

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การหาค่าแรงลมสูงสุดที่กระทำกับโครงสร้าง

A.G. Davenport (1967) ได้เสนอหลักการ วิธีประมาณค่าสูงสุด ของแรงลมที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง ซึ่งรวมผล 3 ส่วน คือ 1. จากค่าเฉลี่ยของแรงลม 2. ค่าจากส่วนกึ่งสถิต (Quasi-static) ซึ่งเกิดจากความผันผวนของลมความถี่ต่ำ และ 3. จากส่วนกำทอน (Resonant) จากความผันผวนของลมความถี่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติ โดยแรงทั้งสามส่วนนี้ เกิดจากผลตอบสนองของเชิงพลศาสตร์ในทิศทางลมจากความปั่นป่วน (Turbulence) ในชั้นบรรยากาศของลมที่ปะทะโครงสร้าง

Ahsan Kareem และ Yin Zhou (2003) ได้กล่าวถึง หลักการ และแนวคิด เกี่ยวกับการประมาณค่าสูงสุดของแรงลม และผลตอบสนองของโครงสร้าง ด้วยหลักการของ ค่าประกอบ เนื่องจากการกระโชกของลม (Gust loading factor, GLF) ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน และแนวทางในอนาคต ซึ่งเน้นไปที่ หลักการของ GLF ที่ได้จาก โมเมนต์พื้นฐานของแบบจำลอง ซึ่งเสนอโดย Y. Zhou, A. Kareem (2001) เป็นหลัก ในบทความของ Ahsan Kareem และ Yin Zhou (2003) เริ่มจาก GLF ที่ใช้ในมาตรฐานทั่วไปอย่างกว้างขวางทั่วโลก แบบแรกที่เสนอโดย A.G. Davenport (1967) ซึ่งมีข้อเสียอยู่ 2 ประการคือ 1. GLF แบบนี้พิจารณาจาก อัตราส่วนการเสียรูปสูงสุดต่อค่าเฉลี่ยการเสียรูป ของโครงสร้าง ทำให้การประมาณค่าสูงสุดอาจผิดพลาดได้ เนื่องจากใช้เพียงค่าเฉลี่ย และความแปรปรวน ของการเสียรูปในโหมดแรก เท่านั้น ซึ่งทำให้ได้ค่า GLF เป็นค่าคงที่สำหรับโครงสร้างหนึ่งๆ เมื่อนำค่า GLF นี้ไปหาแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างเพื่อการออกแบบจะได้ลักษณะการกระจายตัวของแรงลม ตามลักษณะของค่าเฉลี่ยของแรงลมที่ระดับต่างๆ ของโครงสร้าง จึงขัดแย้งกับข้อเท็จจริงสำหรับอาคารสูง และโครงสร้างที่มีลักษณะอ่อนตัวได้ง่าย ซึ่งการกระจายตัวของแรงลมควรมีลักษณะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของมวล และ mode shape ของโครงสร้าง และ 2. GLF แบบนี้ไม่สามารถนำไปใช้หาค่าสูงสุดของแรง หรือ ผลตอบสนอง เมื่อค่าเฉลี่ยของแรง หรือผลตอบสนอง มีค่าเป็น ศูนย์ เช่น แรง หรือผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิด ด้วยข้อเสียที่กล่าวมาทำให้การใช้หลักการของ GLF แบบเดิมมีข้อผิดพลาดในการนำไปใช้งานในหลายๆ กรณี ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทความของ Zhou และคณะ (1999) ทำให้ต่อมาได้มีการพัฒนาปรับปรุงหลักการของ GLF ขึ้นโดย A.G. Davenport (1999) , C.

Drybre, S.O. Hansen (1967) และ J.D. Holmes (2001) แต่ยังมีข้อจำกัด และความไม่สะดวกในการใช้งานอีกหลายประการ ต่อมาจึงมีการนำเสนอในบทความของ Y. Zhou และ A. Kareem (2001) ซึ่งได้เปลี่ยนแนวทางของ GLF จากพื้นฐานของการเสียรูปของโครงสร้าง เป็น โมเมนต์พื้นฐาน จากการทดสอบของแบบจำลองในอุโมงค์ลม มาประมาณค่าสูงสุดของแรงลม และผลตอบสนองของโครงสร้างจริง โดยกระจายจากแรงพื้นฐานไปสู่ชั้นต่างๆ เหมือนกับการกระจายแรงเฉือนพื้นฐานของแรงแผ่นดินไหว ซึ่งทำให้สามารถใช้ได้กับ แรงและผลตอบสนองในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดได้

Y. Zhou และ A. Kareem (2001) ได้เสนอหลักการ และแนวคิดใหม่ ของ Gust Loading Factor โดยอ้างอิงจาก ข้อมูลที่ทดสอบได้จาก วิธีทดสอบในอุโมงค์ลม High-Frequency Base Balance มาใช้แทนหลักการเดิม ซึ่งอ้างอิงจากการเสียรูปของอาคาร และโครงสร้าง

2.2 การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมด้วยวิธี High-Frequency Base Balance

Tschanz และ Davenport (1983) ได้ใช้วิธีการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยวิธี High Frequency Force Balance เพื่อนำมาใช้ในการหาแรงลมที่กระทำต่ออาคารสูง ซึ่งไม่มีพฤติกรรม การ coupling ในแต่ละ mode shape ของอาคาร ทำให้สามารถหาผลตอบสนองเกิดขึ้นกับอาคาร ในแต่ละทิศทางได้ โดยเทคนิคการทดสอบในอุโมงค์ลมนี้จะต้องใช้ค่า mode shape correction มาปรับแก้ผลการทดสอบ

Y. Zhou, Tracy Kijewski and A. Kareem (2003) ได้จัดทำ Interactive database รวบรวมข้อมูล ผลการทดสอบแบบจำลอง โดยวิธี High-Frequency Force Balance ไว้ใน website www.nd.edu/~nathaz. โดยเสนอในรูปของ non-dimensional aerodynamic loads ซึ่งสามารถนำไปใช้หาผลตอบสนองของอาคารสูงไม่มีพฤติกรรมการ coupling ในแต่ละ mode shape ของอาคาร ได้ โดยได้อธิบายถึงการหลักการและวิธีการนำค่าที่ได้ไปใช้เพื่อหาผลตอบสนองของโครงสร้างต่างๆ ต่อแรงลม

Chen, Kareem (2005b) เสนอวิธีในการหาแรง และผลตอบสนอง ของอาคารที่มีลักษณะซับซ้อน ต้องใช้การรวมผลแบบ 3 มิติเพื่อพิจารณาผลของแรงที่กระทำต่ออาคารในแต่ละทิศทาง โดยวิธีการของ High Frequency Force Balance

2.3 การรวมผลของแรงลมสำหรับอาคาร

Melbourne W.H. (1975) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบ ผลของแรงและผลการตอบสนองที่กระทำกับอาคาร BHP House กับผลการทดสอบกับแบบจำลอง พบว่าแรงและผลตอบสนองของอาคารในทิศทางลม และทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม ไม่มีความสัมพันธ์กัน

AS1170.2 (1989) แนะนำการรวมผลของแรงลมในทิศทางลม และทิศทางตั้งฉาก โดยพิจารณาแยกผลจากแรงทั้งสองออกจากกัน แล้วนำผลตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งสองกรณีมาใช้หาผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้าง โดยใช้สมการซึ่งเป็นฟังก์ชันของผลตอบสนองสูงสุดในทิศทางลม ผลตอบสนองเฉลี่ยในทิศทางลม ผลตอบสนองสูงสุดในทิศทางตั้งฉากกับลม ผลตอบสนองเฉลี่ยในทิศทางตั้งฉากกับลม และค่าประกอบเนื่องจากการกระชากของลม (Gust loading factor) แต่อย่างไรก็ตามในภาคผนวกของมาตรฐาน ได้แนะนำการรวมผลของแรงในทิศทางลม และทิศทางตั้งฉากกับลม ไว้อีกวิธี คือให้แรงทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบวงรี แล้วหาผลรวมแบบเวกเตอร์ของแรงทั้งสองที่มีค่าสูงสุด ทำให้ได้สัดส่วนของแรงลมในแต่ละทิศทางเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อหาผลตอบสนองสูงสุดต่อไป

AS/NZS 1170.2 (2002) ได้ปรับปรุงการพิจารณาการรวมผลของแรงในทิศทางลม และทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม เนื้อหาในเรื่องการหาผลตอบสนองสูงสุดต่อแรงลมในสองทิศทาง คล้ายกับ AS1170.2 (1989) แต่เปลี่ยนรูปแบบของสมการซึ่งใช้ในหาค่าผลตอบสนองของแรงสูงสุดใหม่ และในส่วนเพิ่มเติมของมาตรฐาน ได้กล่าวถึงทางเลือกในการรวมแรงลมแบบเวกเตอร์ออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ร้อยละ 25 ของแรงลมเฉลี่ยในทิศทางลม รวมกับ ร้อยละ 75 ของแรงลมสูงสุดในทิศทางลม และ ร้อยละ 75 ของส่วนต่างของแรงลมสูงสุดกับแรงลมเฉลี่ย ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และ กรณีที่ 2 แรงลมเฉลี่ยในทิศทางลม รวมกับผลต่างของแรงสูงสุดกับค่าเฉลี่ย ของแรงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม

Y. Tamura, H. Kikuchi และ K. Hibi (2003) ได้ทดสอบการรวมผลของแรงลมที่กระทำกับโครงสร้าง สำหรับอาคารเตี้ย และอาคารสูงปานกลาง โดยทดสอบกับแบบจำลองรูปทรงสี่เหลี่ยม ในอุโมงค์ลม และวัดค่าความดันบนจุดต่างๆ บนแบบจำลอง และหาผลรวมของแรงทั้งหมดออกมาเป็นแรงที่กระทำรวมต่อแบบจำลองทั้งหมด คือ แรงในทิศทางลม (F_D), แรงในแนวตั้งฉากกับลม (F_L) แรงยก (F_T), โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานในทิศทางลม (M_D), โมเมนต์พลิกคว่ำที่ฐานในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม (M_L) และโมเมนต์บิดที่ฐาน (M_T) และพิจารณาค่าผลรวมของแรงเหล่านี้ในรูปไร้หน่วย คือ สัมประสิทธิ์แรงในทิศทางลม (C_D) สัมประสิทธิ์แรงลมในทิศทางตั้งฉาก (C_L) และสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิด (C_{MT}) พบว่า ค่าสัมบูรณ์ของค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์แรงลม

ในแต่ละทิศทางมีความสัมพันธ์ต่อกัน โดยในส่วนของ แรงในทิศทางลม กับ แรงในทิศทางตั้งฉาก หรือ แรงในทิศทางลม กับ โมเมนต์บิด จะมีความสัมพันธ์กันมาก และ แรงในทิศทางตั้งฉาก กับ โมเมนต์บิด ก็มีความสัมพันธ์กัน แต่น้อยกว่าความสัมพันธ์ของแรงในสองส่วนแรก นอกจากนี้ ยังได้นำผลการรวมแรงที่วัดได้ไปวิเคราะห์หาหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นในแบบจำลองของโครงสร้าง ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม และมีเสาที่มุม 4 ต้น พบว่า หากวิเคราะห์เฉพาะผลของแรงในทิศทางลมเพียงอย่างเดียวจะทำให้ หน่วยแรงตั้งฉากในเสนาน้อยกว่า การวิเคราะห์โดยรวมผลของแรงทั้งหมด ได้ถึงร้อยละ 30 สำหรับอาคารเตี้ย และอาคารสูงปานกลาง

Asami (2000) ได้ศึกษาการรวมผลของแรงในทิศทางตั้งฉากกับลม และโมเมนต์บิด ที่กระทำกับอาคารสูง โดยหาความสัมพันธ์ในรูปของ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วม ของแรงทั้ง 3 ส่วน และได้มีการนำไปใช้ใน มาตรฐาน AIJ (2004)

AIJ (2004) ได้กล่าวถึงการรวมผลของแรงในทิศทางลม แรงในทิศทางตั้งฉากกับลม และโมเมนต์บิดที่กระทำต่อโครงสร้างว่าค่าสูงสุดของแรงเหล่านี้ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยใช้แรงเหล่านี้ทั้งหมดพร้อมกันจะได้ผลที่มากกว่าความเป็นจริง มาตรฐานนี้ได้แบ่งโครงสร้างเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่ 1 อาคารที่มีส่วนของผลตอบสนองแบบกำทอนน้อย จะหาแรงลมในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม โดยใช้ค่า สัมประสิทธิ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความกว้างในด้านขนานกับแรงลมและความกว้างในด้านรับลม ไปคูณกับแรงลมในทิศทางลม ประเภทที่ 2 อาคารที่มีส่วนของผลตอบสนองแบบกำทอนมาก จะกำหนดค่า สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วมของโมเมนต์พื้นฐานในทิศทางลม และทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม โดยใช้ค่า สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วม เท่ากับศูนย์ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงในทิศทางลมกับแรงในอีกสองทิศทาง และใช้สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ร่วมของโมเมนต์พื้นฐาน ระหว่างทิศทางตั้งฉากกับทิศทางลม และโมเมนต์บิดให้ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของความกว้างในด้านขนานกับแรงลมและความกว้างในด้านรับลม ความถี่ธรรมชาติใน Mode ที่ 1 ในทิศทางที่พิจารณา ความเร็วลมระดับยอดอาคาร โดยใช้ผลการทดสอบในอุโมงค์ลมสำหรับอาคารที่มีอัตราส่วนความหน่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.02

ASCE 7-05 (2005) กำหนดวิธีการคำนวณผลของแรงในทิศทางลมเท่านั้น และได้พิจารณาถึงการรวมผลของแรงลม สำหรับ อาคารที่มีลักษณะแข็งเกร็ง (Rigid Building) ทุกความสูง และ อาคารหรือโครงสร้างซึ่งมีลักษณะอ่อนตัว (Flexible Building) โดยใช้ผลของแรงลมในทิศทางลมมากกระทำกับโครงสร้างในลักษณะต่างๆ ไว้เป็น 4 กรณี โดยกำหนดผลของแรงในทิศทางลม และในทิศทางตั้งฉากเป็น ร้อยละ 75 ของแรงลมในทิศทางลม กระทำพร้อมกัน และ

พิจารณาโมเมนต์บิดกระทำโดยใช้แรงร้อยละ 75 ของแรงในทิศทางลม กระทำเยื้องศูนย์กลาง ร้อยละ 15 ของด้านที่พิจารณา จากจุดศูนย์กลางของแรงเฉือน

NBC (2005) ได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารหรือโครงสร้าง ให้สามารถรับแรงลมที่มากระทำกับโครงสร้างได้ 4 กรณี คือ 1 แรงลมในทิศทางลมทั้งหมด กระทำในแต่ละด้านของแกนหลักของอาคาร 2 แรงลมกระทำในทิศทางลมแต่ละด้านของแกนหลักของอาคารแต่กระทำเพียงบางส่วนของด้านที่พิจารณา เพื่อคิดผลของโมเมนต์บิดที่กระทำต่อโครงสร้าง 3 แรงกระทำด้วยร้อยละ 75 ของแรงในทิศทางลมในแต่ละด้าน กระทำพร้อมกันทั้ง 2 ด้านของอาคาร เพื่อพิจารณาแรงลมในส่วนของแรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม และ 4 แรงกระทำตามลักษณะข้อ 3 แต่ให้ใช้ร้อยละ 50 ของแรงกระทำกับบางส่วนของโครงสร้าง เพื่อคิดผลของแรงในด้านตั้งฉากกับทิศทางลม และ โมเมนต์บิดที่เกิดกับอาคาร

มยผ.1311-50 (2552) ได้ทำงานวิจัยร่างมาตรฐาน สำหรับการออกแบบโครงสร้างรับแรงลม เพื่อปรับปรุงกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ได้กำหนดวิธีคิดการรวมผลของแรงในทิศทางลม แรงในทิศทางตั้งฉากกับลม และโมเมนต์บิด ที่กระทำต่อโครงสร้างสำหรับวิธีอย่างง่าย โดยให้คิดเป็น 4 กรณี ตามแบบมาตรฐาน ASCE 7-05 (2005) และสำหรับวิธีอย่างละเอียด แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ 1 $(1.00 \times \text{แรงลมในทิศทางลม}) + (0.4 \times \text{แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม}) + (0.40 \times \text{โมเมนต์บิด})$ และ 2 $\left(0.40 + \frac{0.60}{C_g}\right) \text{แรงลมในทิศทางลม} + (1.00 \times \text{แรงลมในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม}) + (1.00 \times \text{โมเมนต์บิด})$