



การประเมินสมรรถนะของแผงกั้นลมที่มีความพรุนต่างกันต่อพฤติกรรมการไหลของลมผ่านสะพาน

ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

PERFORMANCE EVALUATION OF WIND BARRIERS WITH VARYING POROSITY ON BRIDGE DECK USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

จิรวัดน์ จันทร์เรือง¹ และวิโรจน์ บุญญภิญโญ^{2*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author, E-mail: bvirote@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการประเมินประสิทธิภาพของแผงกั้นลม ต่อการลดความเร็วลมบนหน้าตัดสะพานผ่านการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ของแผงกั้นลมที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ 23 และ 54% ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าหน้าตัดสะพานที่ไม่มี การติดตั้งแผงกั้นลมมีความเสี่ยงสูงสุดเนื่องจากกระแสลมปะทะพื้นผิวจราจร โดยตรง การติดตั้งแผงกั้นลมที่มีความพรุน 23% ทั้ง สองด้านให้ประสิทธิภาพในการกำบังลมสูงสุด โดยสร้างเขตความเร็วลมต่ำครอบคลุมพื้นที่จราจร ได้ตลอดความกว้างสะพาน เมื่อ เพิ่มค่าความพรุนเป็น 54% พบว่าระดับความเร็วลมบนสะพานเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนพื้นที่ที่เปิด ทำให้ประสิทธิภาพการป้องกันลดลง อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การศึกษาดำเนินการติดตั้งชี้ให้เห็นว่าการติดตั้งแผงกั้นฝั่งต้นลมเพียงด้านเดียวสามารถลดความเร็วลม ได้ใกล้เคียงกับการติดตั้งสองด้าน ในขณะที่การติดตั้งฝั่งท้ายลมเพียงอย่างเดียวไม่ส่งผลต่อการชะลอความเร็วลมเหนือผิวจราจร สรุป ได้ว่าการติดตั้งแผงกั้นลมที่มีความพรุน 23% สามารถลดความเร็วลมได้ 65-92% ที่ความสูง 2.53 เมตรจากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิว ถนน และการคำนึงถึงทิศทางลมหลักเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบระบบป้องกันลมที่มีประสิทธิภาพสำหรับ โครงสร้างสะพาน

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; แผงกั้นลม; การลดความเร็วลมผ่านสะพาน

ABSTRACT

This study evaluates the performance of wind barriers in reducing wind speeds across a bridge cross-section using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The investigation compares the aerodynamic effects of wind barriers with porosity levels of 23% and 54%, respectively. The findings indicate that the bare bridge section, without wind barriers, poses the greatest risk because the airflow directly strikes the traffic surface. Installing 23%-porosity wind barriers on both sides provides the most effective wind shielding, creating a low-velocity zone that covers the entire width of the traffic area. When porosity increases to 54%, wind speed over the bridge deck rises in proportion to the open area, significantly reducing the shielding efficiency. Furthermore, the analysis of installation positioning shows that placing a barrier on the windward side alone can achieve wind speed reductions comparable to those of a double-sided installation. Conversely, installing a barrier solely on the leeward side

Jirawat Junruang¹ and Virote Boonyapinyo^{2*}

¹Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

²Faculty of Engineering, Thammasat University

fails to decelerate the airflow over the traffic surface. In conclusion, wind barriers with 23% porosity reduced wind speed by 65–92% at a height of 2.53 m above the road surface. Therefore, considering the prevailing wind direction is a critical factor in designing efficient wind protection systems for bridge structures.

KEYWORDS: computational fluid dynamics; wind barrier; wind speed reduction on bridge deck

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าส่งผลให้วิศวกรสามารถสร้างสะพานที่มีช่วงยาวเพิ่มขึ้น ผลกระทบของแรงลมต่อโครงสร้างสะพานและความปลอดภัยของยานพาหนะที่สัญจรผ่านสะพานจึงได้รับความสนใจจากวิศวกรเป็นอย่างมาก [1] ประเด็นดังกล่าวมีความสำคัญโดยเฉพาะพื้นที่ชายฝั่งซึ่งมีสภาพอากาศรุนแรง [2–3] ยานพาหนะที่มีจุดศูนย์ถ่วงสูงมีแนวโน้มที่จะเกิดการพลิกคว่ำได้มากกว่าเมื่อเผชิญกับลมที่พัดผ่านบนสะพาน [4] ดังนั้นความปลอดภัยของยานพาหนะที่สัญจรผ่านสะพานจึงเป็นประเด็นสำคัญอย่างยิ่ง [5]

นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาผลกระทบของประเภทยานพาหนะต่อค่าสัมประสิทธิ์ทางอากาศพลศาสตร์ของยานพาหนะ ตลอดจนผลของการรบกวนทางอากาศพลศาสตร์ต่อการตอบสนองเชิงพลวัตของยานพาหนะทางถนนและสะพานภายใต้สภาวะลมด้านข้าง [6] ในปัจจุบันการติดตั้งโครงสร้างป้องกันลมบนทั้งสองด้านของสะพานถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดผลกระทบของลมด้านข้างต่อยานพาหนะที่สัญจรผ่านสะพาน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้มุ่งเน้นไปที่ลักษณะทางอากาศพลศาสตร์เป็นหลัก โดยยังไม่ได้พิจารณาผลในการป้องกันของแนวกั้นลมที่ติดตั้งบนพื้นสะพานอย่างเพียงพอ ในช่วงหลัง นักวิชาการจำนวนมากได้ศึกษาผลของลมด้านข้างต่อเสถียรภาพของยานพาหนะบนสะพานผ่านการทดสอบในอุโมงค์ลม และพบว่าราวกันตกและแนวกั้นลมสามารถช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของยานพาหนะได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7–9] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้ยังไม่ได้ศึกษาผลกระทบของแนวกั้นลมที่มีปริมาณความพรุนที่แตกต่างกันต่อความปลอดภัยของยานพาหนะ

นอกเหนือจากการปกป้องยานพาหนะจากผลกระทบของลมด้านข้างแล้ว แนวกั้นลมอาจส่งผลกระทบในทางลบต่อเสถียรภาพทางพลศาสตร์ของสะพานได้ เช่น สะพานที่ติดตั้งแนวกั้นลมทำให้ความต้านทานต่อการเกิดการเสียดเสถียรภาพแบบกระพือ (Flutter) ได้ลดลง เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะลมปั่นป่วนรุนแรง [10] ดังนั้นนักวิจัยจำนวนมากจึงได้ทดลองในอุโมงค์ลมเพื่อศึกษาผลของความสูงและความพรุนของแนวกั้นลมต่อความต้านทานลม แม้ว่าแนวกั้นลมที่มีลักษณะตันจะช่วยลดแรงลมที่กระทำต่อยานพาหนะได้ดีในทางตรงกันข้ามกลับทำให้แรงลมกระทำต่อสะพานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากเพิ่มพื้นที่รับลม และเปลี่ยนหน้าตัดสะพานจากรูปทรงกลมเป็นแบบไม่กลม ดังนั้นการออกแบบแนวกั้นลมโดยพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความพรุนของแนวกั้นลมจาก (ความสูงของแนวกั้นลม – (ความสูงของแนวกั้นลม x จำนวนแผ่น)) / ความสูงของแนวกั้นลม x 100 จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญ ในช่วงที่ผ่านมางานวิจัยส่วนมากเน้นการศึกษาเรื่องผลของการติดตั้งแนวกั้นลมที่ส่งผลต่อเสถียรภาพโดยรวม และสัมประสิทธิ์แรงลมของสะพานเป็นหลัก แต่ด้านประสิทธิภาพในการบังลมของแนวกั้นลมโดยพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความพรุน และรูปแบบการติดตั้งแนวกั้นลมเพียงฝั่งใดฝั่งหนึ่งยังมีน้อย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการประเมินสมรรถนะของแนวกั้นลมในรูปที่ 1(ก) ที่มีความพรุนและรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกัน 5 กรณีประกอบด้วย สะพานที่ไม่ติดตั้งแนวกั้นลม (C1), สะพานที่ติดตั้งแนวกั้นลมที่มีความพรุน 23% ทั้ง 2 ฝั่ง (C2) สะพานที่ติดตั้งแนวกั้นลมที่มีความพรุน 54% ทั้ง 2 ฝั่ง (C3) การติดตั้งแนวกั้นลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านซ้าย (C4) และการติดตั้งแนวกั้นลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านขวา (C5) ที่ติดตั้งบนทางพิเศษบูรพาวิถีรูปที่ 1(ข) โดยพิจารณาด้านประสิทธิภาพในการลดความเร็วลมที่กระทำตลอดหน้าตัดสะพาน เทียบกับกรณีสะพานที่ไม่ติดตั้งแนวกั้นลม พร้อมทั้งยังศึกษา

พฤติกรรมลมที่กระทำต่อสะพาน และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลม เพื่อให้เข้าใจผลของการติดตั้งแผงกันลม ได้ดียิ่งขึ้น



ก)



ข)

รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของแผงกันลมและสะพานกรณีศึกษา ก) ตัวอย่างแผงกันลมที่ประกอบด้วยแผ่นกันลมรูปตัว U จำนวน 6 แผ่น โดยมีช่องว่างระหว่างแผ่น ข) โครงสร้างทางพิเศษบูรพาวิถี ที่ศึกษา

2. การวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

2.1 สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวียร์-สโตกส์

สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds Average Navier-Stokes: RANS) คือสมการการเคลื่อนที่สำหรับของไหลที่ผ่านการหาค่าเฉลี่ยเชิงเวลา โดยสมการ RANS นี้ถูกใช้ควบคุมตัวแปรความเร็วเฉลี่ยและความดัน แนวคิดของสมการคือ การแยกตัวประกอบเรย์โนลด์ซึ่งเป็นการแยกปริมาณขณะใดขณะหนึ่งออกเป็นค่าเฉลี่ยเชิงเวลา และส่วนของการผันผวน สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยแบบเรย์โนลด์นี้ ความไม่คงที่ของการไหลเกือบทั้งหมดจะถูกคำนวณผ่านแบบจำลอง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ของการไหลเฉลี่ยจะถูกคำนวณหาคำตอบโดยตรง ทั้งนี้สมการ RANS ถือเป็นการพัฒนาต่อมาจากสมการการเคลื่อนที่ของนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) สำหรับของไหลนิวโทเนียนที่อัดตัวไม่ได้

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + 2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right] \quad (1)$$

โดยที่ $\bar{S}_{ij}$ คือ เทนเซอร์อัตราการเปลี่ยนรูปเฉลี่ย (Mean rate of strain tensor)

2.2 เทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์

ในการหาคำตอบของสมการ RANS เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหลเฉลี่ยของการไหลแบบปั่นป่วน จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าของเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress tensor) คือ $\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ หรือ τ_{ij} ซึ่งเป็นเทนเซอร์สมมาตรอันดับสองที่มีองค์ประกอบอิสระจำนวน 6 ส่วน สำหรับการไหลสามมิติทั่วไป จะมีตัวแปรไม่ทราบค่าของคุณลักษณะการไหลเฉลี่ยจำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็ว 3 แนวแกน และความดัน เมื่อรวมองค์ประกอบอิสระ 6 ส่วนของเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์เข้ากับคุณลักษณะการไหล

เฉลี่ยทั้ง 4 ตัวแปร ส่งผลให้มีตัวแปรไม่ทราบค่ารวม 10 ตัวแปร อย่างไรก็ตามสมการการอนุรักษ์มวล และสมการการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้ง 3 แนวแกน ให้สมการสำหรับการหาคำตอบเพียง 4 สมการเท่านั้น เพื่อที่จะหาค่าของตัวแปรไม่ทราบค่าทั้ง 10 ตัวแปรด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้สมมติฐานเพิ่มเติมเพื่อแก้ระบบสมการดังกล่าว สมมติฐานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายคือสมมติฐานความหนืดเอ็ดดี้ของบัสสินเนสก์ (Boussinesq) [11] โดยสมมติฐานนี้สำคัญต่อแบบจำลองชนิดสองสมการ (Two-equation models) ทั้งหมด และมีสมมติฐานว่าเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์ τ_{ij} มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเทนเซอร์อัตราการเปลี่ยนรูปเฉลี่ย $\bar{S}_{ij}$

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad k = \frac{\bar{u}_i' \bar{u}_j'}{2} \quad (2), (3)$$

โดยที่ μ_t คือสมบัติสเกลาร์ที่เรียกว่าความหนืดเอ็ดดี้ (Eddy viscosity) ซึ่งโดยปกติคำนวณได้จากตัวแปรการส่งผ่านสองตัวแปร ส่วนพจน์สุดท้ายที่ปรากฏนั้นถูกรวมไว้เพื่อใช้จำลองการไหลที่อัดตัวไม่ได้ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับนิยามของพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ k จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขสมการ (3)

สมมติฐานของบัสสินเนสก์ มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดสองสมการ สมมติฐานดังกล่าวช่วยลดรูปปัญหาลงได้อย่างมาก โดยช่วยให้สามารถพิจารณาผลกระทบของความปั่นป่วนที่มีต่อการไหลเฉลี่ยได้ในลักษณะเดียวกันกับที่ความหนืดระดับโมเลกุล ส่งผลกระทบต่อการไหลแบบลามินาร์ นอกจากนี้ สมมติฐานนี้ยังทำให้สามารถนำตัวแปรความปั่นป่วนในรูปสเกลาร์ที่เข้าใจได้ง่ายมาใช้ได้ เช่น พลังงานจลน์ความปั่นป่วน และการสลายตัว รวมถึงยังสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้กับตัวแปรเชิงกายภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น เช่น ความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulence intensity) และ มาตรการส่วนความยาวความปั่นป่วน (Turbulence length scale)

2.3 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ω

ภายในกลุ่มแบบจำลอง RANS นั้น แบบจำลอง k- ω จัดเป็นแบบจำลองชนิดสองสมการ ซึ่งจะทำการหาคำตอบของสมการการส่งผ่าน ผ่านตัวแปรพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน $k = \frac{\bar{u}_i' \bar{u}_j'}{2}$ และอัตราการสลายตัวจำเพาะ $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$ โดยแบบจำลองนี้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เพื่อให้ได้ผลการทำนายแรงบริเวณใกล้ผนังที่มีความแม่นยำสูง [12] ทั้งนี้ ค่าพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวจำเพาะ (ω) สามารถคำนวณได้จากสมการการส่งผ่านดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (5)$$

โดยที่ G_k แทนพจน์การผลิตพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน อันเนื่องมาจากความชันของความเร็วเฉลี่ย, G_ω แทนพจน์

การผลิตของ ω , ในขณะที่ S_k และ S_ω คือพจน์ต้นกำเนิดที่กำหนดโดยผู้ใช้, Y_k และ Y_ω แทนพจน์การสลายตัวและ τ_ω กับ แทนค่าสภาพแพร่ประสิทธิผล ของ k และ ω อันเนื่องมาจากความปั่นป่วน ซึ่งกำหนดโดยสมการดังนี้

$$\tau_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \tau_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (6)$$

โดยที่ σ_k และ σ_ω คือ เลขพรานด์ความปั่นป่วน (Turbulent Prandtl numbers) สำหรับ k และ ω ตามลำดับ และ μ คือความหนืดความปั่นป่วน (Turbulence viscosity) ทั้งนี้

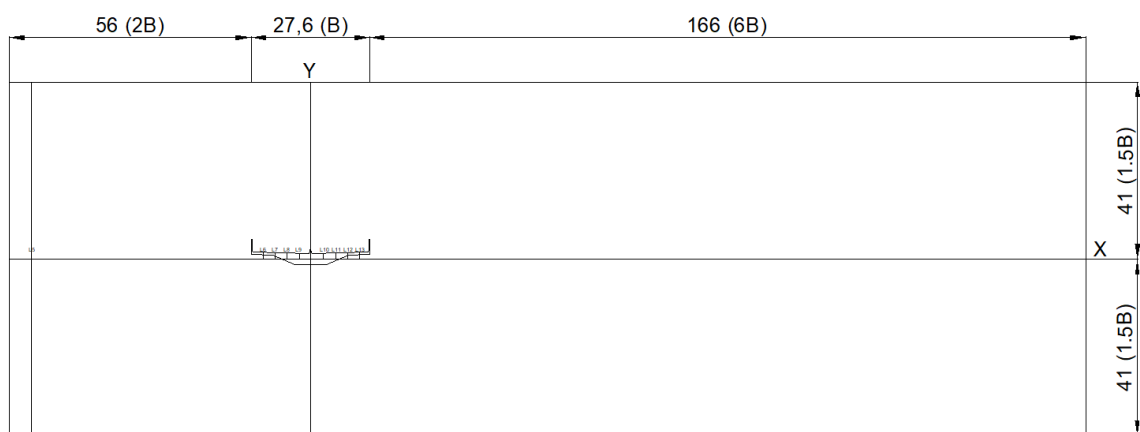
2.4 แบบจำลองการส่งผ่านความเค้นเฉือน SST

แบบจำลอง $k-\omega$ ช่วยให้สามารถจัดการกับการไหลบริเวณใกล้ผนังได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากลักษณะของชั้นขอบเขต จะได้รับอิทธิพลจากธรรมชาติของการไหล ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการสร้างกริดแบบละเอียดในบริเวณใกล้ผนัง อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยประการหนึ่งของแบบจำลองนี้คือความไวต่อค่าในกระแสไหลอิสระ แบบจำลองการส่งผ่านความเค้นเฉือน (Shear Stress Transport: SST) $k-\omega$ เป็นอีกหนึ่งแบบจำลองชนิดสองสมการที่ถูกพัฒนาโดย [13] ซึ่งเป็นการรวมจุดเด่นด้านความแข็งแกร่ง และความแม่นยำของแบบจำลอง $k-\omega$ ในบริเวณใกล้ผนัง เข้ากับคุณสมบัติการไม่ขึ้นต่อค่ากระแสไหลอิสระของแบบจำลอง $k-\epsilon$ ในบริเวณสนามไกล เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว แบบจำลอง $k-\epsilon$ จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลอง $k-\omega$ นอกจากนี้ แบบจำลอง SST ยังคำนึงถึงการส่งผ่านของความเค้นเฉือนความปั่นป่วนภายในชั้นขอบเขต โดยการปรับแก้ฟังก์ชันความหนืดเอ็ดดี้ความปั่นป่วน โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายลักษณะการไหลที่มีความชันความดันย้อนกลับสูง ตลอดจนการไหลที่มีการแยกตัวของชั้นขอบเขตเนื่องจากความดัน

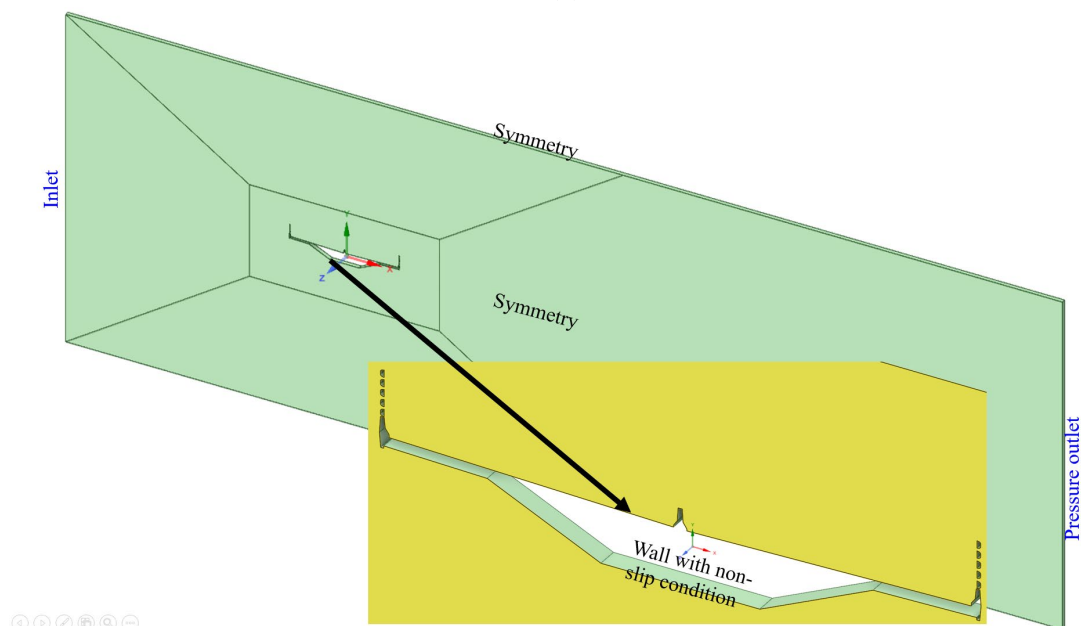
2.5 การตั้งค่าที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดและเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ของหน้าตัดสะพานได้แสดงไว้ในรูปที่ 2(ก) โดยที่ B แทนความกว้างของหน้าตัดสะพาน ระยะห่างจากทางเข้า (Inlet) ถึงขอบด้านหน้าของหน้าตัดกำหนดให้มีระยะ 2B การกำหนดดังกล่าวช่วยส่งเสริมการก่อตัวของกระแสไหลวน (Turbulent wake) จากทางเข้า ส่วนทางออก (Outlet) กำหนดให้มีระยะ 6B จากท้ายสะพานมีเป้าหมายเพื่อประเมินประสิทธิภาพการกักบังลมของแผ่นกันลมและโปรไฟล์ความเร็วลมบริเวณเหนือพื้นผิวจราจรของสะพานเป็นหลัก ไม่ได้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของกระแสนวนในระยะไกล ดังนั้นระยะ 6B ด้านท้ายลมจึงมีความยาวเพียงพอให้สนามความดันคลายตัวลงและป้องกันปัญหาการสะท้อนกลับจากขอบเขตทางออก นอกจากนี้ได้มีการกำหนดระยะห่างจากผนังด้านบนและด้านล่างที่ 1.5B เพื่อควบคุมให้อัตราส่วนการปิดกั้น (Blocking ratio) มีค่าน้อยกว่า 5% ตามแนวทางของมาตรฐานการทดสอบในอุโมงค์ลม ASCE [14] ผนังด้านบนและด้านล่างถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตแบบสมมาตร (Symmetry boundary conditions) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการก่อตัวของชั้นขอบเขตเทียม (Artificial boundary layer) จากผนังด้านบนและด้านล่าง ส่วนเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้กับพื้นผิวของหน้าตัดสะพานแบบผนังไม่ลื่นไหล (No-slip wall boundary conditions) สำหรับทางเข้า (Inlet) ได้กำหนดเวกเตอร์ความเร็วลมและความเข้มของความปั่นป่วน (Turbulence intensity) โดยค่าเริ่มต้นของความเข้มความปั่นป่วนกำหนดไว้ที่ 5% ในส่วนของเงื่อนไขขอบเขตทางออก (Outlet) ตามรูปที่ 2(ข) ถูกกำหนดเป็นทางออกความดัน (Pressure outlet) โดยมีค่าความดันสัมพัทธ์เท่ากับศูนย์ เพื่อให้การคำนวณการแยกตัวของกระแสนอากาศ (Flow separation) เป็นไปอย่างแม่นยำ จึงได้เลือกใช้เมชแบบ Poly-hexahedral โดยกำหนดความสูงของเมชชั้นแรกเท่ากับ 4.5×10^{-4} B (เมื่อ B คือความกว้างของหน้าตัด) ซึ่งเป็น

ค่าที่ผ่านการคำนวณเพื่อให้แน่ใจว่าค่า y^+ มีค่าน้อยกว่า 5 นอกจากนี้ยังมีการใช้จำนวนเมชที่หลากหลายเพื่อทดสอบความเป็นอิสระของโครงข่าย (Grid independence test) โดยโครงข่ายภาพรวมและโครงข่ายเฉพาะจุดของหน้าตัดสะพานแสดงอยู่ในรูปที่ 3 กรณีความพรุน 23% ประกอบด้วยแผงกันรูปทรงตัว U จำนวน 5 แผง โดยมีความสูงรวมของแผงกันลมอยู่ที่ 2.21 เมตร แต่ละแผงมีความสูง 0.34 เมตร และมีระยะห่างระหว่างช่องเปิดอยู่ที่ 0.102 เมตร ในขณะที่กรณีความพรุน 54% ได้มีการปรับลดขนาดของแผงกันลมเหลือ 3 แผง มีระยะห่างระหว่างแผง 0.544 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3(ค) และ 3(ง) ตามลำดับ ทั้งนี้จำนวนเมชสำหรับแบบจำลองสะพาน อยู่ในช่วง 1.5–1.8 ล้านโหนด และ 5–6 ล้านเอลิเมนต์ ตามลำดับ โดยการคำนวณทั้งหมดดำเนินการด้วยหน่วยประมวลผล Threadripper 2990WX ซึ่งมี 32 คอร์ และ 64 เธรด พารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการจำลองสถานะคงตัว (Steady-state simulation) แสดงไว้ในตารางที่ 1

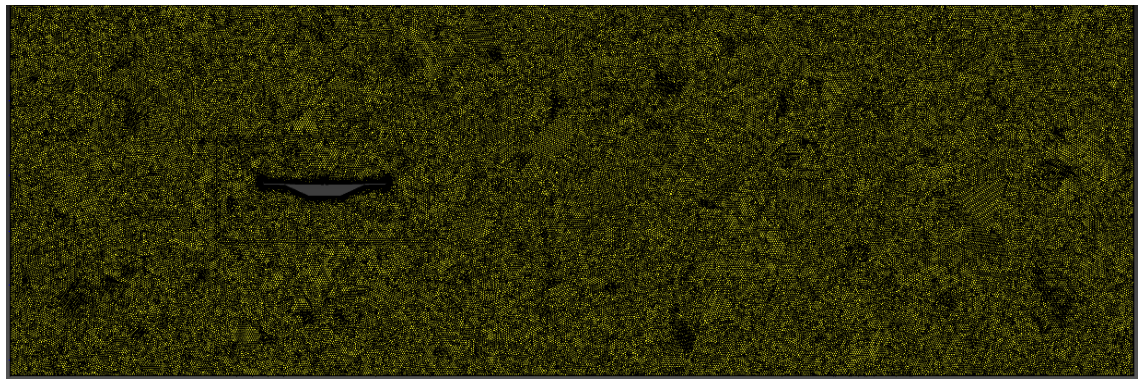


(ก)

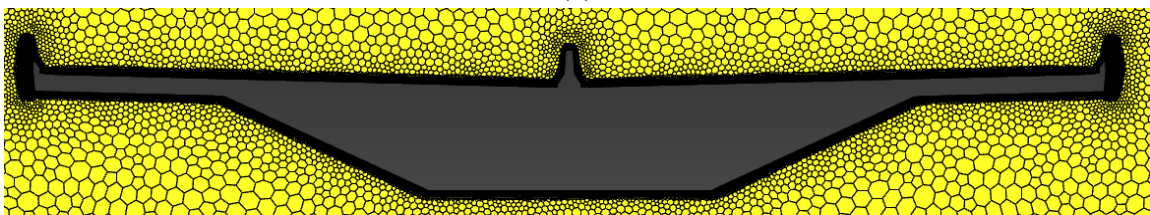


(ข)

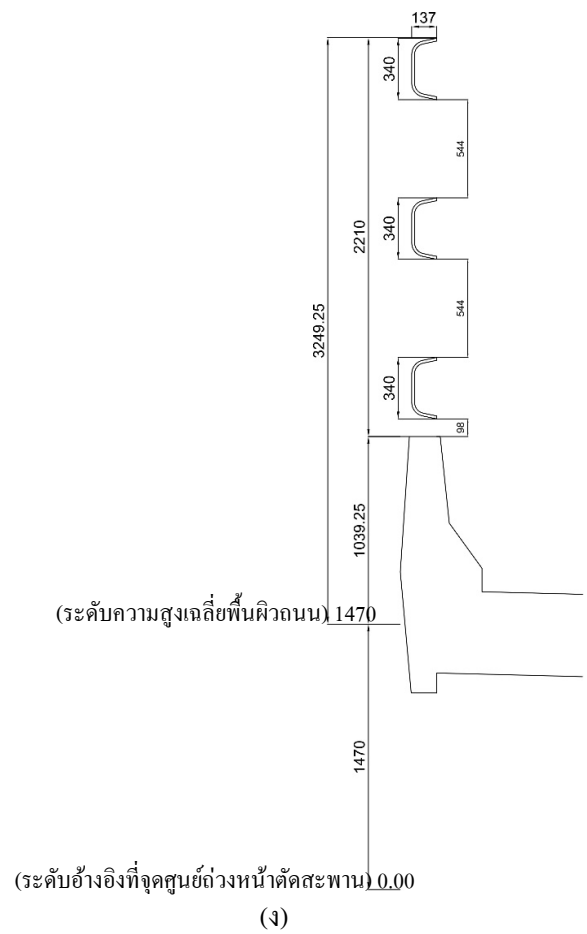
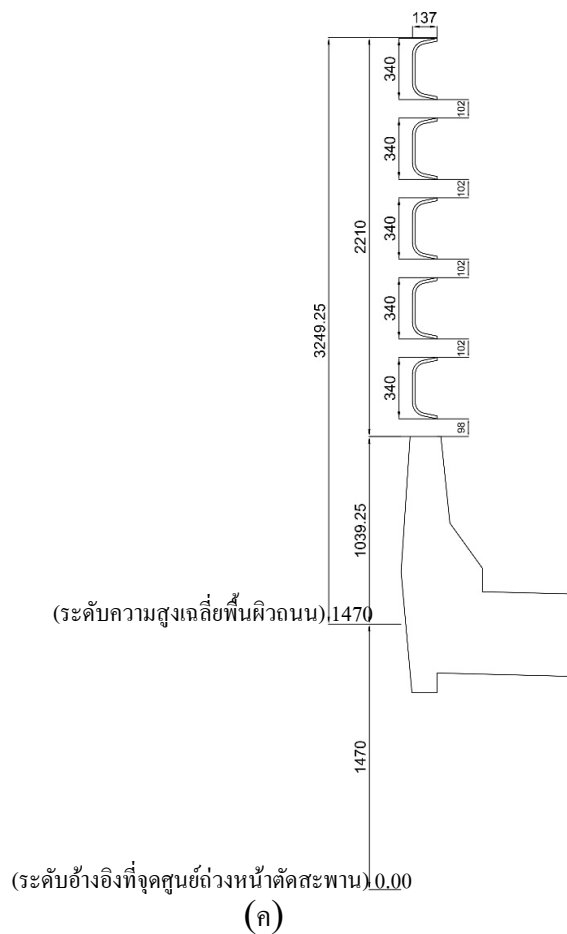
รูปที่ 2 ขนาดของแผงกันลมนั้นกำหนดโดยบริษัทเวิร์ล บริดจ์เทคโนโลยีจำกัด (ก)โดเมนการไหล และ (ข) เงื่อนไขขอบเขต



(ก)



(ข)



รูปที่ 3 กริดที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพลาสม่าของไหลเชิงคำนวณ (ก)ภาพทั้งโดเมนการไหล (ข)ภาพขยายหน้าตัดสะพาน และ (ค) รายละเอียดแผ่นกันลมความพรุน 23% หน่วย mm. (ง) รายละเอียดแผ่นกันลมความพรุน 54% หน่วย mm.

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานะคงตัว

ความเร็วลม (m/s)	ความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง 25 m/s
Solver	double precision, pressure based
Turbulent model	K- ω sst
Spatial discretization:	
Pressure Velocity Coupling	COUPLE
Gradient	Least Square Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent dissipation Rate	Second Order Upwind
Residuals target	10-4

3. ผลการวิเคราะห์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ระหว่างลมและโครงสร้างต่อความปลอดภัยของผู้สัญจร ส่วนต่อไปนี้เป็น การนำเสนอผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่ออธิบายกลไกของลมและเปรียบเทียบความเร็วลมรอบหน้าตัดสะพานในกรณีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 และเนื่องจากทางพิเศษบูรพาวิถี ตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศแบบชานเมืองไม่ได้ผ่านสภาพภูมิประเทศแบบภูเขาส่งผลให้ลมมากระทำต่อน้ำตัดสะพานในแนวราบ จากการศึกษา Zhang และคณะ [15] พบว่าองศาการปะทะของลมในช่วง ± 3 องศา ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเฉพาะองศาการปะทะที่ 0 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการชะลอกระแสลมและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของลมหมุนวน (Wake region) ที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 กรณีศึกษาสะพานที่ติดตั้งแผงกันลม

กรณีศึกษา	ประเภทแผงกันลม	ตำแหน่งที่ติดตั้ง
C1	ไม่ติดตั้งแผงกันลม	-
C2	แผงกันลมที่มีความพรุน 23%	2 ฟัง
C3	แผงกันลมที่มีความพรุน 54%	2 ฟัง
C4	แผงกันลมที่มีความพรุน 23%	ทางซ้าย ด้านคันลม
C5	แผงกันลมที่มีความพรุน 23%	ทางขวา ด้านท้ายลม

3.1 กรณีสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม (C1), สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% ทั้ง 2 ฟัง (C2) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 54% ทั้ง 2 ฟัง (C3)

การจำลองการไหลรอบหน้าตัดสะพานดำเนินการโดยใช้การจำลองแบบ 3 มิติ ภายใต้สภาวะคงตัวด้วยวิธี RANS (แบบจำลองความปั่นป่วน k- ω SST) เนื่องจากมีความเหมาะสมระหว่างคุณภาพของผลลัพธ์และประสิทธิภาพในการคำนวณ สำหรับปัญหาที่ทา

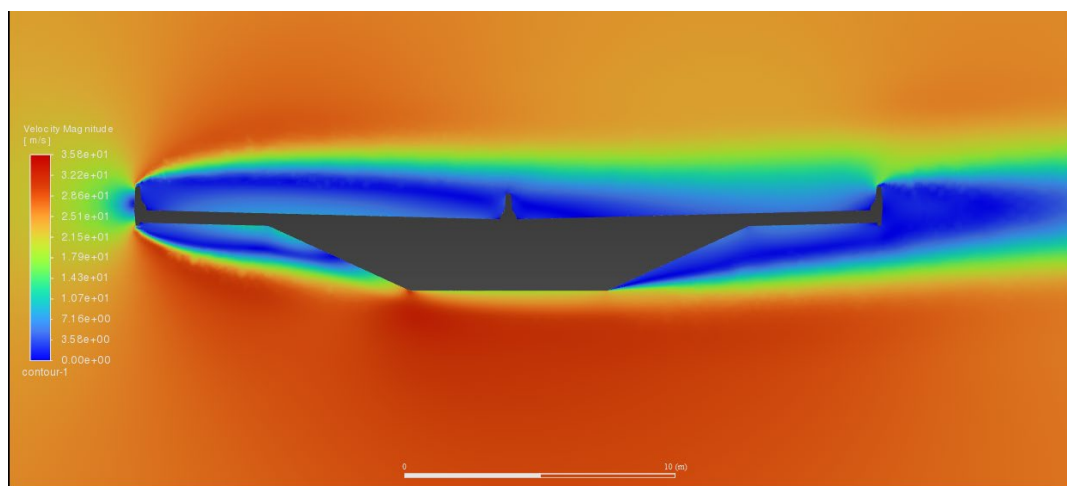
การวิเคราะห์นี้ การแสดงลักษณะการไหลของลมรอบหน้าตัดสะพานได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 สำหรับสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม (C1), สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% (C2) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 54% (C3) ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.1.1 กลไกการไหลของลมผ่านสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม (C1), สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% ทั้ง 2 ฟัง (C2) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 54% ทั้ง 2 ฟัง (C3)

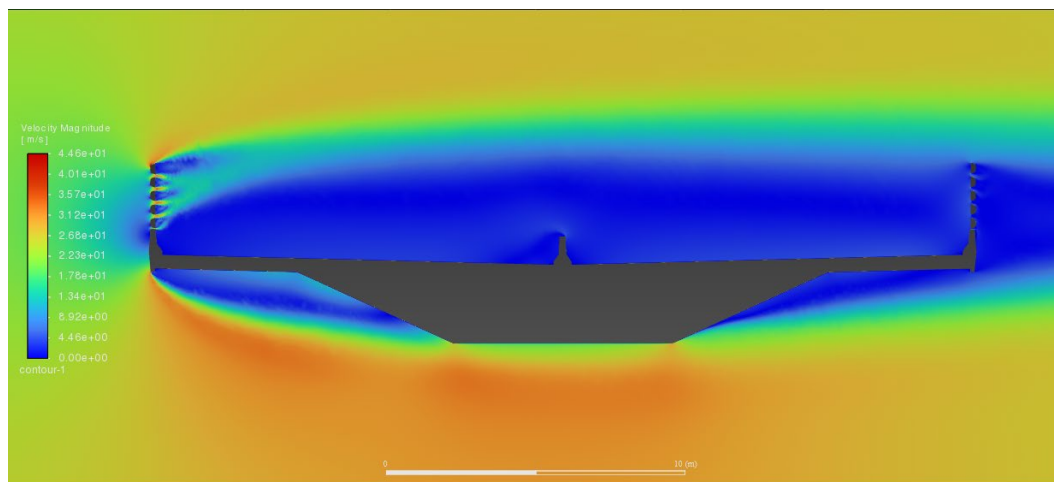
เมื่อกระแสลมไหลรอบหน้าตัดสะพานที่มีรูปทรงตามหลักอากาศพลศาสตร์ปะทะกับส่วนขอบซ้ายสะพานเกิดการแยกตัวเพียงเล็กน้อยที่บริเวณมุมขอบและสามารถกลับมาเกาะผิว (Reattach) ได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กระแสลมกลับมาแนบสนิทไปกับผิวสะพานโดยเฉพาะด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) เนื่องจากไม่มีแผงกันลม กระแสลมความเร็วสูง (แถบสีแดง/ส้ม) ไหลผ่านพื้นที่เหนือผิวจราจรโดยตรง ทำให้ไม่มีพื้นที่กำบังลม (Shielding Zone) ซึ่งเป็นสภาวะวิกฤตสำหรับความปลอดภัยของยานพาหนะ

จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% (รูปที่ 4 (ข)) แผงกันลมทำหน้าที่เป็นสิ่งที่กีดขวางแบบไม่ถล่ม (Bluff Body) บังคับให้กระแสลมหลักแยกตัวที่ขอบบนของแผงกันลมทำให้ชั้นเฉือน (Shear Layer) ถูกยกตัวสูงขึ้นข้ามพื้นที่หน้าตัดสะพาน มีลักษณะรูปทรงโดมของกระแสลมที่มีความเร็วต่ำครอบคลุมพื้นที่จราจรทั้งหมด เนื่องจากปริมาณลมที่ลอดผ่านแผงกันลมที่มีความพรุนน้อยทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังแผงกันลมสูง เกิดกระลอกลมที่ผิวด้านบนสะพานก่อให้เกิดความปั่นป่วนที่สะสมอยู่ภายใน

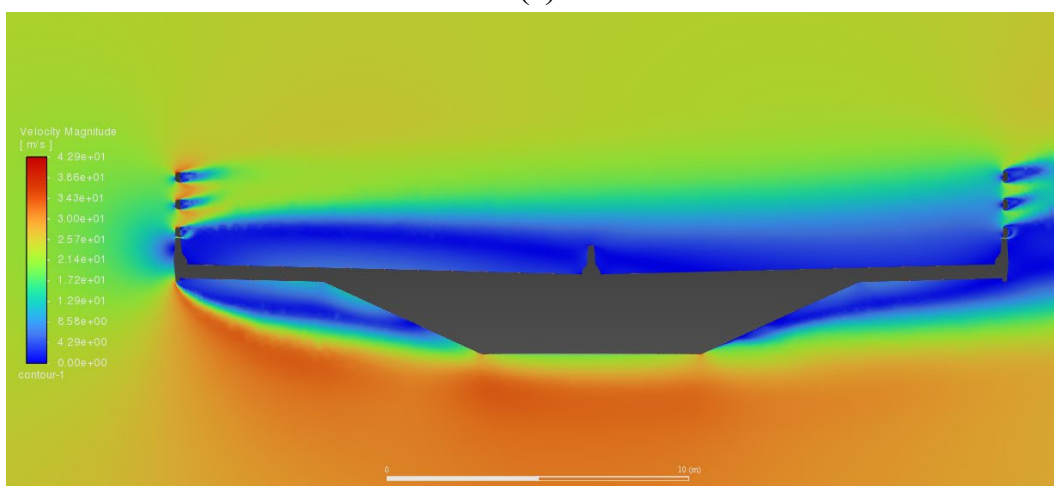
เมื่อเพิ่มแผงกันลมที่มีความพรุนเป็น 54% (รูปที่ 4 (ค)) กระแสลมบางส่วนสามารถลอดผ่านรูพรุนเข้ามาได้ กระแสลมที่ลอดผ่านช่วยลดความรุนแรงของการแยกตัวของกระแสลมหลัก ทำให้ชั้นเฉือนที่ยกตัวขึ้นมีระดับความสูงของความเร็วที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีความพรุน 23% ส่งผลให้ความเร็วลมตลอดผิวจราจรมีค่าสูงกว่าแผงกันลมที่มีความพรุน 23%



(ก)

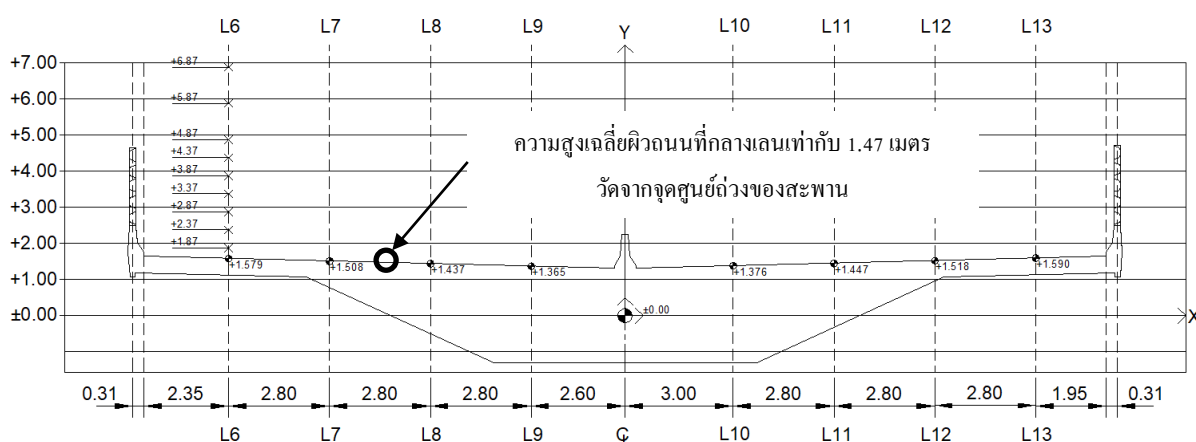


(ข)



(ค)

รูปที่ 4 ความเร็วลมบนสะพาน (ก) สะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม (ข) สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% และ (ค) สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 54%



รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดความเร็วลม (โดยที่ระดับความสูงเฉลี่ยผิวถนนที่กลางเลนเท่ากับ 1.47 เมตร วัดจากจุดศูนย์ถ่วงของสะพานระดับความสูง 0 เมตร)

3.1.2 สมรรถนะโดยรวมของสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% ทั้ง 2 ฝั่ง (C2) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 54% ทั้ง 2 ฝั่ง (C3)

จากการตรวจวัดค่าความเร็วลมเฉลี่ยในแนวดิ่ง ที่ตำแหน่งด้านต้นลม (L6) ไปยังท้ายลม (L13) ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงกันลม 3 กรณีศึกษา ผลการศึกษาในรูปที่ 6 สามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้ พฤติกรรมความเร็วลมกรณีสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลมแสดงในเส้นกราฟวงกลมสีดำ (C1) ในทุกตำแหน่งการวัด (L6-L13) ความเร็วลมมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอและมีความชันสูง ตั้งแต่ระดับพื้นผิวจราจร (1.5 เมตรเหนือระดับอ้างอิง) ไปจนถึงความสูงระดับ Free stream ที่ความสูงประมาณ 2.0 - 4.5 เมตร เหนือระดับอ้างอิง ซึ่งเป็นระดับความสูงวิกฤตของยานพาหนะ พบว่ามีความเร็วลมเพิ่มขึ้นและมีความเร็วสูงสุดที่ระดับความสูง 4.5 เมตรซึ่งเป็นความเร็วลมที่ใกล้เคียงกับความเร็วลมที่กระทำต้นลม

เมื่อพิจารณากราฟของกรณี C2 (สี่เหลี่ยมสีส้ม, สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมความพรุน 23%) และ C3 (สามเหลี่ยมสีเทา, สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมความพรุน 54%) พบการเปลี่ยนแปลงของโปรไฟล์ลมอย่างมีนัยสำคัญ กรณี C2 ประสิทธิภาพการกันลมสูงที่สุดจาก 3 กรณี โดยที่ระดับความสูง 1.5 - 4.5 เมตร พบว่าความเร็วลมลดลงอย่างมาก (อยู่ในช่วง 0-5 m/s) ในเกือบทุกตำแหน่ง (L6-L13) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจากด้านต้นลม (L6) ไปยังท้ายลม (L13) ทันทีที่กระแสลมผ่านแผงกันลมมายังตำแหน่ง (L6-L7) กรณี C2 ความเร็วลมลดลงอย่างรุนแรงทันที เมื่อทำการเปรียบเทียบแนวโน้มของโปรไฟล์ความเร็วลมที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการตรวจวัดในอุโมงค์ลมของ Zhang และคณะ [15] พบว่ามีความใกล้เคียงกัน

ในขณะที่ C3 มีความเร็วเริ่มต้นสูงกว่าเล็กน้อย ตำแหน่งกึ่งกลาง (L9 - L10) ผลกระทบของการกำบังลมยังคงรักษาระดับได้ดีทั้งสองกรณี โดยความเร็วลมในย่านความสูงของยานพาหนะยังคงต่ำกว่ากรณี C1 อย่างชัดเจน ตำแหน่งท้ายลม (L12 - L13) แม้จะห่างจากแผงกันลมด้านหน้ามากแล้ว แต่ย่านความเร็วต่ำ (Wake) ยังคงครอบคลุมพื้นที่อยู่ ไม่พบการ Re-attachment ของกระแสลมหลักลงมาถึงผิวจราจร ซึ่งยืนยันว่าความสูงของแผงกันลมมีเพียงพอที่จะปกป้องยานพาหนะตลอดความกว้างของสะพาน

3.1.3 ประสิทธิภาพการลดความเร็วลมของสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% ทั้ง 2 ฝั่ง (C2) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 54% ทั้ง 2 ฝั่ง (C3) ที่ระดับความสูง 3 เมตรจากพิกัดอ้างอิง (เท่ากับ 1.53 เมตรจากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน)

เนื่องจากพิกัดอ้างอิงหลักของแบบจำลองระดับ ± 0.00 อยู่ที่จุดศูนย์กลางของหน้าตัดสะพานดังรูปที่ 5 และผิวถนนของหน้าตัดสะพานมีความลาดเอียง ระดับผิวถนนจึงแปรผันอยู่ระหว่าง +1.32 ถึง +1.65 เมตร การศึกษานี้จึงใช้ความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนนที่ระดับประมาณ +1.47 เมตร เป็นจุดอ้างอิง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดความเร็วลมของแผงกันลมดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงผลการตรวจวัดที่ความสูงเทียบเท่า 1.53 เมตร (3.00 - 1.47) เหนือผิวจราจร เป็นตัวแทนผลกระทบของความเร็วลมที่มีต่อรถยนต์ขนาดเล็กพบพฤติกรรมที่น่าสนใจดังนี้ กรณีสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม (C1) ความเร็วลมมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.0 - 13.0 m/s โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากด้านต้นลม (L6) ไปยังด้านท้ายลม (L12-L13) ซึ่งบ่งชี้ว่ากระแสลมมีการเร่งตัวขึ้นเมื่อผ่านพื้นที่หน้าตัดสะพาน

ประสิทธิภาพของแผงกันลมความพรุน 23% (C2) แสดงประสิทธิภาพในการบังลมสูงสุด ความเร็วลมลดลงเหลือเพียง 0.85 - 1.59 m/s ในรูปที่ 7 (ก) ตลอดความกว้างสะพาน คิดเป็นประสิทธิภาพการลดความเร็วลมสูงถึง 72% - 93% ในรูปที่ 7 (ข) โดยเฉพาะช่วงกลางและท้ายสะพาน (L10-L13) ที่สามารถลดความเร็วลมได้มากกว่า 90% สภาวะนี้สร้างพื้นที่ปลอดภัย (Sheltered Zone) ที่สมบูรณ์สำหรับรถยนต์ขนาดเล็ก

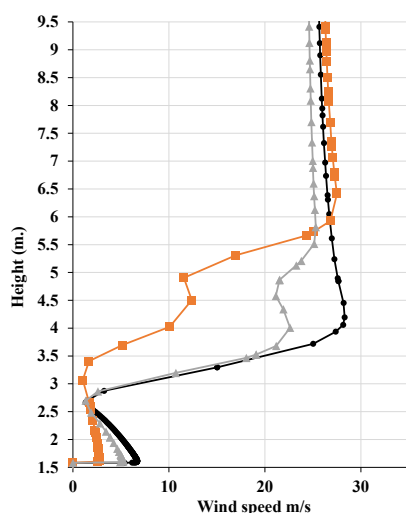
ประสิทธิภาพของแผงกันลมความพรุน 54% (C3) ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ความเร็วลมเฉลี่ยยังคงอยู่ในช่วง 5.0 - 9.0 m/s ในรูปที่ 7 (ก) การลดทอนความเร็วลมทำได้เพียง -2% ถึง 42% ในรูปที่ 7 (ข) โดยที่ตำแหน่ง L8 พบว่าค่าการลดทอนติดลบ (-2%) ซึ่งหมายความว่ากระแสลมมีความเร็วลมสูงกว่ากรณีไม่มีแผงกันเล็กน้อยในบางจุด เนื่องจากการเกิด Bleeding Flow ที่พุ่งผ่านรูพรุนเข้ามาพื้นที่ดังกล่าว

3.1.4 ประสิทธิภาพการลดความเร็วลมของสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% ทั้ง 2 ฝั่ง (C2) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 54% ทั้ง 2 ฝั่ง (C3) ที่ระดับความสูง 4 เมตรจากพิกัดอ้างอิง (เท่ากับ 2.53 เมตรจากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน)

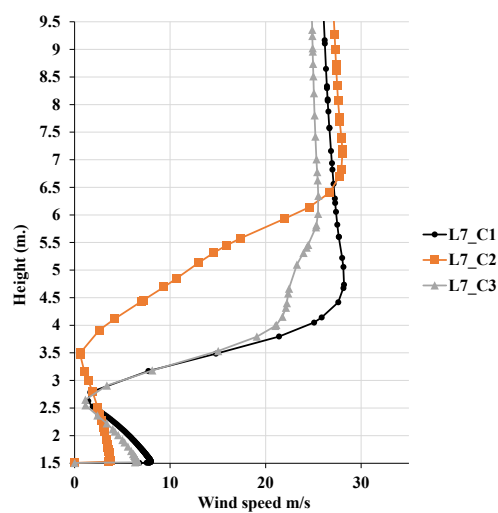
จากรูปที่ 8 ประสิทธิภาพการลดความเร็วลมที่ความสูงเทียบเท่า 2.53 เมตร (4.00 - 1.47) เหนือผิวจราจร เป็นตัวแทนผลกระทบต่อยานพาหนะขนาดใหญ่ ความรุนแรงของลมในกรณีสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม (C1) ความเร็วลมพุ่งสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับระดับล่าง โดยมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง L6 (27.77 m/s) และลดหลั่นลงมาทางท้ายลม แต่ยังคงมีความเร็วมากกว่า 19 m/s ตลอดความกว้างสะพาน ความเร็วระดับนี้มีความเสี่ยงสูงต่อการพลิกคว่ำของรถบรรทุก

เสถียรภาพของแผงกันลมความพรุน 23% (C2) มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยสามารถลดความเร็วลมเฉลี่ยลงเหลือ 1.6 - 9.7 m/s ในรูปที่ 8 (ก) คิดเป็นอัตราการลดความเร็วลมในช่วง 65% - 92% ในรูปที่ 8 (ข) แม้ที่ตำแหน่งต้นลม (L6) ประสิทธิภาพจะลดลงเหลือ 65% แต่ในโซนกลางสะพาน (L9-L11) ยังคงกันลมได้มากกว่า 90%

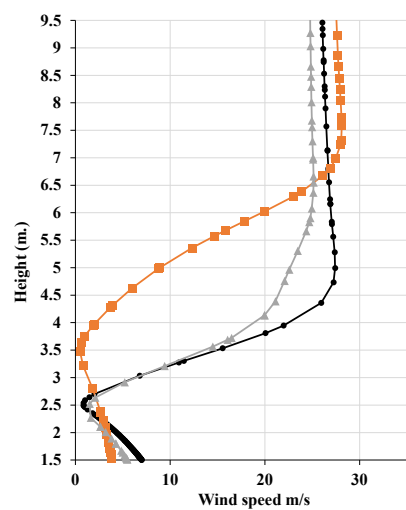
งานวิจัยพบว่าแผงกันลมความพรุน 54% (C3) ประสิทธิภาพการบังลมลดลงอย่างชัดเจนที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้น ความเร็วลมเฉลี่ยสูงถึง 12.8 - 22.6 m/s ในรูปที่ 8 (ก) โดยมีอัตราการลดความเร็วลมเพียง 13% - 35% เท่านั้นในรูปที่ 8 (ข) ซึ่งหมายความว่ายานพาหนะสูงยังคงต้องเผชิญกับแรงลมปะทะที่มีขนาดเกือบ 2 ใน 3 ของกรณีไม่มีแผงกัน



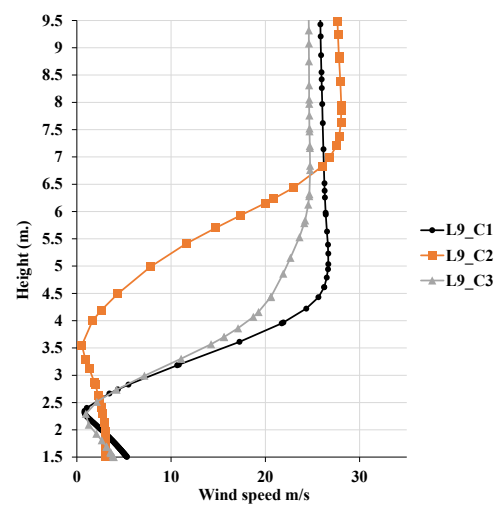
(ก)



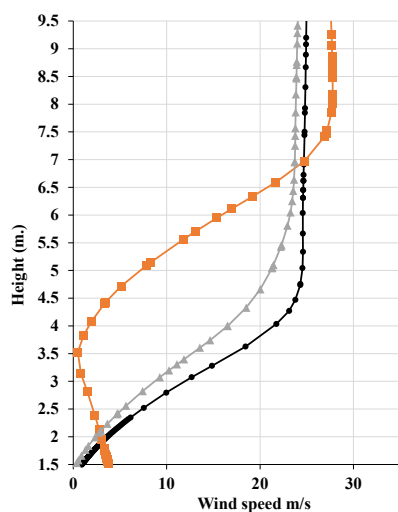
(ข)



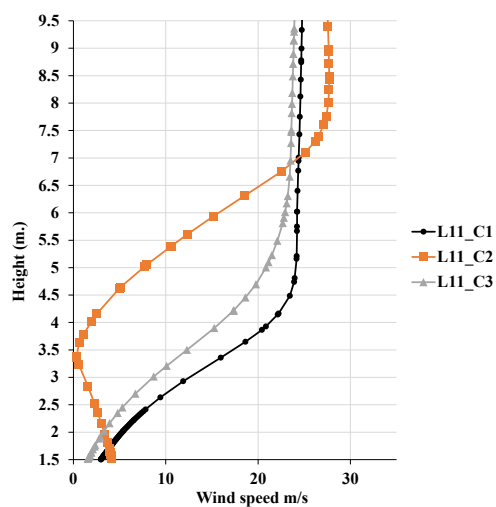
(ค)



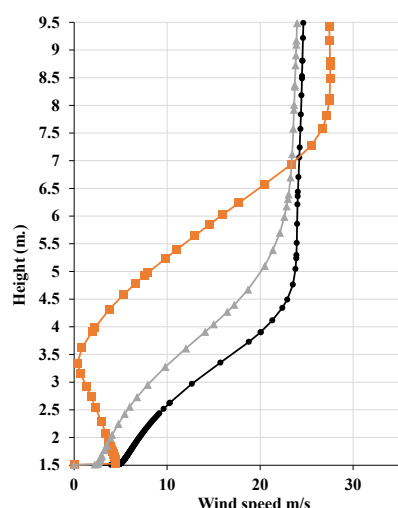
(ง)



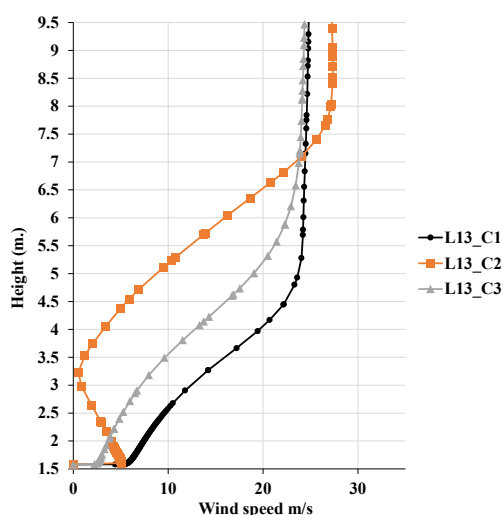
(จ)



(ฉ)

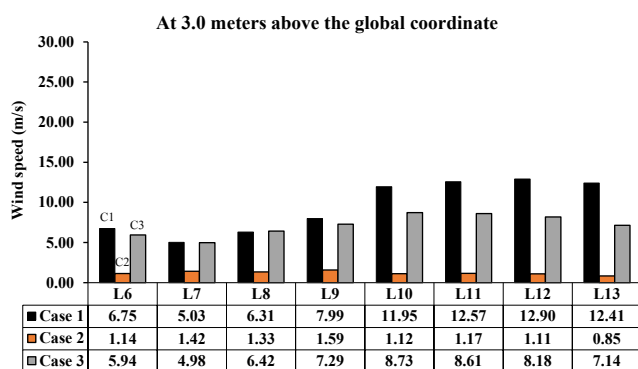


(ช)

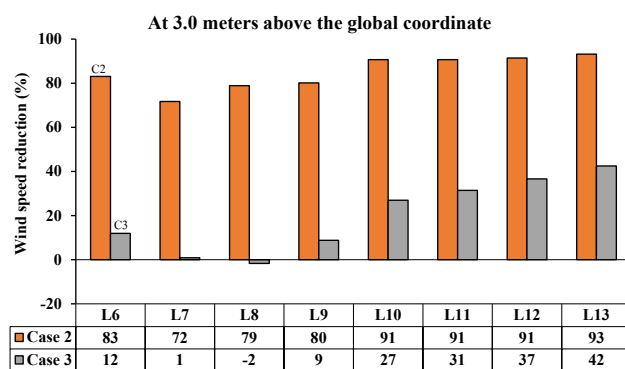


(ซ)

รูปที่ 6 ความเร็วลมระหว่าง 3 รูปแบบการติดตั้งสำหรับ 8 จุดวัด (ก)ตำแหน่ง L6 (ข)ตำแหน่ง L7 (ค)ตำแหน่ง L8 (ง)ตำแหน่ง L9 (จ)ตำแหน่ง L10 (ฉ)ตำแหน่ง L11 (ช)ตำแหน่ง L12 และ(ซ)ตำแหน่ง L13 กรณี C1 C2 และC3



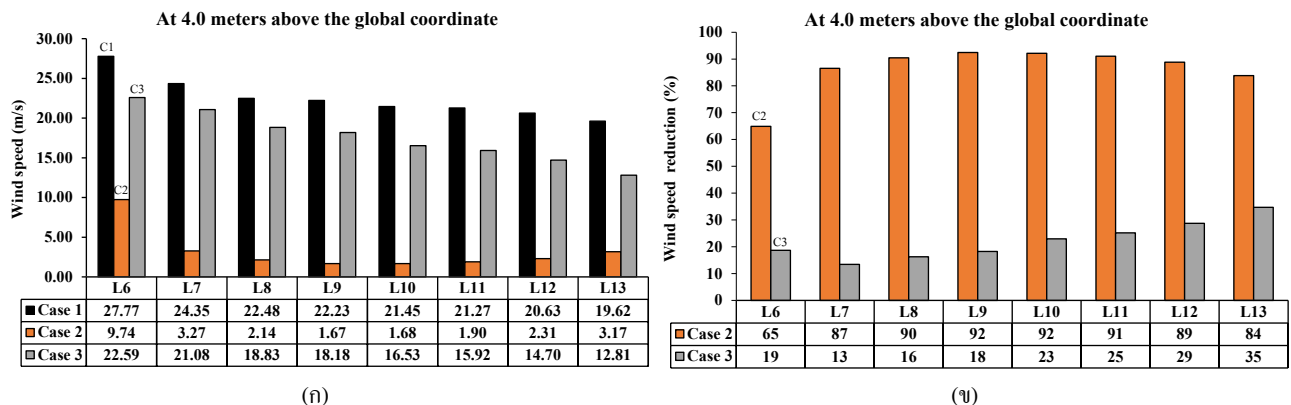
(ก)



(ข)

รูปที่ 7 เปรียบเทียบ (ก) ความเร็วลม C1 C2 C3 และ (ข) การลดลงของความเร็วลม (%) C2 และ C3 เทียบกับ C1

ที่ความระดับสูงเทียบเท่า 1.53 เมตร (3.00 – 1.47) จากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน



รูปที่ 8 เปรียบเทียบ (ก) ความเร็วลม C1 C2 C3 และ (ข) การลดลงของความเร็วลม (%) C2 และ C3 เทียบกับ C1 ที่ความระดับสูงเทียบเท่า 2.53 เมตร (4.00 – 1.47) จากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน

3.2 กรณีสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม (C1), สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านซ้าย (C4) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านขวา (C5)

กรณีที่รู้ทิศทางของลมหลักว่ามาจากทิศใดทิศหนึ่งเพื่อความสะดวกจึงได้ศึกษาผลการติดตั้งแผงกันลมเพียงด้านเดียว งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงลมที่กระทำต่อสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมออกเป็น การติดตั้งแผงกันลมเฉพาะด้านซ้าย (C4) และการติดตั้งแผงกันลมเฉพาะด้านขวา (C5) โดยพิจารณาที่ค่าความพรุน 23% ลักษณะการไหลของลมรอบหน้าตัดสะพานได้แสดงไว้ในรูปที่ 9

3.2.1 กลไกการไหลของลมผ่านสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านซ้าย (C4) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านขวา (C5)

กรณี C4 แผงกันลมทำหน้าที่เป็นสิ่งที่กีดขวางตัวแรกที่ปะทะกับลม กระแสลมถูกบังคับให้ยกตัวข้ามแผงกันลมและบางส่วนไหลผ่านช่องเปิดของแผงเกิดบริเวณอับลมขนาดใหญ่ที่มีความเร็วลมต่ำ (แถบสีน้ำเงินเข้ม) ครอบคลุมพื้นที่เกือบทั้งหมดของพื้นสะพาน กรณีนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพในการกำบังทางอากาศพลศาสตร์สูงสุด ช่วยลดแรงดันจากลม ที่กระทำต่อหน้าตัดสะพานและวัตถุนบนสะพานได้อย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนกรณี C5 ลมปะทะกับขอบสะพานด้านซ้ายโดยตรงก่อนจะไหลผ่านพื้นที่ด้านบนสะพาน แล้วจึงไปปะทะกับแผงกันลมที่ติดตั้งอยู่ฝั่งขวาแม้จะมีการติดตั้งแผงกันลม แต่พื้นที่ส่วนใหญ่บนสะพานยังคงเผชิญกับกระแสลมที่มีความเร็วสูง (แถบสีเขียว/ฟ้าอ่อน) เนื่องจากแผงกันลมไม่ได้ทำหน้าที่กักบังกระแสลมก่อนเข้าสู่พื้นที่ใช้งาน แต่กลับทำให้เกิดการสะสมของความดันและระลอกลม (Vortex) บริเวณด้านหลังแผงทางขวาแทน ประสิทธิภาพในการปกป้องพื้นที่ในกรณีนี้จึงต่ำกว่ากรณีที่ 2 อย่างเห็นได้ชัด

3.2.2 สมรรถนะโดยรวมของสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านซ้าย (C4) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านขวา (C5)

จากการตรวจวัดค่าความเร็วลมเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตำแหน่งด้านต้นลม (L6) ไปยังท้ายลม (L13) 3 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีสะพานที่ไม่ติดตั้ง (C1), สะพานที่ติดตั้งแผงกันลมความพรุน 23% ทางซ้ายต้นลม (C4) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมความพรุน

23% ทางขวาท้ายลม (C5) ผลการศึกษาในรูปที่ 10 สามารถสรุปได้ดังนี้

เมื่อพิจารณากราฟของกรณี C4 ลีหัลล์มส์ไฟฟ้า ประสิทธิภาพการกั้นลมสูงที่สุดจาก 3 กรณี โดยที่ระดับความสูง 1.5 - 4.5 เมตร พบว่าความเร็วลมลดลงอย่างมาก (อยู่ในช่วง 0-13 m/s) ขึ้นกับตำแหน่ง เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจากด้านต้นลม (L6) ไปยังท้ายลม (L13) พื้นที่ที่กระแสลมผ่านแผ่กันลมมายังตำแหน่ง (L6-L7) กรณี C4 ความเร็วลมลดลงอย่างรุนแรงทันที ในขณะที่ C5 (กากบาทสีแดง) ที่ระดับความสูง 1.5- 4 เมตรจากระดับอ้างอิงมีความเร็วเริ่มต้นสูงกว่ากรณีสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลมเล็กน้อย ตำแหน่งกึ่งกลาง (L9 - L10) ผลกระทบของการกักบังลมยังคงรักษาระดับได้ดีในกรณี C4 แต่ C5 ความเร็วลมเริ่มมีค่าน้อยกว่าสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลมที่ตำแหน่ง L10 โดยความเร็วลมที่ระดับความสูง 4.5 เมตรจากระดับอ้างอิงเป็นต้นไปยังคงต่ำกว่ากรณี C1 อย่างชัดเจน ตำแหน่งท้ายลม (L12 - L13) เป็นระยะที่ห่างจากแผงกันลมด้านหน้ามาก แต่ C4 ย่านความเร็วต่ำ (Wake) ยังคงครอบคลุมพื้นที่อยู่ ไม่พบการ Re-attachment ของกระแสลมหลักลงมาที่ผิวจราจร ซึ่งยืนยันว่าความสูงของแผงกันลมมีเพียงพอที่จะปกป้องยานพาหนะตลอดความกว้างของสะพาน ส่วน C5 ผลจากแผงกันลมด้านหลังเริ่มส่งผลให้ความเร็วลมลดลงตั้งแต่ระดับ 1.5 เมตรจากระดับอ้างอิงเป็นต้นไป

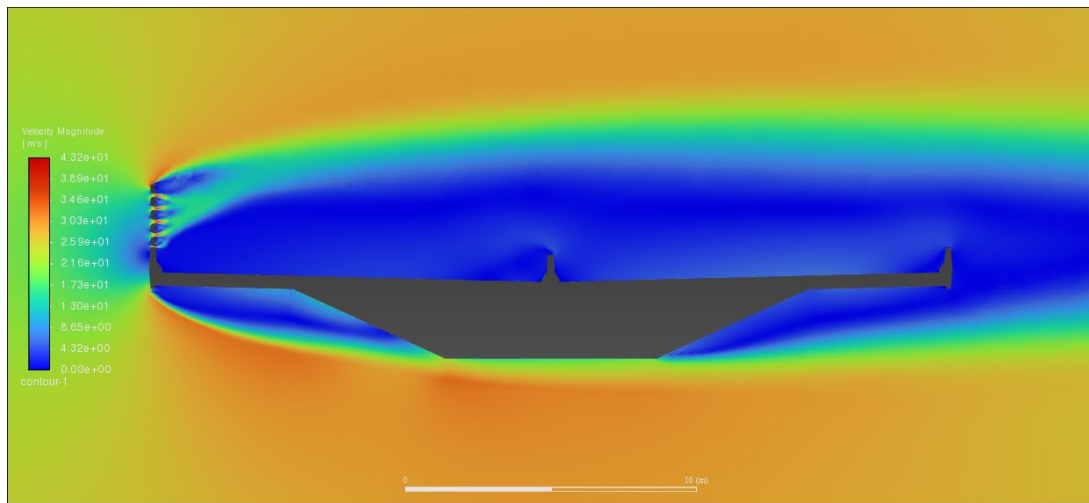
3.2.3 ประสิทธิภาพการลดความเร็วลมของสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านซ้าย (C4) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านขวา (C5) ที่ระดับความสูง 3 เมตรจากพิกัดอ้างอิง (เท่ากับ 1.53 เมตรจากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดความเร็วลมของแผงกันลมดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งแสดงผลการตรวจวัดที่ความสูงเทียบเท่า 1.53 เมตร (3.00 - 1.47) เหนือผิวจราจร ประสิทธิภาพของแผงกันลมความพรุน 23% ติดตั้งต้นลม(C4) แสดงประสิทธิภาพในการบังลมสูงสุด ความเร็วลมลดลงเหลือเพียง 1.04 – 3.23 m/s ตลอดความกว้างสะพาน ที่บริเวณจุดวัดต้นลม L6-L7 ห่างจากแผงกันลม 2.58 ถึง 5.38 เมตรตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการลดความเร็วลมสูงถึง 68% - 70% ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบด้วยอุโมงค์ลม [16] ซึ่งทำการทดสอบที่ความพรุน 25% มุมเอียง 90 องศาที่ความสูงจากผิวถนน 0.3 0.6 และ 0.9 เมตร ที่ระยะห่างจากแผงกันลม 0.5 ถึง 6 เมตรตามลำดับ ส่วนช่วงกลางและท้ายลม (L10-L13 ห่างจากแผงกันลมด้านต้นลม 16.58 ถึง 24.98 เมตรตามลำดับ) สามารถลดความเร็วลมได้มากกว่า 70% สถานะนี้สร้างพื้นที่ปลอดภัย ที่สมบูรณ์สำหรับรถยนต์ขนาดเล็ก

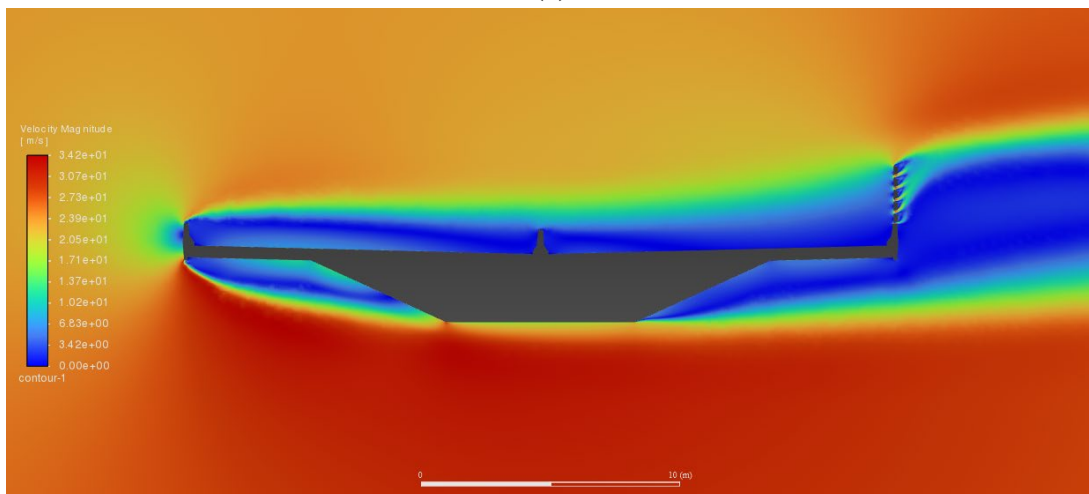
ติดตั้งแผงกันลมท้ายลม (C5): ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ความเร็วลมเฉลี่ยยังคงอยู่ในช่วง 6.02 – 12.89 m/s การลดทอนความเร็วลมทำได้เพียง -131% ถึง 52% โดยที่ตำแหน่ง L7 พบว่าค่าการลดทอนติดลบ (-131%) ซึ่งหมายความว่ากระแสลมมีความเร็วลมสูงกว่ากรณีไม่มีแผงกัน ในจุด L6 ถึง L10 เนื่องจากการเกิด Bleeding Flow ที่พุ่งผ่านรูพรุนเข้ามาพื้นที่ดังกล่าว

3.2.4 ประสิทธิภาพการลดความเร็วลมของสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านซ้าย (C4) และสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% เฉพาะด้านขวา (C5) ที่ระดับความสูง 4 เมตรจากพิกัดอ้างอิง (เท่ากับ 2.53 เมตรจากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน)

จากรูปที่ 12 ประสิทธิภาพการลดความเร็วลมที่ความสูงเทียบเท่า 2.53 เมตร (4.00 – 1.47) เหนือผิวจราจร เป็นตัวแทนผลกระทบต่อยานพาหนะขนาดใหญ่ แผงกันลมความพรุน 23% ติดตั้งต้นลม (C4) มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยสามารถลดความเร็วลมเฉลี่ยลงเหลือ 0.70 – 1.22 m/s คิดเป็นอัตราการลดทอนในช่วง 74% - 98% แม้ที่ตำแหน่งต้นลม (L6) ประสิทธิภาพจะลดลงเหลือ 74% แต่ในโซนกลางสะพาน (L9-L11) ยังคงกั้นลมได้มากกว่า 90% ส่วนแผงกันลมความพรุน 23% ติดตั้งท้ายลม (C5) ประสิทธิภาพการบังลมลดลงอย่างชัดเจนที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้น ความเร็วลมเฉลี่ยสูงถึง 12.7 - 24.82 m/s โดยมีอัตราการลดทอนเพียง 0% - 35% เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่ามีความเร็วลมที่ต่ำกว่ากรณีสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม

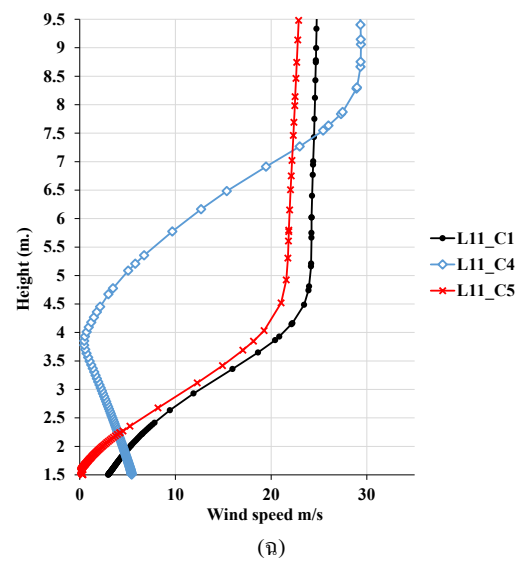
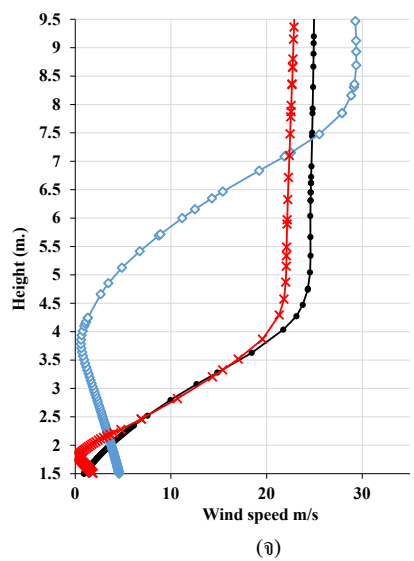
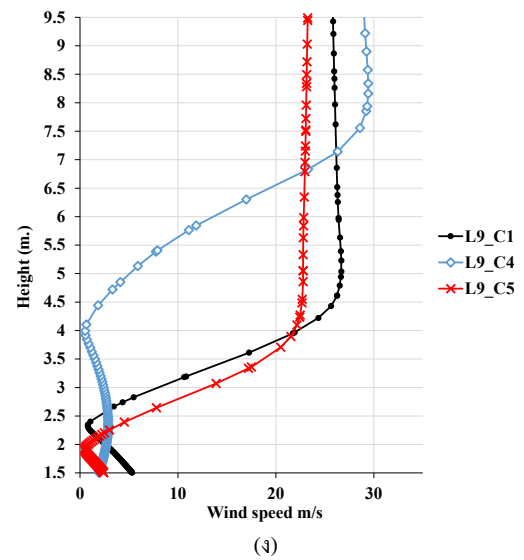
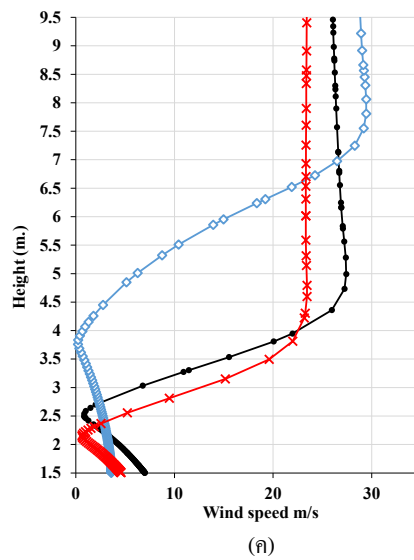
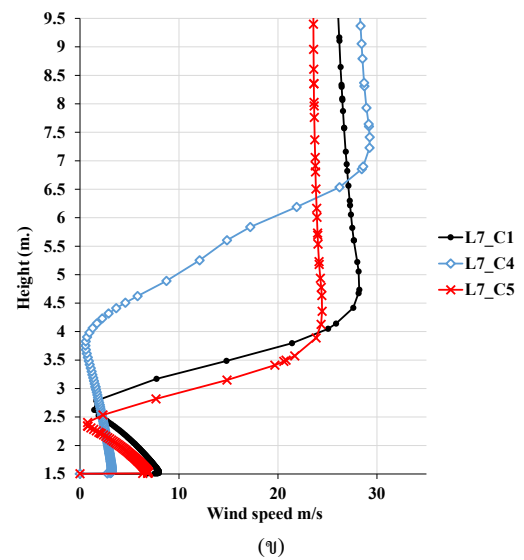
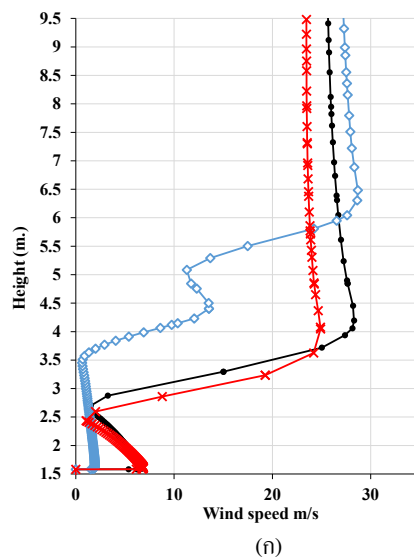


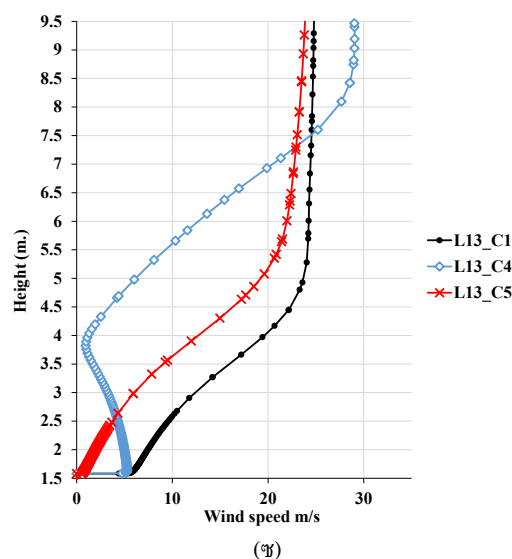
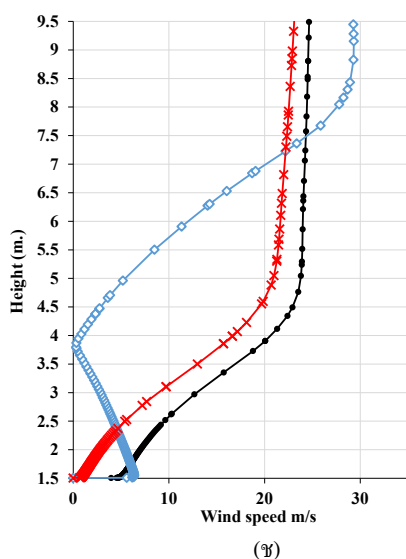
(ก)



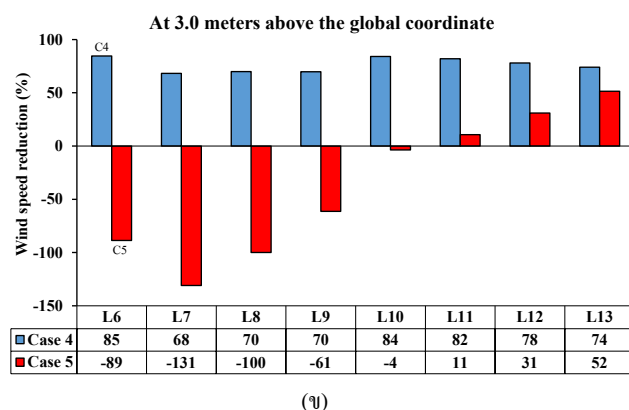
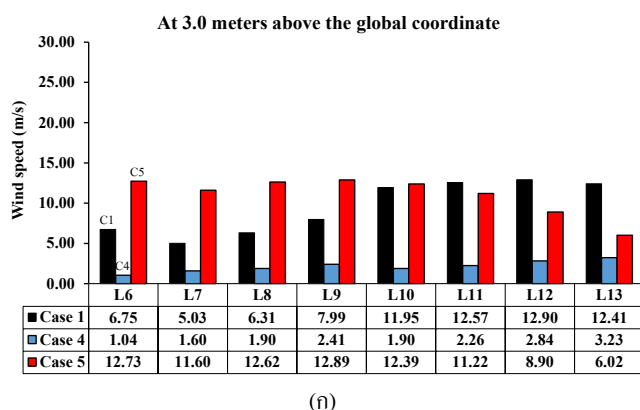
(ข)

รูปที่ 9 ความเร็วลมบนสะพานที่ติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% (ก) ติดตั้งแผงกันลมเฉพาะด้านซ้าย และ (ข) ติดตั้งแผงกันลมเฉพาะด้านขวา

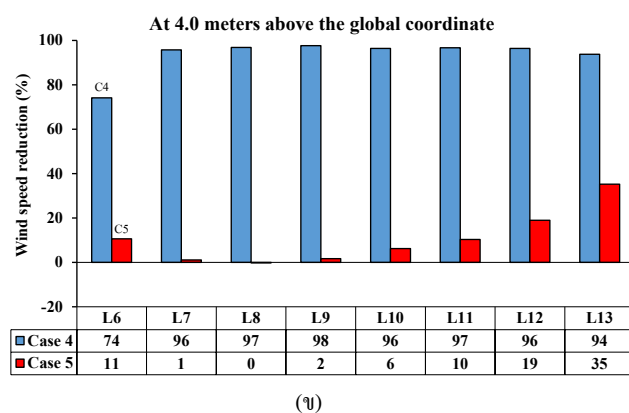
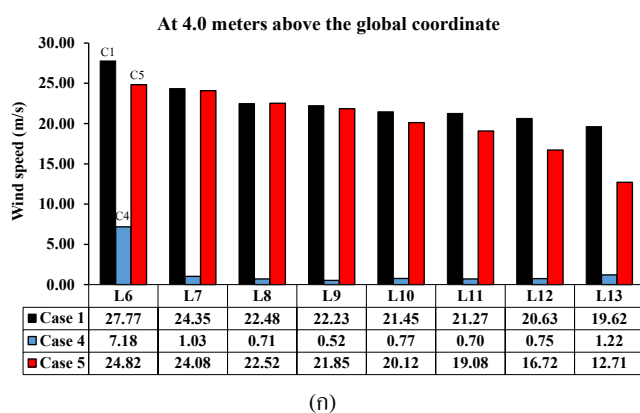




รูปที่ 10 ความเร็วลมระหว่าง 3 รูปแบบการติดตั้ง สำหรับ 8 จุดวัด (ก)ตำแหน่ง L6 (ข)ตำแหน่ง L7 (ค)ตำแหน่ง L8 (ง)ตำแหน่ง L9 (จ)ตำแหน่ง L10 (ฉ)ตำแหน่ง L11 (ช)ตำแหน่ง L12 และ(ซ)ตำแหน่ง L13 ของ C1 C4 และC5



รูปที่ 11 เปรียบเทียบ (ก) ความเร็วลม C1 C4 C5 และ (ข) การลดลงของความเร็วลม (%) C4 และ C5 เทียบกับ C1 ที่ความระดับสูงเทียบเท่า 1.53 เมตร (3.00 -1.47) จากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน

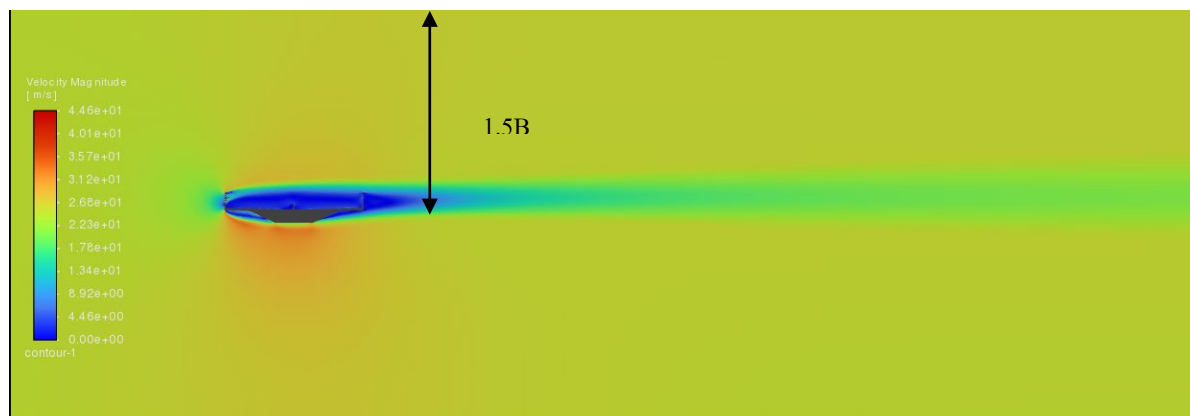


รูปที่ 12 เปรียบเทียบ (ก) ความเร็วลม C1 C4 C5 และ (ข) การลดลงของความเร็วลม (%) C4 และ C5 เทียบกับ C1 ที่ความระดับสูงเทียบเท่า 2.53 เมตร (4.00 - 1.47) จากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน

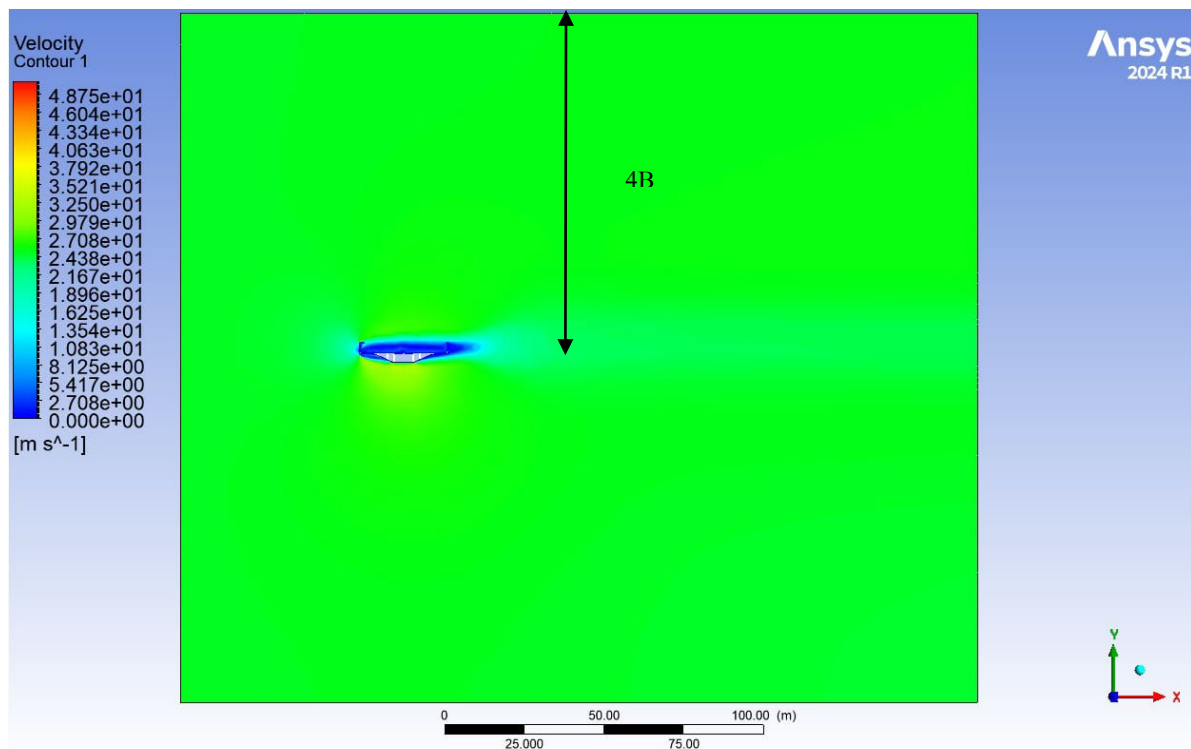
3.3 ผลของขนาดโดเมนการไหลต่อค่าโปรไฟล์ความเร็วลมตลอดความกว้างหน้าตัดสะพาน

เพื่อความสะดวกระหว่างความถูกต้องของผลลัพธ์และต้นทุนทางคอมพิวเตอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องทำการจำลองหลายกรณี งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าของขนาดโดเมนการไหลต่อค่าโปรไฟล์ความเร็วลมแนวตั้งตลอดความกว้างหน้าตัดสะพาน โดยทำการศึกษาค่าสูงของโดเมนการไหลแบบ 1.5B และ 4B ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 13 และรูปที่ 14 ตามลำดับ

รูปที่ 13 แสดงให้เห็นลักษณะของพฤติกรรมการไหล เช่น จุดแยกลมที่ขอบสะพาน, ลักษณะของ Wake region ด้านหลัง, และการเร่งความเร็วลมเหนือหน้าตัดสะพานมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน จากผลการเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลมแนวตั้งเหนือหน้าตัดสะพานที่ตำแหน่ง L8 และ L11 (ดังรูปที่ 14) เป็นตัวแทนเลนฝั่งต้นลมและเลนฝั่งท้ายลม พบว่าความเร็วลมบริเวณใกล้พื้นผิว (ความสูงไม่เกิน 5.5 เมตรเหนือผิวถนน) มีความสอดคล้องกันระหว่างสองกรณี ความคลาดเคลื่อนเริ่มปรากฏในระดับความสูง > 5.5 m ซึ่งเป็นผลมาจากขอบเขตที่ขอบเขตด้านบน อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวมีน้อยกว่า 4% และวัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อพื้นผิวสะพานและยานพาหนะ ซึ่งอยู่ในระดับความสูงที่ผลลัพธ์จากโดเมนทั้งสองมีความแม่นยำเทียบเท่ากัน การเลือกใช้โดเมนขนาด 1.5B จึงมีความเหมาะสม สามารถสะท้อนพฤติกรรมการไหลในพื้นที่ที่สนใจได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่เดียวกันยังช่วยลดทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ในการคำนวณลงได้อย่างมีนัยยะสำคัญ



(ก)



(ข)

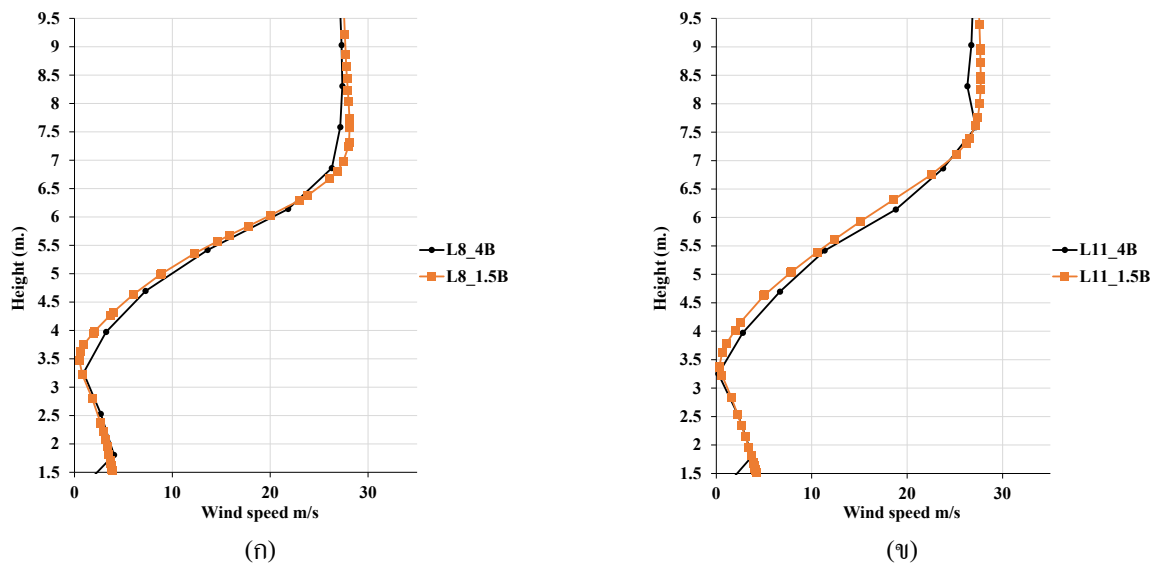
รูปที่ 13 โดเมนการไหลกรณีศึกษา (ก) ความสูงโดเมนการไหล 1.5B (ข) ความสูงโดเมนการไหล 4B

4. บทสรุป

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของลมผ่านหน้าตัดสะพานด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ทั้ง 5 กรณีศึกษา พบว่า ร้อยละความพรุนและการจัดวางตำแหน่งของแผงกันลมส่งผลต่อความเร็วลม และประสิทธิภาพในการป้องกันลมปะทะยานพาหนะ อย่างมีนัยสำคัญโดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้:

กรณีที่มีการติดตั้งแผงกันลมทั้ง 2 ฝั่ง

- กรณีที่ไม่มีการติดตั้งแผงกันลมกระแสลมสามารถไหลผ่านพื้นที่ผิวจราจรได้อย่างอิสระและรุนแรง (สังเกตจากแถบสีเขียวและเหลือง) ซึ่งก่อให้เกิดความเร็วลมสัมพัทธ์ที่สูงบนตัวสะพาน สถานะนี้มีความเสี่ยงสูงสุดต่อเสถียรภาพการขับขี่ โดยเฉพาะยานพาหนะที่มีพื้นที่รับลมมาก



รูปที่ 14 โปรไฟล์ความเร็วลมแนวดิ่ง สำหรับ 2 จุดวัด (ก)ตำแหน่ง L8 (ข)ตำแหน่ง L11 กรณี 1.5B และ 4B

- การติดตั้งแผงกันลมที่มีความพรุน 23% ทั้งสองด้าน แสดงประสิทธิภาพในการกักบังลมได้ดีที่สุด โดยสามารถสร้างพื้นที่ความเร็วลมต่ำ (Wake Region สีน้ำเงินเข้ม) ครอบคลุมทั่วทั้งความกว้างของสะพาน ช่วยลดแรงปะทะด้านข้างต่อยานพาหนะได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- เมื่อเพิ่มความพรุนเป็น 54% แม้จะยังคงลดความเร็วลมได้เมื่อเทียบกับสะพานที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม แต่ประสิทธิภาพในการกักบังลมลดลงเมื่อเทียบกับกรณี 23% เนื่องจากมีกระแสลมบางส่วนสามารถลอดผ่านช่องว่างของแผงกันเข้ามาได้มากขึ้น ทำให้ความเร็วลมเฉลี่ยเหนือผิวจราจรเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย
- การติดตั้งแผงกันลมที่มีค่าความพรุน 23 และ 54% สามารถลดความเร็วลมได้ร้อยละ 65-92% และ 13-35% ตามลำดับ ที่ความสูง 2.53 เมตรจากความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวถนน
กรณีติดตั้งแผงกันลมฝั่งใดฝั่งหนึ่ง
- กรณีการติดตั้งแผงกันลมเฉพาะด้านซ้ายหรือด้านคันลมเพียงพอที่จะสร้างเขตความเร็วลมต่ำเพื่อปกป้องพื้นที่บนสะพานได้ โดยแผงด้านหน้าจะทำหน้าที่ยกกระแสลมให้ข้ามผ่านตัวสะพานไป ส่งผลให้ความเร็วลมบนพื้นผิวอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยใกล้เคียงกับการติดตั้งสองด้าน
- การติดตั้งแผงกันลมเฉพาะด้านขวาหรือด้านท้ายลม ส่งผลต่อการลดความเร็วลมบนผิวจราจรน้อยมาก เนื่องจากกระแสลมได้พัดผ่านหน้าตัดสะพานเต็มที่แล้วก่อนจะไปปะทะกับแผงกัน แต่จะเห็นได้ว่าที่ระยะจุดวัดใกล้แผงกันลมค่าความเร็วลมจะยิ่งลดลงเมื่อเทียบกับหน้าตัดที่ไม่ติดตั้งแผงกันลม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยที่นำเสนอในบทความฉบับนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และบริษัท เวิร์ด บริดจ์ เทคโนโลยี จำกัด นอกจากนี้ผู้สนับสนุนขอขอบพระคุณ สำนักงานศูนย์วิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (มทร.ตะวันออก) สำหรับการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Liu, S., Zhao, L., Fang, G., Hu, C. and Ge, Y. *Investigation on aerodynamic force nonlinear evolution for a central-slotted box girder under torsional vortex-induced vibration*. Journal of Fluids and Structures, 2021, 106, p. 103380.
- [2] Xia, D., Dai, L., Lin, L., Wang, H. and Hu, H. *A field measurement based wind characteristics analysis of a typhoon in near-ground boundary layer*. Atmosphere, 2021, 12 (7), p. 873.
- [3] Kozmar, H., Procino, L., Borsani, A. and Bartoli, G. *Sheltering efficiency of wind barriers on bridges*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 107, pp. 274-284.
- [4] Baker, C., Cheli, F., Orellano, A., Paradot, N., Proppe, C. and Rocchi, D. *Cross-wind effects on road and rail vehicles*. Vehicle System Dynamics, 2009, 47 (8), pp. 983-1022.
- [5] Coleman, S. A. and Baker, C. J. *The reduction of accident risk for high sided road vehicles in cross winds*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 44 (1-3), pp. 2685-2695.
- [6] Han, Y., Cai, C. S., Zhang, J., Chen, S. and He, X. *Effects of aerodynamic parameters on the dynamic responses of road vehicles and bridges under cross winds*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 134, pp. 78-95.
- [7] Chen, N., Li, Y., Wang, B., Su, Y. and Xiang, H. *Effects of wind barrier on the safety of vehicles driven on bridges*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 143, pp. 113-127.
- [8] Kim, S. J., Shim, J. H. and Kim, H. K. *How wind affects vehicles crossing a double-deck suspension bridge*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206, p. 104329.
- [9] Xue, F., Han, Y., Zou, Y., He, X. and Chen, S. *Effects of wind-barrier parameters on dynamic responses of wind-road vehicle-bridge system*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206, p. 104367.
- [10] Buljac, A., Kozmar, H., Pospíšil, S., Macháček, M. and Kuznetsov, S. *Effects of wind-barrier layout and wind turbulence on aerodynamic stability of cable-supported bridges*. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25 (12), p. 04020102.
- [11] Schmitt, F. G. *About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity*. Comptes Rendus Mécanique, 2007, 335 (9-10), pp. 617-627.
- [12] Wilcox, D. C. *Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models*. AIAA Journal, 1988, 26 (11), pp. 1299-1310.
- [13] Menter, F. R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. AIAA Journal, 1994, 32 (8), pp. 1598-1605.
- [14] Cermak, J. E. *Wind tunnel studies of buildings and structures*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 1999.
- [15] Zhang, M., Zhang, J., Long, J., Li, Y., Zou, Y. and Yin, D. *CFD numerical simulation of wind field and vehicle aerodynamic characteristics on truss bridge deck under crosswind*. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26 (12), pp. 5146-5159.
- [16] Lee, S. H., Kim, H., Moon, H., Kim, H. S., Han, S. S. and Jeong, S. *Effects of wind barrier porosity and inclination on wind speed reduction*. Applied Sciences, 2023, 13 (14), p. 8310.