บทที่ 2

ลักษณะของแรงเคเบิลที่กระทำต่อคอนไม้แขวนเคเบิลในงานภาคสนาม

2.1 รูปแบบการใช้งานของเคเบิลที่แขวนลงคอนไม้แขวนเคเบิล

2.1.1 ชนิดของสายเคเบิล

การติดตั้งเคเบิลลงบนคอนไม้แขวนเคเบิลในงานภาคสนามจะมีเคเบิลอยู่สองประเภทที่แขวนอยู่กับคอนไม้แขวนเคเบิล คือ AP-(8) และ AP-PIC เคเบิลทั้งสองประเภทจะมีลักษณะในการติดตั้งที่แตกต่างกันโดยที่ AP-(8) หรือ เรียกอีกอย่างว่า Figure eight จะมีสายสะพานและคู่สายโทรศัพท์รวมอยู่ร่วมกันด้วยฉนวนยางที่หุ้มไว้ และ AP-PIC จะมีสายสะพานและคู่สายโทรศัพท์รวมอยู่ร่วมกันด้วยลวดรัด (Lashing wire) ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 ขนาดและน้ำหนักของสายเคเบิลที่ใช้ในงานด้านช่ายสายอากาศทั้งสองประเภทจะแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งปกติขนาดสายสะพานของ AP-(8) จะใช้ขนาด 4M ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.0 มิลลิเมตร โดยในการติดตั้งขนาดสายสะพานของ AP-(8) ในงานภาคสนามจะต้องออกแรงดึง 750 กิโลกรัม ส่วนขนาดสายสะพาน AP-PIC จะใช้ขนาด 6M ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 มิลลิเมตร โดยการติดตั้งขนาดสายสะพานของ AP-PIC ในงานภาคสนามจะต้องออกแรงดึง 1,500 กิโลกรัม ตามลำดับ

2.1.2 การติดตั้งสายเคเบิลในงานภาคสนาม

การติดตั้งเคเบิลสายอากาศในงานภาคสนามสำหรับสายเคเบิลทางตรงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับจะทำการติดตั้งสายเคเบิลทุก ๆ ช่วงเสาไฟฟ้าที่ห่างกัน 10 ถึง 15 ช่วงเสา เริ่มแรกจะทำการแขวนสายสะพานไว้กับแคลมป์ยึดสายสะพานที่ติดกับคอนไม้แขวนเคเบิลไว้ก่อนโดยยังไม่ต้องขันโบลท์ยึดแคลมป์ทุก ๆ ต้นของเสาไฟฟ้าหลังจากนั้นติดตั้งกายย์จากเสาไฟฟ้าลงดินเพื่อป้องกันไม่ให้เสาไฟฟ้าล้มซึ่งจะติดกายย์ไว้ที่เสาไฟฟ้าต้นแรกและต้นสุดท้ายโดยไม่ต้องมีคอนไม้แขวนเคเบิลแขวนร่วมกับเสาไฟฟ้า ส่วนเสาไฟฟ้าต้นที่สองและต้นรองสุดท้ายจะทำการติดตั้งคอนไม้แขวนเคเบิลคู่กันและเสาไฟฟ้าต้นที่สามและต้นถัดไปให้คอนไม้แขวนเคเบิลทำการสลับหน้ากันทุกๆ ต้นของเสาไฟฟ้า ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ต่อจากนั้นทำการดึงสายสะพานให้แน่นซึ่งเดิมในอดีตการดึงสายสะพานจะใช้โซ่รอกแกร๊กต่อเข้ากับไดนาโมมิเตอร์เพื่อหาแรงดึงของสายสะพานที่เกิดขึ้นโดยการอ่านค่าตัวเลขจากหน้าปัทม์ของไดนาโมมิเตอร์ดังแสดงไว้ในส่วนขยายรูปที่ 2.2ก เมื่อดึงสายสะพานได้แรงตามขนาดของสายสะพานที่กำหนดไว้ข้างต้นแล้วจากนั้นจึงทำการขันโบลท์ยึดสายสะพานให้แน่นหรือถ้ากรณีที่ในงานภาคสนามไม่

ได้ใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดหาแรงที่เกิดขึ้นก็ใช้โซ่รอกแกรักขันสายสะพานให้ตึงแล้วทำการเคาะสายสะพานที่ขึงตึงด้วยเหล็กประแจถ้าสายสะพานมีเสียงดังกังวานตลอดช่วงเสาถือได้ว่าสายสะพานนั้นขึงตึงสามารถแขวนสายเคเบิลได้แต่ทั้งนี้สายสะพานต้องเป็นสายสะพานที่สั่งเข้าจากประเทศอเมริกา แต่ในปัจจุบันสายสะพานที่ใช้สามารถผลิตในประเทศไทยซึ่งคุณภาพที่ได้ยังสู้ต่างประเทศไม่ได้แม้ว่าจะทำการเคาะสายสะพานที่แขวนกับเสาไฟฟ้าด้วยเหล็กประแจแล้วก็ตามแต่ก็ยังไม่เกิดเสียงดังกังวานของสายสะพาน ดังนั้นแม้ปัจจุบันการติดตั้งสายสะพานแขวนสายเคเบิลจะไม่มีการวัดหาแรงของสายสะพานด้วยไดนาโมมิเตอร์แต่การติดตั้งสายเคเบิลก็อาศัยประสบการณ์และการคาดคะเนด้วยสายตา เมื่อทำการติดตั้งสายสะพานที่ขึงตึงและแขวนสายเคเบิลเป็นที่เรียบร้อยต้องตรวจสอบไม่ให้ระยะการตกท้องช้าง (Sag) ของสายเคเบิลมีค่ามากกว่าตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า

ในการติดตั้งคอนไม้แขวนเคเบิลที่ติดตั้งร่วมกับเสาไฟฟ้านั้นทางองค์การโทรศัพท์ได้ทำข้อตกลงการขอเช่าเสาไฟฟ้ากับการไฟฟ้าภาคนครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งในข้อตกลงการขอเช่าเสาไฟฟ้าที่ระบุไว้ในสัญญามีรายละเอียดมากมายแต่ในงานทางด้านวิศวกรรมจะนำข้อตกลงในสัญญามาใช้เพียงไม่กี่ข้อ อาทิเช่น ข้อตกลงในการติดตั้งคอนไม้แขวนเคเบิลกับเสาไฟฟ้าที่ทำข้อตกลงกับการไฟฟ้าภาคนครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนั้นให้ติดตั้งระบบข่ายสายของเคเบิลสูงจากผิวจราจรไม่เกิน 5.70 เมตร และ 5.90 เมตร ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ในการติดตั้งระบบข่ายสายของเคเบิลท้องของสายเคเบิลจะต้องอยู่สูงจากผิวจราจรโดยสามารถให้รถบรรทุกขนาดใหญ่วิ่งผ่านได้ไม่น้อยกว่า 5.50 เมตร จากข้อตกลงของสัญญาในการติดตั้งระบบข่ายสายของเคเบิลจะเห็นได้ว่าระยะตกท้องช้างมากที่สุดของสายเคเบิลสายอากาศที่ติดตั้งต้องไม่เกิน 20 เซนติเมตร สำหรับข้อกำหนดการไฟฟ้าภาคนครหลวง และไม่เกิน 40 เซนติเมตร สำหรับข้อกำหนดการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนั้นในการติดตั้งของระบบงานข่ายสายพนักงานขององค์การโทรศัพท์จะต้องสังเกตไม่ให้ระยะตกท้องช้างมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด และ จะต้องมีช่องว่างของสายเคเบิลกับศูนย์กลางของเสาไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 60 เซนติเมตร เพื่อให้พนักงานการไฟฟ้าสามารถปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าได้สะดวก โดยระบบงานทางด้านข่ายสายที่แขวนร่วมกับคอนไม้แขวนเคเบิลที่ใช้อยู่ปัจจุบันจะมีการติดตั้งอยู่สองรูปแบบ คือ แบบแรกสายเคเบิลทั้งสองเส้นอยู่บนถนนด้านเดียว (Two cable on road side) และ แบบที่สองสายเคเบิลทั้งสองเส้นอยู่บนถนนทั้งสองด้าน (Two cable on both sides) จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 และ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสายเคเบิลโทรศัพท์ที่ใช้แขวนกับคอนไม้แขวนเคเบิลจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแนวเสาไฟฟ้าและขนาดความยาวของเสาไฟฟ้า โดยมีการแบ่งพื้นที่ในการติดตั้งเป็นสองพื้นที่คือ พื้นที่ในภาคนครหลวงและพื้นที่ในส่วนภูมิภาค ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

2.1.3 การติดตั้งเหล็กประกับลงในคอนไม้แขวนเคเบิล

เหล็กประกับที่ติดกับคอนไม้แขวนเคเบิลจะทำหน้าที่ให้คอนไม้แขวนเคเบิลเกิดความสมดุลหรือคอนไม้แขวนเคเบิลไม่เกิดการเอียงทางใดทางหนึ่งเมื่อน้ำหนักของสายเคเบิลที่ลงบนปลายทั้งสองข้างของคอนไม้แขวนเคเบิลมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากปัจจุบันได้มีการขอการติดตั้งสายเคเบิลเพิ่มขึ้นจากบริษัทเอกชนที่ได้รับสัมประทานงานทางด้านการสื่อสารซึ่งขอพ่วงร่วมกับคอนไม้แขวนเคเบิลที่แต่เดิมสายเคเบิลโทรศัพท์ได้ทำการติดตั้งไว้ก่อนหน้านี้แล้ว ดังนั้นในงานภาคสนามการติดตั้งเหล็กประกับจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องมีการเจาะรูผ่านเนื้อไม้โดยใช้สว่านมือเพื่อติดเหล็กประกับ โดยการเจาะรูจะไม่สามารถทำได้จากโรงงานแต่ต้องกระทำในหน้างานเพราะรูของเสาไฟฟ้าในแต่ละระดับมีค่าไม่เท่ากัน ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานภาคสนามสำหรับการเจาะรูลงคอนที่ไม่ใช่คอนไม้แขวนเคเบิลเพื่อติดตั้งเหล็กประกับจึงเกิดขึ้นถ้าคอนไม้แขวนเคเบิลถูกเปลี่ยนมาใช้วัสดุอื่นทดแทน สำหรับถ้ากรณีเป็นคอนกรีตอัดแรงสปันมาใช้ทดแทนคอนไม้แขวนเคเบิลก็จะเกิดปัญหาไม่สามารถเจาะรูผ่านเนื้อคอนกรีตอัดแรงสปันได้ด้วยสว่านมือเพราะคอนกรีตมีความแข็งมาก ขณะที่กรณีเป็นคอนเหล็กรูปตัวซีอาจไม่ต้องทำการเจาะรูด้วยสว่านมือเนื่องจากรูที่ติดเหล็กประกับมีลักษณะเป็นรูปสล็อตซึ่งมีความยาวเพียงพอสำหรับการเคลื่อนตัวของการติดตั้งเหล็กประกับ

2.2 การกำหนดแรงเคเบิลที่กระทำต่อคอนไม้แขวนเคเบิล

2.2.1 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง

ผลจากแรงลมกระทำต่อโครงสร้างหรือสายเคเบิล ให้คิดหน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างหรือสายเคเบิลจาก

$$W = q_{ref} C_{exp} C_{shp} C_{dyn} \qquad (2.1)$$

โดยที่ W = หน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง (Wind force per unit area)

q_{ref} = หน่วยแรงดันลมอ้างอิงจากความเร็วลม (Reference velocity pressure) หรือหน่วยแรงดันลมอ้างอิง

C_{exp} = ตัวคูณสภาพพื้นผิว (Exposure factor)

C_{shp} = ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic shape factor)

C_{dyn} = ตัวคูณผลพลศาสตร์ (Dynamic response factor)

หน่วยแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างหรือสายเคเบิลจะเป็นหน่วยแรงลมสถิตย์เทียบเท่าที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวของโครงสร้าง โดยแรงลมที่กระทำบนโครงสร้างจะมีค่าเทียบเท่ากับหน่วยแรงดันลมคูณกับพื้นที่รับลม สำหรับกรณีแรงลมกระทำบนสายเคเบิลให้คิดพื้นที่รับลมด้านหน้าของสายเคเบิล สำหรับหน่วยแรงดันลมอ้างอิงและตัวคูณต่าง ๆ จะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

2.2.1.1 หน่วยแรงดันลมอ้างอิง (q_{ref})

หน่วยแรงดันลมอ้างอิงเป็นค่าหน่วยแรงดันลมเมื่อพิจารณาความเร็วลมเท่ากับความเร็วลมอ้างอิง หรือเท่ากับความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรในพื้นที่โล่ง โดยคิดคาบเวลากลับ 50 ปี ซึ่งได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติของความเร็วลมระบบธรรมดาที่วัดได้จากสถานีตรวจอากาศในช่วง 10 - 30 ปี โดยหน่วยแรงดันลมอ้างอิง (8) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$q_{ref} = \frac{1}{2}\rho_a V_{ref}^2 \qquad (2.2)$$

โดยที่ V_{ref} = ความเร็วลมอ้างอิง หน่วย เมตรต่อวินาที

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ มีค่าเท่ากับ 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กรณีที่ความเร็วลมไม่ได้วัดที่ความสูง 10 เมตร ในพื้นที่โล่ง จะสามารถแปลงกลับให้เป็นหน่วยแรงดันลมอ้างอิงได้ดังนี้

$$q_{ref} = q \times 0.39 \times \left(\frac{z_g}{z}\right)^{2\alpha} \qquad (2.3)$$

โดยที่ z_g = ความสูงเกรเดียนท์ (Gradient height) ของสภาพภูมิประเทศเดียวกับหน่วยแรงดันลม q

z = ความสูงที่วัดความเร็วลมที่ใช้หาหน่วยแรงดันลม q

α = ดัชนียกกำลังของสภาพภูมิประเทศเดียวกับหน่วยแรงดันลม q

ค่า z_g และ z สำหรับสภาพภูมิประเทศต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

สำหรับหน่วยแรงดันลมที่ความสูง 10 เมตร ในพื้นผิวโล่ง แต่เวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลมไม่เท่ากับ 1 ชั่วโมง หรือ คาบเวลากลับไม่เท่ากับ 50 ปี ต้องนำมาปรับแก้เพื่อปรับเวลาเฉลี่ยในการวัดความเร็วลมหรือคาบเวลากลับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และ 2.6 ผลจากทิศทางลม (Wind directionality) เนื่องจากหน่วยแรงดันลมอ้างอิงซึ่งวัดในทิศทางใด ๆ ที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ กรณีของแรงลมที่กระทำกับสายเคเบิลมีการพิจารณาแรงลมในทิศทางต่าง ๆ ทั้งกรณีของพายุไต้ฝุ่นและลมทั่วไปที่ไม่ใช่ไต้ฝุ่น มีการใช้ตัวคูณลดบนความเร็วลมอ้างอิงก่อนที่จะนำไปหาหน่วยแรงดันลมอ้างอิงซึ่งตัวคูณลดบนความเร็วลมกับทิศทางลมจะแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

2.2.1.2 ตัวคูณผลสภาพพื้นผิว (C_{sp})

ตัวคูณผลสภาพพื้นผิวขึ้นอยู่กับความสูงของโครงสร้างเหนือระดับพื้นดิน และความขรุขระของพื้นผิว (Terrain roughness) ซึ่งบอกได้ในเทอมของระยะความขรุขระ (Roughness length) โดยแสดงลักษณะของขนาดและการกระจายของสิ่งกีดขวางหรือการบดบังผิวหน้าลมที่จะพัดผ่าน ดังแสดงดังได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งรูปนี้บอกถึงลักษณะสภาพภูมิประเทศต่าง ๆ ที่ล้อมรอบด้วยระยะความขรุขระบนพื้นผิวราบ

ตัวคูณผลสภาพพื้นผิวที่ความสูง z ใดๆ (8) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$C_{sp}(z) = B\left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha} \qquad (2.4)$$

โดยที่ $C_{sp}(z)$ = ตัวคูณผลสภาพพื้นผิวที่ความสูง z

B = สเกลแฟคเตอร์ ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศ

α = ดัชนียกกำลัง ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศ

ระยะความขรุขระบนพื้นผิวราบ สเกลแฟคเตอร์ และดัชนียกกำลัง สำหรับสภาพภูมิประเทศต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

2.2.1.3 ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ (C_{ap})

ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตและรูปร่างของโครงสร้าง และ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ปกติค่าตัวเลขเรย์โนลด์มักจะกำหนดการเคลื่อนที่ของอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความหนืดและความเฉื่อย

ของอากาศที่เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (9) จึงมีค่าเท่ากับ Vd/V โดยที่ V คือ ค่าความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบที่ระดับความสูงของสายเคเบิลมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของสายไฟฟ้ามีหน่วยเป็น เมตร และ V คือ ความหนืดจลนศาสตร์มีค่าเท่ากับ $1.5x10^{-5}$ ตารางเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 20° เซลเซียส ตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์บนสายไฟฟ้าที่มีรูปทรงกระบอกขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์โดยจะมีค่าประมาณ 68,700Vd โดยทั่วไปค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์นี้มีค่าแปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 1.3 รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์หรือสัมประสิทธิ์แรงกับตัวเลขเรย์โนลด์ที่ได้จากการทดสอบจากอุโมงค์ลม จากข้อกำหนดใหม่แนะนำให้ใช้ค่า 1.2 สำหรับตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ของสายไฟฟ้าผิวเรียบ (Smooth) และมัดเป็นกลุ่ม (Bundled) แต่เนื่องจากสายเคเบิลโทรศัพท์มีหน้าตัดเป็นรูปเลขแปด Ito และคณะ (2) ได้ทำการศึกษาผลของค่าตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับสายเคเบิลที่มีหน้าตัดรูปเลขแปดพบว่ามีค่าต่ำกว่าค่า $Re=10^{4}-10^{5}$ เล็กน้อย และค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์หาได้จากรูปที่ 2.6. ที่แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงหรือค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์กับมุมของความเร็วลมกระทำกับสายเคเบิลหน้าตัดรูปเลขแปด โดยที่ค่าตัวคูณผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ที่อ่านจากรูปที่ 2.6 มีค่าเท่า 2.0

2.2.1.4 ตัวคูณผลพลศาสตร์ (C_{gm})

ตัวคูณผลพลศาสตร์ คือ อัตราส่วนระหว่างผลเนื่องจากแรงสูงสุดต่อผลเนื่องจากแรงเฉลี่ยที่ติดจากหน่วยแรงดันลมอ้างอิง ซึ่งตัวคูณผลพลศาสตร์คำนึงถึงผลการกระทำของพลศาสตร์ต่างๆ ดังนี้

1. ความแปรปรวน (Fluctuating) ของหน่วยแรงดันลมที่กระทำไหลผ่านรอบ ๆ วัตถุทู่ (Bluff body) ซึ่งรวมถึงผลของเวค (Wake) และ ผลจากลมวนสลับ (Vortex shedding)

2. ความแปรปรวนของหน่วยแรงดันลม เนื่องมาจากความไม่แน่นอนจากลมกระโชก (Gust) กระทำในช่วงเวลาสั้นกว่าเวลาเฉลี่ยสำหรับความเร็วลมอ้างอิง และกระทำบนบางส่วนหรือทั้งหมดของพื้นผิวโครงสร้าง

3. ความแปรปรวนของหน่วยแรงดันที่เกิดจากการสั่นไหวของโครงสร้างเมื่อถูกลมพัด

4. แรงเฉื่อยที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการเกิดก้าทอน (Resonance) ของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนของโครงสร้าง

โครงสร้างทั่วไปจะได้รับผลพลศาสตร์ดังกล่าวบ้างไม่มากก็น้อยขึ้นอยู่กับแรงลมที่กระทำ โดยผลพลศาสตร์ทั้งหมดจะพิจารณาได้จากการรวมผลสองส่วนคือ ส่วนพื้นหลัง (Background component) ซึ่งกระทำกึ่งสถิตย์ (Quasi-statical) โดยปราศจากการขยายเพิ่ม

ทางพลศาสตร์ของโครงสร้างและ ส่วนกำทอน (Resonant component) เนื่องจากสภาวะการกระตุ้นใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของโครงสร้าง ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 สมการโดยทั่วไปที่แสดงถึงผลเนื่องจากแรงสูงสุด $\hat{r}$ เขียนได้ว่า

$$\hat{r} = \bar{r} + g_r \sigma_r \tag{2.5}$$

โดยที่ $\hat{r}$ = ผลสูงสุดเนื่องจากแรง (Peak loading effect)

$\bar{r}$ = ผลเฉลี่ยเนื่องจากแรง (Mean loading effect)

g_r = ตัวประกอบสูงสุดทางสถิติ (Statistical peak factor)

σ_r = รากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจากผลของแรง (RMS. loading effect)

จากสมการ (2.5) สามารถเขียนในรูปใหม่ได้ว่า

$$\hat{r} = \left(1 + \frac{g_r \sigma_r}{\bar{r}}\right) \bar{r}$$

$$= C_{dyn}\, \bar{r} \tag{12}$$

เมื่อ $$C_{dyn} = \frac{1 + g_r \sigma_r}{\bar{r}} \quad , \quad \bar{r} \neq 0$$

ตัวคูณผลพลศาสตร์ C_{dyn} หรือเรียกอีกอย่างว่าตัวคูณตอบสนองลมกระโชก (Gust response factor,G_c) โดยตัวคูณนี้พิจารณาผลการตอบสนองตามความถี่ของสายเคเบิล ลักษณะของลมกระโชก และ สภาพภูมิประเทศที่มีผลตอบสนองกับสายเคเบิล รูปที่ 2.8 จะแสดงระยะห่างของเสาไฟฟ้าและระดับความสูงของเคเบิลที่ติดตั้งบนคอนไม้แขวนเคเบิล การหาค่าตัวคูณผลพลศาสตร์มีพื้นฐานมาจาก Davenport โดยแสดงค่าของตัวคูณการตอบสนองลมกระโชก (Gust response factor,G_c) สำหรับสายเคเบิล ดังนี้

$$G_c = 1 + g\varepsilon E \sqrt{B_c + R_c} \tag{2.7}$$

เมื่อ g = ตัวประกอบทางสถิติ (Statistical factor) มีค่าระหว่าง 3.5 - 4.0 ในที่นี้ให้ใช้ค่าเฉลี่ย g เท่ากับ 3.8

ε = ค่าคงที่ 0.75

E = ตัวประกอบสภาพพื้นผิว (Exposure factor) มีค่าเท่ากับ $\sqrt{24K}\left(\frac{10}{h_c}\right)^{\alpha}$
โดยที่ h_c เท่ากับ ความสูงประสิทธิผลของสายเคเบิล

K = สัมประสิทธิ์ความฝืดพื้นผิว (Surface drag coefficient)

B_c = ส่วนของผลพื้นหลังของสายเคเบิลซึ่งกระทำกึ่งสถิตย์ (Background quasi-static response component) ที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติ

R_c = ส่วนของผลกำทอน (Resonant response component) ของสายเคเบิล ที่มีความถี่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของสายเคเบิล

เมื่อแทนค่า g,ε,E และตัวคูณผลสภาพพื้นผิว (C_{exp}) ลงไปในสมการตัวคูณการตอบสนองลมกระโชก สำหรับสายเคเบิลจะได้ว่า

$$G_c = 1 + 14\sqrt{\frac{KB}{C_{exp}(h_c)}}\sqrt{B_c + R_c} \qquad (2.8)$$

โดยที่ h_c = ความสูงประสิทธิผลของสายเคเบิลมีค่าเท่ากับความสูงที่ระดับติดตั้งสายเคเบิลลบด้วย 2/3 ของระยะตกท้องช้าง $C_{exp}(h_c) = B\left(\frac{h_c}{10}\right)^{2\alpha}$

ค่า $\sqrt{KB}$ โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.05 และ 0.09 ขึ้นกับสภาพพื้นผิว (B) โดยปกติจะมีค่า 0.07 แทนลงในสมการ (2.8) จะได้ตัวคูณการตอบสนองลมกระโชกหรือตัวคูณผลพลศาสตร์ (C_{dyn}) ในรูปที่ง่ายขึ้น

$$C_{dyn} = G_c = 1 + \frac{1}{\sqrt{C_{exp}(h_c)}}\sqrt{B_c + R_c} \qquad (2.9)$$

ค่าส่วนของผลพื้นหลังของสายเคเบิลซึ่งกระทำกึ่งสถิตย์ คำนวณได้จาก

$$B_c = \frac{1}{1 + 0.8\frac{L}{L_s}} \qquad (2.10)$$

โดยที่ L = ระยะห่างเสาไฟฟ้า (Typical span)

L_s = สเกลอินทริกัลทางขวางของการแปรปรวน (Transverse integral scale of turbulence) โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 65 เมตร

ค่าส่วนของผลกำทอนของสายเคเบิล (R_c) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R_c = 0.0113\left[\frac{f_o h_c}{\bar{V}_{h_c}}\right]^{-\frac{5}{3}} \frac{h_c}{L}\frac{1}{\zeta_c} \qquad (2.11)$$

โดยที่ f_c = ความถี่ธรรมชาติของสายเคเบิลค่าประมาณเท่ากับ $\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3g}{2xSag}}$ หน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational acceleration) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตร/วินาที^{2}

sag = ระยะตกท้องช้าง มีค่าประมาณ $\frac{wL^2}{8T}$ หน่วย เมตร

w = น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายเคเบิล หน่วย กิโลกรัมต่อเมตร

T = แรงดึงในสายเคเบิล หน่วย กิโลกรัม

$\bar{V}_{h_c}$ = ความเร็วลมที่ความสูงประสิทธิผลของสายเคเบิลมีค่าเท่ากับ

= $V_{ref}\sqrt{C_{exp}(h_c)}$ หน่วย เมตรต่อวินาที

ζ_c = อัตราส่วนความหน่วงของสายเคเบิล มีค่าประมาณ

$$\left(\frac{\rho_a d^2}{m}\right)\left(\frac{\bar{V}_{h_c}}{f_c d}\right)\left(\frac{C_{shp}}{4\pi}\right)$$

m = มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายเคเบิล หน่วย กิโลกรัมต่อเมตร

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของสายเคเบิล หน่วย เมตร

2.2.2 สภาพการรับน้ำหนัก

1. แรงลมกระทำในทิศตั้งฉากกับแนวสายเคเบิล (Transverse wind) คือ แรงลมกระทำกับสายเคเบิลในทิศตั้งฉากมีค่าเท่ากับหน่วยแรงลมที่ได้จากสมการ (2.1) คูณกับพื้นที่รับลมของสายเคเบิล

2. แรงลมกระทำในทิศขนานกับแนวสายเคเบิล (Longitudinal wind) ในกรณีนี้แรงลมกระทำกับสายเคเบิลเป็นศูนย์

3. แรงลมกระทำในทิศทางทำมุม ψ กับแนวตั้งฉากกับแนวสายเคเบิล (Yawed ψ wind) จะได้ส่วนประกอบของแรงในแนวตั้งฉากกับสายเคเบิล ดังสมการข้างล่างนี้

$$F_c = q_{ref} C_{exp} C_{shp} C_{dyn} A \cos^2\psi \qquad (2.12)$$

โดยที่ F_c = แรงที่กระทำกับสายเคเบิล ในทิศทางตั้งฉากแนวสายเคเบิล
A = พื้นที่รับลมของสายเคเบิล

2.2.3 แรงจากสายเคเบิลกระทำลงบนจุดรองรับของคอนไม้แขวนเคเบิล

ในข้อกำหนดการออกแบบเสาส่งไฟฟ้าในประเทศไทยที่เสนอโดยมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นออนตาริโอ ให้ใช้ความเร็วลมพื้นฐาน (Basic wind speed) หรือความเร็วลมเฉลี่ย 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตร เมื่อคิดคาบเวลากลับ 50 ปี ในพื้นที่โล่งซึ่งค่าความเร็วลมพื้นฐานสำหรับประเทศไทยได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ในที่ใช้ค่า 26.5 เมตรต่อวินาที ส่วนผลจากทิศทางลม (Wind direction) ที่กระทำในทิศทางต่าง ๆ ซึ่งอ้างอิงกับทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวสายเคเบิล มีการคิดแรงกระทำบนสายเคเบิลทั้งกรณีของพายุได้ฝุ่นและลมเฉลี่ยโดยทั่วไปที่ไม่ใช่ลมได้ฝุ่น มีการใช้ตัวคูณลดบนความเร็วลมอ้างอิงก่อนที่จะนำไปหาหน่วยแรงดันลมอ้างอิง ที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.7 ในที่นี้ใช้ตัวคูณลดบนความเร็วลมอ้างอิงเนื่องจากทิศทางลมมีค่า 0.85 และ ตัวคูณเพิ่มความเสี่ยงภายใต้พายุได้ฝุ่นมีค่า 1.4 เนื่องจากคาบเวลากลับของแรงลมพายุได้ฝุ่นจะมีค่ามากกว่าพายุลมทั่วไปที่ไม่ใช่ได้ฝุ่น จะได้ค่าความเร็วลมในการออกแบบเท่ากับ 31.7 เมตรวินาที

ค่าแรงดันลมอ้างอิงที่กระทำกับโครงสร้างหรือสายเคเบิลมีค่าเท่ากับ 62.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ได้จากการแทนค่าความเร็วลมในการออกแบบลงในสมการ (2.2) สำหรับตัวคูณผลสภาพพื้นผิวหาได้จากสมการ (2.4) ส่วนตัวผลรูปร่างอากาศพลศาสตร์ของสายเคเบิลที่มีหน้าตัดเป็นรูปเลขแปดมีค่าเท่ากับ 2.0 และ ตัวคูณผลพลศาสตร์บนสายเคเบิลคำนวณได้จากสมการ (2.9) (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ หลังจากนั้นหาแรงกระทำต่อสายเคเบิลในทิศทางต่าง ๆ สำหรับในการพิจารณาสภาพรับน้ำหนักในการออกแบบโครงสร้างที่มีแรงลมกระทำให้พิจารณาตัวคูณน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ตามการออกแบบด้วยวิธีกำลังประลัย คือ 0.75x(1.5DL+1.8WL) หรือประมาณ 1.125DL+1.4WL โดย DL แทนน้ำหนักบรรทุกคงที่ และ WL แทนแรงลมตามลำดับ รายละเอียดการคำนวณจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก และน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อปลายแต่ละข้างของคอนแขวนเคเบิลเมื่อมีแรงลมมากระทำในทิศทางทำมุมกับแนวราบของสายเคเบิล สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.9

2.2.4 ผลของแรงลมที่กระทำต่อวัสดุทู่

พิจารณารูปที่ 2.10 ที่แสดงถึงวัสดุทู่เมื่อได้รับแรงลมกระทำอย่างสม่ำเสมอโดยสมมติให้วัสดุทู่ถูกตรึงไว้ที่ปลายทั้งสองข้างเพื่อให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของวัสดุทู่แต่ให้เกิดเฉพาะการแกว่งเพียงอย่างเดียวและมุมของความเร็วลม U_r ที่กระทำต่อวัสดุทู่คือ α ดังนั้นเมื่อวัสดุทู่ได้

รับแรงลมกระทำจะก่อให้เกิดแรงเฉลี่ยลาก (Mean drag force,$D(\alpha)$) และ แรงเฉลี่ยยก (Mean lift force,$L(\alpha)$) ดังสมการข้างล่างนี้

แรงเฉลี่ยลาก
$$D(\alpha) = \frac{1}{2}\rho_a U_r^2 B C_D(\alpha) \quad (2.13)$$

แรงเฉลี่ยยก
$$L(\alpha) = \frac{1}{2}\rho_a U_r^2 B C_L(\alpha) \quad (2.14)$$

โดยที่ ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ
U_r = ความเร็วลมประสิทธิผล
B = ความสูงของวัสดุที่ที่สัมผัสกับความเร็วลม
$C_D(\alpha)$ = สัมประสิทธิ์ของแรงเฉลี่ยลาก
$C_L(\alpha)$ = สัมประสิทธิ์ของแรงเฉลี่ยยก

ดังนั้นเมื่อทำการโปรเจคแรงในทิศทางของแกน y แล้วจะได้ว่า

$$F_y = -D(\alpha)\sin\alpha - L(\alpha)\cos\alpha \quad (2.15)$$

หรือ ถ้าเขียนอยู่ในรูปทั่วไปจะได้ว่า

$$F_y = \frac{1}{2}\rho_a U^2 B C_{F_y}(\alpha) \quad (2.16)$$

โดยที่ $U = U_r\cos(\alpha)$
$C_{F_y} = -[C_L(\alpha) + C_D(\alpha)\tan\alpha]\sec\alpha$

รายละเอียดในการวิเคราะห์คำนวณน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นของแรงลมที่พัดผ่านต่อสายเคเบิลโทรศัพท์แล้วถ่ายน้ำหนักลงปลายทั้งสองข้างของคอนแชวนเคเบิลจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข และน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อปลายแต่ละข้างของคอนแชวนเคเบิลเมื่อมีแรงลมมากระทำในทิศทางทำมุมกับแนวดิ่งของสายเคเบิล สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.10