

อิทธิพลของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงลม INFLUENCE OF ROW CONFIGURATION OF SOLAR PANELS ON WIND LOAD COEFFICIENTS

จิรวัดน์ จันทรเรือง¹ และ วิโรจน์ บุญญภิญโญ^{2*}

¹อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย, 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330,
jirawat_ju@rmutto.ac.th

^{2*}อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, เลขที่ 99 หมู่ 18 ถ. พหลโยธิน
ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, bvirote@engr.tu.ac.th

Jirawat Junruang¹ and Virote Boonyapinyo^{2*}

¹Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand,
jirawat_ju@rmutto.ac.th

^{2*}Lecturer, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering, Thammasat University,
99 Phahonyothin Rd, Khlong Nueng, Khlong Luang District, Pathumthani 12120, Thailand,
bvirote@engr.tu.ac.th

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบในอุโมงค์ลมและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในสภาวะคงตัวแบบ 2 มิติด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน k- ω SST เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงลมที่กระทำต่อโซลาร์เซลล์แบบแผงเดี่ยวและแบบเรียงแถวชนิดติดตั้งบนพื้นดินในเขตที่โล่ง ผลการศึกษาพบว่าโซลาร์เซลล์แบบแผงเดี่ยวมีสัมประสิทธิ์แรงดันสูงสุดที่มุมเอียง (θ) 40 องศา โดยในช่วงมุมเอียง 15 ถึง 40 องศา มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน JIS C 8955 เล็กน้อยถึงปานกลาง กรณีแบบเรียงแถวพบว่าสัมประสิทธิ์แรงลมและโมเมนต์มีค่าต่ำกว่าแผงเดี่ยวในทุกมุมเอียง โดยเฉพาะแผงด้านในที่ได้รับอิทธิพลจากการกำบัง ส่งผลให้ความเร็วลมและการแยกตัวของกระแสลมลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ผลวิเคราะห์จาก CFD พบความคลาดเคลื่อนจากผลทดสอบในอุโมงค์ลมร้อยละ 5-17 เนื่องด้วยข้อจำกัดของการจำลองสภาวะคงตัวของแบบจำลอง 2 มิติที่ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการแยกตัวของกระแสลมแบบ 3 มิติที่ซับซ้อนได้อย่างสมบูรณ์ งานวิจัยนี้ช่วยสร้าง

ความเข้าใจต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศ เพื่อนำไปสู่การออกแบบโครงสร้างรับแรงลมของระบบโซลาร์เซลล์ให้มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: อุโมงค์ลม, แผงโซลาร์เซลล์, สัมประสิทธิ์แรงลม, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ABSTRACT

This study utilizes wind tunnel testing and 2D steady-state Computational Fluid Dynamics (CFD) employing the k- ω SST turbulence model to evaluate the wind force coefficients acting on ground-mounted solar panels in single and row configurations situated in open terrain. Results indicate that single panels exhibit maximum normal force at a 40° tilt, slightly to moderately exceeding JIS C 8955 standards between 15° and 40°. In contrast, row configurations show significantly lower coefficients due to the shielding effect, particularly on inner panels where flow separation is reduced. Additionally, the CFD analysis revealed a 5–17% discrepancy compared to the wind tunnel test results. This deviation is attributed to the inherent limitations of 2D steady-state simulations, which cannot fully replicate complex 3D flow separation behaviors. These findings provide critical insights for optimizing the structural safety and efficiency of solar array designs against wind loads.

KEYWORDS: wind tunnel test, solar panels, aerostatic coefficients, computational fluid dynamic

1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อน ไปจนถึงการผลิตกระแสไฟฟ้า โซลาร์เซลล์จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากลักษณะของโซลาร์เซลล์ที่ต้องติดตั้งกลางแจ้งจึงได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ลม และแผ่นดินไหวอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะปัญหาที่เกิดจากแรงลม ในอดีตแผงโซลาร์เซลล์มักติดตั้งบนหลังคาหรือดาดฟ้าของที่พักอาศัย [1-4] ส่งผลให้มีการการศึกษาผลของแรงลมที่มีต่อแผงโซลาร์เซลล์พบว่าพฤติกรรมของแรงลมเมื่อกระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์แล้ว เกิดการไหลของกระแสลมบริเวณผิวหลังคาและระยะระหว่างแผงโซลาร์เซลล์ ส่งผลต่อกระแสลมจากแผงหนึ่งไปยังอีกแผงหนึ่ง และส่งผลให้ลักษณะการปะทะของแรงลมเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีการพิจารณาแผงโซลาร์เซลล์แบบอิสระ [3] นอกจากนี้ยังพบว่ามาตรฐาน ASCE 7-16 [5] ประเมินแรงดูดต่ำเกินไปถึง 34% ในกรณีการวางแผงแบบทั่วไป ในทางกลับกัน สำหรับแผงที่ติดตั้งบริเวณมุมหลังคาตามมาตรฐาน ASCE 7-16 [5] กลับประเมิน

แรงดูดสูงไปถึง 32% นอกจากนั้น Aly and Bitsuamlak [2] เสนอให้เลี่ยงการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ บริเวณมุมหลังคา

การติดตั้งโซลาร์เซลล์แบบเรียงเป็นแถวนั้น ทิศทางลม มุมเอียง ระยะห่าง และความสูงของแผง ล้วนส่งผลกระทบต่อรูปแบบการไหลของกระแสลมอย่างมีนัยสำคัญ ในปี ค.ศ. 2012 Ikeda et al [6] ทำการทดสอบโซลาร์เซลล์จัดเรียงเป็นกลุ่ม (สูงสุด 3 แถว 8 คอลัมน์) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลม สูงสุดเมื่อกระแสลมพัดเข้าทำมุม 30 องศาทิศทางด้านหน้าของกลุ่มแผง โดยตำแหน่งที่รับ แรงลมสูงสุดคือแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณมุมสุดฝั่งด้านหน้าที่ปะทะลม สอดคล้องกับผลการ ทดสอบในอุโมงค์ลมของ Ma et al [7] พบว่าการรบกวนของมุมเอียงต่อกระแสลมเหนือพื้นผิวแผง จะเพิ่มขึ้นตามองศาการติดตั้ง ในประเด็นของระยะห่างระหว่างแถว Shademan et al [8] ใช้ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการศึกษา พบว่าเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยของแรงลม กระทำต่อโครงสร้างโดยรวมจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนระยะห่าง โดย Sun et al [9] พบว่าภายใต้ ความเร็วลมต่ำ แรงต้านทานสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมเอียง 35 องศาและระยะห่าง 3 เมตรระหว่างกลุ่มแผง นอกจากนี้ Xu et al [10] เสนอว่าระยะห่างมีอิทธิพลอย่างมากต่อขนาดของกระแสน้ำวนด้านท้ายลม โดยระยะห่างที่น้อยจะบีบอัดกระแสน้ำวนจากแผงด้านหลัง ในขณะที่ระยะห่างที่กว้างขึ้นจะไม่ส่งผลต่อ ขนาดและรูปร่างของกระแสน้ำวนจากแผงหน้าอีกต่อไป ในส่วนของความสูง Smith et al [11] พบว่า การเพิ่มความสูงในการติดตั้งส่งผลต่อความเร็วของการไหลด้านล่างที่สูงขึ้น ซึ่งกระทบต่อกระแสน้ำวน ด้านหลังกลุ่มแผง ส่งผลให้ความเร็วลมเหนือพื้นผิวแผงด้านหลังเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเรียง แผงซ้อนกันยังก่อให้เกิดผลของการกำบัง โดยแรงลมกระทำแผงหน้าจะลดลง 10-15% เนื่องจากการ มีอยู่ของแผงหลัง [6] และแผงแถวแรกจะช่วยลดแรงลมกระทำต่อแผงแถวที่สอง [1, 6]

ในปัจจุบันประเทศไทย มีการติดตั้งโซลาร์เซลล์ในลักษณะจัดเรียงเป็นแถว (รูปที่ 1) ซึ่ง หากเกิดความเสียหายในจุดใดจุดหนึ่ง อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทั้งหมด โดย ความเสียหายส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นที่บริเวณข้อต่อและจุดยึดแผง การศึกษาในอดีตมุ่งเน้นไปที่แรงลม ที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์ซึ่งติดตั้งบนหลังคาอาคารเป็นหลัก ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับ กลุ่มแผงโซลาร์เซลล์แบบติดตั้งบนพื้นดินในลักษณะของฟาร์มโซลาร์เซลล์ยังมีอยู่อย่างจำกัด นอกจากนี้ปัจจุบันมาตรฐานแรงลมของประเทศไทยยังไม่ครอบคลุมถึงการออกแบบแผงโซลาร์ เซลล์ งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการทดสอบโซลาร์เซลล์แบบแผงเดี่ยวและแบบที่จัดเรียงเป็นแถว ชนิดติดตั้งบนพื้นดินด้วยอุโมงค์ลม TU-AIT เพื่อศึกษาผลจากแรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์ รวมทั้งใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 2 มิติเพื่ออธิบายกลไกการไหลของกระแสลมผ่าน โซลาร์เซลล์แบบแผงเดี่ยวและจัดเรียงเป็นแถวเพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 1 ตัวอย่างแผงโซลาร์เซลล์แบบจัดเรียงแถว ในประเทศไทย

2. การทดลองและระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การทดสอบในอุโมงค์ลมแบบชั้นบรรยากาศ (boundary layer wind tunnel)

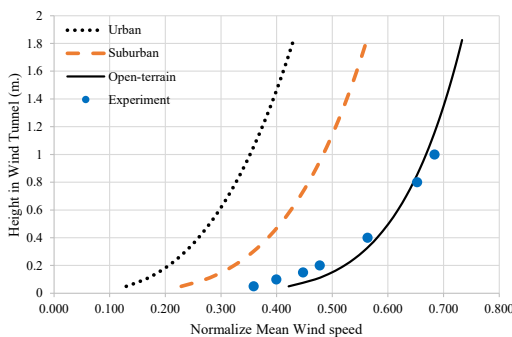
ก่อนทำการติดตั้งแบบจำลองโซลาร์เซลล์ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจำลองสภาวะชั้นบรรยากาศด้วยอุโมงค์ลม TU-AIT มีขนาด 2.5×2.5 เมตร และมีความยาว 25.5 เมตร (รูปที่ 2(ก)) สามารถสร้างความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 20 เมตรต่อวินาที และทำการตรวจวัดคุณลักษณะของกระแสลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot-wire anemometer) แบบ 1 มิติ (รูปที่ 2(ข)) ด้วยอัตราการจับเก็บข้อมูล 1000 ข้อมูล/วินาที โดยทำการตรวจวัดโปรไฟล์ความเร็วลมแนวตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแท่นหมุน ผลการตรวจวัดความเร็วลมเฉลี่ยของงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานสภาพภูมิประเทศ ASCE 7-05 [12] ดังแสดงในรูปที่ 2(ค) ซึ่งสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศแบบที่ 1 ในส่วนความเข้มความปั่นป่วนนั้น เนื่องจากแบบจำลองสเกล 1:20 มีขนาดค่อนข้างใหญ่ความเข้มความปั่นป่วนในชั้นบรรยากาศไม่สามารถจำลองในอุโมงค์ลมได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากขนาดความยาวเฉลี่ย (integral scale) ของลมปั่นป่วนในอุโมงค์ลมมีค่ามากกว่า 2 ถึง 3 เท่าของมิติที่ใหญ่ที่สุดของแบบจำลอง ผลกระทบจากสเกลความปั่นป่วนจึงคาดว่าจะไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ [13] เนื่องจากความเข้มข้นของความปั่นป่วน ที่ได้จากการทดสอบกับการจำลองความปั่นป่วนในอุดมคติต่างกันไม่มาก ดังนั้นผลกระทบที่เกิดจากความเข้มข้นของความปั่นป่วนจึงน่าจะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น พังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของความปั่นป่วนตามแนวยาวถูกเปรียบเทียบกับสเปกตรัม Von Karman ในรูปที่ 2(ง) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องที่ดี ดังนั้นการไหลที่จำลองในอุโมงค์ลม TU-AIT จึงเหมาะสมสำหรับการศึกษผลกระทบแรงลมในครั้งนี้



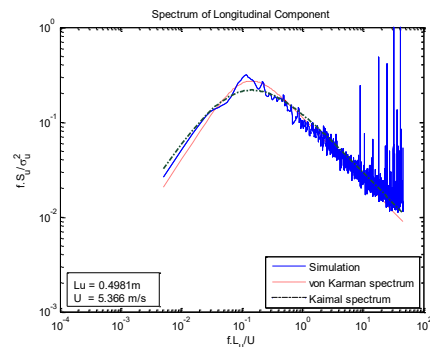
(ก)



(ข)



(ค)

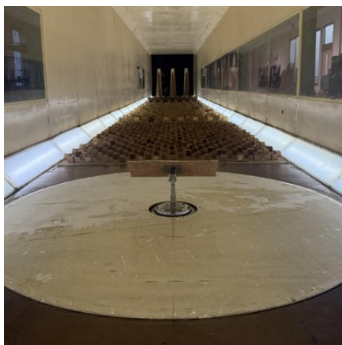


(ง)

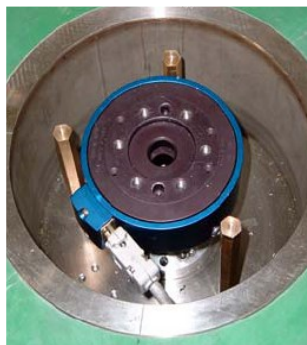
รูปที่ 2 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะกระแสลมในอุโมงค์ลมของงานวิจัยกับทฤษฎีและมาตรฐาน (ก) อุโมงค์ลม TU-AIT (ข) เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (ค) โปรไฟล์ความเร็วลมเฉลี่ยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASCE 7-05 [12] และ (ง) สเปกตรัมของความปั่นป่วนตามแนวยาว ณ ระดับความสูง 30 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับสเปกตรัม Von Karman

แบบจำลองโซลาร์เซลล์ที่มีสเกล 1:20 สร้างขึ้นโดยใช้แบบจำลองที่แข็งแรงและมีน้ำหนักเบาทำจากไม้อัดมีขนาด 206 x 509 x 7 mm (ลึก(L) x กว้าง(W) x ความหนา(t)) เสารองรับทำจากเหล็กกล่องสูง 230 mm พร้อมกลไกที่สามารถปรับมุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์ได้แสดงในรูปที่ 3 จากนั้นทำการติดตั้งบนเซ็นเซอร์วัดแรง ซึ่งยึดติดบนแท่นหมุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ซึ่งสามารถจำลองทิศทางลมใด ๆ ได้โดยการหมุนแบบจำลองไปยังมุมที่เหมาะสมภายในอุโมงค์ลม จากนั้นปล่อยกระแสลมไหลผ่านด้วยความเร็วลม 7.61 m/s (ที่ความสูงเฉลี่ยโซลาร์เซลล์, H) มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) เท่ากับ 1.01×10^5 เมื่อคำนวณจากความยาวคอर्ड (L) ของแบบจำลอง แม้ว่าค่า Re ในการทดสอบจะต่ำกว่าสภาวะการใช้งานจริง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์มีลักษณะทางอากาศพลศาสตร์เป็นวัตถุด้านแหลมขอบเหลี่ยม (sharp-edged bluff body) จุดแยกตัว

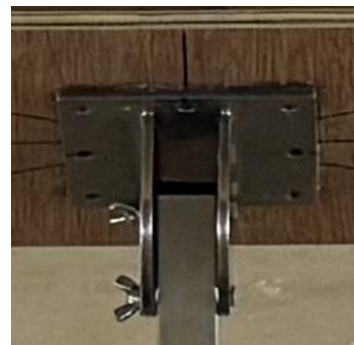
ของการไหลเกิดขึ้นที่ขอบแฉ่งอย่างชัดเจน ทำให้ลักษณะการไหลและค่าสัมประสิทธิ์แรงลมไม่ขึ้นกับค่าเรย์โนลด์ในสภาวะที่ $Re > 10^4$ ผลการทดสอบจึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของพฤติกรรมแรงลมในสภาวะจริงได้อย่างเหมาะสม จากนั้นทำการบันทึกค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกจากอุปกรณ์วัดแรงในทิศทางแกน X และ Z และ โมเมนต์รอบแกน Y ด้วยอัตราการจัดเก็บ 1000 ข้อมูลต่อ 1 วินาทีจัดเก็บเป็นระยะเวลา 60 วินาที ต่อ 1 มุมเอียงโดยมีรูปแบบการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ในแต่ละความเร็วลมถูกแปลงเป็นค่าแรงเฉลี่ย โดยการคูณกับเมทริกซ์การสอบเทียบของอุปกรณ์วัดแรงซึ่งได้จากการสอบเทียบแยกต่างหาก



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3 (ก) แบบจำลองโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยว ขนาด 1:20 (ข) อุปกรณ์วัดแรงติดตั้งที่ฐานแบบจำลอง และ (ค) กลไกปรับมุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์

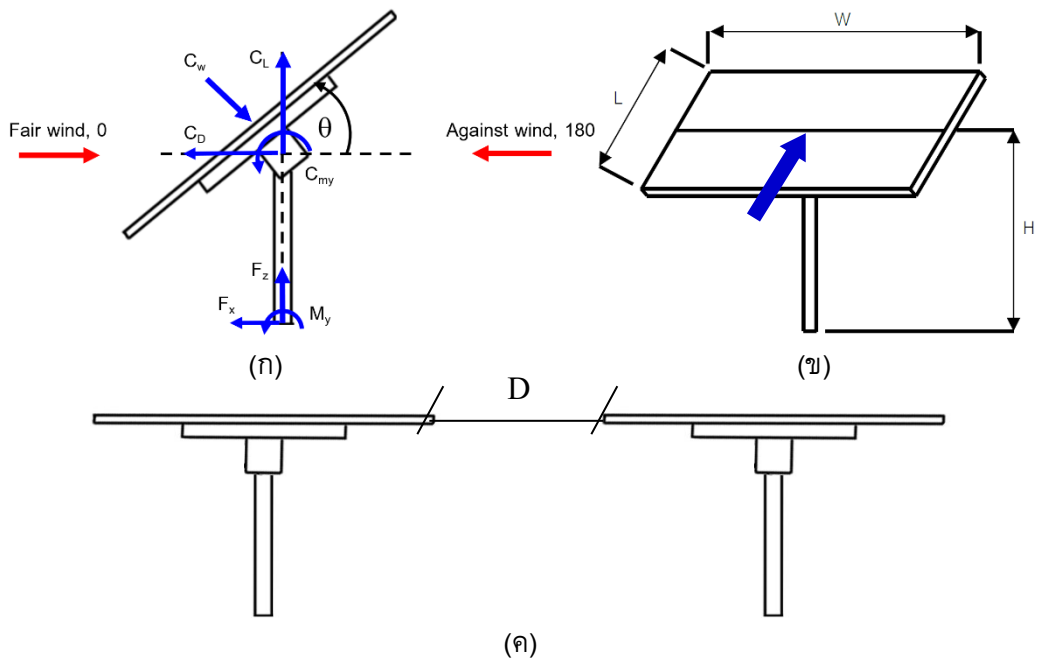
ตารางที่ 1 รูปแบบการทดสอบแผงโซลาร์เซลล์ในอุโมงค์ลม

จำนวนแผงโซลาร์เซลล์	มุมบิดโซลาร์เซลล์
แผงเดี่ยว	40, 30, 25, 20, 15, 10, 5, 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30, -40
ต้นลม 1 แผง	0, 15, 30
ต้นลม 2 แผง	0, 15, 30
ต้นลม 3 แผง	0, 15, 30
ต้นลม 4 แผง	0, 15, 30
ท้ายลม 1 แผง	0, 15, 30
ท้ายลม 2 แผง	0, 15, 30
ท้ายลม 3 แผง	0, 15, 30
ท้ายลม 4 แผง	0, 15, 30

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงอากาศพลศาสตร์ส่วนเฉลี่ย ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) สามารถหาได้จากการตรวจวัดโดยตรง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์ (C_w) สามารถหาได้จากแรงลัพธ์ระหว่างแรง F_x และ F_z ที่กระทำต่อแบบจำลองที่ฐานโซลาร์เซลล์ตามรูปที่ 3 จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงอากาศพลศาสตร์ (aerostatic force coefficients) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_D = \frac{F_x}{0.5\rho U^2 A_n}, C_L = \frac{F_z}{0.5\rho U^2 A_n}, C_w = \frac{F_w}{0.5\rho U^2 A_n}, C_{my} = \frac{M_y - (F_x H)}{0.5\rho U^2 A_n L} \quad (1)$$

โดยที่ A_n คือพื้นที่รวมของแผงโซลาร์เซลล์, F_x คือค่าแรงเฉลี่ยในทิศทางแกน X, F_z คือค่าแรงเฉลี่ยในทิศทางแกน Z, F_w คือค่าแรงเฉลี่ยในทิศทางตั้งฉาก (normal direction), M_y คือโมเมนต์รอบแกน Y, U คือความเร็วลมเฉลี่ยในอุโมงค์ลม ณ ระดับความสูงเฉลี่ยของแผงโซลาร์เซลล์, L คือความยาวคอร์ดในทิศทางลม ของแบบจำลอง ρ คือความหนาแน่นของอากาศ นิยามทิศทางรวมไปถึงขนาดต่างๆ แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ข้อตกลงเรื่องสัญลักษณ์ (ก) ทิศของมุมเอียง แรง และโมเมนต์ (ข) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณและ (ค) ระยะห่างระหว่างแผง

2.2 การวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

2.2.1 สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวียร์-สโตกส์

สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds Average Navier-Stokes: RANS) คือ สมการการเคลื่อนที่สำหรับของไหลที่ผ่านการหาค่าเฉลี่ยเชิงเวลา โดยสมการ RANS นี้ถูกใช้ควบคุมตัวแปรความเร็วเฉลี่ยและความดัน แนวคิดของสมการคือ การแยกตัวประกอบเรย์โนลด์ซึ่งเป็นการแยกปริมาณขณะใดขณะหนึ่งออกเป็นค่าเฉลี่ยเชิงเวลา และส่วนของการผันผวน สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยแบบเรย์โนลด์นี้ ความไม่คงที่ของการไหลเกือบทั้งหมดจะถูกคำนวณผ่านแบบจำลอง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ของการไหลเฉลี่ยจะถูกคำนวณหาคำตอบโดยตรง ทั้งนี้สมการ RANS ถือเป็นการพัฒนาต่อยอดมาจากสมการการเคลื่อนที่ของนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) สำหรับของไหลนิวโทเนียนที่อัดตัวไม่ได้

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

โดยที่ปริมาณต่าง ๆ แบ่งออกเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนปั่นป่วนมีรายละเอียดดังนี้

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p = \bar{p} + p' \quad (3)$$

เมื่อทำการแทนค่าพจน์ต่าง ๆ ลงในสมการนาเวียร์-สโตกส์ จะได้สมการดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + 2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right] \quad (4)$$

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

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

โดยที่ u , $\bar{u}$ และ u' แทนพจน์ของความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง ความเร็วเฉลี่ย และความเร็วปั่นป่วน ตามลำดับ, ν คือความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) และ f_i คือเวกเตอร์แรงภายนอก

2.2.2 เทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์

ในการหาคำตอบของสมการ RANS เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหลเฉลี่ยของการไหลแบบปั่นป่วน จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าของเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์ (reynolds stress tensor) คือ $\rho \overline{u_i' u_j'}$ หรือ τ_{ij} ซึ่งเป็นเทนเซอร์สมมาตรอันดับสองที่มีองค์ประกอบอิสระจำนวน 6 ส่วน สำหรับการไหลสามมิติทั่วไป จะมีตัวแปรไม่ทราบค่าของคุณลักษณะการไหลเฉลี่ยจำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็ว 3 แนวแกน และความดัน เมื่อรวมองค์ประกอบอิสระ 6 ส่วนของเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์เข้ากับคุณลักษณะการไหลเฉลี่ยทั้ง 4 ตัวแปร ส่งผลให้มีตัวแปรไม่ทราบค่ารวม 10 ตัวแปร อย่างไรก็ตามสมการการอนุรักษ์มวล และสมการการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้ง 3 แนวแกน ให้สมการสำหรับการหาคำตอบเพียง 4 สมการเท่านั้น เพื่อที่จะหาค่าของตัวแปรไม่ทราบค่าทั้ง 10 ตัวแปร ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้สมมติฐานเพิ่มเติมเพื่อแก้ระบบสมการดังกล่าว สมมติฐานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายคือ สมมติฐานความหนืดเอ็ดดี้ของบัสสินเนสก์ (Boussinesq) [14] โดยสมมติฐานนี้สำคัญต่อแบบจำลองชนิดสองสมการ (two-equation models) ทั้งหมด และมีสมมติฐานว่าเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์ τ_{ij} มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเทนเซอร์อัตรา การเปลี่ยนรูปเฉลี่ย $\overline{S_{ij}}$

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

$$k = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2} \quad (7)$$

โดยที่ μ_t คือสมบัติสเกลาร์ที่เรียกว่าความหนืดเอ็ดดี้ (Eddy viscosity) ซึ่งโดยปกติคำนวณได้จากตัวแปรการส่งผ่านสองตัวแปร ส่วนพจน์สุดท้ายที่ปรากฏนั้นถูกรวมไว้เพื่อใช้จำลองการไหลที่อัดตัวไม่ได้ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับนิยามของพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ k จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขสมการ (7)

สมมติฐานของบัสสินเนสก์ มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดสองสมการ สมมติฐานดังกล่าวช่วยลดรูปปัญหาลงได้อย่างมาก โดยช่วยให้สามารถพิจารณาผลกระทบของความปั่นป่วนที่มีต่อการไหลเฉลี่ยได้ในลักษณะเดียวกันกับที่ความหนืดระดับโมเลกุลส่งผลกระทบต่อการไหลแบบลามินาร์ นอกจากนี้ สมมติฐานนี้ยังทำให้สามารถนำตัวแปรความปั่นป่วนในรูปสเกลาร์ที่เข้าใจได้ง่ายมาใช้ได้ เช่น พลังงานจลน์ความปั่นป่วน และการสลายตัว รวมถึงยังสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้กับตัวแปรเชิงกายภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

เช่น ความเข้มข้นของความปั่นป่วน (turbulence intensity) และ มาตรฐานความยาวความปั่นป่วน (turbulence length scale)

2.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ω

ภายในกลุ่มแบบจำลอง RANS นั้น แบบจำลอง k- ω จัดเป็นแบบจำลองชนิดสองสมการ ซึ่ง จะทำการหาคำตอบของสมการการส่งผ่าน ผ่านตัวแปรพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน $k = \frac{\overline{u_i' u_i'}}{2}$ และอัตราการสลายตัวจำเพาะ $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$ โดยแบบจำลองนี้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ เพื่อให้ได้ผลการทำนายแรงบริเวณใกล้เคียงที่มีความแม่นยำสูง [15] ทั้งนี้ ค่าพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวจำเพาะ (ω) สามารถคำนวณได้จากสมการการส่งผ่าน ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (9)$$

โดยที่ G_k แทนพจน์การผลิตพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน อันเนื่องมาจากความชันของความเร็วเฉลี่ย, G_ω แทนพจน์การผลิตของ ω , ในขณะที่ S_k และ S_ω คือพจน์ต้นกำเนิดที่กำหนดโดยผู้ใช้, Y_k และ Y_ω แทนพจน์การสลายตัวและ τ_ω กับ แทนค่าสภาพแพร่ประสิทธิผลของ k และ ω อันเนื่องมาจากความปั่นป่วน ซึ่งกำหนดโดยสมการดังนี้

$$\tau_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \tau_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (10, 11)$$

โดยที่ σ_k และ σ_ω คือ เลขพρανต์ความปั่นป่วน (turbulent prandtl numbers) สำหรับ k และ ω ตามลำดับ และ μ คือความหนืดความปั่นป่วน (turbulence viscosity) ทั้งนี้

2.2.4 แบบจำลองการส่งผ่านความเค้นเฉือน SST

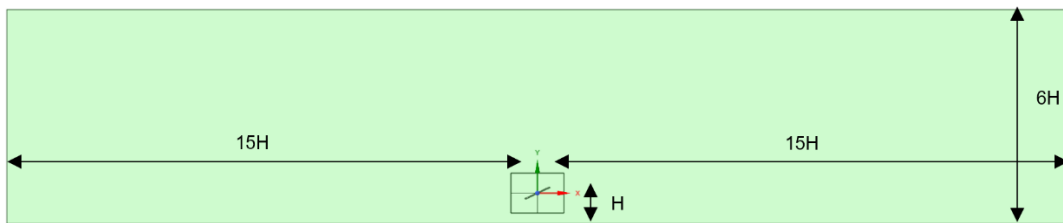
แบบจำลอง k- ω ช่วยให้สามารถจัดการกับการไหลบริเวณใกล้เคียงได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากลักษณะของชั้นขอบเขต จะได้รับอิทธิพลจากธรรมชาติของการไหล ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมี

การสร้างกริดแบบละเอียดในบริเวณใกล้ผนัง อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยประการหนึ่งของแบบจำลองนี้คือความไวต่อค่าในกระแสไหลอิสระ แบบจำลองการส่งผ่านความเค้นเฉือน (Shear Stress Transport: SST) $k-\omega$ เป็นอีกหนึ่งแบบจำลองชนิดสองสมการที่ถูกพัฒนาโดย [16] ซึ่งเป็นการรวมจุดเด่นด้านความแข็งแกร่ง และความแม่นยำของแบบจำลอง $k-\omega$ ในบริเวณใกล้ผนัง เข้ากับคุณสมบัติการไม่ขึ้นต่อค่ากระแสไหลอิสระของแบบจำลอง $k-\epsilon$ ในบริเวณสนามไกล เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว แบบจำลอง $k-\epsilon$ จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลอง $k-\omega$ นอกจากนี้แบบจำลอง SST ยังคำนึงถึงการส่งผ่านของความเค้นเฉือนความปั่นป่วนภายในชั้นขอบเขต โดยการปรับแก้ฟังก์ชันความหนืดเอ็ดดี้ความปั่นป่วน โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายลักษณะการไหลที่มีความชันความดันย้อนกลับสูง ตลอดจนการไหลที่มีการแยกตัวของชั้นขอบเขตเนื่องจากความดัน

2.2.5 การตั้งค่าที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษานี้ได้ดำเนินการจำลองเชิงตัวเลขแบบสภาวะคงตัวด้วยสมการเรย์โนลด์เฉลี่ยนาเวียร์-สโตกส์ (Steady Reynolds-Averaged Navier-Stokes: 2D SRANS) แบบ 2 มิติ เพื่อวิเคราะห์การไหลของลมผ่านชุดแผงโซลาร์เซลล์ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดความเค้นเฉือนแบบถ่ายโอน $k-\omega$ (Shear Stress Transport: SST $k-\omega$) ทั้งนี้ ชุดแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการศึกษา (รูปที่ 3) ซึ่งอ้างอิงตามรายละเอียดจาก EA Solar Lampang Co. Ltd. โดยแผงโซลาร์เซลล์วางทำมุมเอียง 30 องศา กับแนวราบ โดเมนของการคำนวณ (computational domain) (รูปที่ 5) ประกอบด้วยบริเวณพื้นด้านล่างของโดเมนถูกกำหนดให้เป็นแบบผนังขรุขระ (rough wall) โดยมีการระบุค่าความสูงความขรุขระ และค่าคงที่ความขรุขระ ให้มีความสอดคล้องกับรูปแบบของชั้นขอบเขต สำหรับผนังด้านข้างของโดเมนกำหนดให้เป็นแบบสมมาตร (symmetry) ในขณะที่ขอบเขตด้านบนของโดเมนได้กำหนดค่าความเร็วและคุณสมบัติความปั่นป่วนตามค่าจากส่วนบนสุดของรูปแบบทางเข้า (inlet) ส่วนพื้นผิวของแผงโซลาร์เซลล์ถูกกำหนดให้เป็นแบบผนัง (wall) และที่บริเวณทางออกของโดเมน (outlet) ได้ใช้สภาวะขอบเขตแบบเกรเดียนต์เป็นศูนย์ (zero gradient boundary condition)

ใช้โปรแกรม Ansys2024 ในการวิเคราะห์โดยเลือกจำลองที่สภาวะคงตัว (steady state) แบบ 2 มิติของการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ โดยใช้อัลกอริทึม Coupled (coupled pressure-velocity coupling algorithm) โดยกำหนดเกณฑ์การลู่เข้า (convergence criteria) ไว้ที่ 10^{-6} สำหรับทุกตัวแปร ในส่วนของการทำดิสครีไทเซชันได้เลือกใช้รูปแบบ Least Square Cell Based, Green-Gauss Cell Based และ Second Order Upwind



รูปที่ 5 โดเมนของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์

3. ผลจากการทดสอบในอุโมงค์ลม

การทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์ ทั้งกรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยวและแบบจัดเรียงเป็นแถว มีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างขอบถึงขอบ/ความยาวคอร์ด ($D/L = 224/206$) คือ 1.08 แบบติดตั้งบนพื้นดิน การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมภายใต้การไหลรูปแบบชั้นบรรยากาศ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างแผงโซลาร์เซลล์ทั้งกรณีติดตั้งแบบเดี่ยวและแบบจัดเรียงเป็นแถว และยังทำการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่ออธิบายพฤติกรรมของกระแสลมที่มีต่อแผงโซลาร์เซลล์ทั้งในกรณีติดตั้งแบบเดี่ยวและแบบจัดเรียงเป็นแถว ผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

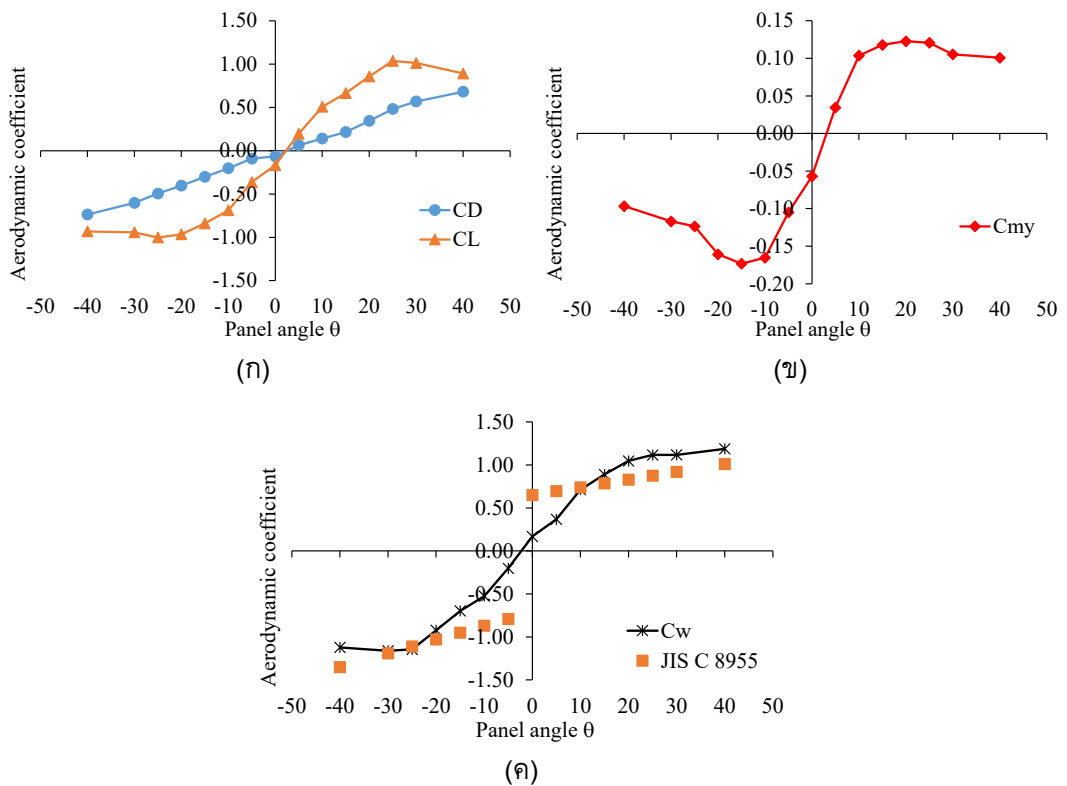
3.1 กรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยว

3.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient) สัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient) สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (Moment coefficient) (มีข้อตกลงเรื่องสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 4(ก)) ของแผงโซลาร์เซลล์ตามการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียง (θ) แสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบจากอุโมงค์ลมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นทั้งทางบวกและทางลบ พบว่ามีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 40 องศากรณีลมปะทะด้านหน้า (0 องศา) และลมปะทะด้านหลัง (180 องศา) มีค่าเท่ากับ 0.68 และ 0.74 ตามลำดับซึ่งใกล้เคียงกัน

3.1.2 สัมประสิทธิ์แรงยก

สัมประสิทธิ์แรงยกกรณีมุมเอียงทางบวกและลบสูงสุดที่มุมเอียง 25 องศาและลดลงที่การเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงมากกว่า 25 องศา พบว่าแรงยกลมปะทะด้านหน้ามีค่าสูงกว่าทิศทางลมด้านหลัง 4% ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีสาเหตุมาจากแรงจากอากาศ (F_x , F_z) ที่ได้รับอิทธิพลจากทิศทางลมตามแนวการไหลมากกว่าทิศทางลมด้าน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์เดี่ยวกับมุมเอียงของแผง (ก) สัมประสิทธิ์แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงยก (ข) สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (ค) สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์

3.1.3 สัมประสิทธิ์โมเมนต์

สัมประสิทธิ์โมเมนต์มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์แรงยก กรณีองศาการปะทะทางบวกสูงสุดที่มุมเอียง 25 องศาและลดลงที่การเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงมากกว่า 25 องศา ส่วนองศาการปะทะทางลบสูงสุดที่ -15 องศาและลดลงที่การเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงมากกว่า -15 องศา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของจุดแยกตัวของการไหลที่องศาการบิดที่มีค่ามากกว่าองศาการบิดวิกฤติส่งผลให้จุดศูนย์กลางแรงดันมีการขยับเข้าใกล้จุดหมุนส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ลดลง

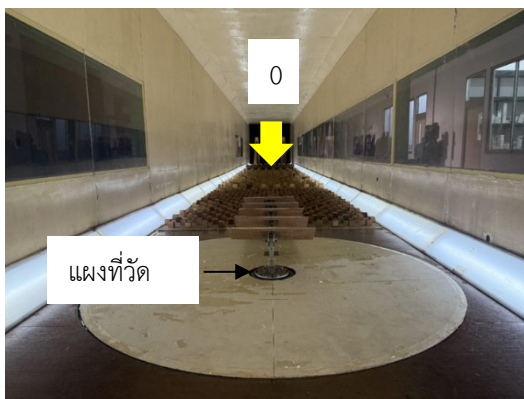
3.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์

สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากของแผงโซลาร์เซลล์ มีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันทั้งในทิศทาง 0 องศา และ 180 องศา เนื่องจากค่า F_x ที่นำมาใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงใน

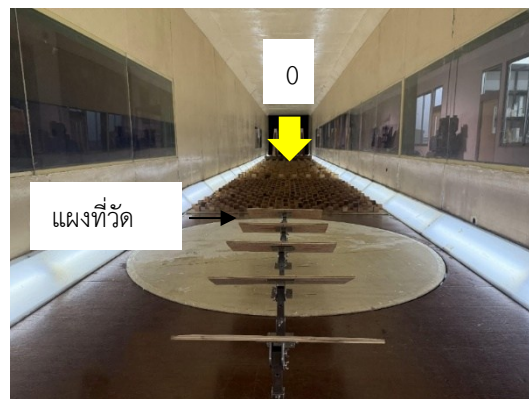
แนวตั้งฉากนั้น ได้รับผลกระทบจากลักษณะการไหลของอากาศอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของพื้นผิวในอุโมงค์ลมน้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน JIS C 8955 [17] พบว่าในกรณีการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงทางบวก 0 ถึง 5 องศา และการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงทางลบ -20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน JIS C 8955 [17] ส่วนการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงทางบวก ตั้งแต่ 15 ถึง 40 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่ามาตรฐาน JIS C 8955 [17] เล็กน้อยถึงปานกลาง

3.2 กรณีติดตั้งแบบจัดเรียงเป็นแถว

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากแรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์เมื่อจัดเรียงเป็นแถวซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าแผงเดี่ยวเนื่องจากอิทธิพลของการรบกวนระหว่างแผง (Interference effects) เพื่อศึกษาผลดังกล่าวงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดกรณีทดสอบออกเป็น กรณีที่ 1) การเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลมแสดงในรูปที่ 7(ก) และกรณีที่ 2) การเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลมแสดงในรูปที่ 7(ข) โดยมีการเพิ่มแผงโซลาร์เซลล์ที่ละ 1 แผงจนครบ 4 แผงในทุก ๆ มุมบิด รูปแบบการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงลมในแต่ละตำแหน่งบนแผงโซลาร์เซลล์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมบิดแผงโซลาร์เซลล์กับค่าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์แบบเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 การจัดวางกลุ่มแผงโซลาร์เซลล์ ภายในอุโมงค์ลม (ก) ติดตั้งแผงจำนวน 4 ชุด ไว้ด้านต้นลม และ (ข) ติดตั้งแผงจำนวน 4 ชุด ไว้ด้านท้ายลม

3.2.1 อิทธิพลของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม

รูปที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้มุมเอียง 3 ระดับ ประกอบไปด้วยมุมเอียง 0 15 และ 30 องศาตามลำดับ ในกรณีที่มุมเอียงเพิ่มขึ้นด้านต้นลม ในภาพรวมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแบบแถวในทุกมุมเอียง ผลการศึกษาเชิงลึกสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

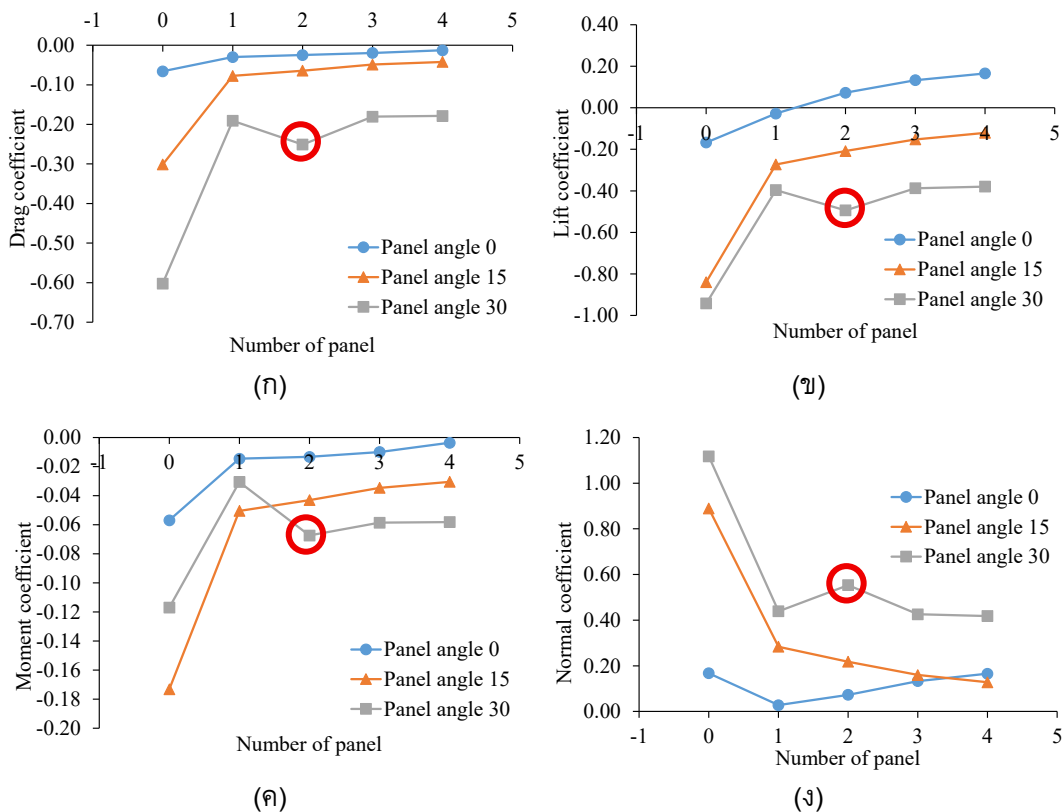
รูปที่ 8(ก) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแบบแถวในทุกมุมเอียง จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลมพบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าลดลงตามจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแผงเดี่ยวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 30 องศา มีค่าเท่ากับ 0.60 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงเหลือ 0.18 ผลจากการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 70% 86% และ 81% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 8(ข) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงยกของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้านคือ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลมพบว่า สัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงตามจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่มขึ้น แต่กรณีมุมบิด 0 องศาพบว่า โซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวและการมีแผงโซลาร์เซลล์ต้นลม 1 แผงส่งผลให้เกิดแรงกดแต่เมื่อเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์เป็น 2 3 และ 4 ส่งผลให้เกิดเป็นแรงยก โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแผงเดี่ยวมีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 30 องศา มีค่าเท่ากับ 0.94 (แรงกด) เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงยกลดลงเหลือ 0.38 (แรงกด) ผลจากการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 60% และ 86% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 และ 15 องศาตามลำดับ

รูปที่ 8(ค) พบว่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน และแรงยก แต่สัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่มุมบิด 15 มีค่ามากกว่า 30 องศา เนื่องจากสัมประสิทธิ์โมเมนต์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปะทะเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของแรงดันรอบหน้าตัด หากการเพิ่มองศาทำให้ลมเกิดการแยกตัวหรือปั่นป่วนจนแรงดันบนและล่างเริ่มหักล้างกันเอง ค่าโมเมนต์ก็จะไม่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีมีแผงโซลาร์เซลล์ต้นลม 2 แผงเป็นต้นไปส่งผลให้สัมประสิทธิ์โมเมนต์ของมุมบิด 30 มีค่ามากกว่า 15 องศา ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของแผงเดี่ยวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 15 องศา มีค่าเท่ากับ 0.17 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์โมเมนต์ลดลงเหลือ 0.03 ผลจากการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงสามารถลดสัมประสิทธิ์โมเมนต์ได้ถึง 50% 82% และ 94% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 8(ง) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของแผงเดี่ยวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 30 องศาเท่ากับ 1.12 จากการศึกษาพบว่าแผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 3 เกิดสัมประสิทธิ์แรง

ตั้งฉาก แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์มากกว่าแผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 2 สามารถอธิบายได้ด้วยพฤติกรรมกรรบวงทางอากาศพลศาสตร์ เมื่อกระแสลมปะทะแผงแถวที่ 1 จะเกิดการแยกตัวของ การไหลบริเวณขอบบนของแผงก่อให้เกิดชั้นเฉือนที่แยกตัวซึ่งมีความปั่นป่วนและพลังงานจลน์สูง พัดผ่านไปด้านหลัง ภายใต้ระยะห่างระหว่างแถวที่ใช้ในการศึกษานี้ชั้นเฉือนดังกล่าวได้ตกลงมา ปะทะตรงเข้าหาแผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 3 ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดความดันสูงสุด แบบเฉพาะที่ และทำให้สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากในแถวที่ 3 มีค่ามากกว่าแผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 2 จากนั้นเมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงส่งผลสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากเหลือ 0.42 สามารถลด สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากได้ถึง 63% และ 86% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 และ 15 องศา ตามลำดับ ส่วนกรณีมุมบิด 0 องศาการมีแผงโซลาร์เซลล์ต้นลม 1 แผงช่วยลดสัมประสิทธิ์แรง ตั้งฉาก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ต้นลมกลับส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากเพิ่มขึ้น แต่ ยังคงต่ำกว่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของแผงเดี่ยว



รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้มุมเอียง 3 ระดับเปรียบเทียบกับจำนวนแผงที่อยู่ต้นลม (ก) สัมประสิทธิ์แรงต้าน (ข) สัมประสิทธิ์แรงยก (ค) สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (ง) สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับผิว

3.2.2 อิทธิพลของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม

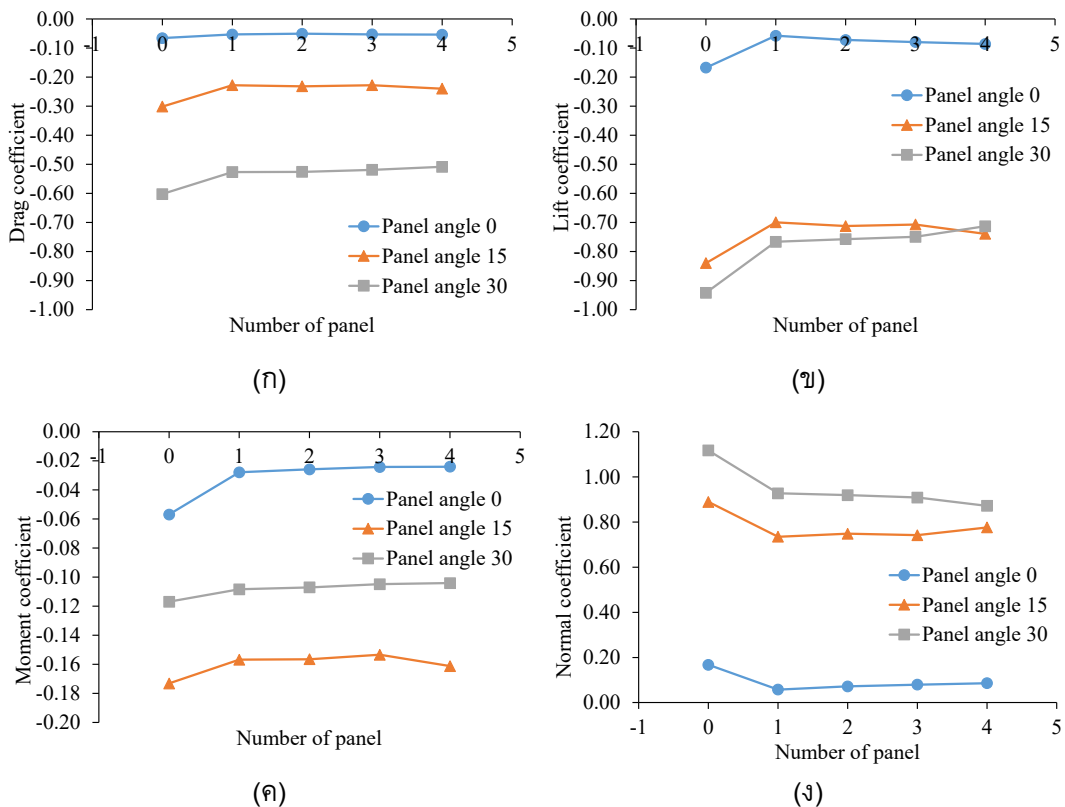
รูปที่ 9 ในกรณีที่มีแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้นด้านท้ายลม ในภาพรวมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมของโซลาร์เซลล์แผงเดียวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแบบแถวในทุกมุมเอียง ผลการศึกษาเชิงลึกสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

รูปที่ 9(ก) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของโซลาร์เซลล์แผงเดียวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแบบแถวในทุกมุมเอียง จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลมพบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าลดลงตามจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่มพฤติกรรมดังกล่าวอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4 โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแผงเดียวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 30 องศา มีค่าเท่ากับ 0.60 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงเหลือ 0.51 สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 16% 20% และ 18% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 9(ข) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงยกของโซลาร์เซลล์แผงเดียวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้านคือ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลมพบว่า สัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงตามจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแผงเดียวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 30 องศา มีค่าเท่ากับ 0.94 (แรงกด) เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงยกลดลงเหลือ 0.71 (แรงกด) สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 24% 12% และ 49% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 9(ค) พบว่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของโซลาร์เซลล์แผงเดียวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน และแรงยก แต่สัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่มุมเอียง 15 มีค่ามากกว่า 30 องศา เนื่องจากสัมประสิทธิ์โมเมนต์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปะทะเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับกระจายตัวของแรงดันรอบหน้าตัด หากการเพิ่มองศาทำให้ลมเกิดการแยกตัวหรือปั่นป่วนจนแรงดันบนและล่างเริ่มหักล้างกันเอง ค่าโมเมนต์ก็จะไม่เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของแผงเดียวมีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 15 องศา มีค่าเท่ากับ 0.17 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์โมเมนต์ลดลงเหลือ 0.16 สามารถลดสัมประสิทธิ์โมเมนต์ได้ถึง 11% 7% และ 58% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 9(ง) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของโซลาร์เซลล์แผงเดียวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของแผงเดียวมีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 30 องศา มีค่าเท่ากับ 1.12 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากลดลงเหลือ 0.87 สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากได้ถึง 22% 13% และ 49% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้มุมเอียง 3 ระดับเปรียบเทียบกับจำนวนแผงที่อยู่ท้ายลม (ก) สัมประสิทธิ์แรงต้าน (ข) สัมประสิทธิ์แรงยก (ค) สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (ง) สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับผิว

4. ผลการวิเคราะห์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

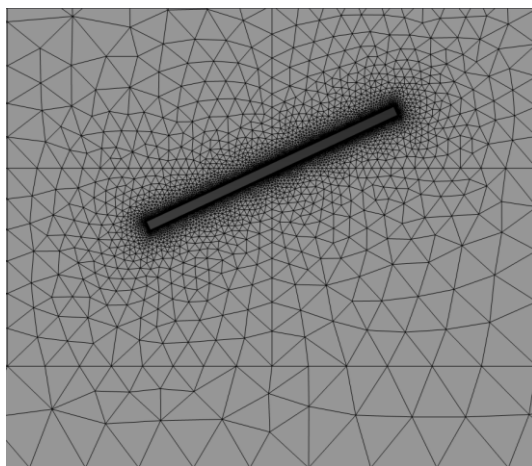
จากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของแรงลมที่กระทำต่อโซลาร์เซลล์ที่จัดเรียงเป็นแถวมีความซับซ้อนมากกว่าแผงเดี่ยวเนื่องจากอิทธิพลของการรบกวนระหว่างแผงซึ่งทำให้เกิด 1) ผลจากการบังลม 2) ผลเนื่องจากความปั่นป่วนของกระแสลม เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยพิจารณาเฉพาะผลจากแผงโซลาร์เซลล์เท่านั้น ไม่นำผลจากฐานรองรับมาร่วมพิจารณา โดยแบ่งรูปแบบการจำลองดังตารางที่ 2 จากการศึกษาสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 รูปแบบการจำลองแผงโซลาร์เซลล์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

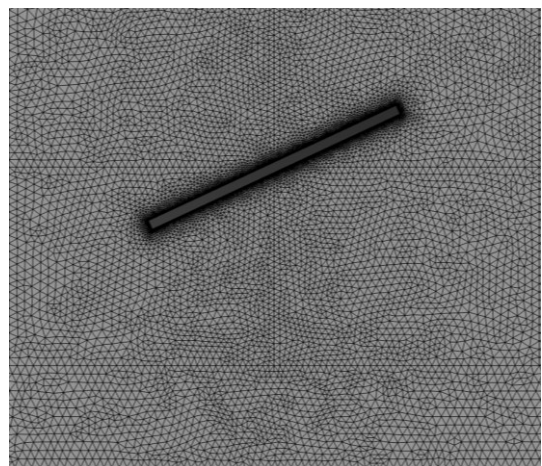
จำนวนแผงโซลาร์เซลล์	มุมเอียงโซลาร์เซลล์	ทิศทางลมกระทำ
โซลาร์เซลล์แผงเดี่ยว	30	ต้นลม, ท้ายลม
โซลาร์เซลล์เรียง 3 แถว	30	ต้นลม, ท้ายลม

4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลม และสัมประสิทธิ์โมเมนต์โดย CFD

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจสอบขนาดของเอลิเมนต์ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลม โดยพิจารณากรณีแผงเดี่ยวที่มุมเอียง 30 องศาเป็นกรณีศึกษา โดยแบ่งออกเป็น 4 ระดับความละเอียด ได้แก่ หยาบ (3.69×10^5 เอลิเมนต์) ปานกลาง (7.72×10^5 เอลิเมนต์) ละเอียด (1.67×10^6 เอลิเมนต์) และละเอียดมาก (2.77×10^6 เอลิเมนต์) ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยรักษาค่าความสูงของเซลล์แรกให้มีความสูงเท่ากับ 0.0001 เมตรสอดคล้องกับค่า y^+ เท่ากับ 2.8 ในทุกกรณี เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST ที่ต้องการให้เซลล์แรกอยู่ในขอบเขต Viscous sublayer ($y^+ < 5$)

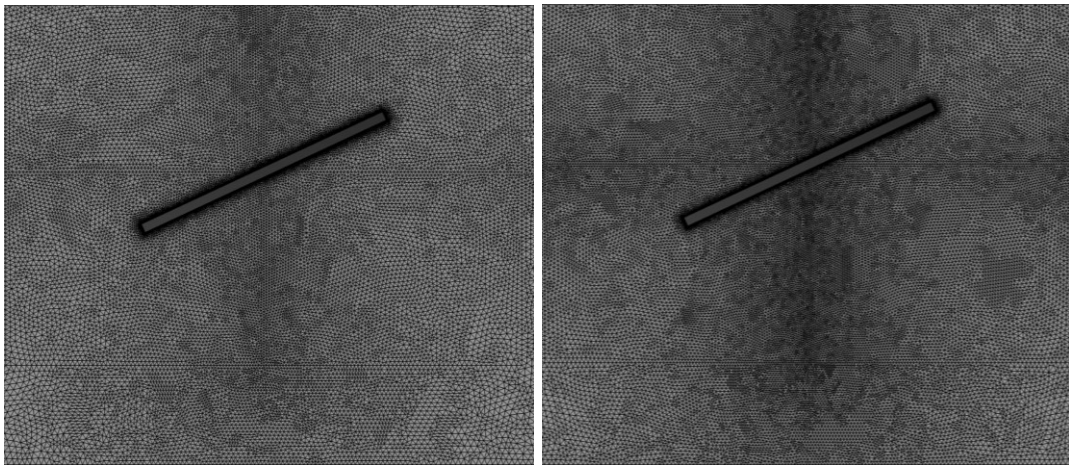


(ก)



(ข)

รูปที่ 10 ระดับความละเอียดของเอลิเมนต์ 4 ระดับสำหรับการตรวจสอบขนาดของเอลิเมนต์ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลม (ก) เอลิเมนต์แบบหยาบ (ข) เอลิเมนต์แบบปานกลาง (ค) เอลิเมนต์แบบละเอียด และ(ง) เอลิเมนต์แบบละเอียดมาก



(ค)

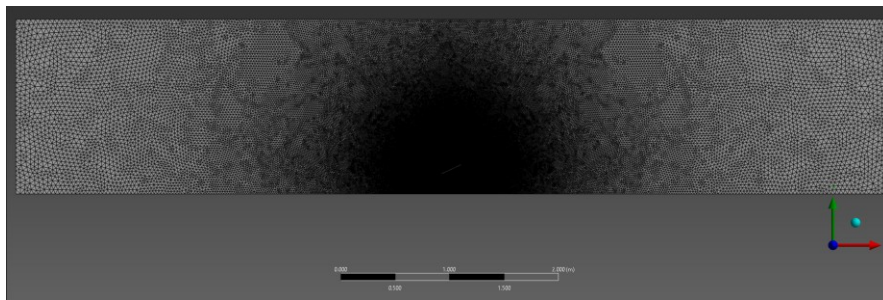
(ง)

รูปที่ 10 ระดับความละเอียดของเอลิเมนต์ 4 ระดับสำหรับการตรวจสอบขนาดของเอลิเมนต์ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลม (ก) เอลิเมนต์แบบหยาบ (ข) เอลิเมนต์แบบปานกลาง (ค) เอลิเมนต์แบบละเอียด และ(ง) เอลิเมนต์แบบละเอียดมาก (ต่อ)

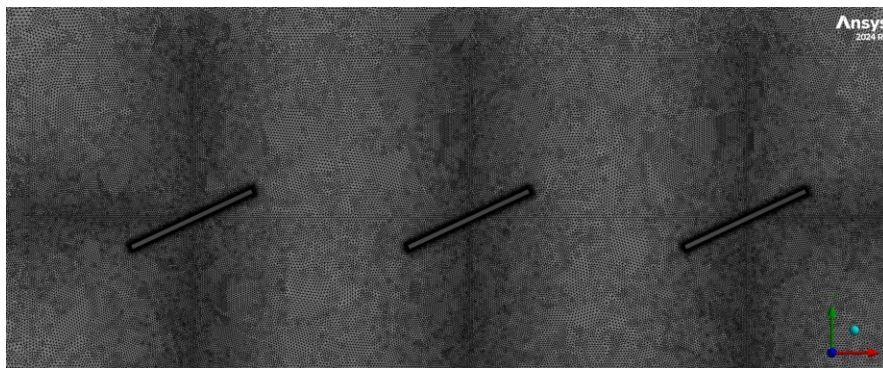
ผลการจำลองด้วย CFD ในตารางที่ 3 พบว่าเมื่อเพิ่มความละเอียดจากระดับหยาบมาระดับปานกลาง ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน สัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์โมเมนต์ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงจากระดับละเอียด และละเอียดมากมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าของคำตอบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากอุโมงค์ลมพบมีความแตกต่างในช่วง 11-14% ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โครงข่ายระดับละเอียดมากที่มีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 2.77×10^6 และ 3.14×10^6 เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โซลาร์เซลล์แผงเดี่ยว และ 3 แถวเรียงดังแสดงในรูปที่ 11

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงลมแผงโซลาร์เซลล์มุมเอียง 30° แผงเดี่ยวกรณีจำลอง 4 ระดับความละเอียด

สัมประสิทธิ์แรงลม	ผลการทดสอบจากอุโมงค์ลม	จำนวนเอลิเมนต์			
		3.69×10^5	7.72×10^5	1.67×10^6	2.77×10^6
C_d	0.568	0.483	0.501	0.502	0.503
C_L	1.012	1.215	1.137	1.118	1.120
C_M	0.105	0.075	0.080	0.090	0.091



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 รูปแบบการสร้างกริดในการวิเคราะห์ (ก) โดเมนการไหลทั้งหมด (ข) ภาพขยายโซลาร์เซลล์เรียง 3 แถว

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์ สำหรับการจำลองด้วย CFD กรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยวและ 3 แถว ทิศทางลม 0 และ 180 องศา แสดงไว้ในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณากรณีแผงเดี่ยวที่มุมเอียง 30 องศา พบความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบในอุโมงค์ลมและการจำลอง CFD ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการจำลอง CFD เท่ากับ 0.503 ซึ่งต่ำกว่าผลทดสอบที่ 0.568 ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของแรงดูดในบริเวณอับลม ในสภาพแวดล้อมจริง (3 มิติ) โครงสร้างของ wake vortex มีการหมุนตัวที่ซับซ้อนและมีการดึงกระแสลมจากด้านข้างเข้ามาผสมซึ่งทำให้อากาศด้านหลังแผงมีความปั่นป่วนและเกิดแรงดูดที่รุนแรงกว่าการจำลองแบบ 2 มิติที่ไม่สามารถจับพฤติกรรมโครงสร้าง 3D vortex เหล่านี้ได้ แม้ว่าแบบจำลอง k- ω SST มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายจุดแยกตัวของการไหล แต่การประมวลผลภายใต้สมมติฐานสถานะคงตัว (steady-state) ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการหลุดตัวของกระแสวนที่ไม่คงที่ (unsteady vortex shedding) และความปั่นป่วนที่ซับซ้อนภายในเขตอับลมขนาดใหญ่บริเวณด้านหลังแผงได้อย่างสมบูรณ์ การเฉลี่ยค่าความดันเชิงเวลา (time-averaging) จึงทำให้การทำนายแรงดูดด้านหลังแผงคลาดเคลื่อน

สัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จากการจำลอง CFD เท่ากับ 1.120 ซึ่งสูงกว่าผลจากอุโมงค์ลมที่ 1.012 เกิดจากการที่แบบจำลอง 2 มิติมีสมมติฐานให้แผงมีความยาวเป็นอนันต์ กระแสลมความดันสูงบริเวณด้านหน้าจึงไม่สามารถไหลระบายออกทางขอบด้านข้างได้ มวลอากาศจึงถูกบังคับให้เร่งความเร็วผ่านขอบบนและขอบล่างเท่านั้น ส่งผลให้ความแตกต่างของแรงดันสถิตในแนวตั้งเพิ่มสูงขึ้นเกินความเป็นจริง

การกระจายตัวของแรงดันบนพื้นผิวในสภาวะ 3 มิติได้รับอิทธิพลอย่างมากจากกระแสลมหมุนวนบริเวณปลายแผง เมื่อแบบจำลอง 2 มิติละเลยผลกระทบส่วนนี้ ทำให้ลักษณะการกระจายแรงดันและตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงดัน คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ส่งผลให้ค่า C_M ที่ได้จาก CFD มีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ (0.091 เทียบกับ 0.105) แม้ว่าข้อจำกัดในการจำลองพฤติกรรมแบบ 3 มิติและโครงสร้าง wake vortex จะส่งผลต่อความแม่นยำของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเชิงปริมาณ แต่การวิเคราะห์ 2D ในศึกษานี้ยังคงมีประสิทธิภาพอย่างยิ่งในเชิงคุณภาพ สำหรับการแสดงให้เห็นภาพพฤติกรรมการก้ำบัง และทิศทางการเบี่ยงเบนของกระแสลมในกรณีที่มีการจัดเรียงแผงแบบหลายแถว

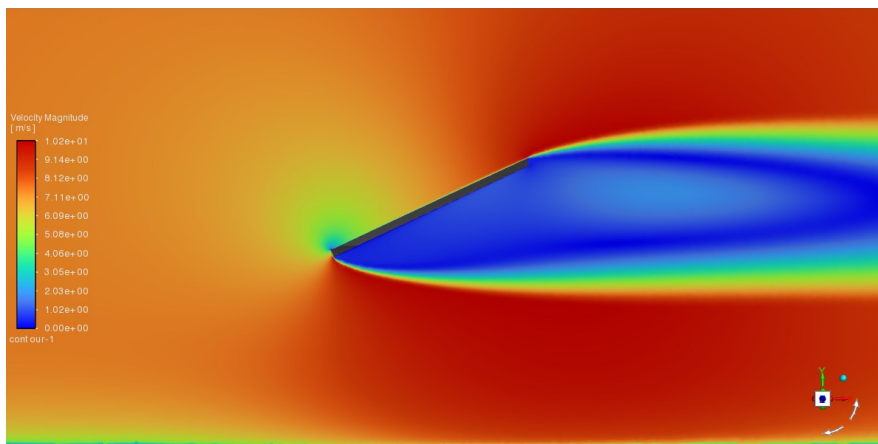
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์ระหว่างการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยวและจัดเรียง 3 แถว

รูปแบบการจัดเรียงแผงโซลาร์เซลล์	ประเภทการวิเคราะห์	สัมประสิทธิ์แรงลม		
		C_D	C_L	C_M
โซลาร์เซลล์มุมเอียง 30 องศา แผงเดี่ยว	อุโมงค์ลม	0.568	1.012	0.105
	CFD	0.503	1.120	0.091
% ความแตกต่าง		ต่ำกว่า 12%	สูงกว่า 11%	ต่ำกว่า 14%
โซลาร์เซลล์มุมเอียง 30 องศา 2 แผงท้ายลม	อุโมงค์ลม	-0.526	-0.758	-0.107
	CFD	-0.442	-0.650	-0.125
% ความแตกต่าง		ต่ำกว่า 16%	ต่ำกว่า 14%	สูงกว่า 17%
โซลาร์เซลล์มุมเอียง 30 องศา 2 แผง ต้นลม	อุโมงค์ลม	-0.251	-0.494	-0.067
	CFD	-0.238	-0.414	-0.058
% ความแตกต่าง		ต่ำกว่า 5%	ต่ำกว่า 16%	ต่ำกว่า 15%

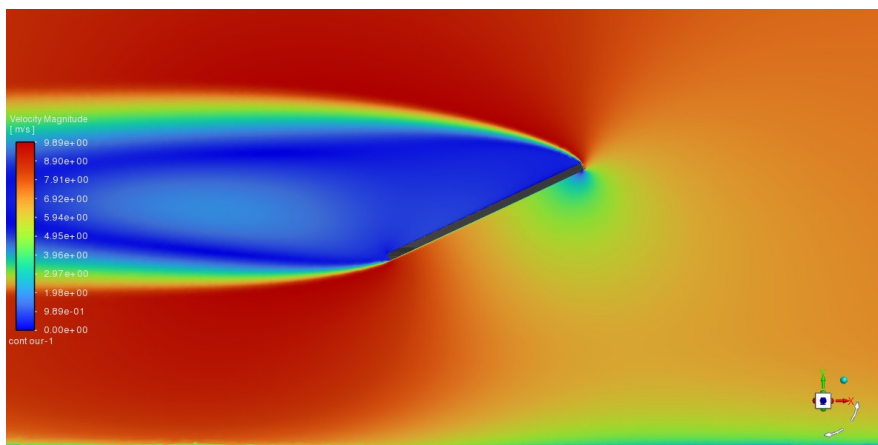
ในกรณีที่มีการจัดเรียงแบบหลายแถวซึ่งพบความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมตั้งแต่ 5% ไปจนถึง 17% อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทำให้เห็นภาพการไหลของกระแสลมและเข้าใจได้ดีขึ้น และมีราคาถูกกว่าการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

4.2 อากาศพลศาสตร์ของแผงโซลาร์เซลล์ กรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยว

แรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์เกิดจากกระแสลมปะทะด้านหน้า และผลต่างของแรงดันระหว่างด้านหน้า (แรงดันบวก/แรงผลัก) และด้านหลัง (แรงดันลบ/แรงดูด) กรณีลมพัดมาจากทิศ 0 องศาจากรูปที่ 12(ก) สังเกตได้ว่าที่บริเวณด้านปะทะของแผงไม่เกิดการแยกตัวของกระแสลม แต่กระแสลมมีการเร่งความเร็วขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ไปตามพื้นผิวด้านบนของแผงเกิดจุดแยกลมที่บริเวณขอบบนและล่างของแผงโซลาร์เซลล์ส่งผลให้ด้านหลังแผงโซลาร์เซลล์เกิดระลอกลมหมุนวนเป็นวงใหญ่ทำให้เกิดแรงดูดที่รุนแรง ส่วนกรณีลมพัดมาจากทิศ 180 องศาจากรูปที่ 12(ข) พบว่ามีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันเพียงแต่กระแสลมมีการเร่งความเร็วขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ไปตามพื้นผิวปะทะด้านล่าง



(ก)



(ข)

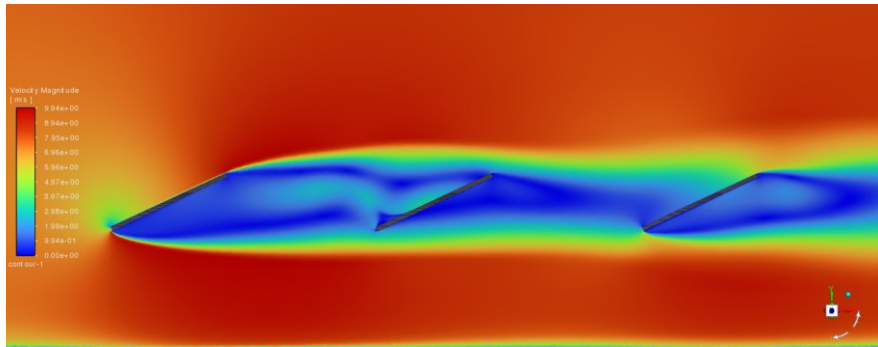
รูปที่ 12 สหามการการไหลของกระแสลมโดยรอบแผงโซลาร์เซลล์แบบเดี่ยวมุมบิต 30 องศา (ก) ลมพัดเข้าทาง 0 องศา (ข) ลมพัดเข้าทาง 180 องศา

4.3 ผลการรบกวนทางอากาศพลศาสตร์ ของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์

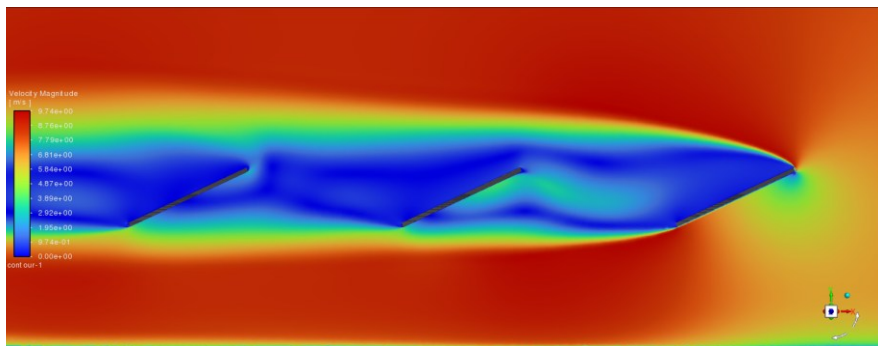
ในกรณีแผงโซลาร์เซลล์เรียงกันเป็นแถว ลมพัดมาจากทิศ 0 องศาแสดงในรูปที่ 13(ก) เมื่อกระแสลมไหลผ่านแผงโซลาร์เซลล์ต้นลมหน้าทำหน้าที่เป็นสิ่งที่กีดขวางส่งผลให้กระแสลมถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทางลอยข้ามขอบบนของแผงไป การมีแผงวางเรียงกันเป็นแถว จะทำให้กระแสลมมีพฤติกรรมเสมือนกระทำกับพื้นผิวที่ต่อเนื่องกันมากขึ้น ทำให้ลมม้วนตัวลงใต้แผงหน้าทำได้ยากขึ้น หรือสร้างความปั่นป่วนทันทีที่พ้นขอบแผงแรก แผงที่สองจะขวางทางให้กระแสลมไหลข้ามผ่านช่องว่างไปอย่างราบเรียบขึ้น พฤติกรรมนี้ช่วยลดการแยกตัวของกระแสลมที่ขอบบนของแผงหน้า ทำให้แรงต้านที่เกิดจากความปั่นป่วนลดลง ปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้พื้นที่ด้านหลังแผงแรกกลายเป็นพื้นที่อับลม แรงดูดที่กระทำต่อด้านหลังของแผงหน้าจึงลดลง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงลมโดยรวมของแผงหน้าลดลงตามไปด้วย (ดูรูปที่ 13 และตารางที่ 4) เมื่อลมไหลผ่านด้านล่างน้อยลง แรงดันบวกที่สะสมอยู่ใต้แผง (ซึ่งพยายามยกแผงขึ้น) ก็อาจจะลดลงในบางมุมการปะทะ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแผงหน้าลดลง (ดูรูปที่ 13 และตารางที่ 4) ผลกระทบนี้จะชัดเจนที่สุดเมื่อช่องว่างระหว่างขอบถึงขอบแผงโซลาร์เซลล์ต่อความกว้างในทิศทางลมของกรณีศึกษา ($D/L = 224/206 = 1.08$) แคบพอที่แผงหลังจะส่งผลต่ออากาศด้านหลังแผงหน้าได้ ถัดไปสังเกตได้ว่าความเร็วลมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าต่ำแรงดันทั้งสองฝั่งใกล้เคียงกัน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงลมกรณีเรียงเป็นแถวมีค่าต่ำกว่าแบบแผงเดี่ยว ในกรณีลมพัดมาจากทิศ 180 องศาแสดงในรูปที่ 13(ข) ก็มีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน

จากผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์แรงลมในการจัดเรียงหลายแถว พบประเด็นทางอากาศพลศาสตร์ที่น่าสนใจกล่าวคือ แผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากสูงกว่าแผงแถวที่ 2 ปรากฏการณ์นี้มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนระยะห่างระหว่างแถวที่กำหนดในงานวิจัย ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวได้ด้วยกลไกการเกิดเขตหมุนวน (recirculation zone) และการเกาะกลับของกระแสนวน (vortex reattachment) รูปที่ 13(ก) เมื่อกระแสลมปะทะโซลาร์เซลล์แถวแรกและเกิดการแยกตัวของกระแสลมจะสร้างเขตอับลมและเขตหมุนวนหลักขึ้นบริเวณด้านหลัง แผงแถวที่ 2 ซึ่งตั้งอยู่ภายในเขตหมุนวนนี้พอดี จะได้รับอิทธิพลจากการกำบังอย่างเต็มที่ (shielding effect) และปะทะกับกระแสลมที่มีโมเมนตัมต่ำมาก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมลดลงต่ำ อย่างไรก็ตามชั้นเฉือนที่แยกตัวออก (separated shear layer) จะมีการขยายตัวและเกิดการเกาะกลับ (reattachment) ลงสู่ระดับโครงสร้างเมื่อเคลื่อนที่ไปด้านหลังภายใต้ระยะห่างระหว่างแถวที่ใช้ในการศึกษานี้ จุดเกาะกลับของกระแสลม (reattachment point) ได้เกิดขึ้นในบริเวณที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของแผงแถวที่ 3พอดี การเกาะกลับนี้ได้นำเอาโมเมนตัมและพลังงานจลน์จากกระแสลมอิสระด้านบนกลับเข้ามาปะทะกับโครงสร้าง ส่งผลให้ความดันและสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากบนแผงแถวที่ 3 เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผงแถวที่ 2 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวขึ้นอยู่กับ 1) อัตราส่วนระหว่าง D/L 2) ระยะห่างระหว่างพื้นดินกับตัวแผง 3) มุมบิดของโซลาร์เซลล์ ดังจะเห็นได้จาก

ผลการทดสอบว่าไม่พบพฤติกรรมดังกล่าวในกรณีมุมบิด 15 องศาและกรณีที่ลมพัดมาจากทิศ 180 องศาของโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 องศาตั้งรูปที่ 13(ข) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าแรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์แผงเดียว



(ก)



(ข)

รูปที่ 13 สหามการการไหลของกระแสลมโดยรอบแผงโซลาร์เซลล์แบบเรียง 3 แถว (ก) ลมพัดเข้าทาง 0 องศา (ข) ลมพัดเข้าทาง 180 องศา

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงแถวและมุมเอียงที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์แบบติดตั้งบนพื้นดิน ด้วยการทดสอบในอุโมงค์ลมสถานะชั้นบรรยากาศรวมกับการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 2 มิติที่สภาวะคงตัว จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) โซลาร์เซลล์แบบแผงเดียวมีสัมประสิทธิ์แรงดันจากสูงสุดที่มุมเอียง (θ) 40 องศา โดยในช่วงมุมเอียง 15 ถึง 40 องศา มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน JIS C 8955[16] เล็กน้อยถึงปานกลาง

2) ในรูปแบบการจัดเรียงแบบแถว แผงแถวหน้าสุดจะได้รับผลกระทบจากแรงลมสูงสุดในขณะที่แผงตั้งแต่แถวที่ 2 เป็นต้นไป จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อันเป็นผลมาจากการถูกบดบังและอยู่ในเขตอับลม

3) ที่มุมเอียง 30 องศา พบปรากฏการณ์ที่แผงที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากสูงกว่าแผงแถวที่ 2 อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเกาะกลับของกระแสลม (vortex reattachment) ของชั้นเนื้อที่แยกตัวออกมาจากแผงแถวแรก

4) การใช้แบบจำลอง 2D SRANS ควบคู่กับสมการความปั่นป่วน $k-\omega$ SST พบความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณเมื่อเทียบกับผลทดสอบในอุโมงค์ลม (โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์) เนื่องจากข้อจำกัดในการประเมินพฤติกรรมการไหลแบบ 3 มิติ แต่แบบจำลองดังกล่าวยังคงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแสดงภาพโครงสร้างการไหลและอธิบายกลไกการรบกวนทางอากาศพลศาสตร์ได้อย่างเป็นรูปธรรม

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

ในการศึกษาครั้งต่อไปควรพิจารณาอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแถว (D/L) และระยะสูงจากพื้น เนื่องจากปัจจัยทั้งสองนี้มีความสำคัญต่อพฤติกรรมการแยกตัวของกระแสลม การขยายตัวของเขตอับลม และตำแหน่งการเกาะกลับของกระแสลม ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อการรบกวนทางอากาศพลศาสตร์ระหว่างแถว นอกจากนี้ควรดำเนินการทดสอบทั้งในอุโมงค์ลมสภาวะชั้นบรรยากาศควบคู่กับการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 3 มิติ (3D CFD) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เพื่อประเมินพฤติกรรมการไหลแบบ 3 มิติที่สมบูรณ์ และสร้างฐานข้อมูลที่ครอบคลุมสำหรับการออกแบบโซลาร์เซลล์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ นอกจากนี้ผู้พิมพ์ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (มทร.ตะวันออก) และ EA Solar Lampang Co. Ltd. สำหรับการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Radu A, Axinte E, Theohari C. Steady wind pressures on solar collectors on flat-roofed buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1986;23:249-58.

- [2] Aly AM, Bitsuamlak G. Wind-induced pressures on solar panels mounted on residential homes. *Journal of Architectural Engineering* 2014;20(1):04013003. doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000132.
- [3] Banks D. The role of corner vortices in dictating peak wind loads on tilted flat solar panels mounted on large, flat roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2013;123(Pt A):192-201.
- [4] Geurts C, Blackmore P. Wind loads on stand-off photovoltaic systems on pitched roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2013;123(Pt A):239-49.
- [5] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-16. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston (VA): ASCE; 2016.
- [6] Ikeda H, Kimura K, Kobayashi T, Kato K, Kubo Y, Ikeda K. A study on the effects of wind direction on the wind force coefficient of solar panels arranged in rows for a solar panel power plant. *Journal of Structural Engineering* 2012;58A:559-66. doi: 10.11532/structcivil.58A.559. (In Japanese)
- [7] Ma W, Zhang W, Zhang X, Chen W, Tan Q. Experimental investigations on the wind load interference effects of single-axis solar tracker arrays. *Renewable Energy* 2023;202:566-80. doi: 10.1016/j.renene.2022.11.112.
- [8] Shademan M, Balachandar R, Barron RM. Detached eddy simulation of flow past an isolated inclined solar panel. *Journal of Fluids and Structures* 2014;50:217-30.
- [9] Sun J, He Y, Li X, Lu Z, Yang X. CFD simulations for layout optimal design for ground-mounted photovoltaic panel arrays. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2023;242:105558.
- [10] Xu A, Ma W, Yuan H, Lu L. The effects of row spacing and ground clearance on the wind load of photovoltaic (PV) arrays. *Renewable Energy* 2024;220:119627. doi: 10.1016/j.renene.2023.119627.
- [11] Smith SE, Viggiano B, Ali N, Silverman TJ, Obligado M, Calaf M, Cal RB. Increased panel height enhances cooling for photovoltaic solar farms. *Applied Energy* 2022;325:119819. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119819.
- [12] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-05. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston (VA): ASCE; 2005.
- [13] Bearman PW. An investigation of the forces on flat plates normal to a turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics* 1971;46(1):177-98. doi: 10.1017/S0022112071000478.

- [14] Schmitt FG. About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity. *Comptes Rendus Mécanique* 2007;335(9-10):617-27. doi: 10.1016/j.crme.2007.08.004.
- [15] Wilcox DC. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA journal* 1988;26(11):1299-310. doi: 10.2514/3.10041.
- [16] Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal* 1994;32(8):1598-605. doi: 10.2514/3.12149.
- [17] Japanese Industrial Standards Committee. JIS C 8955:2011. Design guide on structures for photovoltaic array. Tokyo: Japanese Standards Association; 2011.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.จิรวัดน์ จันทรเรือง อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ Email: jirawat_ju@rmutto.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ผลของแรงลมต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว อุโมงค์ลม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ศ.ดร.วิโรจน์ บุญญิกิโย อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกจาก Yokohama National University, Email: bvirate@engr.tu.ac.th

ความเชี่ยวชาญ: ผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหวต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และโครงสร้างเหล็ก

Article History:

Received: January 24, 2026

Revised: June 13, 2026

Accepted: July 8, 2026