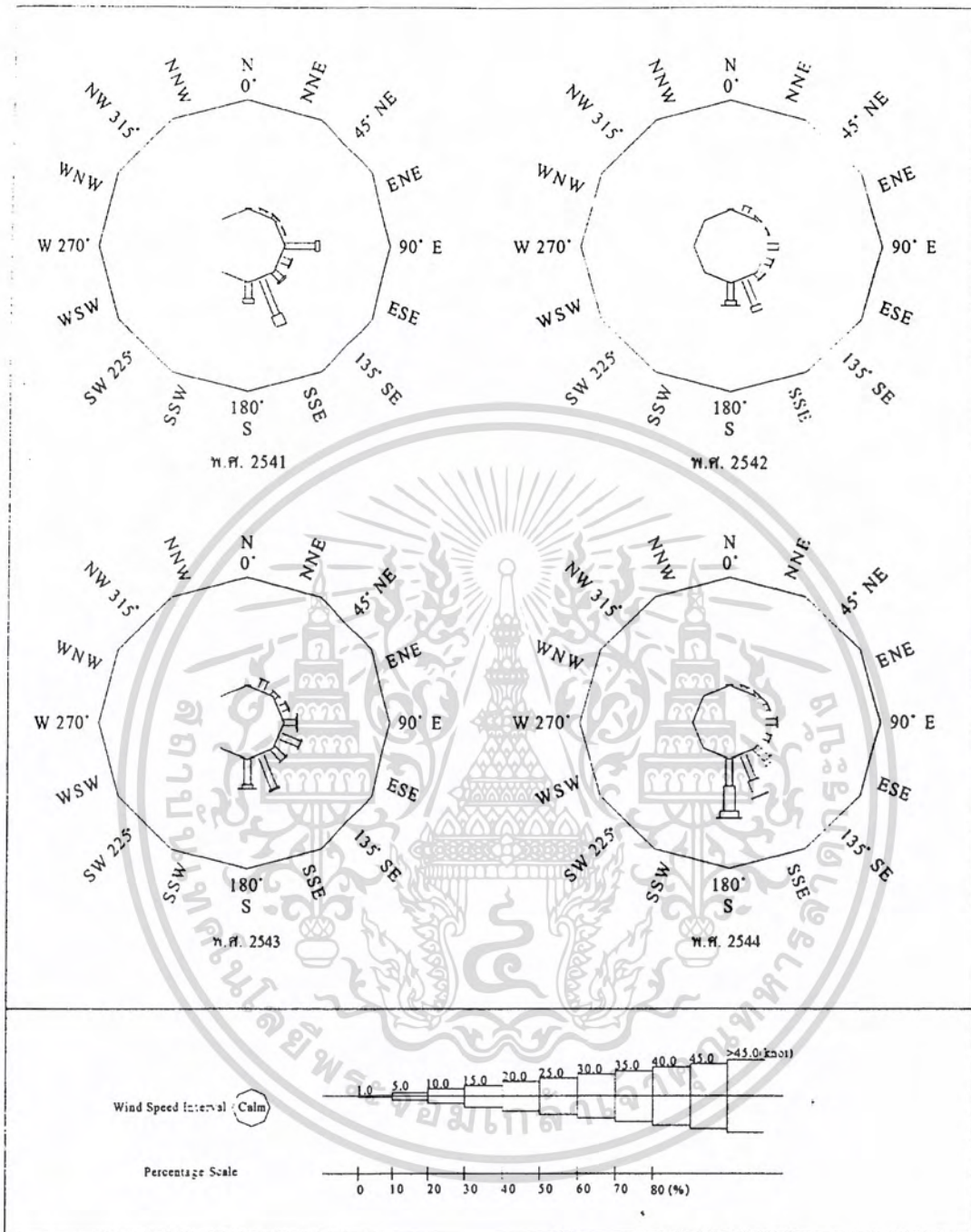
รูปที่ 2.11. พังการกระจายลมรายปีที่สถานีเพชรบุรี ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



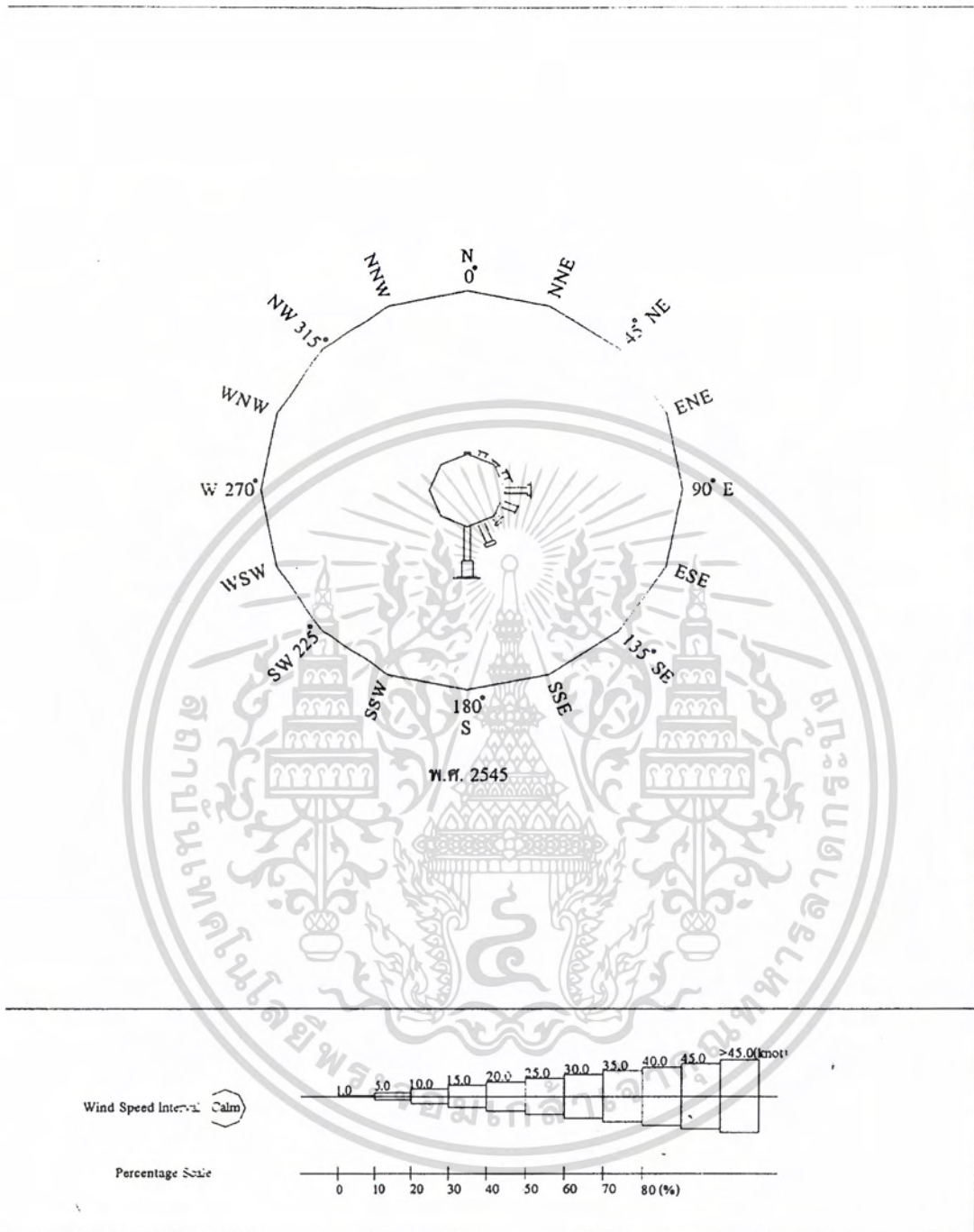
รูปที่ 2.11. ผังการกระจายลมรายปีที่สถานีเพชรบุรี ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11. ผังการกระจายลมรายปีที่สถานีเพชรบุรี ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

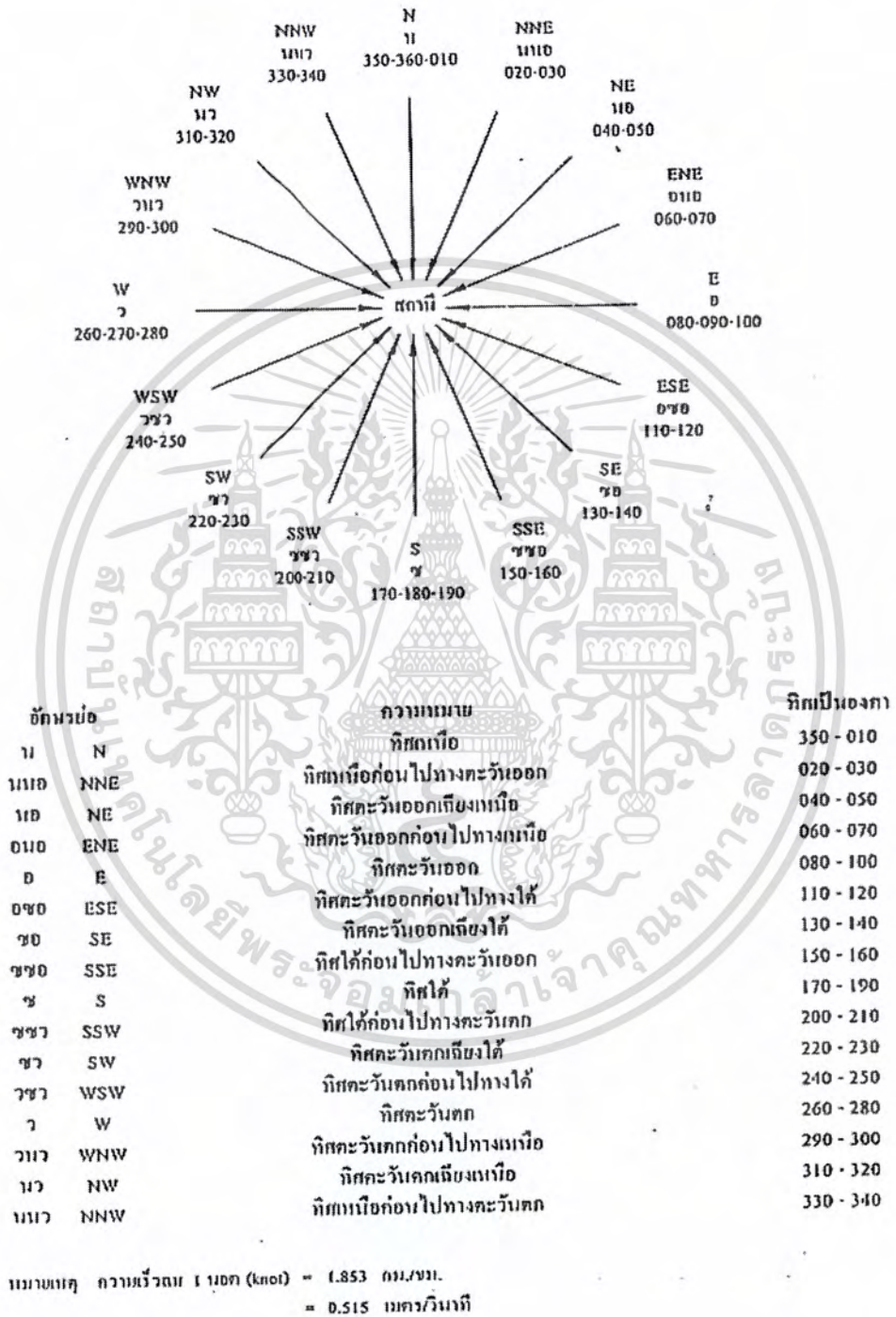


รูปที่ 2.11. ฟังการกระจายลมรายปีที่สถานีเพชรบุรี ตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึง 2545(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางลมที่ใช้ในการตรวจอากาศผิวพื้นทุก 10 องศา

ทิศทางของลมผิวพื้นที่ตรวจได้เป็นทิศทางที่ลมพัดเข้าหาสถานีและแบ่งเป็น 16 ทิศทาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 3.1. ทฤษฎีทางด้านอากาศพลศาสตร์

ลมหรือการเคลื่อนที่ของอากาศ เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดันอากาศระหว่างจุดสองจุดในระดับความสูงเดียวกัน ความแตกต่างของความดันอากาศนี้เกิดขึ้นจากการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ และการสะสมความร้อนของผิวโลก เมื่อใดที่จุดใดจุดหนึ่งได้รับความร้อนสูงกว่าอากาศบริเวณนั้นจะเกิดการขยายตัวและลอยตัวขึ้นสูง ก่อให้เกิดบริเวณความกดอากาศต่ำทำให้อากาศบริเวณที่มีความกดอากาศสูงกว่าหรืออุณหภูมิต่ำกว่าเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่และก่อให้เกิดลมขึ้น

โดยที่อากาศเป็นของไหลชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติของความหนืดและความเสียดทาน ดังนั้นบริเวณที่อากาศเคลื่อนที่ติดกับพื้นผิวโลกซึ่งมีความขรุขระ ย่อมทำให้เกิดความเสียดทานมีผลทำให้ความเร็วของการเคลื่อนที่ลดลง และเกิดการไหลแบบไหลวน (Turbulent Flow) อย่างไรก็ตามผลกระทบจากแรงเสียดทานของผิวโลกจะลดลงขณะที่ความสูงจากผิวโลกเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อถึงความสูงระดับหนึ่ง ผลของแรงเสียดทานนี้จะน้อยมากจนไม่จำเป็นจะต้องนำมาพิจารณา ความสูงนี้เรียกว่าความสูงเกรเดียนต์ (Gradient Height) และชั้นของบรรยากาศที่อยู่ระหว่างผิวโลก และความสูงเกรเดียนต์นี้เรียกว่า บาวคาร์เลเยอร์ (Boundary Layer) ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่มีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธา

### 3.2. สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

สำหรับการไหลอย่างสม่ำเสมอและไม่เกิดผลแรงเฉื่อยจากการไหล ผลรวมของความดันสถิตย์  $p$  ที่จุดใดๆ กับค่าความดันพลวัต (Dynamic Pressure)  $\frac{1}{2} \rho U^2$  ตามแนวของการไหลที่ขณะใดขณะหนึ่ง จะมีค่าคงที่ดังนี้

$$\frac{1}{2} \rho U^2 + p = \text{ค่าคงที่} \quad (3.1.)$$

$\rho$  คือ ค่ามวลของของไหล

และ  $U$  คือ ค่าความเร็วของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3. กฎยกกำลัง (POWER LAW)

ปี ค.ศ. 1916 Hellman [7] ได้เสนอรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความสูงจากระดับพื้นดิน ในช่วงบาวคาร์เรเลเยอร์ ในรูปของกฎยกกำลัง ดังนี้

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^P \quad (3.2.)$$

โดยที่  $V_1$  คือ ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูง  $H_1$

$V_2$  คือ ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูง  $H_2$

และ  $P$  คือ ค่าตัวเลขยกกำลังขึ้นอยู่กับ ลักษณะภูมิประเทศ

ต่อมาในปี ค.ศ. 1965 Davenport [5] ได้เสนอว่าค่าความสูงเกรเดียนต์และค่าตัวเลขยกกำลังสำหรับกฎยกกำลังขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศเท่านั้น และสำหรับภูมิประเทศแบบหนึ่งค่าตัวเลขยกกำลังจะมีค่าคงที่จนถึงระดับความสูงเกรเดียนต์

$$V = V_G \left( \frac{H}{H_G} \right)^P \quad (3.3.)$$

โดยที่  $V$  คือ ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูง  $H$  จากระดับพื้นดิน

$H_G$  คือ ค่าความสูงเกรเดียนต์

$V_G$  คือ ค่าความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์

ดังนั้น ค่าความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์ที่ขณะใดขณะหนึ่ง สามารถหาได้เมื่อทราบค่าความเร็วลมที่ระดับใดระดับหนึ่ง สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบหนึ่ง ดังนี้

$$V_G = \frac{V}{\left( \frac{H}{H_G} \right)^P} \quad (3.4.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Davenport [4] ได้รวบรวมและแบ่งลักษณะภูมิประเทศที่มีอิทธิพลต่อความเร็วลมออกเป็น 8 แบบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ในขณะที่ANSI A58.1-1982[4] ได้แบ่งลักษณะของภูมิประเทศที่มีอิทธิพลต่อความเร็วลมออกเป็น 4 แบบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1.รายละเอียดลักษณะภูมิประเทศ ตามข้อกำหนดของ Davenport [4]

รายละเอียด ลักษณะภูมิประเทศ	P	H <sub>G</sub> ( เมตร )
1.พื้นที่ที่มีผิวเรียบมาก เช่น ฝืนน้ำที่ราบเรียบ,ทะเลกว้าง ๆ,เกาะเดี่ยว ๆ ที่ไม่มีต้นไม้และผู้อาศัยอยู่,พื้นที่ราบที่เรียบชายฝั่ง	$\frac{1}{8.5}$	245
2.พื้นราบที่มีสิ่งกีดขวางเดี่ยว ๆ เช่นทุ่งหญ้า,ทะเลทราย,ที่ราบที่ไม่มีต้นไม้ที่ขั้วโลก	$\frac{1}{7.5}$	275
3.พื้นราบหรือพื้นผิวที่มีลูกคลื่นเล็กน้อยพร้อมกับมีสิ่งกีดขวางที่ใหญ่ขึ้นอีกเล็กน้อย เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีต้นไม้อยู่กระจายห่าง ๆ กันและอาคารที่ปราศจากรั้วหรือเครื่องกีดขวางอื่น ๆ,พื้นที่หรือทุ่งที่มีพุ่มไม้เดี่ยว	$\frac{1}{6.5}$	300
4.พื้นที่ที่มีลูกคลื่นหรือพื้นที่ราบที่มีสิ่งกีดขวางหรืออาคารเดี่ยว ๆ เช่น ทุ่งกว้าง ๆ ที่มีรั้วหรือกำแพง,พื้นที่ที่มีต้นไม้กระจายอยู่ห่าง ๆ และมีอาคาร	$\frac{1}{5.5}$	335
5.พื้นที่ที่มีลูกคลื่นหรือพื้นที่ราบที่มีสิ่งกีดขวางหลาย ๆ ขนาดจำนวนมาก เช่น พื้นที่การเกษตรพร้อมกับทุ่งเล็ก ๆ และมีรั้วหรือสิ่งกีดขวางที่หนาแน่น,มีการต้านทานลมจากต้นไม้ที่กระจัดกระจาย,มีอาคารสองชั้นที่กระจัดกระจาย	$\frac{1}{4.5}$	365
6.พื้นที่ที่เป็นลูกคลื่นหรือพื้นราบที่มีสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่จำนวนมากกระจายครอบคลุมอยู่อย่างสม่ำเสมอ เช่น ป่าไม้,ป่าละเมาะ,สวนอุทยาน	$\frac{1}{3.5}$	410
7.พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่จำนวนมากกระจายอยู่ เช่น ชานเมือง,พื้นที่รอบนอกของเมืองใหญ่,พื้นที่การเกษตรที่มีต้นไม้เล็ก ๆ และมีการต้านทานลมจากต้นไม้สูง	$\frac{1}{3}$	460
8.พื้นผิวที่ครอบคลุมเต็มไปด้วยสิ่งกีดขวางใหญ่ ๆ เช่น ศูนย์กลางของเมืองใหญ่	$\frac{1}{2.5}$	550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2. รายละเอียดลักษณะภูมิประเทศ ตามข้อกำหนดของ ANSI A58.1-1982 [3]

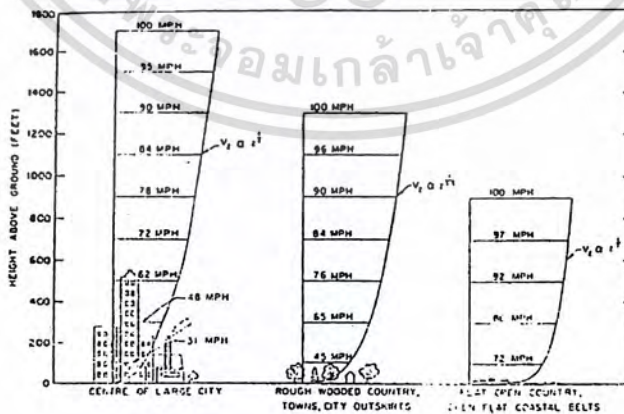
พื้นที่ชายฝั่ง (Coastal Area)		ที่โล่ง (Open Terrain)		ชานเมือง (Suburban Terrain)		ใจกลางเมืองใหญ่ (Centers of Large Cities)	
P	H <sub>G</sub> (เมตร)	P	H <sub>G</sub> (เมตร)	P	H <sub>G</sub> (เมตร)	P	H <sub>G</sub> (เมตร)
$\frac{1}{10}$	215	$\frac{1}{7}$	275	$\frac{1}{4.5}$	370	$\frac{1}{3}$	460

ใจกลางเมืองใหญ่ คือ ที่ศูนย์กลางของเมือง มีอาคารที่สูงเกิน 21 เมตร (70 ฟุต) อย่างน้อย 50% โดยที่พิจารณาลักษณะภูมิประเทศด้านเหนือลมเป็นระยะทางที่น้อยที่สุด 800 เมตร (0.5 ไมล์) หรือ 10 เท่าของความสูงของโครงสร้างโดยใช้ค่าที่มากกว่า

ชานเมือง คือ พื้นที่รอบชานเมือง, พื้นที่ป่าหรือสภาพภูมิประเทศที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ใกล้ชิดกัน โดยที่พิจารณาลักษณะภูมิประเทศด้านเหนือลมเป็นระยะทางที่น้อยที่สุด 460 เมตร (1500 ฟุต) หรือ 10 เท่าของความสูงของโครงสร้าง โดยใช้ค่าที่มากกว่า

ที่โล่ง คือ สภาพภูมิประเทศที่มีสิ่งกีดขวางที่มีความสูงน้อยกว่า 9 เมตร (30 ฟุต) รวมทั้งพื้นที่ทุ่งราบ ทุ่งหญ้า

พื้นที่ชายฝั่ง คือ พื้นที่ชายฝั่งที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยพิจารณาลักษณะภูมิประเทศด้านที่เป็นพื้นดินเป็นระยะทางที่น้อยที่สุด 460 เมตร (1500 ฟุต) หรือ 10 เท่าของความสูงของโครงสร้างโดยใช้ค่าที่มากกว่า



รูปที่ 3.1. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วลมและความสูงจากระดับพื้นดินสำหรับภูมิประเทศแบบต่าง ๆ โดยยกยอกกำลัง [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4. คาบการกลับ(Return Period)

ในการออกแบบโครงสร้างรับแรงลมควรคำนึงถึงคาบการกลับของลม เพื่อความเหมาะสมดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3.

ตารางที่ 3.3. แสดงคาบการกลับสำหรับประเภทของโครงสร้างต่าง ๆ

ประเภทของโครงสร้าง	คาบการกลับ(ปี)
อาคารใช้งานพิเศษที่มีความสำคัญต่อชีวิตและทรัพย์สิน เช่น โรงพยาบาล โรงไฟฟ้า เป็นต้น	100
โครงสร้างมีความสำคัญต่อชีวิตและทรัพย์สิน น้อย เช่น เรือนเกษตร อาคาร โคกเดี่ยว เป็นต้น	25
โครงสร้างใช้งานชั่วคราว เช่น โรงงานก่อสร้าง	5
โครงสร้างชนิดอื่นนอกเหนือจากข้างต้น	50

### 3.5. การศึกษาแบบจำลอง

#### 3.5.1. ข้อกำหนดทางด้านความคล้ายคลึงกัน (Similarity Requirements)

จากการศึกษาทางด้านอากาศพลศาสตร์ พบว่าแรงลมที่เกิดขึ้นบนโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงแรงที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นในตัวโครงสร้างเองนั้นด้วย จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของลมที่พัดเข้าสู่ตัวโครงสร้างนั้น นั่นคือลักษณะของการแปรเปลี่ยนความเร็วลมตามความสูงจากระดับพื้นดิน และความแปรปรวนของลมตลอดจนลักษณะของตัวโครงสร้างเอง

เพื่อให้ผลที่ได้รับจากการทดสอบในอุโมงค์ลม สามารถเป็นตัวแทนของผลที่เกิดขึ้นในสภาพจริงได้ จึงได้มีการตั้งข้อกำหนดทางด้านความคล้ายคลึงกันขึ้นในอันที่จะควบคุมตัวประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องให้มีความสอดคล้องกันทั้งในแบบจริงและแบบจำลอง ตารางที่ 3.4.แสดงมิติของหน่วยตัวแปรในวิศวกรรมชลศาสตร์

ตารางที่ 3.4. มิติของหน่วยตัวแปรในวิศวกรรมศาสตร์[1]

ตัวแปร, หน่วย SI	มิติ
ความยาว (Length), m	L
พื้นที่ (Area), m <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>
ปริมาตร (Volume), m <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>
Second moment of area, m <sup>4</sup>	L <sup>4</sup>
เวลา (Time), sec.	T
ความเร็วเชิงเส้น (Linear Velocity), m/sec.	LT <sup>-1</sup>
ความเร่ง (Acceleration), m/sec <sup>2</sup>	LT <sup>-2</sup>
มวล (Mass), kg	M
Mass Moment of Inertia, kg.m <sup>2</sup>	ML <sup>2</sup>
ความหนาแน่น (Density)	ML <sup>-3</sup>
แรง (Force), N	MLT <sup>-2</sup>
ค่าความหนืดของของไหล (Viscosity), kg/m.s	ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>

พิจารณาแบบจำลองในตัวกลางที่เป็นของไหล โดยทำการสมมุติดังนี้

แรงที่เกิดบนแบบจำลอง, F

ความหนาแน่นของของไหล,  $\rho$

ความเร็วของของไหล, V

มิติของแบบจำลอง, D

ความถี่ธรรมชาติของแบบจำลอง, n

ค่าความหนืดของของไหล,  $\mu$

ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, g

จะได้ความสัมพันธ์

$$F \stackrel{d}{=} F(\rho, V, D, n, \mu, g)$$

$$\text{หรือ } F \stackrel{d}{=} C \rho^\alpha V^\beta D^\gamma n^\delta \mu^\epsilon g^\zeta \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนในรูปมิติ

$$\frac{ML}{T^2} \stackrel{d}{=} (M^0L^0T^0) \left(\frac{ML}{T^3}\right)^\alpha \left(\frac{L}{T}\right)^\beta (L)^\gamma \left(\frac{1}{T}\right)^\delta \left(\frac{M}{LT}\right)^\epsilon \left(\frac{L}{T^2}\right)^\zeta$$

ค่ายกกำลังของมิติเดียวกันด้านซ้ายและขวาต้องเท่ากัน

$$\text{มิติของ } M; 1 = \alpha + \epsilon \tag{3.6.}$$

$$\text{มิติของ } L; 1 = -3\alpha + \beta + \gamma - \epsilon + \zeta \tag{3.7.}$$

$$\text{มิติของ } T; -2 = -\beta - \delta - \epsilon - 2\zeta \tag{3.8.}$$

แก้สมการ (3.6.), (3.7.) และ(3.8.) จะได้ตัวแปรยกกำลังในเทอมของ  $\epsilon$ ,  $\delta$  และ  $\zeta$

$$\alpha = 1 - \epsilon$$

$$\beta = 2 - \epsilon - \delta - 2\zeta$$

$$\gamma = 2 - \epsilon + \delta + \zeta$$

$$F \stackrel{d}{=} \rho^{1-\epsilon} V^{2-\epsilon-\delta-2\zeta} D^{2-\epsilon+\delta+\zeta} n^\delta \mu^\epsilon g^\zeta$$

$$\therefore F \stackrel{d}{=} \rho V^2 D^2 \left(\frac{Dn}{V}\right)^\delta \left(\frac{\mu}{\rho VD}\right)^\epsilon \left(\frac{Dg}{V^2}\right)^\zeta \tag{3.9.}$$

โดยที่  $\stackrel{d}{=}$  แสดงถึงการเท่ากันทางด้านขนาดเท่านั้น

### 3.5.2. กฎความคล้ายทางชลศาสตร์ (Principle of Hydraulic Similitude)

กฎความคล้ายทางชลศาสตร์ระหว่างแบบจริง(Prototype)กับแบบจำลอง(Model) สามารถจำแนกได้เป็น 3 อย่าง คือ ความคล้ายเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity) , ความคล้ายเชิงจลน์ (Kinematic similarity) , ความคล้ายเชิงพลวัต (Dynamic similarity)

#### 3.5.2.1. ความคล้ายเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity)

เป็นความคล้ายทางรูปร่างอัตราส่วน ความยาว ของแบบจริงต่อแบบจำลอง ( $L_r$ ) เป็นค่าคงที่ ดังในสมการที่ (3.10.)

$$\frac{L_p}{L_m} = L_r \tag{3.10.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $L_p$  เป็นความยาวของแบบจริง

$L_m$  เป็นความยาวของแบบจำลอง

อัตราส่วน พื้นที่ ของแบบจริงต่อแบบจำลอง ( $L_r^2$ ) เป็นค่าคงที่ ดังในสมการที่ (3.11.)

$$\frac{A_p}{A_m} = \frac{L_p^2}{L_m^2} = L_r^2 \quad (3.11.)$$

โดย  $A_p$  เป็นพื้นที่ของแบบจริง

$A_m$  เป็นพื้นที่ของแบบจำลอง

อัตราส่วน ปริมาตร ของแบบจริงต่อแบบจำลอง ( $L_r^3$ ) เป็นค่าคงที่ ดังในสมการที่ (3.12.)

$$\frac{Vol_p}{Vol_m} = \frac{L_p^3}{L_m^3} = L_r^3 \quad (3.12.)$$

โดย  $Vol_p$  เป็นปริมาตรของแบบจริง

$Vol_m$  เป็นปริมาตรของแบบจำลอง

### 3.5.2.2. ความคล้ายเชิงจลน์ (Kinematic similarity)

ใช้กับกรณีที่ต้องศึกษาการเคลื่อนที่เช่น การเคลื่อนที่ของอนุภาค สายธารการไหล ดังนั้น ความคล้ายเชิงจลน์นอกจากต้องวิเคราะห์ถึงความคล้ายเชิงเรขาคณิตแล้วยังต้องพิจารณาถึงอัตราส่วน เวลา ของแบบจริงต่อแบบจำลองด้วย ดังในสมการที่ (3.13.)

$$\frac{T_p}{T_m} = T_r \quad (3.13.)$$

ดังนั้น ความเร็ว ซึ่งอยู่ในรูปความยาวต่อเวลา สามารถเขียนอัตราส่วนความเร็วของแบบจริงต่อแบบจำลองได้ ดังในสมการที่ (3.14.)

$$\frac{V_p}{V_m} = \left( \frac{L_p}{L_m} \right) \left( \frac{T_m}{T_p} \right) = \left( \frac{L_p}{L_m} \right) \left( \frac{T_m}{T_p} \right) = \frac{L_r}{T_r} \quad (3.14.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร่ง ซึ่งอยู่ในรูปความยาวต่อเวลายกกำลังสอง สามารถเขียนอัตราส่วนความเร่งของแบบจริงต่อแบบจำลองได้ ดังในสมการที่ (3.15.)

$$\frac{a_p}{a_m} = \left( \frac{L_p}{T_p^2} \right) \left( \frac{L_m}{T_m^2} \right) = \left( \frac{\frac{L_p}{L_m}}{\frac{T_p^2}{T_m^2}} \right) = \frac{L_r}{T_r^2} \quad (3.15.)$$

### 3.5.2.3. ความคล้ายเชิงพลวัต (Dynamic similarity)

ความคล้ายเชิงพลวัต ใช้กับกรณีที่ต้องการศึกษาแรงที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ การไหลของน้ำเป็นปรากฏการณ์ทางชลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแรงต่างๆหลายหลากชนิด การสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางชลศาสตร์ ไม่สามารถจำลองและระบุแรงต่างๆเหล่านั้นใส่ในแบบจำลองได้อย่างครบถ้วน การสร้างแบบจำลองกระทำได้เพียงเพื่อศึกษาแรงที่มีนัยสำคัญเท่านั้น ความคล้ายเชิงพลวัตจึงต้องศึกษาเฉพาะอัตราส่วนแรงนัยสำคัญที่มีผลต่อปัญหานั้นๆ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2 สำหรับรูปทั่วไปของอัตราส่วน แรง ของแบบจริงต่อแบบจำลอง สามารถเขียนได้ ดังในสมการที่ (3.16.) และ (3.17.) ตามลำดับ

$$\frac{F_p}{F_m} = F_r \quad (3.16.)$$

$$\begin{aligned} \frac{F_p}{F_m} &= \frac{m_p \cdot a_p}{m_m \cdot a_m} = \frac{\rho_p \text{Vol}_p a_p}{\rho_m \text{Vol}_m a_m} \\ &= \left( \frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left( \frac{\frac{L_p^3 L_p}{T_p^2}}{\frac{L_m^3 L_m}{T_m^2}} \right) = \left( \frac{\rho_p L_p^4}{\rho_m L_m^4} \right) \times \frac{1}{\left( \frac{T_p^2}{T_m^2} \right)} \\ &= \rho_r \cdot L_r^4 \cdot T_r^{-2} \quad (3.17.) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน มวล ของแบบจริงต่อแบบจำลอง สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$\frac{m_p}{m_m} = \left( \frac{F_p}{a_p} \right) \left( \frac{F_m}{a_m} \right) = F_r \cdot T_r^2 \cdot L_r^{-1} \quad (3.18.)$$

### 3.5.3. แบบจำลองย่อส่วนที่ใช้ในอุโมงค์ลม

การศึกษาแรงลมที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างต่างๆ จำเป็นต้องมีอุโมงค์ลมเพื่อนำมาใช้ทดสอบแบบจำลองย่อส่วน

Melbourne(1972)ได้กำหนดตัวแปรของแบบจำลองอาคารและโครงสร้างต่าง ๆ ที่ได้รับผลกระทบจากแรงลม ดังนี้

$V_G, V_Z, U', V', W', L, n, E, \rho_s, g, \rho, \mu, p, L_s, n_s, \delta$

เมื่อ

$V_G$	ค่าความเร็วลมเกรเดียนต์
$V_Z$	ค่าความเร็วลมที่ความสูง Z
$U', V', W'$	ค่าความเร็วลมกรรโชกในแนวยาว, ด้านข้าง, และ แนวดิ่ง ตามลำดับ
L	มิติของแบบจำลอง
n	ค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลอง
E	โมดูลัสยืดหยุ่น
$\rho_s$	ความหนาแน่นของโครงสร้าง
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
$\rho$	ความหนาแน่นของอากาศ
$\mu$	ความหนืดของอากาศ
p	ความดันของอากาศ
$L_s$	มิติของโครงสร้าง
$n_s$	ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง
$\delta$	สัดส่วนค่าการสลายพลังงานของโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์มิติเชิงหน่วย มี 16 กลุ่มของตัวแปรที่ถูกสรุปจากตัวแปรอิสระนี้และถูกนำมาแสดงได้ดังนี้

Non-dimensional group	Name	Physical meaning
$\frac{V_s}{V_G}$	Velocity Profile	Velocity ratio defines the vertical velocity profile
$\frac{\sigma_U}{V_Z}, \frac{\sigma_V}{V_Z}, \frac{\sigma_W}{V_Z}$	Turbulence intensity	Expression relating total energy of the fluctuating components
$\frac{S_U(n)}{\sigma_U^2}, \frac{S_V(n)}{\sigma_V^2}, \frac{S_W(n)}{\sigma_W^2}$	Normalized power spectral density	Expression giving turbulent energy distribution with respect to frequency
$\frac{nL}{V}$ (L is any related length)	Strouhal number or reduced frequency (or inverse of reduced velocity)	Time scale
$\frac{\rho VL}{\mu}$ (L is any related length)	Reynolds number	$\frac{\text{Inertia force (Fluid)}}{\text{Viscous force (Fluid)}}$
$\frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2}$	Pressure coefficient (or force and moment coefficient)	$\frac{\text{Pressure force (Fluid)}}{\text{Inertia force (Fluid)}}$
$\frac{L}{L_s}$	Length ratio	Ratio of length in boundary layer and structure
$\frac{n}{n_s}$	Frequency ratio	Ratio of frequency or time in boundary layer and structure
$\frac{\rho}{\rho_s}$	Density ratio	$\frac{\text{Inertia force (Structure)}}{\text{Inertia force (Fluid)}}$
$\frac{\rho V^2}{E}$	Cauchy number	$\frac{\text{Inertia force (Fluid)}}{\text{Elastic force}}$
$\frac{V}{\sqrt{Lg}}$	Froude number	$\frac{\text{Inertia force}}{\text{Gravity force}}$
$\delta$ or $\xi$	Logarithmic damping decrement (or critical damping ratio)	$\frac{\text{Energy dissipated / cycle}}{\text{Total energy of oscillation}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มไร้มิติดังกล่าวเป็นเพียงกลุ่มพื้นฐานยังมีกลุ่มอื่นๆอีกที่ถูกใช้สำหรับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมซึ่งถูกเกี่ยวข้องหรือถูกใช้เหมือนกันและสามารถจัดรูปแบบได้โดยนำผลของกลุ่มดังกล่าวมาใช้ ตัวอย่างเช่น แรงและสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้เหมือนกันระหว่างอัตราส่วนแรงหรือสัมประสิทธิ์ความดันลม Strouhal number or reduced frequency สามารถจะใช้แทน Cauchy number หรืออัตราส่วนความหนาแน่นได้

สำหรับอัตราส่วนความคล้ายคลึงที่ถูกต้องระหว่างแบบจำลองและแบบจริง กลุ่มไร้มิตินี้ควรถูกจัดให้เป็นค่าคงที่ สำหรับแบบจำลองและแบบจริง ในทางปฏิบัติสามารถทำได้ยาก และต้องสร้างแบบจำลองให้แข็งแรงทนทาน อย่างไรก็ตามค่าที่บิดเบือนไปของแบบจำลองย่อส่วนควรจะถูกตั้งอยู่บนพื้นฐานของความเข้าใจทางด้านฟิสิกส์และข้อเท็จจริงที่ถูกศึกษามา

### 3.5.4. แบบจำลองโครงสร้างที่นำมาใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงลม

จากการศึกษาการเปลี่ยนรูปโครงสร้างของแบบจำลองในอุโมงค์ลมพบว่า สิ่งที่สำคัญคืออัตราส่วนความยาว, อัตราส่วนเวลาและ อัตราส่วนแรงเฉื่อยของโครงสร้างเช่นเดียวกับแรงลมธรรมชาติที่เกิดกับแบบจำลองซึ่งจะสมบูรณ์ได้ถ้า  $\frac{L}{L_s}, \frac{n}{n_s}, \frac{\rho}{\rho_s}$  มีความสอดคล้องกันนอกจากนั้นยังมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรง (Stiffness) อัตราส่วนความเฉื่อยระหว่างแบบจำลองย่อส่วนและแบบจำลองเต็มส่วนและแรงที่ทำให้เปลี่ยนรูป ซึ่งถูกแสดงโดย Cauchy number  $\left(\frac{\rho V^2}{E}\right)$  จะต้องมีค่าคงที่เช่นเดียวกับอัตราส่วนค่าการสลายพลังงาน (Damping ratio) จะต้องมีค่าคงที่เหมือนกันสำหรับแบบจำลองย่อส่วนและแบบจำลองเต็มส่วน

ก. การได้มาของอัตราส่วนเวลาและความเร็วมีความสำคัญมากในรูปแบบที่ง่ายที่สุดของ Strouhal number (or reduced frequency) จะต้องมีค่าคงที่ในแบบจำลองและแบบจริง

$$\left(\frac{nL}{V}\right)_{\text{model}} = \left(\frac{nL}{V}\right)_{\text{prototype}}$$

$$\frac{n_r L_r}{V_r} = 1$$

$$V_r = n_r L_r$$

หรือ 
$$V_r = \frac{L_r}{T_r} \quad (n_r = \frac{1}{T_r})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ให้ } T_r = \frac{L_r}{V_r}$$

ถ้าแรงโน้มถ่วงของโลกถูกนำมาพิจารณาสำหรับตัวอย่างการโยกตัวในแนวราบของสะพานแขวน, แผ่น โครงสร้างที่ถูกแขวน, การแกว่งของน้ำในอาคารสูง อัตราส่วนของเวลาถูกจำกัดโดย Froude number ดังเช่น

$$\frac{V}{\sqrt{Lg}} = \text{ค่าคงที่}$$

$$V_r = \sqrt{L_r g_r}$$

แต่  $g_r \approx 1$  สำหรับการเคลื่อนที่บนพื้นผิวโลก

$$\text{ให้ } V_r = \sqrt{L_r}$$

$$\text{และ } T_r = \sqrt{L_r}$$

อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้กับความถี่ของลมจำลองค่าต่ำๆ สำหรับแบบจำลองที่มีขนาดเล็ก เป็นการยากที่จะควบคุมให้การไหลแบบปั่นป่วนของชั้น บาวดาร์ เลเยอร์ มีความสม่ำเสมอในอุโมงค์ลม ดังนั้นค่าความเร็วลมต่ำๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า Reynolds number ต่ำๆ เป็นเหตุให้เกิดการความคลาดเคลื่อนในพื้นที่การไหลและการกระจายของความดันส่งผลต่อแรงที่เกิดจากการไหลรอบๆแบบจำลองเทียบกับแบบจริง โดยเฉพาะ โครงสร้างอาคารที่ลักษณะรูปร่างเป็นวงกลม

ข. สำหรับอาคารสูง, สะพานที่อยู่ชั้นบน, ตึกทั่วไปหรือโครงสร้างบางอย่างหรือส่วนของโครงสร้างที่ซึ่งสามารถต้านทานต่อการดัดล้วน (Pure Bending) หรือการบิดได้จากกฎของ Cauchy number สามารถให้เปลี่ยนให้อยู่ในรูปได้ดังนี้

$$\frac{\rho V^2}{E} = \frac{\rho V^2}{\left[ \frac{(EI)}{L^4} \right]} = \frac{\rho V^2}{\left[ \frac{(GJ)}{L^4} \right]} = \text{ค่าคงที่}$$

เมื่อ EI และ GJ คือความแข็งแกร่งต่อการดัดและความแข็งแกร่งต่อการบิดตามลำดับสำหรับ  $\rho_r = 1$

$$(EI)_r = (GJ)_r = L_r^4 V_r^2 \quad (= L_r^5 \text{ สำหรับ Froude number})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. สำหรับเคเบิลหรือชิ้นส่วนที่ต้องต้านทานต่อแรงในแนวแกน จากกฎของ Cauchy number สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปได้ดังนี้

$$\frac{\rho V^2}{E} = \frac{\rho V^2}{\left[\frac{(EA)}{L^2}\right]} = \text{ค่าคงที่}$$

เมื่อ EA คือ แรงต่อหน่วยของความเครียดสำหรับ  $\rho_r = 1$

$$(EA)_r = L_r^2 V_r^2 \quad (= L_r^3 \text{ สำหรับ Froude number})$$

ง. การกระจายมวลของแบบจำลอง สามารถถูกทำให้เหมือนกันได้หลายทางถ้าแบบจำลองย่อส่วนและแบบจำลองเต็มส่วนมีความหนาแน่นของอากาศเท่ากันคือ  $\rho_r = 1$  ดังนั้นจะทำให้อัตราส่วนของแรงเฉื่อยมีค่าคงที่ ความหนาแน่นของโครงสร้างจะเท่ากันนั่นคือ  $\rho_{sr} = 1$  บ่อยครั้งที่ไม่จำเป็นจะต้องทำให้ค่าความหนาแน่นถูกต้องตามค่าอัตราส่วนทั้งหมดในแบบจำลองแต่มีข้อแม้ว่าการกระจายมวลจะต้องมีอัตราส่วนที่ถูกต้องเสมอ

$$m_r = L_r^3$$

การกระจายมวลที่ถูกต้องสามารถถูกแทนที่โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมวล,  $I_M$  สำหรับบางแกนที่สามารถเกิดการหมุนได้

$$I_{Mr} = L_r^5$$

จ. สำหรับสิ่งก่อสร้างที่สูงๆการสั่นไหวจะมีส่วนสำคัญ ซึ่งเกิดจากการแกว่งและการสั่นไหวของชิ้นส่วนที่ยื่น อาจจะถูกทำให้มีลักษณะใกล้เคียงกันโดยทำให้มีรูปร่างเป็นแนวเส้นตรง ในส่วนของการจำลองทางด้านกลศาสตร์ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอากาศ สำหรับวิธีการนี้จะไม่สำคัญเท่าใด วิธีที่ง่ายที่สุดที่จะทำให้ได้ผล คือ การทำให้รูปร่างมีลักษณะพื้นฐานและง่ายๆ โดยใช้สปริงยึดกับแบบจำลองในจุดที่มีแกนหมุนแบบอิสระที่ฐาน วิธีการนี้ได้อ้างถึงแบบจำลองที่สร้างจากไม้ ความแข็งแรงของสปริงถูกกำหนดโดยให้ความถี่ธรรมชาติคงที่จากการสั่น ซึ่งการบิดเบือนถูกกำหนดโดยอัตราส่วนความเร็วที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง ดังตัวอย่างชนิดของแบบจำลองอาคารแบบยึดหยุ่นดัง รูปที่ 3.2.

อัตราส่วนของแบบจำลองต่อแบบจริงคือ

$$\text{โมเมนต์ความเฉื่อยของมวล : } I_{Mr} = L_r^5 \quad \text{สำหรับ } \rho_r = 1 \quad \rho_{sr} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์รอบฐาน :  $H_r = V_r^2 L_r^3$

(ความต้านทานการหมุนรอบแกน)

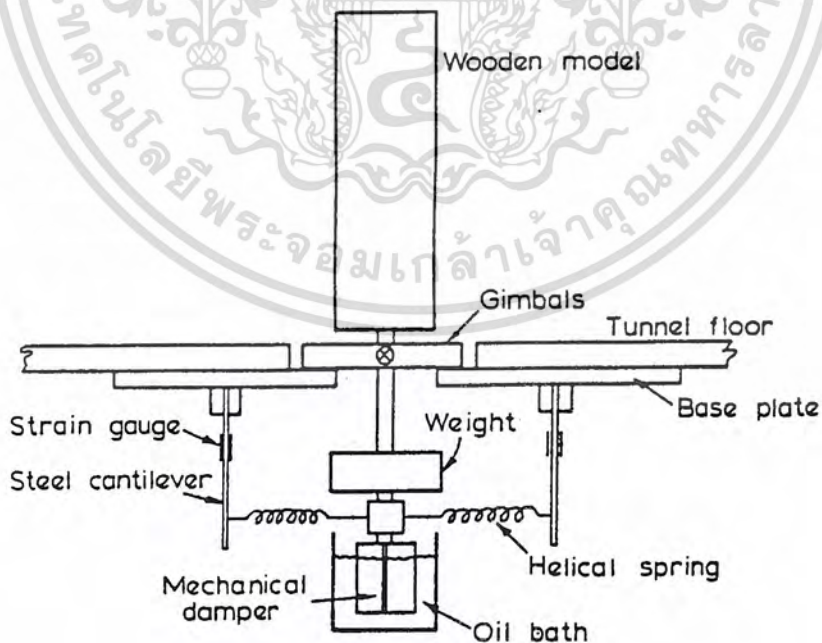
อัตราส่วนของเวลาและความถี่ :  $T_r = \sqrt{\frac{I_{Mr}}{H_r}} = \frac{L_r}{V_r}$

ฉ. สำหรับการศึกษารูปเปลี่ยนรูปของโครงสร้างอาคารที่ซับซ้อนเนื่องจากแรงลมบ่อยครั้งพบว่า จำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการเปลี่ยนรูปและการหมุนจากครั้นไหว ซึ่งจะได้ผลโดยใช้ระบบตัวแปรที่แยกส่วนกันซึ่งมีรูปร่างไม่ต่อเนื่องกันของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ “ก้อนของมวล” จุดประสงค์ของการสร้างแบบจำลองสำหรับแบบจำลองชนิดนี้รวมทั้งความคล้ายคลึงของมวล [M] และความแข็งแรง [K] ทำให้ได้โครงสร้างของแบบจำลองและแบบจริงดังนี้

$$[M]_{\text{Model}} = [M]_{\text{Prototype}} \times L_r^3 \rho_{Sr}$$

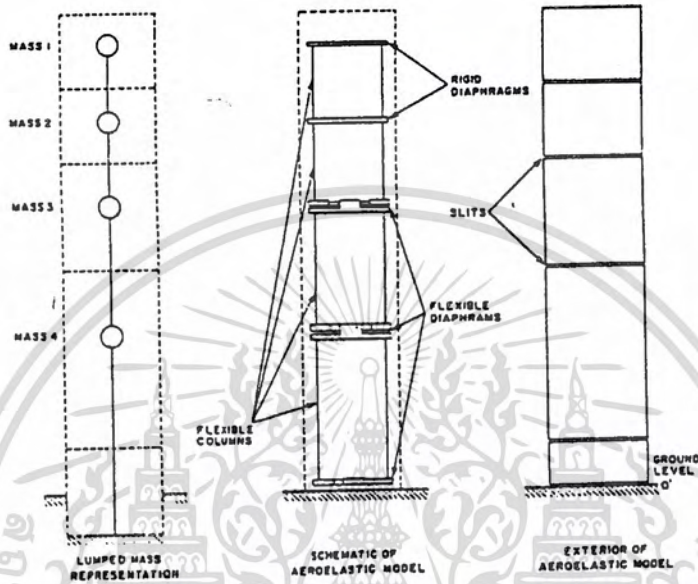
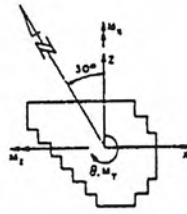
$$[K]_{\text{Model}} = [K]_{\text{Prototype}} \times L_r^3 T_r^{-2} \rho_{Sr}$$

สำหรับก้อนของมวล 7 ก้อนขึ้นไปจะถูกใช้ในโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่าปกติ อย่างไรก็ตามก้อนของมวลเพียง 3 ก้อนก็จะพบว่ามีเหมาะสมเพียงพอสำหรับโครงสร้างที่มีความสูงในระดับปานกลาง (Isyumov, 1982) ตัวอย่างของ multi-degree of freedom ดังแสดงใน รูปที่ 3.3.



รูปที่ 3.2. แบบจำลองที่ใช้สำหรับการทดสอบทางด้านไดนามิกในอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3. multi – degree of freedom

### 3.5.5. ปรัชญาการตีที่มีแรงโน้มถ่วงเป็นค่านัยสำคัญ

การศึกษาแบบจำลองที่ปรากฏการณ์ทางชลศาสตร์มีแรงโน้มถ่วงเป็นค่านัยสำคัญ สามารถเขียนค่าอัตราส่วนแรงของแบบจำลองต่อแบบจริง ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F_r &= \frac{F_p}{F_m} = \frac{m_p g_p}{m_m g_m} \\
 &= \frac{\rho_p g_p L_p^3}{\rho_m g_m L_m^3} = \rho_r g_r L_r^3 \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

สมการที่ (4.13.) เท่ากับสมการที่ (4.14.) จะได้

$$\rho_r \cdot L_r^4 \cdot T_r^{-2} = \rho_r g_r L_r^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการใหม่

$$g_r \cdot L_r = \frac{L_r^2}{T_r^2} = V_r^2$$

หรือ 
$$\frac{V_r}{g_r^{1/2} L_r^{1/2}} = 1 \quad (3.20.)$$

หรือ 
$$\frac{\left[ \frac{V_p}{g_p^{1/2} L_p^{1/2}} \right]}{\left[ \frac{V_m}{g_m^{1/2} L_m^{1/2}} \right]} = 1$$

ดังนั้นจะได้ 
$$\frac{V_p}{g_p^{1/2} L_p^{1/2}} = \frac{V_m}{g_m^{1/2} L_m^{1/2}} = N_F (\text{Froude Number})$$

ในการทำแบบจำลองนั้น มีคุณสมบัติหลายอย่างของสะพานต้นแบบที่มีผลต่อการทดสอบในอุโมงค์ จึงจำเป็นต้องมีหลักการและทฤษฎีเกี่ยวข้องนำมาประยุกต์ใช้ในการทำแบบจำลองอย่างมีเหตุผล จากการพิจารณาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.5.6. ทฤษฎีการย่อส่วน

ก. อัตราส่วนความหนาแน่น (Density Scale,  $\rho_r$ )

$$\left( \frac{\rho_s}{\rho_F} \right)_p = \left( \frac{\rho_s}{\rho_F} \right)_m$$

โดย  $\rho_s$  = ความหนาแน่นของโครงสร้าง (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_F$  = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m<sup>3</sup>)

ในที่นี้ของไหลในการทดสอบ กับของไหลในสภาวะจริงเป็นชนิดเดียวกันคือลม ดังนั้น

$$(\rho_F)_p = (\rho_F)_m$$

เพราะฉะนั้น 
$$(\rho_s)_p = (\rho_s)_m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 
$$\frac{(\rho_s)_p}{(\rho_s)_m} = 1$$

ข. อัตราส่วนขนาด (Length Scale ,  $L_r$ )

$$\left(\frac{D}{L}\right)_p = \left(\frac{D}{L}\right)_m$$

โดย  $D$  = ความกว้างของสะพาน (m)

$L$  = ความยาวของสะพาน (m)

$$\frac{(D)_p}{(D)_m} = \frac{(L)_p}{(L)_m} = L_r$$

จากทฤษฎี Froude Number.  $g_r = 1$  ,  $\rho_r = 1$

ค. อัตราส่วนความเร็ว (Velocity Scale ,  $V_r$ )

จากสมการที่ (3.20.)

$$\frac{V_r}{g_r^{1/2} L_r^{1/2}} = 1$$

$$V_r = L_r^{1/2} \quad ; \quad g_r = 1$$

ง. อัตราส่วนเวลา (Time Scale ,  $T_r$ )

จากตารางที่ (3.4.)  $V$  มีมิติคือ  $LT^{-1}$

$$V_r = L_r T_r^{-1}$$

จากข้อ ค.  $V_r = L_r^{1/2}$

$$L_r^{1/2} = \frac{L_r}{T_r}$$

$$T_r = L_r^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ. อัตราส่วนโดยมวล(Mass Scale ,  $M_r$ )

$$M_r = \rho_r(\text{Vol}_r) = \text{Vol}_r \quad : \quad \rho_r = 1$$

จากตารางที่ (3.4.) Vol มีมิติคือ  $L^3$

$$M_r = \text{Vol}_r = L_r^3$$

ฉ. อัตราส่วนแรง(Force Scale ,  $F_r$ )

จากตารางที่ (3.4.) F มีมิติคือ  $MLT^{-2}$

$$F_r = M_r L_r / T_r^2$$

จากข้อ ง.  $T_r = L_r^{\frac{1}{2}}$

$$F_r = \frac{M_r L_r}{\left(L_r^{\frac{1}{2}}\right)^2} = M_r$$

จากข้อ จ.  $M_r = L_r^3$

$$F_r = M_r = L_r^3$$

ช. อัตราส่วนโมเมนต์ความเฉื่อยของมวล (Mass Moment of Inertia Scale ,  $I_{Mr}$ )

จากตารางที่ (3.4.)  $I_{Mr}$  มีมิติคือ  $ML^2$

$$I_{Mr} = M_r L_r^2$$

จากข้อ ค.  $M_r = L_r^3$

$$I_{Mr} = L_r^3 L_r^2 = L_r^5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5. สรุป Scale Ratio ของคุณสมบัติที่นำมาสร้างแบบจำลองสะพาน

Description	Scale Ratio
ความยาว(Length)	$L_r$
พื้นที่(Area)	$L_r^2$
ปริมาตร(Volume)	$L_r^3$
เวลา(Time)	$L_r^{\frac{1}{2}}$
ความเร็ว(Velocity)	$L_r^{\frac{1}{2}}$
แรง(Force)	$L_r^3$
มวล(Mass)	$L_r^3$
Second Moment of Area	$L_r^4$
Mass Moment of Inertia	$L_r^5$

### 3.6. การจำลองสภาพลมบริเวณที่ตั้งโครงการ

จากการที่โครงการตั้งอยู่ในทะเลเรียบชายฝั่งอ่าวไทย ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับสภาพภูมิประเทศพื้นที่ชายฝั่ง จากข้อกำหนดของ ANSI A58.1-1982 [3] หรือสภาพภูมิประเทศที่มีผิวเรียบมาก ตามข้อกำหนดของ Davenport[4] ค่าความสูงเกรเดียนต์และค่าตัวเลื่อยกกำลัง มีค่าเป็น 245 เมตรและ 0.12 ตามลำดับ จากสมการที่ (3.3.)

$$\frac{V}{V_G} = \left( \frac{H}{245} \right)^{0.12} \quad (3.21.)$$

พิจารณาความเร็วลมสูงสุดสำหรับคาบการกลับที่ 50 ปี ในระดับความสูงประมาณ 10 เมตร ที่ระดับบนสุดของโครงสร้างสะพาน จากการศึกษาของหน่วยวิจัยแผ่นดินไหวและการสั่นสะเทือน [2,9] พบว่าความเร็วลมสูงสุดสำหรับสภาพภูมิประเทศเปิดโล่งเหนือพื้นน้ำที่ระดับความสูง 10 เมตร มีค่าเป็น 29.60 เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากสมการที่ (3.3.) ความเร็วลมเกรเดียนต์สำหรับคาบการกลับที่ 50 ปี สำหรับสภาพภูมิประเทศที่มีผิวเรียบมาก สามารถหาได้ดังนี้

$$V_G = \frac{V}{\left(\frac{H}{245}\right)^{0.12}}$$

$$= 43.45 \text{ เมตร/วินาที}$$

ดังนั้นสภาพลมบริเวณที่ตั้งโครงการสำหรับคาบการกลับที่ 50 ปี สามารถแสดงด้วยกฎยกกำลัง

$$V = \frac{43.45}{\left(\frac{H}{245}\right)^{0.12}} \quad (3.22.)$$

เนื่องจากสะพานเส้นทางลัดสู่ภาคใต้ในช่วงที่นำมาศึกษามีส่วนล่างสุดของสะพานอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 10 เมตร และส่วนบนสุดของสะพานอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 17 เมตร ดังนั้นความเร็วลมที่ระดับความสูงดังกล่าวโดยคำนวณได้จากสมการที่ 5-2 มีค่าเท่ากับ 29.60 และ 31.55 เมตร/วินาที ตามลำดับ

### 3.6.1. ความเร็วลมสูงสุด (Extreme Maximum wind , Knots)

ตารางที่ 3.6. Extreme Maximum wind , Knots (PHETCHABURI STATION)

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2526	20	22	20	23	25	25	22	20	15	26	30	20	30
2527	38	25	25	23	21	24	20	20	40	20	18	15	40
2528	20	25	45	25	28	20	20	17	20	22	25	18	45
2529	15	18	19	20	35	19	16	18	20	15	21	18	35
2530	16	20	18	18	20	30	15	18	17	30	22	14	30
2531	11	17	23	20	28	22	30	20	18	20	15	16	30
2532	16	18	22	22	21	18	22	26	17	16	20	15	26
2533	19	24	25	22	30	17	20	15	15	16	35	22	35
2534	15	15	18	30	23	20	20	15	13	15	15	15	30
2535	15	22	22	30	18	15	16	18	12	30	18	15	30
2536	18	18	15	15	20	20	16	15	16	20	12	15	20
2537	13	13	20	30	12	15	12	12	26	27	15	12	30
2538	12	15	17	15	14	14	14	15	15	14	12	15	17
2539	16	12	15	35	24	24	20	12	15	20	12	12	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2540	12	12	20	12	14	12	12	12	14	20	25	8	25
2541	12	15	15	13	20	11	15	13	12	20	-	-	-
2542	-	46	25	14	15	12	12	15	10	15	20	12	-
2543	12	12	20	25	20	25	17	21	15	-	15	13	-
2544	15	16	13	15	20	16	18	20	14	29	18	13	29
2545	20	16	19	26	24	17	18	16	18	25	-	-	-
2546	-	20	22	20	-	-	-	19	25	-	-	-	-
Ext.	38	46	45	35	35	30	30	26		30	35	22	46

ตารางที่ 3.7. Extreme Maximum wind , Knots (PILOT STATION)

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2526	28	28	30	35	35	35	35	37	33	34	30	27	37
2527	25	25	30	25	30	30	32	32	35	23	25	27	35
2528	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2529	31	31	37	32	99	40	45	50	56	35	37	26	99
2530	32	35	47	55	30	36	32	46	42	47	45	36	55
2531	28	32	29	35	32	33	43	40	30	32	33	34	43
2532	28	28	30	28	48	37	35	33	47	40	40	32	48
2533	30	30	35	55	45	38	36	40	35	40	38	39	55
2534	28	45	42	35	40	38	35	40	32	32	32	26	45
2535	30	29	35	38	55	40	37	30	41	42	40	35	55
2536	38	27	28	30	50	38	40	40	38	38	30	32	50
2537	30	35	38	40	30	40	42	30	32	60	35	24	60
2538	26	34	30	46	45	42	40	35	32	38	30	32	48
2539	27	34	28	36	53	55	35	40	33	37	30	30	55
2540	30	26	31	37	32	42	38	35	35	50	40	29	50
2541	30	29	30	55	43	30	40	46	32	55	35	37	55
2542	26	30	37	32	35	32	30	31	30	33	28	36	37
2543	31	26	36	26	30	40	41	37	35	42	32	24	42
2544	29	25	38	25	40	28	30	28	31	31	30	30	40
2545	33	24	28	45	36	42	36	35	45	25	35	35	45
2546	28	33	40	30	40	40	35	45	37	-	-	-	-
Ext.	38	45	47	55	99	55	45	50	56	60	45	39	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2. พายุที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทย

ตารางค่าความเร็วลมสูงสุดของพายุที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทย พ.ศ. 2531-2545 แสดง  
ในภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

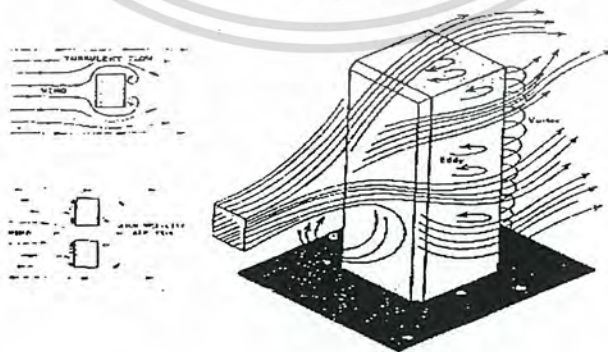
### การศึกษาผลกระทบของแรงลมต่อสะพาน

#### 4.1. อาคารกับแรงลม

นอกจากการคำนวณ โครงสร้างเพื่อให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักอาคารและน้ำหนักใช้งานซึ่งเป็นแรงในแนวดิ่งแล้ว ยังต้องคำนึงถึงแรงด้านข้างหรือแรงที่กระทำในแนวราบได้ ซึ่งมีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยแรงด้านข้างที่มีผลต่ออาคารนั้นมี 3 แรงหลัก ๆ ด้วยกัน คือ แรงลม , แรงจากแผ่นดินไหวและแรงดันดินและน้ำ ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะแรงลมเท่านั้น ซึ่งแรงลมนี้มีผลมากต่อโครงสร้างสะพานในทะเลน้ำลึก ผลกระทบนี้เริ่มมีบทบาทและความสำคัญมากขึ้น ตามความสามารถในการต่อต้านออกแบบสะพานให้มีความสูงและน้ำหนักเบามากขึ้น โดยอาศัยเทคโนโลยีการก่อสร้างต่าง ๆ ดังนั้นค่าสถิติเฟนสของ โครงสร้างสะพานซึ่งเป็นส่วนช่วยในการรับและกระจายแรงด้านข้าง จึงมีความสำคัญเพิ่มขึ้นทดเทียบกับกำลังของวัสดุที่ใช้ นอกจากนี้เสถียรภาพความมั่นคงของโครงสร้างสะพานเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญเพิ่มมากขึ้น

##### 4.1.1. แรงลม

ลักษณะของแรงลมเมื่อพัดผ่านสิ่งกีดขวางหรืออาคารจะมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลวไหลผ่านสิ่งกีดขวางโดยกระแสลมจะไหลผ่านด้านข้างและรวมตัวกันใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.12. แรงลมที่ปะทะกับอาคารจะมีความดันเป็นบวกหรือแรงเข้าสู่อาคาร ส่วนมวลอากาศที่ไม่ปะทะกับอาคารโดยตรงความดันอากาศบริเวณนั้นจะเป็นความดันลบและลมวนจะเกิดขึ้นที่บริเวณนี้



รูปที่ 4.1. แสดงการไหลของลมผ่านสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงกระทำของลมพิจารณาในรูปความดันที่กระทำต่อผิวอาคาร พื้นฐานของความดันคือการแปลงพลังงานจลน์จากการเคลื่อนตัวของมวลอากาศ โดยแปลงให้เป็นความดันสถิตย์ โดยความดันนี้มีส่วนสัมพันธ์กับความสูง พื้นที่และลักษณะอาคาร ซึ่งได้แสดงไว้ในเรื่องการคำนวณแรงลม แรงลมที่เกิดขึ้น มีผลต่ออาคารดังนี้

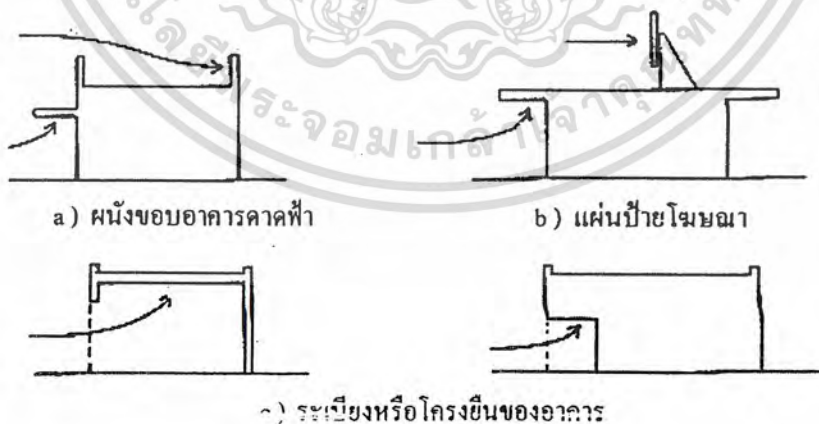
#### 4.1.2. ผลกระทบแรงลมต่ออาคาร

##### 4.1.2.1. แรงในแนวราบของอาคาร

เมื่อมีลมปะทะกับอาคารมีผลทำให้เกิดแรงลมขึ้นซึ่งเป็นแรงด้านข้างของอาคาร โดยแรงที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคาร ในรูปแบบอาคารสมมาตรและรูปทรงลักษณะง่ายทั่วไปแรงลมมีค่าสูงสุดที่ส่วนบนสุดและสามารถคำนวณได้โดยวิธีแรงดันสถิตย์ แรงในแนวราบที่เกิดขึ้นจะกระจายสู่องค์อาคารต่าง ๆ ทั้งเป็นแรงตามแกน แรงเฉือนและโมเมนต์ ซึ่งมีผลต่อเนื่องในอาคาร เช่น การเคลื่อนตัวป็นแนวราบ, โมเมนต์การพลิกคว่ำ, การแอ่นตัวของเสาหรือคาน เป็นต้น

##### 4.1.2.2. แรงลมต่อส่วนยื่นของอาคาร

เมื่อมีบางส่วนของอาคารยื่นออกมา เช่น ระเบียง แรงลมที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ทั้งแรงกดและแรงยกขึ้นโดยเป็นผลตามทิศทางการลม ในส่วนนี้จะมีผลสำหรับอาคารที่มีลมพัดแรงซึ่งต้องออกแบบการยึดรับเพื่อรับแรงที่เกิดขึ้นได้

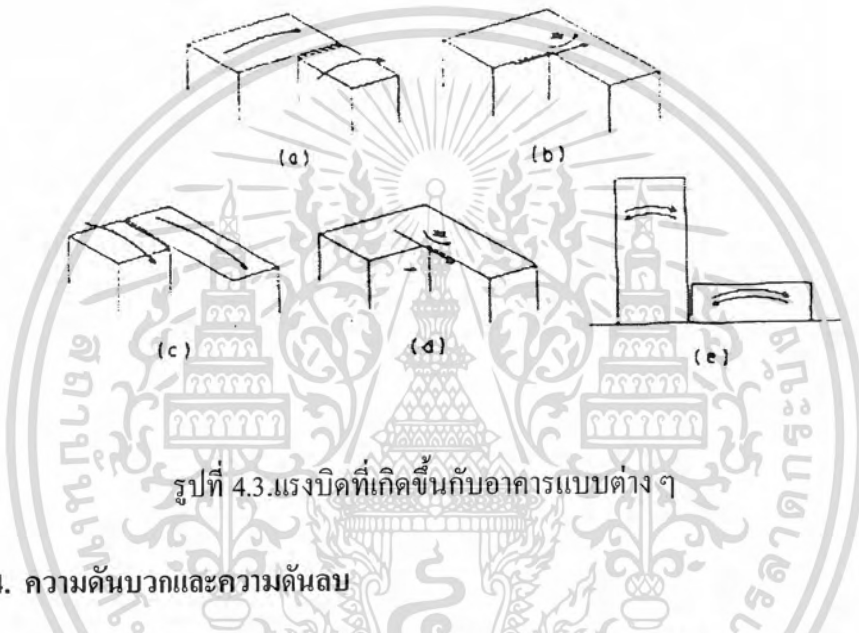


รูปที่ 4.2. แรงลมต่อส่วนยื่นของอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.3. การบิดตัวของอาคาร

นอกจากค่าแรงปกติที่เกิดขึ้นแล้วในกรณีที่อาคารหรือระบบต้านทานแรงด้านข้างมีความไม่สมมาตร นั่นคือ จุดศูนย์กลางของแรงและจุดศูนย์กลางของความแกร่งไม่อยู่ตำแหน่งเดียวกัน นอกจากนี้อาคารเดียวกันที่มีความสูงไม่เท่ากัน ใหญ่เล็กต่างกันมีผลต่อแรงกระจายที่เกิดขึ้น แรงลมที่กระจายไม่เท่ากันทำให้เกิดการบิดขึ้นกับอาคาร ดังรูปที่ 4.3.



รูปที่ 4.3.แรงบิดที่เกิดขึ้นกับอาคารแบบต่าง ๆ

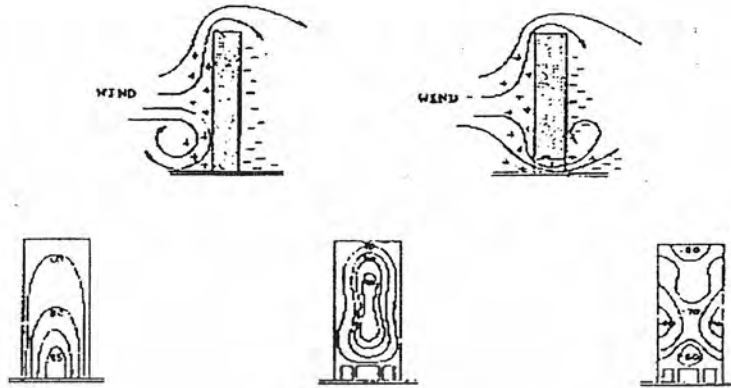
#### 4.1.2.4. ความดันบวกและความดันลบ

ลมทำให้เกิดความดันบวกซึ่งเป็นแรงอัดและความดันลบซึ่งเป็นแรงดูด โดยที่แรงอัดจะเกิดขึ้นที่ผิวปะทะแรงลมซึ่งเป็นทางเหนือลม( Windward ) แรงดูดเกิดที่ผิวขนานแรงลมและผิวใต้ลม(Leeward )แรงที่เกิดขึ้นที่ผิวอาคารจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงในการติดตั้งผนังภายนอก นอกจากนี้ในส่วนหลังอาจเกิดแรงดูดที่ทำให้เกิดการยกตัวขึ้นทำให้ต้องมีการคำนึงถึงการยึดรั้งที่พอเพียง สิ่งที่ต้องพิจารณาอย่างหนึ่งในเรื่องนี้คือลักษณะอาคาร อาคารที่มีลักษณะแตกต่างกันไปจะมีผลต่อความดันบวกและลบที่เกิดขึ้น ในการออกแบบอาคารที่มีผลกระทบของแรงลมมากจึงจำเป็นต้องพิจารณาให้รอบคอบ

#### 4.1.2.5. การแกว่งตัวของอาคาร

ในกรณีที่ลมมีการเปลี่ยนแปลงทั้งความแรงหรือทิศทางหากการเคลื่อนตัวมีความสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของอาคาร อาคารจะสั่นแรงและมากขึ้น โดยเป็นผลจากการสั่นพ้องในการแกว่งตัวหรือการเคลื่อนตัวของอาคารมีผลต่อความรู้สึกของผู้ใช้อาคาร หากการเคลื่อนตัวมากเกินไปผู้ใช้อาคารอาจรู้สึกไม่สบายได้เป็นผลเสียแก่ผู้ใช้อาคาร

เอกสารฉบับนี้เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางวิศวกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4. แรงดันบวกและลบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของอาคาร

## 4.2. สะพานกับแรงลม

โดยทั่วไปในการพิจารณาออกแบบให้สะพานสามารถต้านทานแรงลมได้นั้น ได้กำหนดการพิจารณาอยู่ 2 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่

### 4.2.1. Flutter (การสูญเสียเสถียรภาพ)

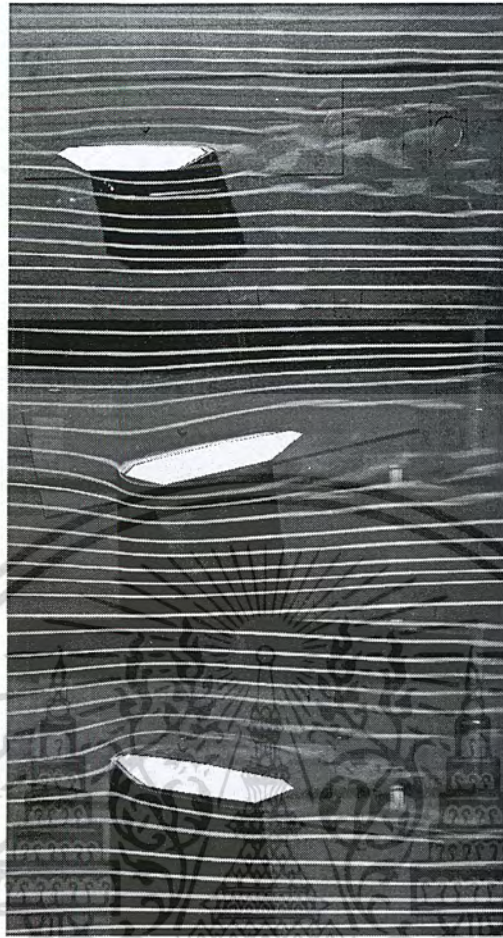
ลักษณะลมที่ทำให้สะพานเคลื่อนขึ้นลง หรือบิดซ้ายขวา หรือรวมกันทั้งสองลักษณะ ดังรูปที่ 4.5. ถ้าหากการเคลื่อนตัวมีมากก็จะทำให้สะพานเสียหายได้ รูปร่างของหน้าตัดสะพานจะมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สะพานที่มีความหนาจะมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนตัวแบบบิดไปมา สะพานที่มีความบางหรือมีรูปร่างที่ลมเคลื่อนผ่านสะดวกจะมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนตัวขึ้นลง รายละเอียดของข้างสะพานจะเป็นตัวกำหนด ความเร็วลมที่ทำให้สะพานกระพือหรือสะบัด

### 4.2.2. Vortex (การสั่นเนื่องจากลมหมุนวน)

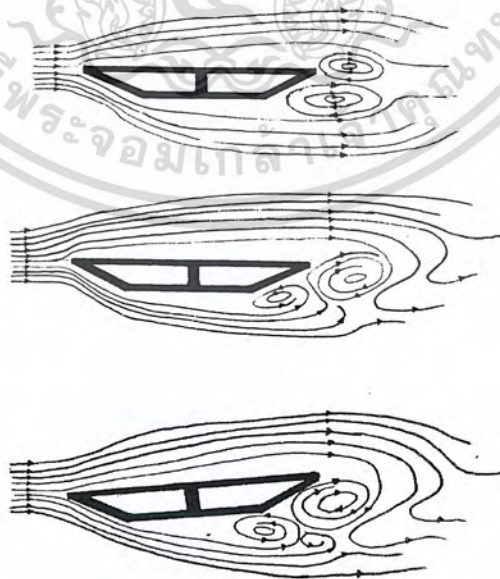
ลักษณะที่ลมหมุนวนบริเวณด้านหลังส่วนของสะพานที่บังลมไว้ เช่น พื้นสะพาน เสากระโดงสะพาน สายเคเบิลสะพาน ดังรูปที่ 4.6. ลมหมุนดังกล่าวจะทำให้สะพานเกิดการสั่น ถ้าหากความถี่ของการสั่นดังกล่าวเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพานแล้วก็จะเกิดการสั่นที่รุนแรง ดังนั้นสะพานจะต้องออกแบบให้เกิดการสั่นดังกล่าวน้อยเมื่อความเร็วลมอยู่ช่วงที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้ผู้ใช้สะพานรู้สึกว่าการสั่นมากและไม่ให้เกิดความล้า(Fatigue)

สรุปได้ว่าที่ค่าความเร็วลม(V) ที่ความเร็วหนึ่งที่ส่งผลให้ลมมีการไหลวนมีวนตัวมีความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งความถี่นี้มีความถี่เท่ากับความถี่ของสะพาน จะเรียก ปรากฏการณ์นี้ว่า “ Vortex ”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5. ลักษณะลมที่ทำให้สะพานเคลื่อนที่ขึ้นลงหรือบิดซ้ายขวา

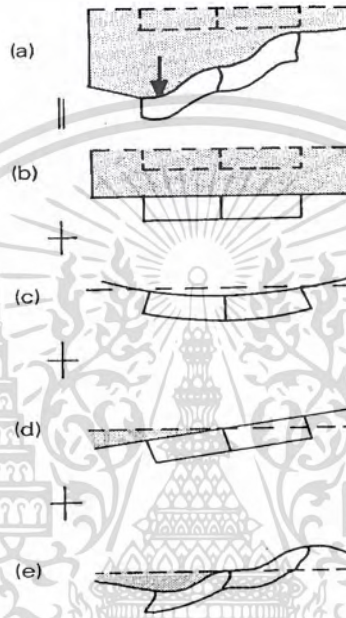


รูปที่ 4.6. ลักษณะการไหลของลมแบบหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3. รูปแบบพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของสะพาน

รูปแบบพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานเมื่อมีแรงกระทำ รูปที่ 4.7. แสดงลักษณะพฤติกรรมการเคลื่อนที่ และการเปลี่ยนรูปของหน้าตัด ซึ่งเกิดจาก โมเมนต์คดตามแนวยาว (Longitudinal bending) , โมเมนต์คดตามแนวขวาง (Transverse bending) , การบิด (Torsion) และ การผิดรูป (Distortion)



รูปที่ 4.7. Principal modes of deformation: (a) total; (b) longitudinal bending; (c) transverse bending; (d) torsion; and (e) distortion.

#### 4.3.1. การโก่งคดตามแนวยาว (Longitudinal bending)

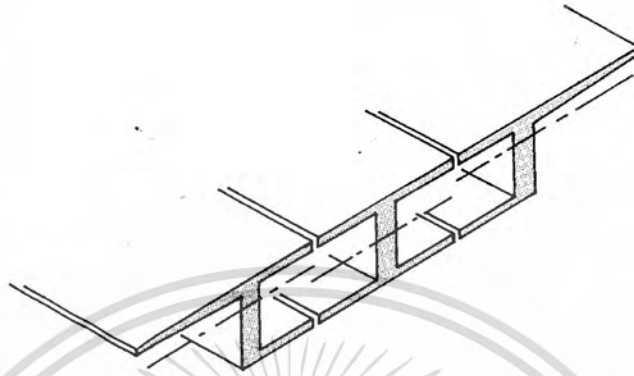
พฤติกรรมของโมเมนต์คดตามแนวยาว สามารถอธิบายได้โดยวิธีการแบ่งส่วนบนของสะพานตามแนวยาวระหว่างแกนตั้งคร่าว ๆ ให้ได้คานที่มีลักษณะเป็นรูปตัวไอ ดังรูปที่ 4.8. ความเค้นคดตามแนวยาวบนหน้าตัดดังรูป 4.9.(a) ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับคานรูปตัวไอ โดย

$$\frac{\sigma}{z} = \frac{M}{I} = \frac{E}{R} \quad (4.1.)$$

การกระจายของความเค้นเนื่องซึ่งเกิดจากการคดงอก็มีลักษณะเหมือนกับคานรูปตัวไอ เช่นเดียวกัน สมการสำหรับแรงเฉือนตามขวางและตามยาวที่จุดใด ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \frac{S_M \bar{A} z}{I} \quad (4.2.)$$



รูปที่ 4.8. Cellular deck split up into I-beams by cuts along centres of cells.



รูปที่ 4.9. Flexure of edge beam about its own neutral axis :  
(a) bending stresses and (b) shear flow.

โดยที่  $A, \bar{z}$  คือ พื้นที่และระยะจากจุดศูนย์กลางถ่วงของส่วนของปีกคานส่วนที่อยู่เหนือจุดที่พิจารณา ตามลำดับ

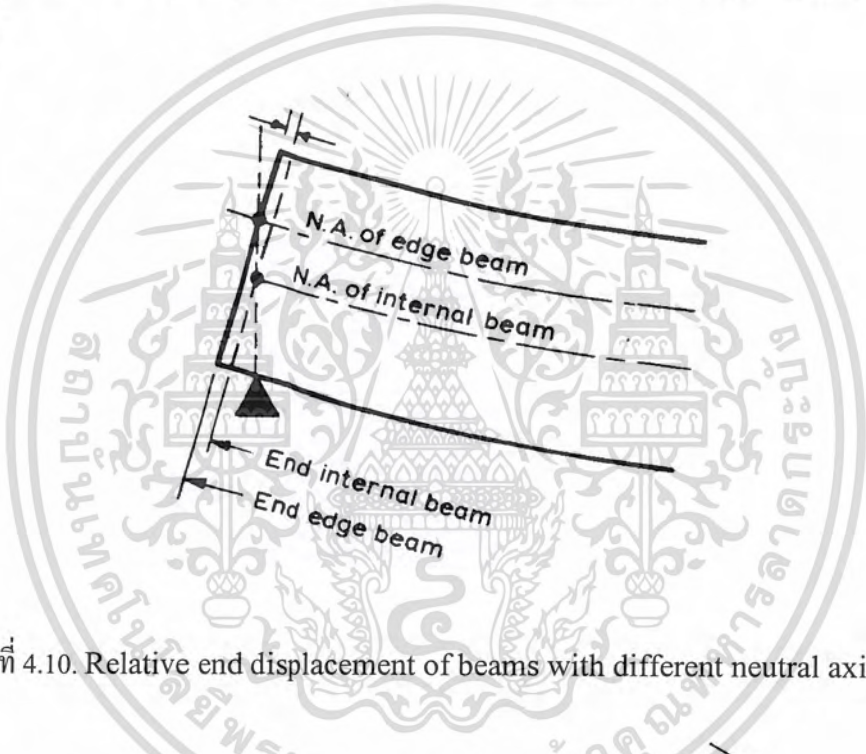
$S_M$  คือ แรงเฉือนในแนวตั้งของคานรูปตัวไอเนื่องจากการตัด โดย

$$S_M = \frac{dM}{dx} \quad (4.3.)$$

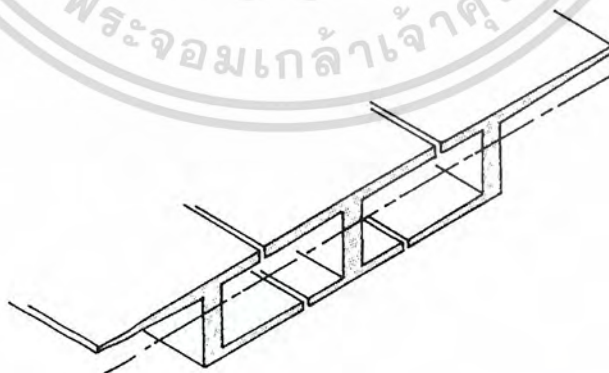
$S_M$  เป็นเพียงส่วนหนึ่งของแรงเฉือนทั้งหมดในแกนตั้ง โดยยังมีอีกส่วนหนึ่งคือ  $S_T$  เนื่องจากการบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.8. แสดงการตัดตามแนวกลางระหว่างแกนตั้ง ถ้าจุดศูนย์กลางของคานอยู่ในระดับที่ต่างกันดังเช่นในกรณีเมื่อคานตัวริมมีส่วนบนเป็นลักษณะของพื้นยื่น การยึดคานตามแนวแกนสะเทินของตัวมันเองแต่ละระดับจะมีค่าเท่ากับ ศูนย์ ในรูปที่ 4.10. หน้าตัดที่บริเวณใกล้ขอบจะหมุนรอบจุดที่ระดับต่างกันและมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวตามแนวยาว การเคลื่อนตัวนี้ถูกต้านและถูกทำให้ลดลงโดย ความแกร่งต่อแรงเฉือน(shear stiffness) ที่สูงมากของพื้นทั้งบนและล่าง คานทั้งหมดถูกบังคับให้ห่อรอบแกนสะเทิน โดยสอดคล้องกับแกนหลักของทุกส่วนที่ถูกแบ่ง เพราะฉะนั้น คุณสมบัติของหน้าตัดของคานรูปตัวไอ จะถูกแสดงโดยชิ้นส่วน Grillage ควรจะถูกคำนวณรอบแกนหลักของส่วนที่ถูกแบ่งนั้น ความเค้นคดถูกคำนวณจากคุณสมบัตินี้ ตามสมการที่ (4.1.) โดยที่  $z$  วัดจากแกนสะเทินปกติ



รูปที่ 4.10. Relative end displacement of beams with different neutral axis.



รูปที่ 4.11. Cellular deck split up into I-beams with common neutral axis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าการแบ่งย่อยให้เป็นคานารูปตัวไอนั้นจะเป็นการทำที่ไม่มีหลักการ ความเค้นที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.1). ก็สามารนำมาใช้ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของตำแหน่งที่ตัดจะมีผลต่อการกระจายโมเมนต์อย่างมาก แต่สัดส่วนของ  $M/I$  สำหรับคาน Grillage ใด ๆ ยังคงมีผลคงที่ และไม่มีผลต่อการคำนวณหาความเค้นคัด อย่างไรก็ตามการคำนวณหากระแสแรงเฉือนตามสมการที่ (4.2.) สามารถทำได้โดยการประมาณ เนื่องจากพื้นที่ของส่วนปีก(A) มีค่าไม่แน่นอน ค่าความคลาดเคลื่อนสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการตัดแบ่งให้เป็นคานารูปตัวไอโดยให้จุดศูนย์กลางถ่วงอยู่บนแกนหลักของส่วนที่ถูกแบ่ง ดังรูปที่ 4.11. เป็นแบบง่าย ๆ ของการตัดพื้นที่เพื่อให้แต่ละแกนตั้งเป็นสัดส่วนเดียวกันระหว่างพื้นบนและล่าง เมื่อเกิดการคัด แนวแกนสะเทินของคานทั้งหมดจะอยู่ในระดับเดียวกัน และการกระจายของความเค้นคัดและกระแสแรงเฉือนจะเป็นดังรูปที่ 4.12. ความเค้นคัดอธิบายได้โดยสมการที่ (4.1.) โดยที่  $I$  เป็น โมเมนต์ความเฉื่อยของคานที่ไม่สมมาตรตามรูปที่ 4.11. และ  $z$  เป็นระยะทางจากแกนสะเทินของคาน กระแสแรงเฉือน ที่เกิดจากการคัดมีความแม่นยำถูกต้อง สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (4.2.) โดยที่  $A, \bar{z}$  และ  $I$  มีความสัมพันธ์กับหน้าตัดตามรูปที่ 4.12



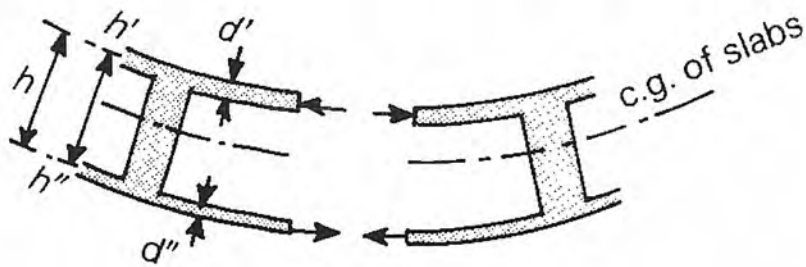
รูปที่ 4.12. Flexure of edge beam with centroid on neutral axis of deck :  
(a) bending stresses and (b) shear flow.

#### 4.3.2. การโค้งคัดตามแนวขวาง (Transverse bending)

การโค้งคัดตามแนวขวางแสดงดังรูปที่ 4.13. การโค้งคัดของพื้นส่วนบนสุดและล่างสุดจะสอดคล้องกับแนวระดับแกนสะเทิน การโค้งคัดในกรณีนี้ไม่รวมการโค้งคัดเนื่องจากการผิดรูปดังรูปที่ 4.7.(e) โมเมนต์ความเฉื่อยของ grillage members ในแนวขวางถูกคำนวณรอบจุดศูนย์กลางถ่วงพื้นดังสมการ

$$i_t = (h'^2 d' + h''^2 d'') = \frac{h^2 d' d''}{d' + d''} \text{ per unit length} \quad (4.4.)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13. Transverse bending.

โดยที่  $d'$ ,  $d''$ ,  $h'$ ,  $h''$  เป็นความหนาของพื้นและระยะทาง centroid ดังรูปที่ 4.13.

การวิเคราะห์ Grillage ไม่คำนึงถึงผลจากอัตราส่วนปัวของต่อโมเมนต์ตามยาวและตามขวาง ใน deck ที่แคบจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย และ deck จะมีการโก่งขึ้นที่ส่วนกลางในทางแนวขวาง ดังเช่น คานที่อยู่ภายใต้โมเมนต์จากการ โค้งลงตามแนวยาวอย่างไรก็ตามใน deck ที่กว้าง ๆ จะมีความแข็งแรงเพียงเล็กน้อยสำหรับการต้านการเปลี่ยนรูป การคำนวณหาโมเมนต์ตามขวางจำเป็นต้องพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อน โมเมนต์ตามขวางที่เกิดจากโมเมนต์ตามยาวที่กระทำตามขวางอาจมีขนาดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ โมเมนต์ตามขวางที่เกิดจากการ โค้งลงทางขวาง

### 4.3.3. การบิด (Torsion)

การบิด อธิบายได้ในรูปของแรงเฉือนและการเปลี่ยนรูปซึ่งทำให้เกิดการบิดของ deck รูปที่ 4.7.(d) โดยไม่รวมผลจากการผิดรูปของหน้าตัดดังรูปที่ 4.7.(e)

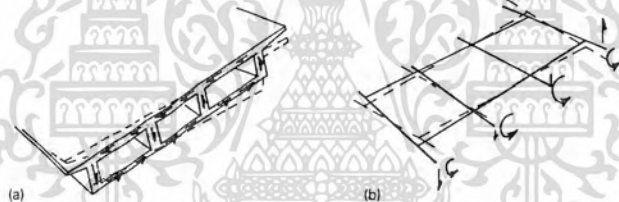
เมื่อ cellular deck เกิดการบิดตัวจะทำให้เกิดกระแสแรงเฉือนตามพื้นล่างและบนและแกนตั้งดังรูปที่ 4.14. (a) โดยมากกระแสแรงเฉือนจะไหลไปตามเส้นรอบรูปไปตามพื้นและแกนตั้งแต่บางครั้งก็จะไหลผ่านตรงกลางแกนตั้ง (intermediate webs) เมื่อ grillage ถูกบิดหน้าตัดขวางจะเปลี่ยนรูปเป็นดังรูปที่ 4.14.(b) แรงบิดทั้งหมดบนหน้าตัดเกิดจากแรงบิดในชิ้นส่วนตามแนวยาวและแรงเฉือนทั้งสองฝั่งของพื้น แรงเฉือนจะเท่ากับแรงบิดในชิ้นส่วนตามขวางดังรูปที่ 4.14. (a) จากการตัดแผ่นพื้นระหว่าง webs ดังรูปที่ 4.16. จะเห็นว่าแรงบิดใน grillage เท่ากับแรงบิดใน deck ซึ่งเกิดจากกระแสแรงเฉือนที่ต้านในส่วนบนสุดและล่างสุดของแผ่นพื้นโดยแรงเฉือนใน grillage  $S_T$  คือกระแสแรงเฉือนในแกนตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงต้านทานการบิดในชิ้นส่วนตามยาวและตามขวางจะเท่ากันค่าคงที่การบิดคิดเป็นสองชั้นของพื้นที่ที่มีความหนาเท่ากัน

$$c = 2(h'^2 d' + h''^2 d'') = 2 \frac{h^2 d' d''}{d' + d''} \text{ per unit width of cell.} \quad (4.5.)$$

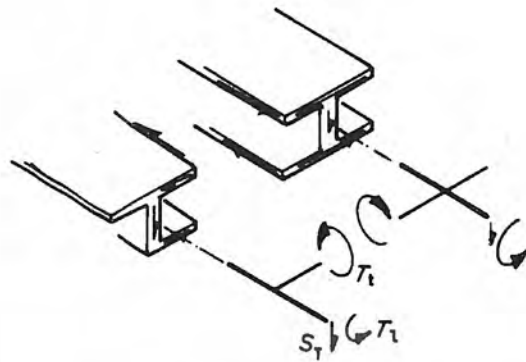
ค่าคงที่นี้จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าคงที่การบิดของ St Venant ผลรวมของค่าความแข็งแรงต่อการบิดของชิ้นส่วนตามแนวยาวใน grillage เป็นเพียงครึ่งหนึ่งของค่าความแข็งแรงต่อการบิดของ St Venant ของหน้าตัดซึ่งถูกพิจารณาเหมือนคานหนึ่งตัวสิ่งนี้จะเป็นจริงเมื่อ grillage ถูกบิดโดยแรงบิดในชิ้นส่วนตามแนวยาวจะมีค่าเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของแรงบิดรวมบนหน้าตัด ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะเป็นค่าแรงเฉือนต้านในแนวตั้งในด้านตรงกันข้ามของ deck เมื่อ deck ถูกหมุนโดยแรงที่มีทิศทางตรงข้ามกันบนหน้าตัดดังรูปที่ 3.12. ระหว่างค่าคงที่การบิดของพื้นและคานจะไม่สัมพันธ์กันอย่างไรก็ตามการเท่ากันของระบบแรงทางด้าน statical ของ grillage และ cellular deck ยังคงถูกควบคุมไว้



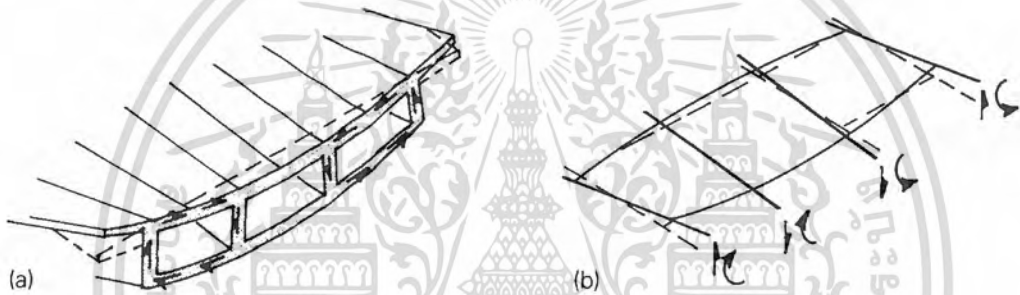
รูปที่ 4.14. Torsion forces on cross – section of twisted deck and grillage:  
(a) shear flows in deck and (b) torques and shear forces in deck.



รูปที่ 4.15. Equilibrium of transverse torque and shear forces in edge grillage member.



รูปที่ 4.16. Statically equivalent torsion forces in deck and grillage.



รูปที่ 4.17. Non-Uniform torsion of (a) deck and (b) grillage.

#### 4.3.4. การเปลี่ยนรูป(Distortion)

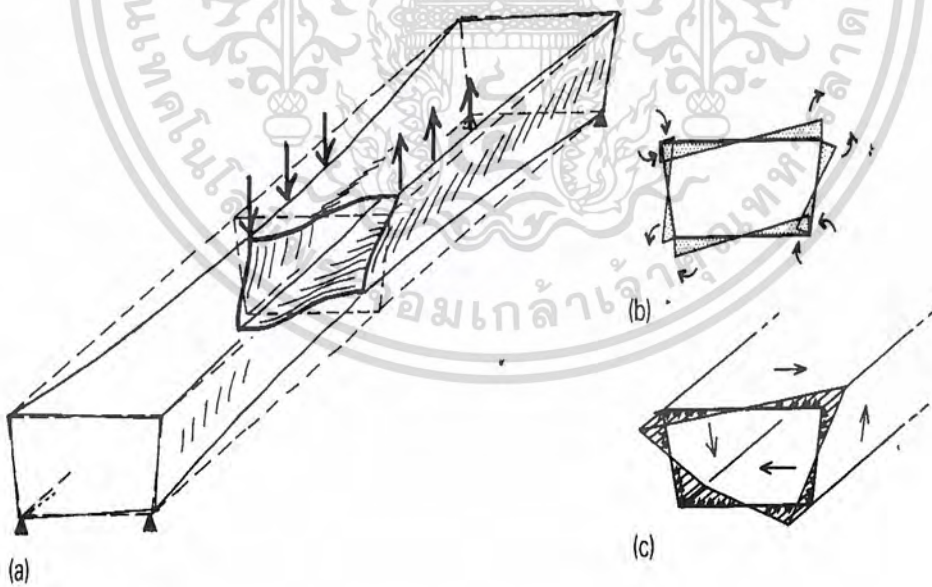
Box-girder เซลล์เดียวสามารถเกิดการผิดรูปได้มากกว่าโครงสร้างหลายเซลล์เพราะว่า ส่วนบนส่วนล่างของปีกจะไม่สามารถบิดและเลื่อนไปในแนวระนาบด้านข้างได้ รูปที่ 4.18. (a) แสดงถึงการผิดรูปของ Box-girder ปีกส่วนบนจะเลื่อนไปทางขวา ส่วนล่างเลื่อนไปทางซ้าย ปีกขวาเลื่อนขึ้นและปีกซ้ายเลื่อนลง รูปที่ 4.18. (b) แสดงถึงโมเมนต์ทางขวางที่เกิดขึ้นเนื่องจากการบิดนอกระนาบ plates ขณะที่รูปที่ 4.18. (c) แสดงถึงความเค้นตามยาวเนื่องจากการตัดในแนวระนาบ

รูปที่ 4.19. แสดงถึงการกระจายของการเปลี่ยนรูป เนื่องจากแรงในโครงสร้าง แรงเยื้องศูนย์กลางในรูปที่ 4.19.(a) สามารถคำนวณในรูปของส่วนประกอบ antisymmetric ในรูปที่ 4.19.(b) และส่วนประกอบสมมาตรในรูปที่ 4.19.(c) ส่วนประกอบสมมาตรเกิดจากแรงบิดในแนวตั้งของ Box-girder ทั้งหมด ส่วนประกอบ antisymmetric ไม่สามารถทำให้เท่ากันโดยตรงกับแรงบิดบน Box เพราะว่าการบิดล้วน(pure torsion) รวมไปถึงระบบของกระแสแรงเฉือนที่อยู่รอบ ๆ เซลล์ในรูปที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.19(e) แรงกระทำ antisymmetric ในรูปที่ 4.19.(b) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ในรูปที่ 4.19.(d) จะเท่ากับผลรวมของการบิดล้วน(pure torsion) เนื่องจากกระแสแรงเฉือนในรูปที่ 4.19.(e) และการเปลี่ยนรูปเนื่องจากกระแสแรงเฉือนในรูปที่ 4.19.(f) สมดุลกับส่วนอื่นและไม่มีผลรวมสุทธิ แต่ในเวลาเดียวกันแรงเหล่านี้เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนรูปของเซลล์ ในรูปที่ 4.18. Box-girder อันหนึ่งจะแข็งแรงมากต่อการบิดล้วน(pure torsion) และการบิดเกือบทั้งหมดของ deck เกิดจากการเสี้ยวรูป นอกจาก Box จะถูกค้ำยันด้วย diaphragms หรือ cross-bracing

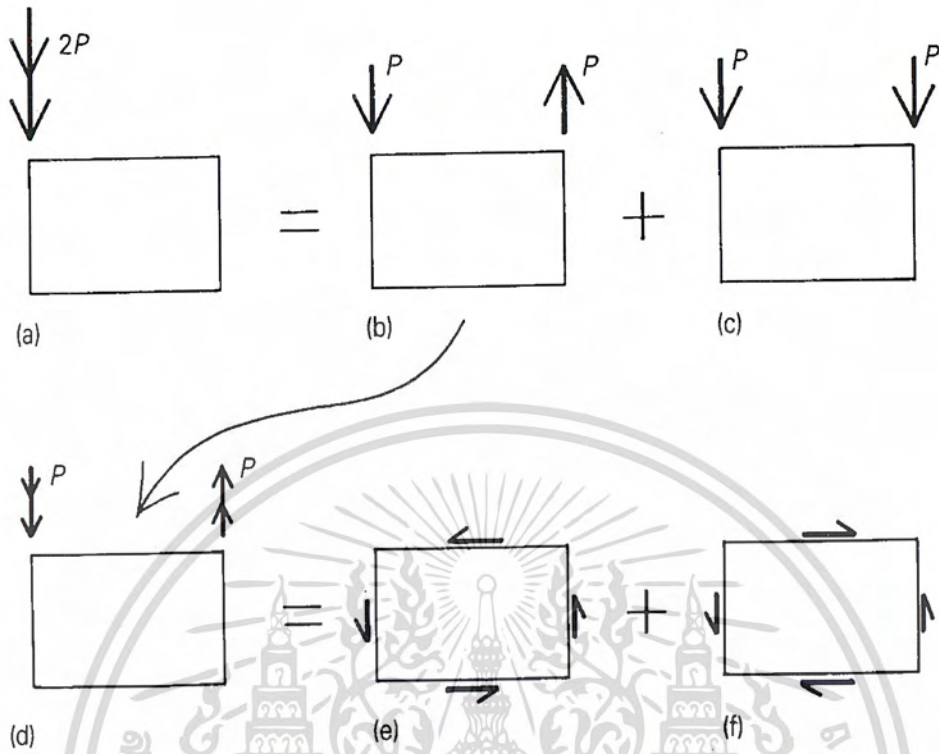
การค้ำยันตามแนวขวางมีผลต่อความแข็งแรงของ Box-girder ในการต่อต้านการเสี้ยวรูป ความแข็งแรงทั้งหมดจะรวมไปถึงความแข็งแรงต่อการบิด ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผลกระทบจากแรงกระจายและการโค้งงอจากการผิดรูป จะช่วยให้น้ำหนักที่มากกระทำกระจายลงสู่จุดรองรับของโครงสร้าง โครงสร้างรูปกล่องนี้จะมีแข็งแรงต่อต้านการผิดรูปและการบิด แต่อาจจะไม่เพียงพอสำหรับการรับน้ำหนักแบกทานภายใต้เกณฑ์ที่อยู่ติดกัน การกระจายของแรงปฏิริยาระหว่างเกณฑ์จะอ่อนไหวต่อแรงอัดและการทรุดตัวที่แตกต่างกันต่อการรับน้ำหนักแบกทาน

การผิดรูปของ Box-girder แบบโค้งจะมีความซับซ้อนมากกว่า เพราะการบิดและการดัดเกิดขึ้นระหว่างความยาวช่วง แรงทั้งหมดจะทำให้เกิดการโค้งตัวและการกดอัดขึ้น



รูปที่ 4.18.(a) Distortion of box-girder deck ; (b) out-of-plane bending moments ; and (c) in-plane bending (warping) stresses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19. (a) Eccentric load ; (b) antisymmetric component ; (c) symmetric component ; (d) = (b) ; (e) pure torsion shear flows ; and (f) distortion shear flows.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ขั้นตอนการดำเนินการ

#### 5.1. ทบทวนวรรณกรรมปริทัศน์เกี่ยวกับการทดสอบแบบจำลองโดยอุโมงค์ลม

การที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ของสะพานนั้นได้มีการศึกษา วิจัย และทำการทดสอบมานานแล้ว โดยมีผลงานการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา ดังต่อไปนี้

การทดสอบแบบจำลองอาคารสูงในอุโมงค์ลม และการจำลองการโยกตัวของอาคาร โดยวิธี Base Hinged Assembly โดย สุกิจย์ เทพมังกร และ Kenny C.S. Kwork ซึ่งเป็นการจำลองการโยกตัวของอาคารสูงโดย Base Hinged assembly (BHA) technique ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารสูง เมื่อรับแรงลมโดยการทดสอบในอุโมงค์ลม จากการศึกษาพบว่าความถี่ในการโยกตัวของ BHA model สามารถจำลองและปรับเปลี่ยนได้โดยการออกแบบ Stiffness ของ flexural elements ให้สอดคล้องกับค่าความถี่ที่ต้องการ นอกจากนี้ผลการทดสอบแบบจำลอง ข้อดีของ BHA model คือ สามารถทำได้ง่าย และการปรับเปลี่ยน mass , stiffness , damping รวมทั้งรูปทรงภายนอกของอาคารก็สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว นอกจากนี้ BHA model ยังมีศักยภาพในการจำลองพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารสูงที่มี Coupled translational-torsional motion ได้อีกด้วย

การศึกษาพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารพญาพาร์ค ทาวเวอร์ เมื่อรับแรงลม โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม โดย สุกิจย์ เทพมังกร, เป็นหนึ่ง วานิชชัย , ปณิธาน ลักคุณประสิทธิ์ และวรศักดิ์ กนกนุกุลชัย ซึ่งได้เสนอผลงานการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารพญา พาร์ค ทาวเวอร์ ในอุโมงค์ลม โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ (1) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารเมื่อรับแรงลม (2)เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเร่งในแนวราบที่เกิดจากการโยกตัว ณ ระดับกัฏดาการ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับระดับที่ยอมรับได้ ที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านความรู้สึกของผู้ใช้อาคาร แล้วนำไปเปรียบเทียบกับระดับที่ยอมรับได้ ที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านความรู้สึกของผู้ใช้อาคาร (3)เพื่อศึกษาหาแนวทางที่เป็นไปได้ในการลดระดับการโยกตัว โดยงานทดสอบอุโมงค์ลมนี้ประกอบด้วย (1)การจำลองสภาพลมธรรมชาติในอุโมงค์ลม (2)การสร้างแบบจำลองย่อส่วนที่มีความคล้ายคลึงกับอาคารจริงทั้งในด้านรูปร่างและคุณสมบัติทางจลศาสตร์ (3)การตรวจวัดการโยกตัวของแบบจำลองเมื่อรับแรงลมจากการทดสอบพบว่าในเกือบทุกกรณีอาคารจะมีระดับการโยกตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางสูงกว่าในแนวทิศทางลม ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลมในแนวตั้งฉากที่เกิดจากการม้วนตัวเป็นจังหวะของกระแสลมที่พัดผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอาคารและกลไกการกำทอนของโครงสร้าง และพบว่าค่าความเร่งที่เกิดขึ้นนี้สูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ดีจากการวิเคราะห์เพิ่มเติมพบว่า วิธีการเพิ่ม Damping ให้อาคารเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถลดระดับการโยกตัวและความเร่งให้ลงมาอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน

## 5.2. การทดสอบภายในอุโมงค์ลม

### 5.2.1. ความนำ

อุโมงค์ลมได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบทางด้านแรงลม สำหรับโครงสร้างมาเป็นเวลานาน โดยในระยะแรก ๆ เป็นการทดสอบด้วยความเร็วลมสม่ำเสมอ(Uniform Flow) ภายใต้สมมุติฐานว่าแรงดันลมเป็นแรงดันแบบสถิตย์และค่าแรงดันลมออกแบบสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความดันลม ซึ่งได้จากการทดสอบภายในอุโมงค์ลมกับค่าความดันลมพลวัตจากค่าความเร็วลมสูงสุดอ้างอิง ซึ่งอาจเป็นค่าความเร็วลมสูงสุดสำหรับคาบการกลับ 50 ปี ในรูปของความเร็วไมล์สูงสุดหรือความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง

ต่อมาการทดสอบในอุโมงค์ลมได้พัฒนาขึ้นมา ปัจจุบันมีการจำลองสภาพการไหลวนและการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามความสูงจากระดับพื้นดิน ให้สอดคล้องกับสภาพของลมตามธรรมชาติ โดยการสร้างอุโมงค์ลมที่มีความยาวมากเพียงพอที่จะทำให้บาวดาร์เลเยอร์ ก่อตัวขึ้นที่ละน้อยจากแรงเสียดทานที่ผิวของพื้นอุโมงค์ลม ซึ่งถูกทำให้มีสภาพขรุขระและมีผลทำให้ลมจำลองที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับลมตามธรรมชาติ ณ บริเวณที่ตั้งโครงการ

### 5.2.2. ประเภทของอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลม ที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิศวกรรม โครงสร้างนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

#### 5.2.2.1. อุโมงค์ลมสำหรับการทดสอบทางด้านการบิน (Aeronautical Tunnels)

ลักษณะของลมจำลองที่ใช้จะเป็นลมที่มีความเร็วลมสม่ำเสมอ ไม่เกิดสภาพการไหลวน จึงไม่เหมาะสำหรับการทดสอบโครงสร้าง ซึ่งอยู่ในช่วงบาวดาร์เลเยอร์ ยกเว้นการทดสอบซึ่งลมที่กระทำต่อโครงสร้างที่พิจารณามีความเร็วต่ำ จนผลของการไหลวนมีค่าน้อยมากและไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2.2. อุโมงค์ลมช่วงยาว (Long Tunnels)

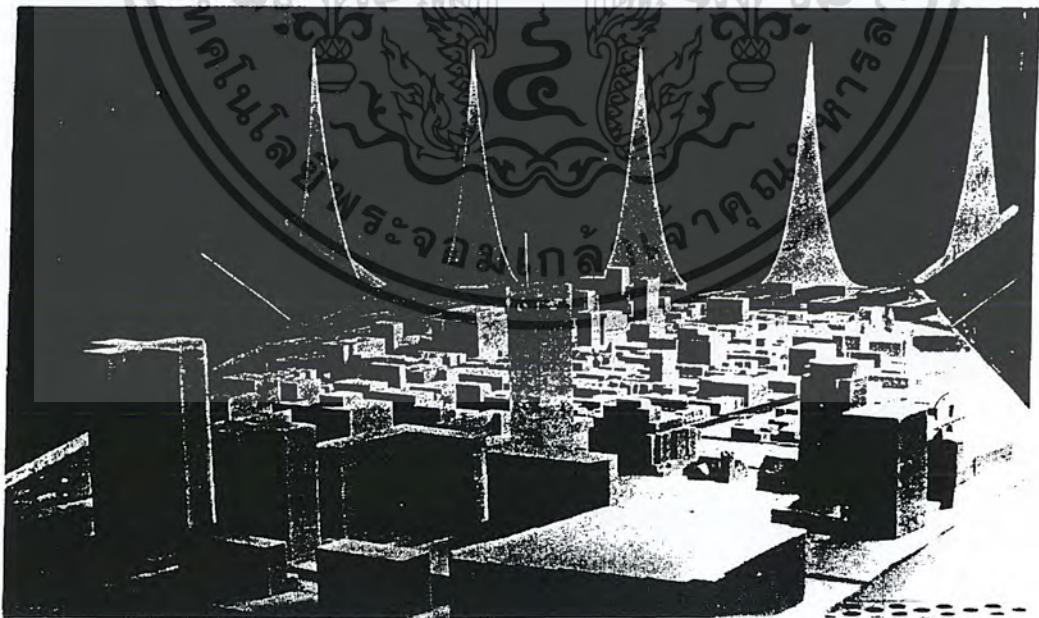
ลักษณะของลมจำลองที่ใช้จะมีลักษณะของการไหลวนตามที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ โดยที่บาวคาร์เลเยอร์จะถูกสร้างขึ้นจากผลของแรงเสียดทานที่ผิวพื้นอุโมงค์ ซึ่งถูกจำลองให้มีสภาพสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศจริง โดยการใช้อุปกรณ์เหลี่ยมขนาดเล็กติดตั้งไว้กับพื้น

### 5.2.2.3. อุโมงค์ที่มีอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Tunnels with Passive Devices)

ลมจำลองจะเป็นลมไหลวนเช่นเดียวกับอุโมงค์ลมช่วงยาว หากแต่บาวคาร์เลเยอร์ จะถูกสร้างขึ้นจากการที่ลมพัดผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น กริด(Grids), เฟนส์(Fences) และสไปร์(Spires) ซึ่งถูกนำไปติดตั้งไว้ที่บริเวณต้นลม ดังรูปที่ 5.1.

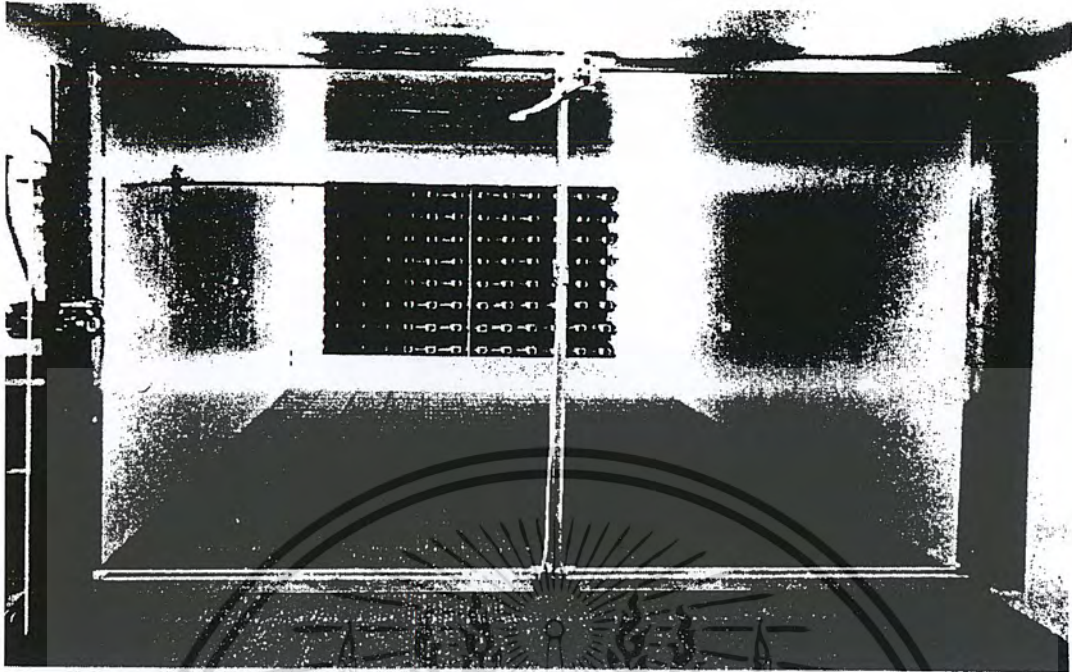
### 5.2.2.4. อุโมงค์ลมที่มีอุปกรณ์แบบแอคทีฟ (Tunnels with Active Devices)

บาวคาร์เลเยอร์จะถูกสร้างขึ้นจากต้นกำเนิดลม โดยอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ ได้แก่ เจ็ต(Jets) และอุปกรณ์ปรับชัตเตอร์(Shutters) อุปกรณ์เหล่านี้จะทำให้สามารถปรับค่าความเร็วลมเฉลี่ยและความแรงของการไหลวนได้โดยอิสระต่อกัน ทำให้สะดวกในการปรับบาวคาร์เลเยอร์เพื่อให้ได้ตามต้องการ ดังรูปที่ 5.2.

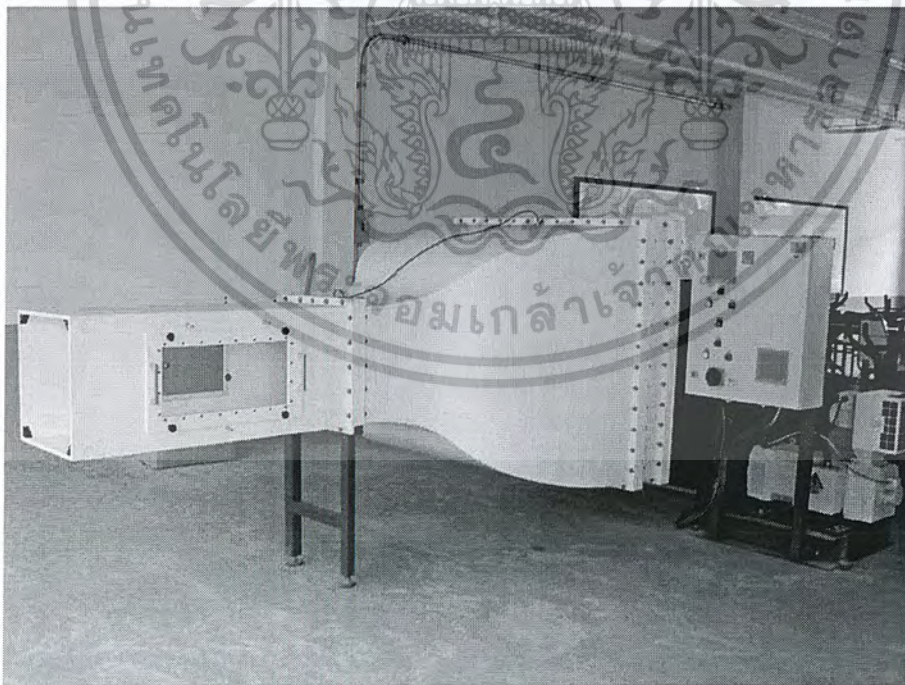


รูปที่ 5.1. อุโมงค์ลมที่มีอุปกรณ์แบบพาสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2. อุโมงค์ลมที่มีอุปกรณ์แบบแอคทีฟ



รูปที่ 5.3. รูปอุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3. ประเภทของแบบจำลอง

แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบภายในอุโมงค์ลม สามารถจำแนกตามวัตถุประสงค์ในการทดสอบได้เป็น 2 ประเภทคือ

#### 5.2.3.1. แบบจำลองแบบแข็ง(Rigid Model)

ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าผลของแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง ในรูปของแรง, โมเมนต์และความดันอันจะนำไปสู่การออกแบบโครงสร้างให้มีความแข็งแรงเพียงพอ

#### 5.2.3.2. แบบจำลองแบบยืดหยุ่น(Aeroelastic Model)

ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงลม ในรูปของการเคลื่อนที่และการสั่นสะเทือน

แบบจำลองทั้ง 2 ประเภทข้างต้น หากพิจารณาในลักษณะของอัตราส่วน ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบจำลองขนาดเท่าของจริง(Full Scale Model) และ แบบจำลองย่อส่วน(Scale Model)

### 5.3. การคำนวณแรงลม

ลมที่พัดอย่างต่อเนื่องกับโครงสร้างสะพาน แรงลมจะถูกเป็นแรงดันคงที่กระทำบนโครงสร้าง แรงดัน ( $q$ ) หาได้จากสมการ  $q = \frac{1}{2} \rho V^2$  การคำนวณแรงลมในแต่ละมาตรฐานมีการผนวกในเรื่องความสำคัญของอาคาร ความสูงและตำแหน่งที่ตั้งของอาคารเข้าไปในสมการ ในที่นี้ได้เสนอการคำนวณตามมาตรฐานต่าง ๆ ดังนี้

#### 5.3.1. Uniform Building Code (UBC) มาตรฐานการก่อสร้างแห่งสหรัฐอเมริกา

$$P = C_e C_q q_s I \text{ psf}$$

$P$  คือ ความดันสถิตย์กระทำที่ผิวภายนอกของอาคาร

$C_e$  คือ สัมประสิทธิ์ความสูงของอาคารและพื้นที่โดยรอบตาม

$C_q$  คือ สัมประสิทธิ์ความดันสำหรับโครงสร้างตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I คือ สัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคารตาม

$q_s$  คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์กับความเร็วลมในรูปความดันลมที่ 30 ฟุตตาม

$$q_s = 0.00256 V^2 \quad ( V \text{ มีหน่วยเป็น mph } )$$

ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ แสดงใน ภาคผนวก ก.

เนื่องจากมีค่าความเร็วลมทั้งทางทฤษฎี, สถานีวัดแรงลมและ ความเร็วลมพายุ ในที่นี้ ได้ศึกษาเฉพาะความเร็วลมพายุในคาบการกลับ 50 ปี

จากค่าความเร็วลมพายุสูงสุดที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยาที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2531-2545 ของประเทศไทย เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าในคาบ 50 ปี มีค่าความเร็วเท่ากับ 93 นอต (107.034 mph)

ทำให้ได้ค่า  $q_s$  เท่ากับ 29.33 psf (143.23 kg/m<sup>2</sup>)

จากภาคผนวก ก. จะได้ค่า  $C_e$  และ  $C_q$  ดังนี้

$$C_e = 1.564 \quad \text{ตารางที่ ผ.ก.1.}$$

$$C_q = 1.70 \quad \text{ตารางที่ ผ.ก.2}$$

$$I = 1.15 \quad \text{ตารางที่ ผ.ก.3.}$$

$$P = 89.68 \text{ psf (437.93 kg/m}^2\text{)}$$

ตารางที่ 5.1. หน่วยแรงลมที่กำหนดให้ตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

(กฎกระทรวงฯ)

ความสูงของอาคาร(m)	0-10	10-20	20-40	>40
หน่วยแรงลมอย่างน้อย (kg/m <sup>2</sup> )	50	80	120	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4. วิธีการสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทดสอบโดยอุโมงค์ลมนั้น เครื่องทดสอบอุโมงค์ลม เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญสำหรับการกำหนดสัดส่วนรูปร่างของแบบจำลองเพื่อให้ขนาดของแบบจำลองที่ใช้ทดสอบกับเครื่องอุโมงค์ลมมีความเหมาะสมกัน จึงต้องกำหนดขนาดอัตราส่วนรูปร่างของแบบจำลองที่แน่นอน

สำหรับการทดสอบในอุโมงค์ลมนี้ กำหนดให้อัตราส่วนที่ใช้ เท่ากับ 1 : 50 ทำให้แบบของสะพานจริงที่มีความยาวช่วง 100 เมตร ลดลงเหลือ 2 เมตร สำหรับแบบจำลองสะพาน ซึ่ง เมื่อเทียบกับหน้าตัดของอุโมงค์ลมแล้วจำเป็นต้องทำกล่องที่มีรูปร่างลักษณะคล้ายปล่องขยายต่อจากตัวอุโมงค์ลม

$$\text{อัตราส่วนที่ใช้ } (L_r) = 1 : 50$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6

## สรุปและข้อเสนอนแนะ

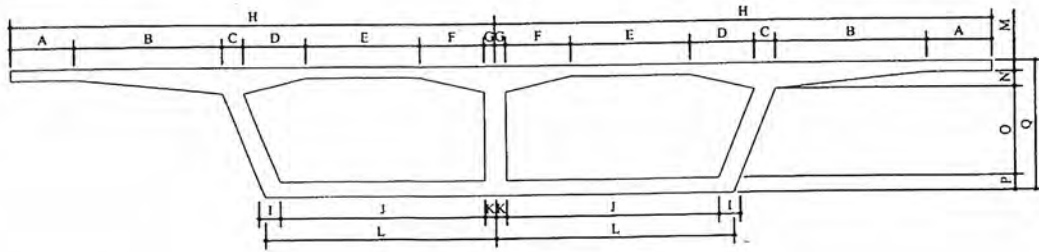
### 6.1. สรุป

จากการศึกษาการย่อส่วนของแบบจำลองบางส่วน (Section Model) เพื่อสามารถนำมาใช้กับการทดสอบในอุโมงค์ลมทำให้ทราบถึงอัตราส่วนลักษณะและคุณสมบัติของแบบจริงกับแบบจำลองดังตารางที่ 6.1.

ตารางที่ 6.1. สรุปอัตราส่วนที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติ	สะพานจริง	อัตราส่วน	แบบจำลอง
ขนาด			
ความกว้าง	D	$\frac{1}{50}$	$\frac{D}{50}$
ความยาว	L	$\frac{1}{50}$	$\frac{L}{50}$
ความสูง	H	$\frac{1}{50}$	$\frac{H}{50}$
ความเร็วลม (Velocity)	V	$\frac{1}{50}$	$\frac{V}{50}$
มวล (Mass)	M	$\frac{1}{50^3}$	$\frac{M}{50^3}$
แรง (Force)	F	$\frac{1}{50^3}$	$\frac{F}{50^3}$
Second Moment of Area	I	$\frac{1}{50^4}$	$\frac{I}{50^4}$
Mass Moment of Inertia	$I_M$	$\frac{1}{50^5}$	$\frac{I_M}{50^5}$
กำลังของวัสดุ (Strength)	$\sigma$	$\frac{1}{50}$	$\frac{\sigma}{50}$
ความดัน (Pressure)	P	$\frac{1}{50}$	$\frac{P}{50}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

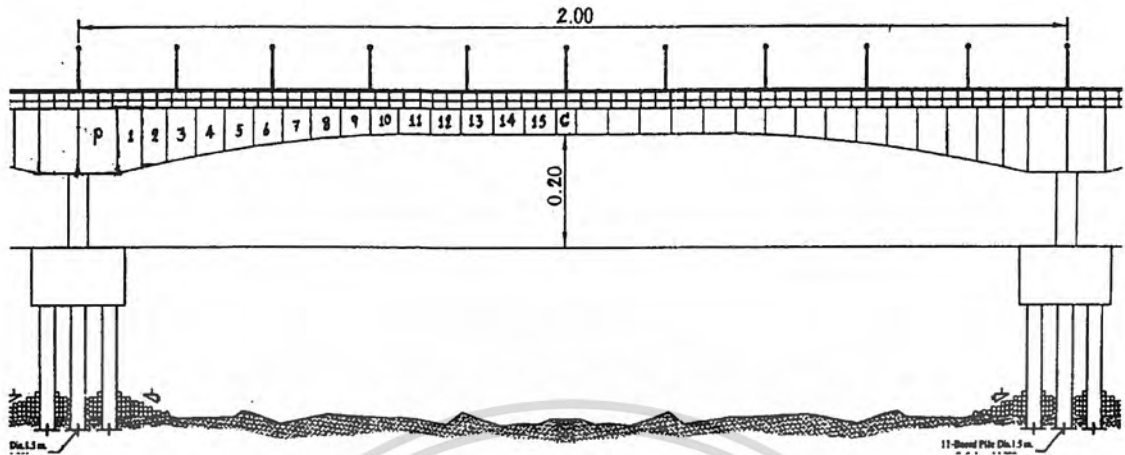


รูปที่ 6.1.หน้าตัดของคานรูปกล่องของแบบจำลองสะพาน

ตารางที่ 6.2.ขนาดหน้าตัดของคานรูปกล่องของแบบจำลองสะพาน

Span Length	Dimension (mm.)																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
2 (m)	AT PIER	30	70	10	30	55	30	5	230	10	72.4	5	78.7	5	7	98	20	130
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	72.4	5	78.7	5	7	98	20	130
	1	30	70	10	30	55	30	5	230	10	72.4	5	78.7	5	7	98	20	130
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	74.9	5	81.8	5	7	92.3	18.7	123
	2	30	70	10	30	55	30	5	230	10	74.9	5	81.8	5	7	92.3	18.7	123
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	77.5	5	84.9	5	7	86.6	17.4	116
	3	30	70	10	30	55	30	5	230	10	77.5	5	84.9	5	7	86.6	17.4	116
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	80	5	88.1	5	7	81	16.1	109
	4	30	70	10	30	55	30	5	230	10	80	5	88.1	5	7	81	16.1	109
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	82.6	5	91.2	5	7	75.2	14.8	102
	5	30	70	10	30	55	30	5	230	10	82.6	5	91.2	5	7	75.2	14.8	102
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	85.1	5	94.3	5	7	69.5	13.5	95
	6	30	70	10	30	55	30	5	230	10	85.1	5	94.3	5	7	69.5	13.5	95
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	87.7	5	97.5	5	7	63.8	12.2	88
	7	30	70	10	30	55	30	5	230	10	87.7	5	97.5	5	7	63.8	12.2	88
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	90.3	5	101	5	7	58.1	10.9	81
	8	30	70	10	30	55	30	5	230	10	90.3	5	101	5	7	58.1	10.9	81
		30	70	10	30	55	30	5	230	10	92.8	5	104	5	7	52.4	9.6	74
9	30	70	10	30	55	30	5	230	10	92.8	5	104	5	7	52.4	9.6	74	
	30	70	10	30	55	30	5	230	10	95.4	5	107	5	7	46.7	8.3	67	
10	30	70	10	30	55	30	5	230	10	95.4	5	107	5	7	46.7	8.3	67	
	30	70	10	30	55	30	5	230	10	97.9	5	110	5	7	41	7	60	
11,12,13, 14,15	30	70	10	30	55	30	5	230	10	97.9	5	110	5	7	41	7	60	
	30	70	10	30	55	30	5	230	10	97.9	5	110	5	7	41	7	60	
Closure Pour	30	70	10	30	55	30	5	230	10	97.9	5	110	5	7	41	7	60	
	30	70	10	30	55	30	5	230	10	97.9	5	110	5	7	41	7	60	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



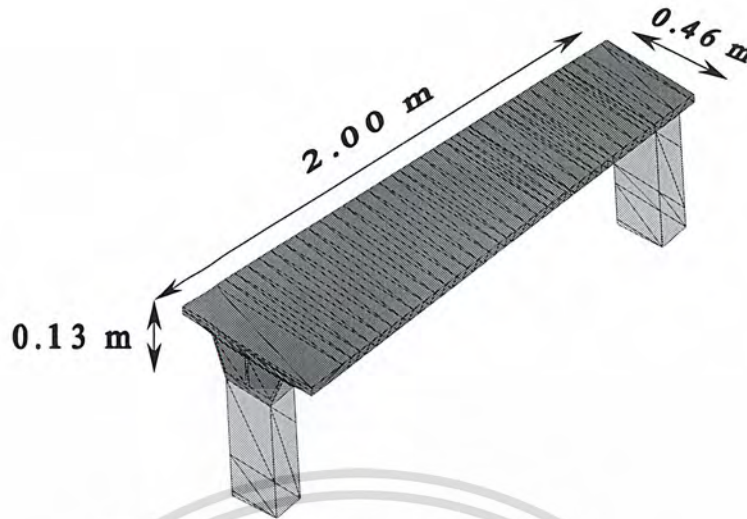
รูปที่ 6.2. รูปด้านยาวของแบบจำลองสะพาน

ตารางที่ 6.3. Segment Length of Model ( Span 2 m. )

Span Length (2 m.)	AT PIER (P)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Closure Pour (C)
Segment Length (mm.)	87	50	50	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	40

- ความเร็วลมพายุ ( $V_p$ ) ที่เกิดขึ้นในคาบ 50 ปี เท่ากับ 47.63 เมตร/วินาที (93 นอต)  
จากอัตราส่วนความเร็วที่ใช้ในแบบจำลอง ทำให้ได้ความเร็วลมที่ใช้ทดสอบกับแบบจำลอง ( $V_m$ ) เท่ากับ 6.74 เมตร/วินาที
- ความดันของลมที่เกิดขึ้นจริง ( $P_p$ ) เท่ากับ  $437.93 \text{ kg/m}^2$  จากอัตราส่วนความดันที่ใช้ในแบบจำลองทำให้ได้ความดันลมที่ใช้ทดสอบกับแบบจำลอง เท่ากับ  $8.7586 \text{ kg/m}^2$
- กำลังของวัสดุ ( $\sigma_p$ ) เนื่องจากสะพานนี้เป็นคอนกรีตอัดแรงจึงเลือกใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เท่ากับ 1500 ksc. (คอนกรีตอัดแรงสามารถทำให้มีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 1400 - 2100 ksc.) ทำให้ได้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพื่อใช้สร้างแบบจำลอง เท่ากับ 30 ksc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3. ตัวอย่างแบบจำลองที่ได้จากการย่อส่วน

จากการศึกษาความเร็วของลมพายุในคาบการกลับ 50 ปี เพื่อนำมาหาความดันที่เกิดขึ้นจริงพบว่าค่าความดันเนื่องจากแรงลมโดยใช้มาตรฐาน Uniform Building Code (UBC) มีความเหมาะสมกว่าเมื่อเทียบกับค่าแรงลมโดยใช้ข้อกำหนดตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

## 6.2. ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากการศึกษาการสร้างแบบจำลองของสะพานนี้ เลือกลเฉพาะความเร็วลมพายุที่เกิดขึ้นในคาบการเกิด 50 ปี มาทดสอบแต่การทดสอบควรใช้ความเร็วลมปกติที่เกิดขึ้นมาทำการทดสอบด้วยเพื่อประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในการก่อสร้างสะพานจริง
- สำหรับค่ากำลังของคอนกรีตนั้น ทางผู้จัดทำได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกพบว่าให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำ จึงได้เสนอการหาส่วนผสมของคอนกรีต ไว้ในภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. สกฤต ห่อวโนทยาน,2542.ชลศาสตร์.500เล่ม.พิมพ์ครั้งที่1.กรุงเทพฯ:แผนกตำราวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. อุทัย ฤกษ์ศิริรัตน์,2533.ค่าแรงลมสถิติเทียบเท่าเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบอาคารสูงในกรุงเทพฯ. สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. American National Standards Institute.,1982. American National Standard Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures ANSI Standard, A58.1-1982.
4. Davenport, A.G.,1977.The Prediction of Risk Under Wind Loading. Proceedings 2<sup>nd</sup>. International Conference on Structural Safety and Reliability, (Icosar), 511-538.Munich, West Germany.
5. Davenport, A.G.,1960.Wind Loads on Structures. Technical Paper No.88. Ottawa : National Research Council of Canada .
6. Gumbel, E.J.,1958.Statistics of Extremes : Columbia University . Press, New York.
7. Hellman,G.,1916.Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre,34:273.
8. Kwok,K.C.S.,1996.WIND TUNNEL TEST TECHNIQUES.WIND EFFECT ON TALL BUILDINGS AND SLENDER STRUCTURES,RAMAGARDEN HOTEL.
9. Ochi, M.K.,1992. Applied Probability & Stochastic Processes in Engineering & Physical Sciences : John Wiley & Sons.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- วีระพล แต่สมบัติ,2533.หลักสูตรวิทยา.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์.
- วีระเชาว์ปฏิภาณ วีระชัย โรจน์อารีย์ และ สนธยา ปิยมาท,2544.การทดสอบแบบจำลองสะพานในอุโมงค์ลม.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ศิริวัฒน์ ไชยชนะ,2543.กลศาสตร์ของวัสดุ.พิมพ์ครั้งที่4.กรุงเทพฯ:บริษัท เอส.เอส.บุ๊คเฮาส์ จำกัด.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผนวก ก.

Uniform Building Code (UBC) มาตรฐานการก่อสร้างแห่งสหรัฐอเมริกา

ตารางที่ ผ.ก.1. UBC 1994 [ ตารางที่ 16-G สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับค่าความสูง,แรงดันลม และแรงลม ( $C_e$ )]

HEIGHT ABOVE AVERAGE LEVEL OF ADJOINING GROUND (feet)	EXPOSURE D	EXPOSURE C	EXPOSURE B
× 304.8 for mm			
0-15	1.39	1.06	0.62
20	1.45	1.13	0.67
25	1.50	1.19	0.72
30	1.54	1.23	0.76
40	1.62	1.31	0.84
60	1.73	1.43	0.95
80	1.81	1.53	1.04
100	1.88	1.61	1.13
120	1.93	1.67	1.20
160	2.02	1.79	1.31
200	2.10	1.87	1.42
300	2.23	2.05	1.63
400	2.34	2.19	1.80

<sup>1</sup>Values for intermediate heights above 15 feet (4572 mm) may be interpolated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ก.2. UBC 1994 [ ตารางที่ 16-H สัมประสิทธิ์แรงดันลม ( $C_q$ ) ]

STRUCTURE OR PART THEREOF	DESCRIPTION	$C_q$ FACTOR
1. Primary frames and systems	<b>Method 1 (Normal force method)</b> Walls: Windward wall Leeward wall Roofs <sup>1</sup> : Wind perpendicular to ridge Leeward roof or flat roof Windward roof less than 2:12 (16.7%) Slope 2:12 (16.7%) to less than 9:12 (75%)  Slope 9:12 (75%) to 12:12 (100%) Slope > 12:12 (100%) Wind parallel to ridge and flat roofs	0.8 inward 0.5 outward  0.7 outward 0.7 outward 0.9 outward or 0.3 inward 0.4 inward 0.7 inward 0.7 outward
	<b>Method 2 (Projected area method)</b> On vertical projected area Structures 40 feet (12 192 mm) or less in height Structures over 40 feet (12 192 mm) in height On horizontal projected area <sup>1</sup>	1.3 horizontal any direction 1.4 horizontal any direction 0.7 upward
2. Elements and components not in areas of discontinuity <sup>2</sup>	<b>Wall elements</b> All structures Enclosed and unenclosed structures Partially enclosed structures Parapets walls	1.2 inward 1.2 outward 1.6 outward 1.3 inward or outward
	<b>Roof elements<sup>3</sup></b> Enclosed and unenclosed structures Slope < 7:12 (58.3%) Slope 7:12 (58.3%) to 12:12 (100%)	1.3 outward 1.3 outward or inward
	Partially enclosed structures Slope < 2:12 (16.7%) Slope 2:12 (16.7%) to 7:12 (58.3%)  Slope > 7:12 (58.3%) to 12:12 (100%)	1.7 outward 1.6 outward or 0.8 inward 1.7 outward or inward
3. Elements and components in areas of discontinuities <sup>2,4,5</sup>	<b>Wall corners<sup>6</sup></b>	1.5 outward or 1.2 inward
	<b>Roof eaves, rakes or ridges without overhangs<sup>6</sup></b> Slope < 2:12 (16.7%) Slope 2:12 (16.7%) to 7:12 (58.3%) Slope > 7:12 (58.3%) to 12:12 (100%) For slopes less than 2:12 (16.7%) Overhangs at roof eaves, rakes or ridges, and canopies	2.3 upward 2.6 outward 1.6 outward  0.5 added to values above
4. Chimneys, tanks and solid towers	Square or rectangular	1.4 any direction
	Hexagonal or octagonal Round or elliptical	1.1 any direction 0.8 any direction
5. Open-frame towers <sup>7,8</sup>	Square and rectangular	
	Diagonal	4.0
	Normal Triangular	3.6 3.2
6. Tower accessories (such as ladders, conduit, lights and elevators)	Cylindrical members 2 inches (51 mm) or less in diameter Over 2 inches (51 mm) in diameter	1.0 0.8
	Flat or angular members	1.3
7. Signs, flagpoles, lightpoles, minor structures <sup>8</sup>		1.4 any direction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ก.2. UBC 1994 [ ตารางที่ 16-H สัมประสิทธิ์แรงคั้นลม (  $C_q$  ) ] (ต่อ)

- <sup>1</sup>For one story or the top story of multistory partially enclosed structures, an additional value of 0.5 shall be added to the outward  $C_q$ . The most critical combination shall be used for design. For definition of open structures, see Section 1613.
- <sup>2</sup> $C_q$  values listed are for 10-square-foot ( $0.93 \text{ m}^2$ ) tributary areas. For tributary areas of 100 square feet ( $9.29 \text{ m}^2$ ), the value of 0.3 may be subtracted from  $C_q$ , except for areas at discontinuities with slopes less than 7 units vertical in 12 units horizontal (58.3% slope) where the value of 0.8 may be subtracted from  $C_q$ . Interpolation may be used for tributary areas between 10 and 100 square feet ( $0.93 \text{ m}^2$  and  $9.29 \text{ m}^2$ ). For tributary areas greater than 1,000 square feet ( $92.9 \text{ m}^2$ ), use primary frame values.
- <sup>3</sup>For slopes greater than 12 units vertical in 12 units horizontal (100% slope), use wall element values.
- <sup>4</sup>Local pressures shall apply over a distance from the discontinuity of 10 feet (3048 mm) or 0.1 times the least width of the structure, whichever is smaller.
- <sup>5</sup>Discontinuities at wall corners or roof ridges are defined as discontinuous breaks in the surface where the included interior angle measures 170 degrees or less.
- <sup>6</sup>Load is to be applied on either side of discontinuity but not simultaneously on both sides.
- <sup>7</sup>Wind pressures shall be applied to the total normal projected area of all elements on one face. The forces shall be assumed to act parallel to the wind direction.
- <sup>8</sup>Factors for cylindrical elements are two thirds of those for flat or angular elements.

ตารางที่ ผ.ก.3. UBC 1994 [ ตารางที่ 16-L คือ สัมประสิทธิ์ความสำคัญของอาคาร( I ) ]

OCCUPANCY CATEGORY <sup>1</sup>	IMPORTANCE FACTOR I	
	Earthquake <sup>2</sup>	Wind
I. Essential facilities	1.25	1.15
II. Hazardous facilities	1.25	1.15
III. Special occupancy structures	1.00	1.00
IV. Standard occupancy structures	1.00	1.00

- <sup>1</sup>Occupancy types or functions of structures within each category are listed in Table No. 23-K and structural observation requirements are given in Sections 305, 306 and 307.
- <sup>2</sup>For life-safety-related equipment, see Section 2336 (a).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผนวก ข.

### ข้อเสนอแนะสำหรับการหาส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้สร้างแบบจำลอง

จากการศึกษาทฤษฎีการย่อยส่วนของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองโครงสร้างสะพานของเรานั้นต้องการคอนกรีตที่มีค่ากำลังต่ำ ๆ ดังนั้น จึงทำการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต (Mix Design) โดยมีคุณสมบัติเหมือนคอนกรีตบล็อก

### วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีตบล็อก

#### ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรีข้างผลิตโดยบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด ( มอก. 15-2514/2517 และ ASTM C 150-71 Type I ) ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ = 3.16

#### หิน

หินที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นหินฝุ่นจาก หจก. เจริญชัยค้าไม้ ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้ผลดังนี้

- ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและอัดแน่น (Dry – Roded Unit Weight) = 1772 kg/m<sup>3</sup>
- ค่าอัตราการดูดซึมน้ำ (Absorption) = 6.17 %
- ค่าความถ่วงจำเพาะแบบอิมตัวผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity) = 1.39
- ความชื้นที่ผิว (Surface Moisture) = 6.57 %

#### ทราย

ทรายที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นทรายจาก หจก. เจริญชัยค้าไม้ ทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ได้ผลดังนี้

- ค่าอัตราการดูดซึมน้ำ (Absorption) = 3.67 %
- ค่าความถ่วงจำเพาะแบบอิมตัวผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity) = 2.39
- ค่าโมดูลัสความละเอียด (Finess Modulus) = 2.653
- ความชื้นที่ผิว (Surface Moisture) = 3.81 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

น้ำที่ใช้ทดสอบคือน้ำประปา

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ คือ 0.23 ,0.33 ,0.43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผนวก ก.

ตารางที่ ผ.ค.1. ค่าความเร็วลมสูงสุดของพายุที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทย พ.ศ. 2531-2545

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )		ความกดอากาศ ( h Pa )
2532	1.พายุไต้ฝุ่น "เกย์" ( GAY 8929 )	1 พ.ย.	07.00	7.3	103.0		TD	1008
			13.00	7.7	102.3			1008
			19.00	7.8	102.0			1008
		2 พ.ย.	01.00	8.0	102.0			
			07.00	8.0	102.0			
			13.00	8.2	101.7	74	TS	
			19.00	8.4	101.7	65		
			01.00	8.8	101.7	65		
		3 พ.ย.	07.00	9.4	101.4	83		
			13.00	10.0	101.0	93		
			19.00	10.1	100.5	120	TY	
			01.00	10.4	100.4	120		
		4 พ.ย.	07.00	10.5	100.0	120		
			13.00	10.8	98.8	93	TS	
			19.00	11.6	97.8	93		
			01.00	11.6	97.5	93		
		5 พ.ย.	07.00	11.7	96.8	93		
			13.00	11.8	95.7	120	TY	
			19.00	12.0	94.8			
			01.00	12.4	94.0			
		6 พ.ย.	07.00	12.6	92.5	167		
			13.00	12.7	91.5	167		
			19.00	13.5	90.6	167		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )	ความกดอากาศ ( h Pa )	
		7 พ.ย.	01.00	13.6	88.8	167		
			07.00	13.9	88.1	185		
			13.00	14.2	87.1	167		
			19.00	14.6	86.2			
		8 พ.ย.	01.00	14.7	85.1	185		
			07.00	14.8	83.5	185		
			13.00	15.0	82.8	222		
			19.00	15.2	82.0	222		
		9 พ.ย.	01.00	15.2	80.4	222		
			07.00	15.5	79.8	222		
			13.00	15.7	78.0	130		
			19.00	15.6	76.7	130		
		10 พ.ย.	01.00	15.3	74.9	93	TS	
			07.00	15.5	73.4	65		
			13.00	16.0	72.3	56	TD	
			19.00	16.0	72.0		L	
2534	1.พายุดีเปรสชัน 4 (TD 4)	25 ต.ค.	13.00	8.0	106.7	30	TD	1006
			19.00	8.6	105.3	30		1004
		26 ต.ค.	01.00	8.8	104.8	30		1006
			07.00	9.0	104.2	30		1006
			13.00	9.0	103.5	30		1006
			19.00	9.4	102.8	30		1006
		27 ต.ค.	01.00	9.8	101.7	30		1006
			07.00	10.4	101.5	27		1006
			13.00	10.6	100.0	27		1008
			19.00	11.2	99.4	27		1008
		28 ต.ค.	01.00				L	
2535	1.พายุไต้ฝุ่น	15 ต.ค.	07.00	11.0	117.0	30	TD	1004

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )	ความกดอากาศ ( h Pa )
	"แอนเจลา" (ANGELA 9224)	16 ต.ค.	13.00	11.5	117.5	30	1002
			19.00	11.5	118.5	30	1004
			01.00	13.0	118.0	30	1000
		17 ต.ค.	07.00	14	117.5	30	
			13.00	13.8	117.6	30	
			19.00	14.2	117.6	30	
			01.00	14.6	117.6	30	
			07.00	13.5	117.8	30	
		18 ต.ค.	13.00	13.7	117.6	35	TS
			19.00	13.6	117.1	40	996
			01.00	13.7	116.6	50	992
			07.00	13.5	116.0	55	995
			13.00	13.0	115.6	65	TY
		19 ต.ค.	19.00	12.6	115.4	65	975
			01.00	12.5	114.8	65	970
			07.00	12.3	114.3	65	970
			13.00	11.8	113.8	75	970
			19.00	11.9	113.6	75	
		20 ต.ค.	01.00	12.0	113.1	75	
			07.00	12.6	112.6	70	
			13.00	12.8	112.0	70	970
			19.00	12.9	111.9	70	
			01.00	12.9	111.9	65	930
		21 ต.ค.	07.00	13.1	111.7	60	TS
			13.00	13.5	111.6	60	970
			19.00	13.5	111.6	60	975
			01.00	13.8	112.0	60	980

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )	ความกดอากาศ ( h Pa )
		23 ต.ค.	07.00	13.8	111.9	55	985
			13.00	13.9	111.8	55	985
			19.00	13.9	111.5	55	
			01.00	13.8	110.6	50	970
			07.00	13.7	109.9	45	
			13.00	13.5	108.8	45	970
		24 ต.ค.	19.00	13.5	108.3	40	944
			01.00	13.4	107.8	35	996
			07.00	13.2	107.2	30	TD
		25 ต.ค.	13.00	12.8	106.5	25	
			19.00	12.0	105.5		L
			01.00	10.0	105.5		
			07.00	10.0	102.5		
			13.00	8.8	102.5		
		26 ต.ค.	19.00	8.9	102.5		
			07.00	9.0	103.0		
			13.00	9.0	103.0		
		27 ต.ค.	19.00	8.5	103.0		
			01.00	8.0	103.5		
			07.00	8.5	102.5	30	TD
			13.00	8.5	102.0	55	TS
		28 ต.ค.	19.00	8.5	101.5	40	
			01.00	8.7	100.8	40	
			07.00	8.7	100.8	40	
			13.00	8.9	100.8	65	TY
		29 ต.ค.	19.00	9.1	101.2	50	TS
			01.00	8.7	100.8	40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )		ความกดอากาศ ( h Pa )
		30 ต.ค.	07.00	9.6	101.5	35	TD	998
			13.00	9.4	101.8	35		
			19.00	9.6	102.2	30		
			01.00	10.1	103.5	27		
			07.00	10.4	104.2	27		
			13.00	11.2	103.6	27		
			19.00	12.2	103.2	27		
		31 ต.ค.	01.00	12.7	102.1	27	L	
			07.00	12.1	100.9	30		
			13.00	12.9	99.6	25		
			19.00	13.3	98.6			
2. พายุโซนร้อน "ฟอร์เรสต์" (FORREST 9229)	10 พ.ย.	19.00	10.0	128.0	30	D		
			11 พ.ย.	01.00	10.0			126.5
	12 พ.ย.	07.00	9.0	123.0	30	L		
			13.00	8.0	122.0			30
			19.00	8.0	121.0			25
			01.00	8.0	120.0			25
			07.00	8.0	119.5			
			13.00	7.8	116.2			
	13 พ.ย.	01.00	8.0	113.0	30	TD		
			07.00	9.0	112.2			35
			13.00	9.0	110.0			45
			19.00	9.8	108.7			45
	14 พ.ย.	01.00	8.5	107.5	45	TS		
			07.00	8.0	106.4			50
			13.00	7.8	105.0			50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )	ความกดอากาศ ( h Pa )
		15 พ.ย.	19.00	7.8	104.0	45	TS
			01.00	7.9	102.5	45	
			07.00	8.0	101.5	45	
			13.00	8.4	100.2	40	
		16 พ.ย.	19.00	8.9	99.3	40	
			01.00	8.9	97.8	40	
			07.00	9.0	96.5	40	
			13.00	9.5	94.8	40	
		17 พ.ย.	19.00	9.6	93.8	45	
			01.00	9.7	93.3	45	
			07.00	9.7	92.4	45	
			13.00	10.1	91.7	45	
		18 พ.ย.	19.00	10.2	90.5	50	
			01.00	10.4	88.9	55	
			07.00	10.6	88.2	55	
			13.00	11.1	87.5	55	
		19 พ.ย.	19.00	13.2	87.2	60	
			01.00	15.1	87.5	75	
			07.00	16.1	87.8	90	
			13.00	17.1	87.8	90	
		20 พ.ย.	19.00	17.5	88.0	95	
			01.00	17.9	89.2	115	
			07.00	18.6	89.0	125	
			13.00	19.2	89.3	125	
		21 พ.ย.	19.00	18.6	89.9	120	
			01.00	19.7	90.9	115	
			07.00	20.3	91.4	100	
			13.00	0.7	92.5	90	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )		ความกดอากาศ ( h Pa )	
		22 พ.ย.	19.00	21.0	92.8	65			
			01.00	21.2	93.4	35			
			07.00	19.8	94.8	25	TD		
			13.00	18.5	97.0		L		
2539	1.พายุดีเปรสชัน 7 (TD 7)	29 ต.ค.	07.00	8.5	104.0		TD		
			13.00	8.5	103.0	30			
		30 ต.ค.	19.00	8.8	102.5	30		1002	
			01.00	9.2	102.0	30			
	2.พายุโซนร้อน "เออร์นี" (ERNIE 9625)	30 ต.ค.	07.00	10.5	100.0	30		1004	
			13.00	11.3	99.6	30		1004	
		4 พ.ย.	19.00	7.0	132.0	27	TD	1000	
			5 พ.ย.	01.00	8.0	131.0	30		996
		9 พ.ย.	07.00	7.0	129.4	30		1000	
			13.00	8.0	128.0	30		1000	
			6 พ.ย.	19.00	8.0	127.0	30		1000
				01.00	9.0	126.0	30		1000
07.00	9.0	126.0		30		998			
13.00	10.0	126.0		30		998			
7 พ.ย.	19.00	10.0	124.5	35	TS	990			
	01.00	11.0	123.0	30	TD	998			
	07.00	11.5	121.5	30		1002			
	13.00	11.7	119.8	30		990			
	19.00	11.7	119.2	30		998			
	8 พ.ย.	01.00	11.9	118.7	30		998		
		07.00	12.5	118.0	30		998		
		13.00	13.0	118.0	30		998		
19.00		13.5	118.0	30		998			
9 พ.ย.	01.00	15.0	117.5	30		1000			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )	ความกดอากาศ ( h Pa )
		10 พ.ย.	07.00	15.8	117.0	30	1002
			13.00	16.5	116.8	30	996
			19.00	18.5	118.0	30	996
			01.00	19.5	118.0	30	998
			07.00	19.5	118.2	33	996
			13.00	19.5	117.7	40	TS 996
			19.00	19.7	118.0	35	998
		11 พ.ย.	01.00	20.1	118.0	35	996
			07.00	20.2	118.0	40	998
			13.00	20.3	118.1	40	992
			19.00	19.5	118.8	35	992
		12 พ.ย.	01.00	19.3	119.3	35	992
			07.00	19.1	120.0	40	992
			13.00	18.8	120.2	40	992
			19.00	18.0	121.0	40	992
		13 พ.ย.	01.00	17.2	119.7	35	996
			07.00	16.5	118.5	35	996
			13.00	16.0	118.0	35	998
			19.00	16.8	117.7	35	1002
		14 พ.ย.	01.00	15.6	117.0	35	998
			07.00	115.0	115.0	35	1002
			13.00	14.0	114.0	35	998
			19.00	13.2	113.0	30	TD 1006
		15 พ.ย.	01.00	12.5	112.3	30	1004
			07.00	12.0	111.8	30	1006
			13.00	11.5	110.8	30	1006
			19.00	11.0	110.0	30	1008
		16 พ.ย.	01.00	10.3	109.0	30	1008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )	ความกดอากาศ ( h Pa )		
		17 พ.ย.	07.00	9.8	108.2	30	1006		
			13.00	9.7	107.5	30	1004		
			19.00	10.0	106.5	30	1002		
			01.00	10.0	105.5	25	1008		
			07.00	9.8	104.8	27	1006		
			13.00	9.5	103.5	27	1006		
		18 พ.ย.	19.00	9.8	102.5	27	1006		
			01.00	10.0	101.5	27	1008		
			07.00	10.0	100.3		1008		
			13.00	10.0	99.2	30	1010		
			19.00	9.5	98.5	27	1008		
			19 พ.ย.	01.00	9.8	97.8	27	1008	
		07.00		11.0	95.0	27	1006		
		13.00		10.5	93.5	30	1006		
		19.00		10.5	92.0	30	1008		
		20 พ.ย.		01.00	11.0	91.0	30	1008	
				07.00	11.0	90.0	30	1008	
			13.00	11.5	89.4	30	1008		
			19.00	11.6	88.4	30	1006		
			21 พ.ย.	01.00	11.5	85.0	30	1006	
				07.00	11.5	83.0	35	1006	
2540	2.พายุไต้ฝุ่น "ลินดา" (LINDA 9728)	31 ต.ค.		13.00	8.0	115.0		L	1008
				19.00	8.0	115.0	28	TD	1006
		1 พ.ย.		01.00	8.0	115.0	30		1006
				07.00	8.3	112.0	30		1002
			13.00	8.0	111.5	35	TS	1000	
			19.00	8.1	110.0	40		998	
		2 พ.ย.	01.00	8.2	108.8	45		994	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )		ความกดอากาศ ( h Pa )
			07.00	8.2	107.3	45		994
			13.00	8.3	106.0	45		994
			19.00	8.4	104.2	45		990
		3 พ.ย.	01.00	8.5	103.0	45		990
			07.00	9.1	102.4	50	STS	986
			13.00	9.8	102.2	65	TY	976
			19.00	10.8	100.8	65		990
		4 พ.ย.	01.00	11.4	99.6	50	STS	996
			07.00	12.4	99.0	35	TS	996
			13.00	12.8	97.5	35		990
			19.00	13.0	96.5	40		996
		5 พ.ย.	01.00	13.2	95.5	40		996
			07.00	13.6	94.8	40		1008
			13.00	13.9	94.3	40		1006
			19.00	14.5	93.8	40		1006
		6 พ.ย.	01.00	15.1	93.0	40		1006
			07.00	15.5	92.3	40		1004
			13.00	15.5	92.1	40		1006
			19.00	15.5	92.1	40		1006
		7 พ.ย.	01.00	15.5	92.1	50		1004
			07.00	15.5	92.1	50		1004
			13.00	15.5	92.1	50		1006
			19.00	15.5	92.0	45		1006
		8 พ.ย.	01.00	15.5	92.0	45		1006
			07.00	15.5	92.0	35		1006
			13.00	15.5	92.0	30	TD	1010
			19.00	15.5	92.0	30		1010
		9 พ.ย.	01.00	15.0	92.0	30		1008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )		ความกดอากาศ ( h Pa )	
			07.00	15.5	92.0	30		1008	
			13.00	15.0	91.5	30		1008	
			19.00	15.0	91.0	30		1006	
		10 พ.ย.	01.00	15.0	90.5		L	1012	
2541	1. พายุโซนร้อน "ชิพ" (CHIP 9813)	11 พ.ย.	01.00				L		
			07.00	8.7	114.1	30	TD	1004	
			13.00	9.6	114.0	30	TD	1004	
			12 พ.ย.	19.00	9.6	113.8	30	TD	1002
				01.00	9.6	113.1	30	TD	1002
				07.00	9.5	112.0	30	TD	1002
			13 พ.ย.	13.00	10.0	111.0	30	TD	998
				19.00	10.2	111.0	35	TS	998
				01.00	10.2	111.4	35	TS	994
			14 พ.ย.	07.00	10.6	110.3	40	TS	994
				13.00	10.6	110.6	40	TS	994
				19.00	11.0	111.0	40	TS	996
			15 พ.ย.	01.00	11.2	109.7	40	TS	998
				07.00	11.2	109.0	40	TS	998
				13.00	11.2	108.5	30	TD	1002
			16 พ.ย.	19.00	11.2	108.4	27	TD	1002
				01.00	12.0	105.0		L	
				07.00	11.0	105.0		L	
				13.00	10.0	105.0		L	
				19.00	9.0	103.0		L	
				01.00	10.0	102.0		L	
		07.00	10.5	101.0		TD			
		13.00	10.5	100.5	30	TD	1006		
		19.00	10.5	100.0	30	TD	1006		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี พ.ศ.	ลำดับที่	วันที่	เวลา	ละติจูด	ลองจิจูด	ความเร็วลมสูงสุด ( นอต )		ความกดอากาศ ( h Pa )
		17 พ.ย.	01.00	10.8	99.8	30	TD	1006
			07.00	10.8	99.4	24	TD	1004
			13.00	11.2	97.5	24	TD	1004
			19.00	11.3	96.5	27	TD	1002
		18 พ.ย.	01.00	11.3	95.5	27	TD	1004
			07.00	12.0	93.0	27	TD	1004
			13.00	12.0	93.5	27	TD	1004
			19.00	12.0	93.4	27	TD	1004
		19 พ.ย.	01.00	11.5	92.5	27	TD	1004
			07.00	11.8	93.3	27	TD	1002
			13.00	12.5	92.5	27	TD	1004
			19.00	13.0	91.5	27	TD	1004
		20 พ.ย.	01.00	14.2	89.5	30	TD	1002
			07.00	13.4	89.8	35	TS	1002
			13.00	14.5	89.5	35	TS	1004
			19.00	16.0	87.8	35	TS	1000
		21 พ.ย.	01.00	17.0	87.5	35	TS	1002
			07.00	16.6	87.7	40	TS	1000
			13.00	17.7	87.5	40	TS	1000
			19.00	19.0	86.0	40	TS	1002
		22 พ.ย.	01.00	20.5	87.5	40	TS	1004
			07.00	20.7	86.5	35	TS	1004
			13.00	21.5	86.5	40	TS	1000
			19.00	22.0	88.5	40	TS	1000
		23 พ.ย.	01.00	22.8	90.5	30	TD	1004
			07.00	23.0	91.0	30	TD	1004
			13.00				L	
	2.พายุโซนร้อน	9 ธ.ค.	07.00				L	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

