

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลในการศึกษาผลกระทบ ของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคาร

โดย

ทวิช รุ่งมิตรจรัสแสง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2551

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลในการศึกษาผลกระทบของลมที่มีต่อ

โครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคาร

Computational Fluid Dynamics in Studying of Wind Effects on

Billboards and Buildings

โดย

ทวิช รุ่งมิตรจรัสแสง

Mr. Tawit Rungmitjarutsaeng

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2551

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายทวิช รุ่งมิตรจรัสแสง

เรื่อง

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลในการศึกษาผลกระทบของลมที่มีต่อ
โครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคาร

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2551

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญานุญโญ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ ลิ้มสัมพันธุ์เจริญ)

กรรมการวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม)

กรรมการวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มตระการ)

กรรมการวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เวชพงศ์ ชูติชูเดช)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา วิสกุล)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารภายใต้สภาพลมตามธรรมชาติด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ Model การวิเคราะห์กรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาพิจารณาถึงขนาด ทิศทางลม และผลกระทบของอาคารข้างเคียง ส่วนกรณีอาคารพิจารณาถึงผลของการปรับแต่งมุมอาคาร ทิศทางลม และผลกระทบของอาคารคู่แฝด วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงประสิทธิภาพของวิธีการข้างต้นโดยนำผลการวิเคราะห์กรณีต่างๆ ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมก่อนหน้านี้ จากการศึกษาพบว่าในภาพรวมผลการวิเคราะห์ที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลองอุโมงค์ลม โดยที่ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมในทิศทางตามลมมากกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมในหลายกรณี อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ภาพการไหลความเร็วลมและการกระจายตัวเส้นชั้นความดันลมบนผิวของโครงสร้างสามารถให้ความกระจ่างถึงความเป็นไปของผลการทดลองอุโมงค์ลม อีกทั้งผลการวิเคราะห์ยังช่วยตรวจสอบเป็นเบื้องต้นถึงความเหมาะสมของวิธีการที่ใช้ในการทดลองอุโมงค์ลมได้อีกด้วย บทสรุปของผลการวิจัยบ่งชี้ว่าประสิทธิภาพของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ Model ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในระดับที่ไม่ถึงกับดีมากแต่ทว่าศักยภาพโดยรวมของวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลสามารถช่วยสนับสนุนวิธีการทดลองอุโมงค์ลมได้เป็นอย่างดี

Abstract

Wind effects on billboards and buildings, in boundary layer turbulence wind, are investigated by using computational fluid dynamics with $k - \varepsilon$ turbulence model. The problems include analysis of wind effects on isolated billboards and corner-cut buildings, analysis of interference effect on billboards due to nearby buildings, and analysis of wind effects on twin tower. The objective of the study is to investigate the accuracy of the results from numerical analysis as compare with results from wind tunnel experiments in previous studies. It is found that, overall, results from the numerical analysis agree well with experimental results but the predicted quantities are not very accurate, with the tendency to over-predict the drag coefficients in many cases. Nevertheless, based on the flow visualizations and plots of pressure distribution on surfaces of structures, the numerical analysis not only provides clear explanations to support experimental results but also verifies hypotheses and validates assumptions which are used in wind-tunnel experiments. It is concluded that, although the performance of the $k - \varepsilon$ model in this study is not at a very good level for practical use, computational fluid dynamics has a potential to be an excellent tools in supporting wind-tunnel experiment.

กิตติกรรมประกาศ

การประสบความสำเร็จในชีวิตอีกขั้น ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู และให้โอกาสได้ศึกษาเล่าเรียน รวมไปถึงคุณน้าสุวัฒน์ เเด่นนิติรัตน์ และคุณน้าจิราพร เเด่นนิติรัตน์ ตลอดจนพี่ชาย และน้องชาย ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ ลิ้มสัมพันธุ์เจริญ ที่ได้วางแนวทางในการทำวิจัย ชี้แนะ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้อย่างเต็มที่มาโดยตลอด อีกทั้งต้องขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มตระการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เวชพงศ์ ชูติชูเดช ที่ได้สละเวลามาตรวจสอบวิทยานิพนธ์รวมถึงให้ข้อเสนอแนะทางวิชาการที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ท่านอื่นๆ ที่ได้ให้ความรู้ในห้องเรียน ตลอดจนเจ้าหน้าที่มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทุกๆ ท่าน ที่ได้ช่วยเหลือในระหว่างที่ศึกษาอยู่ ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคน ที่ได้ช่วยเหลือซึ่งกันและกันมาโดยตลอด รวมถึงได้ทำกิจกรรมที่ดีต่างๆ ร่วมกัน

ที่ขาดเสียไม่ได้ ขอขอบพระคุณ คุณอุมาทิพย์ วรรณกุล ที่ไม่เคยปฏิเสธความช่วยเหลือ คอยให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีประโยชน์ต่อวงการการศึกษาไม่ว่ามากหรือน้อย ข้าพเจ้าขอขอบคุณความดีความชอบเหล่านั้นให้แก่บุคคลตามที่เอ่ยถึงข้างต้น และผู้มีพระคุณท่านอื่นที่มีสามารถเอ่ยถึงได้ทั้งหมด ณ ที่นี้

ทวิช รุ่งมิตรจรัสแสง

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2551

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(1)
Abstract.....	(2)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญภาพประกอบ.....	(11)
 บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลม.....	4
2.2 งานวิจัยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	6
3 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล.....	8
3.1 ทัวไป.....	8

3.2	ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์.....	8
3.3	สมการเชิงอนุพันธ์มวล.....	12
3.4	สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม.....	14
3.5	สมการเชิงสมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน.....	20
3.6	ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์.....	29
4	แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน.....	34
4.1	ทั่วไป.....	34
4.2	สมการเรย์โนลด์สของการไหลแบบปั่นป่วน.....	34
4.3	แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ Model.....	37
4.4	Log-Law of the Wall.....	40
5	วิธีการวิจัย.....	43
5.1	ทั่วไป.....	43
5.2	ภาพรวมของวิธีการวิจัย.....	44
5.3	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	47
5.3.1	ชนิดเอลิเมนต์ (Element Type).....	48
5.3.2	เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition).....	49
5.3.3	คุณสมบัติของอากาศ.....	52
6	กรณีศึกษา: ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วน ต่างกันและกรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ.....	53
6.1	ทั่วไป.....	53
6.2	การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหา.....	56
6.2.1	ลักษณะของปัญหา.....	56
6.2.2	การสร้างขอบเขต.....	59

6.2.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	63
6.3 วิธีการวิเคราะห์ผล.....	66
6.4 ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์.....	68
6.4.1 การแบ่งเอลิเมนต์ภายในขอบเขต.....	68
6.4.2 การลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution).....	69
6.5 ผลการวิเคราะห์.....	72
6.5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วน ต่างๆกัน.....	73
6.5.1.1 ผลของ Aspect Ratio.....	73
6.5.1.2 ผลของ Clearance Ratio.....	76
6.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทาง ลมที่กระทำ.....	98
6.5.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศ แกน x	98
6.5.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศ แกน y	101
6.5.2.3 ระยะเยื้องศูนย์ของแรงที่กระทำ.....	104
6.6 สรุปผลการวิเคราะห์.....	113
6.6.1 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วน ต่างๆ กัน.....	113
6.6.2 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของ ทิศทางลมที่กระทำ.....	114
7 กรณีศึกษา: ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของ อาคารข้างเคียง.....	116
7.1 ทั่วไป.....	116
7.2 การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหา.....	118
7.2.1 ลักษณะของปัญหา.....	118

7.2.2	การสร้างขอบเขต.....	120
7.2.3	การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	122
7.3	วิธีการวิเคราะห์ผล.....	124
7.4	ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์.....	125
7.4.1	กรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม.....	125
7.4.2	การลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution).....	128
7.5	ผลการวิเคราะห์.....	136
7.5.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคาร ข้างเคียงขนาด 0.5 h	138
7.5.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคาร ข้างเคียงขนาด 1.0 h	169
7.5.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคาร ข้างเคียงขนาด 1.5 h	200
7.6	สรุปผลการวิเคราะห์.....	231
7.6.1	สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของ อาคารข้างเคียงขนาด 0.5 h	231
7.6.2	สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของ อาคารข้างเคียงขนาด 1.0 h	232
7.6.3	สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของ อาคารข้างเคียงขนาด 1.5 h	233
8	กรณีศึกษา: ผลกระทบของลมที่มีต่ออาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุม อาคาร.....	235
8.1	ทั่วไป.....	235
8.2	การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหา.....	237
8.2.1	ลักษณะของปัญหา.....	237
8.2.2	การสร้างขอบเขต.....	240
8.2.3	การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	242

8.3	วิธีการวิเคราะห์ผล.....	245
8.4	ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์.....	245
8.4.1	กรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม.....	246
8.4.2	การลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution).....	249
8.5	ผลการวิเคราะห์.....	253
8.5.1	ผลการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว.....	253
8.5.2	ผลการวิเคราะห์อาคารคู่แฝด.....	275
8.6	สรุปผลการวิเคราะห์.....	304
8.6.1	สรุปผลการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว.....	304
8.6.2	สรุปผลการวิเคราะห์อาคารคู่แฝด.....	304
9	สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	306
9.1	สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	306
9.2	ข้อเสนอแนะ.....	308
	บรรณานุกรม.....	310
	ประวัติการศึกษา.....	316

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ค่าคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52
6.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ กรณีการปรับขนาดเอลิเมนต์ภายในขอบเขต.....	69
6.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่มีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน.....	71
6.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ โครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดกว้าง 0.2 เมตร สูง 0.1 เมตร ที่ทิศทางลมต่างๆ.....	72
6.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณา กรณีที่มีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน.....	73
6.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณา กรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ.....	99
6.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ของโครงสร้างป้ายโฆษณา กรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ.....	102
6.7 ผลการวิเคราะห์ห้ระยะเยื้องศูนย์แนวตั้ง.....	104
6.8 ผลการวิเคราะห์ห้ระยะเยื้องศูนย์แนวราบ.....	106
7.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กรณีขอบเขตดั้งเดิมกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม.	132
7.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ กรณีขอบเขตดั้งเดิมกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม.....	128
7.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$	131
7.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$	133
7.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5 h$	135
7.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่มีอาคารข้างเคียง.....	136
7.7 ค่า IF ที่ระยะ Dx (เมตร) และ Dy (เมตร) กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$	138

7.8	ค่า IF ที่ระยะ Dx (เมตร) และ Dy (เมตร) กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$	169
7.9	ค่า IF ที่ระยะ Dx (เมตร) และ Dy (เมตร) กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$	200
8.1	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กรณีขอบเขตดั้งเดิมกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม.	247
8.2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ กรณีขอบเขตดั้งเดิมกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม.....	249
8.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำกรณี อาคารเดี่ยวรูปแบบต่างๆ.....	250
8.4	แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของ อาคารหลักกรณีอาคารคู่แฝดรูปแบบต่างๆ.....	252
8.5	ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารเดี่ยว.....	253
8.6	ผลการวิเคราะห์ค่า IF ของอาคารหลัก.....	275

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
3.1 เส้นทางเดินของของไหลก่อนเล็กๆจากตำแหน่ง 1 ที่เวลา t_1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 ที่เวลา t_2	9
3.2 รูปแบบแสดงฟลักซ์ของมวลผ่านลูกบาศก์ขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหล.....	12
3.3 รูปแบบแสดงแรงต่างๆในทิศแกน x ที่กระทำบนก้อนของไหลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล.....	14
3.4 รูปแบบแสดงงานที่เกิดขึ้น และปริมาณฟลักซ์ในทิศแกน x ที่ไหลผ่านก้อนมวลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล.....	21
5.1 ขั้นตอนในการทดลองอุโมงค์ลม.....	43
5.2 แนวคิดวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	45
5.3 ขั้นตอนในการทำวิจัย.....	46
5.4 เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3-D) ชนิดเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral Element).....	48
5.5 นิยามด้านของขอบเขต.....	51
6.1 ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Letchford, 2001)...	55
6.2 ความเข้มของความปั่นป่วนของลมที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Letchford, 2001).....	56
6.3 นิยามของโครงสร้างป้ายโฆษณา.....	57
6.4 ทิศทางลมที่กระทำ.....	64
6.5 ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กัน.....	59
6.6 ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ (45 องศา).....	61
6.7 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณา.....	63
6.8 นิยามระยะเยื้องศูนย์ของแรงที่กระทำ.....	67

6.9	ความสัมพันธ์ของจำนวนเอลิเมนต์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณา Aspect Ratio เท่ากับ 2 และ Clearance Ratio เท่ากับ 0.5.....	68
6.10	ความสัมพันธ์ของจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน.....	70
6.11	ความสัมพันธ์ของจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดกว้าง 0.2 เมตร สูง 0.1 เมตร ที่ทิศทางลมต่างๆ..	71
6.12	ความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ...	74
6.13	ความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $c/h = 1$	74
6.14	ความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $c/h = 0.9$	75
6.15	ความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $c/h = 0.5$	75
6.16	ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x	77
6.17	ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา.....	77
6.18	ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา.....	78
6.19	ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $b/c = 0.5$	78
6.20	ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $b/c = 1$	79
6.21	ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $b/c = 2$	79
6.22	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$ และ $c/h = 1$ (เมตรต่อวินาที).....	85

6.23	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$ และ $c/h = 0.9$ (เมตรต่อวินาที).....	86
6.24	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$ และ $c/h = 0.5$ (เมตรต่อวินาที).....	87
6.25	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$ และ $c/h = 1$ (เมตรต่อวินาที).....	88
6.26	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$ และ $c/h = 0.9$ (เมตรต่อวินาที).....	89
6.27	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$ และ $c/h = 0.5$ (เมตรต่อวินาที).....	90
6.28	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$ และ $c/h = 1$ (เมตรต่อวินาที).....	91
6.29	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$ และ $c/h = 0.9$ (เมตรต่อวินาที).....	92
6.30	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$ และ $c/h = 0.5$ (เมตรต่อวินาที).....	93
6.31	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$ และ $c/h = 1$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	94
6.32	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$ และ $c/h = 0.9$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	94
6.33	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$ และ $c/h = 0.5$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	95
6.34	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$ และ $c/h = 1$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	95
6.35	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$ และ $c/h = 0.9$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	96
6.36	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$ และ $c/h = 0.5$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	96

6.37	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$ และ $c/h = 1$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	97
6.38	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$ และ $c/h = 0.9$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	97
6.39	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$ และ $c/h = 0.5$ (นิวตันต่อตารางเมตร).....	98
6.40	ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x สำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	99
6.41	ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าและขอบด้านหลัง โครงสร้างป้ายโฆษณาสำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	100
6.42	ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y สำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	102
6.43	ระยะเยื้องศูนย์แนวดิ่งสำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	105
6.44	ระยะเยื้องศูนย์แนวราบสำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	106
6.45	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ สำหรับทิศทางลม 0 องศา (เมตรต่อวินาที)	108
6.46	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ สำหรับทิศทางลม 15 องศา (เมตรต่อวินาที)	108
6.47	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ สำหรับทิศทางลม 30 องศา (เมตรต่อวินาที)	109
6.48	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ สำหรับทิศทางลม 45 องศา (เมตรต่อวินาที)	109
6.49	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ สำหรับทิศทางลม 60 องศา (เมตรต่อวินาที)	110
6.50	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ สำหรับทิศทางลม 75 องศา (เมตรต่อวินาที)	110
6.51	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาสำหรับทิศทางลม 0 องศา (นิวตัน ต่อตารางเมตร)	111
6.52	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาสำหรับทิศทางลม 15 องศา (นิวตัน ต่อตารางเมตร)	111

6.53	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาสำหรับทิศทางลม 30 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)	111
6.54	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาสำหรับทิศทางลม 45 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)	112
6.55	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาสำหรับทิศทางลม 60 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)	112
6.56	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาสำหรับทิศทางลม 75 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)	112
7.1	ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548).....	117
7.2	ความเข้มของความปั่นป่วนของลมที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548).....	118
7.3	ขนาดและตำแหน่งของโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารข้างเคียง.....	119
7.4	ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของอาคารข้างเคียง.....	119
7.5	ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียง.....	120
7.6	ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารข้างเคียง.....	122
7.7	ลักษณะของขอบเขตกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร.....	126
7.8	ความสัมพันธ์ของจำนวนการทำความซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x สำหรับขอบเขตดั้งเดิมและกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร.....	126
7.9	เปรียบเทียบเส้นชั้นความเร็วลมของกรณีขอบเขตดั้งเดิมกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม.....	127
7.10	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำความซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีไม่มีอาคารข้างเคียง.....	129
7.11	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำความซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ D_x ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $D_y = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$...	130
7.12	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำความซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ D_x ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $D_y = -0.20$ เมตรกรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$...	130
7.13	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำความซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ D_x ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $D_y = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$...	132

7.14	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตรกรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$	132
7.15	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5 h$...	134
7.16	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตรกรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5 h$	134
7.17	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีไม่มีอาคารข้างเคียง (เมตรต่อวินาที)	137
7.18	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีไม่มีอาคารข้างเคียง.....	138
7.19	ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆสำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$	139
7.20	ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆสำหรับ $Dy = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$	140
7.21	ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่มีและมีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$ อยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา กับ Dx (เมตร) สำหรับ $Dy = 0$ เมตร..	141
7.22	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	145
7.23	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	146
7.24	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	147
7.25	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	148

[illegible]

[illegible]

7.49	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตร ต่อวินาที).....	166
7.50	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	167
7.51	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	167
7.52	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	168
7.53	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	168
7.54	ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$	169
7.55	ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$	171
7.56	ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหน้า และขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่มีและมีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ อยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา กับ Dx (เมตร) สำหรับ $Dy = 0$ เมตร.....	172
7.57	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อ วินาที).....	176
7.58	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อ วินาที).....	177
7.59	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อ วินาที).....	178

[illegible]

7.72	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	187
7.73	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	188
7.74	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	189
7.75	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	190
7.76	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	191
7.77	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	192
7.78	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	192
7.79	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	193
7.80	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	193
7.81	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	194
7.82	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที).....	195

7.83	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตร ต่อวินาที).....	196
7.84	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตร ต่อวินาที).....	197
7.85	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	198
7.86	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	198
7.87	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	199
7.88	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	199
7.89	ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5\ h$	200
7.90	ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5\ h$	202
7.91	ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหน้า และขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่มีและมีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5\ h$ กับ Dx (เมตร) สำหรับ $Dy = 0$ เมตร.....	203
7.92	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.5\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อ วินาที).....	207
7.93	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.5\ h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อ วินาที).....	208

[illegible]

[illegible]

7.117	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $D_x = 0.08$ เมตร และ $D_y = -0.20$ เมตร (เมตร ต่อวินาที).....	226
7.118	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $D_x = 0.12$ เมตร และ $D_y = -0.20$ เมตร (เมตร ต่อวินาที).....	227
7.119	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคาร ข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $D_x = 0.20$ เมตร และ $D_y = -0.20$ เมตร (เมตร ต่อวินาที).....	228
7.120	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $D_x = 0.05$ เมตร และ $D_y = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	229
7.121	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $D_x = 0.08$ เมตร และ $D_y = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	229
7.122	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $D_x = 0.12$ เมตร และ $D_y = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	230
7.123	เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $D_x = 0.20$ เมตร และ $D_y = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร).....	230
8.1	ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547).....	236
8.2	ความเข้มของความปั่นป่วนของลมที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547).....	237
8.3	ขนาดและรูปแบบหน้าตัดของอาคาร.....	238
8.4	ขนาดและตำแหน่งของอาคารข้างเคียง.....	239
8.5	ขนาดขอบเขตของอาคาร.....	240
8.6	ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆอาคาร.....	242
8.7	ลักษณะของขอบเขตกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร.....	246
8.8	ความสัมพันธ์ของจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x สำหรับขอบเขตดั้งเดิมและกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร.....	247

8.9	เปรียบเทียบเส้นชั้นความเร็วลมของกรณีขอบเขตดั้งเดิม กับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม.....	248
8.10	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x กรณีอาคารเดี่ยว.....	249
8.11	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x กรณีอาคารคู่แฝด.....	251
8.12	ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารเดี่ยวที่มีมุมอาคาร รูปแบบต่างๆ สำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	254
8.13	ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุม ฉากสำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	256
8.14	ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุม เว้าสำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	256
8.15	ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุม ตัดสำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	257
8.16	ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุม โค้งมนสำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	257
8.17	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยวหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (เมตรต่อวินาที)	259
8.18	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยวหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า (เมตรต่อวินาที)	261
8.19	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยวหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (เมตรต่อวินาที)	263
8.20	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยวหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (เมตรต่อวินาที)	265
8.21	ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (นิวตันต่อตารางเมตร)	267
8.22	ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า (นิวตันต่อตารางเมตร)	269

8.23	ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (นิวตันต่อตารางเมตร)	271
8.24	ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (นิวตันต่อตารางเมตร)	273
8.25	ค่า IF ของอาคารหลักที่มีรูปแบบหน้าตัดต่างๆ สำหรับทิศทางลมที่กระทำ.....	275
8.26	ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก.....	277
8.27	ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า.....	279
8.28	ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด.....	282
8.29	ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน.....	284
8.30	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝดหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (เมตรต่อวินาที).....	288
8.31	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝดหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า (เมตรต่อวินาที).....	290
8.32	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝดหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (เมตรต่อวินาที).....	292
8.33	เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝดหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (เมตรต่อวินาที).....	294
8.34	ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (นิวตันต่อตารางเมตร).....	296
8.35	ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า (นิวตันต่อตารางเมตร).....	298
8.36	ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (นิวตันต่อตารางเมตร).....	300
8.37	ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (นิวตันต่อตารางเมตร).....	302

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการคำนวณและการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา โครงสร้างที่ต้องได้รับการพิจารณาในเรื่องนี้เป็นพิเศษได้แก่โครงสร้างที่มีความชะลูดและมีความอ่อนไหวต่อแรงลม เช่น อาคารสูง สะพาน ช่วงยาว และ โครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดใหญ่ เป็นต้น ถ้าการคำนวณและออกแบบโครงสร้างเหล่านี้ไม่ได้พิจารณาผลของลมที่มีต่อพฤติกรรมของโครงสร้างอย่างถูกต้อง แรงลมอาจก่อให้เกิดการสั่นไหวของโครงสร้างในขณะใช้งานมากเกินไป หรืออาจทำให้โครงสร้างวิบัติได้

วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการวิเคราะห์ผลของลมที่มีต่อโครงสร้างได้แก่การทดลองแบบจำลองของโครงสร้างในอุโมงค์ลม ในต่างประเทศไม่มีเพียงแค่วิธีการทดลองอุโมงค์ลมเท่านั้นที่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย แต่ยังมีการประยุกต์ใช้อีกวิธีหนึ่งในการวิเคราะห์ผลของลมที่มีต่อโครงสร้าง วิธีนั้นก็คือ วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในขณะที่ในประเทศไทยวิธีการวิเคราะห์ผลของลมที่มีต่อโครงสร้างส่วนใหญ่ได้แก่วิธีการทดลองอุโมงค์ลมโดยที่เริ่มขึ้นเมื่อประมาณสิบกว่าปีมาแล้ว ส่วนวิธี CFD มีการประยุกต์ใช้น้อยมาก

การทดลองอุโมงค์ลมนั้นอาจมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อใช้ควบคู่กับการจำลองพฤติกรรมของลมด้วยระเบียบวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) CFD นั้นเป็นการประยุกต์ทฤษฎีทางพลศาสตร์ของของไหล (Fluid Dynamics) เข้ากับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) เช่น วิธีผลต่างสืบเนื่อง หรือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นต้น เพื่อประมาณพฤติกรรมของการไหลของของไหลจากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ CFD นั้นมีประโยชน์อยู่หลายประเด็น เช่น สามารถใช้ศึกษาเบื้องต้นถึงลักษณะของการทดลองอุโมงค์ลมที่ควรจะเป็นเพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการลองผิดลองถูก ใช้ควบคู่กับการทดลองอุโมงค์ลมเพื่อปรับแก้การทดลองให้สอดคล้องกับความต้องการมากขึ้น ใช้เสริมเพื่ออธิบายผลการทดลองที่ได้จากอุโมงค์ลม เป็นต้น ในปัจจุบัน CFD ได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายทางวิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical Engineering) และ วิศวกรรมการบินและอวกาศ (Aerospace Engineering) แต่กลับยังไม่เป็นที่สนใจมากนักในงานด้านวิศวกรรมโครงสร้าง (Structural Engineering)

โดยเฉพาะในประเทศไทย จากการค้นคว้าพบว่าในปัจจุบันมีงานวิจัยในประเทศเพียงชิ้นเดียว (Loi, 2004) ที่ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ CFD ทางวิศวกรรมโครงสร้าง

จากข้อประโยชน์ของ CFD ดังได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ดังนั้นจึงควรหันมาใส่ใจกับงานวิจัยในด้านนี้ และควรมีการศึกษาวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาถึงประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี CFD ในการวิเคราะห์ผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้าง
2. ทำการวิเคราะห์เพื่ออธิบายผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีขนาดอัตราส่วนต่างๆ โดยคำนึงถึงผลของทิศทางลม และเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมจากงานวิจัยในอดีต
3. ทำการวิเคราะห์เพื่ออธิบายผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีผลของอาคารข้างเคียงลักษณะต่างๆ และเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมจากงานวิจัยในอดีต
4. ทำการวิเคราะห์เพื่ออธิบายผลกระทบของลมที่มีต่ออาคารคู่แฝดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร และเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมจากงานวิจัยในอดีต

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. การศึกษาจะศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างในกรณีที่โครงสร้างเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Bluff Body) เท่านั้นโดยไม่ศึกษาถึงพฤติกรรมด้าน Aeroelastic ของโครงสร้าง
2. เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาทฤษฎีหรือวิธีการใหม่ในด้าน CFD แต่มุ่งที่จะศึกษาประสิทธิภาพของ CFD ในการวิเคราะห์เท่านั้น ดังนั้นการศึกษาจึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการจำลองการไหลและพฤติกรรมของลม โดยที่การศึกษาใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่สร้างจากทฤษฎี Eddy Viscosity Model ที่บรรจุอยู่ในโปรแกรมสำเร็จรูป (ANSYS) สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้คือ แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ Model

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของลมโดยใช้ CFD ได้
2. ทราบถึงประโยชน์และข้อจำกัดของการใช้ CFD ควบคู่กับการทดลองอุโมงค์ลม
3. สามารถใช้ผลที่ได้จาก CFD ในการวิเคราะห์และอธิบายเพิ่มเติมผลการทดลองที่ได้จากอุโมงค์ลม

บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการรวบรวมผลงานวิจัยและงานเขียนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยมุ่งเน้นไปที่งานวิจัยสองส่วน ได้แก่ งานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลม และงานวิจัยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

2.1 งานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างโดยวิธีการทดลองอุโมงค์ลม มีทั้งในและต่างประเทศ โดยที่ในประเทศไทยเริ่มประมาณสิบกว่าปีมาแล้ว สำหรับงานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ มีดังต่อไปนี้

Letchford (2001) ได้ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงที่กระทำกับแผ่นป้าย (C_f) ในอุโมงค์ลมภายใต้ Turbulence Boundary Layer Flow โดยทำการพิจารณาถึงผลของค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแผ่นป้าย (Aspect Ratio, b/c) อัตราส่วนความสูงของป้ายต่อความสูงของป้ายจากพื้นดิน (Clearance Ratio, c/h) ลักษณะของความพรุน (Porosity) และทิศทางของลมที่กระทำกับป้าย (Wind Direction) โดยผลการทดสอบพบว่าเมื่อ $c/h > 0.67$ ค่า C_f ลดลงเมื่อ b/c มีค่ามากขึ้น สำหรับ $c/h < 0.67$ ค่า C_f เพิ่มขึ้นเมื่อ b/c มีค่าลดลง และค่า C_f จะเพิ่มขึ้นเมื่อ c/h ลดลง และที่ $c/h = 0.5$ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงจะเป็นอิสระต่อ b/c โดยมีค่า 1.45 และทิศทางของลมที่กระทำกับป้ายจะมีค่า C_f คงที่ที่มุม 0-45 หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อมุมเพิ่มขึ้น

ชาญณรงค์ (2547) ได้ทำการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารคู่แฝดในอุโมงค์ลม เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่าง การจัดเรียงตัวของอาคาร และการปรับแต่งมุมอาคารเป็นแบบเว้าตัด และโค้งมนที่มีผลกระทบต่อค่าแรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารคู่แฝดซึ่งมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้แบบจำลองอาคารประเภทแข็งเกร็ง (Rigid) ที่มีอัตราส่วนความหนา 6:1:1 และทำการย่อด้วยอัตราส่วน 1:400 แล้วทำการการวัดแรงและโมเมนต์พื้นฐานของแบบจำลองจากการศึกษาพบว่า อาคารข้างเคียงที่อยู่เหนือลมมีแนวโน้มในการเพิ่มค่าแรงพลศาสตร์ที่กระทำกับอาคารหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารที่ตั้งอยู่ในแนวทแยงทำมุมประมาณ 20 ถึง 45 องศาทิศทางลม ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าแรงพลศาสตร์ในบางทิศทางเพิ่มขึ้นได้ถึง 80 % นอกจากนี้ยังพบว่า

การปรับแต่งมุมแบบเว้า และแบบโค้งมน มีผลในการลดค่าแรงลมพลศาสตร์ได้ดีกว่าการปรับแต่งมุมแบบตัด ซึ่งในบางกรณีอาจลดได้ถึง 50 % เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารคู่แฝดที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Suksit (2004) ได้ศึกษาผลกระทบจากแรงลมต่อป้ายโฆษณาขนาดใหญ่โดยใช้การทดสอบในอุโมงค์ลม การทดลองนี้ใช้เทคนิค High Frequency Force Balance (HFFB) ในการวัดแรงและโมเมนต์พื้นฐาน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลม โดยแบบจำลองที่ทำขึ้นมามีทั้งหมด 9 แบบ ซึ่งแปรเปลี่ยนขนาดตามความกว้างต่อความสูงของป้าย (Aspect Ratio) และความสูงของป้ายต่อความสูงจากพื้นดิน (Clearance Ratio) และคำนึงถึงผลของทิศทางลมตั้งแต่ 0-75 องศา แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของ AS/NZS, ASCE7-98 และ Cook ผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเฉลี่ย (Mean Drag Force) มีค่าประมาณ 1.4 และสำหรับสัมประสิทธิ์ของแรงลมเฉลี่ยที่มากที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อทิศทางลมกระทำที่มุม 45 องศา ค่าที่ได้จากการทดสอบ สอดคล้องกับข้อกำหนด แต่จะมีค่าน้อยกว่า เหตุผลที่ข้อกำหนดมีค่ามากกว่าก็เพื่อที่จะได้ค่าที่ปลอดภัยสำหรับใช้งาน

ธีรวัฒน์ (2548) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณา โดยคำนึงถึงผลอาคารข้างเคียงจากการศึกษาพบว่า แรงที่มีทิศ 0 องศากระทำกับโครงสร้างป้ายในทิศทางตามลมมีค่าลดลงหากอาคารอยู่ด้านต้นลมและแรงนี้อาจจะกลับทิศทางจากแรงดันเป็นแรงดูดกระทำต่อป้ายได้เมื่ออาคารขนาดใหญ่ขึ้น แต่เมื่อแรงที่มีทิศทางทำมุมกระทำกับโครงสร้างป้ายในทิศทางตามลมทำให้ค่าเพิ่มสูงสุดประมาณ 30% และหากอาคารวางอยู่ด้านท้ายลมแรงที่กระทำกับโครงสร้างป้ายในทิศทางตามลมอาจมีค่าเพิ่มขึ้นจากป้ายที่ไม่มีอาคารข้างเคียงในหลายกรณีโดยมีค่าเพิ่มสูงสุดประมาณ 30% ของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ นอกจากนั้นแรงบิดสูงสุดอาจมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าของป้ายที่ไม่มีอาคารข้างเคียงโดยมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 90% และ 50% สำหรับกรณีที่มีอาคารวางอยู่ด้านต้นลมและท้ายลม

Kobchai (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงลมที่กระทำกับป้ายโฆษณา โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยที่ป้ายที่ทำการทดสอบจะมี 4 ลักษณะ คือ ป้ายเดี่ยว ป้ายคู่ขนานกัน ป้ายคู่ที่ทำมุมระหว่างกัน 15 และ 30 องศาตามลำดับ โดยที่ไม่คิดและคิดผลกระทบของทางด่วน โดยคำนึงถึงผลของทิศทางลม จากการศึกษพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเฉลี่ยจะเท่ากับ 1.4 สำหรับป้ายเดี่ยวและป้ายคู่ขนานกัน ในขณะที่ป้ายคู่ที่ทำมุมระหว่างกัน 15 และ 30 มีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเฉลี่ยจะเท่ากับ 1.5 ส่วนผลกระทบของทางด่วนจะไม่ค่อยมีอิทธิพลมากนัก

ต่อค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเฉลี่ย อย่างไรก็ตาม ผลกระทบจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างป้ายกับทางด่วนเพิ่มขึ้น

งานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลมนั้นมีการศึกษาอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งไม่สามารถที่จะนำมากล่าวถึงได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ดีและสามารถใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาได้ แต่ไม่ขอลงในรายละเอียดเนื่องจากไม่เกี่ยวข้อง มีดังนี้ Castro, I.P. and Robin, A.G. (1977) ได้ทำการทดสอบในอุโมงค์ลมโดยใช้อาคารทรงลูกบาศก์ขนาดต่างๆกัน เพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของความดันลมเฉลี่ย พูลศักดิ์ (2535) ได้เสนอการหาแรงลมเฉพาะจุด สำหรับออกแบบ Cladding Glass ในอาคารสูง ด้วยการทดสอบโดยใช้หุ่นจำลองอาคารสูงในอุโมงค์ลม ปฏิพัทธ์ (2537) ได้ศึกษาผลกระทบของทิศทางลมที่มีผลต่อค่าแรงลมสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผนังโดยรอบอาคาร สุกิตย์, เป็นหนึ่ง, ปณิธาน และ วรศักดิ์ (2537) ได้ทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของอาคารพญาพาร์ค ทาวเวอร์ ในอุโมงค์ลม เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารเมื่อรับแรงลม โสภณ (2537) ได้ทำการศึกษาผลจากการปิดกั้น (Blockage Effect) ในการทดสอบเพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นในคานแนวกกลางของแบบจำลองสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ สุวรรณสาม (2546) ได้ศึกษาแรงลมสำหรับการออกแบบป้ายโฆษณาโดยวิธีการคำนวณตามมาตรฐานการออกแบบและวิธีการทดลองอุโมงค์ลม อัครพล (2546) ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรง และตอบสนองของอาคารสูงที่มีการปรับแต่งมุมอาคารโดยการทดสอบในอุโมงค์ลม

2.2 งานวิจัยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

ในต่างประเทศการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้างกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น นอกเหนือจากการทดลองอุโมงค์ลม ในขณะที่ในประเทศไทยไม่ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับ CFD มากนัก จากการค้นคว้าพบว่าในปัจจุบันมีงานวิจัยในประเทศเพียงชิ้นเดียว (Loi, 2004) ที่ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ CFD ทางวิศวกรรมโครงสร้าง สำหรับงานวิจัยการคำนวณพลศาสตร์ของไหลที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ มีดังต่อไปนี้

Cowan, Castro, and Robins (1997) ได้ทำการสำรวจงานวิจัยก่อนหน้าและมีคำแนะนำเกี่ยวกับขนาดขอบเขตของการคำนวณดังนี้ ความยาวของด้านต้นลม 5H ความยาวของด้านท้ายลม 15H และความกว้างด้านข้าง 4H โดยที่ H คือความสูงของวัตถุ อย่างไรก็ตามขนาดของขอบเขตอาจขึ้นอยู่กับปัญหาที่วิเคราะห์

Murakami (1997) ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในหลากหลายปัญหาโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่างๆกันในงานทางด้านการคำนวณทางวิศวกรรม (Computational Wind Engineering, CWE) โดยชี้ให้เห็นถึงความยากในงานทางด้าน CWE เนื่องจากลมที่กระทำกับโครงสร้างที่มีลักษณะวัตถุแข็งเกร็ง (Bluff Body) เป็นลมแบบ Boundary Layer และบริเวณมุมหรือขอบของโครงสร้างต้องใช้เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดเพื่อความถูกต้อง อีกทั้งต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน การประยุกต์ใช้ CFD ในงานทางด้าน CWE มีแนวโน้มใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น รวมไปถึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองใหม่ๆขึ้นเพื่อลดข้อผิดพลาดของผลการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามก็ยังมีแบบจำลองแต่ละแบบจำลองมีทั้งข้อดีและข้อด้อยโดยที่ปัจจัยพื้นฐานในการเลือกใช้แต่ละแบบจำลองมีอยู่สองข้อ ข้อแรกความถูกต้องของแบบจำลองในการคาดคะเน ข้อที่สองระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งได้สรุปให้เห็นถึงความเหมาะสมของแต่ละแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ในปัญหาต่างๆ แบบจำลองที่มีความถูกต้องมากที่สุดได้แก่แบบจำลอง Large Eddy Simulation (LES) โดยมีความสามารถในการวิเคราะห์ได้หลากหลายปัญหา แต่ LES มีข้อด้อยตรงที่ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์นาน ถึงกระนั้นก็ตามการพัฒนาระบบ Hardware อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากขึ้นทำให้ LES ไม่มีปัญหาทางด้านเวลา และ LES จะเป็นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอนาคต

Loi (2004) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้าง ในรูปของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS ทำการวิเคราะห์ และได้เลือกใช้แบบจำลองของ $k - \epsilon$ Turbulence Model เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมที่กระทำต่อป้ายโฆษณา โดยที่รูปร่างมีการเปลี่ยนแปลงขนาด ความกว้างต่อความสูงของป้าย (Aspect Ratio) และความสูงของป้ายต่อความสูงจากพื้นดิน (Clearance Ratio) โดยคิดผลของกรณีมีสิ่งกีดขวาง และไม่มีสิ่งกีดขวาง แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีและผลการทดลองในอดีต จากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมสอดคล้องกับข้อมูลการทดสอบในอุโมงค์ลมแต่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมมากกว่า สำหรับกรณีมีสิ่งกีดขวางวางอยู่ด้านหน้าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมต่ำกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงหรือความยาวของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล

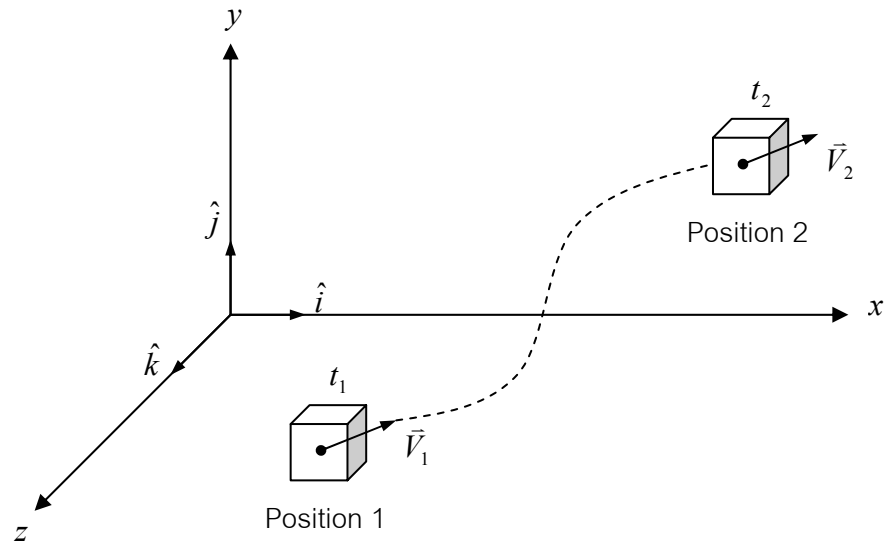
3.1 ทัวไป

การวิเคราะห์ปัญหาใดๆทางวิศวกรรมศาสตร์หรือวิทยาศาสตร์ ลักษณะของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นของปัญหาโดยปกติจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 ประการคือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้น และลักษณะรูปร่างของปัญหา สำหรับการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ของการไหลด้วยการคำนวณนั้น ความเข้าใจในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลนับว่าเป็นหัวใจที่สำคัญ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลซึ่งต้องเกิดการอนุรักษ์มวล อนุรักษ์โมเมนตัม และอนุรักษ์พลังงาน สมการเหล่านี้ล้วนประกอบด้วยพจน์ที่อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ต่างๆกัน ดังนั้นในบทนี้จึงเป็นการกล่าวถึงสมการพื้นฐานทางด้านพลศาสตร์ของไหล โดยที่การเรียบเรียงเนื้อหาในบทนี้ได้จาก (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2545)

3.2 ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์

ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ (Substantial Derivative) เป็นสิ่งที่จำเป็นจะต้องเข้าใจในความหมายก่อนเริ่มทำการประดิษฐ์ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล เพื่ออธิบายความหมายของค่านี้ ภาพที่ 3.1 แสดงเส้นทางเดินของก้อนของไหลก้อนเล็กๆ จากตำแหน่งที่ 1 ที่เวลา t_1 ไปยังตำแหน่ง 2 ที่เวลา t_2 บนระนาบ $x-y-z$ โดยบนระนาบนี้กำหนดให้ $\hat{i}$, $\hat{j}$ และ $\hat{k}$ เป็นเวกเตอร์ 1 หน่วย (Unit Vector) ในทิศแกน x , y และ z ตามลำดับ ก้อนของไหลนี้มีความเร็ว $\vec{V}_1$ ที่ตำแหน่ง 1 และ $\vec{V}_2$ ที่ตำแหน่ง 2 ความเร็วเหล่านี้ต่างเป็นปริมาณเวกเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้คือ

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (3.1)$$



ภาพที่ 3.1 เส้นทางเดินของของไหลก้อนเล็กๆจากตำแหน่ง 1 ที่เวลา t_1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 ที่เวลา t_2

โดยที่ u , v และ w เป็นความเร็วย่อยในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ ความเร็วย่อย u , v และ w นี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโคออร์ดิเนต x , y และ z และเวลา t คือ

$$u = u(x, y, z, t) \quad (3.2ก)$$

$$v = v(x, y, z, t) \quad (3.2ข)$$

$$w = w(x, y, z, t) \quad (3.2ค)$$

ในขณะที่ก้อนของไหลนี้เคลื่อนที่ไปนั้น ค่าคุณสมบัติต่างๆของก้อนของไหลนี้ก็เปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งโคออร์ดิเนตและเวลาด้วย ยกตัวอย่างเช่นความหนาแน่น (Density)

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (3.3ก)$$

โดยที่ค่าความหนาแน่นของก้อนของไหลที่ตำแหน่ง 1 นี้คือ

$$\rho_1 = \rho(x_1, y_1, z_1, t_1) \quad (3.3\text{ข})$$

และเมื่อก้อนของไหลเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่ง 2 ค่าความหนาแน่นคือ

$$\rho_2 = \rho(x_2, y_2, z_2, t_2) \quad (3.3ค)$$

และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปอย่างต่อเนื่อง (Continuous) ค่าความเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่ง 2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าความหนาแน่นที่ตำแหน่ง 1 โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) ดังนี้

$$\rho_2 = \rho_1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)_1 \Delta x + \left(\frac{\partial \rho}{\partial y}\right)_1 \Delta y + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)_1 \Delta z + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_1 \Delta t + H.O.T. \quad (3.4)$$

โดย $H.O.T.$ แทนพจน์ต่างๆที่ประกอบด้วย $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ และ Δt ที่มีอันดับสูงขึ้นไป (Higher Order Terms) หากย้าย ρ_1 มายังด้านซ้ายของสมการ แล้วทำการหารตลอดด้วย Δt จะได้

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta t} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)_1 \frac{\Delta x}{\Delta t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial y}\right)_1 \frac{\Delta y}{\Delta t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)_1 \frac{\Delta z}{\Delta t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_1 + H.O.T. \quad (3.5)$$

และเมื่อ $\Delta t \rightarrow 0$ กล่าวคือตำแหน่ง 2 นั้นเลื่อนเข้าสู่ตำแหน่ง 1 พจน์ต่างๆในสมการที่ (3.5) จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta t} = \frac{D\rho}{Dt} \quad (3.6)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = u \quad (3.7)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} = v \quad (3.8)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta z}{\Delta t} = w \quad (3.9)$$

และพจน์ $H.O.T.$ ซึ่งยังประกอบด้วย $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ และ Δt ต่างลู่เข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (3.5) จึงกลายมาเป็น

$$\frac{D\rho}{Dt} = u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.10)$$

แต่ละพจน์ในสมการที่ (3.10) นี้ต่างมีความหมายทางกายภาพ พจน์ $D\rho/Dt$ ทางด้านซ้ายของสมการแทนอัตราการเปลี่ยนแปลงโดยสัมบูรณ์ของค่าความหนาแน่นในขณะที่ยกก่อนของไหลนั้นเคลื่อนผ่านตำแหน่งที่ 1 ส่วนพจน์ $\partial \rho / \partial t$ ทางด้านขวาของสมการแทนอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นในก้อนของไหลใดๆที่ไหลผ่านตำแหน่งที่ 1

ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (3.10) สามารถประยุกต์เข้ากับค่าคุณสมบัติอื่นๆได้ ดังนั้นจึงเขียนสมการของความสัมพันธ์นี้โดยทั่วไปได้ว่า

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.11)$$

หรือ

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\vec{\nabla} \equiv \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3.13)$$

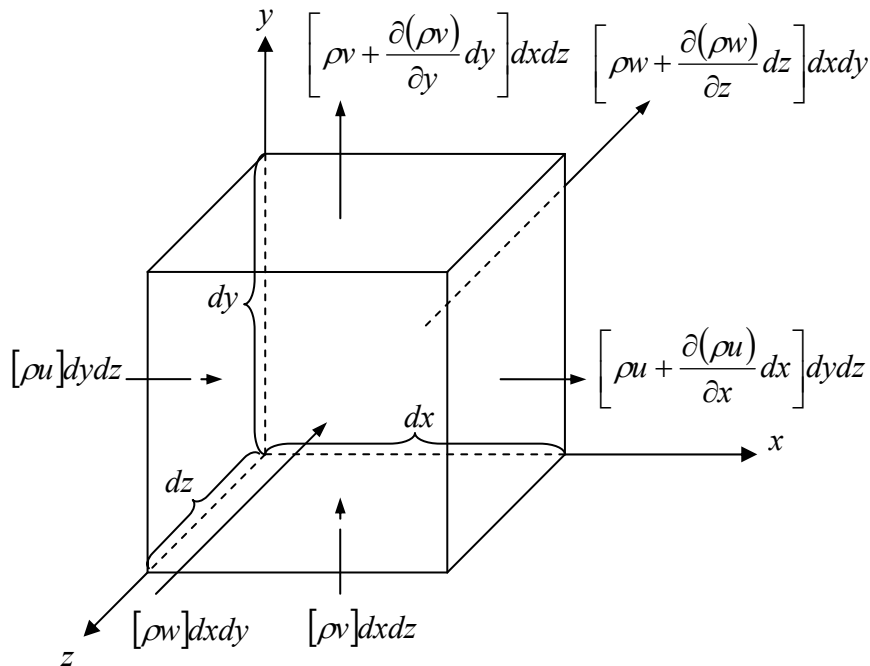
สำหรับสมการที่ (3.12) พจน์ทางด้านซ้ายของสมการเรียกว่า ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ (Substantial Derivative) ส่วนพจน์สุดท้ายทางขวาของสมการคือ

$$\begin{aligned}
 (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) &= (u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k} \right) \\
 &= u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

ซึ่งประกอบด้วย 3 พจน์ย่อยที่มีความเร็วในแต่ละแนวแกนคูณอยู่ข้างหน้าซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้ค่าของพจน์ทั้งสาม ทำให้สมการนี้เป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) และเนื่องจากพจน์ทั้งสามนี้ประกอบด้วยผลคูณของความเร็วและค่าอนุพันธ์ จึงเรียกพจน์ดังกล่าวนี้ว่า พจน์เชิงอนุพันธ์เนื่องจากการพา (Convective Derivative)

3.3 สมการเชิงอนุพันธ์มวล

สมการแรกในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลนี้เป็นสมการของการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) ซึ่งมีความหมายว่า มวลนั้นไม่สูญหายไป การประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์มวลนี้ สามารถทำได้โดยพิจารณาการไหลผ่านลูกบาศก์เล็กๆ ที่มีขนาด dx , dy และ dz ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหล



ภาพที่ 3.2 รูปแบบแสดงฟลักซ์ของมวลผ่านลูกบาศก์ขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหล

จากภาพที่ 3.2 จะเห็นว่ามวลไหลเข้าและออกในทั้ง 3 แนว (คือ x, y และ z) เพื่อความสะดวกจะพิจารณามวลไหลเข้าและออกจากลูกบาศก์เล็กๆนี้ในทิศแกน x ก่อน พิจารณาพื้นที่ด้านซ้ายของลูกบาศก์เล็กๆ มีปริมาณฟลักซ์ของมวลที่ไหลเข้าเท่ากับ $[\rho u]dydz$ เนื่องจากทั้งความหนาแน่น ρ และความเร็ว u นั้นเปลี่ยนแปลงไปตลอด ดังนั้นปริมาณฟลักซ์ของมวลที่ไหลออกทางด้านขวาของลูกบาศก์คือ $[\rho u + \partial(\rho u)/\partial x dx]dydz$ นั่นคือปริมาณฟลักซ์ของมวลที่เพิ่มขึ้นในทิศแกน x ผ่านระนาบ $dydz$ ของการไหลผ่านลูกบาศก์เล็กๆนี้คือ

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dydz - [\rho u] dydz = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dydz \quad (3.15)$$

ในทำนองเดียวกันปริมาณฟลักซ์ของมวลที่เพิ่มขึ้นในทิศแกน y ผ่านระนาบ $dx dz$ คือ

$$\left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx dz - [\rho v] dx dz = \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz \quad (3.16)$$

ในทำนองเดียวกันปริมาณฟลักซ์ของมวลที่เพิ่มขึ้นในทิศแกน z ผ่านระนาบ $dx dy$ คือ

$$\left[\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz \right] dx dy - [\rho w] dx dy = \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx dy dz \quad (3.17)$$

และเนื่องจากปริมาณมวลในลูกบาศก์เล็กๆนี้คือ $\rho dx dy dz$ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลหรือปริมาณฟลักซ์ที่ลดลงไปคือ

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (3.18)$$

แต่เนื่องจากมวลในลูกบาศก์เล็กๆนี้จะต้องไม่เกิดการสูญหาย ดังนั้นจึงหมายความว่าปริมาณฟลักซ์ของมวลที่เพิ่มขึ้นจากการไหลผ่านระนาบ $dydz, dx dz$ และ $dx dy$ จำเป็นต้องเท่ากับปริมาณฟลักซ์ของมวลในลูกบาศก์เล็กๆที่ลดลงในนั้น นั่นคือ

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx dy dz = -\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz$$

นำ $dx dy dz$ หารตลอดทั้งสมการ และจัดรูปเทอมใหม่จะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (3.19)$$

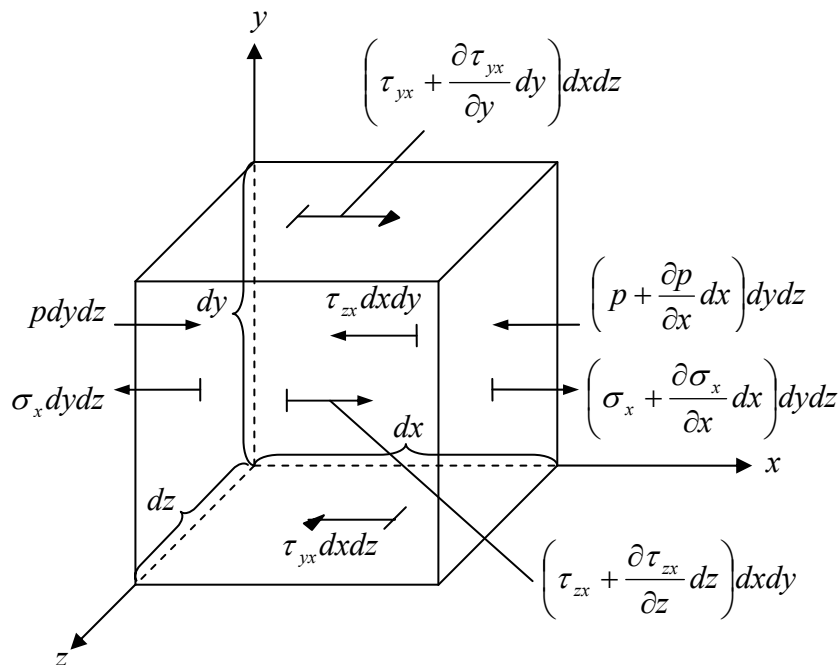
หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.20)$$

สมการที่ (3.20) นี้คือสมการเชิงอนุรักษ์มวล

3.4 สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม

ความจริงส่วนที่สองในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลคือ สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) โดยประยุกต์มาจากกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's Second Law) ที่กล่าวว่า แรงเท่ากับมวลคูณด้วยอัตราเร่ง โดยพิจารณามวลขนาด dx, dy และ dz ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปกับการไหล ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 รูปแบบแสดงแรงต่างๆในทิศแกน x ที่กระทำบนก้อนของไหลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล

เพื่อความสะดวกจะทำการพิจารณาสมการโมเมนตัมในทิศแกน x ก่อนดังแสดงในภาพที่ 3.3 ซึ่งแสดงแรงต่างๆที่กระทำในแกน x เท่านั้น กฎข้อที่สองของนิวตันเมื่อพิจารณาในแกน x คือ

$$F_x = ma_x \quad (3.21)$$

โดยที่ F_x คือแรงรวมในทิศแกน x , m คือมวลของก้อนของไหลนี้ และ a_x คือความเร่งของมวลในทิศแกน x

แรงรวมในทิศแกน x ประกอบด้วยแรงที่กระทำที่ผิวต่างๆ (Surface Forces) และแรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง (Body Force) สำหรับแรงที่กระทำที่ผิวนั้น ยังประกอบด้วยแรงอันเนื่องมาจากความดัน p , ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) σ_x และความเค้นเฉือน (Shear Stress) τ_{yx}, τ_{zx} ดังนั้นแรงรวมที่กระทำที่ผิวต่างๆในทิศแกน x ของก้อนมวลนี้คือ

$$\begin{aligned} & \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dydz + \left[\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) - \sigma_x \right] dydz \\ & + \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \end{aligned} \quad (3.22)$$

ส่วนแรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของตัวเองในทิศแกน x คือ

$$\rho f_x (dx dy dz) \quad (3.23)$$

ดังนั้นแรงรวมทั้งหมดในทิศแกน x ที่เกิดจากพจน์ต่างๆในสมการที่ (3.22) และสมการที่ (3.23) คือ

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \quad (3.24)$$

ส่วนมวลของก้อนของไหลนี้คือ

$$m = \rho (dx dy dz) \quad (3.25)$$

ค่าความเร่ง a_x ของมวลในสมการที่ (3.21) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว u ของมวลที่กำลังเคลื่อนที่นั้นต่อเวลา เนื่องจากเรากำลังจับตาเฝ้าดูมวลนี้กำลังเคลื่อนที่ไปกับการไหล ดังนั้นความเร่ง a_x นี้คือ ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ของ u กล่าวคือ

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (3.26)$$

แทนสมการที่ (3.24)-(3.26) ลงในกฎที่สองของนิวตันสมการที่ (3.21) แล้วหารตลอดด้วย $dx dy dz$ จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.27ก)$$

ในทำนองเดียวกันสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมในทิศแกน y คือ

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.27ข)$$

ในทำนองเดียวกันสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมในทิศแกน z คือ

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.27ค)$$

สมการที่ (3.27ก-ค) เรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) เพื่อเป็นเกียรติแก่ชาวฝรั่งเศสชื่อ M.Navier และ ชาวอังกฤษ G.Storks

สมการนาเวียร์-สโตกส์ สมการที่ (3.27ก-ค) ต่างอยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์อันเนื่องมาจากการประดิษฐ์สมการโดยการจับตามองก้อนมวลของไหลที่เคลื่อนตัวไป ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์นี้สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของค่าอนุพันธ์ธรรมดา คือการสังเกตนิ่งอยู่ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแล้วเฝ้ามองการเปลี่ยนแปลงของของไหลที่ผ่านไปโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.12) ประยุกต์เข้ากับความเร็ว u ดังนี้

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} u \quad (3.28)$$

ดังนั้น

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \vec{V} \cdot \vec{\nabla} u \quad (3.29)$$

นั่นคือ พจน์ทางด้านซ้ายของสมการนาเวียร์-สโตกส์ ที่อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ สามารถแทนด้วยพจน์ทั้งสองทางด้านขวามือของสมการที่ (3.29) ซึ่งอยู่ในรูปของค่าอนุพันธ์ธรรมดาและสามารถนำไปใช้ร่วมกับสมการเชิงอนุรักษ์มวลสมการที่ (3.20) เพื่อการแก้ปัญหาก็ได้ อย่างไรก็ตามพจน์ทางด้านขวาของสมการที่ (3.29) ยังสามารถทำให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

ดังนั้น

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.30)$$

และเนื่องจาก

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) = u \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) + (\rho \vec{V}) \cdot \vec{\nabla} u$$

ดังนั้น

$$\rho \vec{V} \cdot \vec{\nabla} u = \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) - u \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \quad (3.31)$$

แทนสมการที่ (3.30) และ สมการที่ (3.31) ลงในสมการที่ (3.29) จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) - u \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V})$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right] + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) \quad (3.32)$$

แต่เนื่องจากผลรวมของ 2 พจน์ในวงเล็บที่เหลี่ยมนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ตามสมการเชิงอนุพันธ์มวลสมการที่ (3.20) ดังนั้นสมการที่ (3.32) จึงกลายมาเป็น

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) \quad (3.33)$$

แทนสมการที่ (3.33) นี้ ลงในสมการที่ (3.27ก) จะได้

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.34ก)$$

ในทำนองเดียวกันสมการที่ (3.27ข) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.34ข)$$

ในทำนองเดียวกันสมการที่ (3.27ค) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.34ค)$$

สมการที่ (3.34ก-ค) นี้เรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์ ที่อยู่ในรูปแบบอนุรักษ (Conservation Form)

พจน์ทางด้านขวามือของสมการนาเวียร์-สโตกส์นี้ มีเทอมของค่าความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน ซึ่งจำเป็นจะต้องถูกเขียนให้อยู่ในรูปแบบของความเร็วในแกนต่างๆกัน ในปลายคริสต์ศตวรรษที่ 17 ไอแซค นิวตัน (Isaac Newton) ได้เสนอว่า ค่าความเค้นนี้แปรผันโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว (Velocity Gradient) ข้อเสนอแนะนี้พบว่าสามารถใช้ได้กับของไหลทั่วไปในทางปฏิบัติ ทำให้เป็นที่ยอมรับและเรียกของไหลที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่า ของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluid) ข้อเสนอดังกล่าว ก่อให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเร็วดังนี้

$$\sigma_x = \lambda(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.35ก)$$

$$\sigma_y = \lambda(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.35ข)$$

$$\sigma_z = \lambda(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.35ค)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.35ง)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.35จ)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.35ฉ)$$

โดยที่ μ แทนค่าความหนืดพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity) หรือบางครั้งถูกเรียกว่า ค่าความหนืดที่หนึ่ง (First Viscosity) และ λ คือค่าความหนืดที่สอง (Second Viscosity) ซึ่งสโตกส์ได้ตั้งสมมุติฐาน (Stokes's hypothesis) ไว้ว่า

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (3.36)$$

และพบว่าสมมุติฐานดังกล่าวนี้ใช้ได้ดีหากของไหลนั้นเป็นก๊าซ (Gas)

อย่างไรก็ตามหากของไหลนั้นเป็นของเหลว (Liquid) ซึ่งโดยมากจะเป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible flow) กล่าวคือความหนาแน่น ρ จะคงที่ สมการอนุรักษ์มวล สมการที่ (3.20) จึงลดรูปลงเป็น $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$ หรือ $\text{div } \vec{V} = 0$ ทำให้ค่าความหนืดที่สอง λ ไม่ได้ใช้ในการคำนวณและความเค้นตึงฉากในสมการที่ (3.35ก-ค) จึงมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าความหนืดพลศาสตร์ μ คุณกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2545, น. 44)

เมื่อแทนค่าความเค้นตึงต่างๆที่อยู่ในรูปของความเร็วจากสมการที่ (3.35ก-ฉ) ลงในสมการที่ (3.34ก-ค) จะก่อให้เกิดสมการนาเวียร์-สโตกส์ที่อยู่ในรูปแบบอนุรักษ์ดังนี้

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \bar{\nabla} \cdot \bar{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x
\end{aligned} \tag{3.37ก}$$

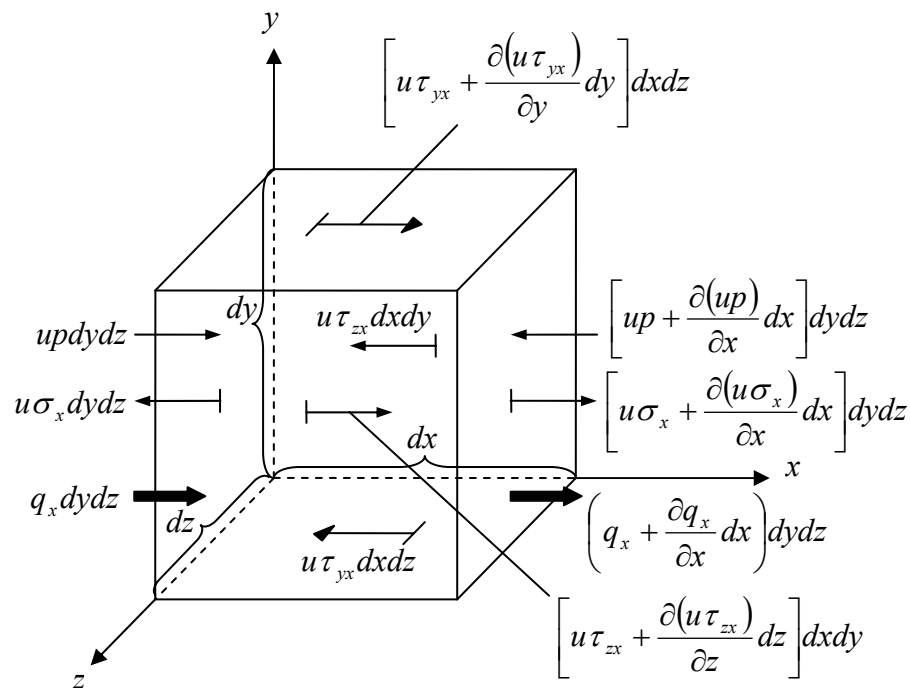
$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \bar{\nabla} \cdot \bar{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y
\end{aligned} \tag{3.37ข}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = & -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \bar{\nabla} \cdot \bar{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z
\end{aligned} \tag{3.37ค}$$

สมการที่ (3.37ก-ค) นี้คือ สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

3.5 สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน

ความจริงส่วนที่สามของการไหลใดๆที่ใช้ประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลคือ กฎที่ว่า พลังงานนั้นไม่สูญหาย (Conservation of energy) ภาพที่ 3.4 แสดงมวลที่มีขนาด dx , dy และ dz ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปกับการไหล



ภาพที่ 3.4 รูปแบบแสดงงานที่เกิดขึ้น และปริมาณฟลักซ์ในทิศแกน x ที่ไหลผ่านก้อนมวล ซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล

สมการเชิงอนุพันธ์พลังงานสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยใช้กฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น

$$A = B + C \quad (3.38)$$

โดยที่

- A คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานในก้อนมวล
- B คือ ปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่มวล
- C คือ อัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ บนก้อนมวลนั้น

หากเริ่มต้นพิจารณาที่พจน์ C แรงชนิดแรกคือแรงจากน้ำหนักของก้อนมวลเอง (Body Force) ซึ่งเมื่อคูณกับความเร็วของการไหลในทิศทางนั้น จะก่อให้เกิดอัตราของงานคือ

$$\rho \vec{f} \cdot \vec{V}(dxdydz)$$

จากภาพที่ 3.4 อัตราของงานที่เกิดขึ้นจากแรงดัน p ที่กระทำบนระนาบ $dydz$ ในทิศแกน x คือ

$$\left[up - \left(up + \frac{\partial(up)}{\partial x} dx \right) \right] dydz = -\frac{\partial(up)}{\partial x} dxdydz$$

อัตราของงานที่เกิดขึ้นจากความเค้นตั้งฉาก σ_x ที่กระทำบนระนาบ $dydz$ ในทิศแกน x คือ

$$\left[u\sigma_x + \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} dx \right] dydz - u\sigma_x dydz = \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} dxdydz$$

และอัตราของงานที่เกิดขึ้นจากความเค้นเฉือน τ_{yx} และ τ_{zx} ที่กระทำบนระนาบ $dxdz$ และบนระนาบ $dxdy$ ตามลำดับในทิศแกน x คือ

$$\left[u\tau_{yx} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} dy \right] dxdz - u\tau_{yx} dxdz = \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} dxdydz$$

$$\left[u\tau_{zx} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} dz \right] dxdy - u\tau_{zx} dxdy = \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} dxdydz$$

ในทำนองเดียวกันอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำบนก้อนมวลในทิศแกน y และในทิศแกน z ก็สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้เช่นกัน ก่อให้เกิดอัตราของงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆบนก้อนมวลนี้ คือ

$$C = \left[-\left(\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right. \\ \left. + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\sigma_z)}{\partial z} \right] dxdydz \quad (3.39) \\ + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}dxdydz$$

สำหรับพจน์ B ซึ่งแทนปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่ก้อนมวลนั้นประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นบนปริมาตรของก้อนมวล เช่น ปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองภายในก้อนมวลนั้น (Internal Heat Generation) ส่วนที่สองคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชันของอุณหภูมิ หากกำหนดให้ $\bar{Q}$ แทนปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นเองต่อมวลหนึ่งหน่วย ดังนั้นปริมาณฟลักซ์ที่เกิดขึ้นเองสำหรับก้อนมวลนี้คือ

$$\rho\bar{Q}(dxdydz)$$

และจากภาพที่ 3.4 ปริมาณฟลักซ์สุทธิอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนในทิศแกน x ผ่านระนาบ $dydz$ ทั้งทางด้านซ้าย และด้านขวาของก้อนมวลคือ

$$\left[q_x - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) \right] dydz = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dxdydz$$

ในทำนองเดียวกัน ปริมาณฟลักซ์สุทธิอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนในทิศแกน y ผ่านระนาบ $dx dz$ ทั้งทางด้านล่าง และด้านบนของก้อนมวลคือ

$$\left[q_y - \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) \right] dx dz = -\frac{\partial q_y}{\partial y} dxdydz$$

ในทำนองเดียวกัน ปริมาณฟลักซ์สุทธิอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนในทิศแกน z ผ่านระนาบ $dxdy$ ทั้งทางด้านล่าง และด้านบนของก้อนมวลคือ

$$\left[q_z - \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \right] dxdy = -\frac{\partial q_z}{\partial z} dxdydz$$

ดังนั้นปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นบนก้อนมวลนี้คือ

$$B = \left[\rho \bar{Q} - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] dx dy dz$$

แต่จากกฎของ ฟูริเยร์ (Fourier's law) ปริมาณฟลักซ์ความร้อน q_x , q_y และ q_z นั้นแปรผันขึ้นอยู่กับความชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ดังนี้

$$q_x = -k_T \frac{\partial T}{\partial x}; q_y = -k_T \frac{\partial T}{\partial y}; q_z = -k_T \frac{\partial T}{\partial z}$$

โดย k_T แทนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของของไหล ดังนั้น พจน์ B จึงกลายมาเป็น

$$B = \left[\rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (3.40)$$

ส่วนพจน์ A แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานในก้อนมวลอันประกอบด้วย พลังงานภายใน (Internal Energy) ซึ่งเกิดการเคลื่อนไหวของโมเลกุลภายในของไหลนั้น และพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากของไหลนั้นเกิดการไหล หาก e แทนพลังงานภายใน และ $V^2/2$ คือพลังงานจลน์ที่ก้อนมวลนั้นไหลด้วยความเร็ว V ดังนั้นพลังงานรวม (Total Energy) คือ $e + V^2/2$ ซึ่งมีหน่วยต่อหนึ่งหน่วยมวล เนื่องจากปริมาณทั้งหมดของก้อนมวลนี้คือ $\rho dx dy dz$ ดังนั้น พจน์ A ซึ่งแทนอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานในก้อนมวลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหลนี้คือ

$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dx dy dz \quad (3.41)$$

ทำการแทนพจน์ A อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานในก้อนมวลสมการที่ (3.41) พจน์ B ปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่มวลสมการที่ (3.40) และพจน์ C อัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ บนก้อนมวลนั้นสมการที่ (3.39) ลงในสมการที่ (3.38) แล้วหารตลอดด้วย $dx dy dz$ ก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์พลังงานดังนี้

$$\begin{aligned}
\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = & \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\
& - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} \\
& + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} \\
& + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \sigma_z)}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

สมการเชิงอนุพันธ์พลังงานสมการที่ (3.42) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา นี้ อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ (Substantial Derivative) ซึ่งจำเป็นจะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ธรรมดา จึงจะสามารถใช้ร่วมกับสมการเชิงอนุพันธ์มวลสมการที่ (3.20) และ สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมสมการที่ (3.37) สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์พลังงานนี้กระทำบนทั้งพจน์ของพลังงานภายใน e และพจน์ของพลังงานจลน์ $V^2/2$ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจในการประดิษฐ์สมการต่อไป จึงขอแสดงขั้นตอนการแปลงรูปแบบของค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ของพลังงานภายใน e แต่เพียงอย่างเดียวก่อน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนในการแปลงรูปแบบค่าอนุพันธ์ เริ่มจากการทำอนุกรมสมการที่ (3.27ก-ค) ด้วยความเร็ว u, v และ w ตามลำดับจะได้

$$\rho \frac{D(u^2/2)}{Dt} = -u \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + u \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + u \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho u f_x \tag{3.43ก}$$

$$\rho \frac{D(v^2/2)}{Dt} = -v \frac{\partial p}{\partial y} + v \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + v \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho v f_y \tag{3.43ข}$$

$$\rho \frac{D(w^2/2)}{Dt} = -w \frac{\partial p}{\partial z} + w \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + w \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + w \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho w f_z \tag{3.43ค}$$

นำสมการทั้งสามนี้มารวมกัน และเนื่องจาก $u^2 + v^2 + w^2 = V^2$ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
\rho \frac{D(V^2/2)}{Dt} = & -u \frac{\partial p}{\partial x} - v \frac{\partial p}{\partial y} - w \frac{\partial p}{\partial z} + u \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\
& + v \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) \\
& + \rho (uf_x + vf_y + wf_z)
\end{aligned} \tag{3.44}$$

นำสมการที่ (3.44) ที่ได้นี้ไปลบออกจากสมการที่ (3.42) โดยใช้ $\rho \vec{f} \cdot \vec{V} = \rho (uf_x + vf_y + wf_z)$ จะได้

$$\begin{aligned}
\rho \frac{De}{Dt} = & \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\
& - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} \\
& + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial w}{\partial z}
\end{aligned} \tag{3.45}$$

สมการที่ (3.45) นี้ยังสามารถเขียนให้สั้นลงได้อีก และสำหรับของไหลที่มีคุณสมบัติไอโซโทรปิก (Isotropic) จะได้ว่า $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ และ $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ดังนั้นสมการที่ (3.45) จึงกลายมาเป็น

$$\begin{aligned}
\rho \frac{De}{Dt} = & \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\
& - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial w}{\partial z} \\
& + \tau_{yx} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \tau_{zx} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \tau_{zy} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{3.46}$$

จากนั้นแทนค่าความเค้นต่างๆในสมการที่ (3.46) นี้ในรูปแบบของความเร็วโดยใช้สมการที่ (3.35 ก-ง) จะได้

$$\begin{aligned}
\rho \frac{De}{Dt} = & \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\
& - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\
& + \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right. \\
& \left. + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]
\end{aligned} \tag{3.47}$$

พจน์ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ของพลังงานภายในสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของอนุพันธ์ธรรมดาได้ โดยเริ่มจากการใช้คำจำกัดความของค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ในสมการที่ (3.12) ประยุกต์เข้ากับค่าพลังงานภายใน e แล้วคูณตลอดด้วยค่าความหนาแน่น ρ

$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \vec{V} \cdot \vec{\nabla} e \tag{3.48}$$

แต่จาก

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = \rho \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

ดังนั้น

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} - e \frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{3.49}$$

และจากความสัมพันธ์ของการประยุกต์ไดเวอร์เจนซ์ (Divergence) ลงบนผลคูณของปริมาณสเกลาร์ (Scalar) และเวกเตอร์ (Vector)

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho e \vec{V}) = e \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) + (\rho \vec{V}) \cdot \vec{\nabla} e$$

ดังนั้น

$$\rho \vec{V} \cdot \vec{\nabla} e = \vec{\nabla} \cdot (\rho e \vec{V}) - e \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \quad (3.50)$$

แทนสมการที่ (3.49) และสมการที่ (3.50) ลงในสมการที่ (3.48) แล้วจัดพจน์จะได้

$$\rho \frac{De}{Dt} = \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} - e \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right] + \vec{\nabla} \cdot (\rho e \vec{V})$$

และผลรวมของพจน์ในวงเล็บสี่เหลี่ยม ในสมการข้างบนนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ตามสมการเชิงอนุพันธ์มวลสมการที่ (3.20) ดังนั้นจึงได้ว่า

$$\rho \frac{De}{Dt} = \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho e \vec{V}) \quad (3.51)$$

แทนสมการที่ (3.51) นี้ลงทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (3.47) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho e \vec{V}) = & \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ & + \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3.52)$$

ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์พลังงานที่เขียนให้อยู่ในรูปของพลังงานภายใน e แต่เพียงอย่างเดียว

แต่เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานทั้งหมดภายในก้อนมวลนั้นประกอบด้วยพลังงานภายใน e และพลังงานจลน์ $V^2/2$ ดังนั้นพจน์เชิงอนุพันธ์สัมบูรณ์ทางด้านซ้ายของสมการที่ (3.42) สามารถเขียนรูปแบบของพจน์เชิงอนุพันธ์ธรรมดาได้เช่นกัน โดยทำตามขั้นตอนจากสมการที่ (3.48) จนถึงสมการที่ (3.51) ด้วยการเปลี่ยนพจน์พลังงานภายใน e ไปเป็นพจน์พลังงานรวม $e + V^2/2$ จะได้

$$\rho \frac{D(e + V^2/2)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] \quad (3.53)$$

แทนสมการที่ (3.53) ลงในสมการที่ (3.42) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] &= \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial(u \sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \sigma_z)}{\partial z} \\ &\quad + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (3.54)$$

สมการที่(3.54) นี้คือ สมการเชิงอนุรักษ์พลังงานที่เขียนอยู่ในรูปของพลังงานรวม $e + V^2/2$

3.6 ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์

สมการเชิงอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน ซึ่งได้ประติษฐ์ขึ้นจากความจริงที่มวลนั้นไม่มีการสูญหาย การใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน และพลังงานนั้นไม่มีการสูญหายตามลำดับก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

สมการเชิงอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.55)$$

สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

แกน x :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho u \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.56\text{ก})$$

แกน y :

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho v \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.56\text{ข})$$

แกน z :

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho w \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.56\text{ค})$$

สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \bar{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \bar{V} \right] &= \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\sigma_z)}{\partial z} \\ &\quad + \rho \bar{f} \cdot \bar{V} \end{aligned} \quad (3.57)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั้งสี่สมการนี้ต่างอยู่ในรูปแบบอนุรักษ (Conservation Form) กล่าวคือ การจับตาวัตถุภาวศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงขนาด dx, dy และ dz ซึ่งตรึงแน่นอยู่กับที่ไม่ไหลไปกับการไหล แล้วเฝ้าดูปริมาณฟลักซ์ ที่ผ่านเข้าออกวัตถุภาวศาสตร์ที่เหลี่ยมนั้น หากพิจารณาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั้งสี่สมการนี้โดยละเอียด จะพบว่าทางด้านซ้ายของทุกสมการ มีพจน์ที่เกี่ยวข้องกับไดเวอร์เจนซ์ของปริมาณฟลักซ์ กล่าวคือ $\vec{\nabla} \cdot (\text{ปริมาณฟลักซ์})$ อยู่เสมอดังนี้

สมการที่ (3.55) : $\rho \vec{V}$ แทนปริมาณฟลักซ์ของมวล

สมการที่ (3.56ก) : $\rho u \vec{V}$ แทนปริมาณฟลักซ์ของโมเมนตัมในทิศแกน x

สมการที่ (3.56ข) : $\rho v \vec{V}$ แทนปริมาณฟลักซ์ของโมเมนตัมในทิศแกน y

สมการที่ (3.56ค) : $\rho w \vec{V}$ แทนปริมาณฟลักซ์ของโมเมนตัมในทิศแกน z

สมการที่ (3.57) : $\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V}$ แทนปริมาณฟลักซ์ของพลังงานรวม

ยิ่งไปกว่านั้นหากพิจารณาสมการทั้งห้าโดยละเอียด จะพบว่าทั้งห้าสมการนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบฟอร์มเดียวกัน กล่าวคือ

$$\frac{\partial \{A_V\}}{\partial t} + \frac{\partial \{B_V\}}{\partial x} + \frac{\partial \{C_V\}}{\partial y} + \frac{\partial \{D_V\}}{\partial z} = \{E_V\} \quad (3.58)$$

โดยที่ $\{A_V\}, \{B_V\}, \{C_V\}, \{D_V\}$ และ $\{E_V\}$ เป็นเวกเตอร์ซึ่งประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\{A_V\} = \left\{ \begin{array}{c} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \end{array} \right\} \quad (3.59)$$

$$\{B_V\} = \left\{ \begin{array}{c} \rho u \\ \rho u^2 + p - \sigma_x \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho wu - \tau_{xz} \\ \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) u + pu - k \frac{\partial T}{\partial x} - u \sigma_x - v \tau_{xy} - w \tau_{xz} \end{array} \right\} \quad (3.60)$$

$$\{C_V\} = \left\{ \begin{array}{c} \rho v \\ \rho uv - \tau_{yx} \\ \rho v^2 + p - \sigma_y \\ \rho wv - \tau_{yz} \\ \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) v + pu - k \frac{\partial T}{\partial y} - u \tau_{yx} - v \sigma_y - w \tau_{yz} \end{array} \right\} \quad (3.61)$$

$$\{D_V\} = \left\{ \begin{array}{c} \rho w \\ \rho uw - \tau_{zx} \\ \rho vw - \tau_{zy} \\ \rho w^2 + p - \sigma_z \\ \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) w + pw - k \frac{\partial T}{\partial z} - u \tau_{zx} - v \tau_{zy} - w \sigma_z \end{array} \right\} \quad (3.62)$$

$$\{E_V\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \rho f_x \\ \rho f_y \\ \rho f_z \\ \rho(uf_x + vf_y + wf_z) + \rho \overline{Q} \end{array} \right\} \quad (3.63)$$

ข้อดีของการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั้งห้าในรูปแบบฟอร์มเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ (3.58) ก็เพราะว่า ในการประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขใดๆเข้าระบบ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยชุดนี้ สามารถมองสมการทั้งห้า เป็นสมการที่มีลักษณะเหมือนกันเพียงสมการเดียว นั่นคือ

$$\frac{\partial A_V}{\partial t} + \frac{\partial B_V}{\partial x} + \frac{\partial C_V}{\partial y} + \frac{\partial D_V}{\partial z} = E_V \quad (3.64)$$

บทที่ 4

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

4.1 ทัวไป

สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของแรงลมต่อโครงสร้างนั้น พฤติกรรมของลมโดยทั่วไปจะมีพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) นั่นคือความเร็วของลมประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนที่เป็นค่าปั่นป่วน (Fluctuation) ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง จึงต้องใช้ทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วน เป็นที่ยอมรับกันว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ที่ประดิษฐ์ขึ้น ในบทที่ 3 นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนได้โดยตรง แต่เนื่องจากการวิเคราะห์โดยตรงนั้น จำเป็นต้องใช้ขนาดของเอลิเมนต์ของการไหล (Domain Elements) ให้มีขนาดเล็กมาก และต้องทำการวิเคราะห์ด้วยช่วงเวลาเพิ่มขึ้น (Time Increment) ที่สั้นมาก อีกทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์ยังอยู่ในรูปแบบสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) เป็นอย่างมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว การวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์ จึงต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำ และหน่วยการประมวลผลที่สูง การเรียบเรียงเนื้อหาและทฤษฎีที่ปรากฏในบทนี้ได้จาก (ANSYS)

4.2 สมการเรย์โนลด์ของการไหลแบบปั่นป่วน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์โดยตรงนั้น ไม่สามารถทำได้ ทฤษฎีการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนในปัจจุบันจึงใช้สมการของเรย์โนลด์ (Reynolds Equation) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ ที่ได้จากการเฉลี่ยของสมการ นาเวียร์-สโตกส์ โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าความเร็วของการไหลและความดันจะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยรวมกับค่าปั่นป่วน

$$\begin{aligned}u &= \bar{u} + u' \\v &= \bar{v} + v'\end{aligned}\tag{4.1ก}$$

$$\begin{aligned}w &= \bar{w} + w' \\p &= \bar{p} + p'\end{aligned}\tag{4.1ข}$$

และ

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} u' dt = 0 & \quad ; & \quad \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} u dt = \bar{u} \\
 \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} v' dt = 0 & \quad ; & \quad \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} v dt = \bar{v} \\
 \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} w' dt = 0 & \quad ; & \quad \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} w dt = \bar{w}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

โดยที่

u, v, w	คือ ความเร็วในทิศแกน x, y, z ตามลำดับ
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	คือ ความเร็วเฉลี่ยในทิศแกน x, y, z ตามลำดับ
u', v', w'	คือ ความเร็วปั่นป่วนในทิศแกน x, y, z ตามลำดับ
$p, \bar{p}, p'$	คือ ความดัน, ความดันเฉลี่ย และความดันปั่นป่วน ตามลำดับ
δt	คือ ช่วงเวลาในการเฉลี่ย

ทำการแทนสมการที่ (4.1ก) ลงในสมการเชิงอนุพันธ์มวล (3.20) โดยพิจารณาการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flows) จะได้ว่า

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \tag{4.3}$$

และทำการแทนสมการที่ (4.1ก-ข) ลงในสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม (3.37 ก-ค) โดยพิจารณาการไหลแบบไม่อัดตัว ไม่คิดผลของค่าความหนืดที่สอง (λ) และไม่คิดผลของแรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง (Body Force) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \rho \overline{u'u'} \right] \\
&+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) - \rho \overline{u'v'} \right] \\
&+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) - \rho \overline{u'w'} \right]
\end{aligned} \tag{4.4ก}$$

$$\begin{aligned}
\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \rho \overline{v'u'} \right] \\
&+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - \rho \overline{v'v'} \right] \\
&+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) - \rho \overline{v'w'} \right]
\end{aligned} \tag{4.4ข}$$

$$\begin{aligned}
\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) - \rho \overline{w'u'} \right] \\
&+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) - \rho \overline{w'v'} \right] \\
&+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) - \rho \overline{w'w'} \right]
\end{aligned} \tag{4.4ค}$$

สมการที่ (4.4ก-ค) นี้คือ สมการเรย์โนลด์

สังเกตว่า สมการเรย์โนลด์ นั้นมีหน้าตาคล้ายคลึงกับสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนต์ของนาเวียร์-สโตกส์ โดยที่มีเทอมเพิ่มขึ้นมา 9 เทอม ซึ่งเรียกว่า Reynolds Stresses Tensor หรือ Turbulence Stresses Tensor คือ

$$-\rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

จะเห็นได้ว่าสมการเรย์โนลด์นั้น มีตัวไม่รู้ค่าเป็นค่าเฉลี่ยของความดันและความเร็วในทิศแกนต่างๆ ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปของการไหลแบบไม่ปั่นป่วน ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ต่อไปได้ อย่างไรก็ตาม เทอมของ Reynolds Stresses นั้นเป็นตัวไม่รู้ค่าเพิ่มขึ้นมา และแบบจำลองของการไหลปั่นป่วน (Turbulence Model) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป มุ่งที่จะหาความสัมพันธ์ของ Reynolds Stresses กับ ความเร็วเฉลี่ยในทิศแกนต่างๆ เพื่อประดิษฐ์สมการเพิ่มเติมแล้วนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการเรย์โนลด์

4.3 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ Model

ทฤษฎี Eddy Viscosity Model (EVM) EVM นี้เป็นที่นิยมและใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วน ทฤษฎีนี้พิจารณาว่า Reynolds Stresses นั้นสัมพันธ์กับ Velocity Gradients ดังนี้ (Reddy and Gartling, 2000, p. 215)

$$-\rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} = \mu_t \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \\ \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

โดยที่

μ_t คือ ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent viscosity)

เมื่อแทนความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.6) ลงในสมการที่ (4.4ก-ค) จะทำให้สมการเรย์โนลด์อยู่ในรูปแบบของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.7\text{ก})$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.7\text{ข})$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.7\text{ค})$$

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจาก EVM นี้ มีหลากหลายที่เป็นที่นิยมและถูกนำไปพัฒนาสร้างเป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูปเพื่อการใช้งาน อันได้แก่ Zero Equation Turbulence Model, Standard $k - \varepsilon$ Model, Standard $k - \omega$ Turbulence Model, Shear Stress Transport Turbulence Model (SST), Re-normalized Group Turbulence Model (RNG), New $k - \varepsilon$ Model due to Shih (NKE), Nonlinear Model of Girimaji (GIR) และ Shi, Zhu, Lumley Model

สำหรับแบบจำลองข้างต้นนี้ Zero Equation Turbulence Model จัดอยู่ในประเภท Zero Equation Model และที่เหลืออีก 7 แบบจำลอง จัดอยู่ในประเภท Two Equation Model เป็นที่ทราบกันดีว่าแบบจำลอง Zero Equation Turbulence Model เป็นแบบจำลองที่ง่ายแต่ความถูกต้องไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองประเภท Two Equation Model ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่แบบจำลองประเภท Two Equation Model โดยเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ Model ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดทางด้านเวลาอีกทั้งแบบจำลองการไหลแบบ

ปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ Model เป็นแบบจำลองที่ใช้กันโดยทั่วไป รวมไปถึงแบบจำลองอีกหกแบบจำลองในประเภท Two Equation Model ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีพื้นฐานสมการมาจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ Model

โดยที่แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ Model มุ่งที่จะพิจารณาค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน μ_t เพื่อใช้ในสมการความสั้มพันธ์ของ Reynolds Stresses กับ Velocity Gradients ตามสมการที่ (4.6) ค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน μ_t พิจารณาจาก (Launder and Spalding, 1974)

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.9)$$

โดยที่ k คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial(\bar{u}k)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(\bar{v}k)}{\partial y} + \rho \frac{\partial(\bar{w}k)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t \phi - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (4.10)$$

และ ε คือ อัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial(\bar{u}\varepsilon)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(\bar{v}\varepsilon)}{\partial y} + \rho \frac{\partial(\bar{w}\varepsilon)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \phi - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4.11)$$

โดยที่ $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ และ $\sigma_\varepsilon = 1.3$ เป็นค่าคงที่ได้จากการทดลองตามลำดับ และ ϕ คือ Viscosity Dissipation มีค่าเท่ากับ

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right]$$

สำหรับ k และ ε ให้นิยามตามนี้

$$k \equiv \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$$

$$\varepsilon \equiv -\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}$$

สมการของ $k - \varepsilon$ สมการที่ (4.10-4.11) นี้ เป็นสมการที่ใช้ประกอบกับสมการเรย์โนลด์ที่อยู่ในรูปค่าความดันเฉลี่ย $\bar{p}$ และความเร็วเฉลี่ย $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ รวมไปถึงสมการเชิงอนุพันธ์มวลที่อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยทั้งหมด

4.4 Log-Law of the Wall

พฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณชั้นนอก (Outer Layers) บริเวณชั้นกลาง (Overlap Layers) และบริเวณชั้นใน (Inner Layers) บริเวณชั้นในนี้คือชั้นของของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิว (Wall) ซึ่งพฤติกรรมของของไหลในชั้นนี้จะถูกควบคุมด้วย Viscous Shear Stressed (τ_{ij}) ส่วนชั้นภายนอก พฤติกรรมจะถูกควบคุมด้วย Reynolds Stresses ส่วนชั้นกลางได้แก่ ชั้นของของไหลที่อยู่ระหว่างชั้นนอกและชั้นใน จะถูกควบคุมด้วย Shear Stresses ทั้งสอง ดังนั้นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Model) ที่มีจึงเหมาะกับการจำลองพฤติกรรมของการไหลในชั้นภายนอกเท่านั้น ส่วนชั้นในและชั้นกลางซึ่งมีความหนาของชั้นการไหลน้อยมากจะสามารถจำลองพฤติกรรมการไหลได้ด้วย Log-Law ของพื้นผิว ในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนนั้น สามารถละเว้นการพิจารณาถึงพฤติกรรมที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นได้ แต่จะทำให้ต้องใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กมากในการจำลองพฤติกรรมการไหลในบริเวณที่ติดกับพื้นผิว

การใช้ Log-Law ของพื้นผิวช่วยในการจำลองการไหล จะทำให้การจำลองของของไหลที่ติดกับพื้นผิวได้ง่ายและสะดวกขึ้น

การวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนในชั้น Log-Law นี้พิจารณาว่าขอบเขตของของไหล (Domain) มีระยะรันจากพื้นผิวและไม่ได้ติดกับพื้นผิว เมื่อทำการวิเคราะห์เสร็จสิ้น

แล้วจึงใช้ ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่ขอบเขตและ Log-Law ของพื้นผิวในการคำนวณ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่พื้นผิว โดยที่มีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\frac{\bar{U}_{\tan}}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}} = \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{E\delta}{\nu} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \right) \quad (4.28)$$

โดยที่

$\bar{U}_{\tan}$	คือ ความเร็วขนานกับพื้นผิว (Velocity Parallel to the Wall)
τ	คือ ความเค้นเฉือน (Shear Stress)
ν	คือ ความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity)
κ	คือ พารามิเตอร์ลาดเอียงของกฎของพื้นผิว (Slope Parameter of Law of the Wall)
E	คือ กฎของค่าคงที่พื้นผิว (Law of the Wall Constant)
δ	คือ ระยะร่นจากพื้นผิว (Distance from the Wall)

เมื่อ $\kappa = 0.4$ และ $E = 9.0$ ตามลำดับ

Log-Law ในสมการที่ (4.28) นั้นมี τ เป็นตัวไม่รู้ค่า เมื่อกำหนด τ นี้ได้แล้ว จะสามารถ คำนวณหาค่าความหนืดที่พื้นผิวได้จาก

$$\mu_w = \delta \frac{\tau}{\bar{U}_{\tan}} \quad (4.29)$$

ค่าความหนืดของเอลิเมนต์ที่ติดกับพื้นผิวคือค่าที่มากกว่าระหว่าง μ และ μ_w

ค่าของ k ที่พื้นผิว (k_{nw}) สามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Equation) ส่วนค่าของอัตราการกระจายพลังงานจลน์ ε ที่พื้นผิวนั้นคำนวณจาก

$$\varepsilon_{nw} = \frac{C_\mu^{0.75} k_{nw}^{1.5}}{\mu} \quad (4.30)$$

โดยที่

ε_{nw} คือ อัตราการกระจายพลังงานจลน์ที่พื้นผิว (Near Wall Dissipation Rate)

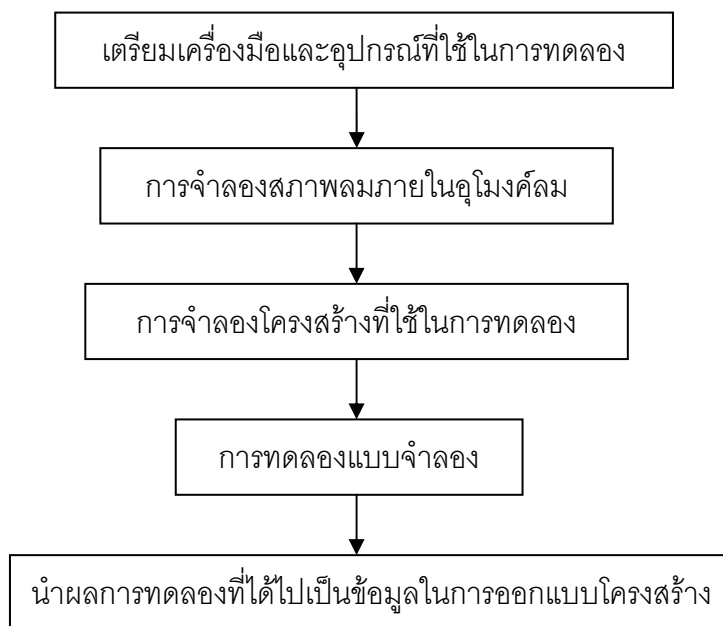
k_{nw} คือ พลังงานจลน์ที่พื้นผิว (Near Wall Kinetic Energy)

บทที่ 5

วิธีการวิจัย

5.1 ทัวไป

การวิเคราะห์ผลของลมที่กระทำกับโครงสร้างโดยทั่วไปแล้ววิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดได้แก่การทดลองแบบจำลองของโครงสร้างในอุโมงค์ลม ภาพที่ 5.1 แสดงขั้นตอนในการทดลองอุโมงค์ลม



ภาพที่ 5.1 ขั้นตอนในการทดลองอุโมงค์ลม

ขั้นตอนในการทดลองอุโมงค์ลมจากภาพที่ 5.1 แบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกการเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองอุโมงค์ลมอันได้แก่ อุโมงค์ลม เครื่องวัดความเร็วลม เครื่องวัดแรงพื้นฐาน เป็นต้น ขั้นตอนที่สอง การจำลองสภาพลมภายในอุโมงค์ลม ในการจำลองลมภายในอุโมงค์ลมให้มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพลมตามธรรมชาตินั้นทำโดยการลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนกว่าจะได้สภาพลมภายในอุโมงค์ลมใกล้เคียงกับสภาพลมตาม

ธรรมชาติที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองให้มีลักษณะเหมือนกับสภาพลมตามธรรมชาติ ได้แก่ Spires และ Roughness Elements เป็นต้น ขั้นตอนที่สามารถจำลองโครงสร้างที่ใช้ในการทดลอง แบบจำลองที่ใช้ในการทดลองจะต้องออกแบบให้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับโครงสร้างจริง นอกจากนี้วัสดุที่ใช้จะต้องเหมาะสมกับวิธีการทดลอง ขั้นตอนที่สุดท้ายของการทดลองแบบจำลอง การทดลองอุโมงค์ลมนั้นมีหลายวิธีเช่น วิธี High Frequency Force Balance Tests (HFFB) หรือ วิธี Simultaneous Pressure Measurement Model Tests เป็นต้น ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างจริงต่อไป

อย่างไรก็ตาม การทดลองอุโมงค์ลมก็ยังมีข้อจำกัดอยู่บางประการคือ

1. ความยากลำบากในการจำลองสภาพลมภายในอุโมงค์ลมให้เป็นไปตามความต้องการ เนื่องจากต้องการอาศัยการลองผิดลองถูก รวมทั้งความยากลำบากในการจำลองแบบจำลองให้ตรงกับความต้องการ ซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการทดลอง
2. หากต้องการทราบรายละเอียดสภาวะการไหล (Detailed Flow Field) อธิบายประกอบถึงพฤติกรรมของการไหลอาจจะทำได้ยากมากหรือใช้เวลาดัดแปลงแก้ไขนาน

5.2 ภาพรวมของวิธีการวิจัย

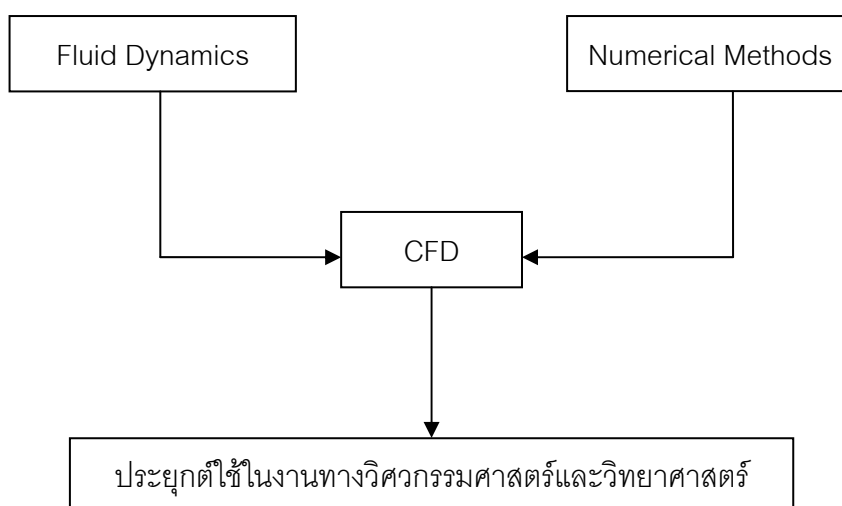
ข้อจำกัดของวิธีการทดลองอุโมงค์ลมดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในการวิเคราะห์ผลของลมที่กระทำกับโครงสร้าง สาเหตุที่เลือกใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเนื่องจาก

1. CFD ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการลองผิดลองถูกของวิธีการทดลองอุโมงค์ลมอีกทั้งการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์สามารถตอบสนองความต้องการได้เป็นอย่างดี
2. CFD มีจุดเด่นตรงที่ Flow Visualization ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดสภาวะการไหล (Detailed Flow Field) ในรูปของเวกเตอร์ได้ รวมทั้งสามารถแสดงรายละเอียดของเส้นความดันได้อีกด้วย
3. การประยุกต์ใช้ CFD ควบคู่กับการทดลองอุโมงค์ลมจะช่วยเพิ่มความมั่นใจในผลการวิเคราะห์ที่ได้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างจริงต่อไป

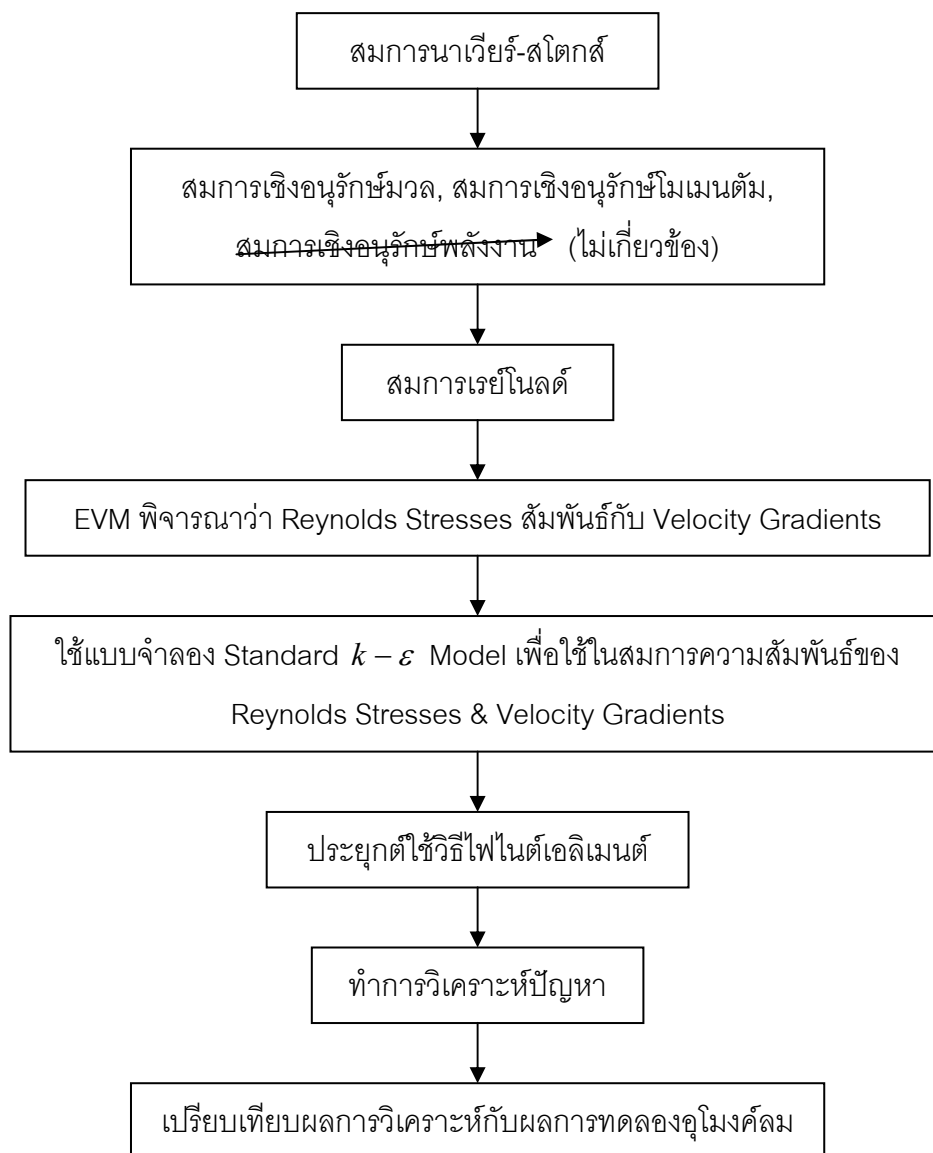
การวิเคราะห์ปัญหาการไหลเพื่อหาความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ ฯลฯ สำหรับใช้ในการออกแบบงานวิศวกรรมหรือการศึกษางานทางวิทยาศาสตร์ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ได้เข้ามามีบทบาทและก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากใน

ปัจจุบัน วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลผสมผสานกับความรู้ทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) โดยทำการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ (Computers) เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสมดุลของการไหลนั้น ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถแสดงได้ด้วยกราฟิกส์ (Color Graphics) (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2545, น. 3)

ภาพรวมของวิธีการวิจัยมีพื้นฐานมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลที่ประดิษฐ์ขึ้นในบทที่ 3 และมีการพัฒนาด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์และสมมุติฐานเพิ่มเติมในบทที่ 4 เพื่อให้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์เข้ากับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่กระทำต่อโครงสร้าง แนวคิดในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลแสดงได้ดังภาพที่ 5.2 ขั้นตอนในการทำวิจัยแสดงได้ในภาพที่ 5.3



ภาพที่ 5.2 แนวคิดวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล



ภาพที่ 5.3 ขั้นตอนในการทำวิจัย

จากภาพที่ 5.3 ขั้นตอนในการทำวิจัยสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ประดิษฐ์ขึ้นจากบทที่ 3
2. สมการนาเวียร์-สโตกส์ ประกอบด้วย สมการเชิงอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass), สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และ สมการเชิงอนุรักษ์

พลังงาน (Conservation of energy) งานวิจัยนี้ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงละเว้นสมการเชิงอนุรักษ์พลังงาน

3. สมการเรย์โนลด์ (Reynolds Equation) ประดิษฐ์ขึ้นในบทที่ 4 พัฒนามาจากสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยพิจารณาว่าเป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flows) ไม่คิดผลของค่าความหนืดที่สอง (λ) และไม่คิดผลของแรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง (Body Force) โดยมีเทอมที่เพิ่มขึ้นมาเรียกว่า Reynolds Stresses
4. ทฤษฎี Eddy Viscosity Model (EVM) ประดิษฐ์สมการความสัมพันธ์ของ Reynolds Stresses กับ Velocity Gradients
5. ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ Model เพื่อเป็นสมการเพิ่มเติมในสมการความสัมพันธ์ของ Reynolds Stresses กับ Velocity Gradients แล้วแทนลงในสมการเรย์โนลด์ ถึงขั้นตอนนี้แล้วสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลจะอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
6. ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศเพื่อวิเคราะห์ปัญหา การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะอธิบายในรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.3
7. ลักษณะของปัญหาที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มี 3 กรณี กรณีแรกทำการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีขนาดอัตราส่วนต่างๆ และคำนึงถึงผลของทิศทางลมในบทที่ 6 กรณีที่สองทำการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีผลของอาคารข้างเคียงลักษณะต่างๆ ในบทที่ 7 และกรณีสุดท้ายทำการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่ออาคารคู่แฝดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคารในบทที่ 8 โดยจะเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธี CFD ในแต่ละกรณีกับผลการทดลองอุโมงค์ลมก่อนหน้า

5.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็

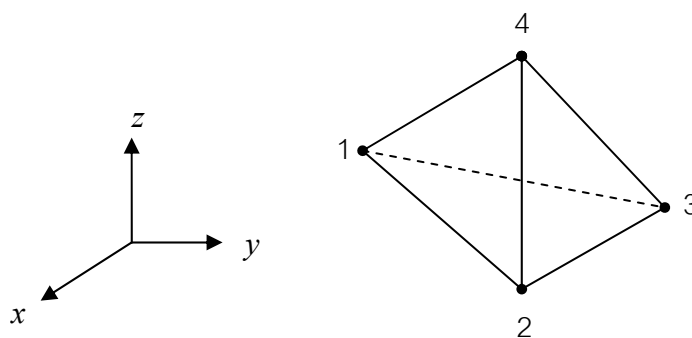
คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2547, น. 4)

การหาผลเฉลยแม่นยำตรงที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือ ทำการเปลี่ยนค่าผลเฉลยแม่นยำตรงที่มีจำนวนอนันต์ค่ามาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนนับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วย เอลิเมนต์ (Elements) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน โดยแต่ละเอลิเมนต์ถูกต่อกันด้วยจุดต่อ (Node) สมการที่ใช้สร้างในแต่ละเอลิเมนต์จะต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่ จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้ากันก่อให้เกิดสมการชุดใหญ่ ขั้นตอนต่อมาจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณ การเลือกใช้เอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับปัญหารวมทั้งการแบ่งเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับรูปร่างของปัญหาลดจนความละเอียดที่เพียงพอจะลดข้อผิดพลาดของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

มีนักพัฒนาโปรแกรมจำนวนไม่น้อยได้เสนอโปรแกรมสำเร็จรูปที่อาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลให้แก่ผู้ใช้งานได้เลือกใช้ โปรแกรมสำเร็จรูปการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (ANSYS) โดยเลือกโหมดการทำงานแบบ FLOTAN CFD ซึ่งมีเอลิเมนต์ 2 ชนิดให้เลือกใช้คือ FLUID141 และ FLUID142 ในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์ FLUID142 โดยที่ทำการวิเคราะห์ในระบบสามมิติ (3-D)

5.3.1 ชนิดเอลิเมนต์ (Element Type)

เอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองอากาศภายในขอบเขต (Domain) งานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3-D) คือ เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral Element) แสดงได้ดังภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.4 เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3-D) ชนิดเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral Element)

จากภาพที่ 5.4 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral Element) ประกอบด้วย 4 จุดต่อ แต่ละจุดต่อมี 6 ตัวแปรอิสระ (Degree of Freedom) ได้แก่ ความเร็วเฉลี่ยในทิศทางสามแกน ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$) ความดันเฉลี่ย ($\bar{p}$) พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k) อัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate, ε) สำหรับขนาดของเอลิเมนต์ มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ 0.005 เมตร บริเวณรอบๆโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์ หลังจากนั้นค่อยๆเพิ่มขนาดของเอลิเมนต์เมื่อไกลออกไป ขนาดของเอลิเมนต์ที่ใหญ่ที่สุดมีขนาดประมาณ 0.1 เมตร

5.3.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ขอบเขต (Domain) ของการไหลของลมที่ครอบคลุมโครงสร้างในแต่ละด้านจะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) รวมทั้งที่ผิวของโครงสร้างให้ถูกต้องและสอดคล้องกับสมมติฐานที่กำหนด

สมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของลมที่เข้าปะทะโครงสร้างคือ

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (5.1)$$

โดยที่

$\bar{u}(z)$	คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง z จากพื้นดิน ตามทิศทาง x มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที (m/s) (อ้างอิงจากข้อมูลการทดลองอุโมงค์ลม)
$\bar{u}_{ref}$	คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับอ้างอิงมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที (m/s)
z	คือ ความสูงที่ต้องการหาความเร็วลมเฉลี่ยมีหน่วยเป็น เมตร (m)
z_{ref}	คือ ความสูงที่ระดับอ้างอิงมีหน่วยเป็น เมตร (m)
α	คือ เลขยกกำลังขึ้นอยู่กับสภาพพื้นผิวและภูมิประเทศ

สมการที่ (5.1) นี้เรียกว่าสมการกฎยกกำลัง (Power Law)

$$k(z) = \frac{3}{2} [I(z) \cdot \bar{u}(z)]^2 \quad (5.2)$$

โดยที่

$k(z)$ คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)
 $I(z)$ คือ ความเข้มของความปั่นป่วนของลม (Turbulence Intensity) ที่ระดับความสูง z จากพื้นดิน (อ้างอิงจากข้อมูลการทดลองอุโมงค์ลม)

$$\varepsilon(z) = \frac{C_\mu [k(z)]^{\frac{3}{2}}}{L(z)} \quad (5.3)$$

โดยที่

$\varepsilon(z)$ คือ อัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate)
 $L(z)$ คือ Dissipation length สามารถหาได้จากสมการที่ (5.4)

$$L(z) = \frac{\sqrt{C_\mu \cdot k(z)}}{\frac{\partial \bar{u}(z)}{\partial z}} \quad (5.4)$$

โดยที่

$\frac{\partial \bar{u}(z)}{\partial z}$ คือ ค่าอนุพันธ์ของความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง z จากพื้นดิน

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้เป็นอย่างนี้ โดยพิจารณาภาพที่ 5.5 ประกอบ

พื้นผิวของโครงสร้าง: พิจารณาเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Bluff Body) โดยให้ความเร็วทั้งสามทิศแกนเป็นศูนย์ (Non-slip Condition)

ด้านต้นลม: ความเร็วในทิศแกน x พิจารณาจากสมการที่ (5.1)

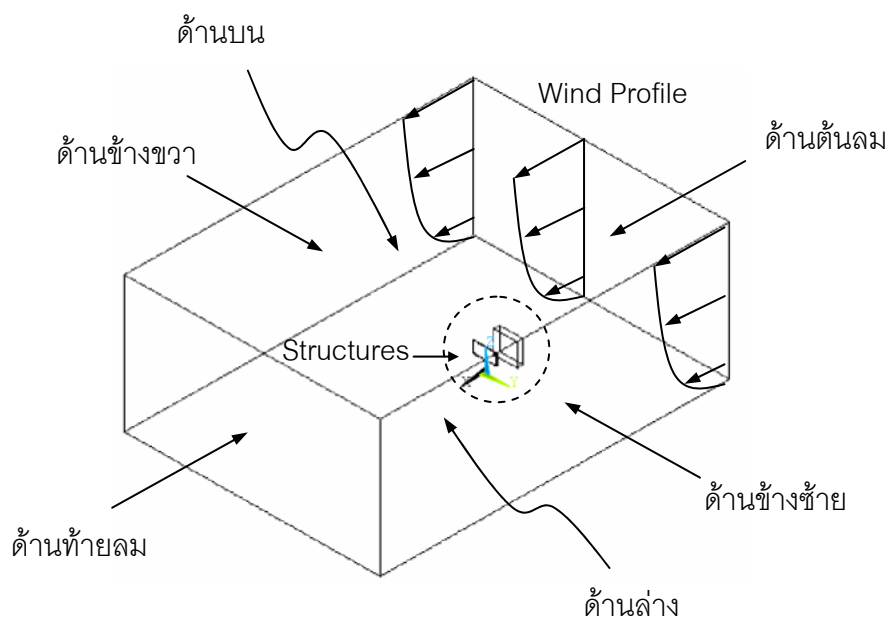
ความเร็วในทิศแกน y เป็นศูนย์

ความเร็วในทิศแกน z เป็นศูนย์

ค่าพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน พิจารณาจากสมการที่ (5.2)

ค่าอัตราการกระจายพลังงานพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน พิจารณาจากสมการที่ (5.3)

ด้านท้ายลม:	เป็นการไหลแบบอิสระ โดยให้ค่าความดันเป็นศูนย์
ด้านล่าง:	เป็นระนาบพื้น ความเร็วทั้งสามทิศแกนเป็นศูนย์
ด้านบน:	ความเร็วในทิศแกน z เป็นศูนย์
ด้านข้างขวา:	ความเร็วในทิศแกน y เป็นศูนย์
ด้านข้างซ้าย:	ความเร็วในทิศแกน y เป็นศูนย์



ภาพที่ 5.5 นิยามด้านของขอบเขต

5.3.3 คุณสมบัติของอากาศ

การกำหนดค่าคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังตารางที่ 5.1 โดยที่อ้างอิงจาก (White, 2005, p. 24)

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความหนาแน่นของอากาศ (ρ)	1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m ³)
ความหนืดพลศาสตร์ (μ)	1.8×10^{-5} (นิวตันวินาที)ต่อตารางเมตร (N's/m ²)

บทที่ 6

กรณีศึกษา: ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน
และกรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ

6.1 ทัวไป

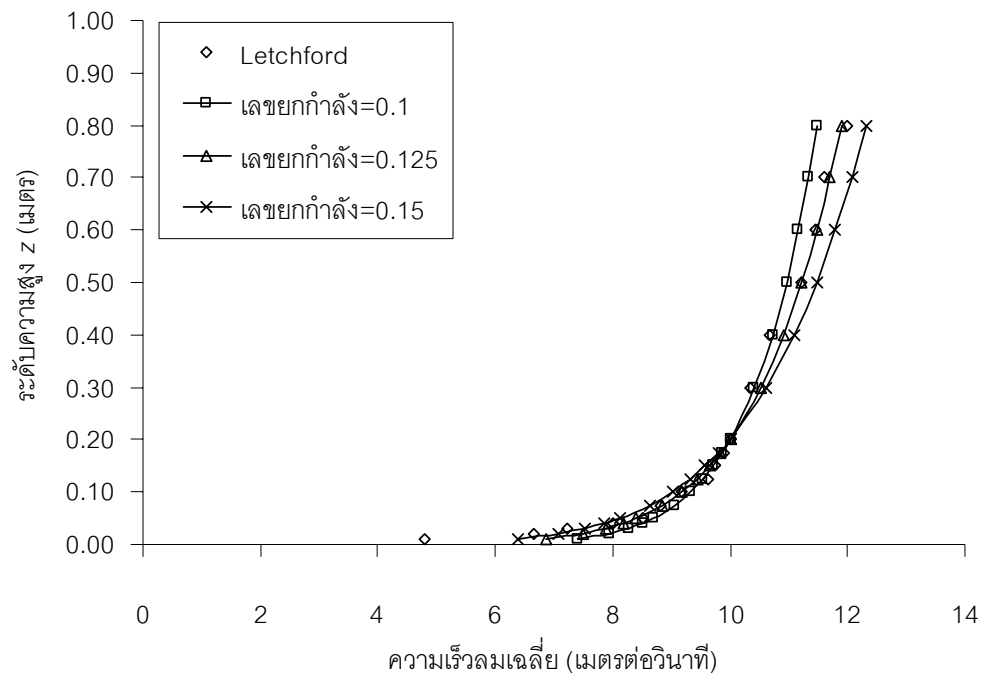
ในประเทศไทยโดยเฉพาะในเมืองหลวง การโฆษณาและประชาสัมพันธ์ส่วนหนึ่งได้ใช้บริการผ่านทางสื่อโครงสร้างป้ายโฆษณาและก็เป็นที่ยอมรับอย่างมาก จากการที่ธุรกิจนี้เติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้ป้ายขนาดใหญ่เพิ่มจำนวนมากขึ้น และทำให้เกิดปัญหาต่างๆตามมาเช่น ความเป็นระเบียบเรียบร้อย เป็นต้น นอกจากนั้นปัญหาก็อย่างหนึ่งที่สำคัญคือ ด้านความปลอดภัย ในบางครั้งการเกิดลมพายุที่พัดแรงหรือการเกิดลมมรสุมในช่วงฤดูที่มีลมพัดแรง โครงสร้างป้ายที่ไม่ได้ออกแบบให้แข็งแรงเพียงพออาจจะพังเสียหายลงมาได้ เนื่องจากป้ายขนาดใหญ่จะรับแรงปะทะของลมเป็นส่วนใหญ่ดังนั้นในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีขนาดอัตราส่วนต่างๆกันและคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ

การวิเคราะห์ในบทนี้ใช้ข้อมูลอ้างอิงเชิงตัวเลขในการกำหนดสภาพขอบเขตด้านต้นลมในบทที่ 5 หัวข้อ 5.3.2 จากงานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) โดยมีค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที ที่ระดับขอบบนของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ความสูงจากพื้น 0.2 เมตร และค่าเลขยกกำลัง (α) ที่เหมาะสมกับลักษณะของลมเท่ากับ 0.125 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate, ε) แสดงได้ในภาพที่ 6.1 ส่วนค่าความเข้มของความปั่นป่วนของลม (Turbulence Intensity) แสดงได้ดังภาพที่ 6.2

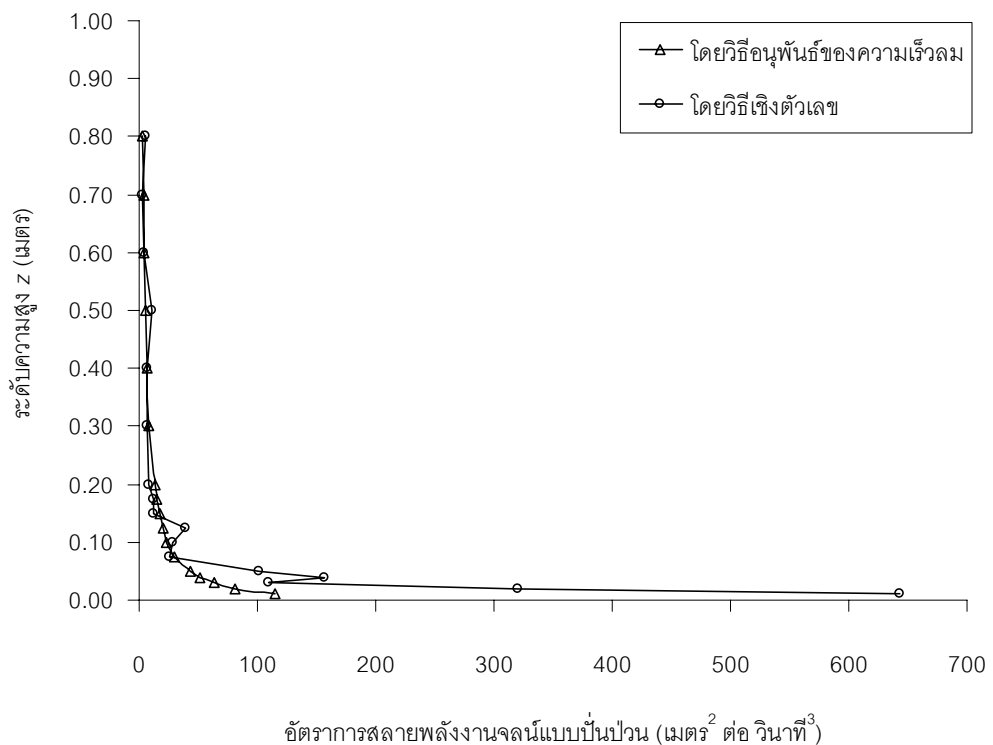
งานวิจัยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ต่างๆ โดยทั่วไปมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ทางด้านต้นลม 3 กรณี ได้แก่ ค่าความเร็วลม ค่าพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k) และค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate, ε) ในกรณีของค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน จากการค้นคว้างานวิจัยต่างๆ ชี้ให้เห็นถึงข้อสรุปของค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนว่าเป็นการประมาณโดยมีการคำนวณในหลากหลายรูปแบบ ทั้งนี้ในการประมาณค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนมีสองรูปแบบคือ รูปแบบคงที่

และรูปแบบแปรเปลี่ยนตามความสูง ในส่วนของรูปแบบแปรเปลี่ยนตามความสูงมีการคำนวณค่า อัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนสองลักษณะ ลักษณะแรกคำนวณในรูปค่าความเร็วลมเสียดทาน (Friction Velocity) และลักษณะที่สองคำนวณในรูปค่าอนุพันธ์ของความเร็วลม (Cowan, Castro, and Robins, 1997), (Delaunay, Lakehal, Barre and Sacre, 1997), (Stathopoulos, 1997), (Tsuchiya, Murakami, Mochida, Kondo and Ishida, 1997) และ (Lien, Yee and Cheng, 2004)

เนื่องจากงานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) ไม่ได้กำหนดค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate, ϵ) มาให้รวมไปถึงค่าความเร็วลมเสียดทาน (Friction Velocity) อีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การคำนวณค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนในรูปค่าอนุพันธ์ของความเร็วลม โดยการหาค่าเลขยกกำลัง (α) ที่เหมาะสมกับลักษณะลมที่ได้จากการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) โดยมุ่งเน้นความเหมาะสมกันไปที่ระดับความสูงของโครงสร้างเป็นสำคัญเพื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ (5.3) และ (5.4) ในบทที่ 5 อย่างไรก็ตามค่าอนุพันธ์ของความเร็วลมสามารถคำนวณแบบเชิงตัวเลขได้ก็คือ การหาค่าความชัน (Slope) ระหว่างจุดสองจุด พิจารณาภาพ 6.1 ข แสดงค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนในรูปค่าอนุพันธ์ของความเร็วลม และแบบเชิงตัวเลข จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนแบบเชิงตัวเลขพบปัญหาของความไม่ต่อเนื่องกันของค่าความชัน อีกทั้งที่บริเวณความสูงน้อยๆ ใกล้กับระดับพื้นมีความไม่สม่ำเสมอของค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนเป็นอย่างมาก ซึ่งไม่มีความสมเหตุสมผลมากนัก โดยที่ปัญหาดังกล่าวไม่พบในการคำนวณค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนในรูปค่าอนุพันธ์ของความเร็วลมโดยการหาค่าเลขยกกำลังที่เหมาะสมกับลักษณะลมซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

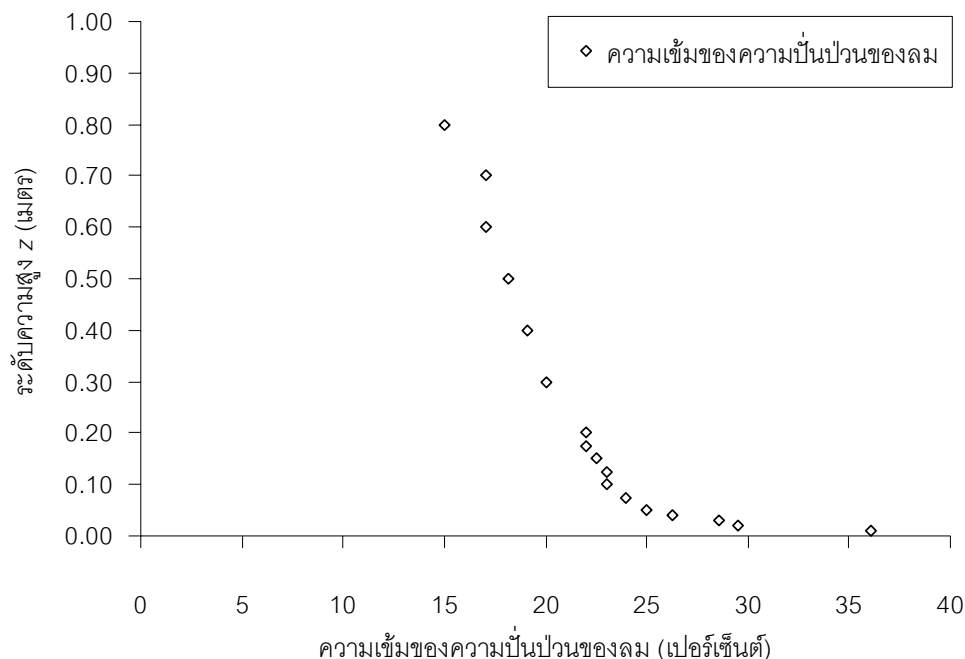


ก. ความเร็วลมเฉลี่ยและค่าเลขยกกำลัง (α) ที่เหมาะสมกับลักษณะของลมเท่ากับ 0.125



ข. อัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน

ภาพที่ 6.1 ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Letchford, 2001)



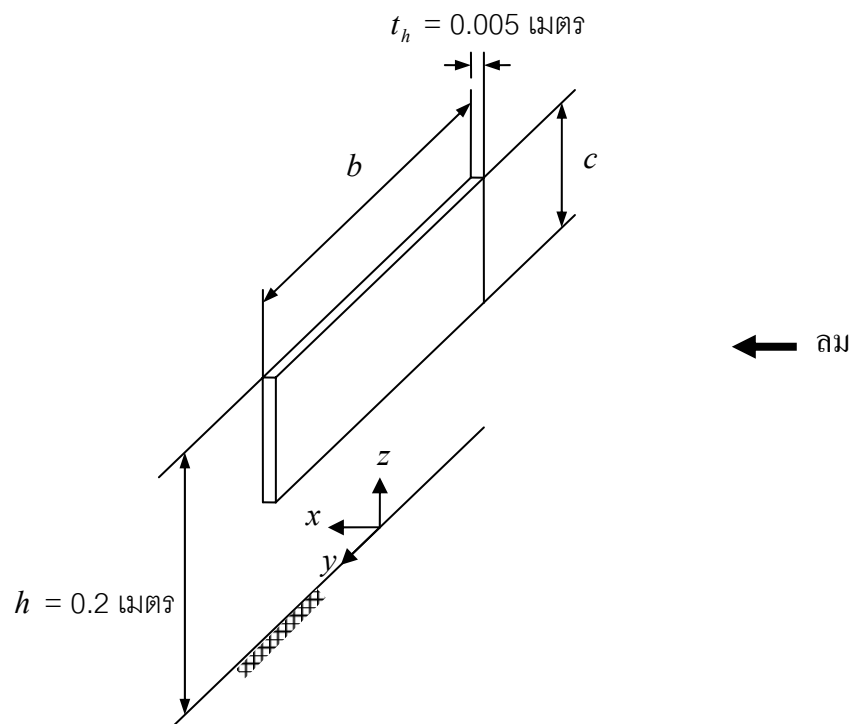
ภาพที่ 6.2 ความเข้มของความปั่นป่วนของลมที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์
(Letchford, 2001)

6.2 การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหา

การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกทำความเข้าใจกับลักษณะปัญหา ขั้นตอนที่สองทำการสร้างขอบเขตของการวิเคราะห์ และขั้นตอนสุดท้ายทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์

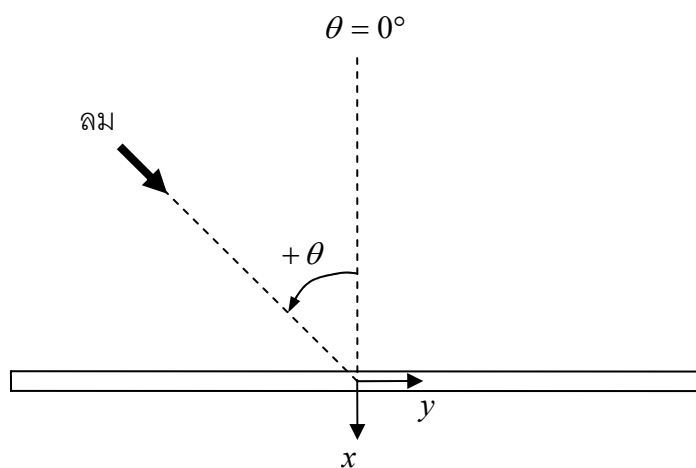
6.2.1 ลักษณะของปัญหา

ลักษณะของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ใช้ในการวิเคราะห์ในบทนี้มี 2 ลักษณะได้แก่ ลักษณะแรกเป็นโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กัน ลักษณะที่สองเป็นโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีอัตราส่วน ขนาดความกว้างโครงสร้างป้ายโฆษณา (b) ต่อความสูงโครงสร้างป้ายโฆษณา (c) (Aspect Ratio, b/c) เท่ากับ 2 และอัตราส่วนความสูงโครงสร้างป้ายโฆษณา (c) ต่อความสูงทั้งหมดจากพื้น (h) (Clearance Ratio, c/h) เท่ากับ 0.5 ในการวิเคราะห์ผลของทิศทางลมที่กระทำ แสดงได้ดังภาพที่ 6.3 และภาพที่ 6.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 6.3 นิยามของโครงสร้างป้ายโฆษณา

จากภาพที่ 6.3 การวิเคราะห์ลักษณะแรกโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กัน มีความสูงทั้งหมดจากพื้นจนถึงยอดโครงสร้างป้ายโฆษณา (h) คงที่เท่ากับ 0.2 เมตร และความหนา (t_h) คงที่เท่ากับ 0.005 เมตร แต่จะแปรเปลี่ยนตามความกว้างของโครงสร้างป้ายโฆษณา (b) และความสูงของโครงสร้างป้ายโฆษณา (c) ซึ่งจะมีทั้งหมด 9 ขนาดดังนี้ อัตราส่วนขนาดความกว้างโครงสร้างป้ายโฆษณา (b) ต่อความสูงโครงสร้างป้ายโฆษณา (c) (Aspect Ratio, b/c) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 และอัตราส่วนความสูงโครงสร้างป้ายโฆษณา (c) ต่อความสูงทั้งหมดจากพื้น (h) (Clearance Ratio, c/h) เท่ากับ 0.5, 0.9 และ 1 ตามลำดับ

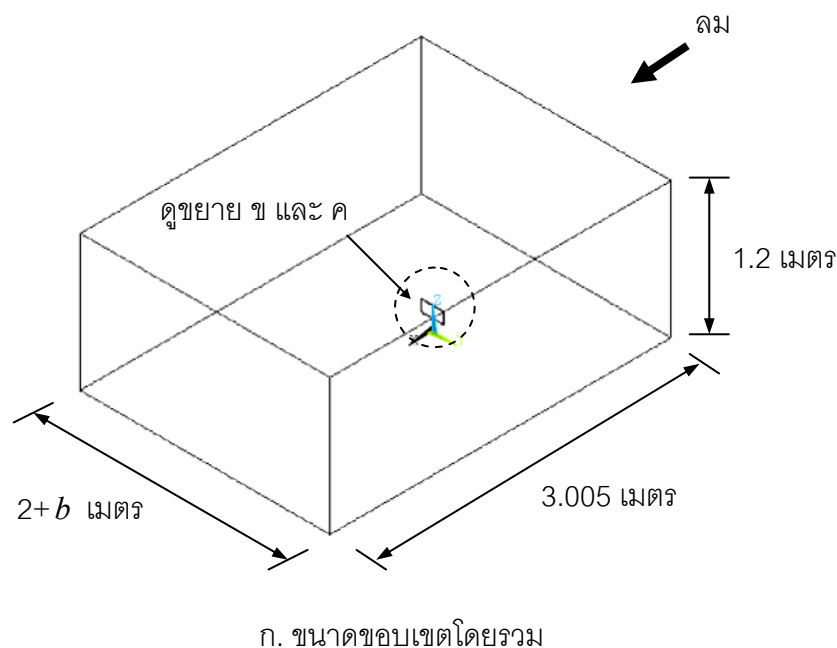


ภาพที่ 6.4 ทิศทางลมที่กระทำ

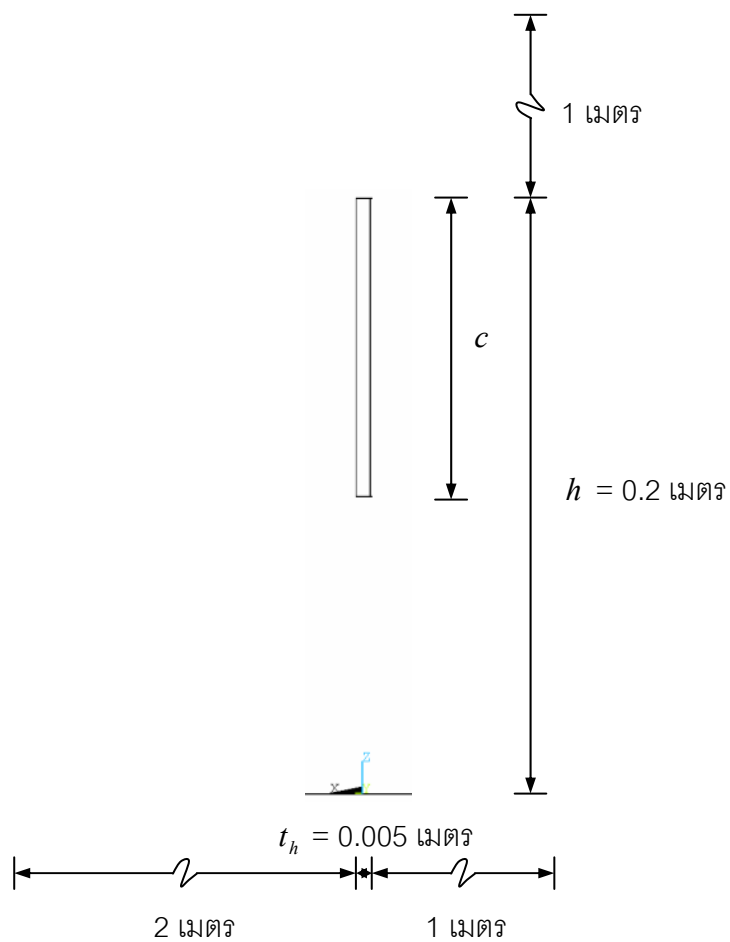
จากภาพที่ 6.4 ลักษณะที่สองการวิเคราะห์จะคำนึงถึงผลของทิศทางลมเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเลือกขนาดของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดเดียวกันคือ อัตราส่วน Aspect Ratio เท่ากับ 2 และ อัตราส่วน Clearance Ratio เท่ากับ 0.5 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือมีขนาดความกว้าง (b) 0.2 เมตร และความสูง (c) 0.1 เมตร มีทิศทางลมที่กระทำ 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา ตามลำดับ ให้ทิศทางลมเป็นบวกเมื่อโครงสร้างป้ายโฆษณาหมุนตามเข็มนาฬิกา

6.2.2 การสร้างขอบเขต

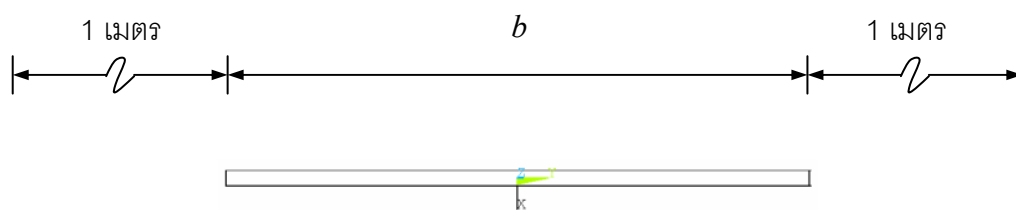
ขอบเขต (Domain) ของอากาศที่ครอบคลุมโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างพอสมควรเพื่อที่จะแน่ใจได้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ที่กำหนดจะไม่รบกวนสภาวะการไหลของลมรอบโครงสร้าง การสร้างขอบเขตการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กันและกรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลม แสดงได้ดังภาพที่ 6.5 และภาพที่ 6.6 ตามลำดับ



ภาพที่ 6.5 ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กัน



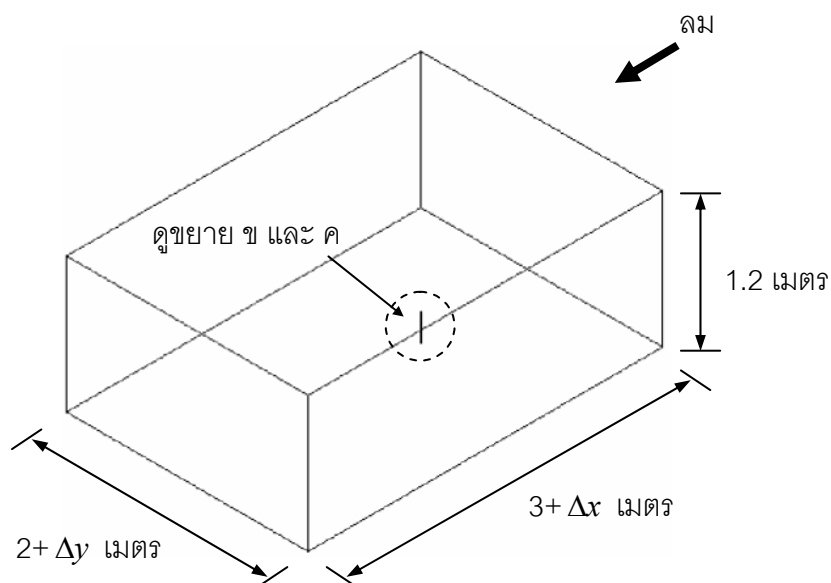
ข. ภาพขยายด้านข้าง



ค. ภาพขยายด้านบน

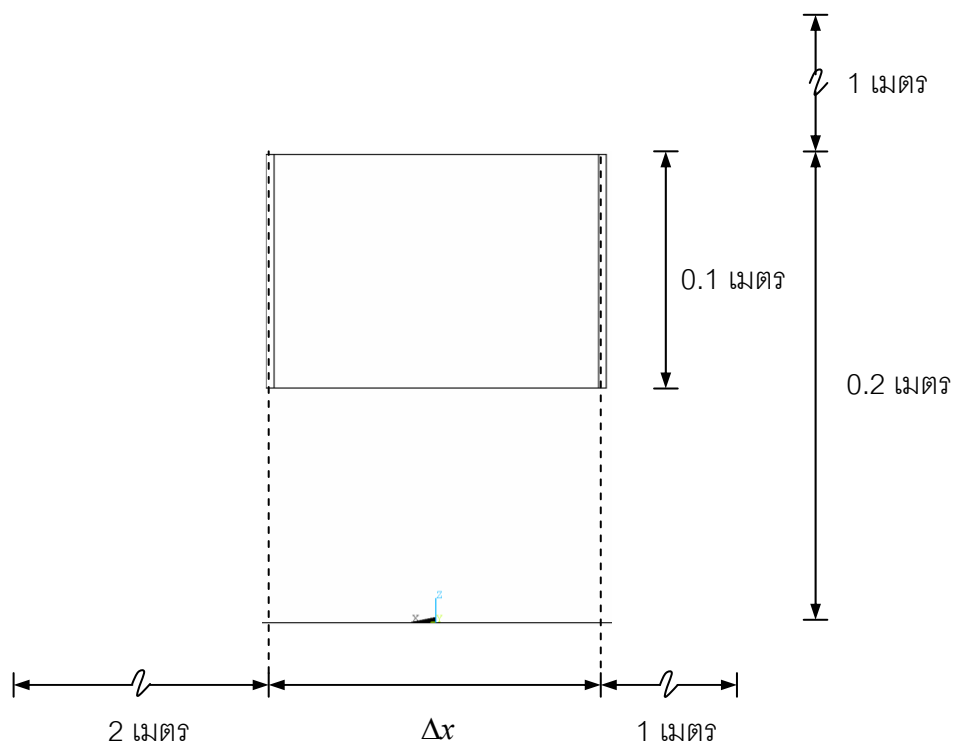
ภาพที่ 6.5 (ต่อ) ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กัน

จากภาพที่ 6.5 ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กัน มีระยะจากขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านตันลมเท่ากับ 1 เมตร ระยะจากขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านท้ายลมเท่ากับ 2 เมตร ระยะจากขอบบนโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านบนเท่ากับ 1 เมตร และระยะจากขอบข้างโครงสร้างป้ายโฆษณาทั้งสองข้างจนถึงด้านข้างขวาและด้านข้างซ้ายมีระยะเท่ากันคือ 1 เมตร

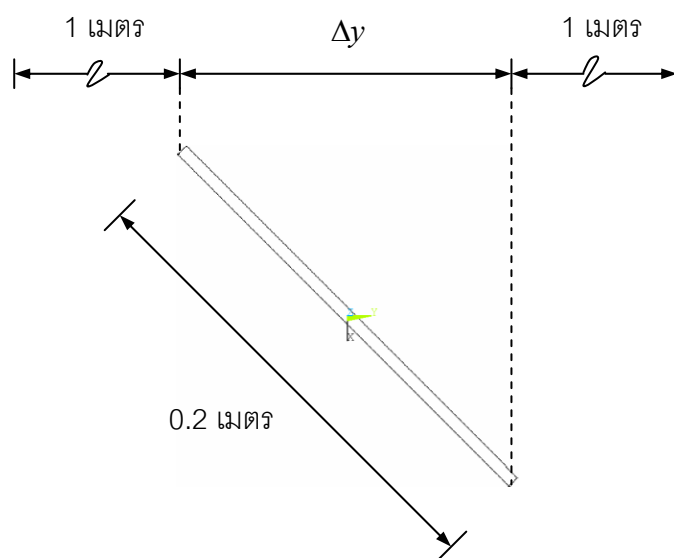


ก. ขนาดของขอบเขตโดยรวม

ภาพที่ 6.6 ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ
(45 องศา)



ข. ภาพขยายด้านข้าง



ค. ภาพขยายด้านบน

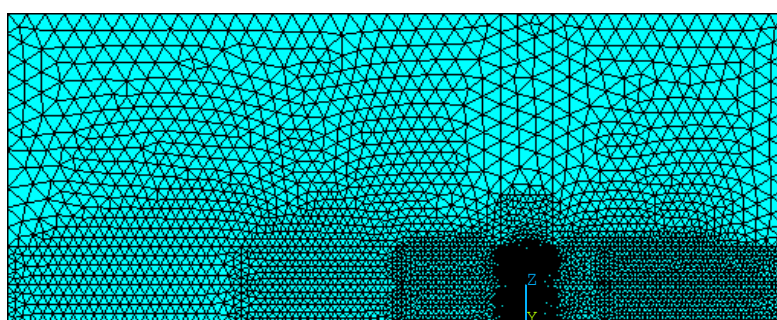
ภาพที่ 6.6 (ต่อ) ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ
(45 องศา)

จากภาพที่ 6.6 ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ เมื่อหมุนโครงสร้างป้ายโฆษณาแล้วจะมีระยะจากขอบข้างขวาโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านต้นลมเท่ากับ 1 เมตร ระยะจากขอบข้างซ้ายโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านท้ายลมเท่ากับ 2 เมตร ระยะจากขอบบนโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านบนเท่ากับ 1 เมตร และระยะจากขอบข้างทั้งสองของโครงสร้างป้ายโฆษณาจนถึงด้านข้างขวาและด้านข้างซ้ายมีระยะเท่ากันคือ 1 เมตร ส่วนระยะ Δx และ Δy จะแปรเปลี่ยนไป โดยที่จะสอดคล้องกับทิศทางลมที่กระทำ

จากการสำรวจงานวิจัยก่อนหน้ามีคำแนะนำเกี่ยวกับขนาดขอบเขตของการคำนวณดังนี้ ความยาวของด้านต้นลม $5H$ ความยาวของด้านท้ายลม $15H$ และความกว้างด้านข้าง $4H$ โดยที่ H คือความสูงของวัตถุ อย่างไรก็ตามขนาดของขอบเขตอาจขึ้นอยู่กับปัญหาที่วิเคราะห์ (Cowan, Castro, and Robins, 1997, p. 538)

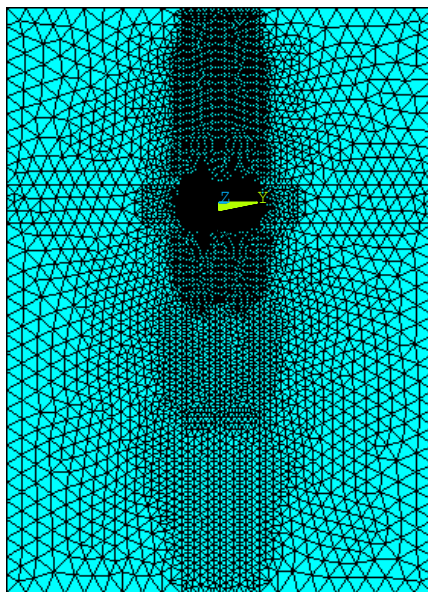
6.2.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เอลิเมนต์ของอากาศที่สร้างขึ้นสำหรับการวิเคราะห์จะมีขนาดประมาณ 0.005 เมตร บริเวณรอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณา หลังจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขนาดของเอลิเมนต์เมื่อไกลออกไป ขนาดเอลิเมนต์ที่ใหญ่ที่สุดมีขนาดประมาณ 0.1 เมตร การแบ่งเอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์แสดงได้ดังภาพที่ 6.7

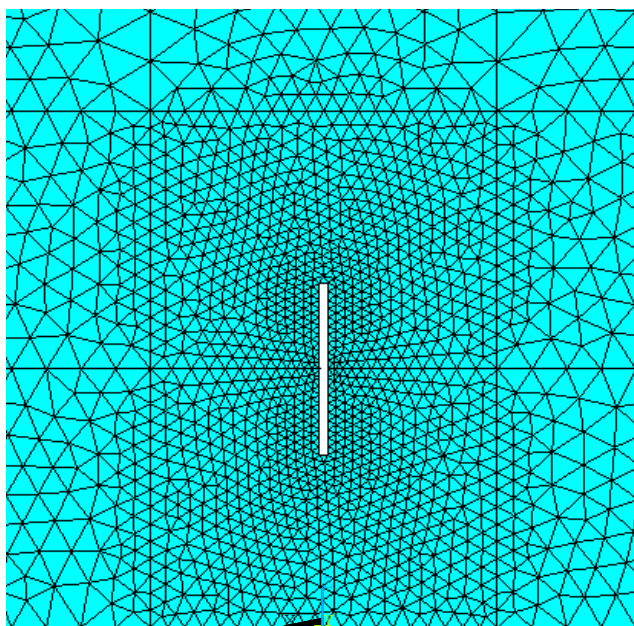


ก. ภาพตัดแนวตั้งที่จุดศูนย์กลางโครงสร้างป้ายโฆษณา

ภาพที่ 6.7 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณา

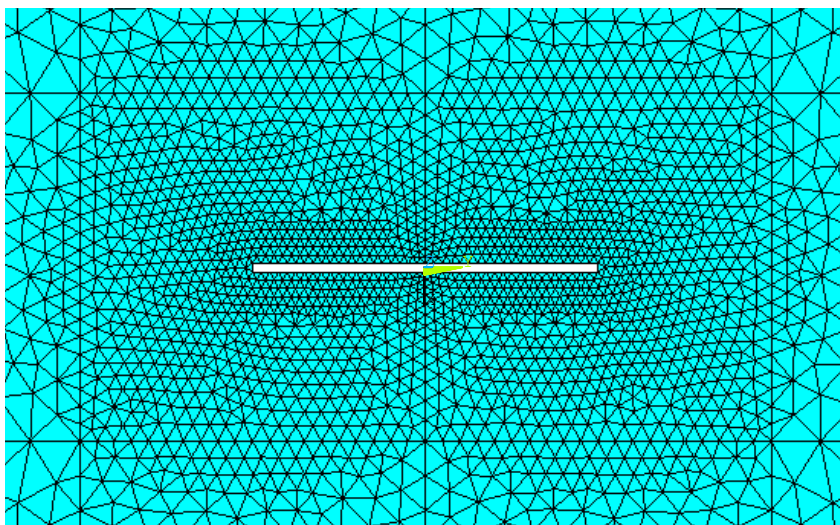


ข. ภาพตัดแนวราบที่จุดศูนย์กลางโครงสร้างป้ายโฆษณา

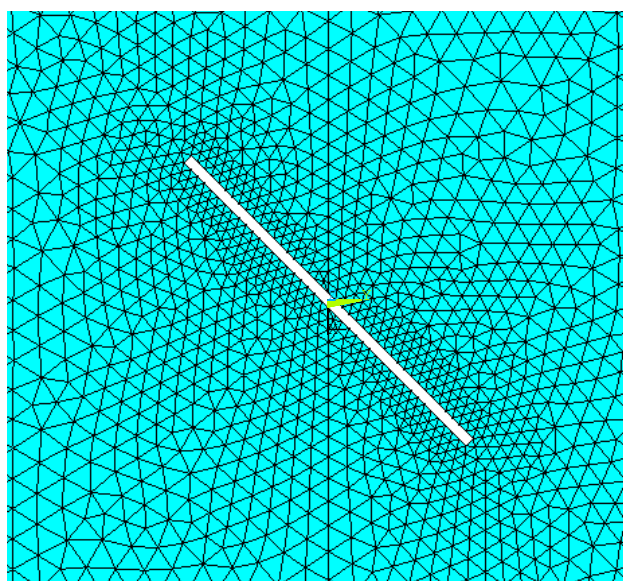


ค. ภาพขยายภาพตัดแนวดิ่ง

ภาพที่ 6.7 (ต่อ) ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณา



ง. ภาพขยายภาพตัดแนวราบ



จ. ภาพขยายภาพตัดแนวราบกรณีทิศทางลม 45 องศา

ภาพที่ 6.7 (ต่อ) ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณา

6.3 วิธีการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างป้ายโฆษณาในกรณีต่างๆ จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยในทิศทางต่างๆ ได้แก่ สัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x สัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y และสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิดเฉลี่ยรอบทิศแกน z โดยมีสมการที่ใช้คำนวณตามสมการที่ 6.1 ถึงสมการที่ 6.3 ตามลำดับ

$$C_D = \frac{\bar{F}_x}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}_{ref}^2 bc} \quad (6.1)$$

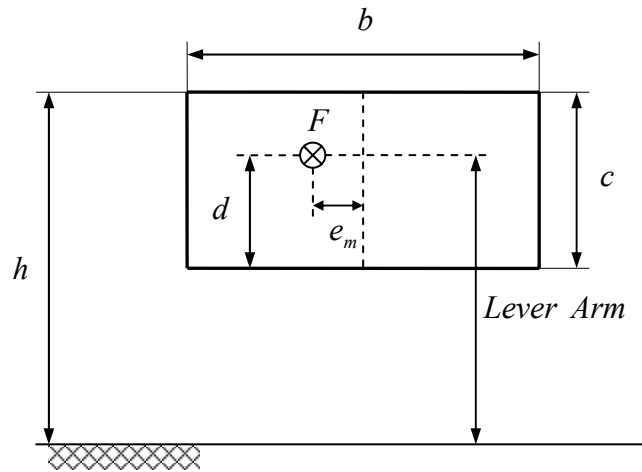
$$C_L = \frac{\bar{F}_y}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}_{ref}^2 bc} \quad (6.2)$$

$$C_T = \frac{\bar{M}_z}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}_{ref}^2 b^2 c} \quad (6.3)$$

โดยที่

C_D	คือ สัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x
$\bar{F}_x$	คือ แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)
C_L	คือ สัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y
$\bar{F}_y$	คือ แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)
C_T	คือ สัมประสิทธิ์โมเมนต์บิดเฉลี่ยรอบทิศแกน z
$\bar{M}_z$	คือ โมเมนต์บิดเฉลี่ยรอบทิศแกน z มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (N'm)
ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m ³)
$\bar{u}_{ref}$	คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที (m/s)
b	คือ ความกว้างโครงสร้างป้ายโฆษณามีหน่วยเป็นเมตร (m)
c	คือ ความสูงโครงสร้างป้ายโฆษณามีหน่วยเป็นเมตร (m)

ในบางกรณีลมที่กระทำจะทำให้เกิดระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาได้ ปกติแล้วระยะเยื้องศูนย์กลางแบ่งออกได้เป็น 2 แนว คือระยะเยื้องศูนย์กลางแนวตั้ง (Vertical Eccentricity) และระยะเยื้องศูนย์กลางแนวราบ (Horizontal Eccentricity) ตำแหน่งของแรงที่กระทำเยื้องศูนย์กลางมีได้ดังภาพที่ 6.8 และมีสมการที่ใช้คำนวณตามสมการที่ 6.4 และสมการที่ 6.5



ภาพที่ 6.8 นิยามระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ

ก. ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวตั้ง (Vertical Eccentricity) ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวตั้ง (Vertical Eccentricity) แทนด้วยอัตราส่วนของ d/c ในภาพที่ 6.8 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Lever Arm} &= \frac{\overline{M}_y}{F_x} \\ d &= c - (h - \text{Lever Arm}) \\ \frac{d}{c} &= \frac{c - \left(h - \frac{\overline{M}_y}{F_x} \right)}{c} \end{aligned} \quad (6.4)$$

โดยที่

$\overline{M}_y$ คือ โมเมนต์เฉื่อยรอบทศแกน y มีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร (N·m)

h คือ ความสูงทั้งหมดจากพื้นจนถึงยอดโครงสร้างป้ายโฆษณา มีค่าเท่ากับ 0.2 เมตร (m)

ข. ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวราบ (Horizontal Eccentricity) ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวราบ (Horizontal eccentricity) แทนด้วยอัตราส่วนของ e_m/b หาได้จากอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์บิดเฉื่อยรอบทศแกน z ต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทศแกน x ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

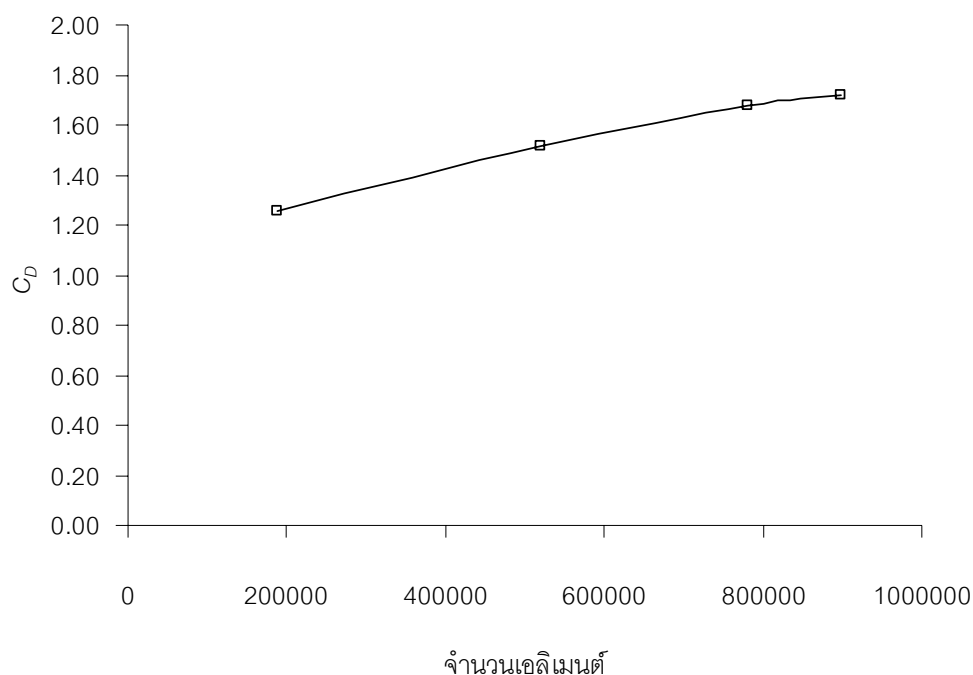
$$\frac{e_m}{b} = \frac{C_T}{C_D} \quad (6.5)$$

6.4 ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ขนาดของขอบเขตที่ใช้ในการจำลองลม การแบ่งเอลิเมนต์ภายในขอบเขต และการลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution) เป็นต้น การตรวจสอบความถูกต้องแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การแบ่งเอลิเมนต์ภายในขอบเขต และการลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ ส่วนในกรณีตรวจสอบขนาดของขอบเขตที่ใช้ในการจำลองลมพิจารณาได้จากบทที่ 7 หัวข้อ 7.4.1 เนื่องจากเป็นกรณีที่ขนาดขอบเขตอาจมีผลต่อลมที่กระทำรอบๆ โครงสร้างป้ายโฆษณาได้มากที่สุด

6.4.1 การแบ่งเอลิเมนต์ภายในขอบเขต

ในหัวข้อนี้ได้แสดงให้เห็นถึงจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมภายในขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยที่มีการค่อยๆ เพิ่มจำนวนเอลิเมนต์แสดงได้ดังภาพที่ 6.9 จำนวนเอลิเมนต์ที่เพียงพอจะทำให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องมากขึ้น



ภาพที่ 6.9 ความสัมพันธ์ของจำนวนเอลิเมนต์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณา Aspect Ratio เท่ากับ 2 และ Clearance Ratio เท่ากับ 0.5

ในงานวิจัยเลือกขนาดโครงสร้างป้ายโฆษณา Aspect Ratio เท่ากับ 2 และ Clearance Ratio เท่ากับ 0.5 เพื่อลองปรับจำนวนเอลิเมนต์ภายในขอบเขตโดยที่พิจารณาจำนวนการทำซ้ำ 500 รอบ และที่จำนวนประมาณ 200,000 500,000 800,000 และ 900,000 เอลิเมนต์ มีเอลิเมนต์ขนาดเล็กสุดประมาณ 0.05 0.02 0.01 และ 0.005 เมตร รอบๆ วัตถุตามลำดับ โดยที่มีเอลิเมนต์ขนาดใหญ่สุดประมาณ 0.1 เมตรในทุกกรณี จากภาพที่ 6.9 จะเห็นได้ว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่ละเอียดมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีแนวโน้มเข้าสู่ผลลัพธ์อยู่ในระดับเป็นที่น่าพอใจ โดยที่จำนวนเอลิเมนต์ 800,000 ถึง 900,000 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x แตกต่างกันประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ในหัวข้อ 6.2.3 จึงถือว่ามี ความถูกต้องเพียงพอ ด้วยข้อจำกัดทางคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการวิเคราะห์โดยใช้จำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 900000 เอลิเมนต์ โดยที่เอลิเมนต์มีขนาดเล็กสุดประมาณ 0.005 เมตร รอบๆวัตถุ เมื่อไกลออกไปมีเอลิเมนต์ขนาดใหญ่สุดประมาณ 0.1 เมตร

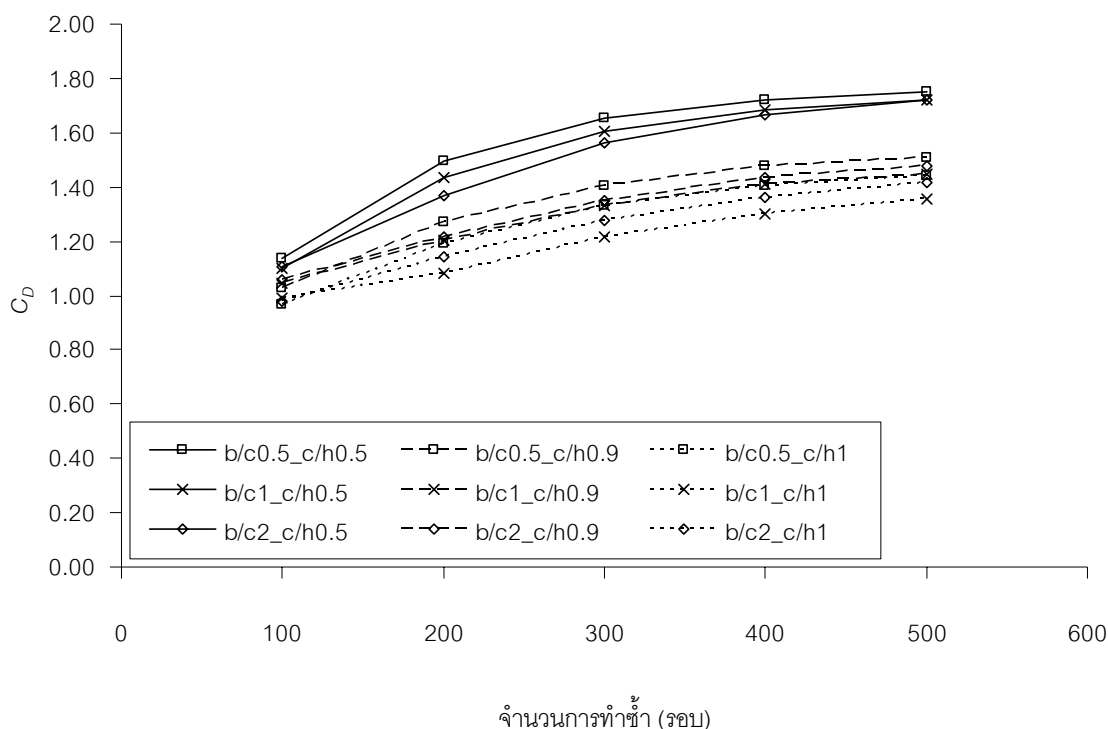
ตารางที่ 6.1

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของกรณีการปรับขนาด เอลิเมนต์ภายในขอบเขต

จำนวนเอลิเมนต์	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)				
	100	200	300	400	500
899009	1.1086	1.3673	1.5612	1.6660	1.7195
780133	1.0641	1.3550	1.5404	1.6341	1.6798
520783	1.0982	1.3786	1.4731	1.5048	1.5143
188096	1.2370	1.2546	1.2549	1.2549	1.2549

6.4.2 การลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution)

การแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ของสมการแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) การลู่เข้าสู่ผลลัพธ์เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการทำซ้ำ (Iteration) ของผลลัพธ์ ภาพที่ 6.10 และภาพที่ 6.11 แสดงการลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ในกรณีต่างๆ



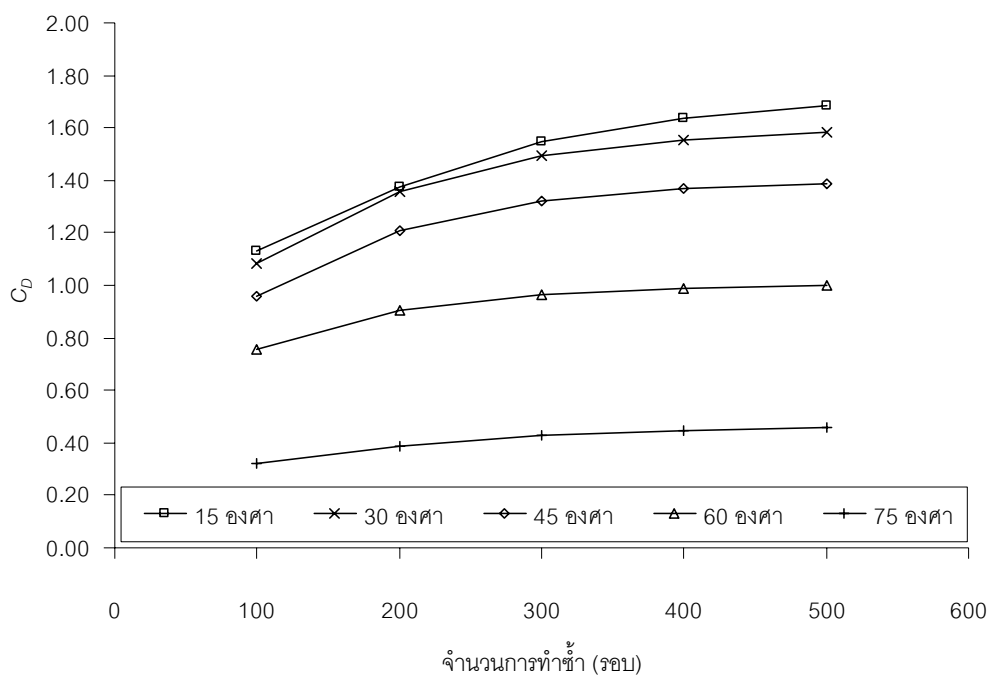
ภาพที่ 6.10 ความสัมพันธ์ของจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน

จากภาพที่ 6.10 การรู้เข้าสู่ผลลัพธ์ของโครงสร้างป้ายโฆษณาทุกขนาดให้การรู้เข้าสู่ของผลลัพธ์อยู่ในระดับเป็นที่น่าสนใจ กล่าวคือผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่จำนวนการทำซ้ำ 400 รอบ จนถึงจำนวนการทำซ้ำ 500 รอบ ที่มีค่ามากที่สุดคือโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด Aspect Ratio (b/c) เท่ากับ 1 และ Clearance Ratio (c/h) เท่ากับ 1 โดยมีค่าแตกต่างประมาณ 4.2 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6.2

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่มีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน

ขนาดอัตราส่วน	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)				
	100	200	300	400	500
$b/c=0.5_c/h=0.5$	1.1372	1.4961	1.6508	1.7202	1.7510
$b/c=0.5_c/h=0.9$	1.0297	1.2688	1.4059	1.4743	1.5059
$b/c=0.5_c/h=1$	0.9667	1.1937	1.3309	1.4042	1.4404
$b/c=1_c/h=0.5$	1.0978	1.4350	1.6074	1.6862	1.7209
$b/c=1_c/h=0.9$	1.0459	1.2042	1.3329	1.4085	1.4496
$b/c=1_c/h=1$	0.9918	1.0805	1.2134	1.3025	1.3585
$b/c=2_c/h=0.5$	1.1086	1.3673	1.5612	1.6660	1.7195
$b/c=2_c/h=0.9$	1.0608	1.2143	1.3509	1.4321	1.4794
$b/c=2_c/h=1$	0.9811	1.1445	1.2737	1.3631	1.4194



ภาพที่ 6.11 ความสัมพันธ์ของจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดกว้าง 0.2 เมตร สูง 0.1 เมตร ที่ทิศทางลมต่างๆ

จากภาพที่ 6.11 การลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ของโครงสร้างป้ายโฆษณาในกรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมให้ผลลัพธ์อยู่ในระดับเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศทาง x ที่จำนวนการทำซ้ำ 400 รอบ จนถึงจำนวนการทำซ้ำ 500 รอบ ที่มีค่ามากที่สุดที่ทิศทางลม 15 องศาโดยมีค่าแตกต่างประมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์

จากผลการศึกษาพบว่าการลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ด้วยจำนวนการทำซ้ำ 500 รอบ อยู่ในวิสัยที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรมโยธา ด้วยข้อจำกัดของเวลาและประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ การศึกษาและวิเคราะห์ต่อไปจะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่จำนวนการทำซ้ำ 500 รอบ

ตารางที่ 6.3

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศทาง x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดกว้าง 0.2 เมตร สูง 0.1 เมตร ที่ทิศทางลมต่างๆ

ทิศทางลม	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)				
	100	200	300	400	500
15 องศา	1.1292	1.3742	1.5457	1.6369	1.6819
30 องศา	1.0832	1.3549	1.4955	1.5563	1.5812
45 องศา	0.9610	1.2098	1.3229	1.3686	1.3859
60 องศา	0.7564	0.9055	0.9637	0.9888	0.9986
75 องศา	0.3236	0.3899	0.4257	0.4460	0.4570

6.5 ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน และการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ

6.5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน

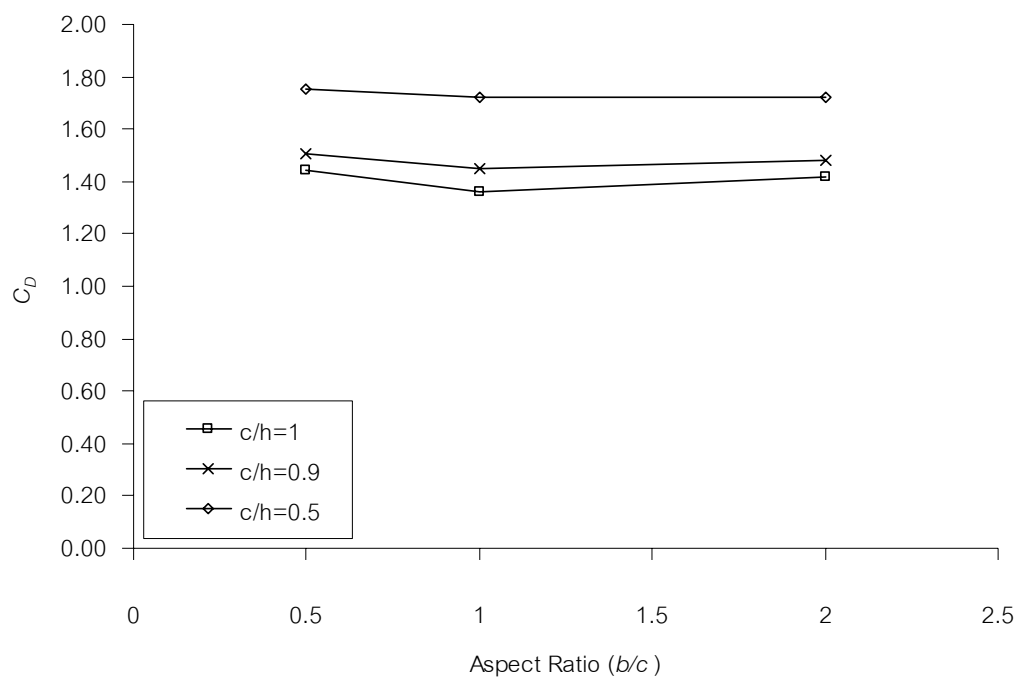
ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) และผลการวิเคราะห์ CFD ของ (Loi, 2004) ซึ่งใช้แบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ Model เช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4

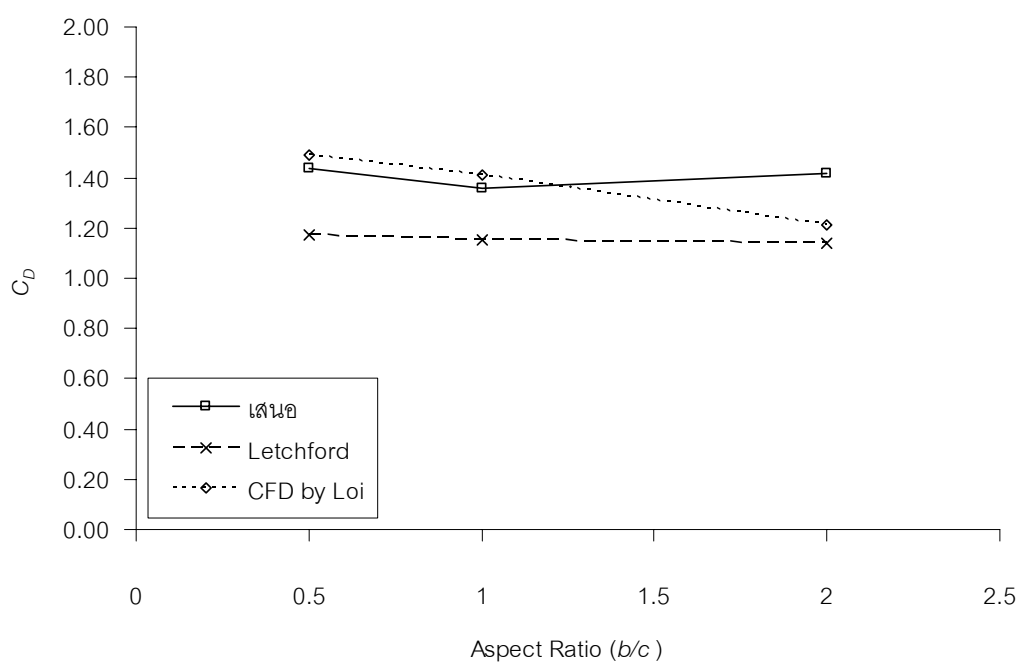
ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณา
กรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆกัน

c/h	เสนอ			(Letchford, 2001)			(Loi, 2004)		
	b/c			b/c			b/c		
	0.5	1	2	0.5	1	2	0.5	1	2
1	1.44	1.36	1.42	1.17	1.15	1.14	1.49	1.41	1.21
0.9	1.51	1.45	1.48	1.41	1.34	1.33	1.53	1.56	1.55
0.5	1.75	1.72	1.72	1.47	1.38	1.42	1.82	1.87	1.89

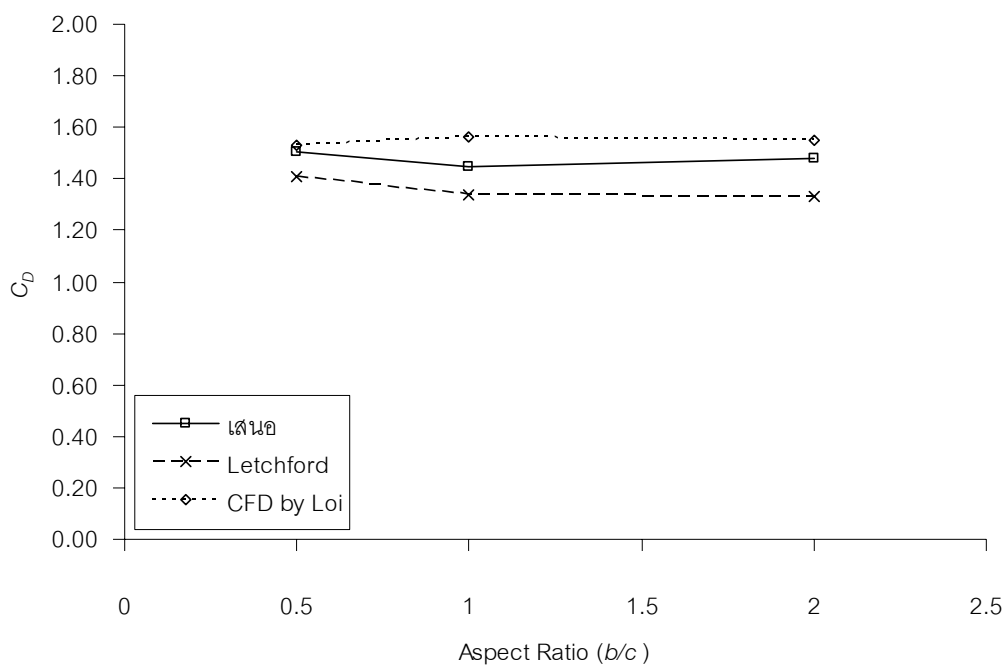
6.5.1.1 ผลของ Aspect Ratio ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดต่างๆ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ค่อนข้างคงที่สำหรับ Clearance Ratio หนึ่งๆ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x อยู่ระหว่าง 1.36-1.44, 1.45-1.51 และ 1.72-1.75 สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 1, 0.9 และ 0.5 ตามลำดับ แสดงได้ดังภาพที่ 6.12 ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ค่อนข้างคงที่สำหรับ Clearance Ratio หนึ่งๆ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x อยู่ระหว่าง 1.14-1.17, 1.33-1.41 และ 1.38-1.47 สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 1, 0.9 และ 0.5 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันคือค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ค่อนข้างคงที่สำหรับ Clearance Ratio หนึ่งๆ โดยพิจารณาภาพที่ 6.13 ถึงภาพที่ 6.15 ประกอบ



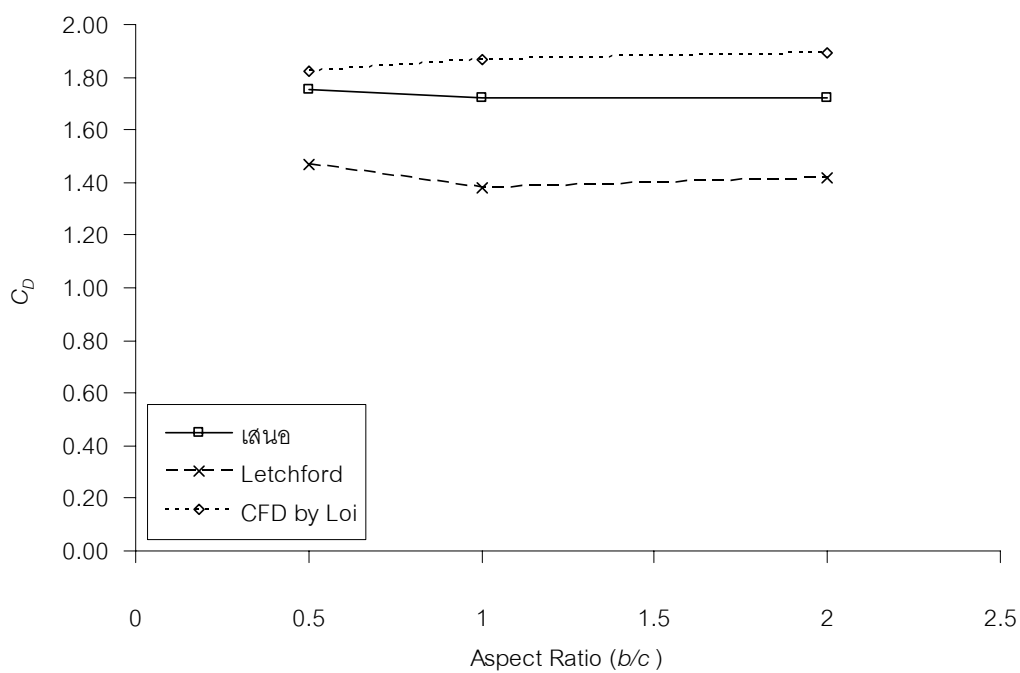
ภาพที่ 6.12 ความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงดลเฉลี่ยตามทิศแกน x



ภาพที่ 6.13 ความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงดลเฉลี่ยตามทิศแกน x
ที่ $c/h = 1$

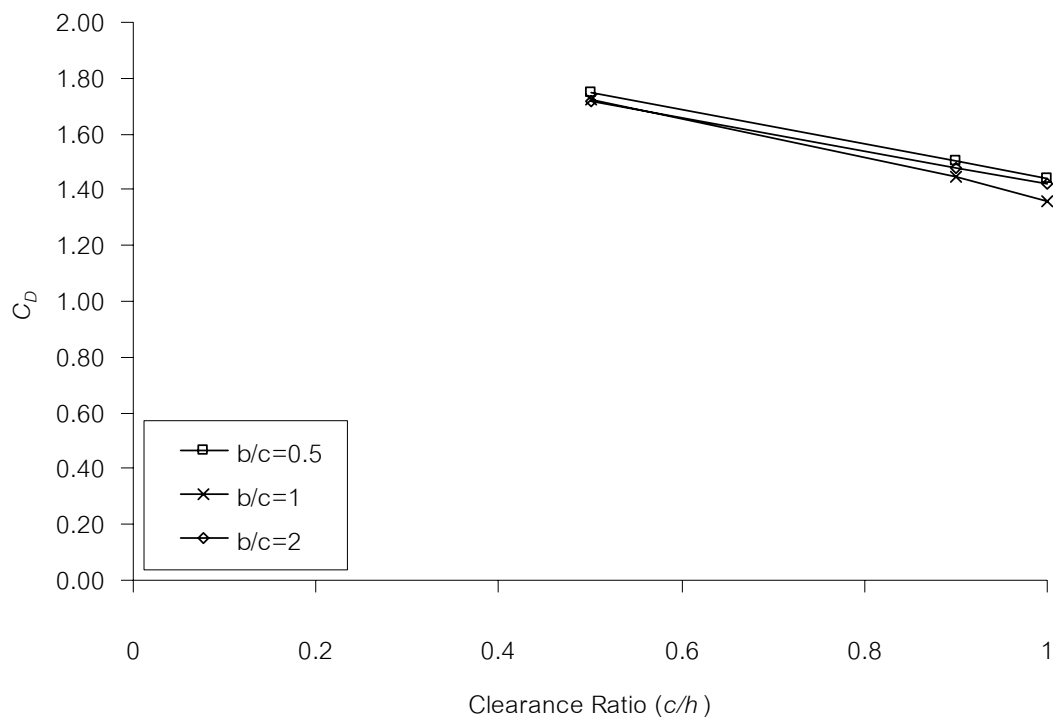


ภาพที่ 6.14 ความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $c/h = 0.9$

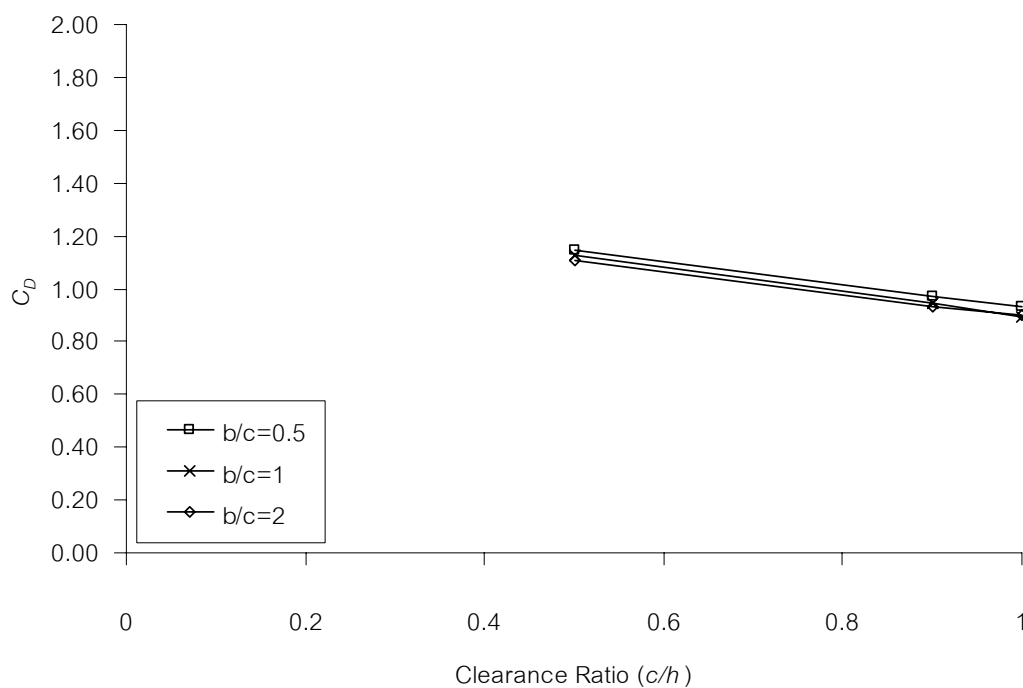


ภาพที่ 6.15 ความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $c/h = 0.5$

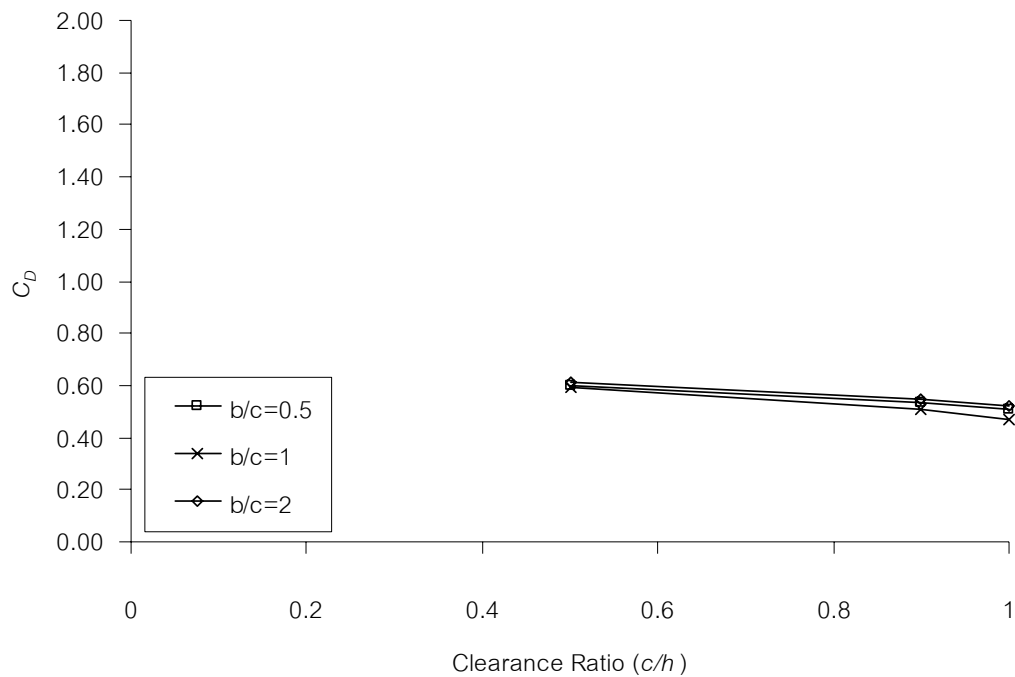
6.5.1.2 ผลของ Clearance Ratio ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อ Clearance Ratio ลดลง (ช่องว่างระหว่างขอบล่างของโครงสร้างป้ายโฆษณากับพื้นมากขึ้น) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นจาก 1.44-1.75, 1.36-1.72 และ 1.42-1.72 สำหรับ Aspect Ratio เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ แสดงได้ดังภาพที่ 6.16 ผลการวิเคราะห์ที่บ่งชี้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ประมาณ 0.3 นั้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาประมาณ 0.2 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเพิ่มขึ้นประมาณ 0.1 แสดงได้ดังภาพที่ 6.17 และภาพที่ 6.18 ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ของ (Letchford, 2001) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Clearance Ratio ลดลง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นจาก 1.17-1.47, 1.15-1.38 และ 1.14-1.42 สำหรับ Aspect Ratio เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของ (Letchford, 2001) นั้นมิได้เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นมากนัก โดยที่การลดลงของ Clearance Ratio จาก 1 ถึง 0.9 ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นแบบฉับพลัน หลังจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เมื่อ Clearance Ratio ลดลงไปในทิศทางเดียวกันคือ ลดลงประมาณ 0.3 พิจารณาภาพที่ 6.19 ถึงภาพที่ 6.21 ประกอบ



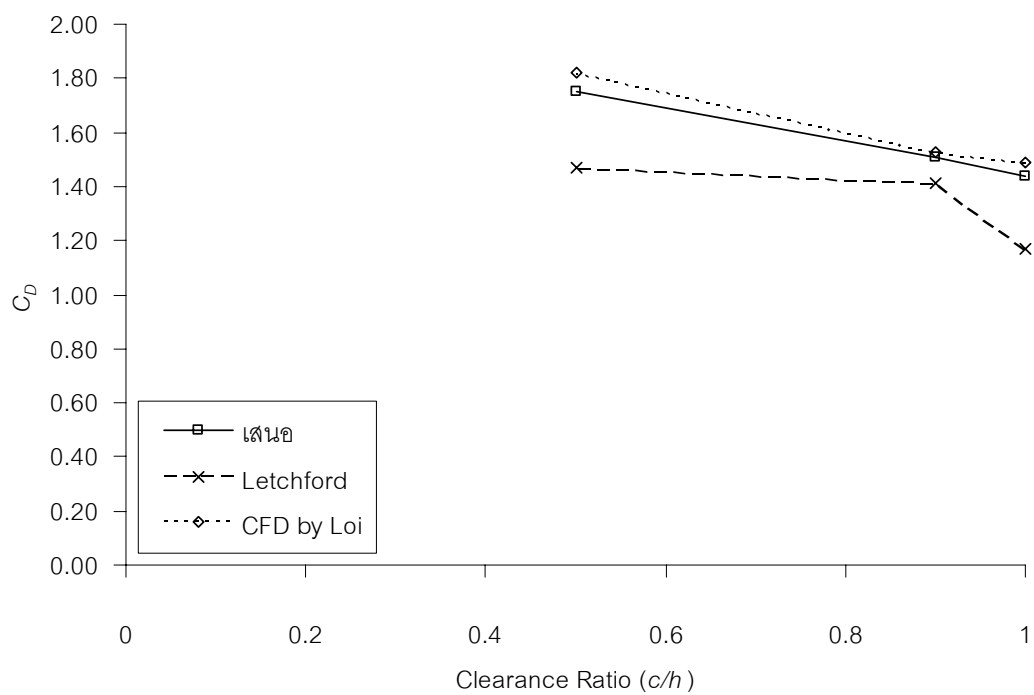
ภาพที่ 6.16 ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x



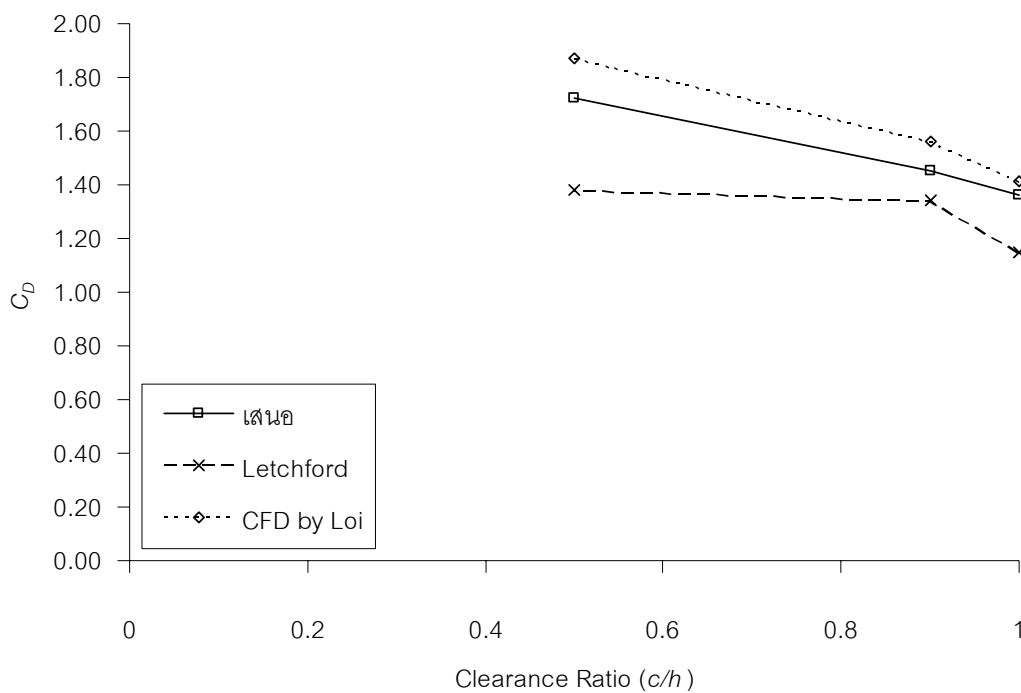
ภาพที่ 6.17 ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา



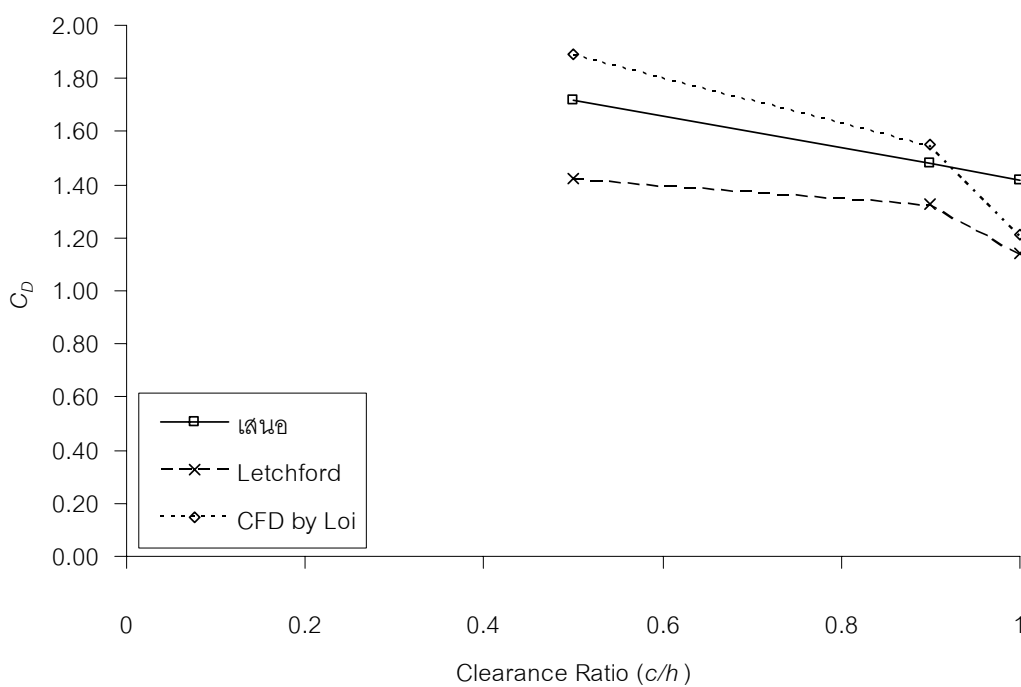
ภาพที่ 6.18 ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา



ภาพที่ 6.19 ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $b/c = 0.5$



ภาพที่ 6.20 ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $b/c = 1$



ภาพที่ 6.21 ความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ $b/c = 2$

ภาพที่ 6.22 ถึงภาพที่ 6.30 แสดงการไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมสำหรับโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดต่างๆ ภาพที่ 6.31 ถึงภาพที่ 6.39 แสดงเส้นชั้นความดันลมที่กระทำด้านหน้าและด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ที่แสดงอยู่ในรูปการไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมและเส้นชั้นความดันลมสามารถอธิบายได้ว่า การที่ผลของ Aspect Ratio ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ค่อนข้างคงที่สำหรับ Clearance Ratio หนึ่งๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากเวกเตอร์ความเร็วลมมีลักษณะคล้ายคลึงกันดังนี้ กรณี Aspect Ratio ทุกขนาด

- สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 1 (กรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาติดพื้น) ตามภาพที่ 6.22, 6.25 และ 6.28 หากสังเกตภาพ ก จะเห็นได้ว่าเกิดพฤติกรรมการแยกตัว (Separation) ของลมความเร็วสูงที่บริเวณขอบบนโครงสร้างป้ายโฆษณา ในขณะที่บริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีลักษณะลมหมุน (Wake) หนึ่งวง ส่วนภาพ ข ลักษณะลมมีลักษณะสมมาตรกันดีโดยที่ลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีสองวง
- สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 0.9 ตามภาพที่ 6.23, 6.26 และ 6.29 หากสังเกตภาพ ก จะเห็นได้ว่าลมบางส่วนลอดผ่านขอบล่างโครงสร้างป้ายโฆษณาส่งผลให้บริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาส่วนล่างเกิดลมหมุนขนาดเล็กและส่วนบนเป็นลมหมุนขนาดใหญ่ ส่วนภาพ ข ลักษณะลมมีลักษณะสมมาตรกันดีโดยที่ลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีสองวง
- สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 0.5 ตามภาพที่ 6.24, 6.27 และ 6.30 หากสังเกตภาพ ก จะเห็นว่าเกิดพฤติกรรมการแยกตัวของลมที่ขอบบนและขอบล่างโครงสร้างป้ายโฆษณา ส่วนภาพ ข ลักษณะลมมีลักษณะสมมาตรกันดีโดยที่ลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีสองวง

ส่งผลให้ความดันลมที่กระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาซึ่งเป็นแรงดัน (Pressure) และความดันลมที่กระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาซึ่งเป็นแรงดูด (Suction) มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าความดันลมในลักษณะคล้ายคลึงกันดังนี้ กรณี Aspect Ratio ทุกขนาด

- สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 1 ตามภาพที่ 6.31, 6.34 และ 6.37 สังเกตได้ว่าขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาบริเวณด้านบนเป็นแรงดันมาก ส่วนขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาบริเวณด้านล่างเป็นแรงดูดน้อย

- สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 0.9 ตามภาพที่ 6.32, 6.35 และ 6.38 สังเกตได้ว่าขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาครึ่งบนเป็นแรงดันมาก ส่วนขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดน้อยบริเวณตรงกลาง
- สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 0.5 ตามภาพที่ 6.33, 6.36 และ 6.39 สังเกตได้ว่าขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดันกระจายค่อนข้างเต็มพื้นที่ ส่วนขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดกระจายค่อนข้างเต็มพื้นที่เช่นเดียวกัน

ในส่วนของผล Clearance Ratio การที่ Clearance Ratio ลดลงแล้วทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้น สำหรับ Aspect Ratio หนึ่งๆนั้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมการแยกตัว (Separation) ของลมบริเวณขอบล่างโครงสร้างป้ายโฆษณาเกิดมากขึ้น พิจารณาภาพที่ 6.22 ก ถึง ภาพที่ 6.30 ก ประกอบ สังเกตได้ว่าเวกเตอร์ความเร็วลมบริเวณขอบล่างโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าความเร็วลมมากขึ้น อีกทั้งลมหมุน (Wake) บริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาจากเดิมที่มีลมหมุนเพียงหนึ่งวงกลายเป็นลมหมุนที่มีสองวงแบบสมบูรณ์มากขึ้นโดยที่มีลักษณะสมมาตรที่ Clearance Ratio เท่ากับ 0.5 ซึ่งสอดคล้องกับ (Letchford, 2001) ที่กล่าวว่าเมื่อ Clearance Ratio ลดลง (โครงสร้างป้ายโฆษณาลอยขึ้นจากพื้นมากขึ้น) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมการแยกตัวของ Shear Layer ที่แยกตัวออกจากบริเวณขอบของโครงสร้างป้ายโฆษณา (Letchford, 2001, p. 140) นอกจากนี้หากพิจารณาภาพที่ 6.31 ถึงภาพที่ 6.39 จะเห็นได้ว่าเมื่อ Clearance Ratio ลดลง สำหรับ Aspect Ratio หนึ่งๆ ขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณามีการกระจายตัวของค่าแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่วนขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดมากขึ้นเรื่อยๆ

ผลของระยะเยื้องศูนย์กลาง จากผลการวิเคราะห์ให้ค่าระยะเยื้องศูนย์กลางแนวราบ (Horizontal Eccentricity, e_m/b) เท่ากับศูนย์ในทุกขนาดของโครงสร้างป้ายโฆษณา ในส่วนของระยะเยื้องศูนย์กลางแนวดิ่ง (Vertical Eccentricity, d/c) จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อ Clearance Ratio ลดลง ให้ค่า d/c ลดลงโดยอยู่ระหว่าง 0.55 - 0.51 สังเกตได้จากภาพที่ 6.31 ถึงภาพที่ 6.39 เมื่อ Clearance Ratio ลดลง ส่งผลให้บริเวณขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าความดันค้อยๆมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอมากขึ้นโดยที่แรงลัพท์กระทำเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณามากขึ้น โดยที่ (Suksit Sinthuwong, 2004, p. 52) ได้แนะนำค่า d/c เท่ากับ 0.6 และ (Kobchai Poemsantitham, 2005, p. 50) ได้แนะนำค่า d/c เท่ากับ 0.63

ข้อสังเกตที่ได้เพิ่มเติมจาก CFD เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.22 ก ถึงภาพที่ 6.30 ก พบว่าเมื่อ Clearance Ratio ลดลง ตำแหน่งของ Front Stagnation (FS) จะมีค่ามากขึ้นซึ่งสอดคล้องกันกับค่า d/c ตามข้างต้น

- กรณี Clearance Ratio เท่ากับ 1, 0.9 และ 0.5 ได้ FS เท่ากับ $0.63h$, $0.66h$ และ $0.74h$ ตามลำดับ สำหรับ Aspect Ratio เท่ากับ 0.5
- กรณี Clearance Ratio เท่ากับ 1, 0.9 และ 0.5 ได้ FS เท่ากับ $0.57h$, $0.63h$ และ $0.74h$ ตามลำดับ สำหรับ Aspect Ratio เท่ากับ 0.9
- กรณี Clearance Ratio เท่ากับ 1, 0.9 และ 0.5 ได้ FS เท่ากับ $0.51h$, $0.54h$ และ $0.74h$ ตามลำดับ สำหรับ Aspect Ratio เท่ากับ 0.5

นอกจากนี้ยังพบว่าระยะจากโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงจุดสิ้นสุดลมหมุนทางด้านหลัง ($\bar{X}$) มีค่ามากขึ้นเมื่อ Aspect Ratio มากขึ้น (โครงสร้างป้ายโฆษณากว้างขึ้น) จากภาพ ก สังเกตว่าลมหมุนทางด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีตำแหน่งไกลออกไป

- กรณี Aspect Ratio เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 ได้ $\bar{X}$ เท่ากับ $1.66h$, $2.80h$ และ $3.50h$ ตามลำดับ สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 1
- กรณี Aspect Ratio เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 ได้ $\bar{X}$ เท่ากับ $1.34h$, $2.46h$ และ $3.43h$ ตามลำดับ สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 0.9
- กรณี Aspect Ratio เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 ได้ $\bar{X}$ เท่ากับ $0.43h$, $0.60h$ และ $0.91h$ ตามลำดับ สำหรับ Clearance Ratio เท่ากับ 0.5

โดยทั่วไปแล้วผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณาทุกขนาดในงานวิจัยนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มากกว่าผลการทดลองอุโมงค์ของ (Letchford, 2001) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งหากพิจารณากรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาติดพื้นตามภาพที่ 6.22(ก), 6.25(ก) และ ภาพที่ 6.28 (ก) บริเวณส่วนล่างของขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ลมหมุนที่เกิดขึ้นมีความไม่สมบูรณ์มากนัก โดยทั่วไปแล้วจะต้องเป็นลมหมุนในลักษณะแรงดูดไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณามากเกินไป อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ CFD ของ (Loi, 2004) ซึ่งใช้แบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ Model เช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้ ก็ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มากกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมเช่นเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่เสนอในงานวิจัยนี้กับผลการวิเคราะห์ของ (Loi, 2004) พบว่าในภาพรวมผลการ

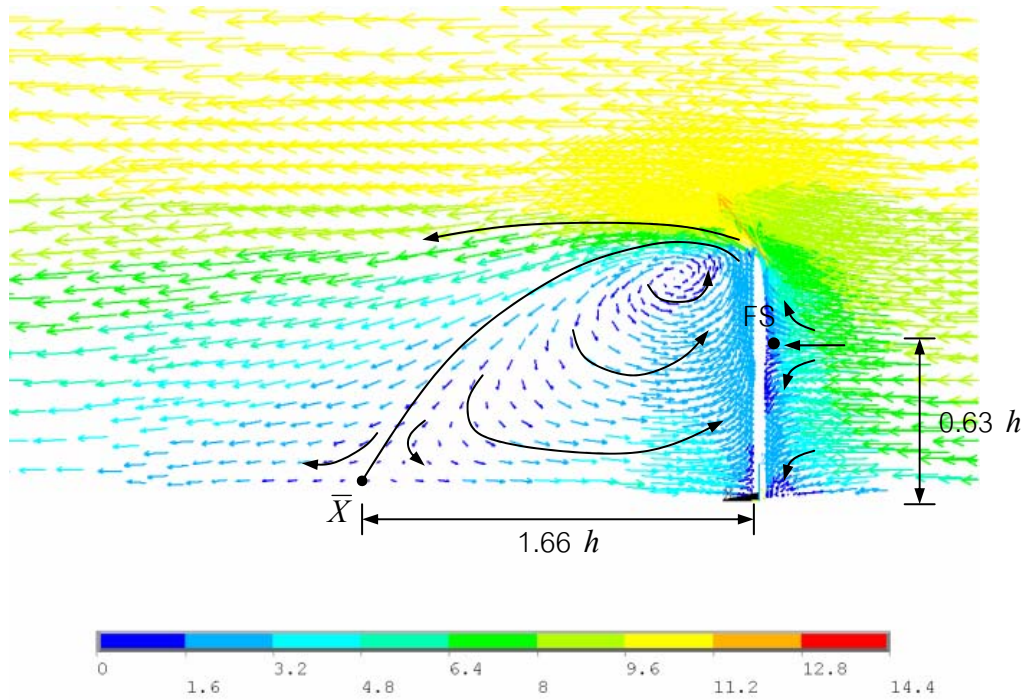
วิเคราะห์ของ (Loi, 2004) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มากกว่าผลการวิเคราะห์ที่เสนอในงานวิจัยนี้อีกด้วย

อย่างไรก็ดีข้อสังเกตที่พบจากการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001), (Suksit Sinthuwong, 2004), (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ก็คือวิธีการทดลองอุโมงค์ลม โดยที่ใช้วิธี High Frequency Force Balance Tests (HFFB) ซึ่งเป็นการหาค่าแรงต่างๆ ที่ฐานโดยมีอุปกรณ์ตรวจจับติดตั้งอยู่ ดังนั้นการทดลองอุโมงค์ลมจึงจำเป็นต้องมีการจำลองเสาเพื่อให้โครงสร้างป้ายโฆษณายึดติดจากนั้นจึงไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจจับที่ฐาน วิธีการหาค่าแรงต่างๆ ก็คือการหาแรงที่กระทำรวมทั้งโครงสร้างป้ายโฆษณากับเสา แล้วหักออกด้วยแรงที่กระทำกับเสาเพียงอย่างเดียว จึงได้แรงที่กระทำเฉพาะกับโครงสร้างป้ายโฆษณาเพียงอย่างเดียว (Letchford, 2001, p. 137), (Suksit Sinthuwong, 2004, p. 31), (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548, น. 37) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005, p. 29)

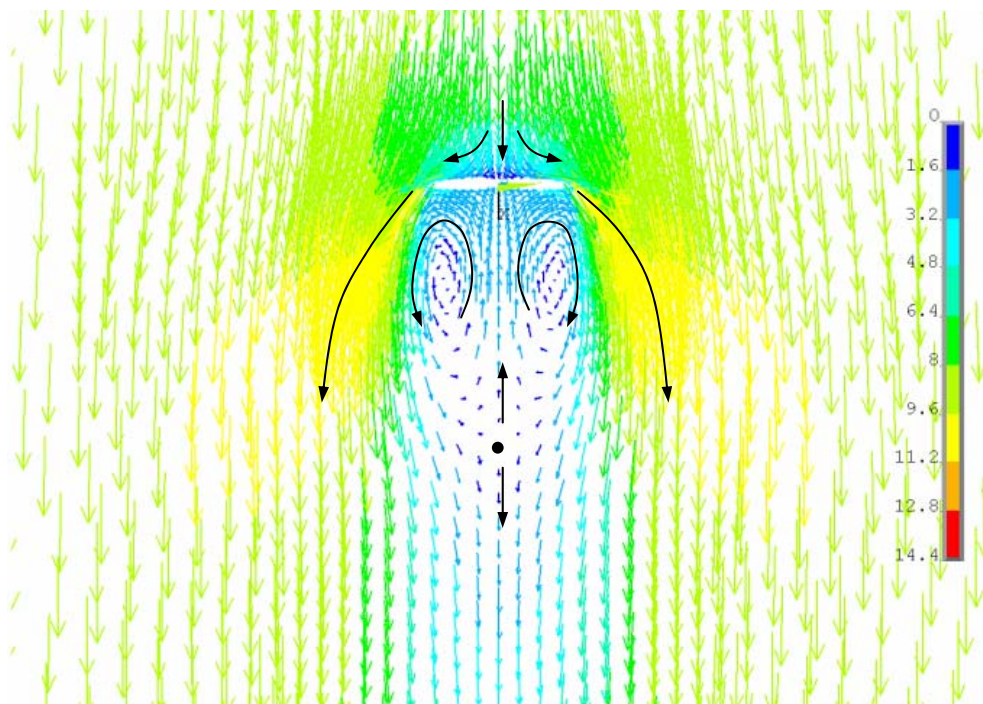
ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบผลของ CFD ที่ได้จากงานวิจัยนี้ที่มากจนเกินไปอีกทั้งเป็นการตรวจสอบหลักการดังกล่าวตามข้างต้นเนื่องจากวิธีการดังกล่าวเป็นหลักการ Superposition ในขณะที่พฤติกรรมของลมเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลของเสาโดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 กรณี กรณีแรกโครงสร้างป้ายโฆษณาติดกับเสาเชื่อมต่อกับฐาน โดยที่เลือกขนาดโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มี Aspect Ratio เท่ากับ 2 และ Clearance Ratio เท่ากับ 0.5 ส่วนเสาเชื่อมต่อกับฐาน โดยที่ขนาดของเสามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 เมตร เชื่อมต่อกับฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 เมตร หนา 0.012 เมตร มีความสูงทั้งหมดจากพื้นถึงขอบบนโครงสร้างป้ายโฆษณา ในกรณีที่สองมีเฉพาะเสาเชื่อมต่อกับฐานโดยที่ในกรณีนี้มีความสูงทั้งหมดจากพื้นจนถึงขอบล่างโครงสร้างป้ายโฆษณา ทั้งนี้ขนาดโครงสร้างป้ายโฆษณาและเสาเป็นแบบเดียวกันกับ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) จากการศึกษาพบว่า กรณีแบบจำลองโครงสร้างป้ายโฆษณาติดกับเสาเชื่อมต่อกับฐาน ผลการวิเคราะห์รวมทั้งหมดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 1.854 ส่วนกรณีแบบจำลองที่มีเฉพาะเสาเชื่อมต่อกับฐานให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 0.14 เมื่อหักลบผลของเสาตามวิธีการของการทดลองอุโมงค์ลมแล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาเท่ากับ 1.714 ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ที่เสนอเป็นแบบจำลองที่จำลองเพียงโครงสร้างป้ายโฆษณาเพียงอย่างเดียวโดยให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 1.72 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่เสนอก่อนหน้านี้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x แตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นวิธีการ Superposition หักลบค่าแรงเนื่องจาก

ผลกระทบของลมในบริเวณที่ไม่ต้องการของการทดลองอุโมงค์ลมอยู่ในวิสัยที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามก็ ตามวิธีการดังกล่าวอาจมีนัยสำคัญมากขึ้นในการทดลองปัญหาแบบอื่นๆ ได้

การวิเคราะห์ CFD โดยใช้แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ Model เพื่อหาความเร็วและความดันของโครงสร้างที่มีคุณสมบัติแบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) นั้นพบข้อจำกัดจำนวนไม่น้อย ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมาจากทฤษฎีพื้นฐานของ Eddy Viscosity Model (EVM) ซึ่งแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ Model ที่ประดิษฐ์ขึ้นจาก EVM จะให้ค่าพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k) บริเวณมุมด้านหน้าของโครงสร้างมากเกินไปจริง (Murakami, 1997, p. 7) แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ Model เหมาะกับการไหลแบบง่าย เช่น การไหลในท่อ (Pipe Flow) เป็นต้น (Murakami, 1997, p. 29)

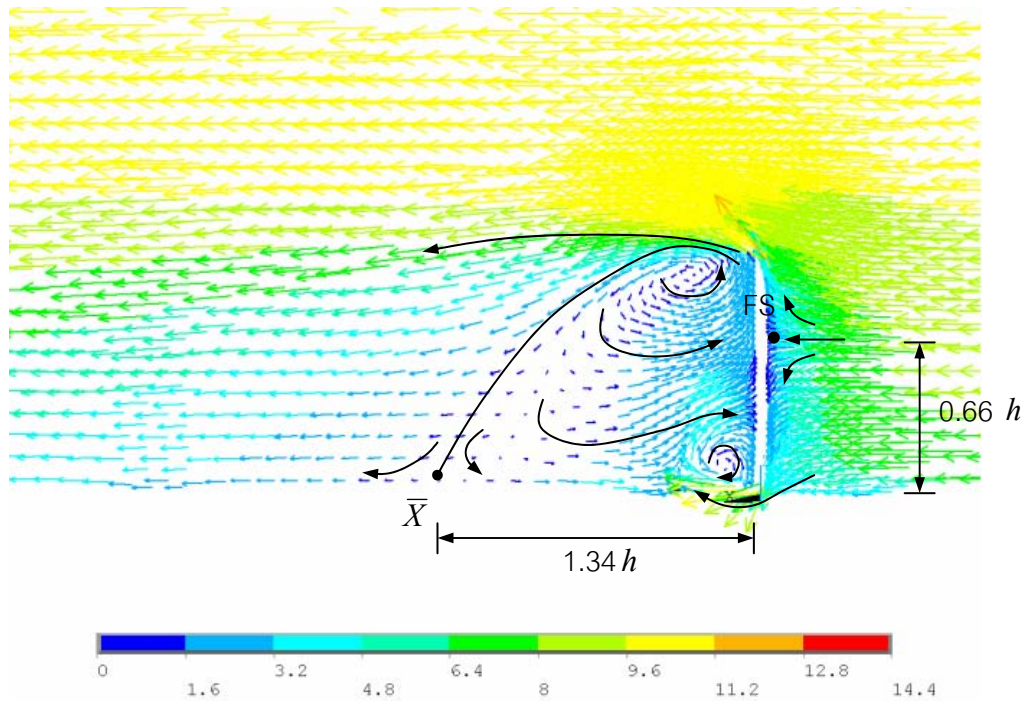


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

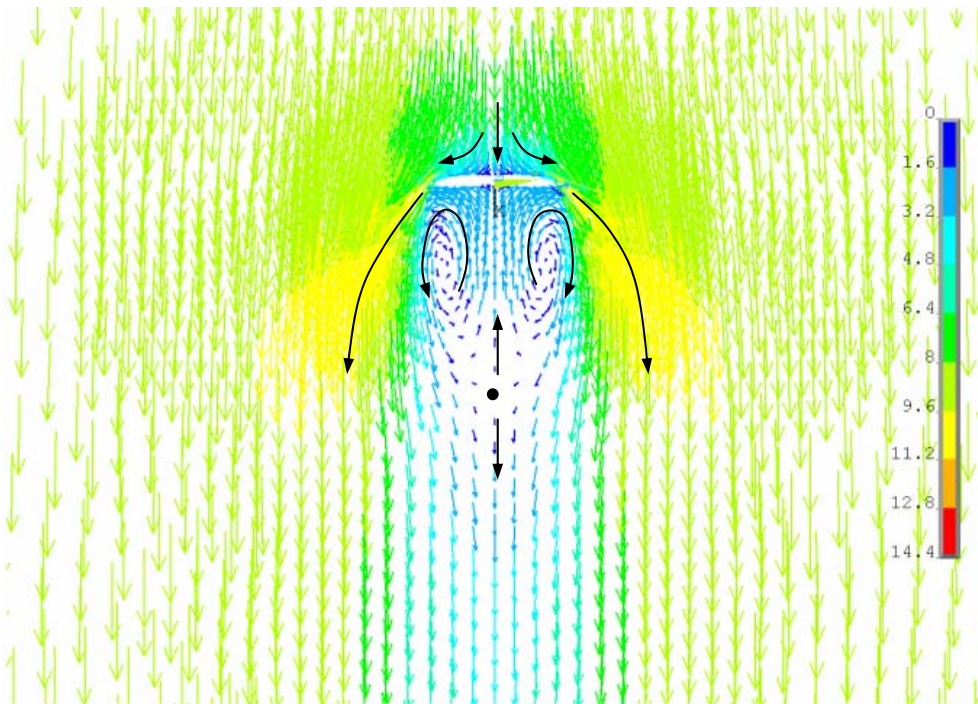


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 6.22 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$
และ $c/h = 1$ (เมตรต่อวินาที)

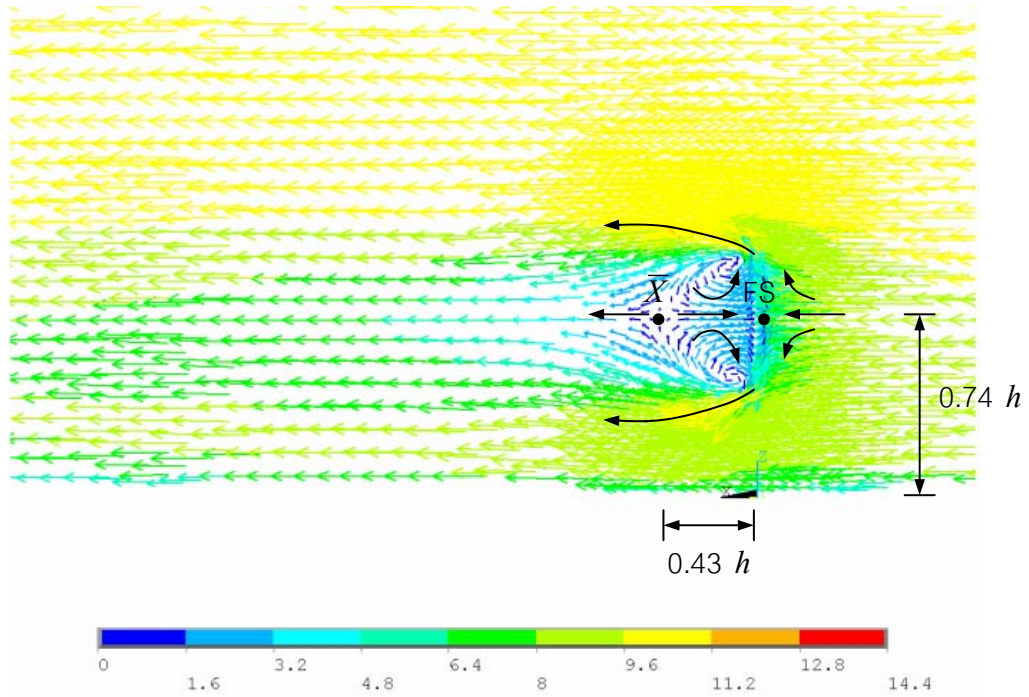


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

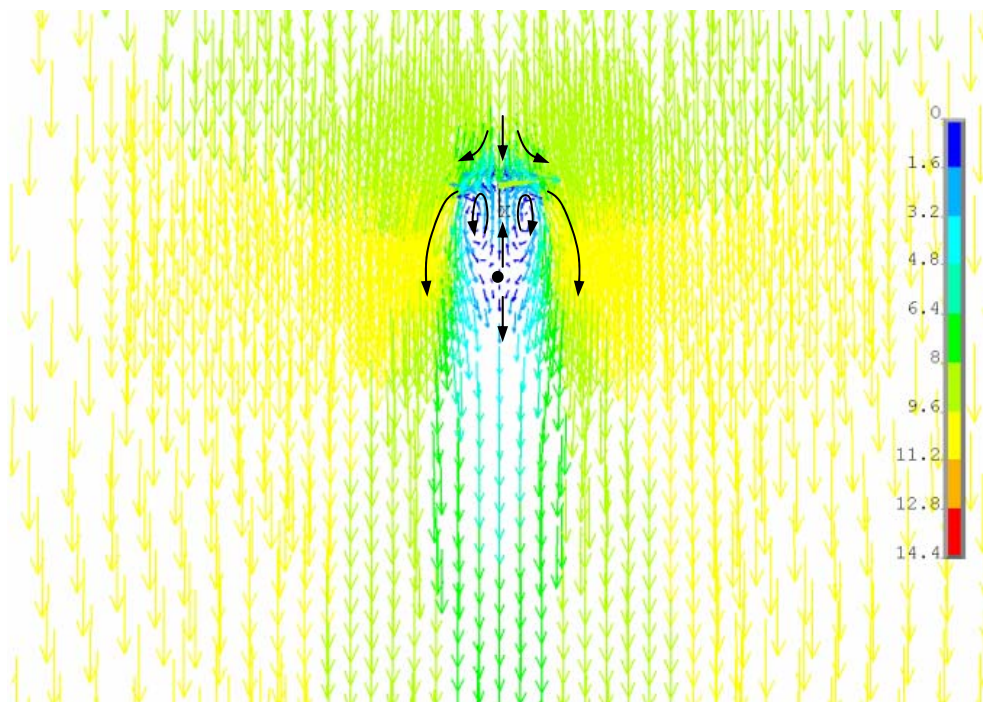


ข. ภาพตัดแนวนอน

ภาพที่ 6.23 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$
และ $c/h = 0.9$ (เมตรต่อวินาที)

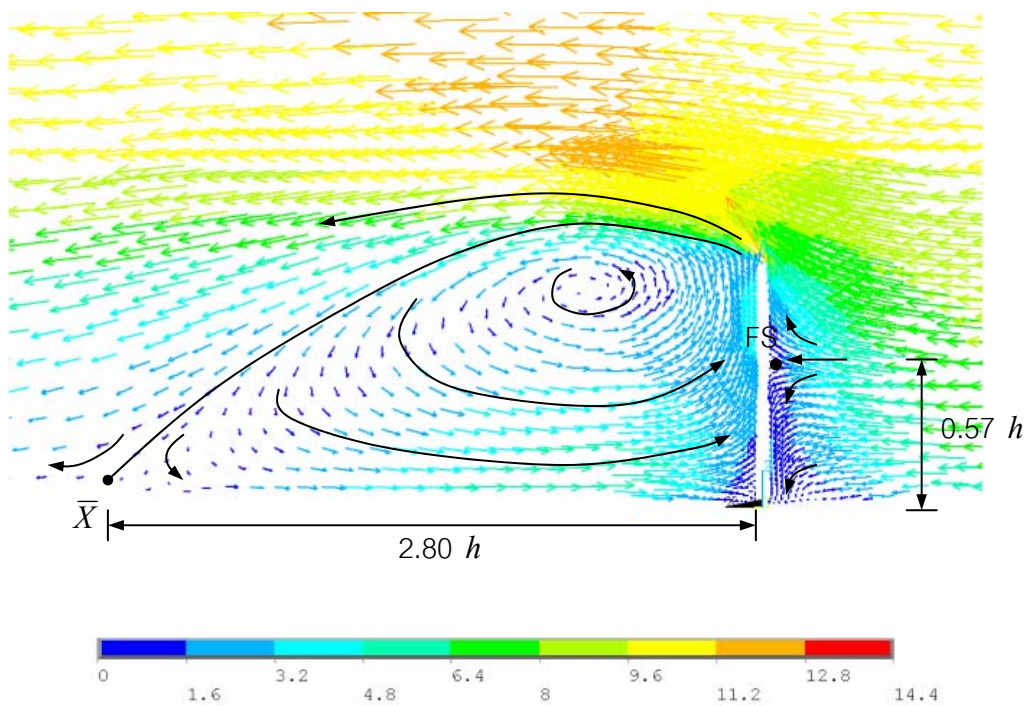


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

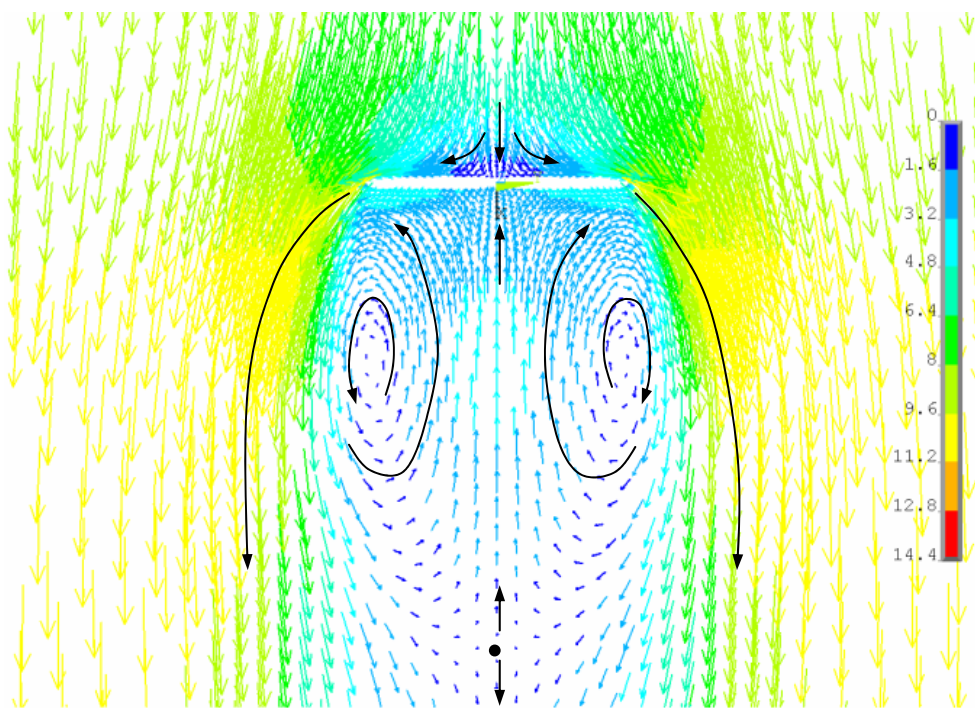


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 6.24 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$
และ $c/h = 0.5$ (เมตรต่อวินาที)

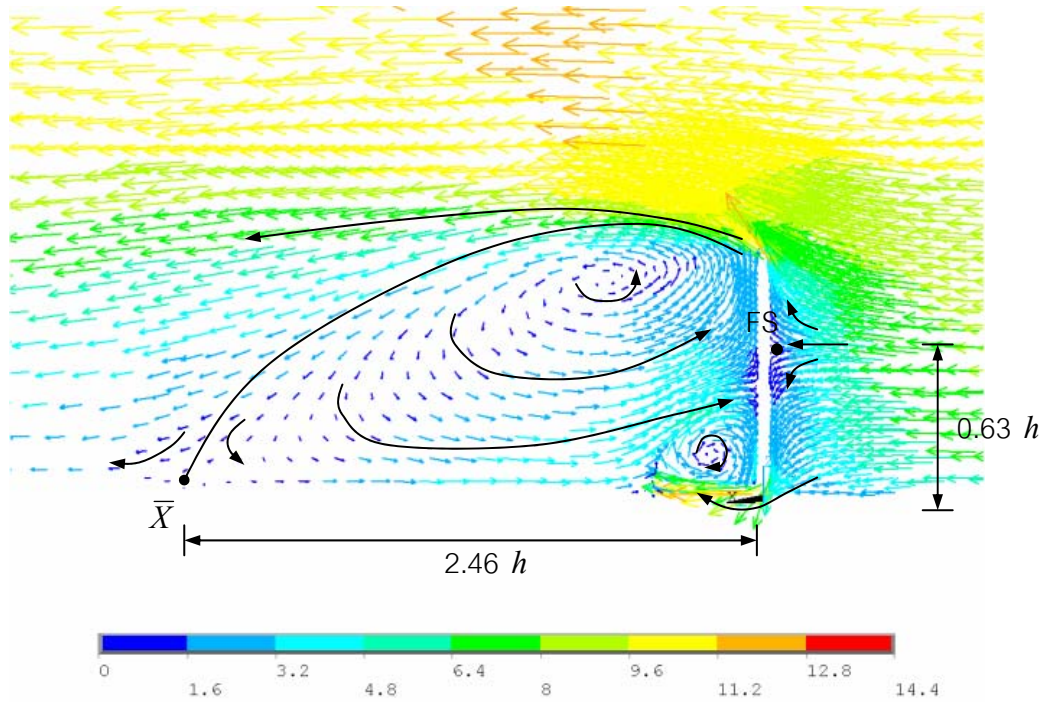


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

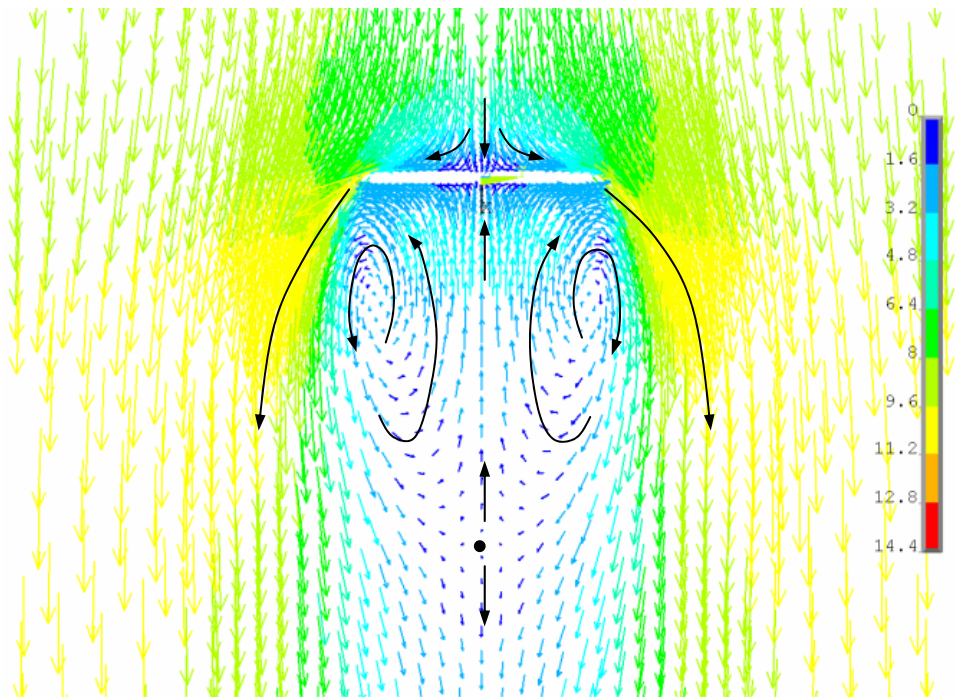


ข. ภาพตัดแนวนอน

ภาพที่ 6.25 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$
และ $c/h = 1$ (เมตรต่อวินาที)

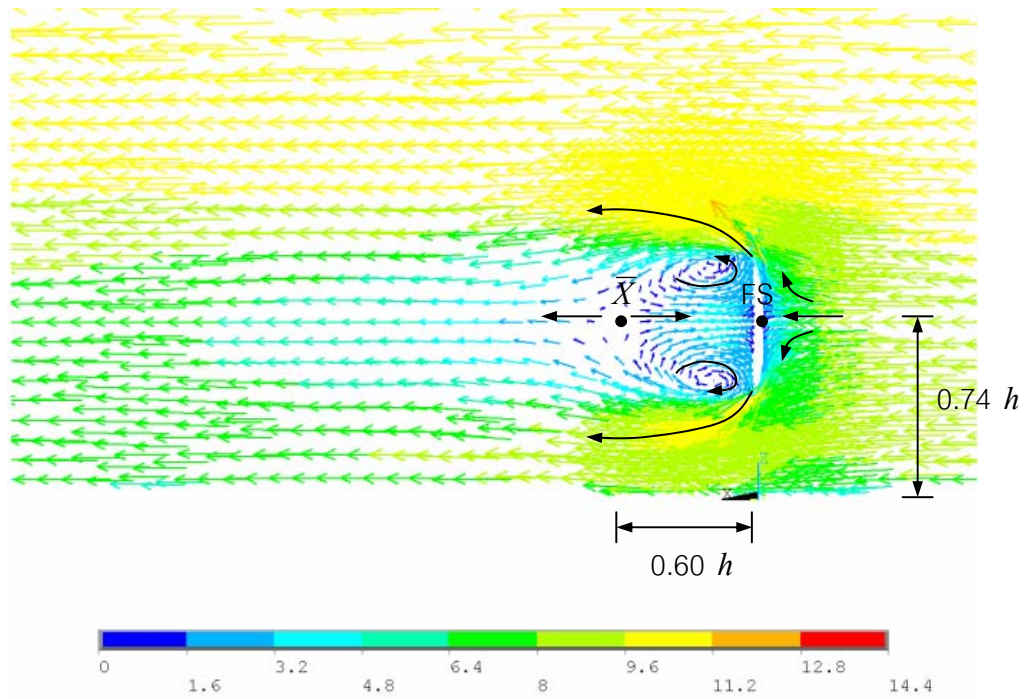


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

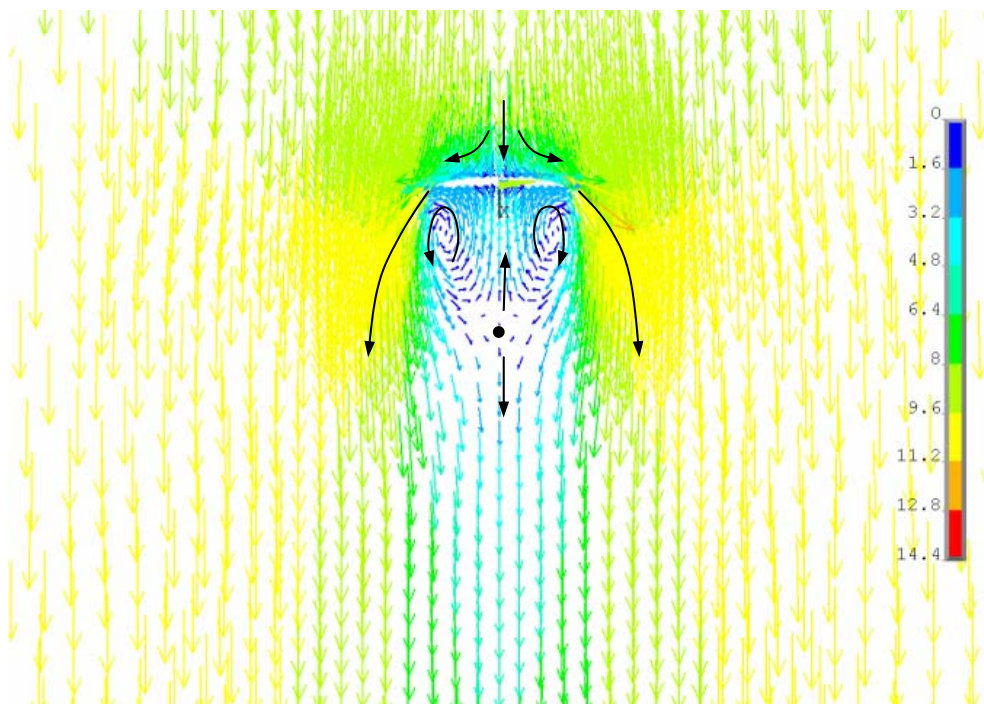


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 6.26 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$
และ $c/h = 0.9$ (เมตรต่อวินาที)

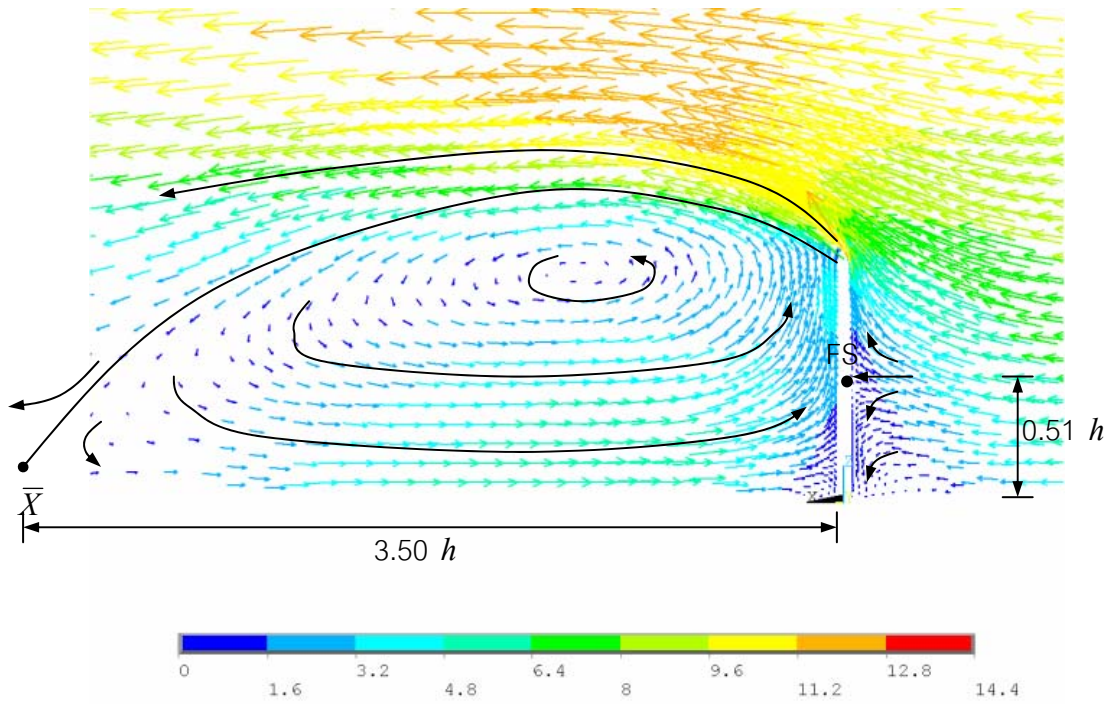


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

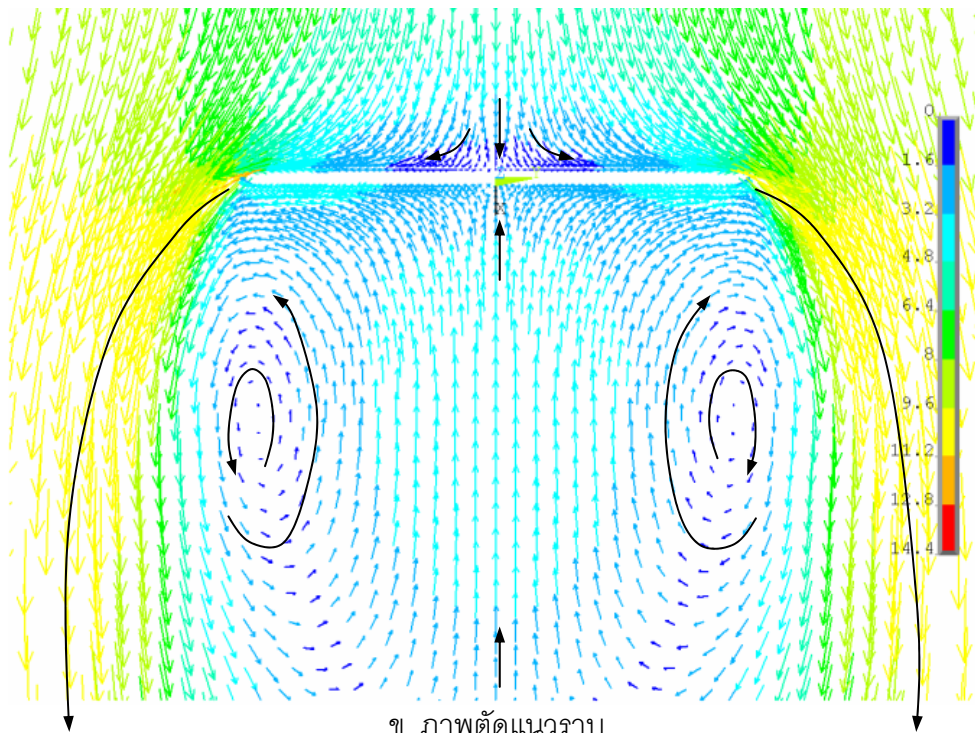


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 6.27 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$
และ $c/h = 0.5$ (เมตรต่อวินาที)

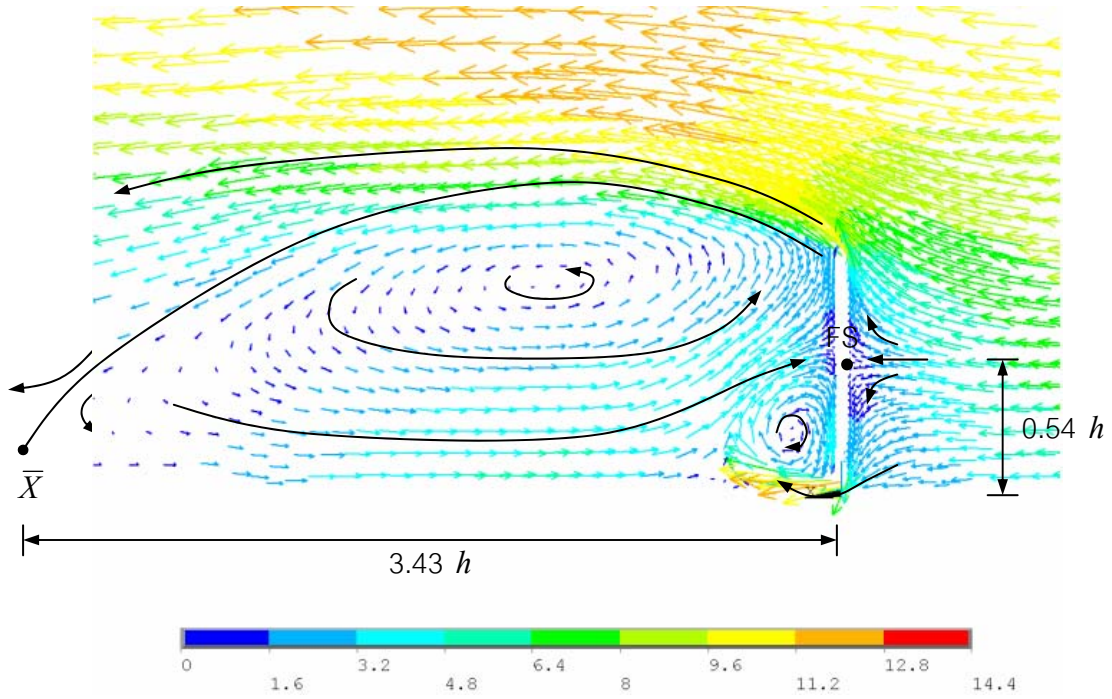


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

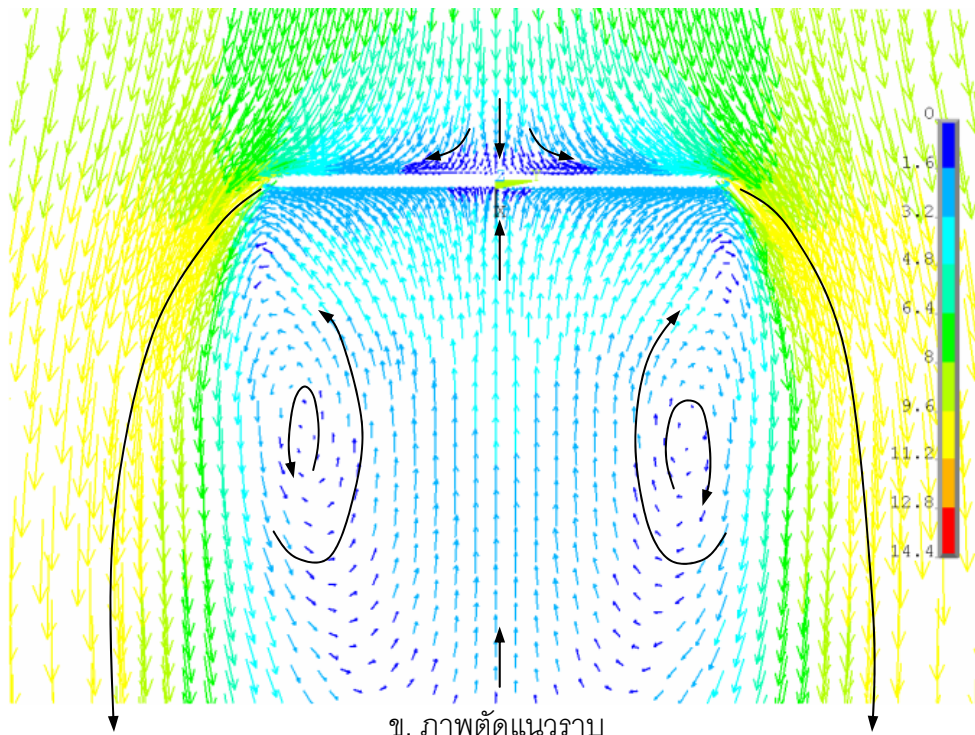


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 6.28 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$
และ $c/h = 1$ (เมตรต่อวินาที)

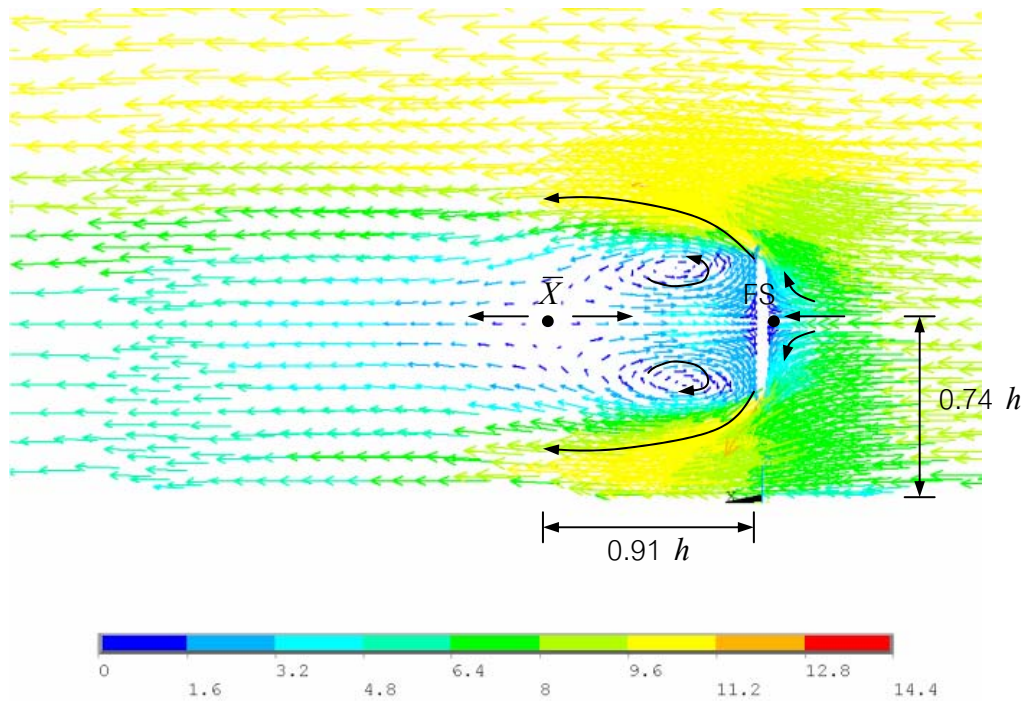


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

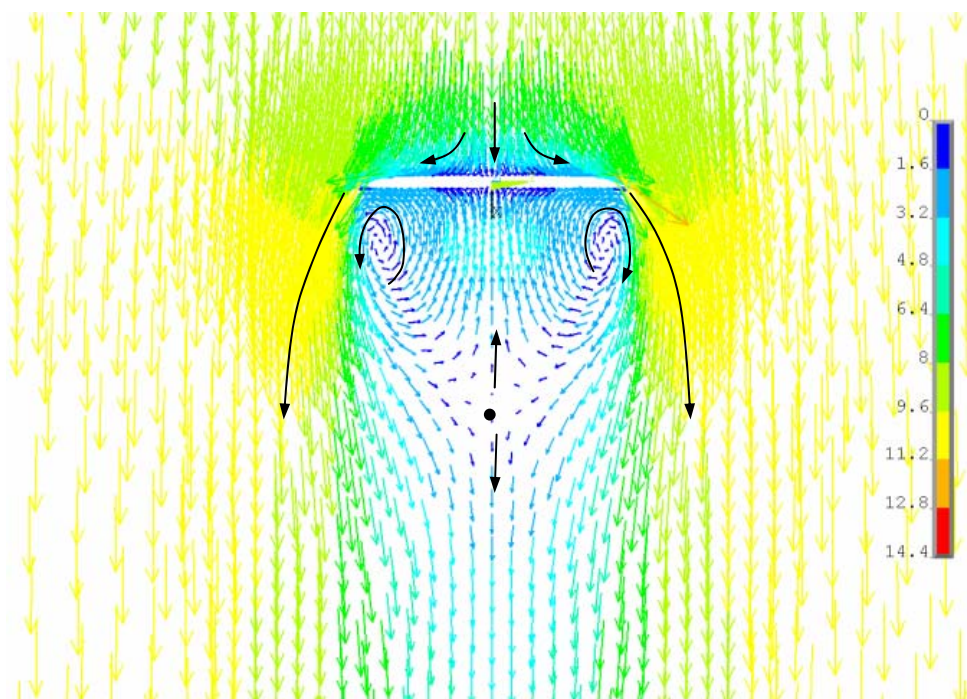


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 6.29 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$
และ $c/h = 0.9$ (เมตรต่อวินาที)

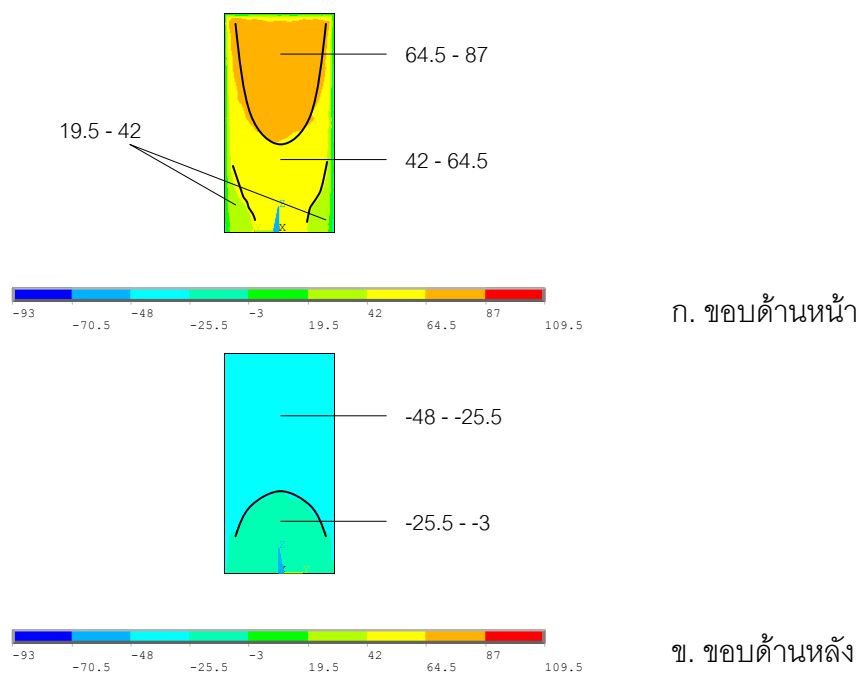


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

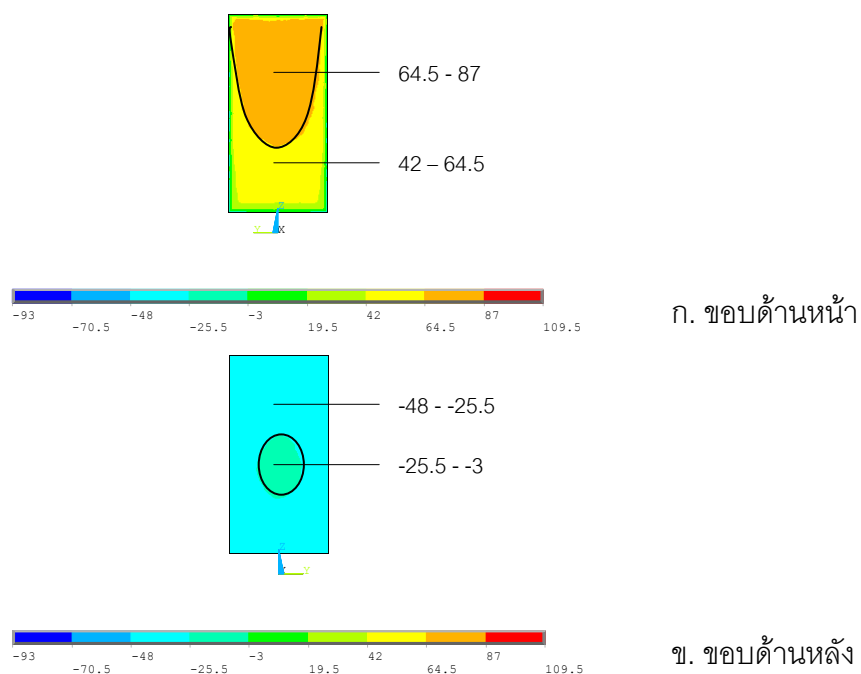


ข. ภาพตัดแนวราบ

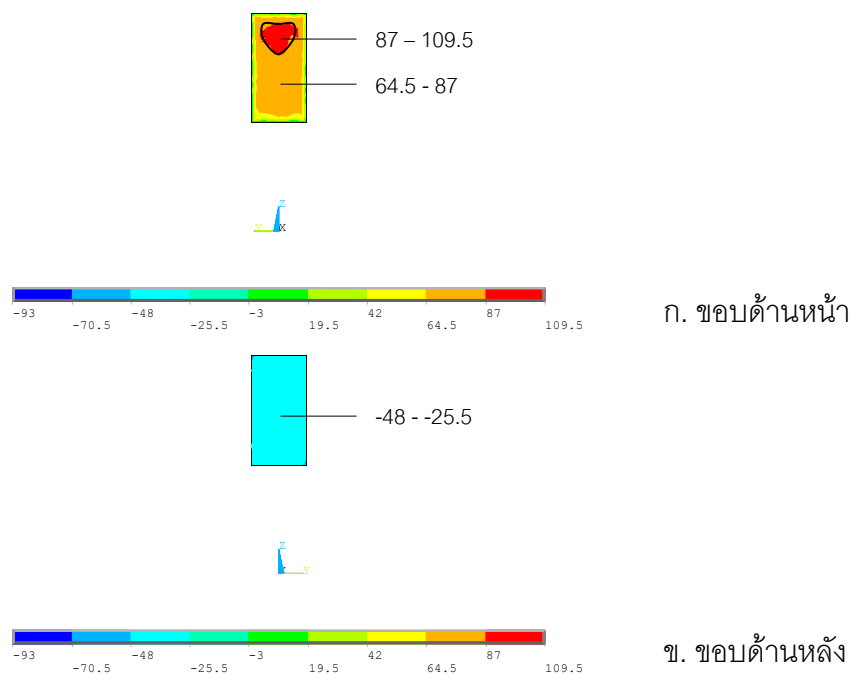
ภาพที่ 6.30 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$
และ $c/h = 0.5$ (เมตรต่อวินาที)



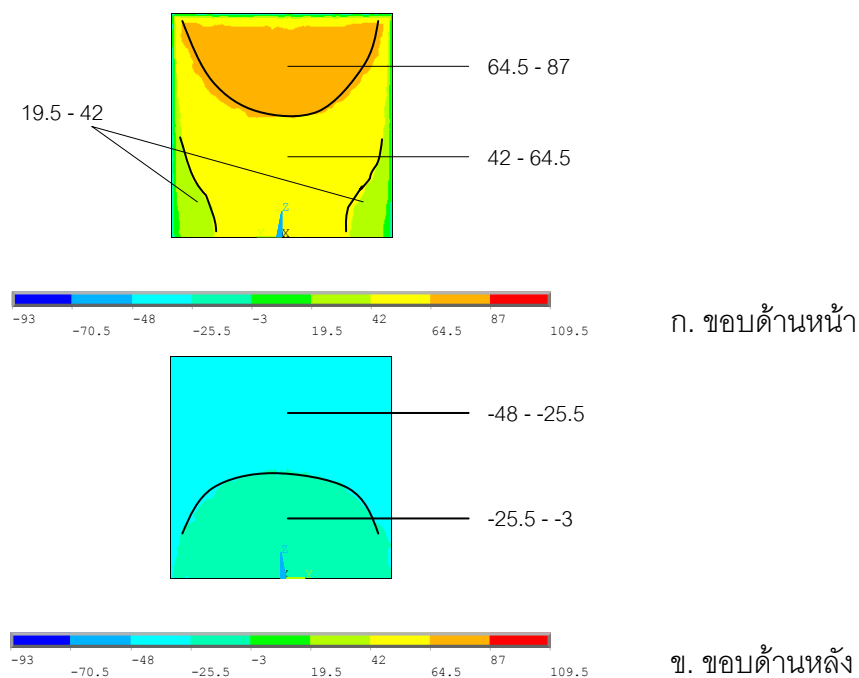
ภาพที่ 6.31 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$
และ $c/h = 1$ (นิวตันต่อตารางเมตร)



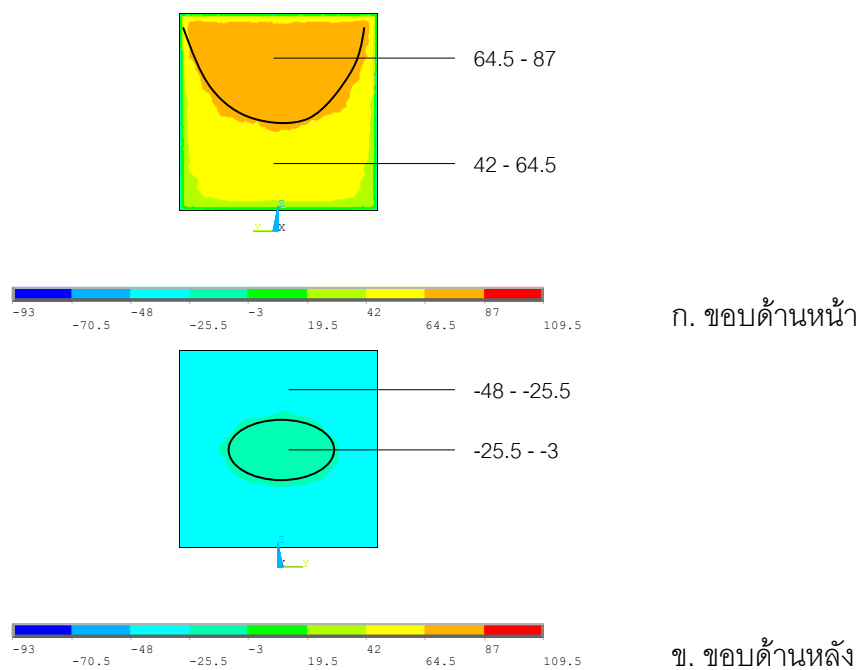
ภาพที่ 6.32 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$
และ $c/h = 0.9$ (นิวตันต่อตารางเมตร)



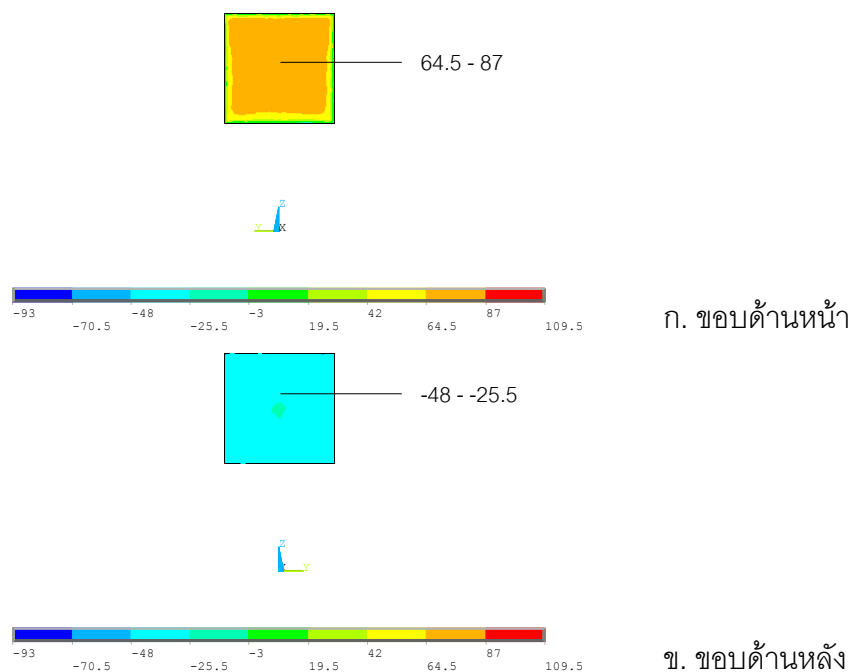
ภาพที่ 6.33 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 0.5$
และ $c/h = 0.5$ (นิวตันต่อตารางเมตร)



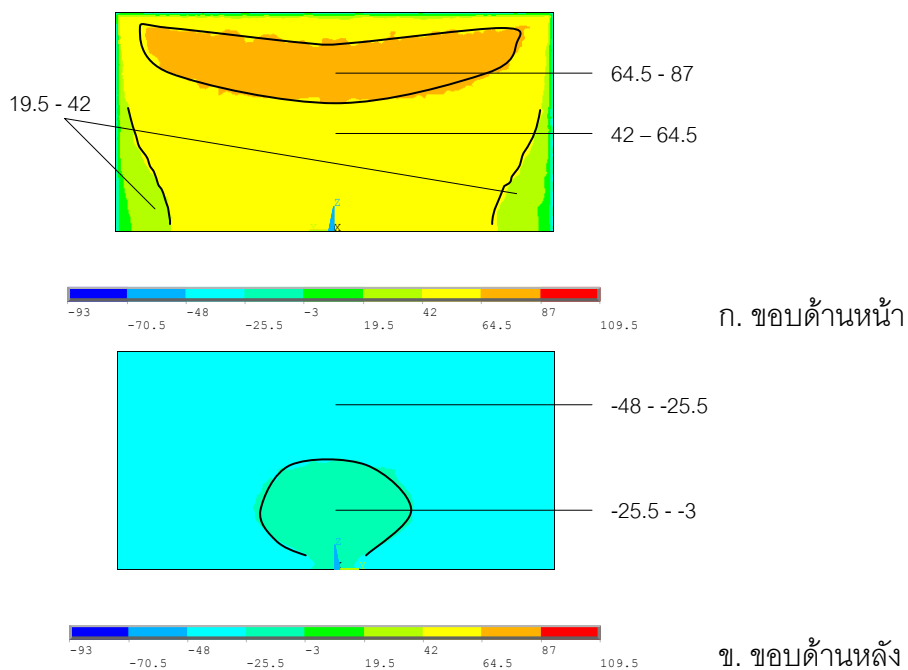
ภาพที่ 6.34 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$
และ $c/h = 1$ (นิวตันต่อตารางเมตร)



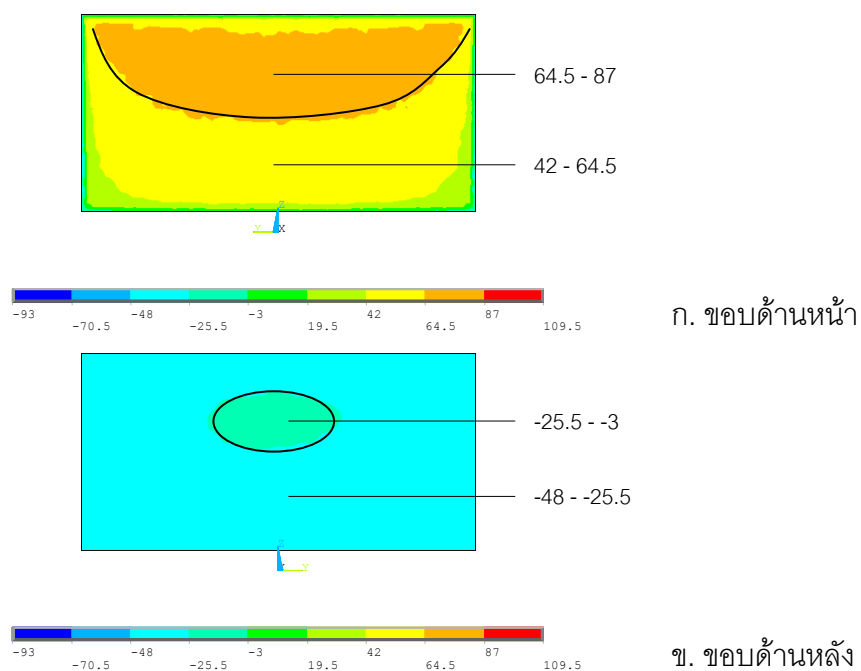
ภาพที่ 6.35 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$
และ $c/h = 0.9$ (นิวตันต่อตารางเมตร)



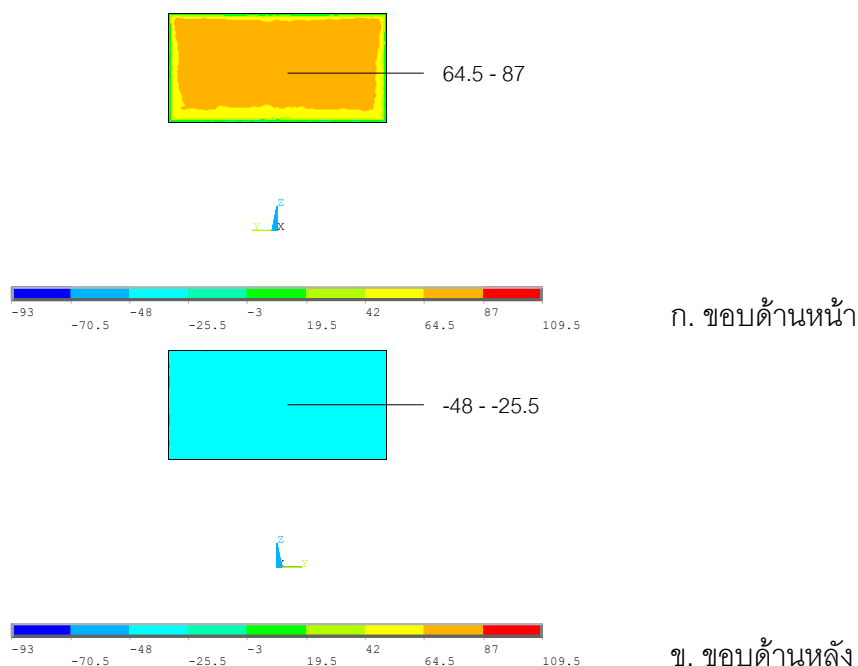
ภาพที่ 6.36 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 1$
และ $c/h = 0.5$ (นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 6.37 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$
และ $c/h = 1$ (นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 6.38 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณาขนาด $b/c = 2$
และ $c/h = 0.9$ (นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 6.39 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างปีกโฆษณาขนาด $b/c = 2$

และ $c/h = 0.5$ (นิวตันต่อตารางเมตร)

6.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างปีกโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ

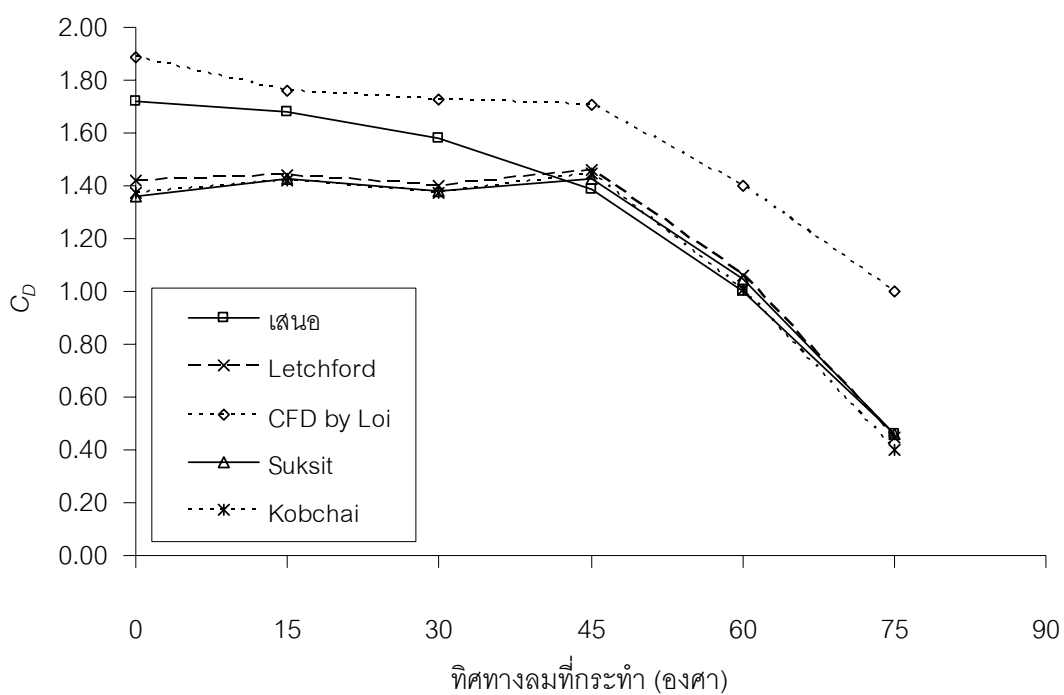
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างปีกโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y และระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ

6.5.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ CFD ของ (Loi, 2004) ที่ได้ใช้แบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ Model รวมไปถึงผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ที่ได้ทำการทดลองอุโมงค์ลมที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต (TU-AIT Wind Tunnel) ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5

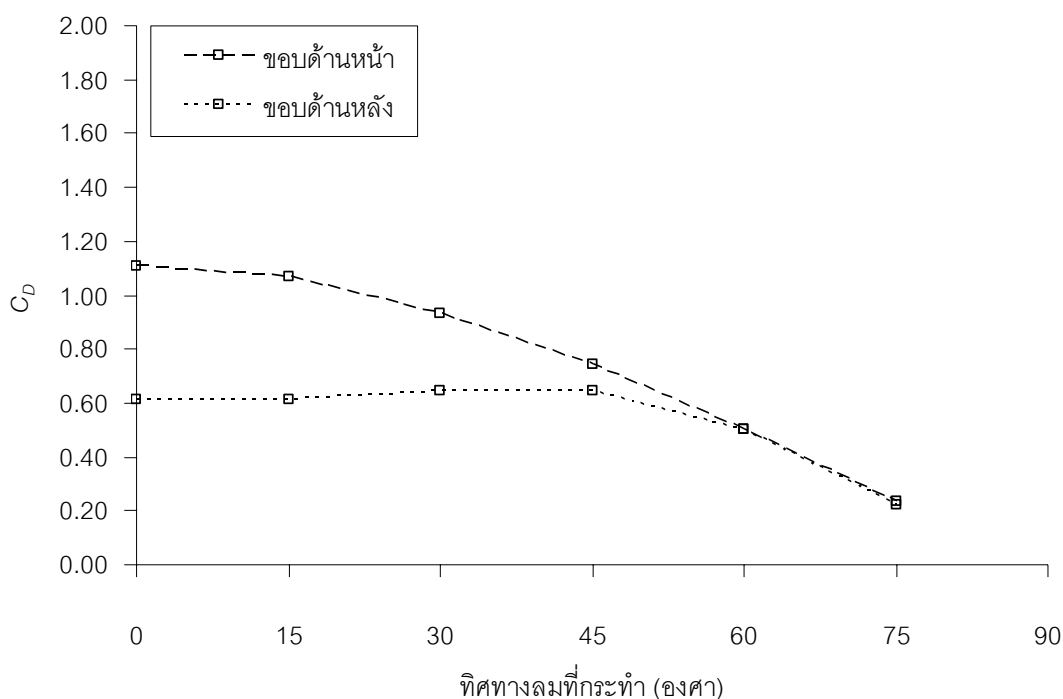
ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณา
กรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ

ทิศทางลม (องศา)		0	15	30	45	60	75
C_D	เสนอ	1.72	1.68	1.58	1.39	1.00	0.46
	(Letchford, 2001)	1.42	1.44	1.40	1.46	1.06	0.45
	(Loi, 2004)	1.89	1.76	1.73	1.71	1.40	1.00
	(Suksit, 2004)	1.36	1.43	1.38	1.43	1.05	0.46
	(Kobchai, 2005)	1.37	1.42	1.37	1.45	1.01	0.40



ภาพที่ 6.40 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x สำหรับทิศทางลมที่กระทำ

จากภาพที่ 6.40 ผลการวิเคราะห์ที่ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยสำหรับทิศทางลมที่ 0 องศา ถึง 30 องศา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 1.72, 1.68 และ 1.58 ตามลำดับ และหลังจากนั้นจึงลดลงเกือบเชิงเส้น ผลการวิเคราะห์ที่ได้บ่งชี้ว่าการที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงหลังจากทิศทางลม 0 องศา เป็นผลเนื่องมาจากแรงที่กระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าลดลงอย่างฉับพลันตั้งแต่ทิศทางลม 30 องศา เป็นต้นไปในขณะที่แรงที่กระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ 0 องศา จนถึง 45 องศา หลังจากนั้นจึงลดลงเกือบเชิงเส้น แสดงได้ดังภาพที่ 6.41 ขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ค่อนข้างคงที่สำหรับทิศทางลมที่ 0 องศา ถึง 45 องศา หลังจากนั้นจึงลดลงเกือบเชิงเส้น เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน โดยเฉพาะที่ทิศทางลม 45 องศา เป็นต้นไปสอดคล้องกันเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามที่ทิศทางลม 0 องศา ถึง 30 องศา ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มากกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลม



ภาพที่ 6.41 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาสำหรับทิศทางลมที่กระทำ

อย่างไรก็ดีจากการพิจารณาเรื่องผลของเสาดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.5.1 ในส่วนนี้จึงทำการพิจารณาผลของเสาด้วยเพื่อเป็นการตรวจสอบผลการวิเคราะห์เนื่องจากที่ทิศทางลม 0 องศา ถึง 30 องศา ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มากเกินไป ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีมีโครงสร้างป้ายโฆษณาติดกับเสาเชื่อมต่อฐาน และในกรณีที่มีเฉพาะเสาเชื่อมต่อฐานดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.5.1 จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Superposition แบบเดียวกันกับการทดลองอุโมงค์ลมให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 1.714, 1.694, 1.571, 1.403, 0.969 และ 0.435 สำหรับทิศทางลม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 ตามลำดับ เช่น ที่ทิศทางลม 30 องศา ผลการวิเคราะห์ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x กรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาติดกับเสาเชื่อมต่อฐาน เท่ากับ 1.692 ส่วนกรณีที่มีเฉพาะเสาเชื่อมต่อฐาน เท่ากับ 0.121 เมื่อหักลบแบบ Superposition ได้เท่ากับ 1.571 เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่เสนอก่อนหน้าซึ่งเสนอในส่วนของผลการวิเคราะห์ในกรณีของโครงสร้างป้ายโฆษณาเพียงอย่างเดียวตามภาพที่ 6.40 ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เกือบเท่ากันในทุกๆ ทิศทางลม ดังนั้นผลของเสาจึงไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มากนักเมื่อทิศทางลมเปลี่ยนไป วิธี Superposition ของการทดลองอุโมงค์ลมยังคงใช้ได้

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในกรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาติดกับเสาเชื่อมต่อฐาน โดยที่ทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ในเฉพาะส่วนของเสาช่วงบนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 0.0013, 0.0072, 0.0108, 0.0124, 0.0179 และ 0.0311 สำหรับทิศทางลม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับบริเวณดังกล่าวมีค่าน้อยมาก

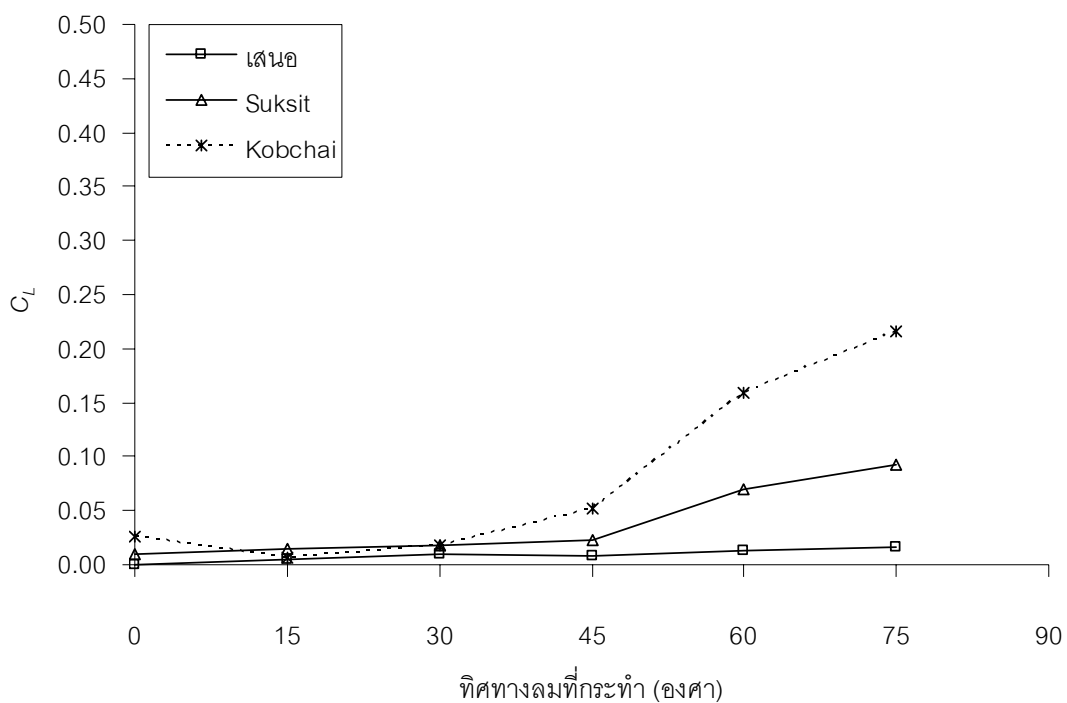
6.5.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y (C_L) การวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาเมื่อมีทิศทางลมเข้ามาเกี่ยวข้องอาจมีผลทำให้เกิดแรงกระทำตามทิศแกน y ได้ ถึงแม้ว่าผลของแรงที่กระทำตามทิศแกน y ไม่ใช่ปัจจัยหลักที่จะพิจารณาเมื่อเปรียบเทียบกับแรงกระทำตามทิศแกน x ทั้งนี้เนื่องมาจากพื้นที่ในการรับแรงนั้นมีน้อยอันเนื่องมาจากมิติความหนาของโครงสร้างป้ายโฆษณา อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงอ้างอิงผลการทดลองอุโมงค์ลม

จาก (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6

ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ของโครงสร้างป้ายโฆษณา
กรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ

ทิศทางลม (องศา)		0	15	30	45	60	75
C_L	เสนอ	0	0.005	0.009	0.009	0.012	0.016
	(Suksit, 2004)	0.009	0.015	0.018	0.023	0.069	0.092
	(Kobchai, 2005)	0.026	0.006	0.019	0.051	0.159	0.216



ภาพที่ 6.42 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y สำหรับทิศทางลมที่กระทำ

จากภาพที่ 6.42 ผลการวิเคราะห์ที่ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y มีค่าน้อยมากและค่อนข้างคงที่ในทุกๆ ทิศทางลมที่กระทำโดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ตั้งแต่ 0 - 0.016 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ทิศทางลมที่ 0 องศาจนถึง 45 องศา หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน จะเห็นได้ว่าที่ทิศทางลม 45 องศา เป็นต้นไปมีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร อย่างไรก็ตามคำกล่าวของ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ตามย่อหน้าถัดไปได้อธิบายไว้ว่า

โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y จะต้องไม่เปลี่ยนแปลงในทุกๆ ทิศทางลม ผลของค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นหลังจากทิศทางลมที่ 45 องศา ไปแล้วเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในการละเว้นผลของเสาด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ใช้ในการทำแบบจำลอง ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ของ (Kobchai Poemsantitham, 2005) มากกว่า (Suksit Sinthuwong, 2004) เนื่องจากเสาด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ใช้ในการทำแบบจำลองมีขนาดใหญ่กว่า (Kobchai Poemsantitham, 2005, p. 44)

ด้วยเหตุผลตามข้างต้นงานวิจัยนี้จึงได้พิสูจน์ผลของเสาที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ส่วนขนาดเสาและวิธีการดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.5.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Superposition ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y เท่ากับ 0.002, -0.017, -0.030, -0.020, 0.012 และ 0.040 สำหรับทิศทางลม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 ตามลำดับ เช่น ที่ทิศทางลม 75 องศา ผลการวิเคราะห์ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y กรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาติดกับเสาเชื่อมต่อฐาน เท่ากับ 0.175 ส่วนกรณีที่มีเฉพาะเสาเชื่อมต่อฐาน เท่ากับ 0.135 เมื่อหักลบแบบ Superposition ได้เท่ากับ 0.040 เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่เสนอก่อนหน้าซึ่งเสนอในส่วนของผลการวิเคราะห์ในกรณีของโครงสร้างป้ายโฆษณาเพียงอย่างเดียวตามภาพที่ 6.42 ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y เกือบเท่ากันในทุกๆ ทิศทางลม ดังนั้นผลของเสาจึงไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการณ์ผวนของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y มากนักเมื่อทิศทางลมเปลี่ยนไป ซึ่งไม่สอดคล้องกันกับคำกล่าวของ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ตามข้างต้น และมีความเป็นไปได้ว่าข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจมาจากส่วนอื่นรวมอยู่ด้วย

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในกรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาติดกับเสาเชื่อมต่อฐาน โดยที่ทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ในเฉพาะส่วนของเสาช่วงบนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา ผลการวิเคราะห์ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศ

แกน y เท่ากับ -0.0004, -0.0172, -0.0236, -0.0051, 0.0231 และ 0.0539 สำหรับทิศทางลม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ที่กระทำกับบริเวณดังกล่าวมีค่าน้อยมาก

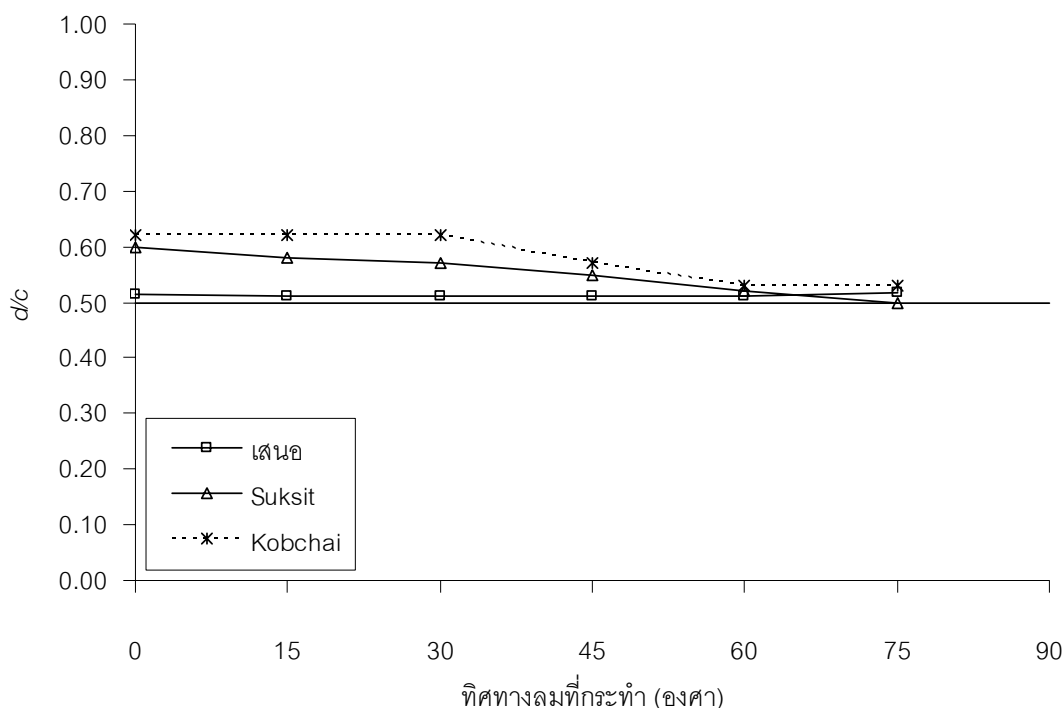
6.5.2.3 ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ ในกรณีที่มีผลของทิศทางลมที่กระทำจะทำให้เกิดระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาได้ ปกติแล้วระยะเยื้องศูนย์กลางแบ่งออกได้เป็น 2 แนว คือระยะเยื้องศูนย์กลางแนวดิ่ง (Vertical Eccentricity) และระยะเยื้องศูนย์กลางแนวราบ (Horizontal Eccentricity) ตำแหน่งของแรงที่กระทำเยื้องศูนย์กลางนิยามได้ดังภาพที่ 6.8 ระยะเยื้องศูนย์กลางที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005)

ก.ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวดิ่ง (Vertical Eccentricity, d/c) ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวดิ่ง (Vertical Eccentricity) จะแทนด้วยอัตราส่วนของ d/c ในภาพที่ 6.8 ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7

ผลการวิเคราะห์ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวดิ่ง

ทิศทางลม (องศา)		0	15	30	45	60	75
d/c	เสนอ	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52
	(Suksit, 2004)	0.60	0.58	0.57	0.55	0.52	0.50
	(Kobchai, 2005)	0.62	0.62	0.62	0.57	0.53	0.53



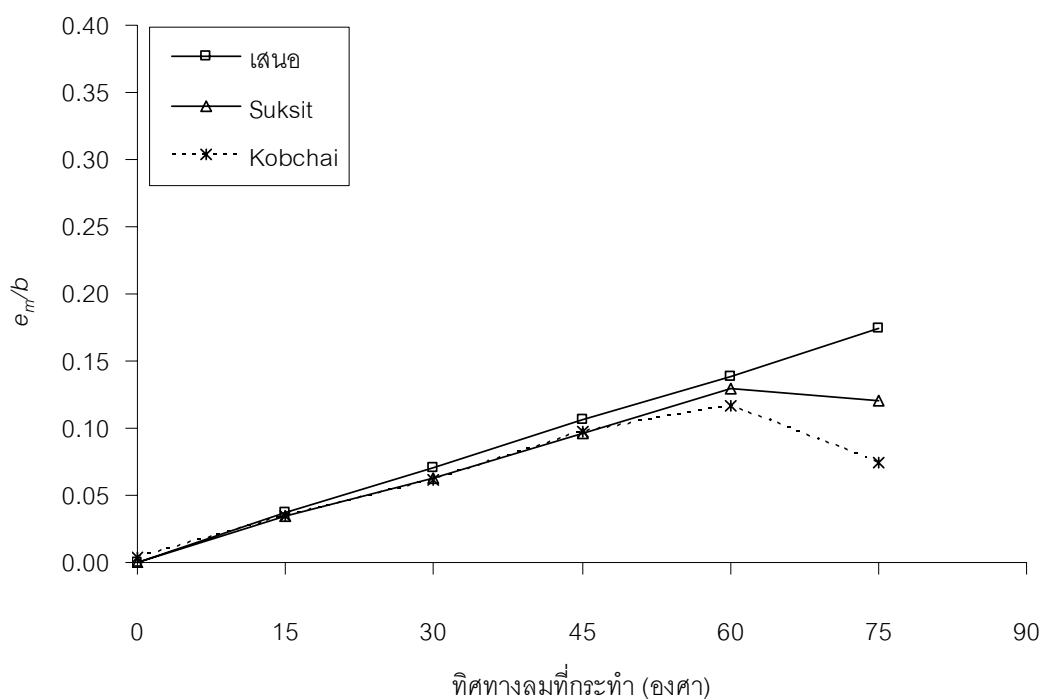
ภาพที่ 6.43 ระยะเยื้องศูนย์แนวดิ่งสำหรับทิศทางลมที่กระทำ

จากภาพที่ 6.43 ผลการวิเคราะห์ได้ระยะเยื้องศูนย์แนวดิ่งค่อนข้างคงที่โดยมีค่าประมาณ 0.51 อย่างไรก็ตามในทุกทิศทางลมให้ระยะเยื้องศูนย์แนวดิ่งมากกว่า 0.5 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ให้ระยะเยื้องศูนย์แนวดิ่งประมาณ 0.6 ที่ทิศทางลม 0 องศา ถึง 30 องศาหลังจากนั้นจึงลดลงเข้าใกล้ 0.5 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองอุโมงค์ลมพบว่ามีความโน้มเอียงเหมือนกันโดยที่ได้ค่าระยะเยื้องศูนย์แนวดิ่งมากกว่า 0.5 ในทุกๆ ทิศทางลม ตำแหน่งระยะเยื้องศูนย์แนวดิ่งอยู่ครึ่งบนของโครงสร้างป้ายโฆษณา โดยที่ (Suksit Sinthuwong, 2004, p. 52) ได้แนะนำค่า d/c เท่ากับ 0.6 และ (Kobchai Poemsantitham, 2005, p. 50) ได้แนะนำค่า d/c เท่ากับ 0.63

ข. ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวนอน (Horizontal Eccentricity, e_m/b) ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวนอน (Horizontal eccentricity) ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8
ผลการวิเคราะห์ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวนอน

ทิศทางลม (องศา)		0	15	30	45	60	75
e_m/b	เสนอ	0	0.04	0.07	0.11	0.14	0.17
	(Suksit, 2004)	0	0.04	0.06	0.10	0.13	0.12
	(Kobchai, 2005)	0	0.04	0.06	0.10	0.12	0.07

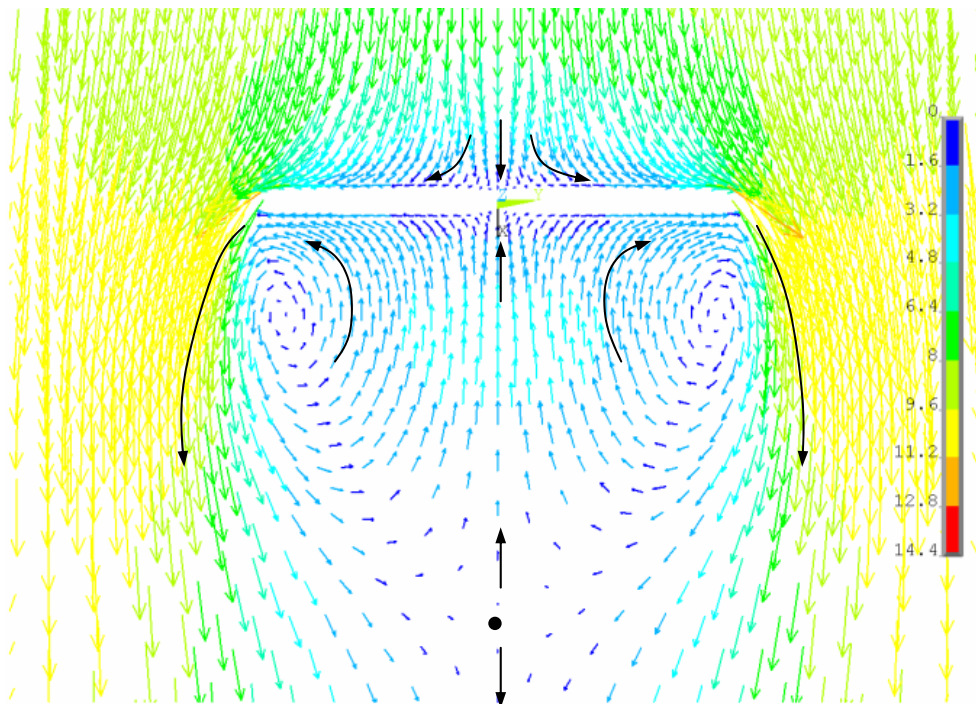


ภาพที่ 6.44 ระยะเยื้องศูนย์กลางแนวนอนสำหรับทิศทางลมที่กระทำ

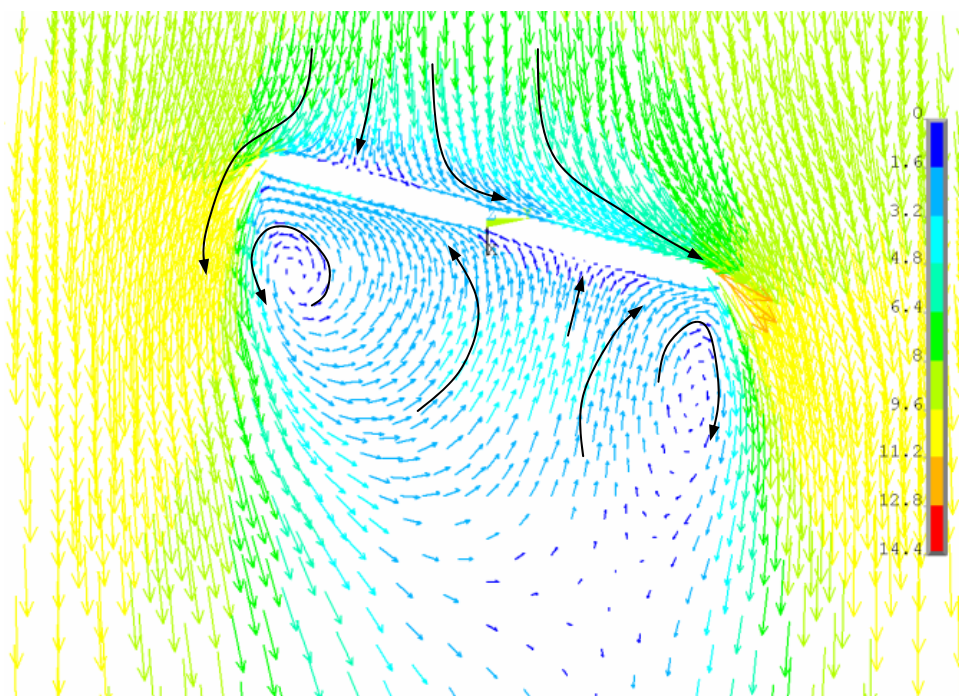
จากภาพที่ 6.44 ผลการวิเคราะห์ที่ได้ให้ระยะเยื้องศูนย์แนวราบเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น โดยให้ระยะเยื้องศูนย์แนวราบมากที่สุดเท่ากับ 0.17 ที่ทิศทางลม 75 องศา ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมให้ระยะเยื้องศูนย์แนวราบเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตั้งแต่ทิศทางลม 0 ถึง 60 องศา จากนั้นจึงลดลงเล็กน้อย ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ในกรณีมุมปะทะ 0 องศา ถึง 60 องศา แต่ในกรณีมุมปะทะ 75 องศา นั้นผลการทดลองอุโมงค์ลมให้ระยะเยื้องศูนย์แนวราบลดลงโดยมีระยะเยื้องศูนย์แนวราบมากที่สุดประมาณ 0.12 ที่มุมปะทะ 60 องศา

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ที่แสดงอยู่ในรูปการไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมและเส้นชั้นความดันลมสามารถอธิบายการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมได้ดังนี้ การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงเล็กน้อยที่ทิศทางลม 0 ถึง 30 องศา หลังจากนั้นจึงลดลงแบบเชิงเส้นจนถึงมุมปะทะที่ 75 องศา นั้นหากพิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 6.45 ถึง ภาพที่ 6.50 จะเห็นได้ว่าเมื่อทิศทางลมเปลี่ยนไปลมที่ปะทะด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณามีองค์ประกอบของลมในทิศตั้งฉากกับโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลง โดยมีลักษณะลู่ลมอย่างสมบูรณ์มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันลักษณะลมหมุน (Wake) บริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาจากเดิมที่มีสองวงอย่างสมบูรณ์จะค่อยๆหายไปจนในที่สุดมีลักษณะลมที่ขนานไปกับโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มุมปะทะ 75 องศา ส่งผลให้ภาพเส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 6.51 ถึง ภาพที่ 6.56 ที่บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดัน (Pressure) และมีค่าแรงดันโดยรวมลดลงอย่างมากเมื่อมุมเปลี่ยนไป โดยที่บริเวณส่วนบนทางขอบข้างด้านต้นลมให้ค่าแรงดันเพิ่มขึ้นเล็กน้อยส่วนแรงดันขอบข้างด้านท้ายลมเป็นให้ค่าแรงดันลดลงอย่างมาก โดยที่ลักษณะการกระจายตัวของเส้นชั้นความดันบริเวณขอบด้านหน้าสอดคล้องกันกับการวิเคราะห์ค่าระยะเยื้องศูนย์แนวตั้ง d/c และค่าระยะเยื้องศูนย์แนวราบ e_m/b ในกรณีที่บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูด (Suction) และมีค่าแรงดูดโดยรวมลดลงเมื่อมุมเปลี่ยนไป ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาตามภาพที่ 6.41

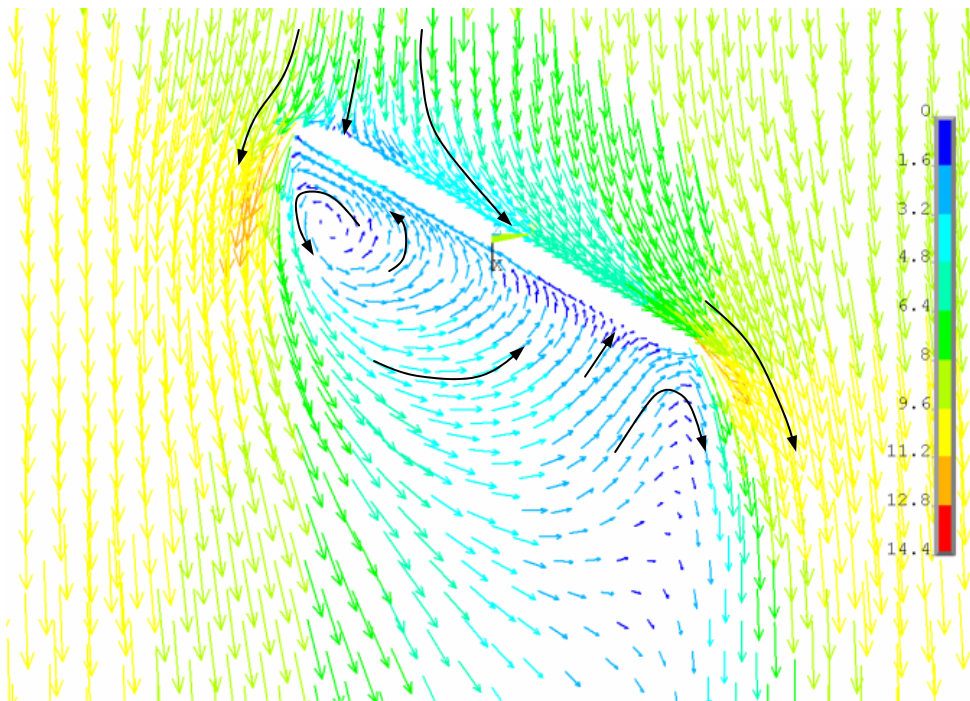
ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ที่มีค่าประมาณศูนย์ เป็นผลมาจากมิติความหนาของป้าย อีกทั้งหากพิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 6.45 ถึง ภาพที่ 6.50 ลมที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณามีลักษณะลู่ลมมากขึ้นเมื่อทิศทางลมเปลี่ยนไป



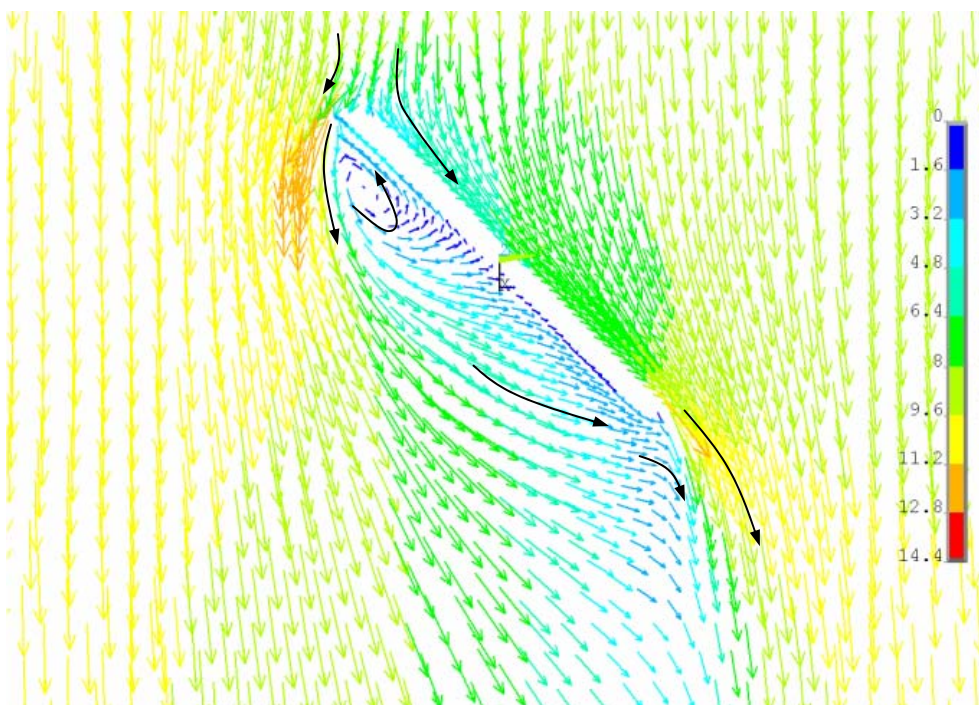
ภาพที่ 6.45 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ
สำหรับทิศทางลม 0 องศา (เมตรต่อวินาที)



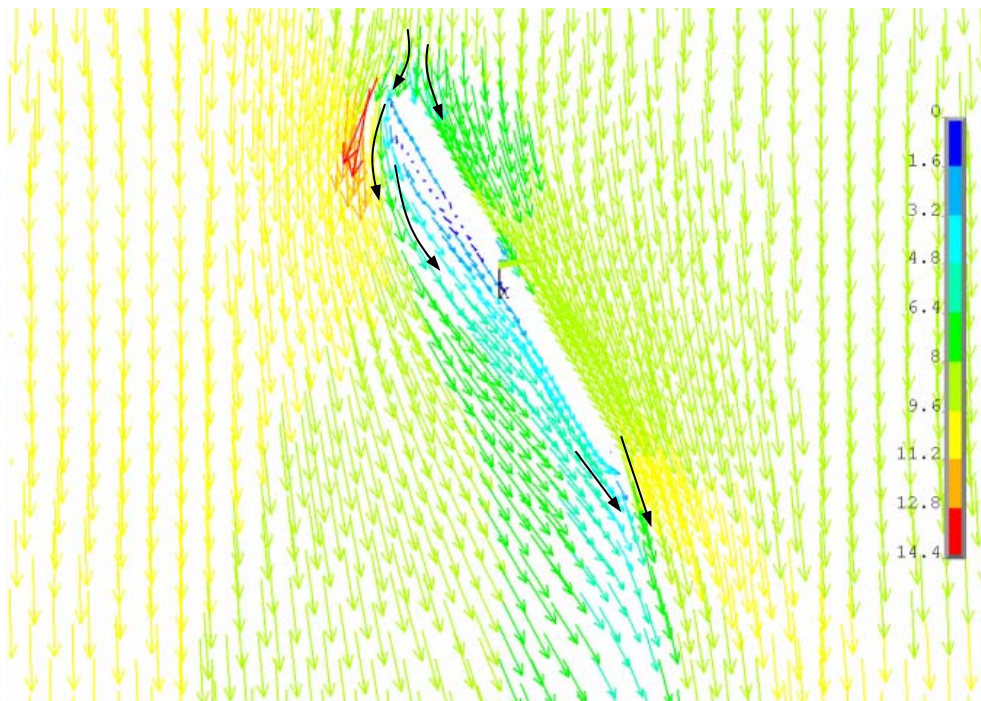
ภาพที่ 6.46 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ
สำหรับทิศทางลม 15 องศา (เมตรต่อวินาที)



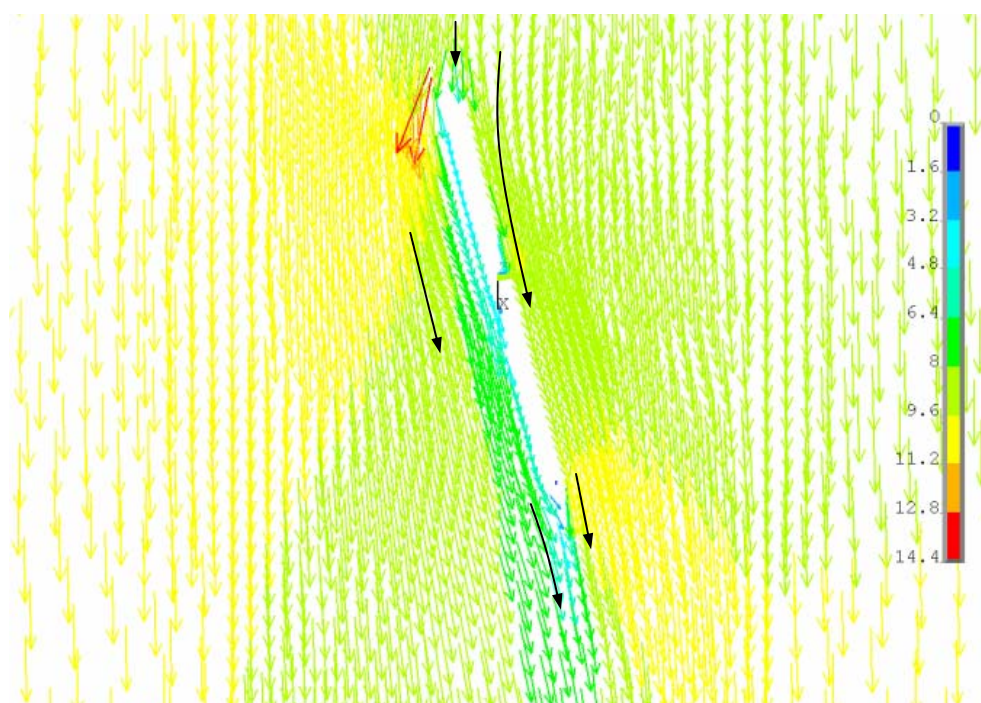
ภาพที่ 6.47 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ
สำหรับทิศทางลม 30 องศา (เมตรต่อวินาที)



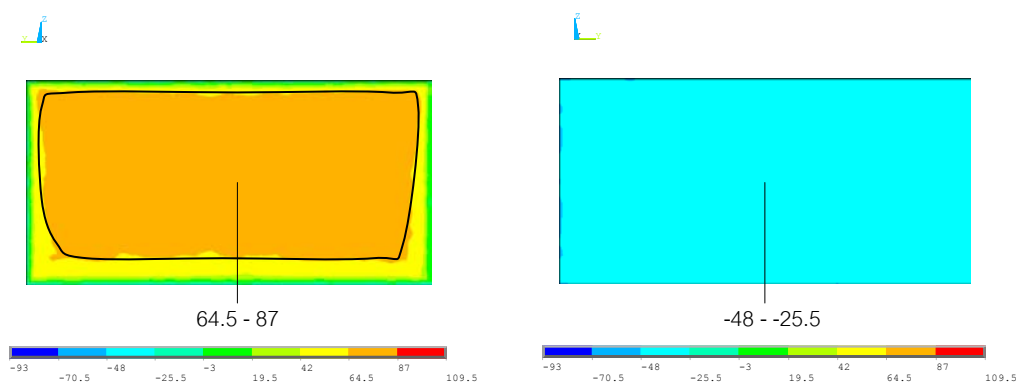
ภาพที่ 6.48 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ
สำหรับทิศทางลม 45 องศา (เมตรต่อวินาที)



ภาพที่ 6.49 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ
สำหรับทิศทางลม 60 องศา (เมตรต่อวินาที)



ภาพที่ 6.50 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณาแนวราบ
สำหรับทิศทางลม 75 องศา (เมตรต่อวินาที)

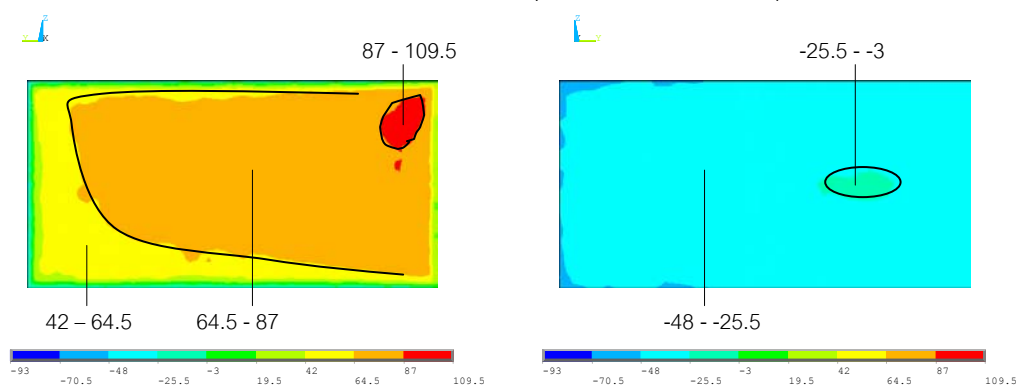


ก. ขอบด้านหน้า

ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 6.51 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างปายโฆษณา

สำหรับทิศทางลม 0 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)

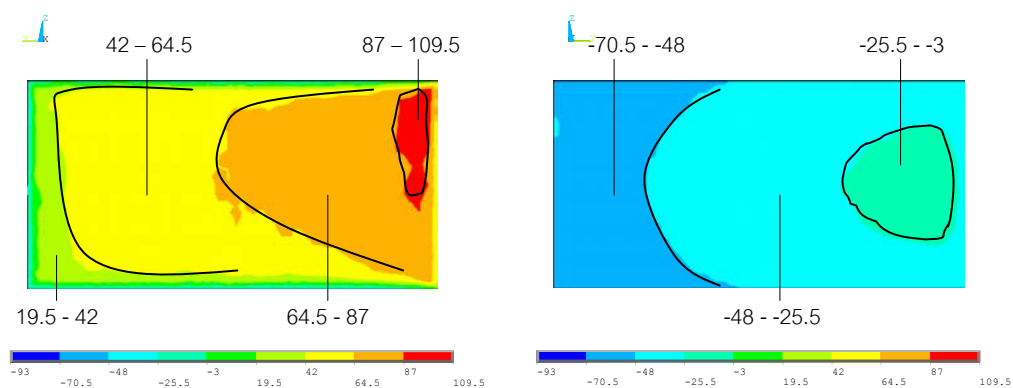


ก. ขอบด้านหน้า

ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 6.52 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างปายโฆษณา

สำหรับทิศทางลม 15 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)

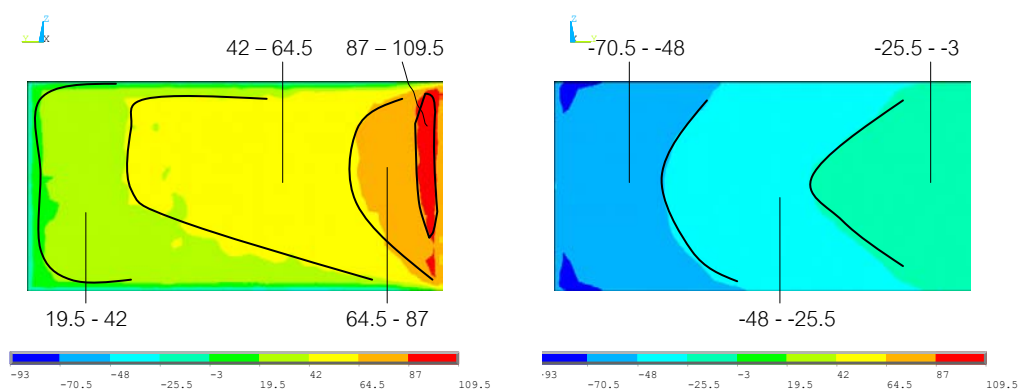


ก. ขอบด้านหน้า

ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 6.53 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างปายโฆษณา

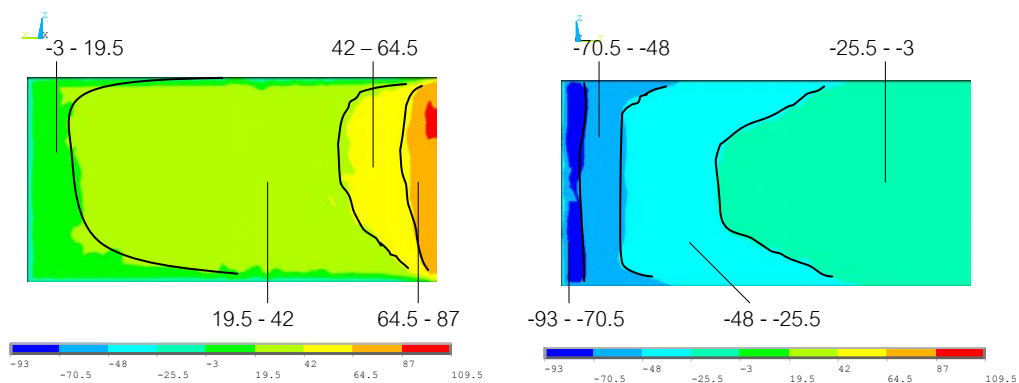
สำหรับทิศทางลม 30 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)



ก. ขอบด้านหน้า

ข. ขอบด้านหลัง

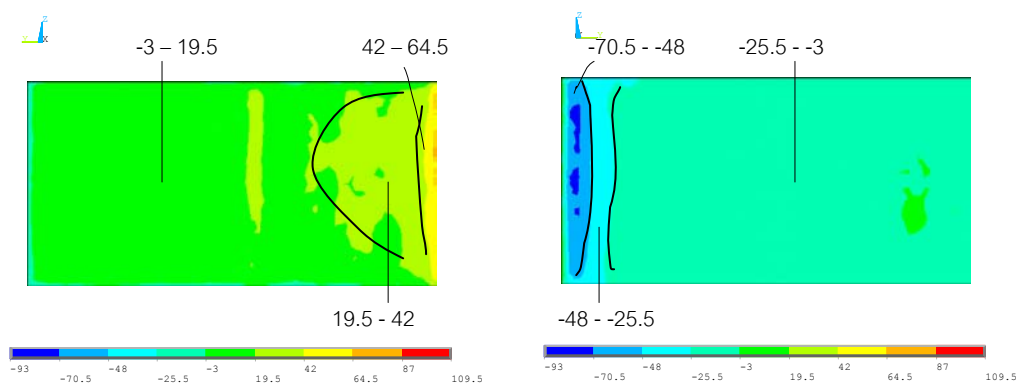
ภาพที่ 6.54 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณา
สำหรับทิศทางลม 45 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)



ก. ขอบด้านหน้า

ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 6.55 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณา
สำหรับทิศทางลม 60 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)



ก. ขอบด้านหน้า

ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 6.56 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณา
สำหรับทิศทางลม 75 องศา (นิวตันต่อตารางเมตร)

6.6 สรุปผลการวิเคราะห์

สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาในบพนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ตามลักษณะของปัญหาที่วิเคราะห์คือ การวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กัน และ การวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ

6.6.1 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีขนาดอัตราส่วนต่างๆ กัน

1. ผลของ Aspect Ratio: จากความสัมพันธ์ของ Aspect Ratio กับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่า ผลของ Aspect Ratio จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ค่อนข้างคงที่สำหรับ Clearance Ratio หนึ่งๆ
2. ผลของ Clearance Ratio: จากความสัมพันธ์ของ Clearance Ratio กับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x จะเพิ่มขึ้นเมื่อ Clearance Ratio ลดลง
3. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (Letchford, 2001) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ค่าคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (Letchford, 2001) สูงสุดประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีขนาดของโครงสร้างป้ายโฆษณา Aspect Ratio เท่ากับ 2 Clearance Ratio เท่ากับ 1 และ Aspect Ratio เท่ากับ 1 Clearance Ratio เท่ากับ 0.5
4. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Letchford, 2001) บ่งชี้ว่าให้ผลในภาพรวมที่ดีกว่า (Loi, 2004) ที่ได้ใช้แบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ Model และโปรแกรมการทำงานเดียวกันกับในงานวิจัยนี้

6.6.2 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำ

1. จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่า ที่ทิศทางลม 0 องศา ถึงทิศทางลม 30 องศาจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงเล็กน้อย หลังจากนั้นจึงลดลงจนเกือบเชิงเส้นที่ทิศทางลม 45 องศา ถึงทิศทางลม 75 องศา
2. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (Letchford, 2001) (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน โดยที่มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีตั้งแต่ที่ทิศทางลม 45 องศาเป็นต้นไป อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ค่าคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (Letchford, 2001) สูงสุดประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ ที่ทิศทางตรง (0 องศา)
3. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ผลที่ดีกว่า (Loi, 2004) อยู่พอสมควร
4. จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y มีค่าน้อยมากและค่อนข้างคงที่ในทุกๆ ทิศทางลม และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) พบว่ามีความสอดคล้องกันดี อย่างไรก็ตาม ที่ทิศทางลมตั้งแต่ 45 องศาเป็นต้นไปค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน y ที่ได้จากการทดลองอุโมงค์ลมมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งนี้ให้เหตุผลว่ามาจากผลของเสาด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง
5. ผลการวิเคราะห์ระยะเยื้องศูนย์แนวตั้ง (d/c) ที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่ามีค่า d/c ประมาณ 0.51 คงที่ในทุกทิศทางลม และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Suksit Sinthuwong, 2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) พบว่ามีแนวโน้มเดียวกัน
6. ผลการวิเคราะห์ระยะเยื้องศูนย์แนวราบ (e_m/b) ที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่ามีค่า e_m/b เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในทุกทิศทางลมโดยให้ค่า e_m/b มากที่สุดเท่ากับ 0.17 ที่ทิศทางลม 75 องศา และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (Suksit Sinthuwong,

2004) และ (Kobchai Poemsantitham, 2005) พบว่ามีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองอุโมงค์ลมให้ค่า e_m/b มากที่สุดเท่ากับ 0.12 ที่ทิศทางลม 60 องศา หลังจากนั้นให้ค่า e_m/b ลดลงเล็กน้อย

บทที่ 7

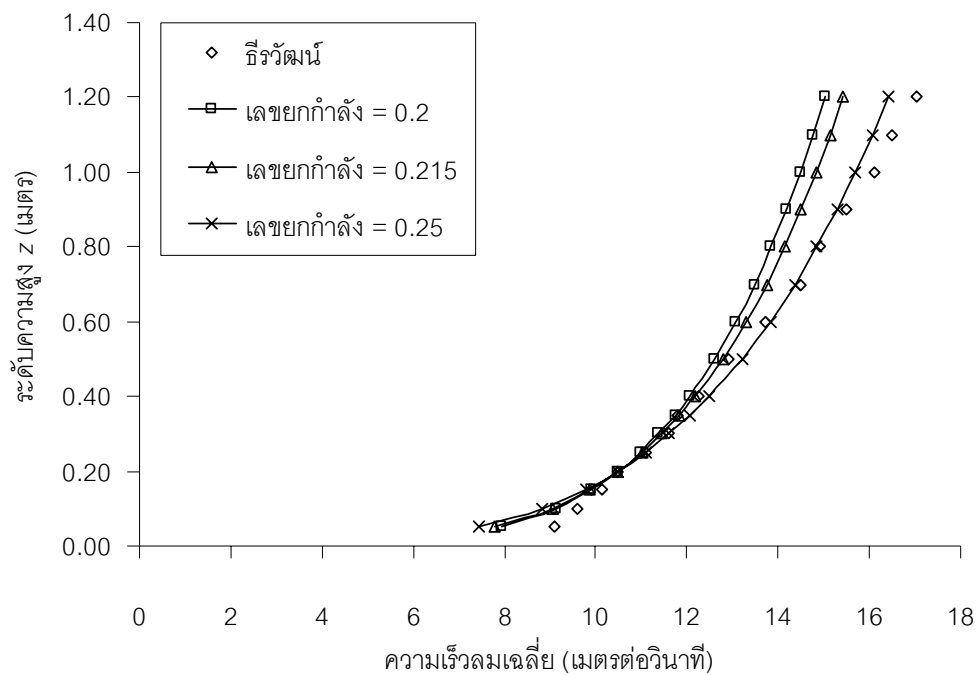
กรณีศึกษา: ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียง

7.1 ทัวไป

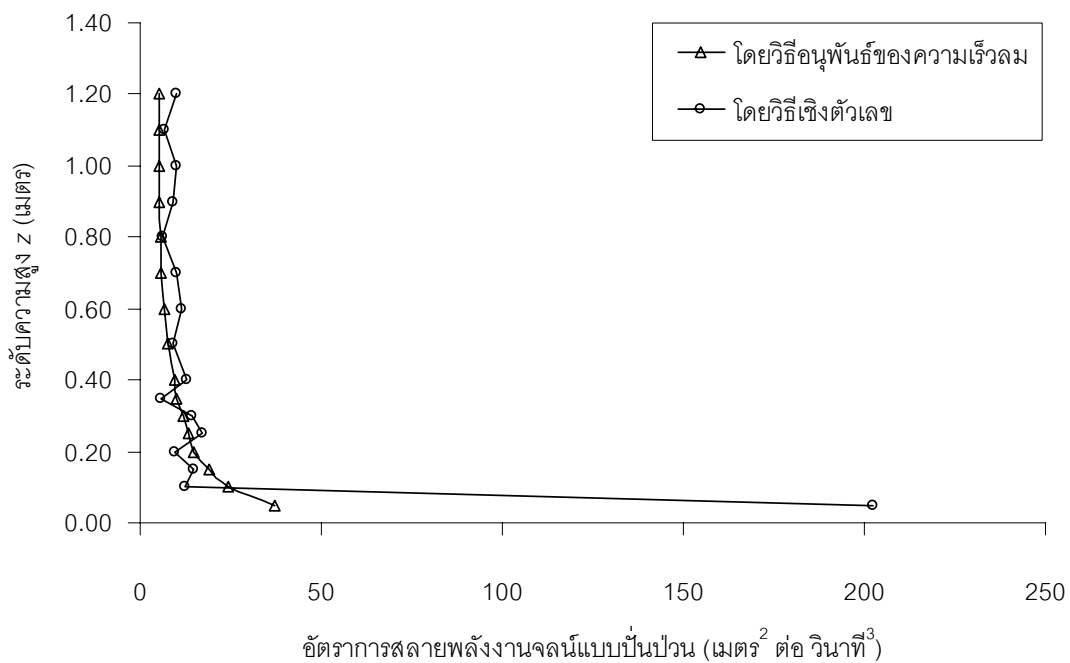
ในบทที่แล้วได้กล่าวถึงกรณีศึกษาผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีขนาดต่างๆและในกรณีคำนึงถึงผลของทิศทางลมเป็นเบื้องต้น อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงโครงสร้างป้ายโฆษณาอาจตั้งอยู่ในบริเวณสภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อลมที่มากระทำกับโครงสร้างได้ เช่นในกรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาอาจตั้งอยู่ใกล้กับอาคาร เป็นต้น ดังนั้นในบทนี้จึงทำการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงเพิ่มเติม ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมก่อนหน้า

การวิเคราะห์ในบทนี้ใช้ข้อมูลอ้างอิงเชิงตัวเลขในการกำหนดสภาพขอบเขตด้านต้นลมในบทที่ 5 หัวข้อ 5.3.2 จากงานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ที่ได้ทำการทดลองอุโมงค์ลมที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต (TU-AIT Wind Tunnel) โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ 10.5 เมตรต่อวินาที ที่ระดับขอบบนของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ความสูงจากพื้นเท่ากับ 0.2 เมตร และค่าเลขยกกำลัง (α) ที่เหมาะสมกับลักษณะของลมเท่ากับ 0.215 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate, ε) ดังแสดงได้ในภาพที่ 7.1 ส่วนค่าความเข้มของความปั่นป่วนของลม (Turbulence Intensity) แสดงได้ดังภาพที่ 7.2

ในบทนี้เลือกการคำนวณค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนในรูปค่าอนุพันธ์ของความเร็วม โดยการใช้ค่าเลขยกกำลัง (α) ที่เหมาะสมกับลักษณะลมที่ได้จากการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) โดยมุ่งเน้นความเหมาะสมกันไปที่ระดับความสูงของโครงสร้างเป็นสำคัญ การเลือกวิธีในข้างต้นมีเหตุผลเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 6 หัวข้อ 6.1

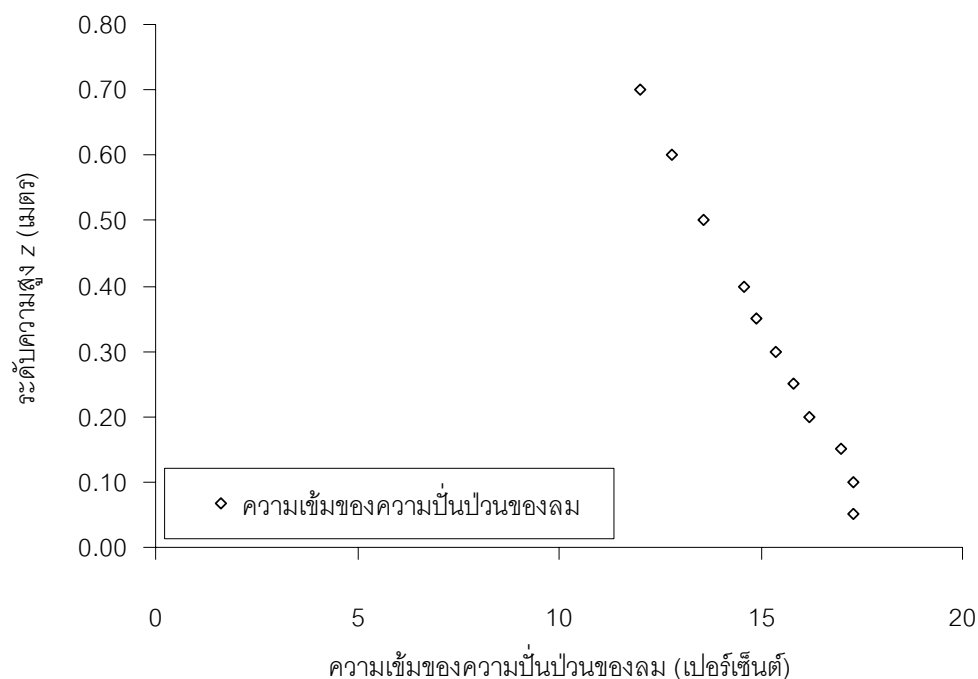


ก. ความเร็วลมเฉลี่ยและค่าเลขยกกำลัง (α) ที่เหมาะสมกับลักษณะของลมเท่ากับ 0.215



ข. อัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน

ภาพที่ 7.1 ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)



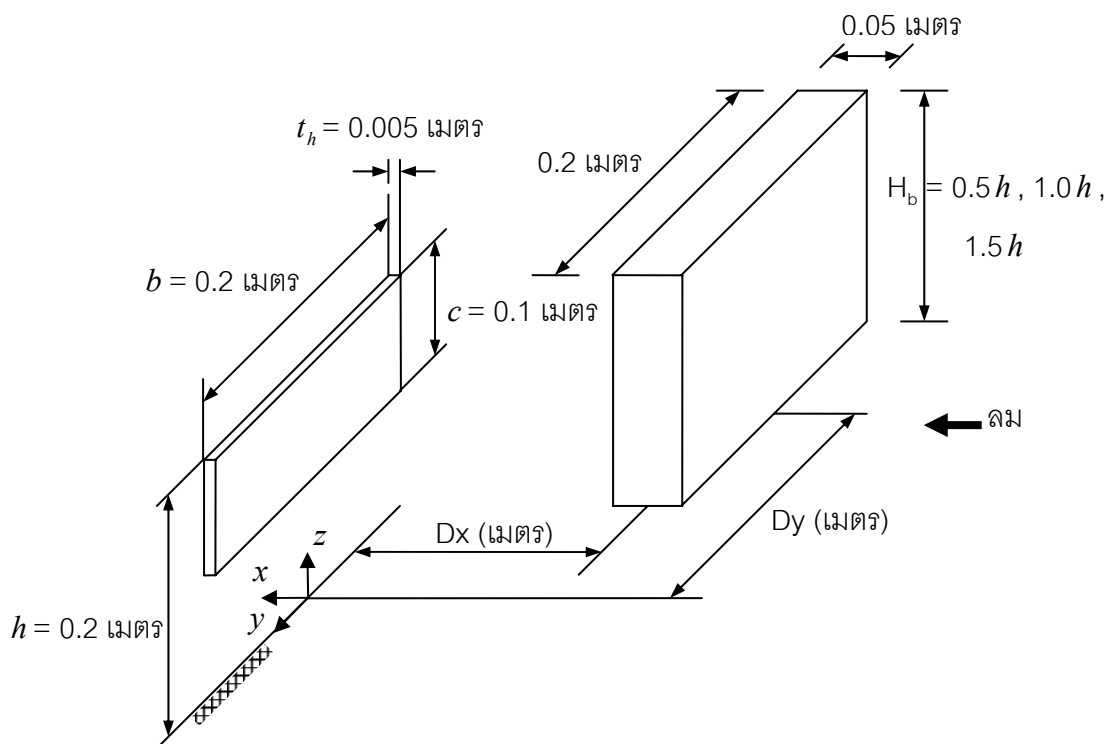
ภาพที่ 7.2 ความเข้มของความปั่นป่วนของลมที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์
(ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)

7.2 การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหา

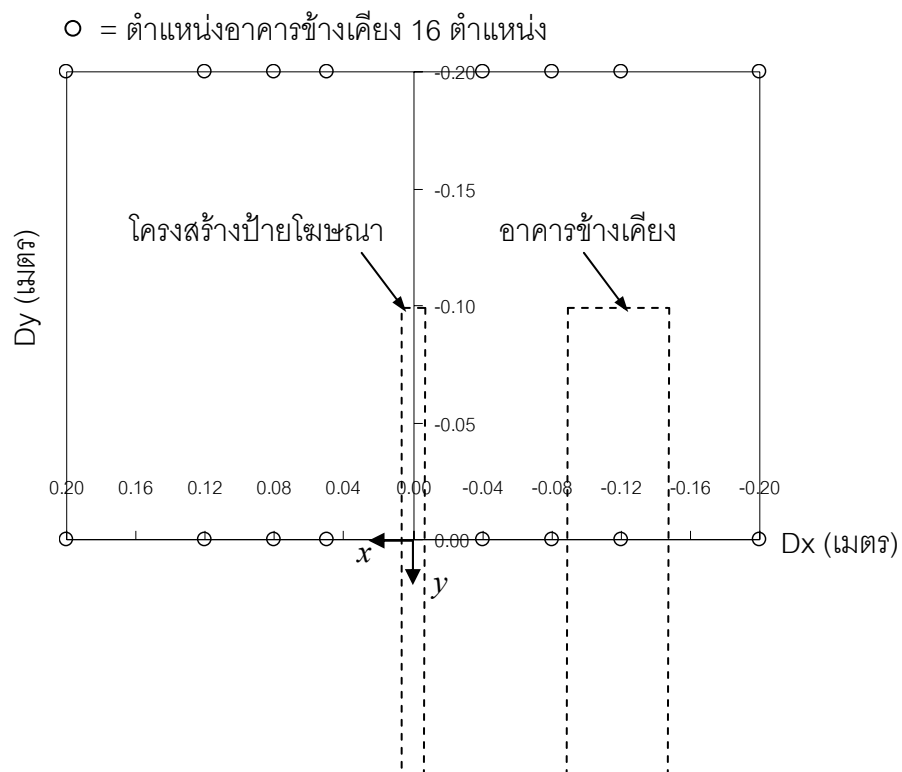
การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกทำความเข้าใจกับลักษณะปัญหา ขั้นตอนที่สองทำการสร้างขอบเขตของการวิเคราะห์ และขั้นตอนสุดท้ายทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์

7.2.1 ลักษณะของปัญหา

การวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาในบพนี้ จะมุ่งไปที่การศึกษาผลของอาคารข้างเคียงที่ตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับโครงสร้างป้ายโฆษณา โดยที่ขนาดของอาคารข้างเคียงจะมี 3 ขนาด มิติของโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารข้างเคียงรวมไปถึงตำแหน่งของอาคารข้างเคียงสามารถพิจารณาได้ในภาพที่ 7.3 และ ภาพที่ 7.4



ภาพที่ 7.3 ขนาดและตำแหน่งของโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารข้างเคียง

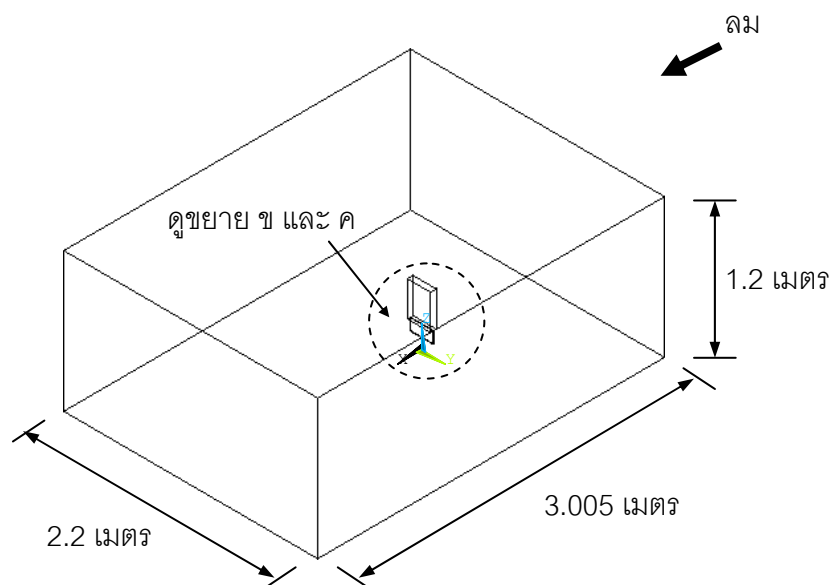


ภาพที่ 7.4 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของอาคารข้างเคียง

จากภาพที่ 7.3 และ ภาพที่ 7.4 ขนาดของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความกว้าง (b) เท่ากับ 0.2 เมตร ความสูง (c) เท่ากับ 0.1 เมตร ความหนา (t_h) เท่ากับ 0.005 เมตร และความสูงทั้งหมดจากพื้น (h) เท่ากับ 0.2 เมตร ในขณะที่อาคารข้างเคียงมี 3 ขนาดคือ มีความกว้างคงที่เท่ากับ 0.2 เมตร และความหนาคงที่เท่ากับ 0.05 เมตร แต่จะแปรเปลี่ยนตามความสูง (H_b) โดยที่มีความสูง $0.5h$, $1.0h$ และ $1.5h$ ตามลำดับ ตำแหน่งของอาคารข้างเคียงที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ตำแหน่งตามทิศแกน x (Dx) มีทั้งหมด 8 ตำแหน่ง ได้แก่ Dx เท่ากับ -0.20, -0.12, -0.08, -0.04, 0.05, 0.08, 0.12 และ 0.20 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่ตำแหน่งตามทิศแกน y (Dy) มี 2 ตำแหน่ง ได้แก่ Dy เท่ากับ 0 เมตร และ -0.20 เมตร

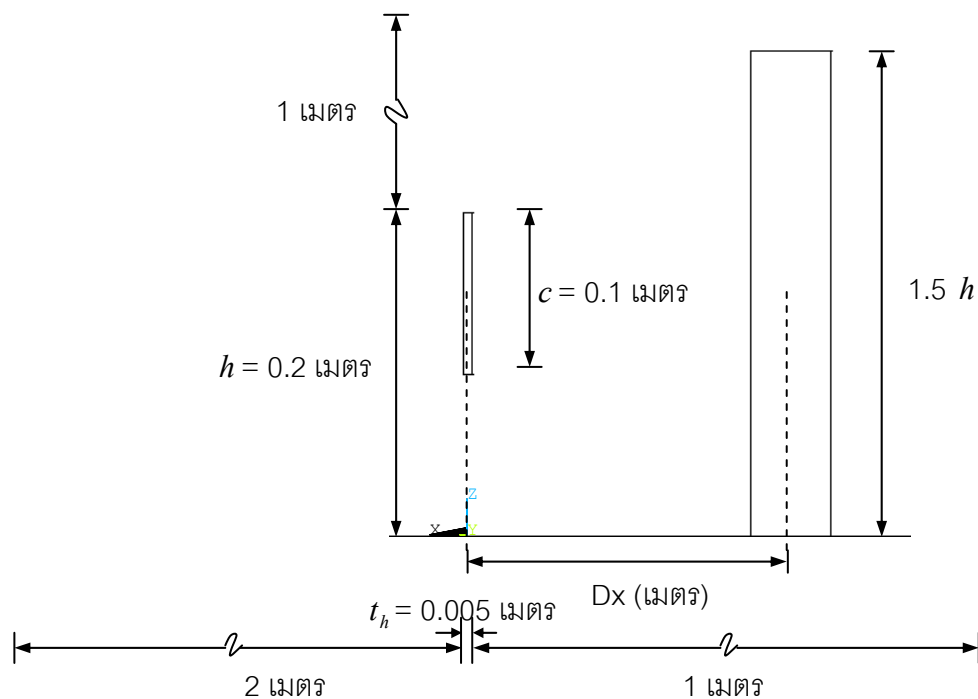
7.2.2 การสร้างขอบเขต

ขอบเขต (Domain) ของอากาศที่ครอบคลุมโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างพอสมควรเพื่อที่จะแน่ใจได้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ที่กำหนดจะไม่รบกวนสภาวะการไหลของลมรอบโครงสร้าง การสร้างขอบเขตการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียง แสดงได้ดังภาพที่ 7.5

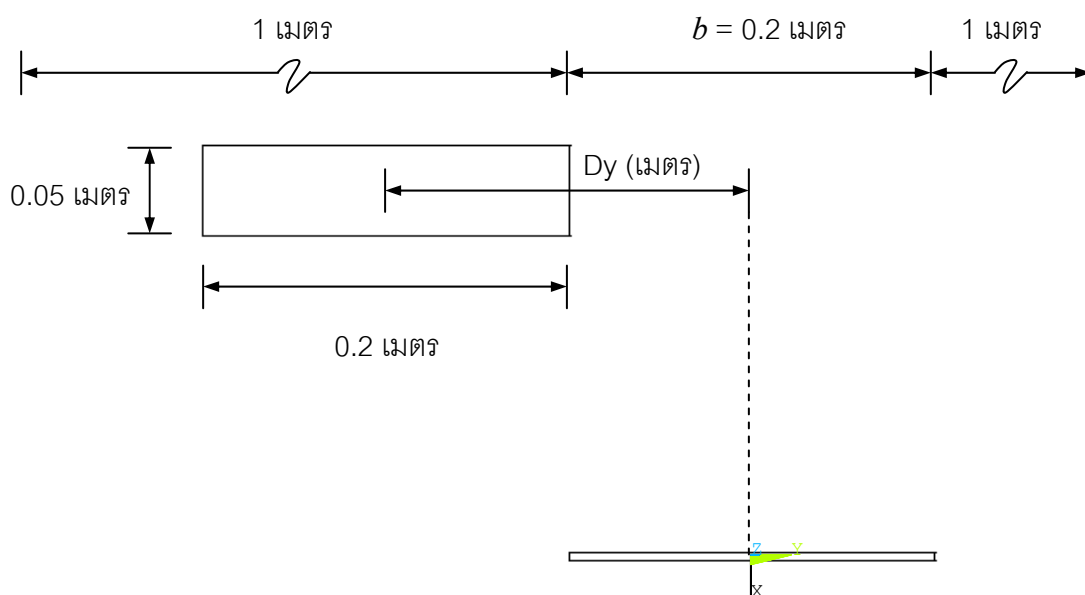


ก. ขนาดขอบเขตโดยรวม

ภาพที่ 7.5 ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียง



ข. ภาพขยายด้านข้าง



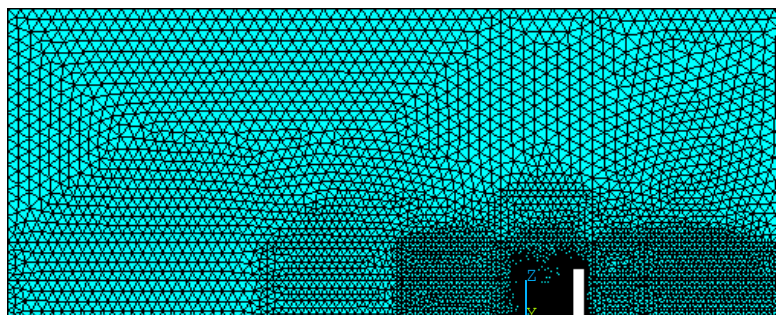
ค. ภาพขยายด้านบน

ภาพที่ 7.5 (ต่อ) ขนาดขอบเขตของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียง

จากภาพที่ 7.5 ขนาดขอบเขตของการวิเคราะห์ มีระยะจากขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านต้นลมเท่ากับ 1 เมตร ระยะจากขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านท้ายลมเท่ากับ 2 เมตร ระยะจากขอบบนโครงสร้างป้ายโฆษณาถึงด้านบนเท่ากับ 1 เมตร และระยะจากขอบข้างโครงสร้างป้ายโฆษณาทั้งสองข้างจนถึงด้านข้างขวาและด้านข้างซ้ายมีระยะเท่ากันคือ 1 เมตร ในขณะที่ขนาดของอาคารข้างเคียงและตำแหน่งที่ตั้งจะแปรเปลี่ยนไปตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้

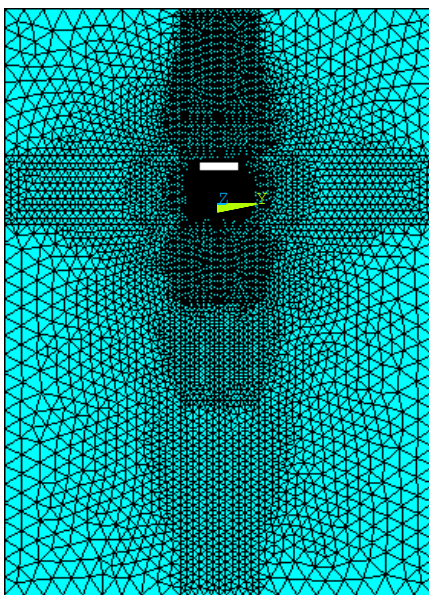
7.2.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เอลิเมนต์ของอากาศที่สร้างขึ้นสำหรับการวิเคราะห์จะมีขนาดประมาณ 0.005 เมตร บริเวณรอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารข้างเคียง หลังจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขนาดของเอลิเมนต์เมื่อไกลออกไป ขนาดเอลิเมนต์ที่ใหญ่ที่สุดมีขนาดประมาณ 0.1 เมตร การแบ่งเอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์แสดงได้ดังภาพที่ 7.6

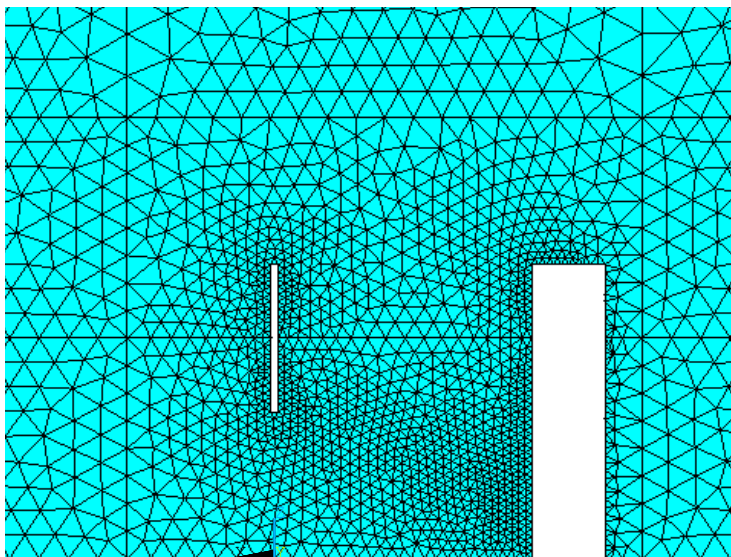


ก. ภาพตัดแนวดิ่งที่จุดศูนย์กลางโครงสร้างป้ายโฆษณา

ภาพที่ 7.6 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารข้างเคียง

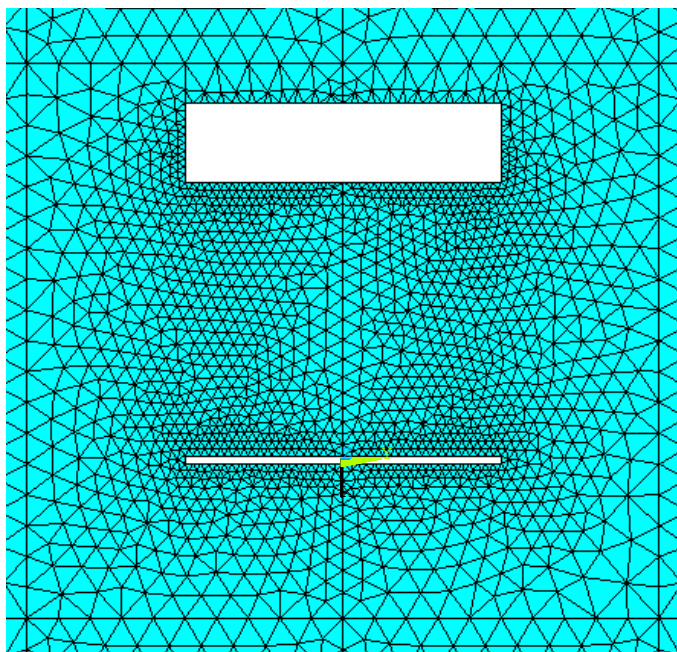


ข. ภาพตัดแนวราบที่จุดศูนย์กลางโครงสร้างป้ายโฆษณา



ค. ภาพขยายภาพตัดแนวตั้ง

ภาพที่ 7.6 (ต่อ) ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารข้างเคียง



ง. ภาพขยายภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.6 (ต่อ) ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆโครงสร้างป้ายโฆษณาและอาคารข้างเคียง

7.3 วิธีการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียง โดยจะแสดงผลอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของแรงลมเฉลี่ยที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาในทิศทางตามทิศแกน x กรณีมีอาคารข้างเคียงต่อค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวในกรณีไม่มีอาคารข้างเคียง (Interference Factor, IF) ตามสมการที่ 7.2

$$C_D = \frac{\bar{F}_x}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}_{ref}^2 bc} \quad (7.1)$$

$$IF = \frac{C_D \text{ ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีมีอาคารข้างเคียง}}{C_D \text{ ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีไม่มีอาคารข้างเคียง}} \quad (7.2)$$

โดยที่

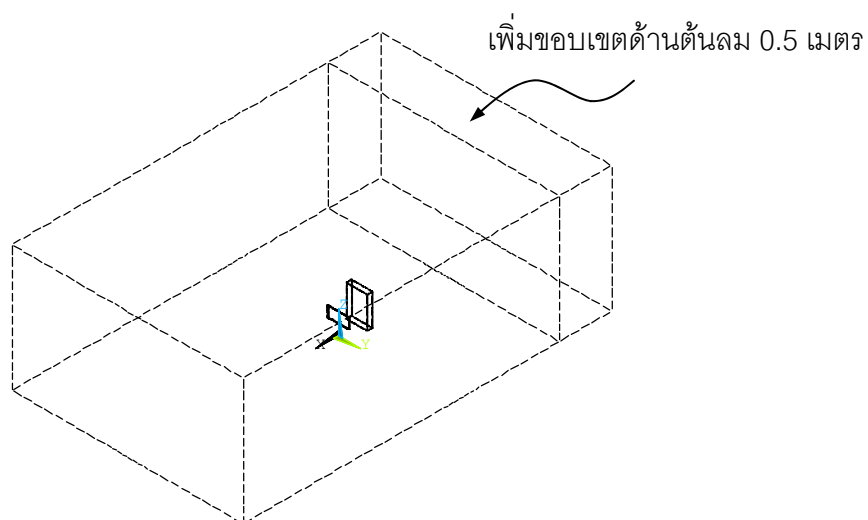
C_D	คือ สัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x
$\bar{F}_x$	คือ แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)
ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)
$\bar{u}_{ref}$	คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 10.5 เมตรต่อวินาที (m/s)
b	คือ ความกว้างโครงสร้างป้ายโฆษณา มีค่าเท่ากับ 0.2 เมตร (m)
c	คือ ความสูงโครงสร้างป้ายโฆษณา มีค่าเท่ากับ 0.1 เมตร (m)
IF	คือ Interference Factor

7.4 ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์

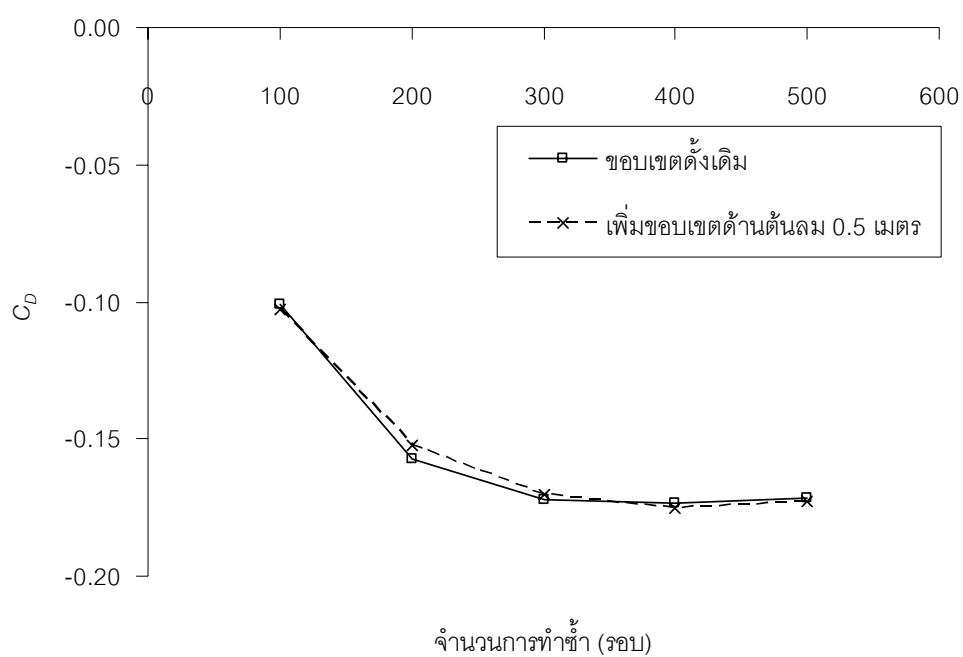
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม และการลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution) ในกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลมเนื่องจากบางตำแหน่งของอาคารข้างเคียงจะตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาทำให้ระยะทางการไหลของลมจากด้านต้นลมจนถึงโครงสร้างมีระยะสั้นลง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ด้านต้นลมอาจส่งผลกระทบต่อสภาวะการไหลของลมรอบโครงสร้างได้ สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ภายในขอบเขตที่เหมาะสมที่ใช้ในการวิเคราะห์พิจารณาได้จากบทที่ 6 หัวข้อ 6.4.1

7.4.1 กรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม

การเพิ่มขอบเขตด้านต้นลมจะเพิ่มระยะตามทิศแกน x เท่ากับ 0.5 เมตร โดยเลือกพิกัดของอาคารข้างเคียงที่ D_y เท่ากับ 0 เมตร และ D_x เท่ากับ -0.20 เมตร ซึ่งตั้งอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา และความสูงเท่ากับ $1.5h$ ปัจจัยต่างๆของอาคารข้างเคียงดังกล่าวเป็นปัจจัยที่อาจจะส่งผลกระทบต่อแรงที่มากระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาได้มากที่สุด สามารถทำความเข้าใจได้โดยพิจารณาภาพที่ 7.7 ประกอบ ผลของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาแสดงได้ในภาพที่ 7.8 และตารางที่ 7.1



ภาพที่ 7.7 ลักษณะของขอบเขตกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร

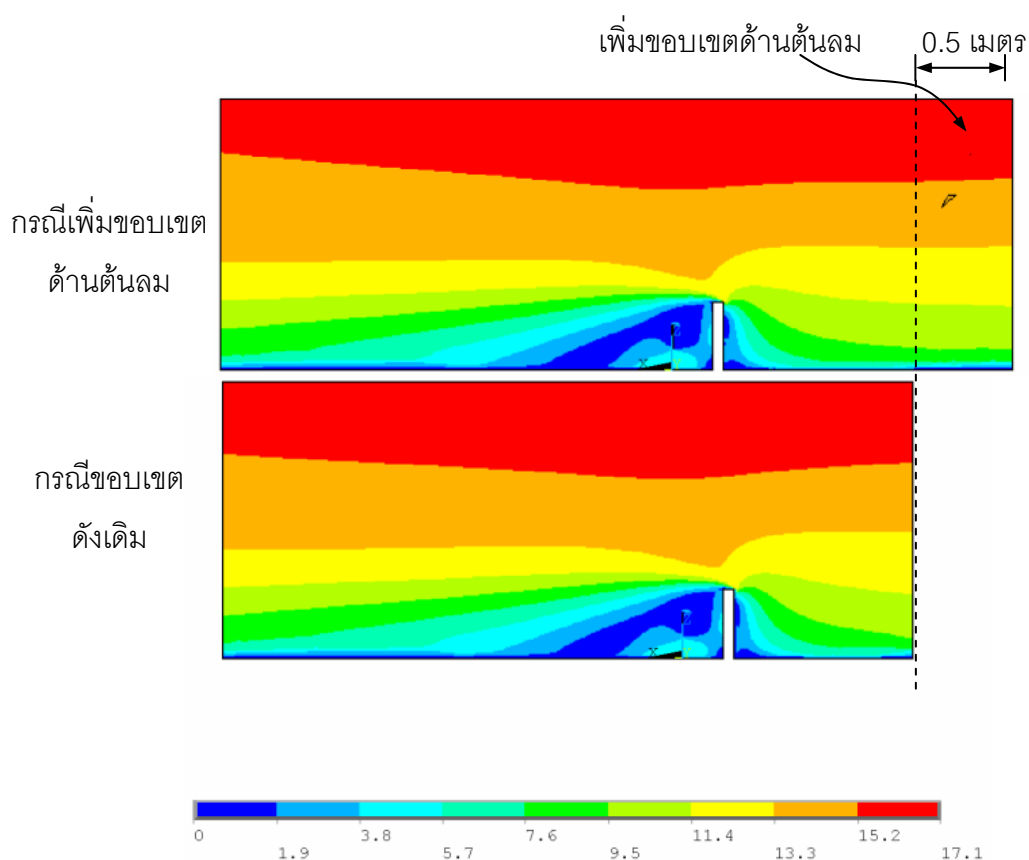


ภาพที่ 7.8 ความสัมพันธ์ของจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x สำหรับขอบเขตดั้งเดิมและกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร

ตารางที่ 7.1

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การไหลของของไหลในช่องเดิมกับการเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม

แบบจำลอง	จำนวนการทำซ้ำ	C_D	ค่าแตกต่าง
ขอบเขตเดิม	500	-0.17121	0.9 %
เพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร	500	-0.17264	



ภาพที่ 7.9 เปรียบเทียบเส้นชั้นความเร็วของกรณีขอบเขตดั้งเดิม
กับการเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม

จากภาพที่ 7.8 และตารางที่ 7.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารขนาด $1.5h$ ตั้งอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาที่พิกัด Dy เท่ากับ 0 เมตร และ Dx เท่ากับ -0.20 เมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาที่จำนวนการทำซ้ำ 500 รอบ สำหรับกรณีขอบเขตดั้งเดิมเท่ากับ

-0.17121 ส่วนกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร เท่ากับ -0.17264 โดยที่มีค่าคลาดเคลื่อน 0.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าน้อยมาก และหากพิจารณาเส้นชั้นความเร็วลมตามภาพที่ 7.9 สังเกตได้ว่าเส้นชั้นความเร็วลมกรณีเพิ่มขอบเขตช่วง 0.5 เมตร เป็นลมที่มีลักษณะ Streamlines แบบสมบูรณ์จากทางด้านต้นลมโดยที่ไม่มีการแปรเปลี่ยนความเร็วลมตามความสูงมากนัก ขอบเขตดั้งเดิมที่มีด้านต้นลมที่สั้นกว่าแต่ยังคงอยู่ในช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเมื่อเทียบกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลมจึงถือว่าอยู่ในวิสัยที่ยอมรับได้ ดังนั้นขนาดของขอบเขตที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 7.2.2 จึงถือว่ามีความถูกต้องเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ในกรณีอื่นๆต่อไป

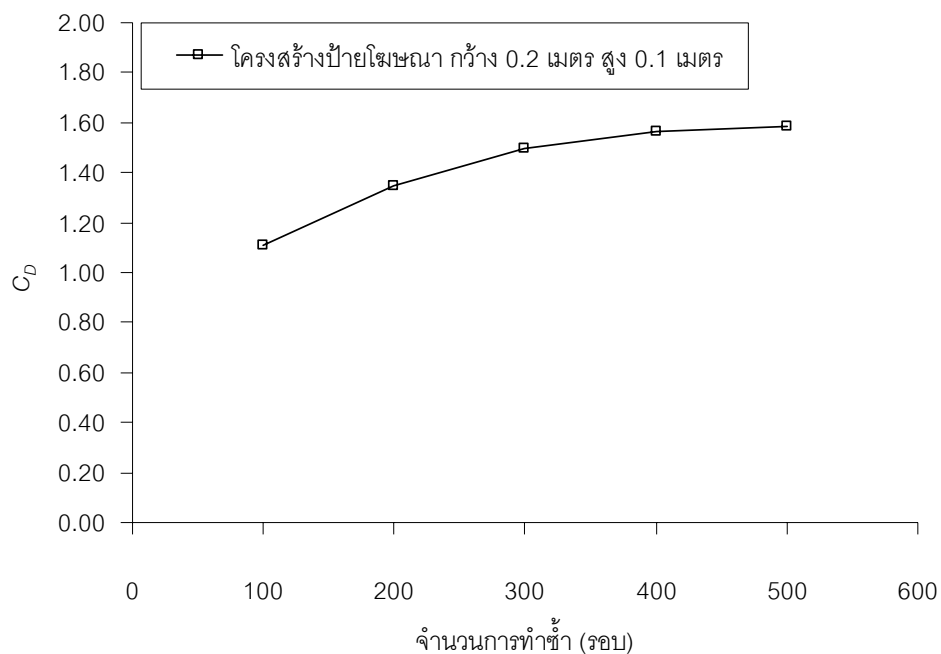
ตารางที่ 7.2

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของกรณีขอบเขตดั้งเดิมกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม

แบบจำลอง	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)				
	100	200	300	400	500
ขอบเขตดั้งเดิม	-0.1007	-0.1570	-0.1719	-0.1732	-0.1712
เพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร	-0.1028	-0.1525	-0.1703	-0.1749	-0.1726

7.4.2 การเข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution)

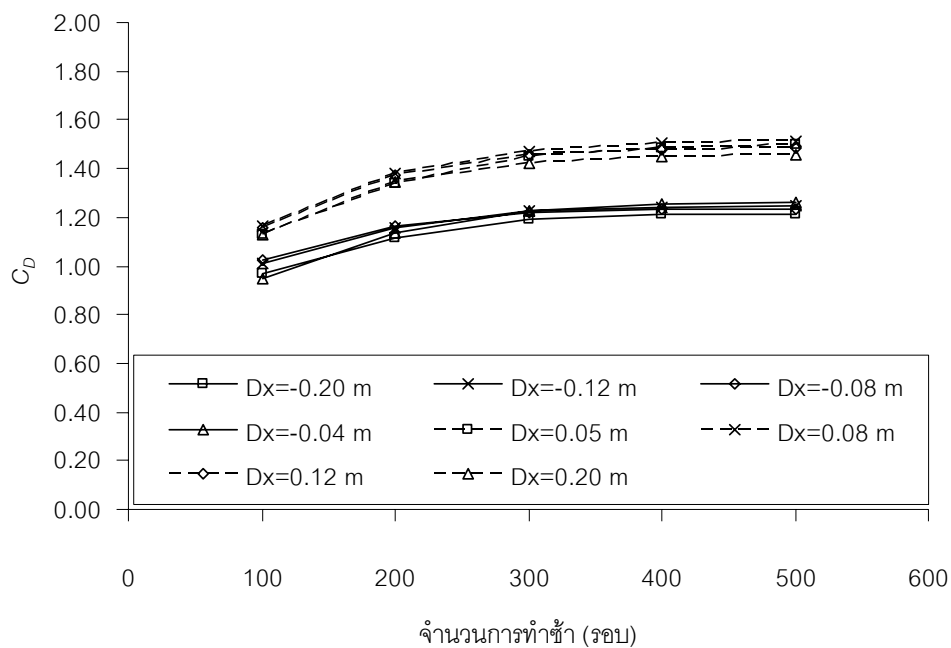
การทำซ้ำ (Iteration) ของผลลัพธ์ ในงานวิจัยนี้เลือกการทำซ้ำ 500 รอบ โดยจะตรวจสอบการเข้าสู่ของผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณา ภาพที่ 7.10 แสดงผลของการทำซ้ำในกรณีที่โครงสร้างป้ายโฆษณาไม่มีอาคารข้างเคียง ส่วนในกรณีที่มีผลของอาคารข้างเคียง 3 ขนาดตามตำแหน่งที่ตั้ง 16 ตำแหน่ง ผลของการทำซ้ำสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 7.11 ถึงภาพที่ 7.16 ตามลำดับ



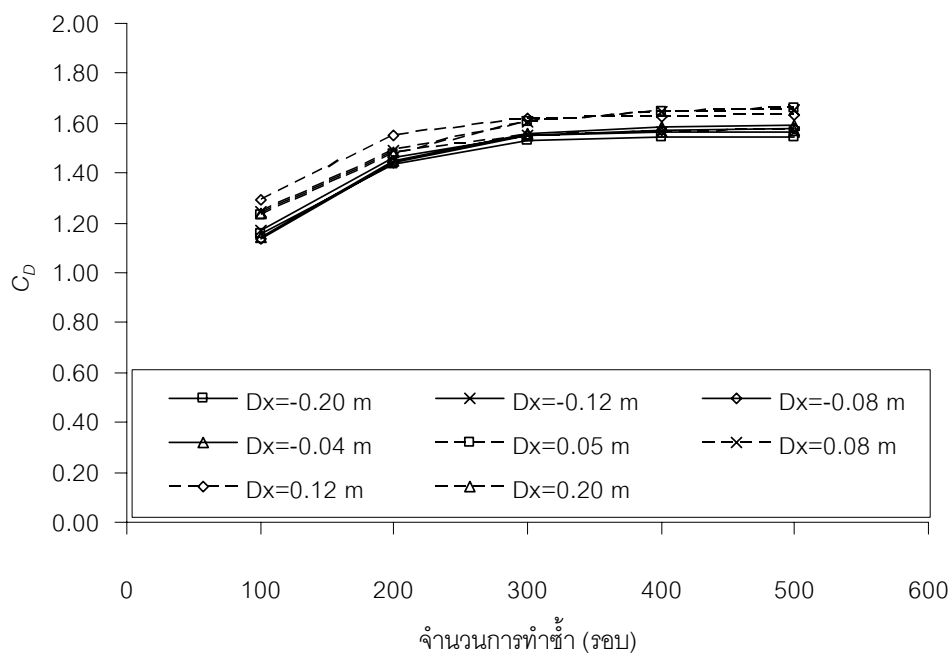
ภาพที่ 7.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีไม่มีอาคารข้างเคียง

จากภาพที่ 7.10 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาเข้าสู่ผลลัพธ์ในระดับเป็นที่น่าสนใจ กล่าวคือผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่จำนวนการทำซ้ำ 400 จนถึงจำนวนการทำซ้ำ 500 มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 1.6 เปอร์เซนต์

ทั้งนี้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 1.1062, 1.3457, 1.4981, 1.5615 และ 1.5860 สำหรับที่จำนวนการทำซ้ำ 100 200 300 400 และ 500 รอบ ตามลำดับ



ภาพที่ 7.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$



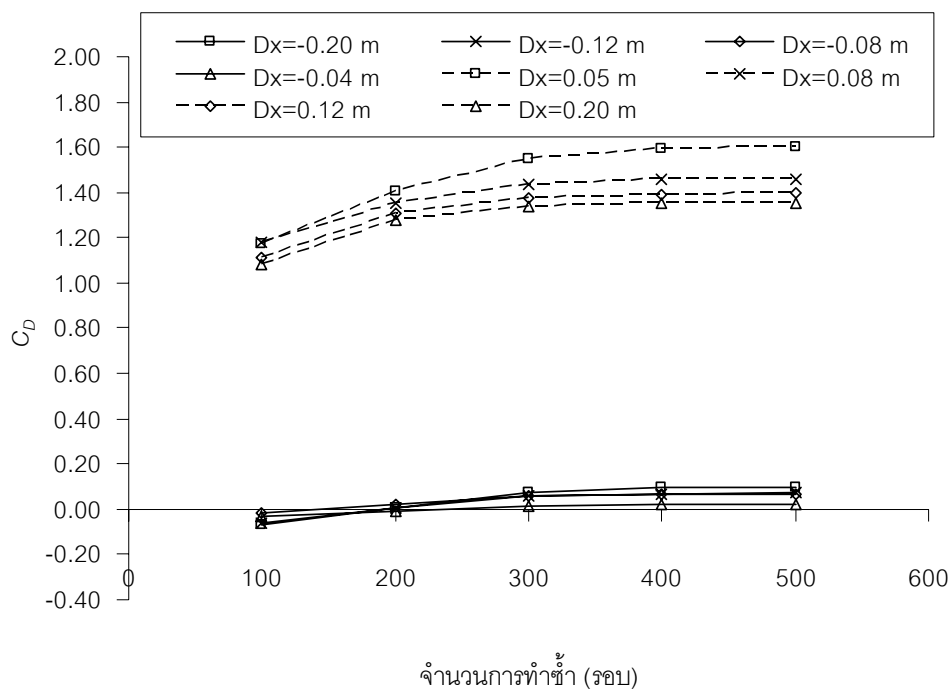
ภาพที่ 7.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$

จากภาพที่ 7.11 และภาพที่ 7.12 กรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$ ที่ตำแหน่งต่างๆ 16 ตำแหน่ง ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาเข้าสู่ผลลัพธ์ในระดับเป็นที่น่าสนใจ กล่าวคือผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่จำนวนการทำซ้ำ 400 จนถึงจำนวนการทำซ้ำ 500 ที่มีค่ามากที่สุดได้แก่ที่พิกัดของอาคาร Dy เท่ากับ -0.20 เมตร และ Dx เท่ากับ 0.05 เมตร โดยที่มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 0.8 เปอร์เซ็นต์

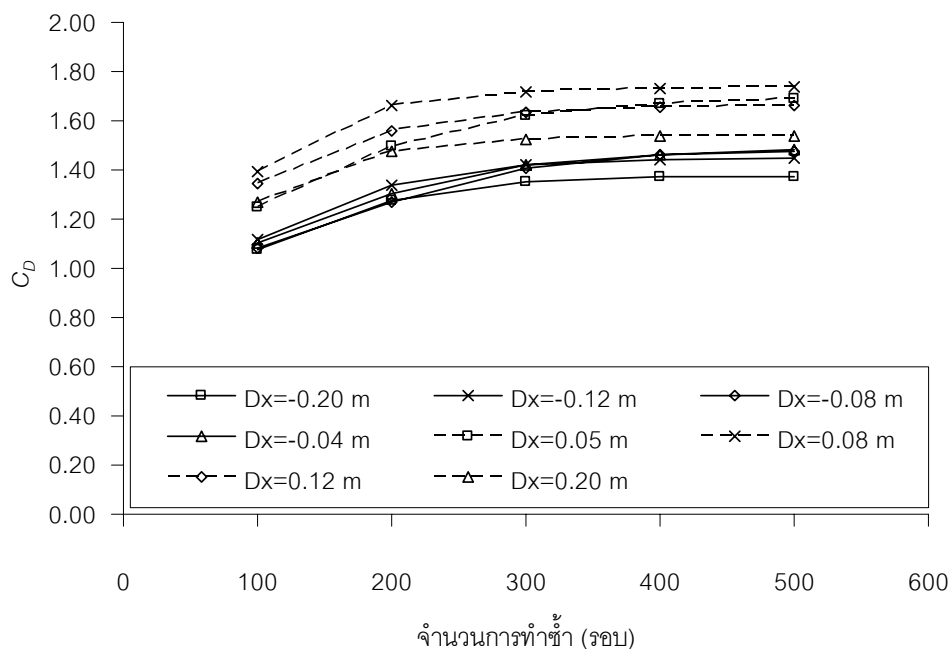
ตารางที่ 7.3

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5 h$

ตำแหน่งอาคารข้างเคียง (เมตร)	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)				
	100	200	300	400	500
$Dy=0_Dx=-0.20$	0.9704	1.1179	1.1917	1.2118	1.2158
$Dy=0_Dx=-0.12$	1.0086	1.1564	1.2251	1.2434	1.2473
$Dy=0_Dx=-0.08$	1.0236	1.1618	1.2181	1.2330	1.2360
$Dy=0_Dx=-0.04$	0.9497	1.1369	1.2271	1.2539	1.2591
$Dy=0_Dx=0.05$	1.1271	1.3386	1.4507	1.4875	1.4973
$Dy=0_Dx=0.08$	1.1668	1.3782	1.4736	1.5021	1.5093
$Dy=0_Dx=0.12$	1.1554	1.3694	1.4539	1.4791	1.4861
$Dy=0_Dx=0.20$	1.1284	1.3461	1.4250	1.4479	1.4543
$Dy=-0.20_Dx=-0.20$	1.1587	1.4369	1.5283	1.5447	1.5463
$Dy=-0.20_Dx=-0.12$	1.1686	1.4599	1.5482	1.5626	1.5639
$Dy=-0.20_Dx=-0.08$	1.1348	1.4409	1.5483	1.5721	1.5761
$Dy=-0.20_Dx=-0.04$	1.1415	1.4513	1.5611	1.5863	1.5907
$Dy=-0.20_Dx=0.05$	1.2284	1.4792	1.6025	1.6445	1.6566
$Dy=-0.20_Dx=0.08$	1.2454	1.4872	1.6061	1.6447	1.6551
$Dy=-0.20_Dx=0.12$	1.2921	1.5478	1.6164	1.6277	1.6293
$Dy=-0.20_Dx=0.20$	1.2383	1.4845	1.5528	1.5657	1.5680



ภาพที่ 7.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดลเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$



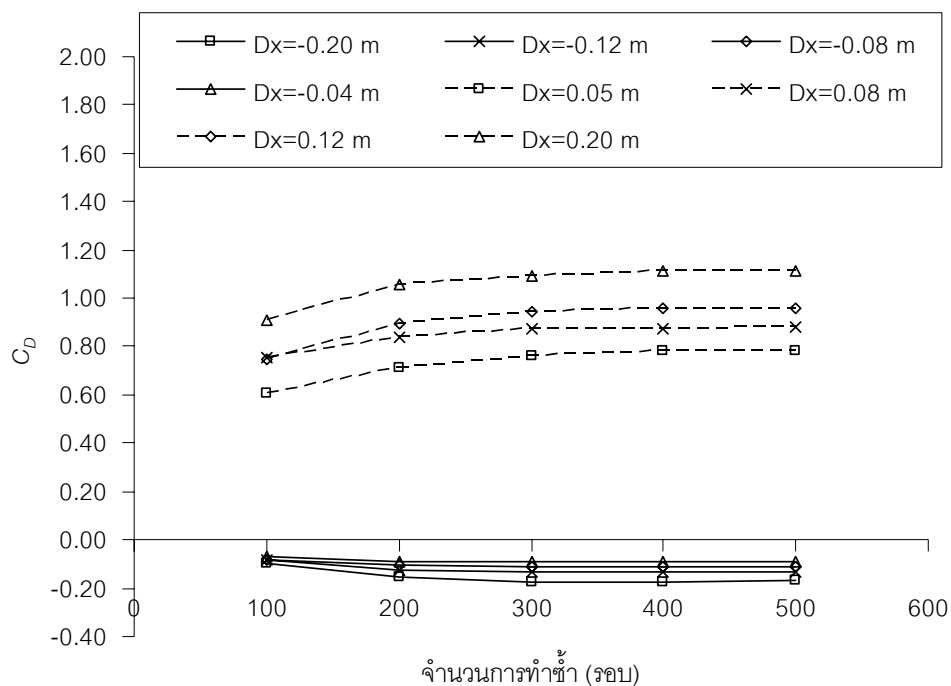
ภาพที่ 7.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดลเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$

จากภาพที่ 7.13 และภาพที่ 7.14 กรณีนี้นำถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$ ที่ตำแหน่งต่างๆ 16 ตำแหน่ง ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาเข้าสู่ผลลัพธ์ในระดับเป็นที่น่าสนใจ กล่าวคือผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่จำนวนการทำซ้ำ 400 จนถึงจำนวนการทำซ้ำ 500 ที่มีค่ามากที่สุดได้แก่ที่พิกัดของอาคาร Dy เท่ากับ 0 เมตร และ Dx เท่ากับ -0.20 เมตร โดยที่มีค่าแตกต่างเท่ากับ 5.4 เปอร์เซ็นต์

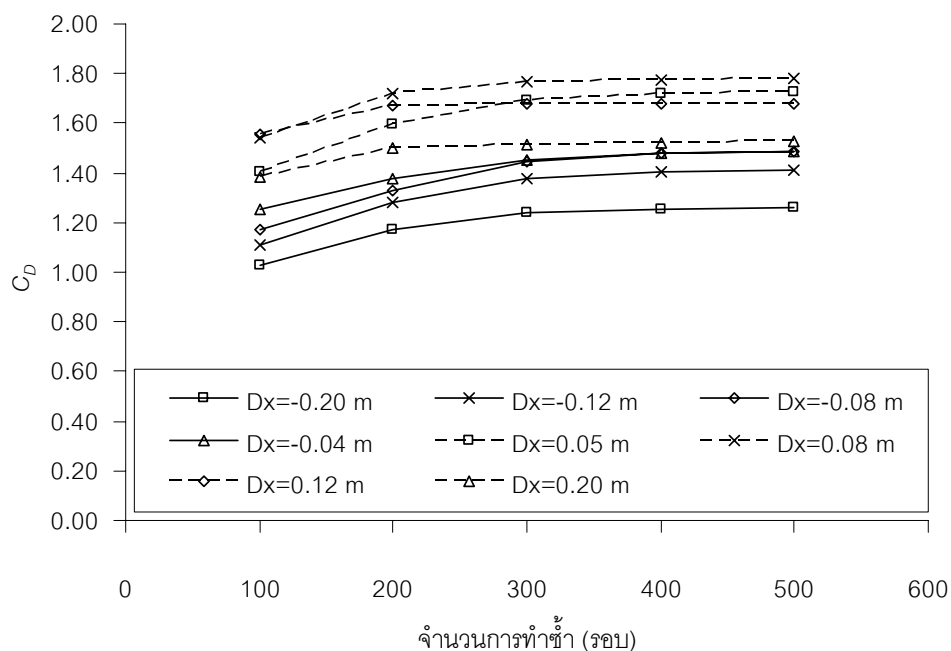
ตารางที่ 7.4

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0\ h$

ตำแหน่งอาคารข้างเคียง (เมตร)	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)				
	100	200	300	400	500
$Dy=0_Dx=-0.20$	-0.0669	0.0088	0.0743	0.0928	0.0980
$Dy=0_Dx=-0.12$	-0.0589	0.0090	0.0596	0.0680	0.0711
$Dy=0_Dx=-0.08$	-0.0187	0.0206	0.0578	0.0652	0.0660
$Dy=0_Dx=-0.04$	-0.0348	-0.0111	0.0145	0.0221	0.0230
$Dy=0_Dx=0.05$	1.1760	1.4089	1.5480	1.5931	1.6030
$Dy=0_Dx=0.08$	1.1781	1.3547	1.4337	1.4555	1.4606
$Dy=0_Dx=0.12$	1.1135	1.3043	1.3736	1.3915	1.3963
$Dy=0_Dx=0.20$	1.0818	1.2806	1.3396	1.3529	1.3562
$Dy=-0.20_Dx=-0.20$	1.0777	1.2758	1.3547	1.3721	1.3754
$Dy=-0.20_Dx=-0.12$	1.1176	1.3360	1.4227	1.4418	1.4456
$Dy=-0.20_Dx=-0.08$	1.0855	1.2668	1.4062	1.4607	1.4775
$Dy=-0.20_Dx=-0.04$	1.1057	1.3052	1.4181	1.4624	1.4840
$Dy=-0.20_Dx=0.05$	1.2501	1.4935	1.6228	1.6693	1.6872
$Dy=-0.20_Dx=0.08$	1.3928	1.6606	1.7190	1.7341	1.7385
$Dy=-0.20_Dx=0.12$	1.3451	1.5585	1.6359	1.6574	1.6629
$Dy=-0.20_Dx=0.20$	1.2662	1.4753	1.5274	1.5379	1.5405



ภาพที่ 7.15 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$



ภาพที่ 7.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงดมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ Dx ตำแหน่งต่างๆ สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$

จากภาพที่ 7.15 และภาพที่ 7.16 กรณีนี้นำถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $1.5 h$ ที่ตำแหน่งต่างๆ 16 ตำแหน่ง ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาเข้าสู่ผลลัพธ์ในระดับเป็นที่น่าสนใจ กล่าวคือผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่จำนวนการทำซ้ำ 400 จนถึงจำนวนการทำซ้ำ 500 ที่มีค่ามากที่สุดได้แก่ที่พิกัดของอาคาร Dy เท่ากับ 0 เมตร และ Dx เท่ากับ -0.20 เมตร โดยที่มีค่าแตกต่างเท่ากับ 1.2 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 7.5

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5 h$

ตำแหน่งอาคารข้างเคียง (เมตร)	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)				
	100	200	300	400	500
$Dy=0_Dx=-0.20$	-0.1007	-0.1570	-0.1719	-0.1732	-0.1712
$Dy=0_Dx=-0.12$	-0.0806	-0.1247	-0.1342	-0.1341	-0.1334
$Dy=0_Dx=-0.08$	-0.0854	-0.1074	-0.1124	-0.1117	-0.1112
$Dy=0_Dx=-0.04$	-0.0714	-0.0879	-0.0915	-0.0932	-0.0936
$Dy=0_Dx=0.05$	0.6095	0.7092	0.7646	0.7789	0.7817
$Dy=0_Dx=0.08$	0.7521	0.8419	0.8717	0.8770	0.8779
$Dy=0_Dx=0.12$	0.7476	0.8945	0.9445	0.9565	0.9597
$Dy=0_Dx=0.20$	0.9113	1.0545	1.0953	1.1105	1.1163
$Dy=-0.20_Dx=-0.20$	1.0265	1.1735	1.2391	1.2545	1.2597
$Dy=-0.20_Dx=-0.12$	1.1128	1.2829	1.3762	1.4028	1.4091
$Dy=-0.20_Dx=-0.08$	1.1711	1.3318	1.4464	1.4824	1.4834
$Dy=-0.20_Dx=-0.04$	1.2537	1.3749	1.4522	1.4788	1.4889
$Dy=-0.20_Dx=0.05$	1.4021	1.5948	1.6950	1.7177	1.7242
$Dy=-0.20_Dx=0.08$	1.5405	1.7224	1.7690	1.7766	1.7785
$Dy=-0.20_Dx=0.12$	1.5526	1.6681	1.6755	1.6761	1.6772
$Dy=-0.20_Dx=0.20$	1.3840	1.5016	1.5141	1.5228	1.5246

7.5 ผลการวิเคราะห์

ในเบื้องต้นได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่มีอาคารข้างเคียง ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 7.6 หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงโดยแสดงอยู่ในรูป Interference Factor (IF) แบ่งออกเป็น 3 กรณีได้แก่ กรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$, $1.0h$ และ $1.5h$ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)

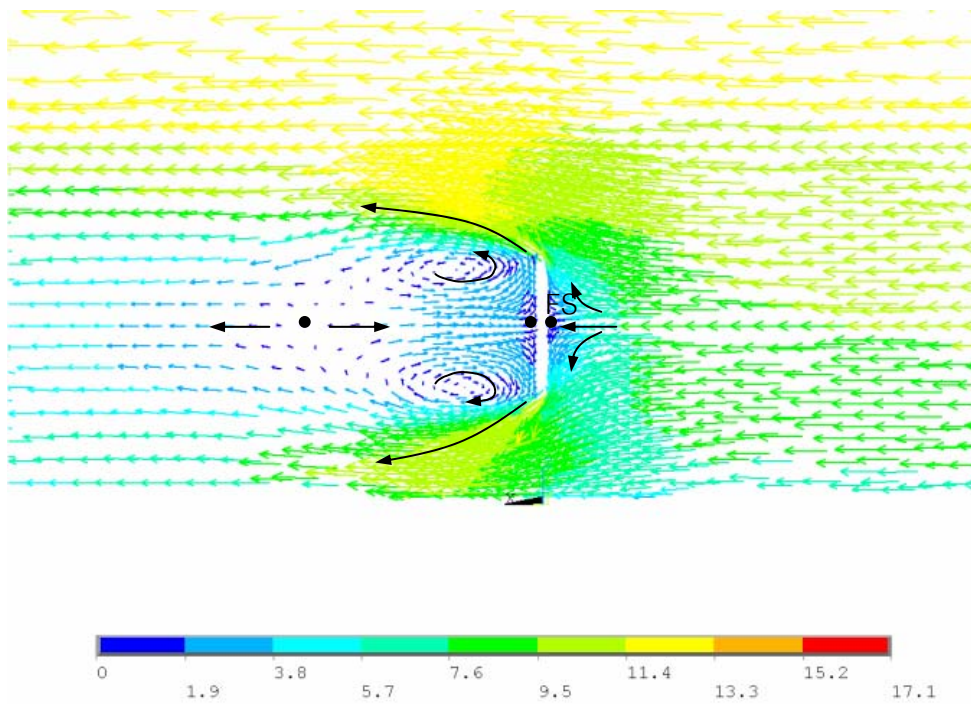
ตารางที่ 7.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่มีอาคารข้างเคียง

แบบจำลอง	C_D	ค่าคลาดเคลื่อน
$b = 0.2$ เมตร, $c = 0.1$ เมตร, $t_h = 0.005$ เมตร	1.59 (1.38)	13.3 %

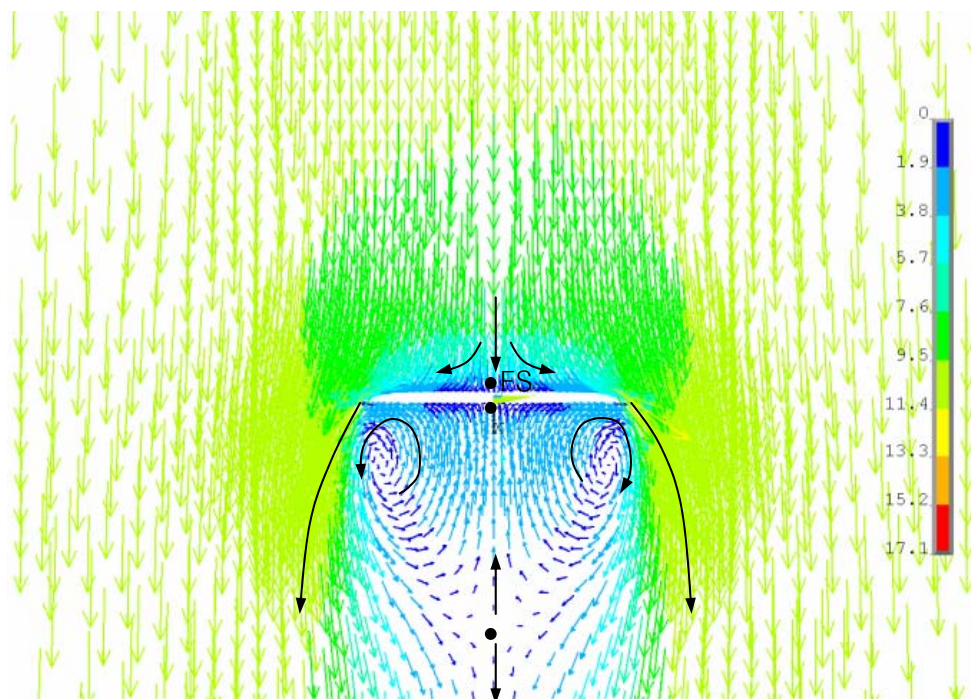
หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บได้จากผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)

จากตารางที่ 7.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่มีอาคารข้างเคียงให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 1.59 ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เท่ากับ 1.38 เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วให้ค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 13.3 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 7.17 แสดงการไหลของเวกเตอร์ความเร็วลม และภาพที่ 7.18 แสดงเส้นชั้นความดันลมที่กระทำด้านหน้าและด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่มีอาคารข้างเคียง ตามลำดับ

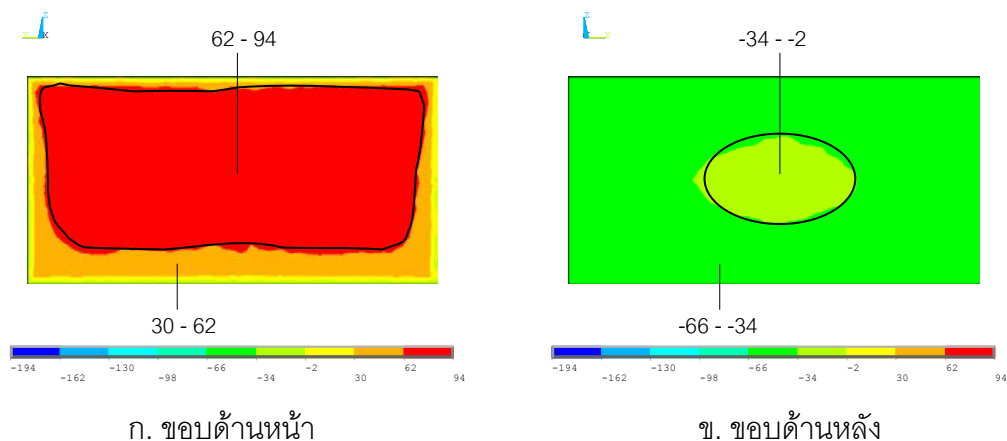


ก. ภาพตัดแนวดิ่ง



ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.17 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณา
กรณีไม่มีอาคารข้างเคียง (เมตรต่อวินาที)



ภาพที่ 7.18 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีไม่มีอาคารข้างเคียง

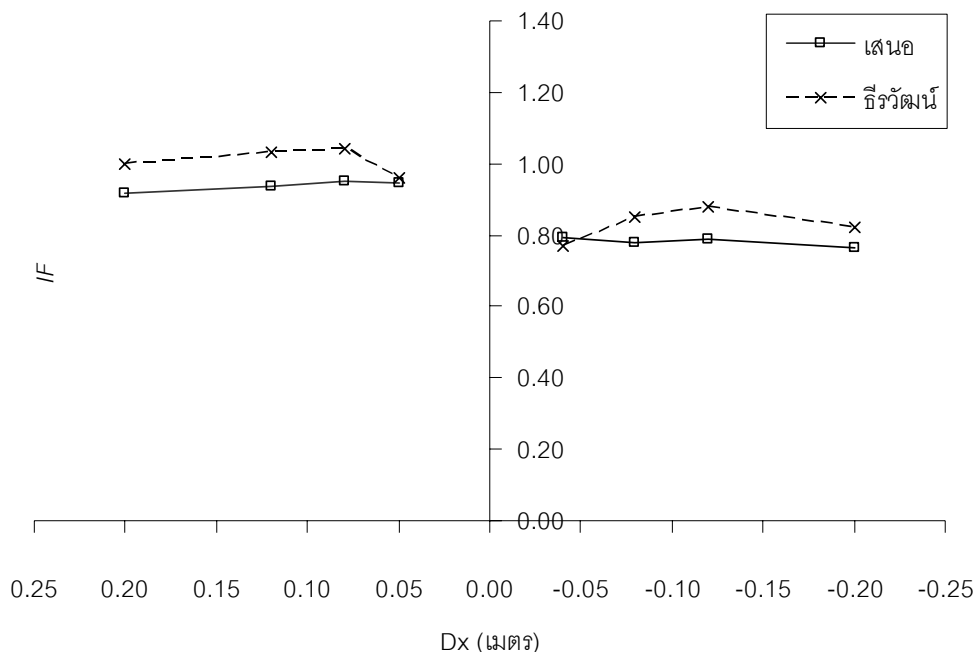
7.5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$

ผลการวิเคราะห์ค่า Interference Factor (IF) ของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ แสดงได้ดังตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 ค่า IF ที่ระยะ Dx (เมตร) และ Dy (เมตร) กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$

Dy (เมตร)	อาคารข้างเคียงอยู่ด้านหลัง				อาคารข้างเคียงอยู่ด้านหน้า			
	Dx (เมตร)							
	0.20	0.12	0.08	0.05	-0.04	-0.08	-0.12	-0.20
0	0.92	0.94	0.95	0.94	0.79	0.78	0.79	0.77
	(1.00)	(1.03)	(1.04)	(0.96)	(0.77)	(0.85)	(0.88)	(0.82)
-0.20	0.99	1.03	1.04	1.04	1.00	0.99	0.99	0.97
	(1.02)	(1.11)	(1.09)	(1.11)	(0.87)	(0.92)	(0.91)	(0.94)

หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บได้จากการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)



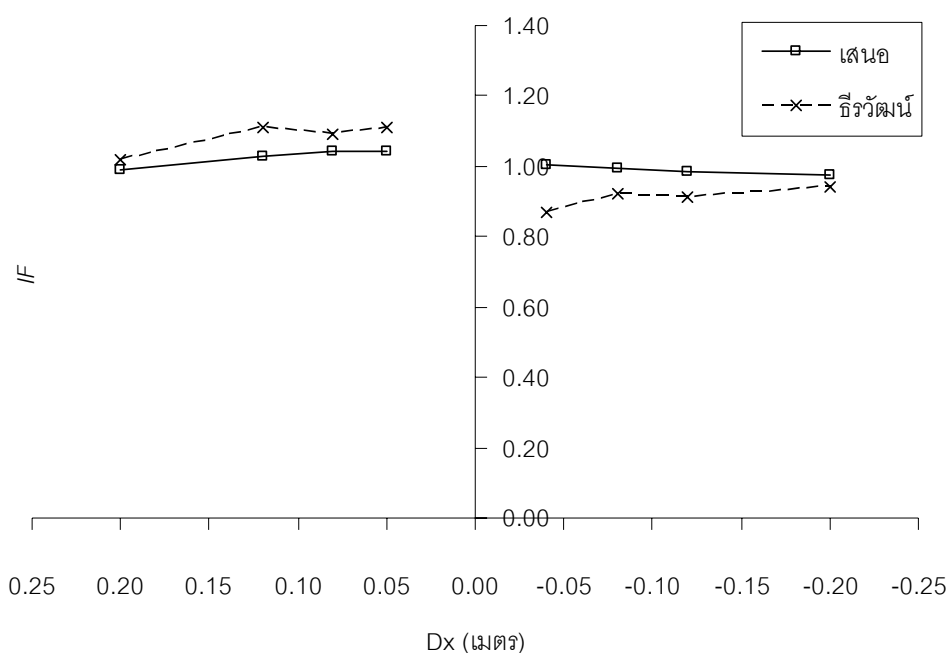
ภาพที่ 7.19 ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ

สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) ตามภาพที่ 7.19 ได้ผลดังนี้

- เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF ประมาณ 0.8 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.8 - 0.9 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่งไกลออกไป ($Dx < -0.04$ เมตร) ผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF น้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) เล็กน้อย
- เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงเล็กน้อยประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.92 - 0.95 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงเล็กน้อยเมื่ออยู่ติดกับโครงสร้างป้ายโฆษณา ($Dx =$

0.05 เมตร) และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป ($D_x > 0.05$ เมตร) โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.96 - 1.04 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF น้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) เล็กน้อย



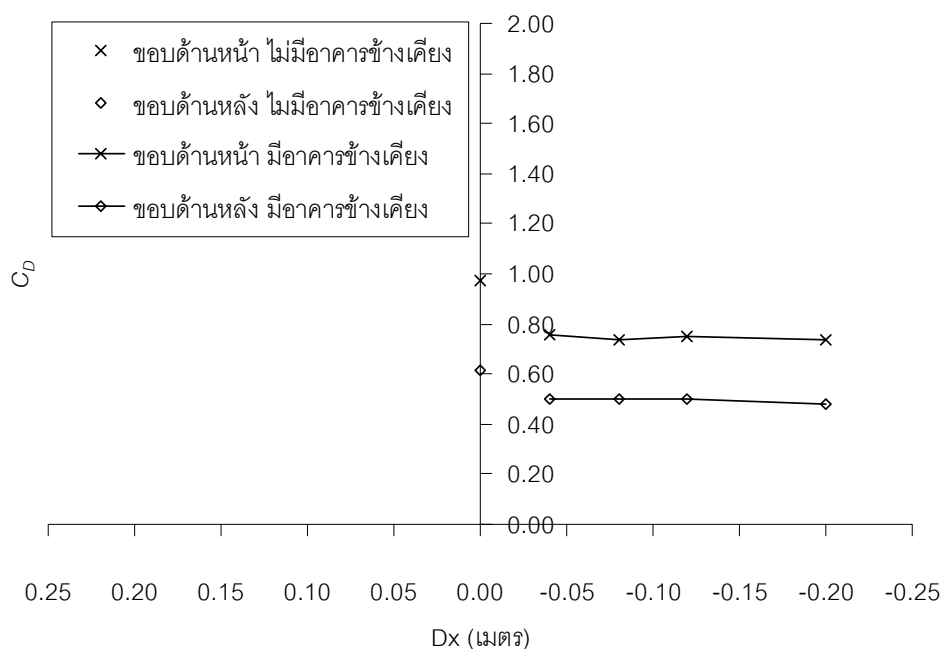
ภาพที่ 7.20 ความสัมพันธ์ของ IF กับ D_x (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ
สำหรับ $D_y = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ อยู่ตำแหน่ง D_y เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร) ตามภาพที่ 7.20 ได้ผลดังนี้

1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยให้ค่า IF ประมาณ 1 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออยู่ติดกับโครงสร้างป้ายโฆษณา ($D_x = -0.04$ เมตร) และลดลงเล็กน้อยเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป ($D_x < -0.04$ เมตร) โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.87 - 0.94 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลอง

อุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) พบว่ามีความสอดคล้องกันเฉพาะในตำแหน่งของอาคารข้างเคียงที่ไกลออกไป อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF มากกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) เล็กน้อย

- เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 1 – 1.04 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 1.02 – 1.11 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF น้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) เล็กน้อย



ภาพที่ 7.21 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่ได้และมีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ อยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา กับ Dx (เมตร) สำหรับ $Dy = 0$ เมตร

ข้อสังเกตที่น่าสนใจจากภาพที่ 7.21 กรณีที่อาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) และอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ผลการวิเคราะห์ชี้ว่าการที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลเนื่องมาจากแรงดันที่กระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงโดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 0.2 ในขณะที่แรงดูดที่กระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 0.1 ส่งผลให้แรงสุทธิกระทำต่อโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลง การที่แรงกระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงนั้นเพราะว่าแรงถูกลดทอนลงบางส่วนเนื่องจากอาคารที่ตั้งอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ที่แสดงอยู่ในรูปการไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมและเส้นชั้นความดันลมสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา)

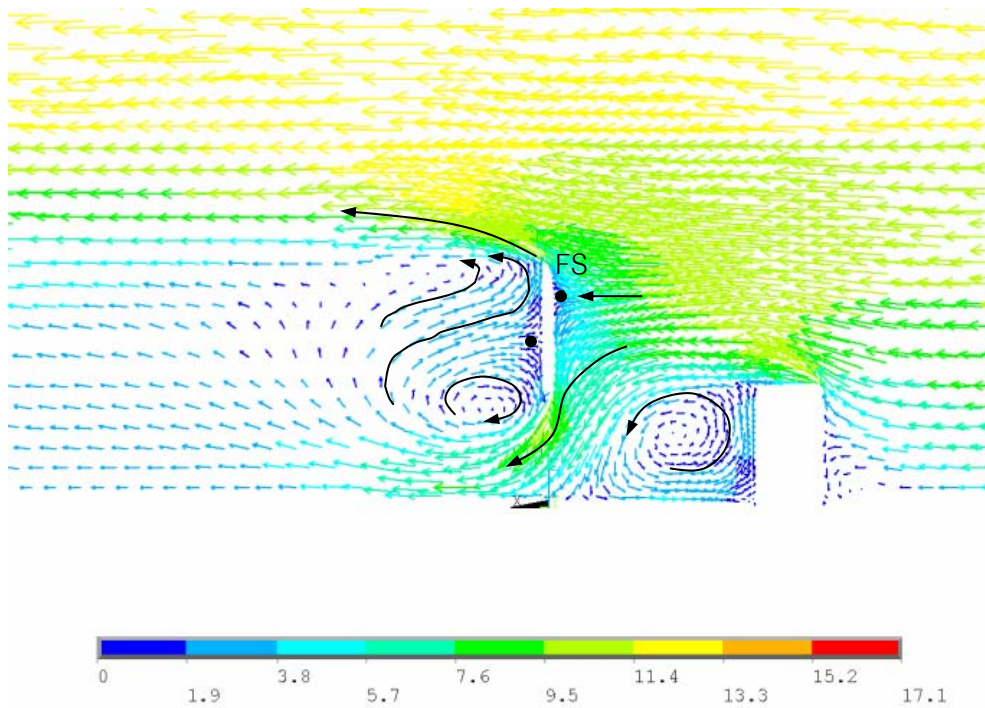
1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.22 ก ถึงภาพที่ 7.25 ก การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ นั้นเป็นผลมาจากการที่ความเร็วลมลดลงบริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเนื่องจากการขวางลมของอาคารข้างเคียงทำให้พฤติกรรมการแยกตัว (Separation) ของลมบริเวณขอบล่างโครงสร้างป้ายโฆษณามีความเร็วลดลง สังเกตได้ว่าตำแหน่ง FS สูงขึ้น อีกทั้งลมหมุน (Wake) บริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาจะค่อยๆ หายไปจนเหลือวงเดียว พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ก ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.26 ถึงภาพที่ 7.29 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาส่วนล่างเป็นแรงดัน (Pressure) ลดลง ในขณะที่บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูด (Suction) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาตามภาพที่ 7.21 พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ
2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.30 ก ถึงภาพที่ 7.33 ก การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ

5 เปอร์เซ็นต์ นั้นเป็นผลมาจากลมที่ลอดผ่านขอบล่างโครงสร้างป้ายโฆษณาแล้วปะทะกับอาคารย้อนกลับพุ่งขึ้นไปด้านบน ทำให้ลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาหายไป ในตำแหน่งอาคารข้างเคียงที่ใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณา และลมหมุนด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาส่วนบนมีความไม่สมบูรณ์เมื่อตำแหน่งอาคารข้างเคียงไกลออกไป พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ก ประกอบส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.34 ถึงภาพที่ 7.37 บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาส่วนบนเป็นแรงดูดลดลง พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ

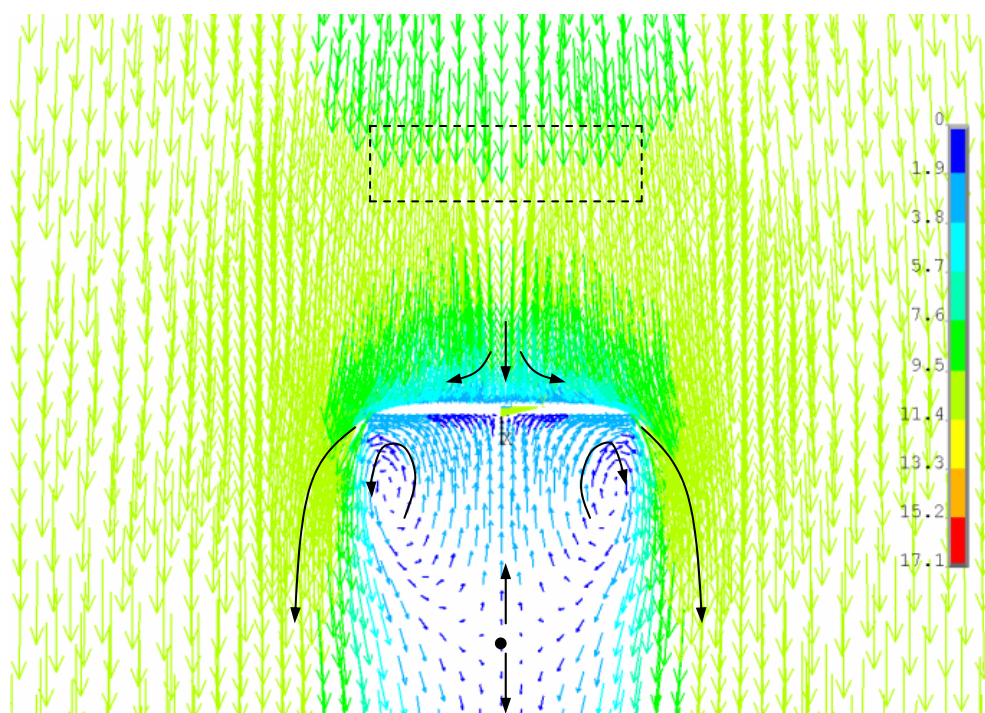
กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเยื้องกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร)

1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.38 ข ถึงภาพที่ 7.41 ข การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ไม่เปลี่ยนแปลง นั้นเป็นผลมาจากการที่ความเร็วลมลดลงบริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเนื่องจากการขวางลมของอาคารข้างเคียงทำให้พฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณขอบข้างโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงมีความเร็วลดลง ในขณะที่ลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีรูปแบบสองวงสมบูรณ์ พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ข ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.42 ถึงภาพที่ 7.45 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงเป็นแรงดันลดลง ในขณะที่บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นแรงสุทธิที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาจึงไม่เปลี่ยนแปลง พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ
2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.46 ถึงภาพที่ 7.49 การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ นั้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณขอบล่างโครงสร้างป้ายโฆษณามีความเร็วสูงขึ้นสังเกตได้จากภาพ ก และลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีความเร็วเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากภาพ ข พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.50 ถึงภาพที่ 7.53 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงเป็น

แรงดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดเพิ่มขึ้น
พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ

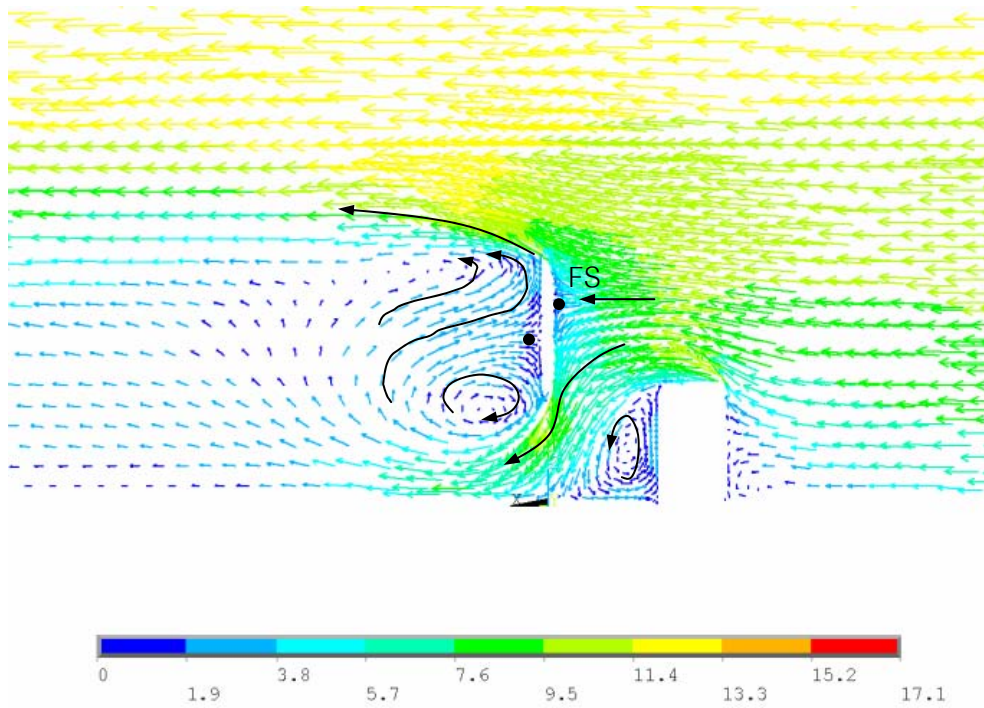


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

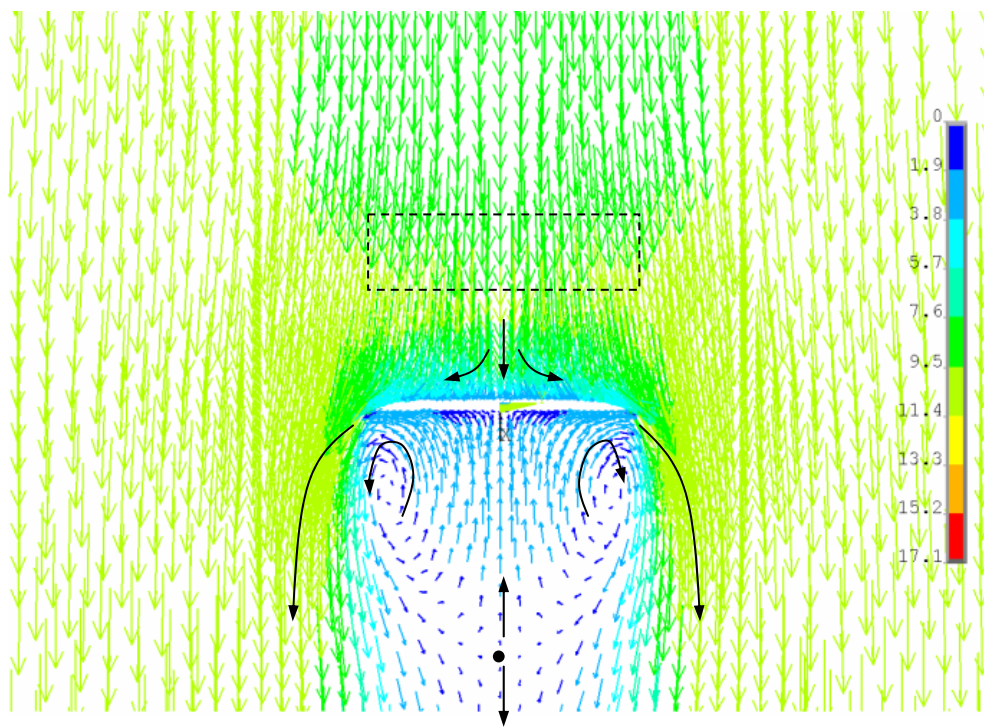


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.22 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

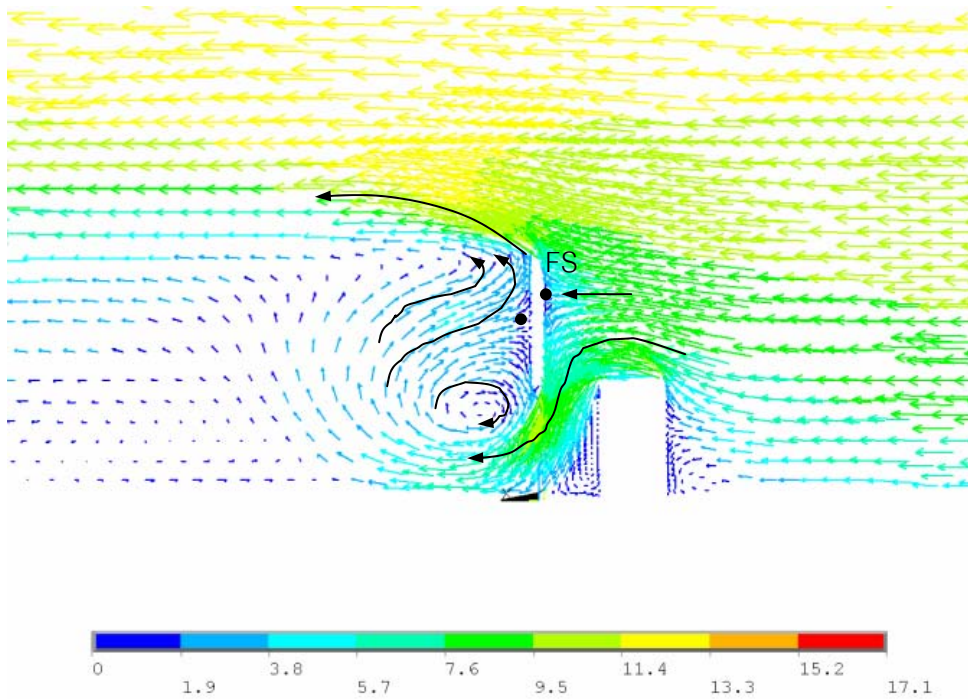


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

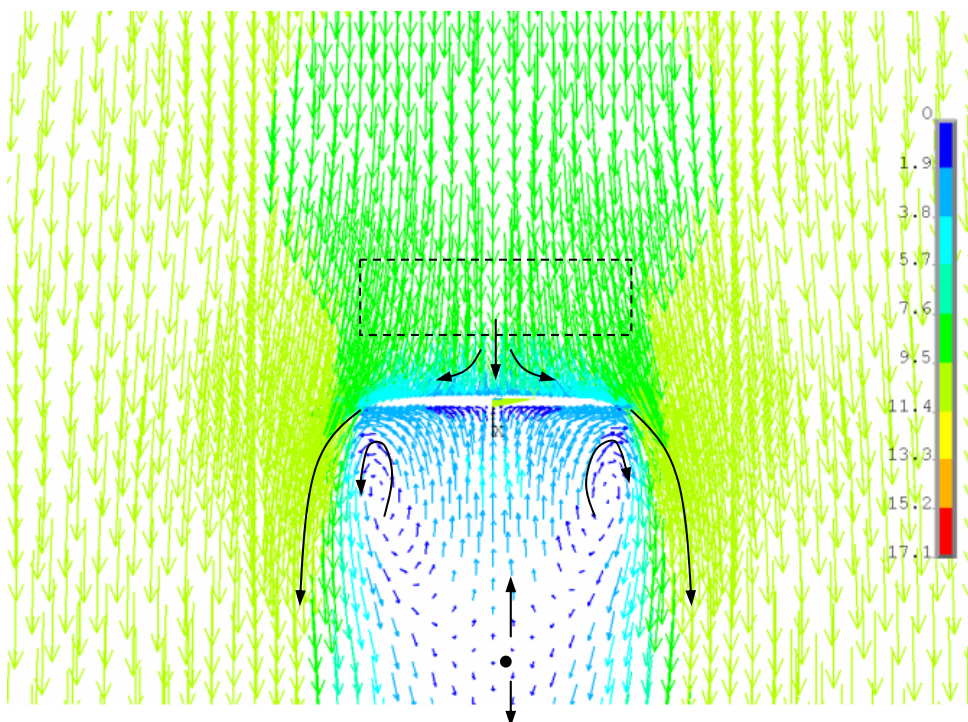


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.23 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

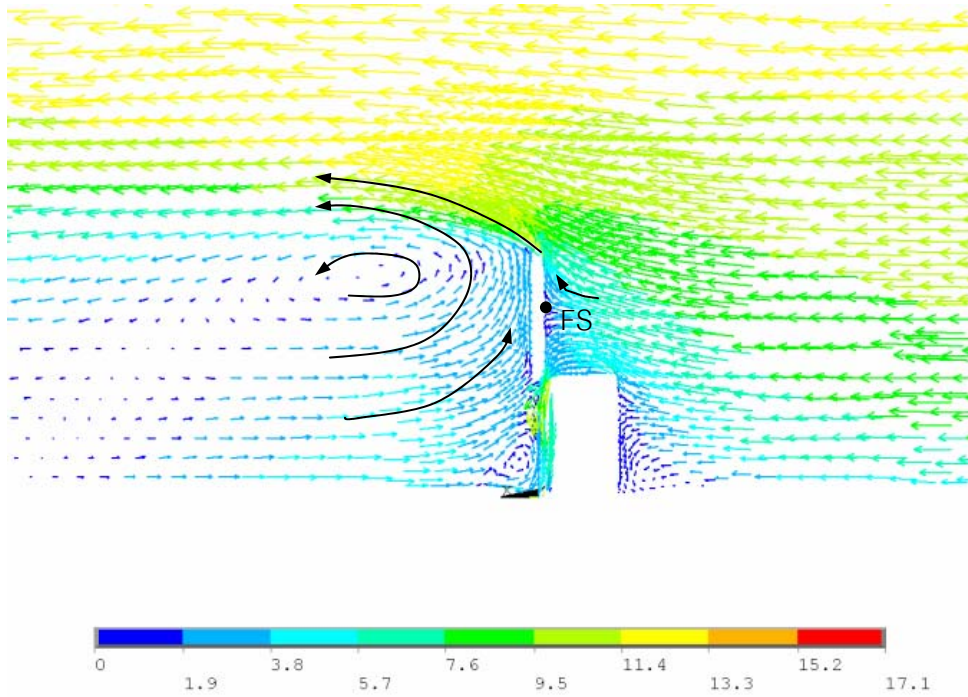


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

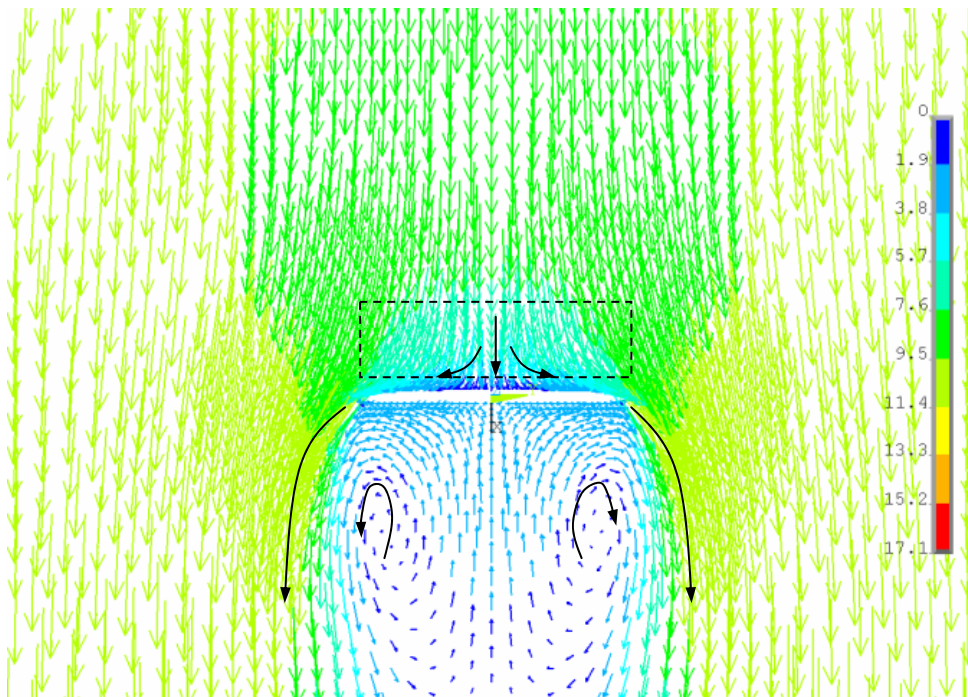


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.24 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

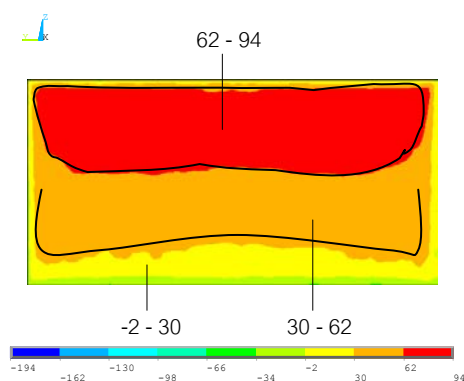


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

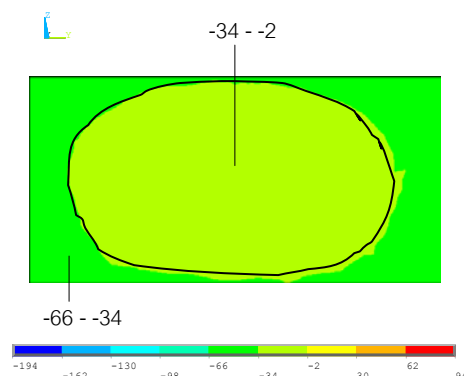


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.25 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

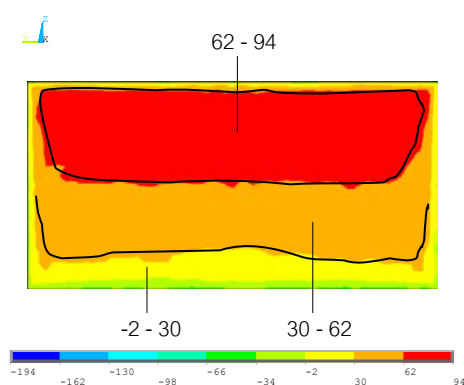


ก. ขอบด้านหน้า

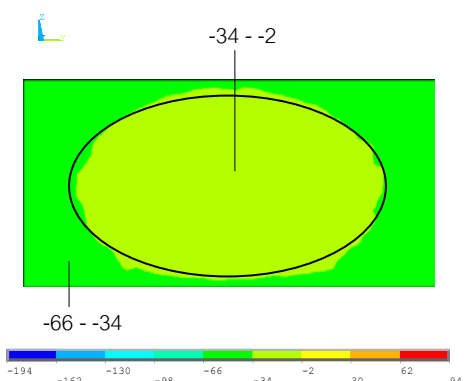


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.26 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

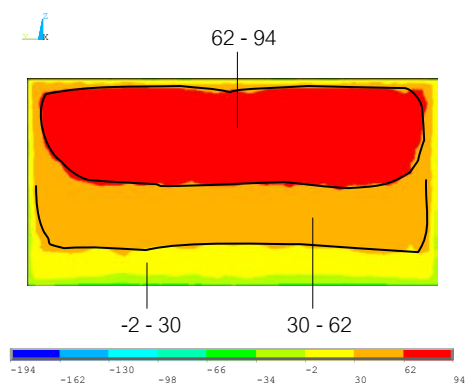


ก. ขอบด้านหน้า

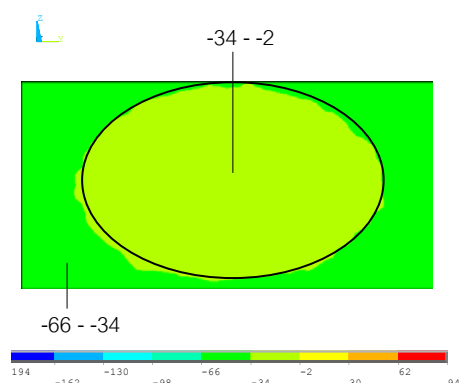


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.27 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

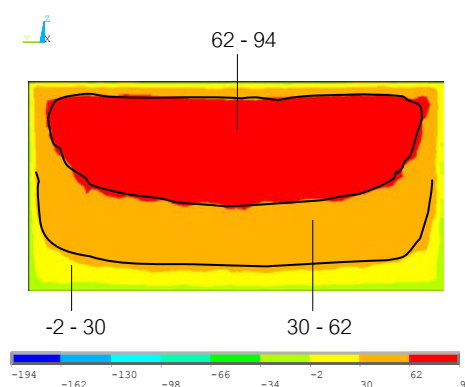


ก. ขอบด้านหน้า

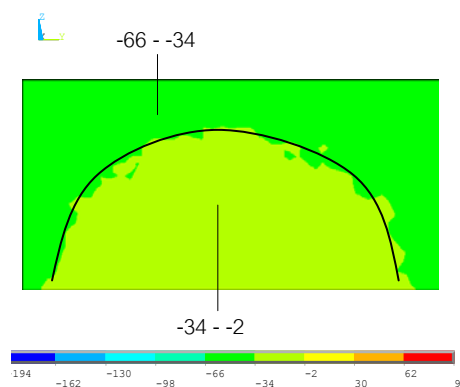


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.28 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

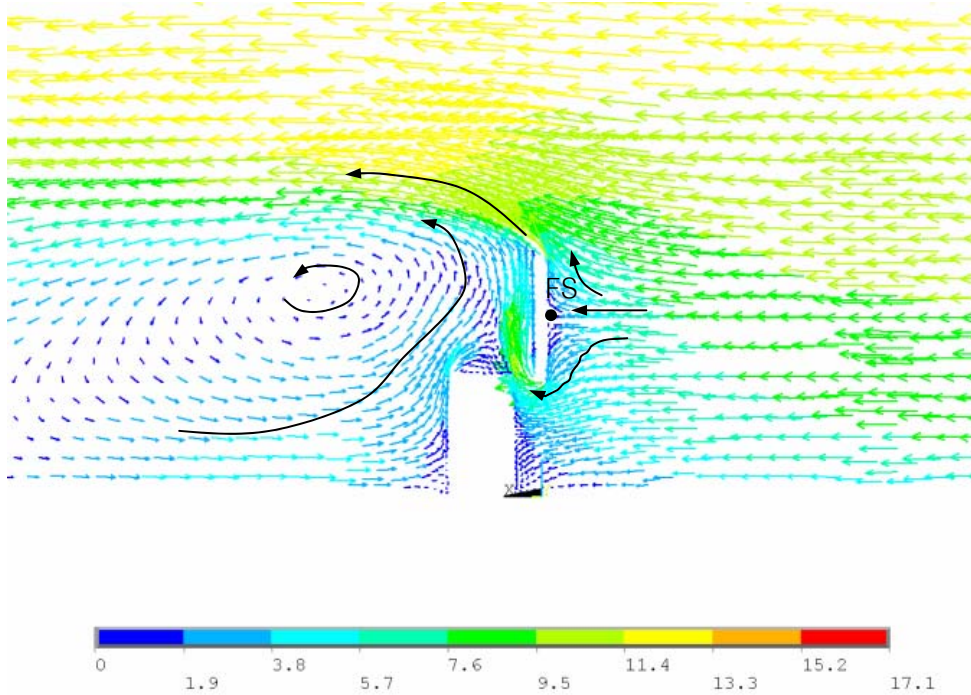


ก. ขอบด้านหน้า

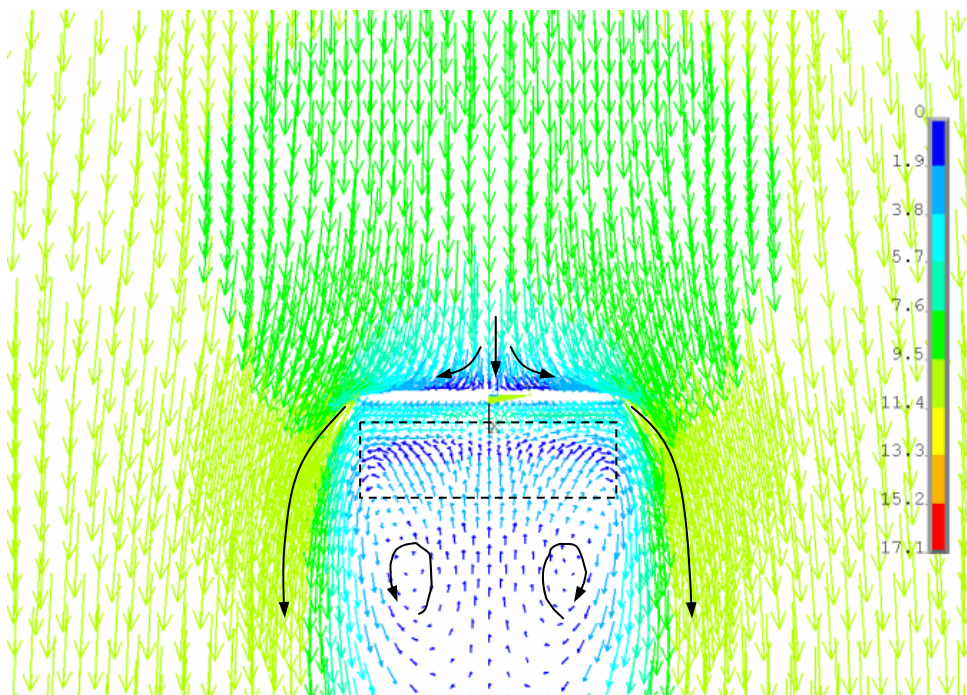


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.29 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

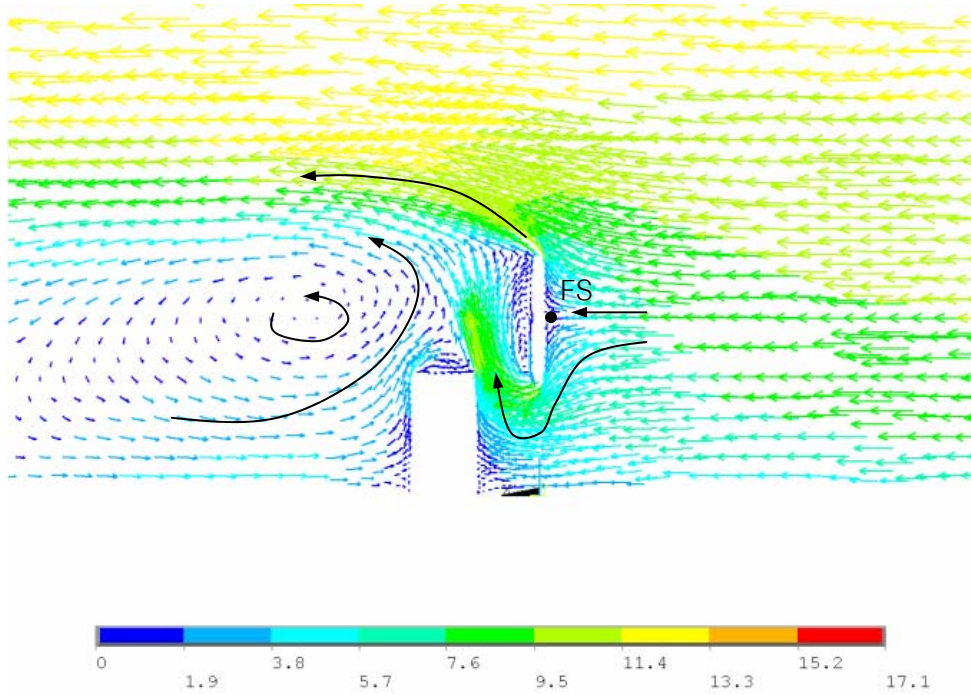


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

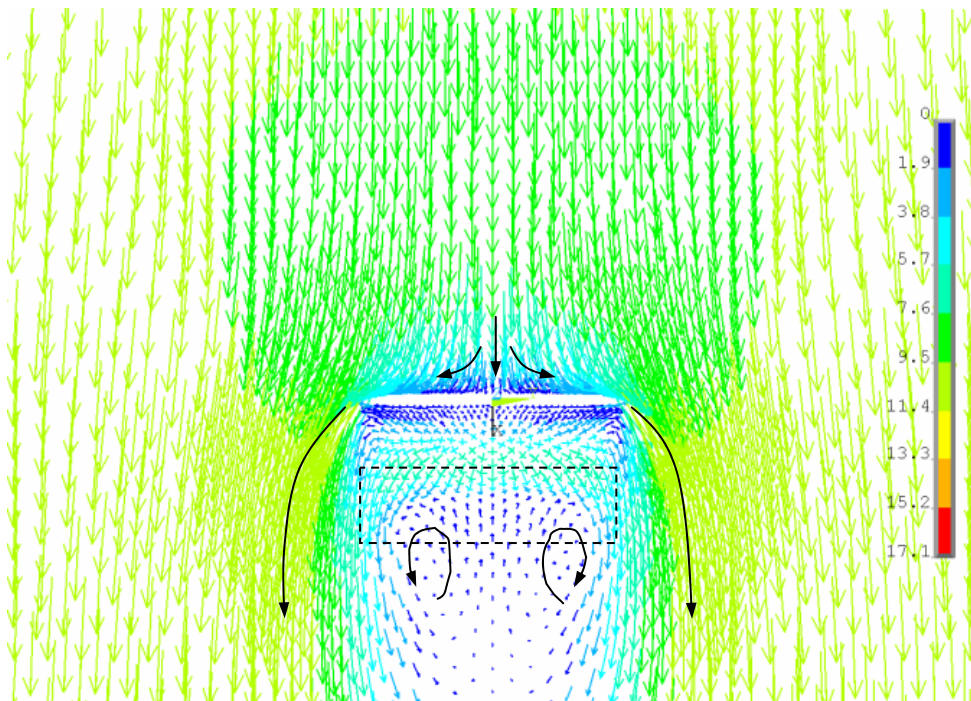


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.30 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

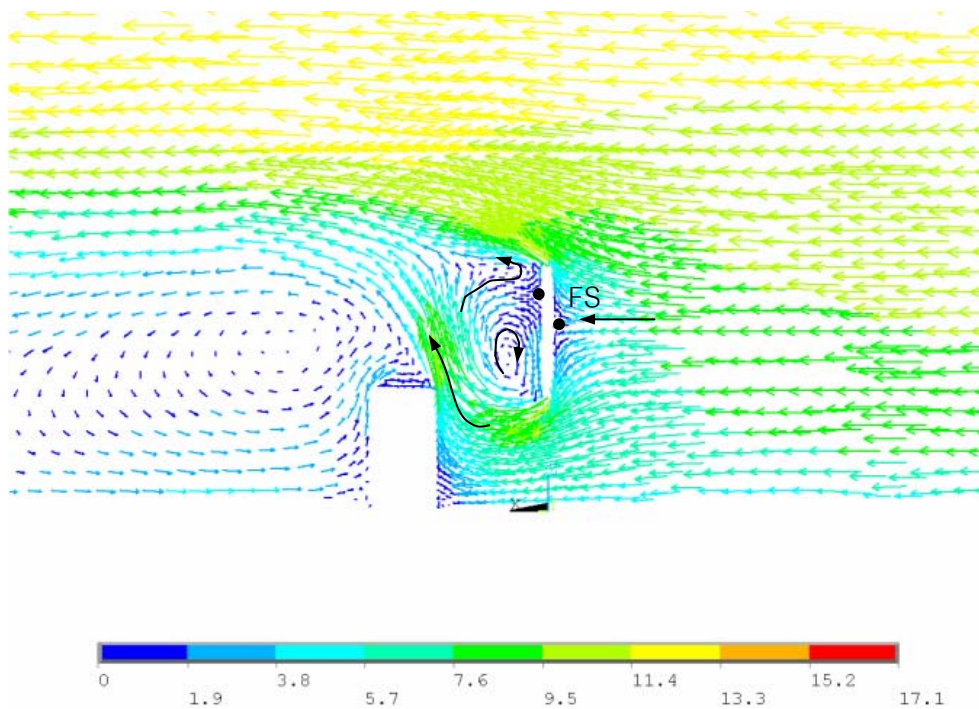


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

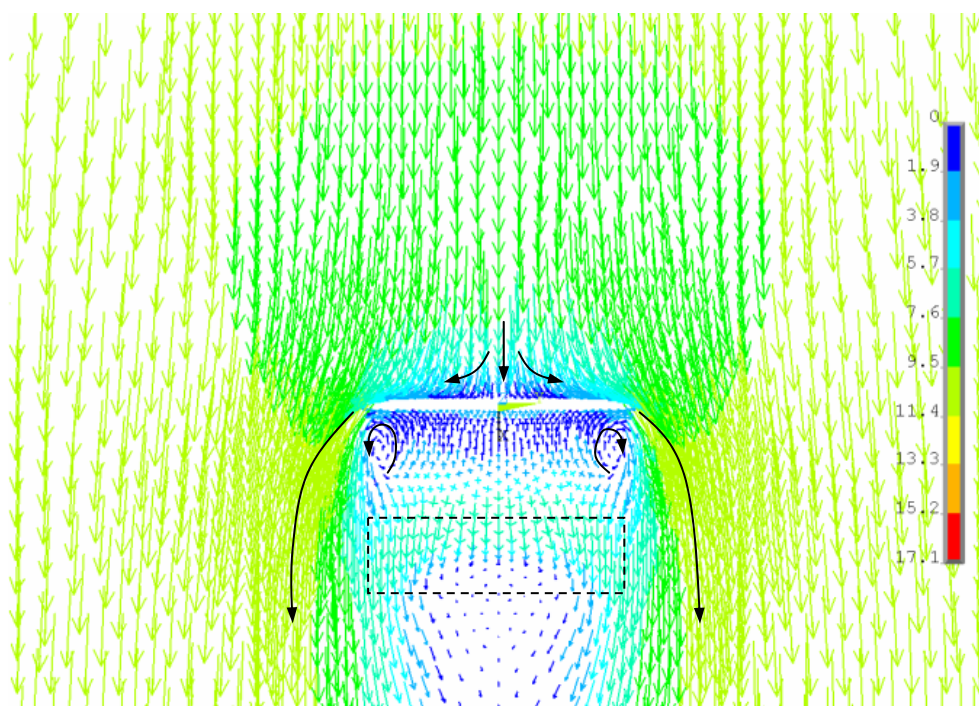


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.31 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

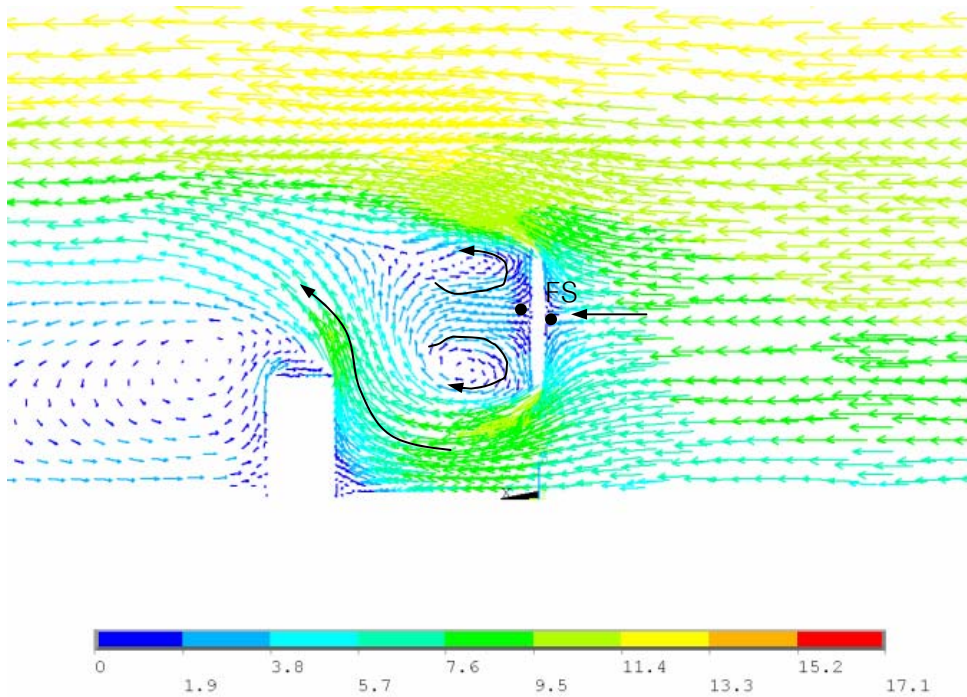


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

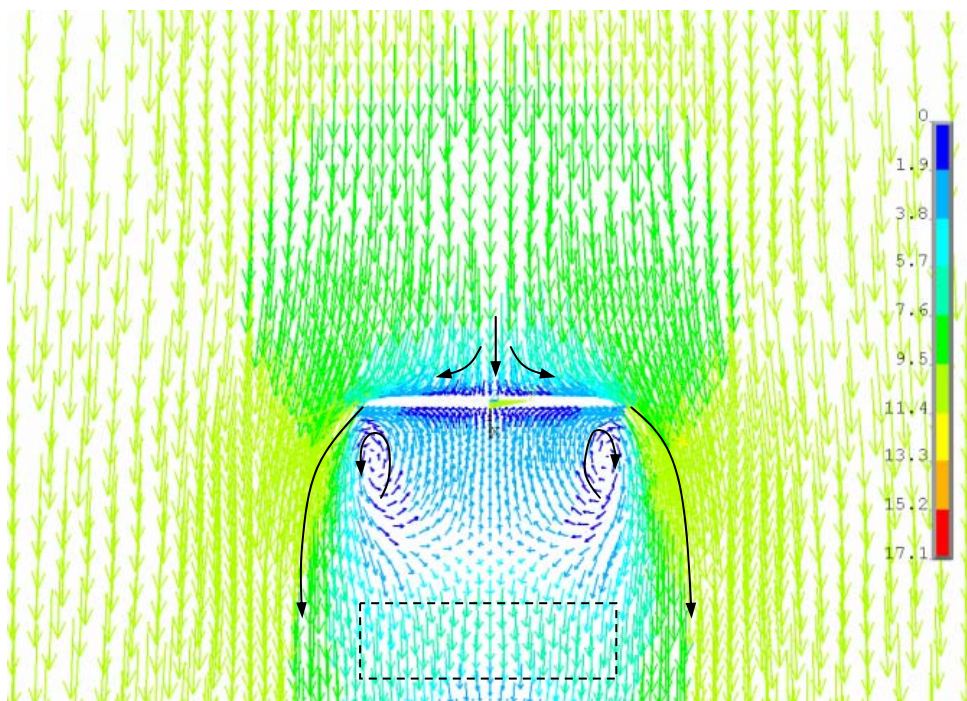


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.32 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

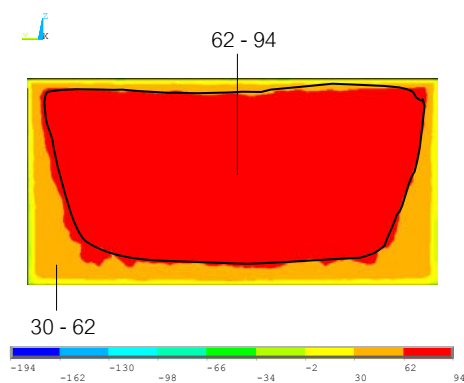


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

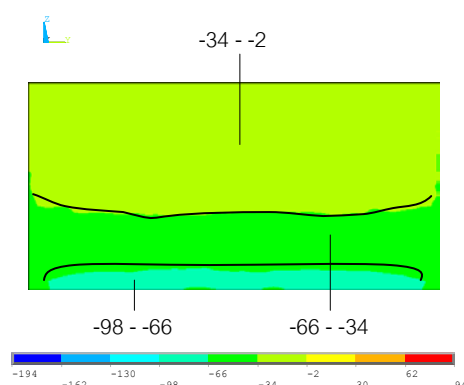


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.33 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

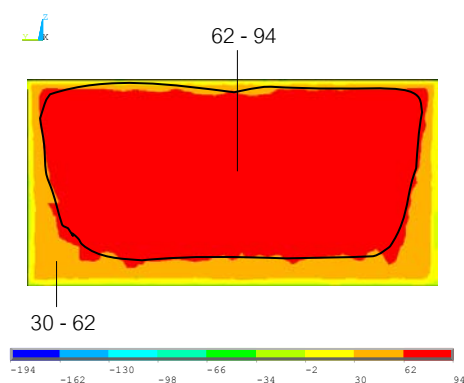


ก. ขอบด้านหน้า

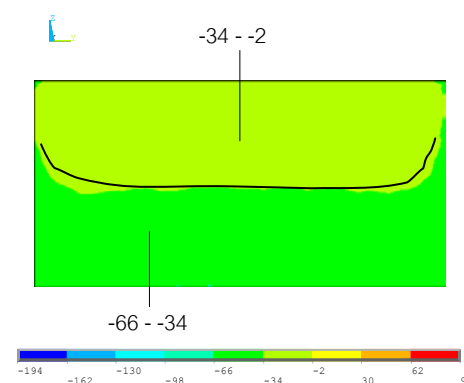


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.34 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

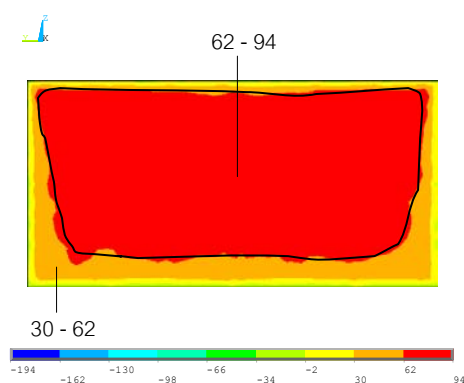


ก. ขอบด้านหน้า

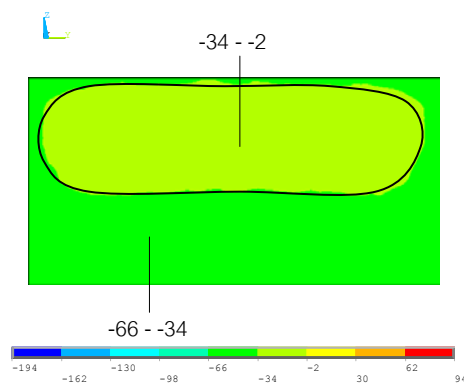


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.35 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

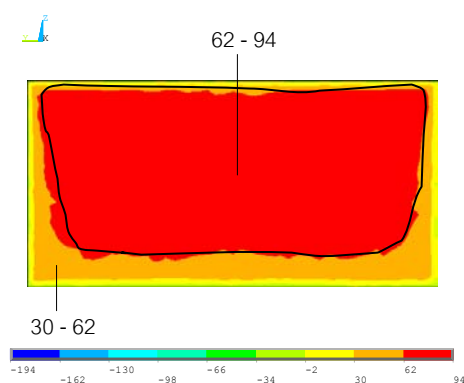


ก. ขอบด้านหน้า

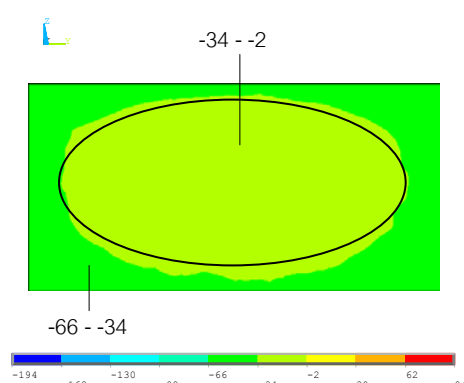


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.36 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

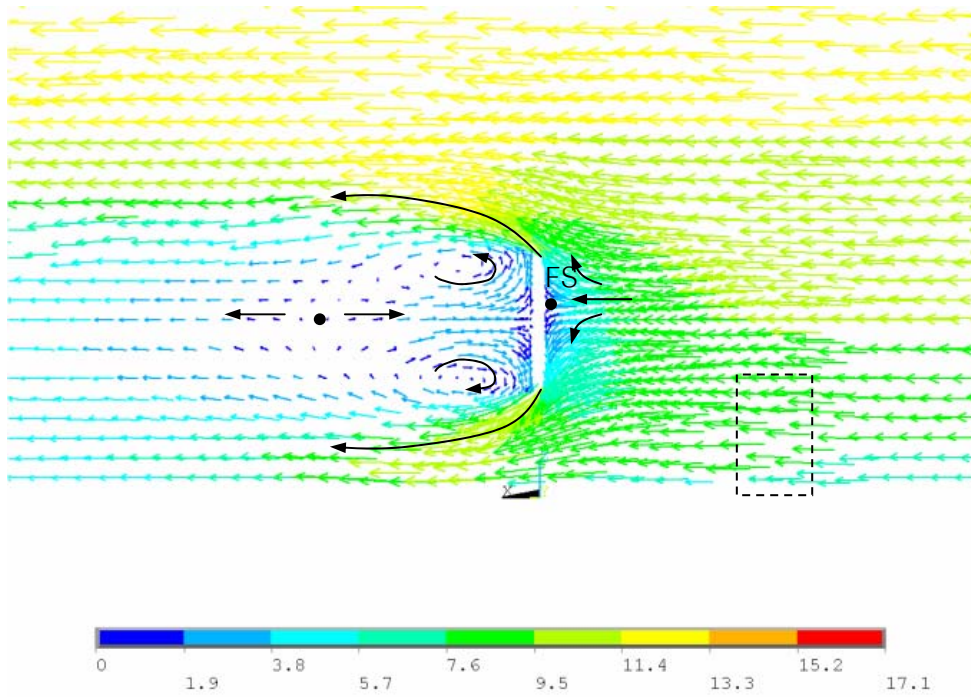


ก. ขอบด้านหน้า

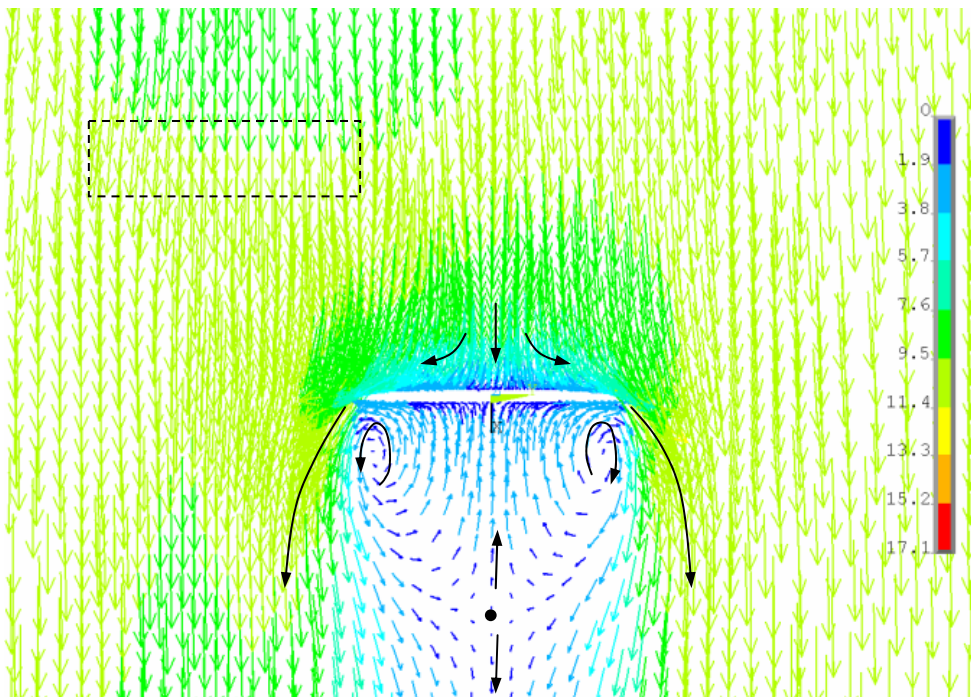


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.37 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

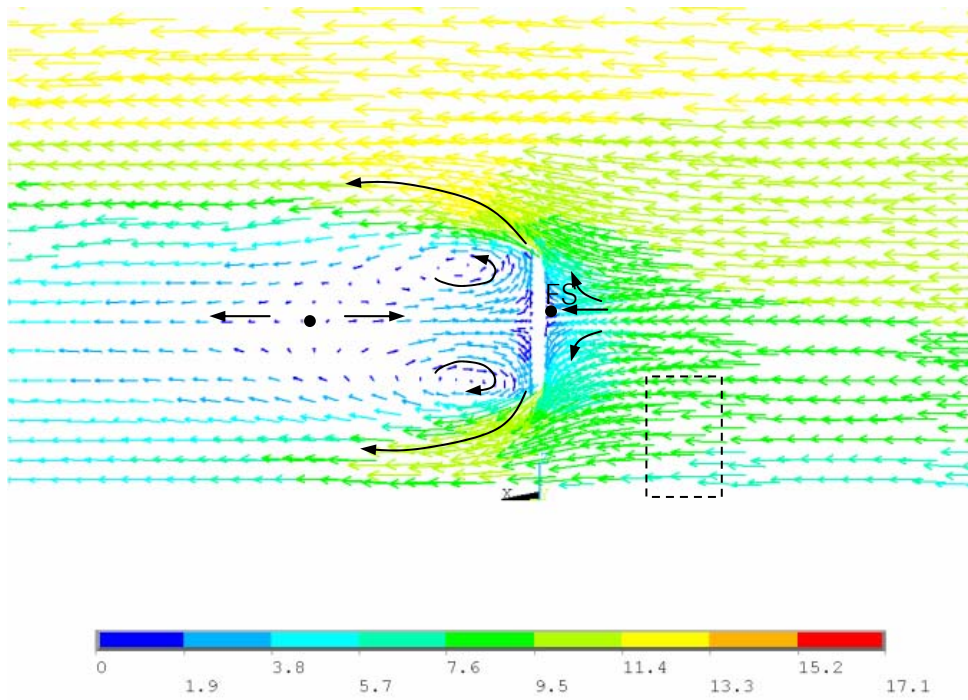


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

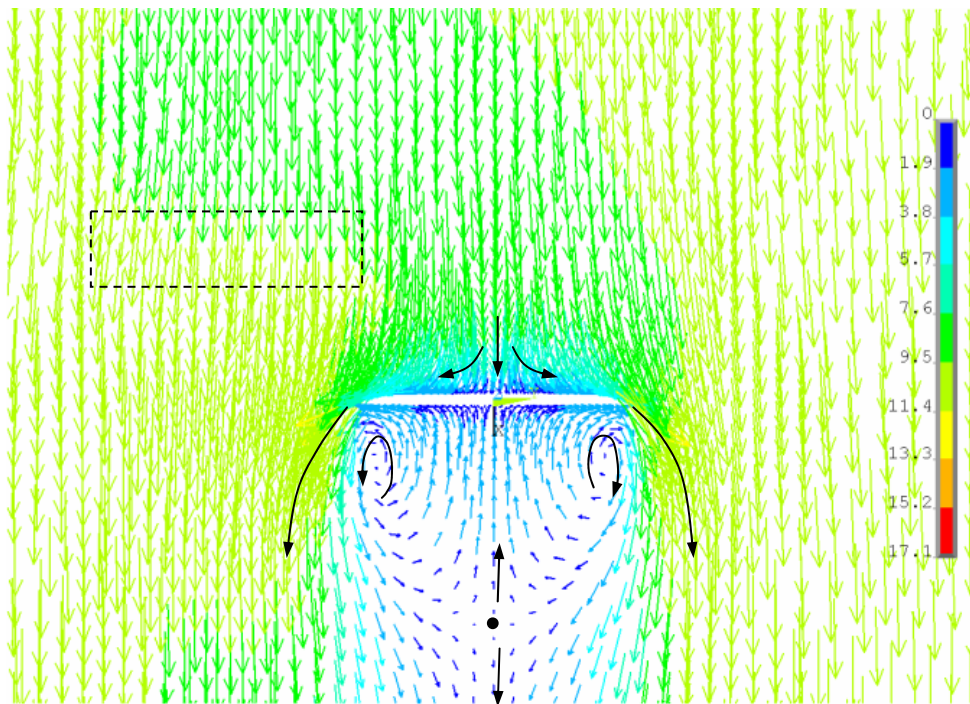


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.38 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

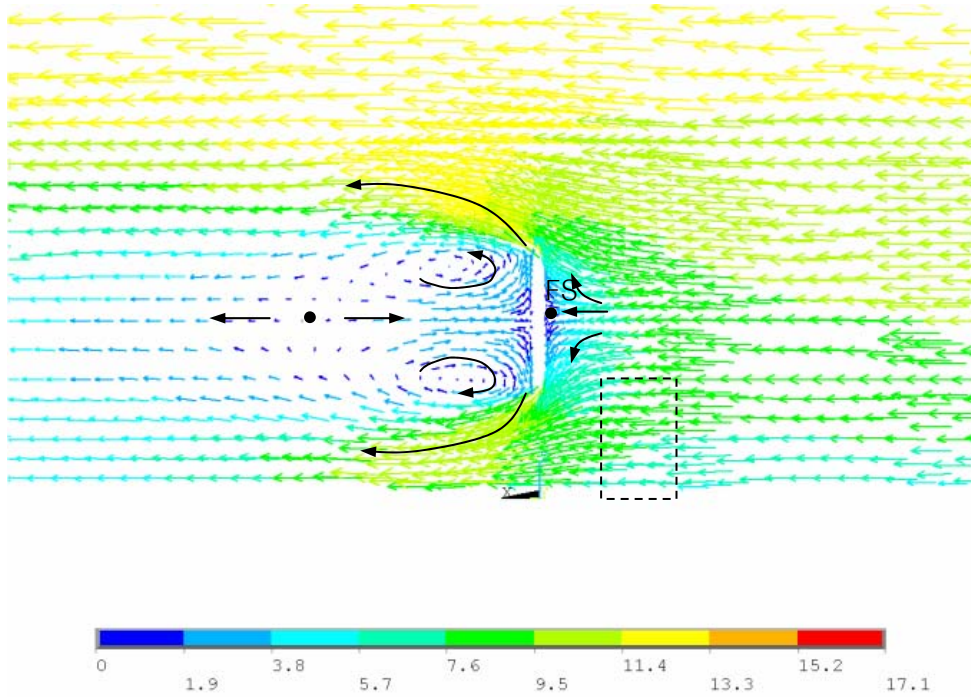


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

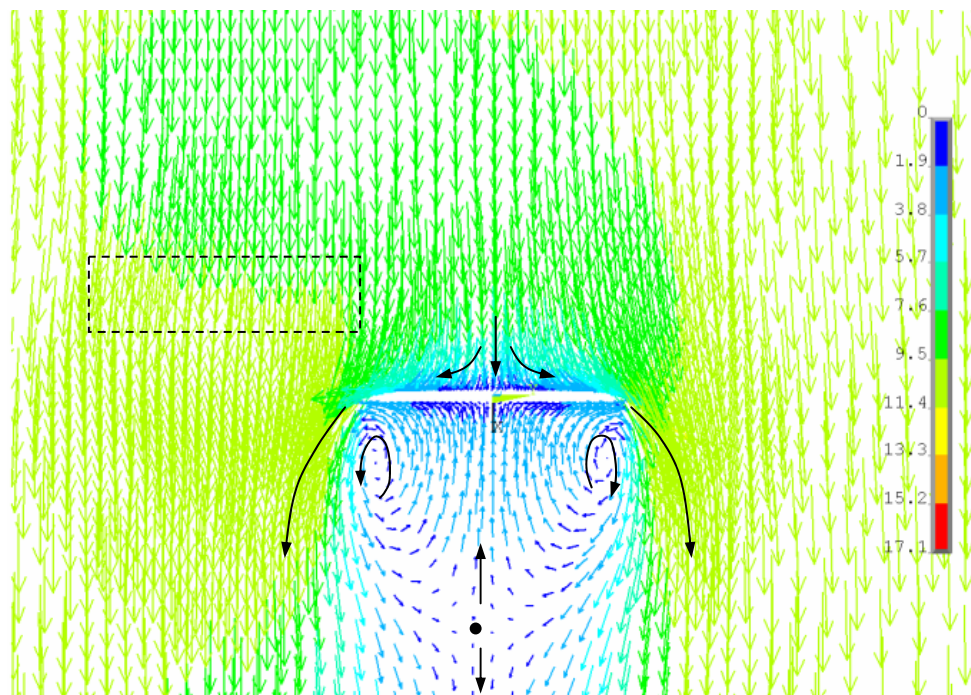


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.39 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

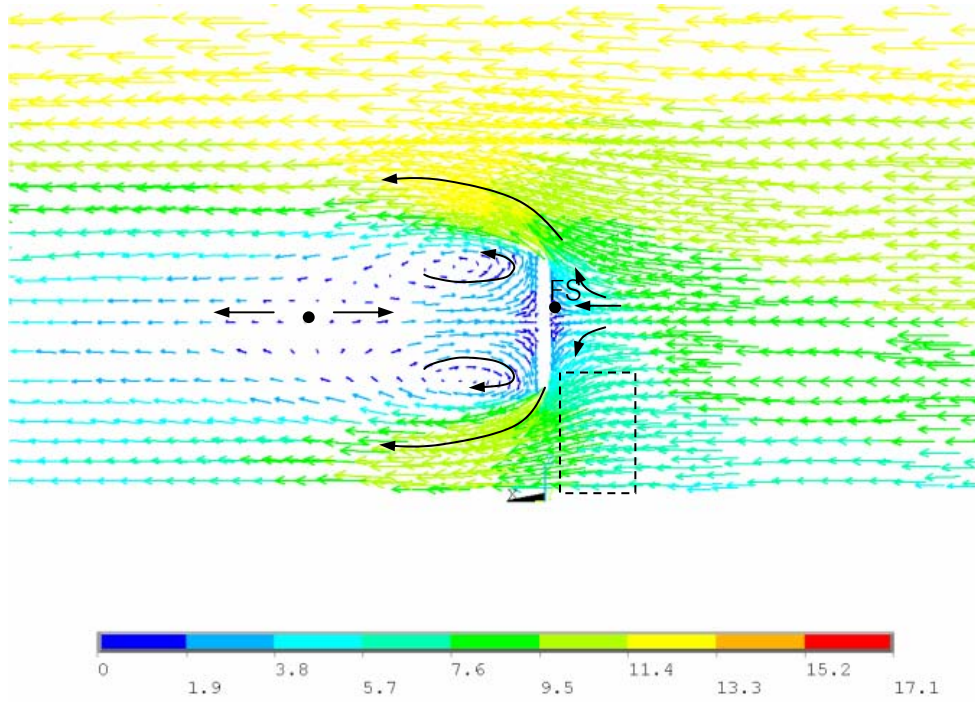


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

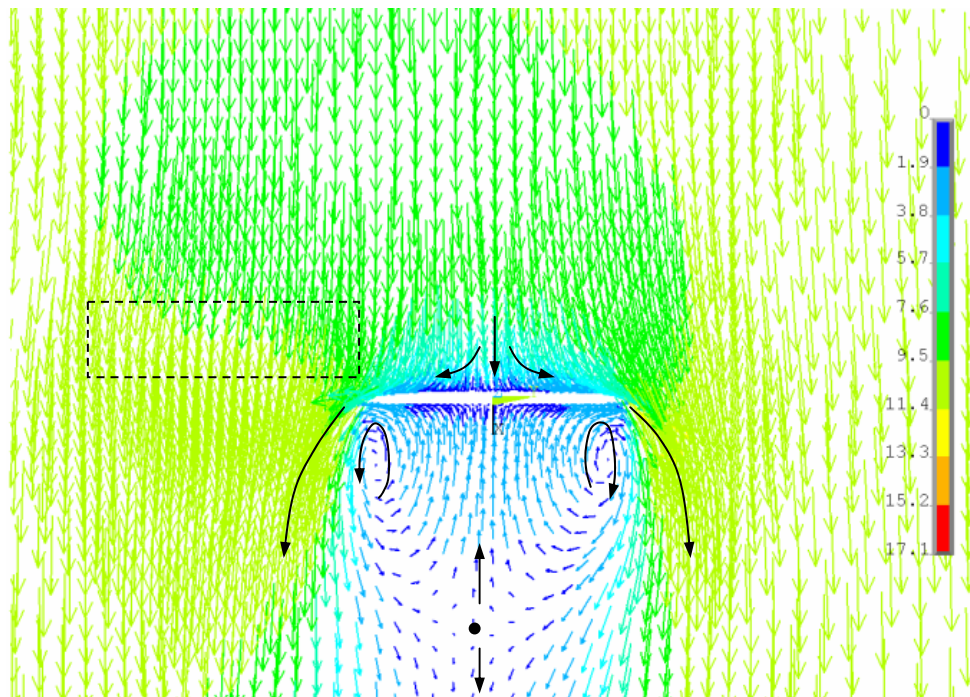


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.40 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

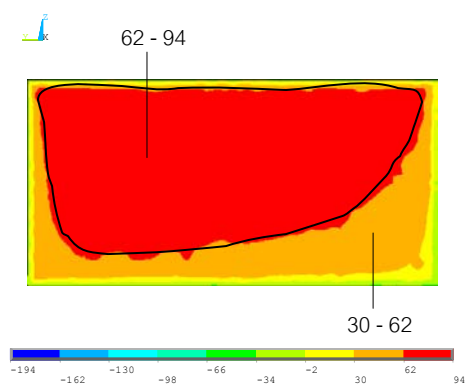


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

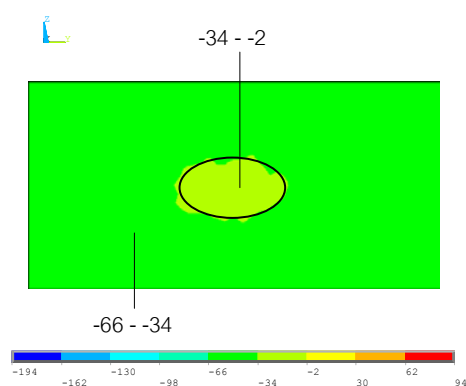


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.41 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

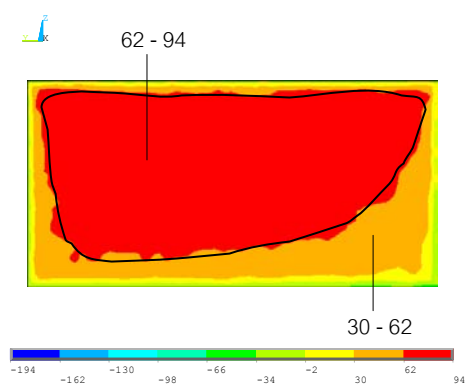


ก. ขอบด้านหน้า

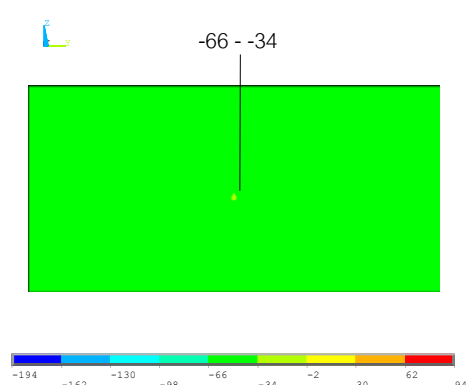


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.42 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

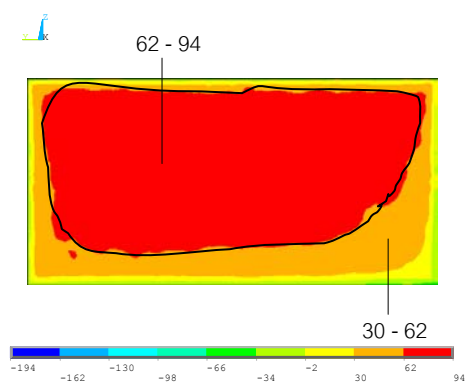


ก. ขอบด้านหน้า

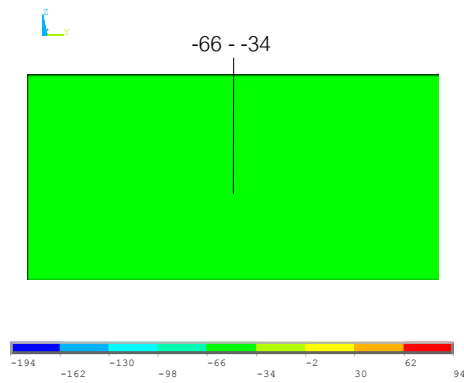


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.43 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

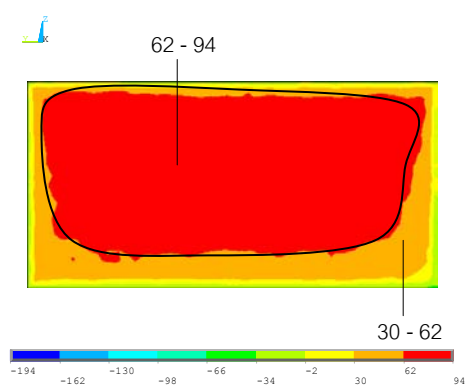


ก. ขอบด้านหน้า

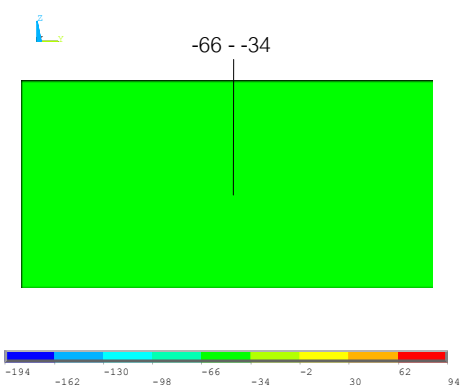


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.44 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

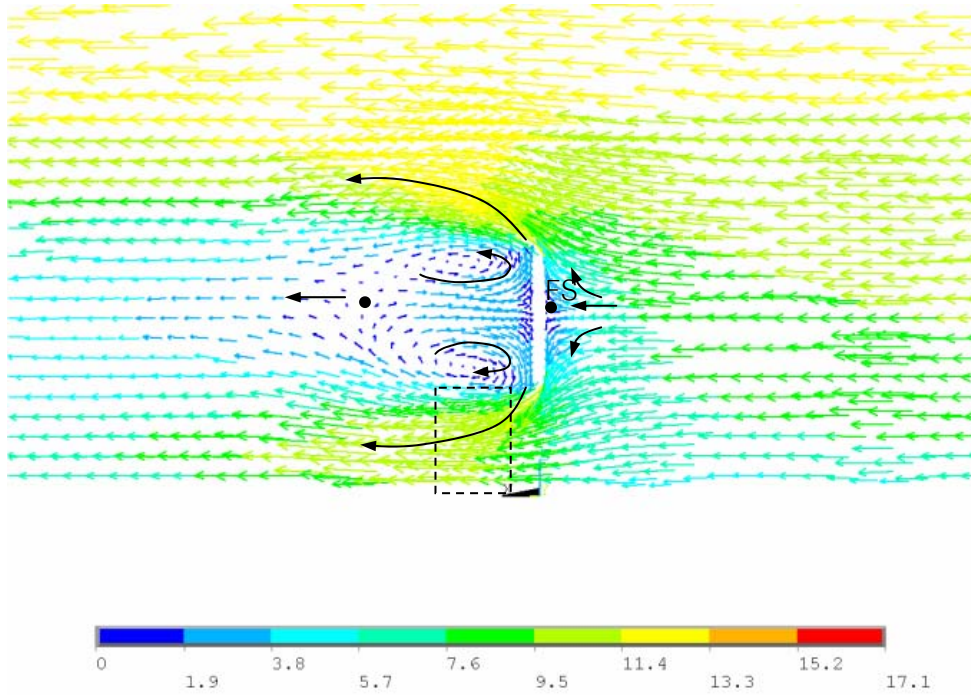


ก. ขอบด้านหน้า

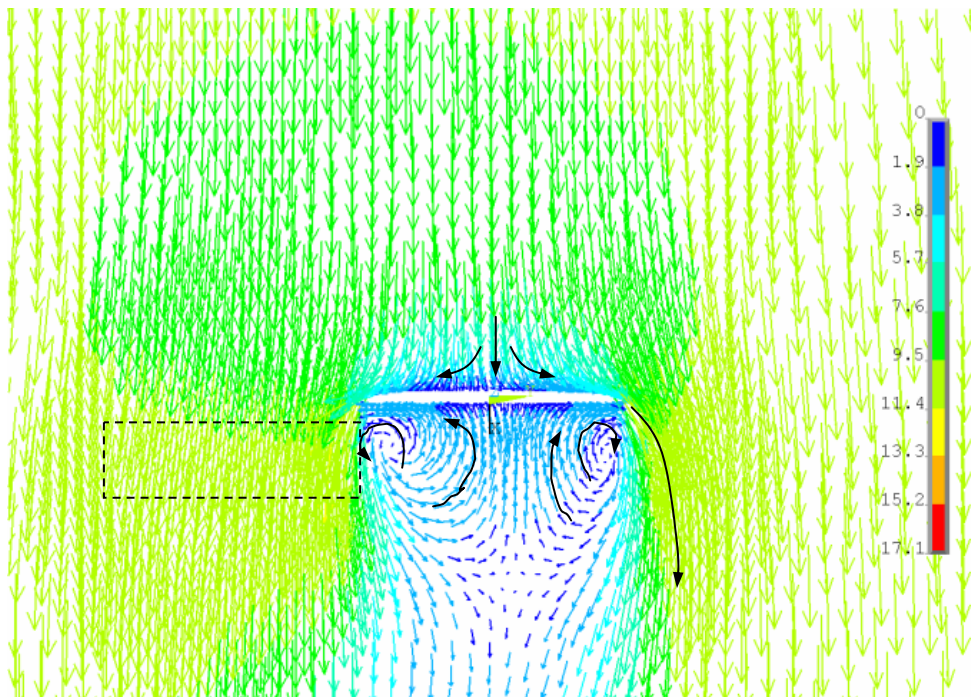


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.45 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

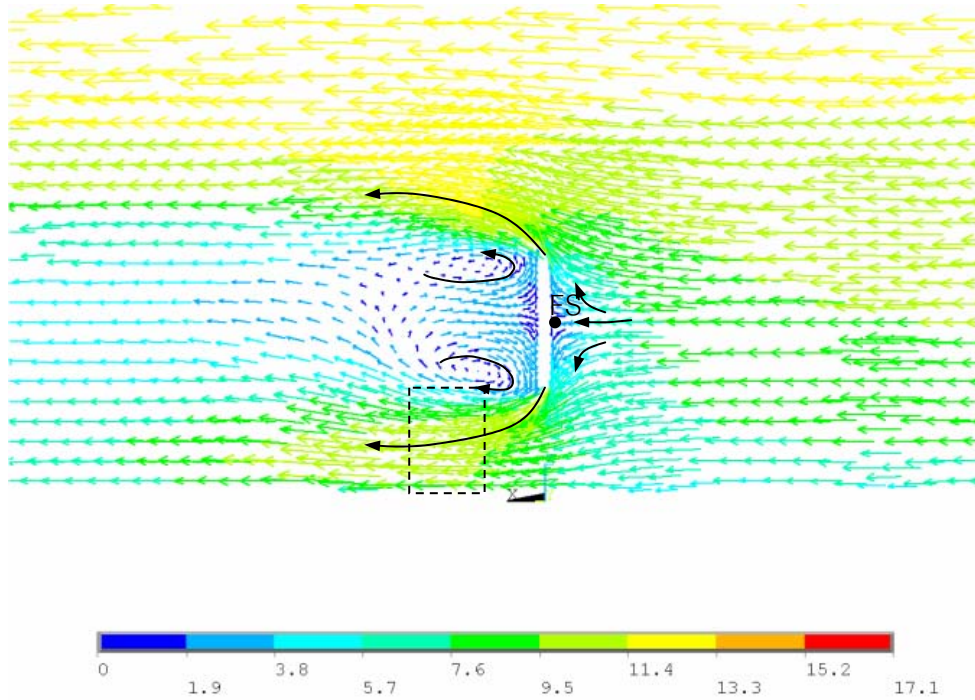


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

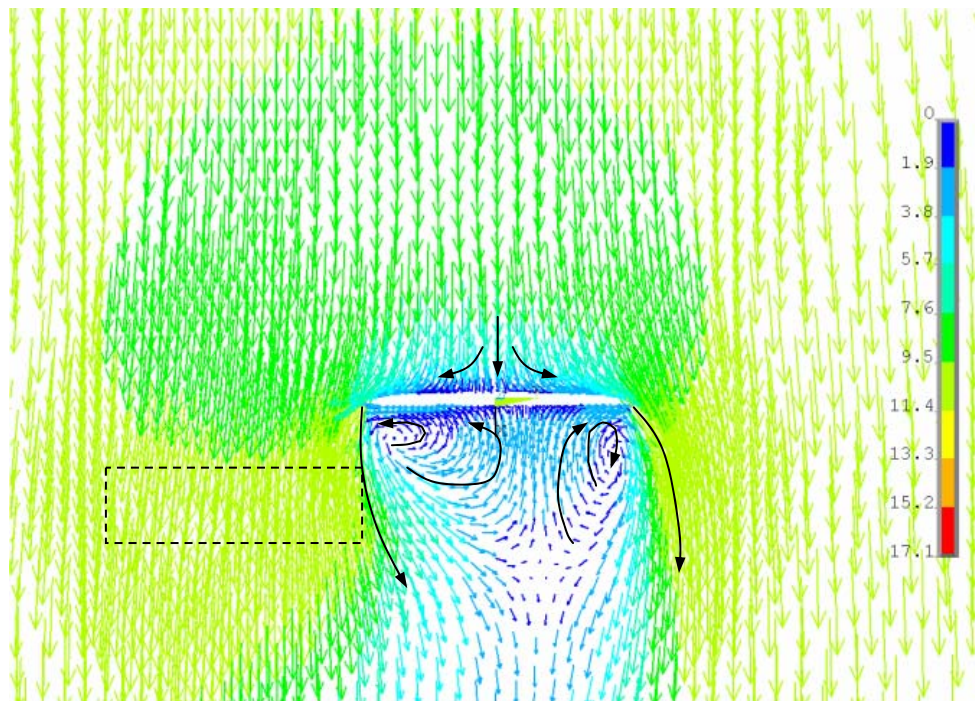


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.46 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

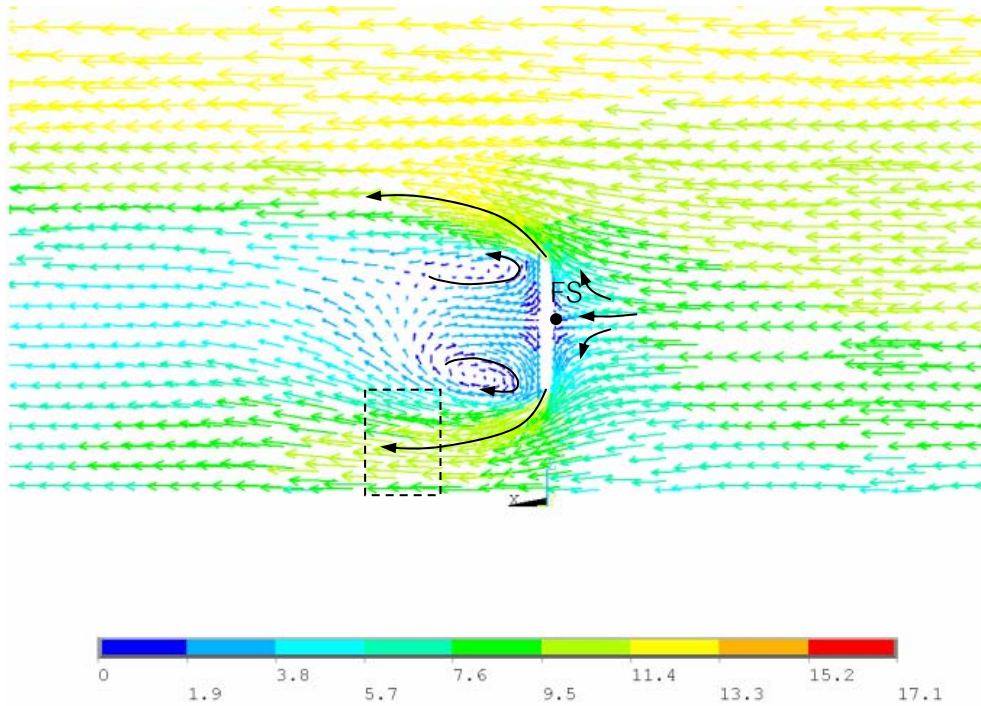


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

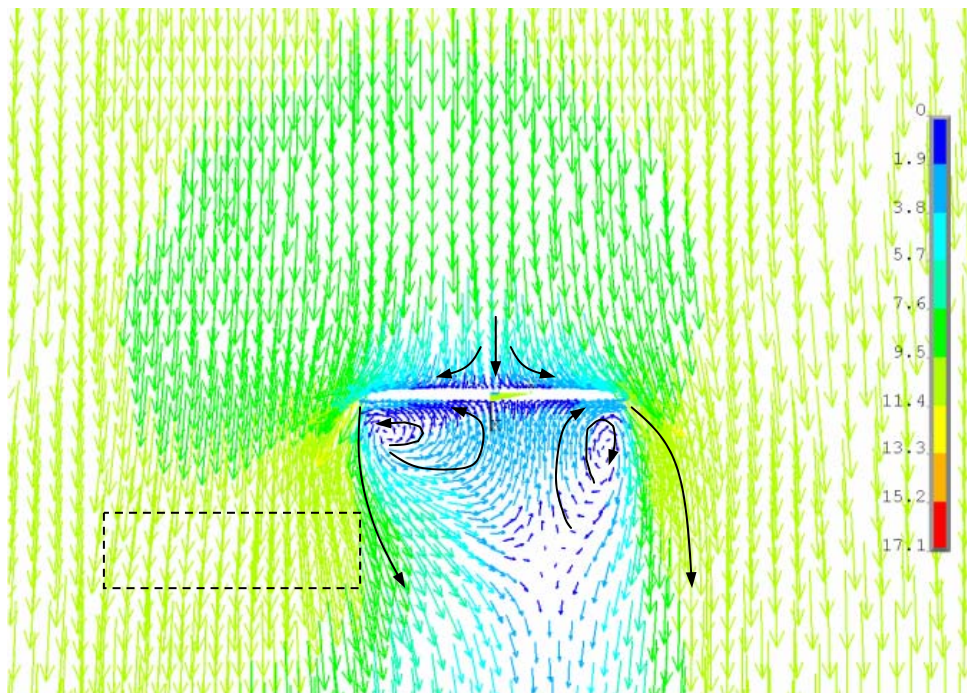


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.47 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

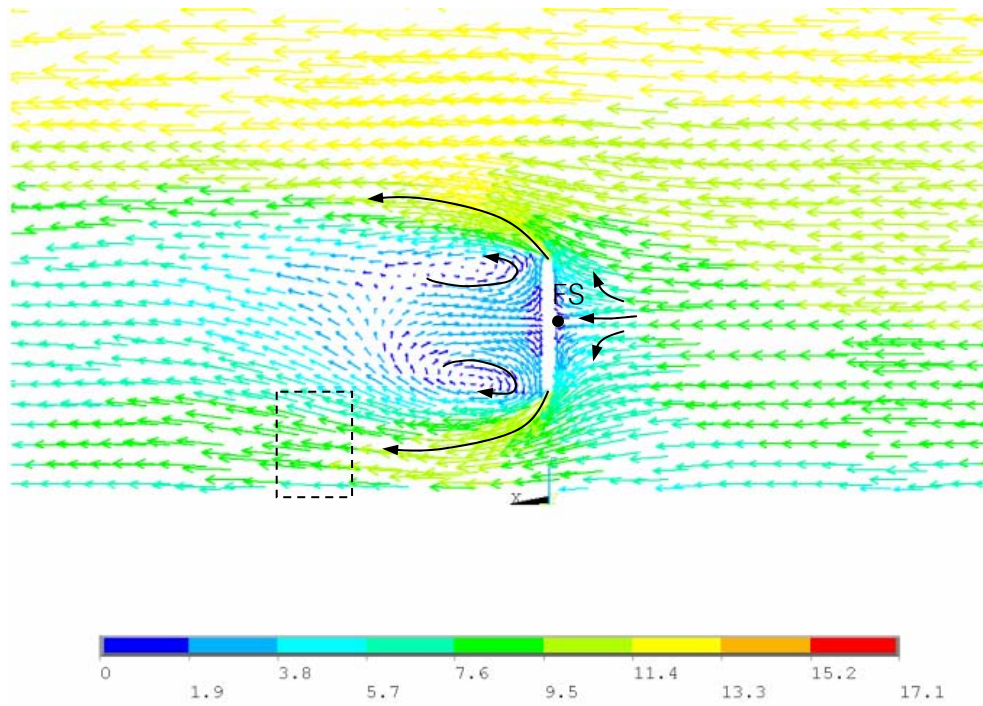


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

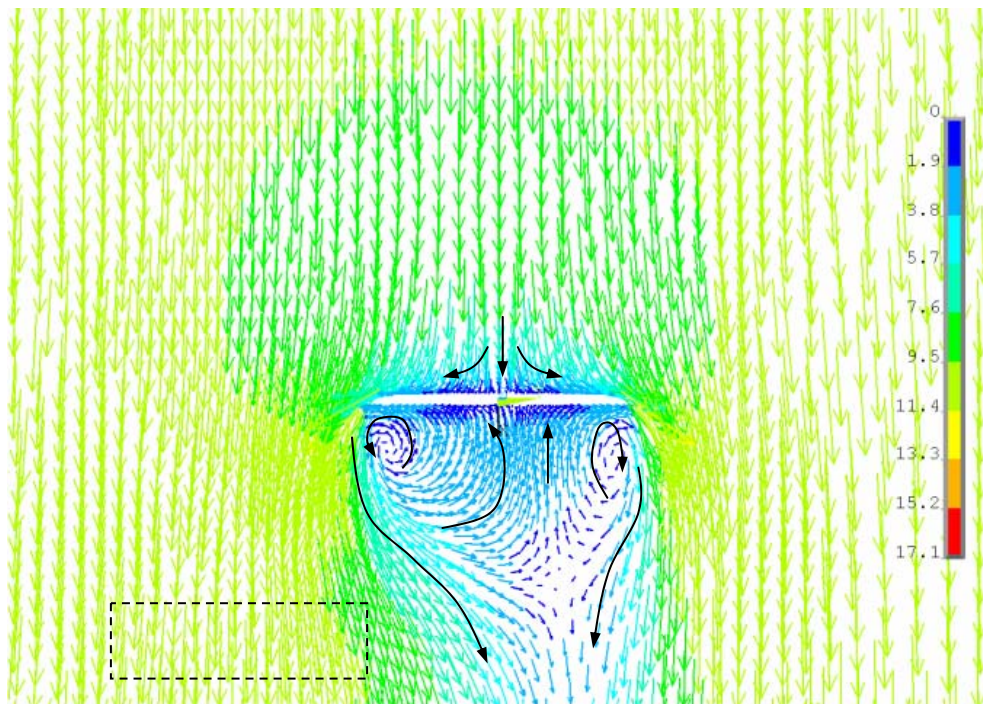


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.48 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

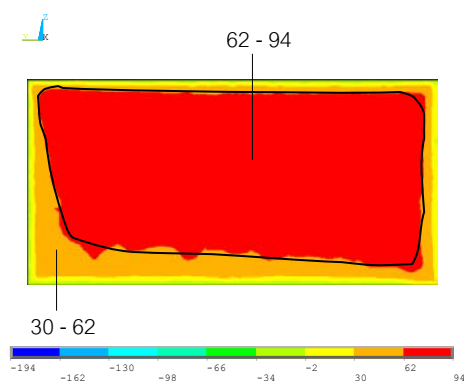


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

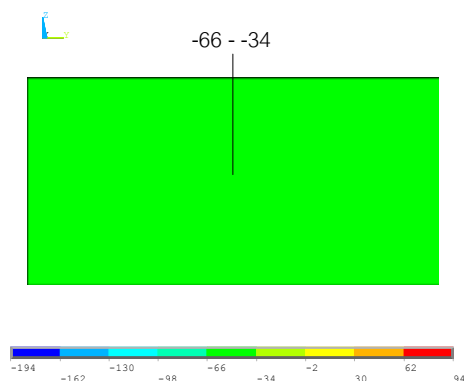


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.49 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

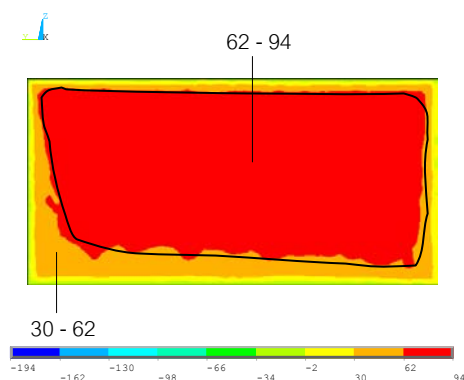


ก. ขอบด้านหน้า

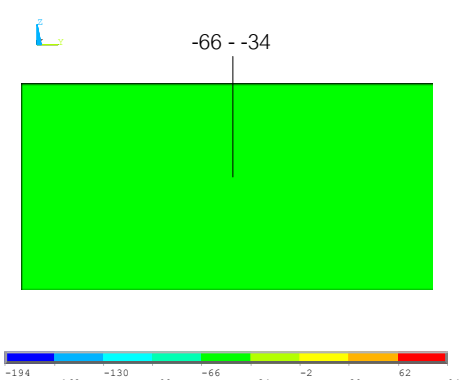


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.50 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

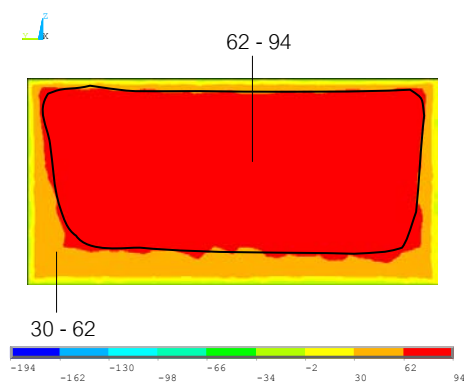


ก. ขอบด้านหน้า

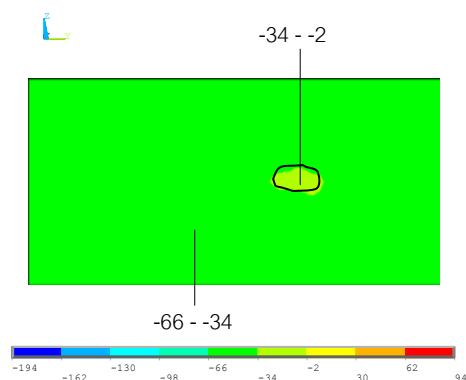


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.51 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

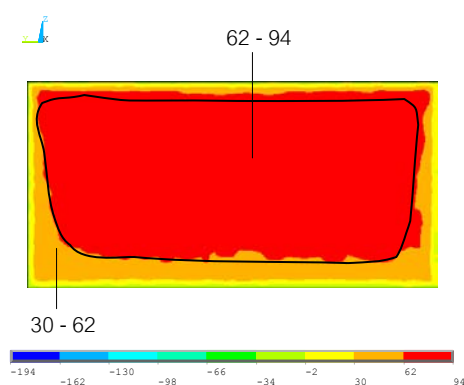


ก. ขอบด้านหน้า

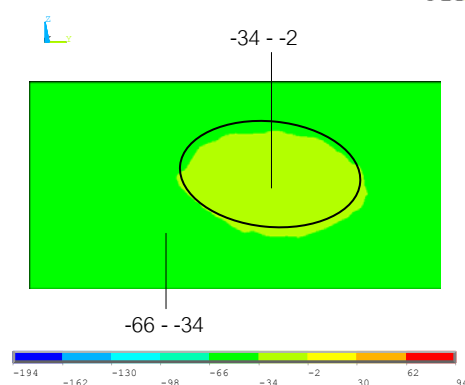


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.52 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



ก. ขอบด้านหน้า



ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.53 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

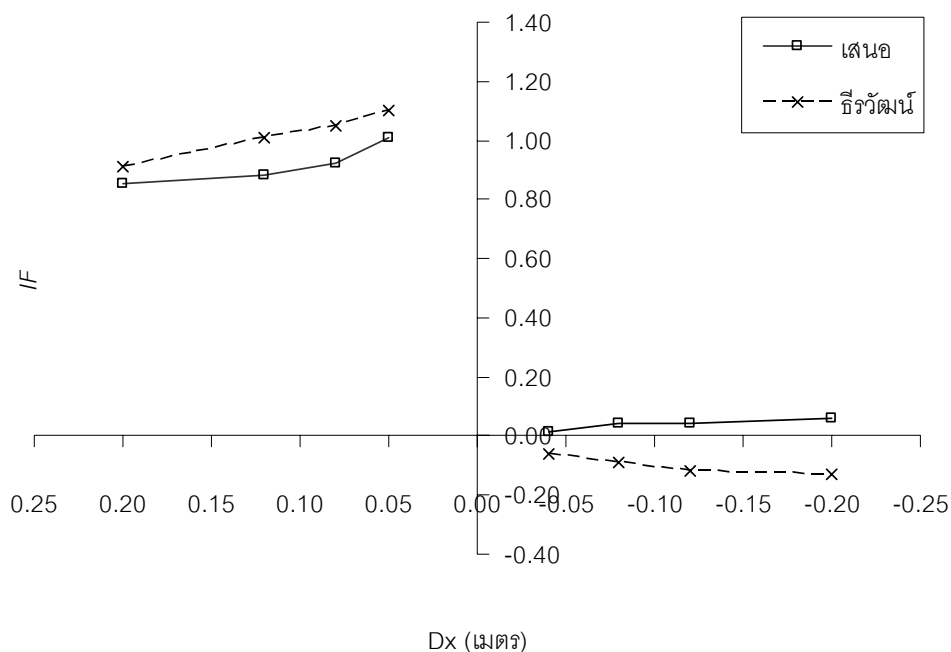
7.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$

ผลการวิเคราะห์ค่า Interference Factor (IF) ของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$ แสดงได้ดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 ค่า IF ที่ระยะ Dx (เมตร) และ Dy (เมตร) กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$

Dy (เมตร)	อาคารข้างเคียงอยู่ด้านหลัง				อาคารข้างเคียงอยู่ด้านหน้า			
	Dx (เมตร)							
	0.20	0.12	0.08	0.05	-0.04	-0.08	-0.12	-0.20
0	0.86	0.88	0.92	1.01	0.01	0.04	0.04	0.06
	(0.91)	(1.01)	(1.05)	(1.10)	(-0.06)	(-0.09)	(-0.12)	(-0.13)
-0.2	0.97	1.05	1.10	1.06	0.94	0.93	0.91	0.87
	(1.07)	(1.19)	(1.25)	(1.18)	(0.88)	(0.81)	(0.80)	(0.77)

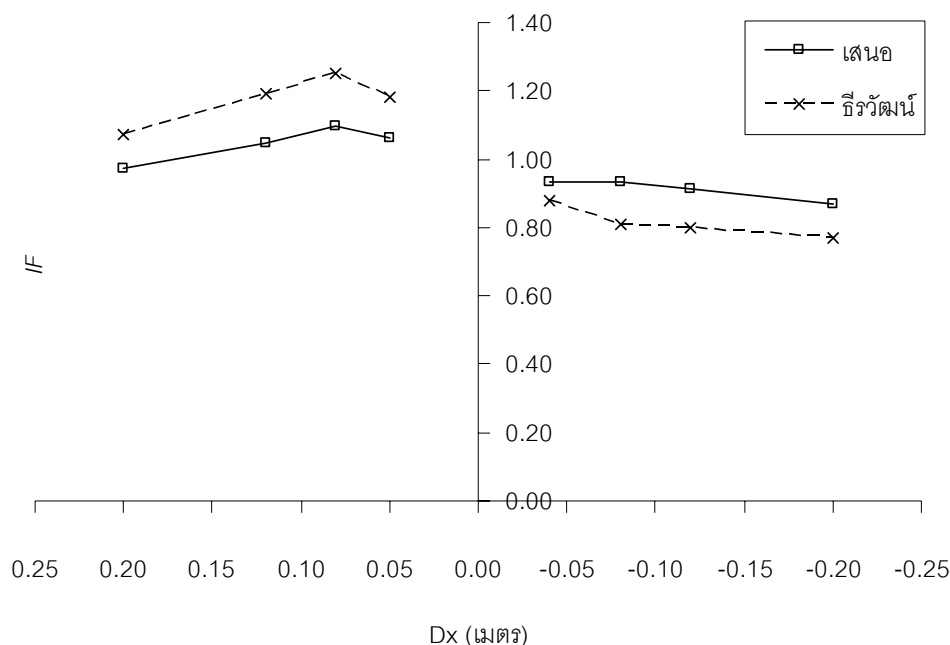
หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บได้จากการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)



ภาพที่ 7.54 ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ
สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) ตามภาพที่ 7.54 ได้ผลดังนี้

1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ โดยให้ค่า IF ประมาณ 0 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงจนติดลบ โดยให้ค่า IF ติดลบอยู่ระหว่าง -0.06 - -0.13 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ที่ไม่มีค่า IF ที่ติดลบ
2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ตำแหน่งติดกับโครงสร้างป้ายโฆษณา ($Dx = 0.05$ เมตร) มีค่าคงที่ หลังจากนั้นที่ตำแหน่งไกลออกไป ($Dx > 0.05$ เมตร) ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.86 - 1 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งติดกับโครงสร้างป้ายโฆษณา ($Dx = 0.05$ เมตร) และค่อยๆ ลดลงเมื่อตำแหน่งไกลออกไป ($Dx > 0.05$ เมตร) โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.9 - 1.1 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF น้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) เล็กน้อย

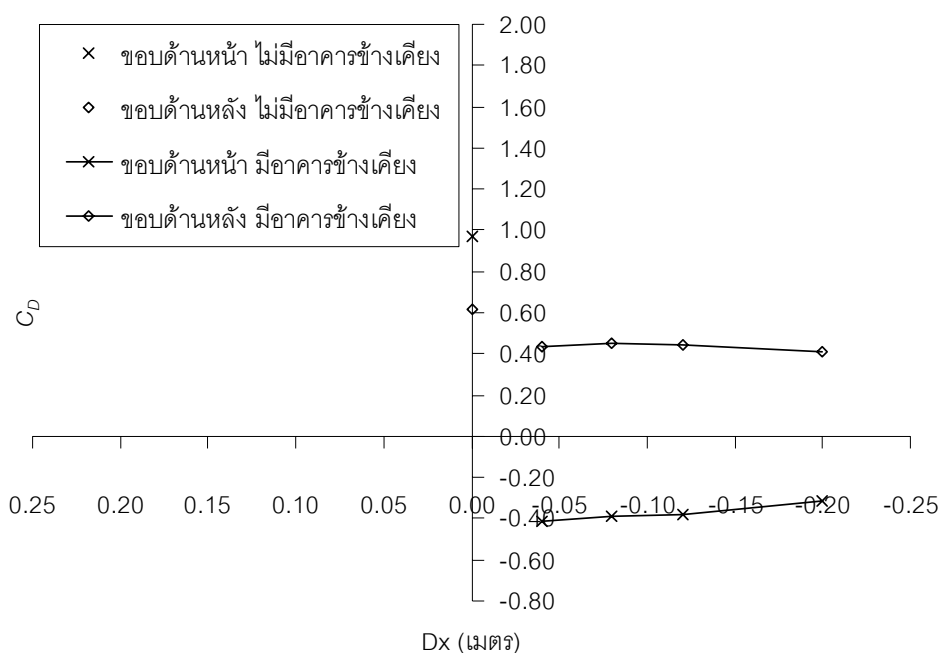


ภาพที่ 7.55 ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ
สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร) ตามภาพที่ 7.55 ได้ผลดังนี้

- เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มการลดลงเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง $0.87 - 0.94$ ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มการลดลงเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง $0.8 - 0.9$ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์จะให้ค่า IF มากกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) เล็กน้อย
- เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 5 - 10 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง $0.97 - 1.1$ ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์

แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 1.07 – 1.25 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์จะให้ค่า IF น้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)



ภาพที่ 7.56 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่และมีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$ อยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณากับ Dx (เมตร) สำหรับ $Dy = 0$ เมตร

ข้อสังเกตที่น่าสนใจจากภาพที่ 7.56 กรณีที่อาคารข้างเคียงขนาด $1.0 h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) และอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าการที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนเกือบเป็นศูนย์นั้นเป็นผลมาจากแรงที่กระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงอย่างมาก จนมีค่าติดลบ เป็นแรงดูดแบบกลับทิศไปทางด้านต้นลม ในขณะที่แรงดูดที่กระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงเล็กน้อยส่งผลให้แรงสุทธิกระทำต่อโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าประมาณศูนย์ การที่แรงกระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าติดลบนั้นเพราะว่าลม

หมุนบริเวณด้านหลังอาคารข้างเคียงพยายามดูดขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศแกน x (พยายามดูดป้ายคว่ำไปด้านหลัง)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ที่แสดงอยู่ในรูปการไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมและเส้นชั้นความดันลมสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา)

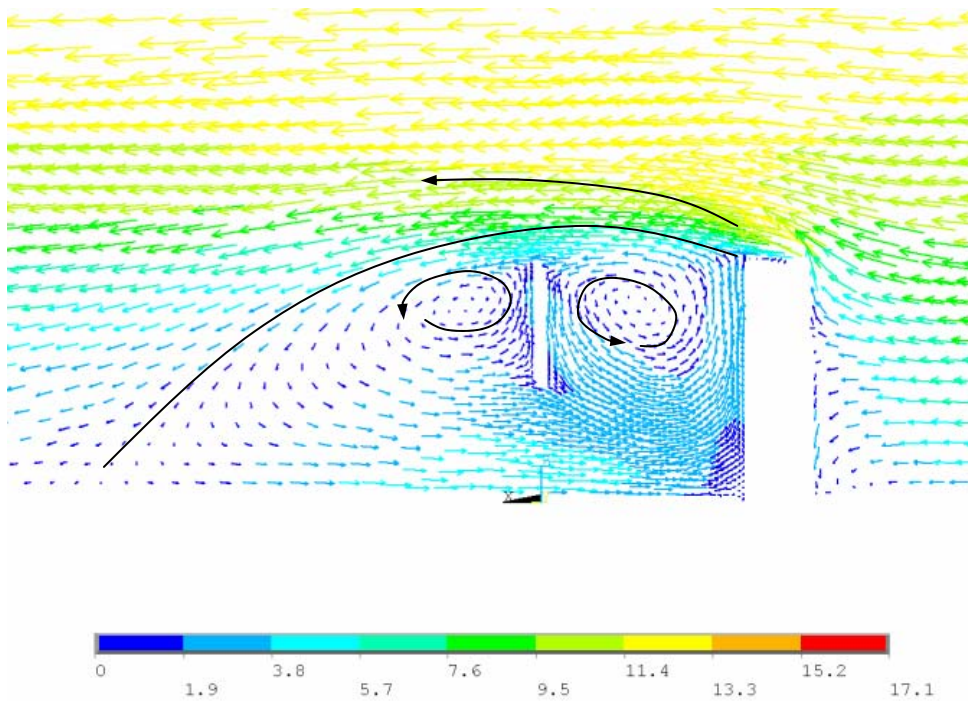
1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.57 ก ถึงภาพที่ 7.60 ก การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนเกือบเป็นศูนย์นั้นเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างป้ายโฆษณาอยู่ในตำแหน่งลมหมุน (Wake) ด้านหลังอาคารข้างเคียงซึ่งเป็นความเร็วลมต่ำ ทำให้เกิดลมหมุนบางส่วนพยายามพุ่งขึ้นไปด้านหลังนอกจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างป้ายโฆษณากับอาคารข้างเคียงส่วนลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายมีหนึ่งวงเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณา ในขณะที่อาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไปทำให้เกิดลมหมุนบริเวณด้านหน้าหนึ่งวงและบริเวณด้านหลังหนึ่งวงของโครงสร้างป้ายโฆษณาโดยมีลักษณะไปในทิศเดียวกัน นอกจากนี้หากพิจารณาภาพ ข จะเห็นได้ว่าบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีลมหมุนจำนวนสองวง พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.61 ถึงภาพที่ 7.64 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูด (Suction) ในทิศทางกลับทิศไปทางด้านต้นลมโดยพยายามดูดโครงสร้างป้ายโฆษณาคว่ำไปทางด้านหน้า ในขณะที่บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดไปทางด้านท้ายลม ดังนั้นแรงกระทำสุทธิจึงมีค่าประมาณศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาตามภาพที่ 7.56 พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ
2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.65 ก ถึงภาพที่ 7.68 ก การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีแนวโน้มการลดลงเมื่อตำแหน่งอาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป นั้นเป็นผลมาจากลมที่ลอดผ่านโครงสร้างป้ายโฆษณาแล้วปะทะกับอาคารข้างเคียงย้อนพุ่งขึ้นไป

ด้านบนขนานกับโครงสร้างป้ายโฆษณาทำให้ลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาหายไปเมื่ออาคารข้างเคียงใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณา และลมหมุนบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาส่วนบนมีความไม่สมบูรณ์เมื่ออาคารข้างเคียงไกลออกไป พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ก ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.69 ถึงภาพที่ 7.72 บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาส่วนบนเป็นแรงดูดลดลงและลดลงเรื่อยๆ เมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ

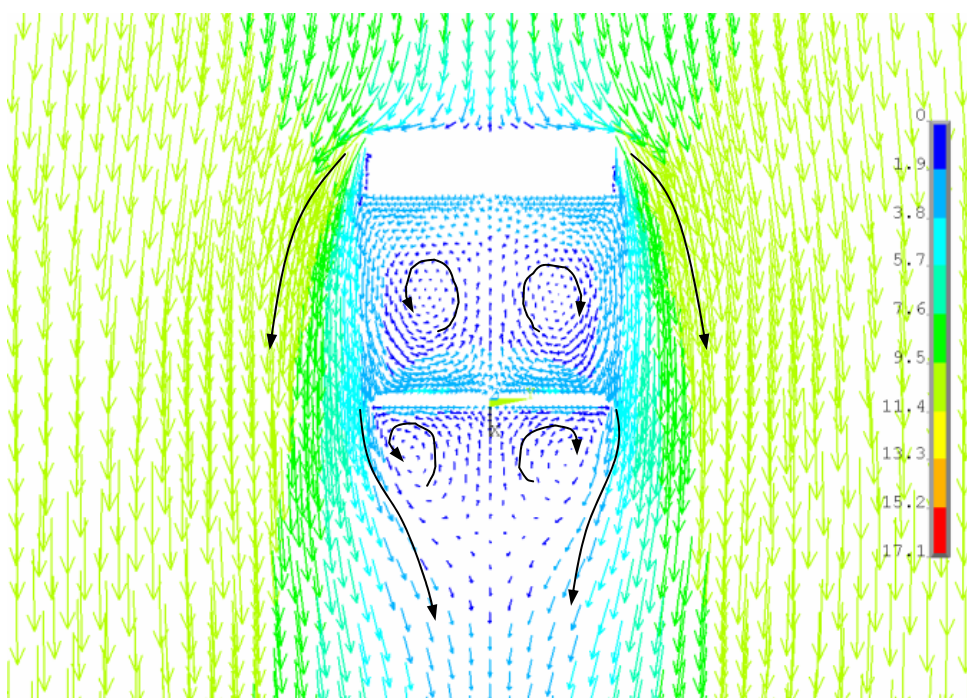
กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ อยู่ตำแหน่ง D_y เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเยื้องกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร)

1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.73 ข ถึงภาพที่ 7.76 ข การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีแนวโน้มการลดลงเมื่อตำแหน่งอาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป นั้นเป็นผลมาจากการที่ความเร็วลมลดลงบริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเนื่องจากการขวางลมของอาคารข้างเคียงทำให้เกิดพฤติกรรมการแยกตัว (Separation) ของลมที่ขอบข้างโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงมีความเร็วลดลง การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงโดยมีแนวโน้มการลดลงเมื่อตำแหน่งอาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไปเนื่องจากการที่อาคารข้างเคียงอยู่ใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณาจะมีผลจากพฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณด้านหน้าอาคารกระทบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาในขณะที่ผลกระทบดังกล่าวจะไม่มีผลมากนักเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ข ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.77 ถึงภาพที่ 7.80 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงเป็นแรงดัน (Pressure) ลดลงและลดลงเรื่อยๆ เมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ
2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.81 ข ถึงภาพที่ 7.84 ข การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 5 - 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งอาคารอยู่ใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณา นั้นเป็นผลมาจากการที่ตำแหน่งอาคารข้างเคียงใกล้กับโครงสร้าง

ป้ายโฆษณาทำให้พฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณขอบข้างโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงมีความเร็วมากขึ้นโดยพยายามผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างป้ายโฆษณากับอาคารข้างเคียง ในขณะที่อาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไปบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีลักษณะลมหมุนที่ไม่สมบูรณ์จากเดิมที่มีสองวงสมบูรณ์ พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ข ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.85 ถึงภาพที่ 7.88 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงเป็นแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดลดลงเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ

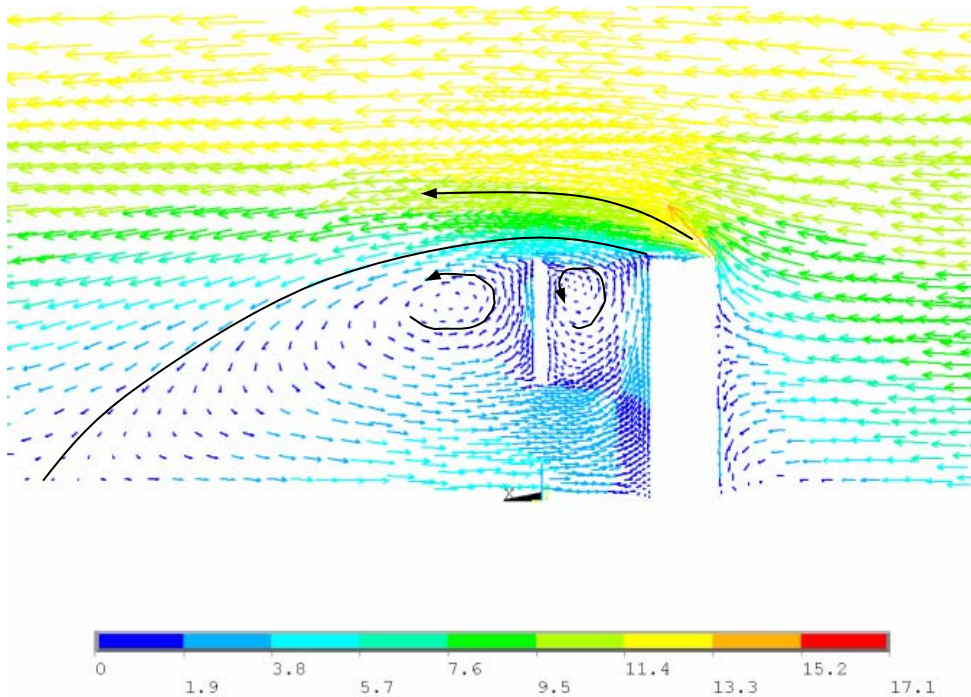


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

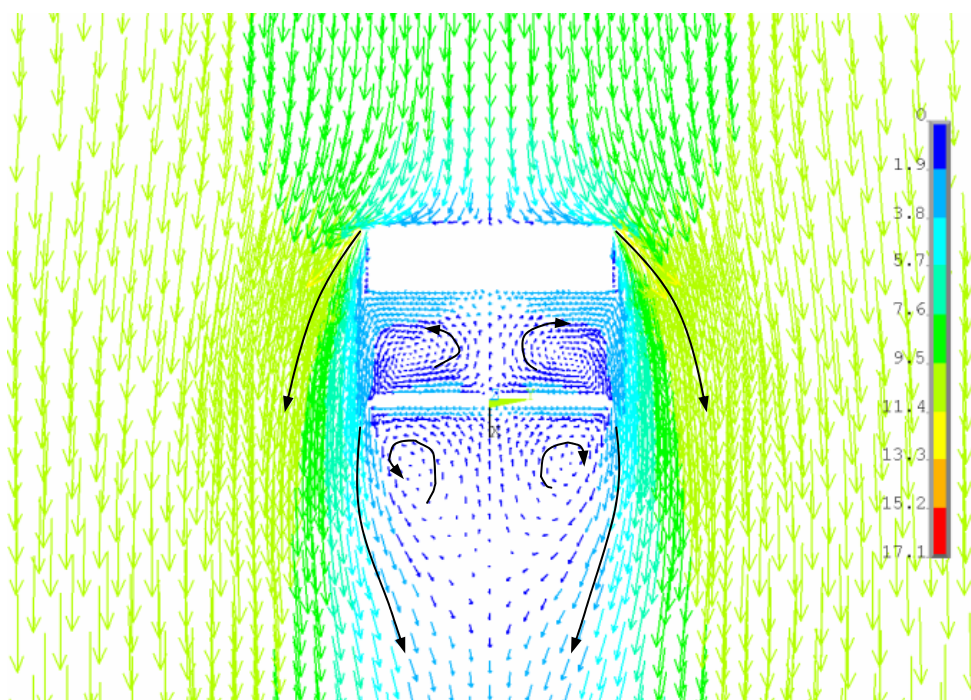


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.57 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

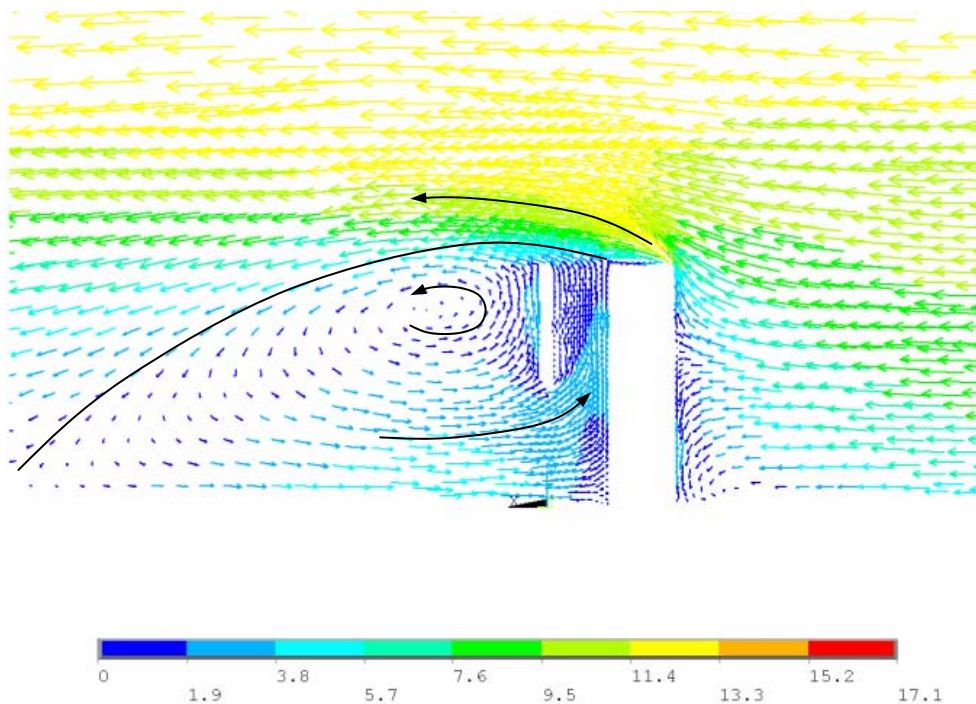


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

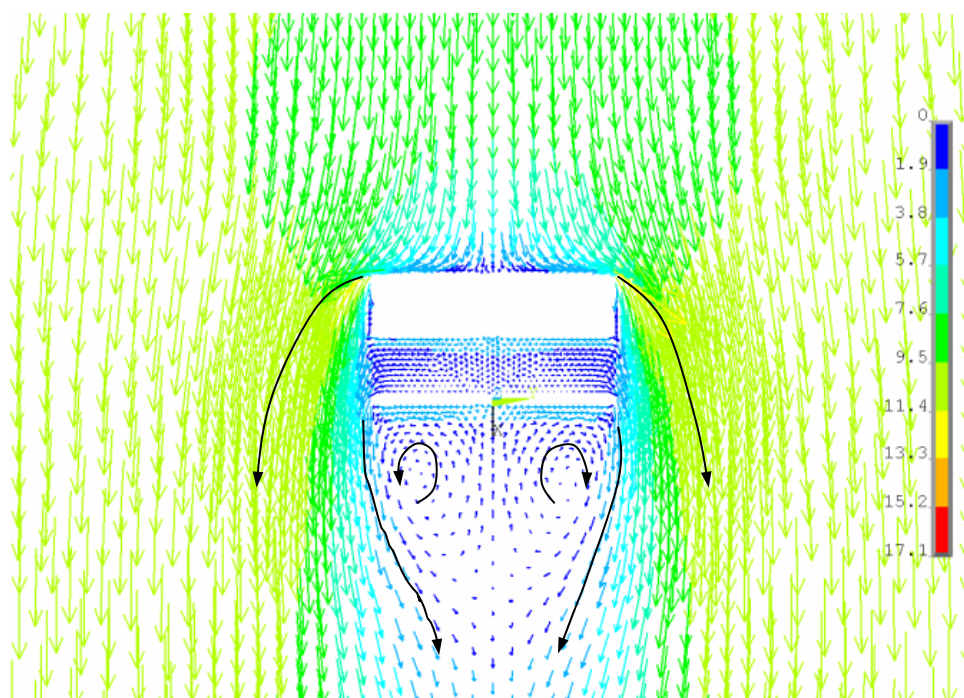


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.58 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

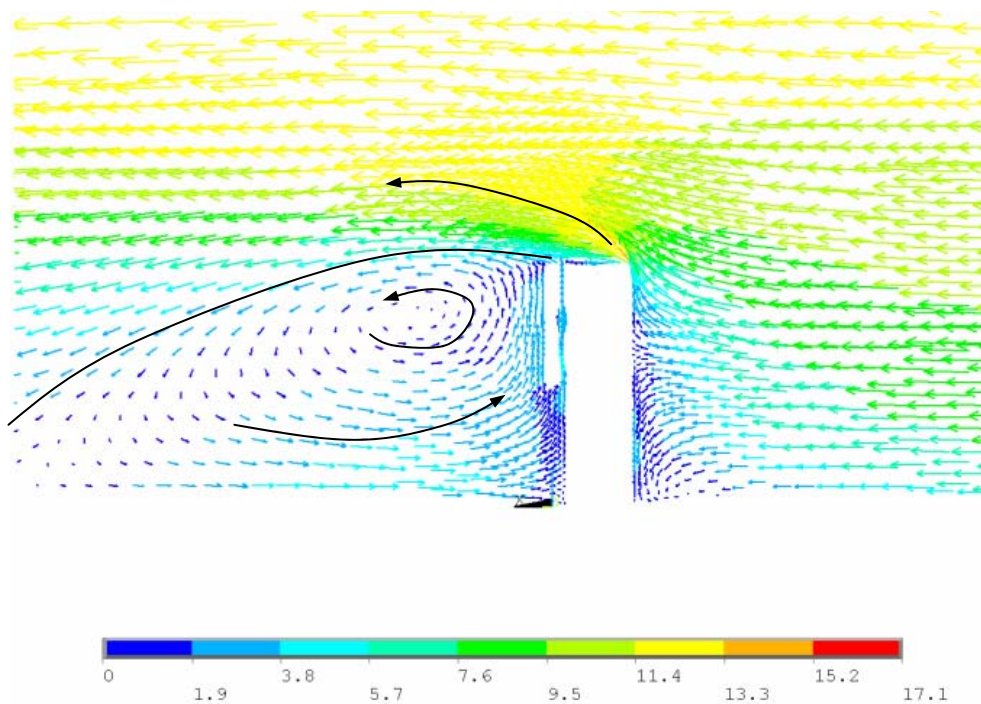


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

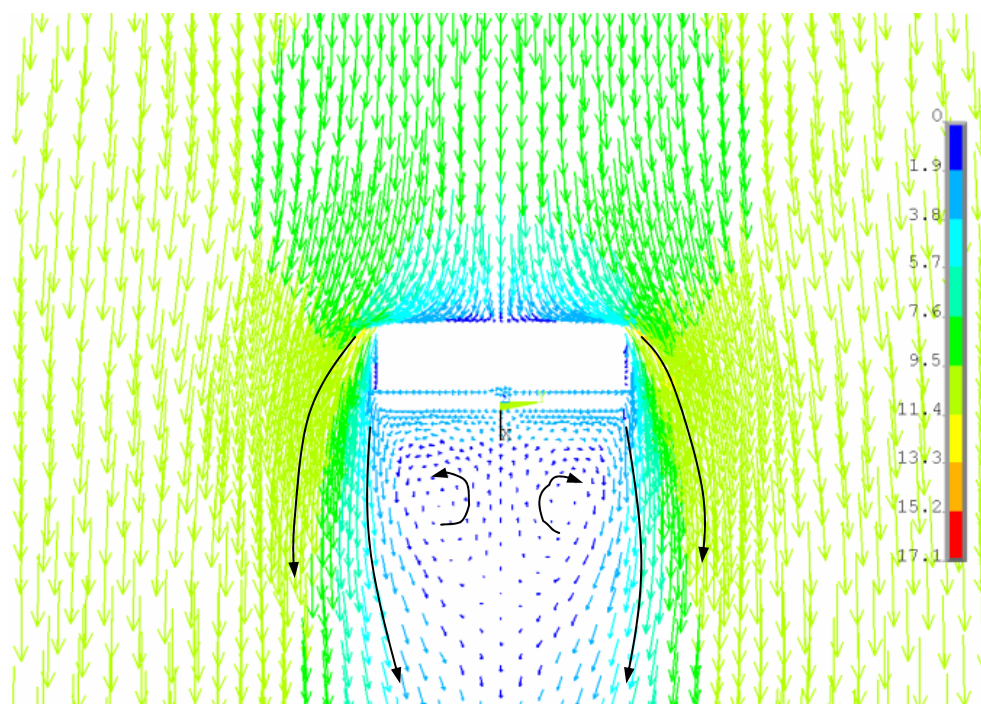


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.59 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

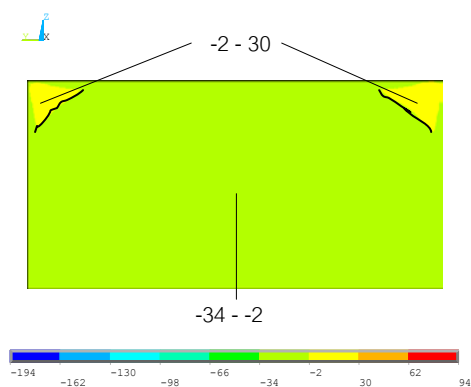


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

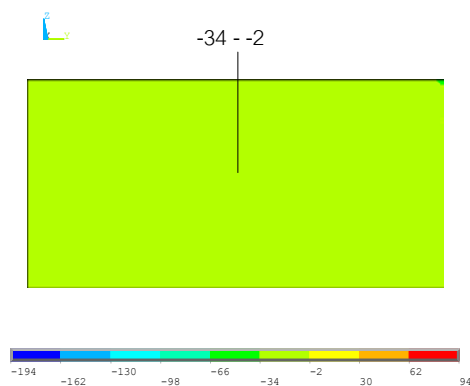


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.60 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

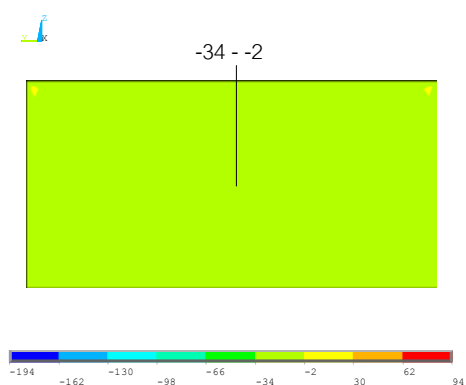


ก. ขอบด้านหน้า

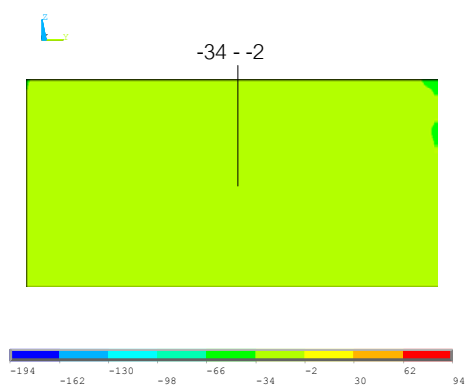


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.61 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

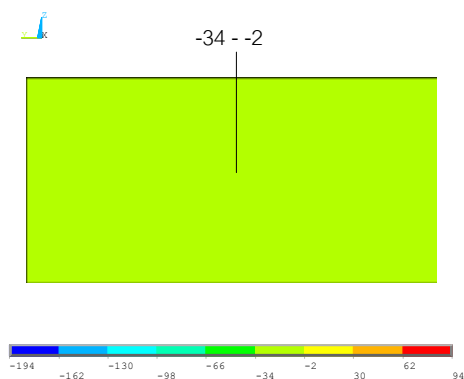


ก. ขอบด้านหน้า

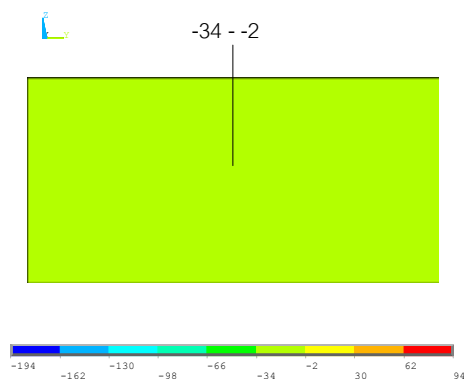


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.62 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

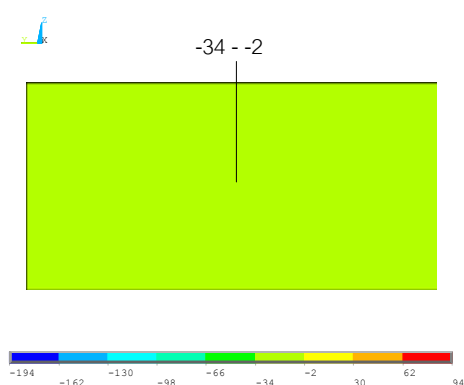


ก. ขอบด้านหน้า

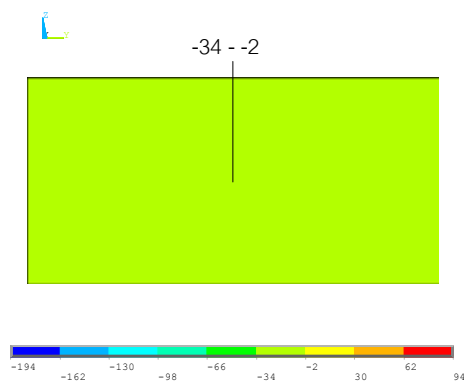


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.63 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

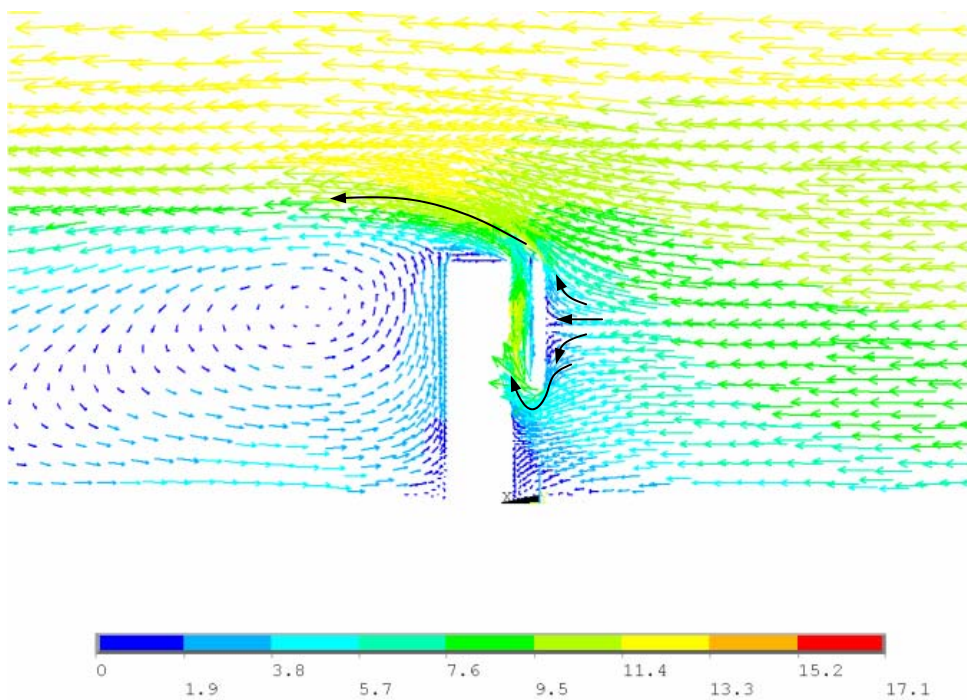


ก. ขอบด้านหน้า

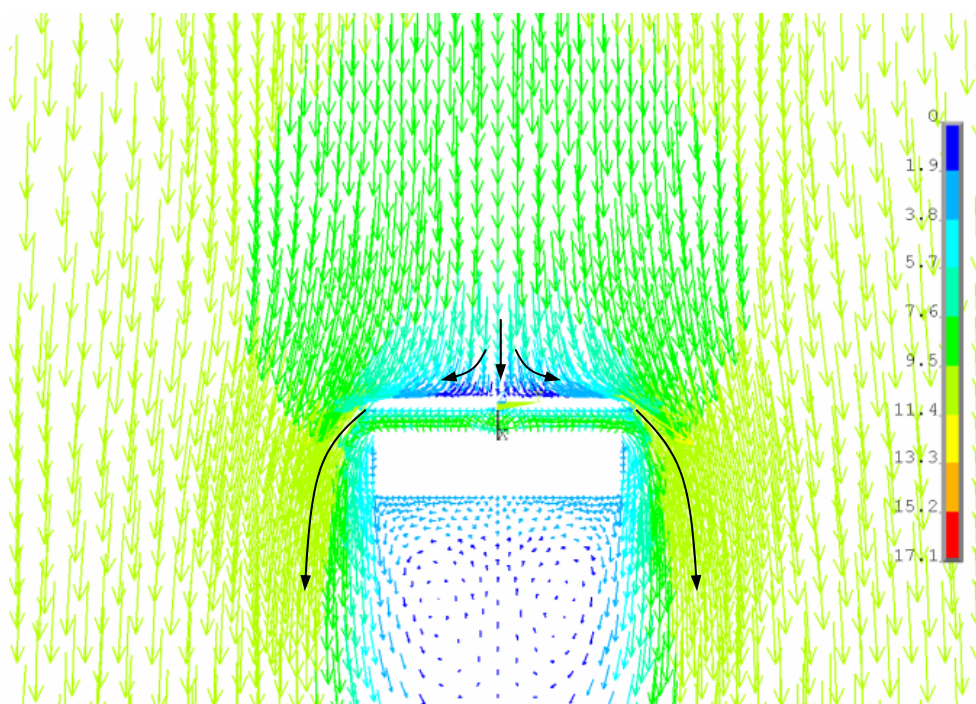


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.64 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

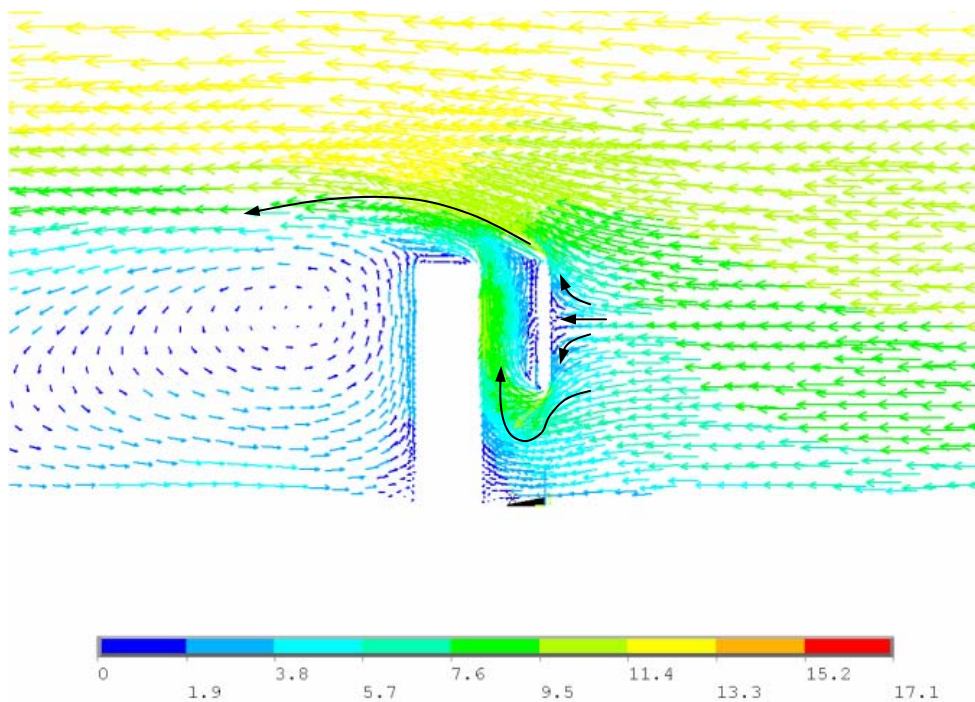


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

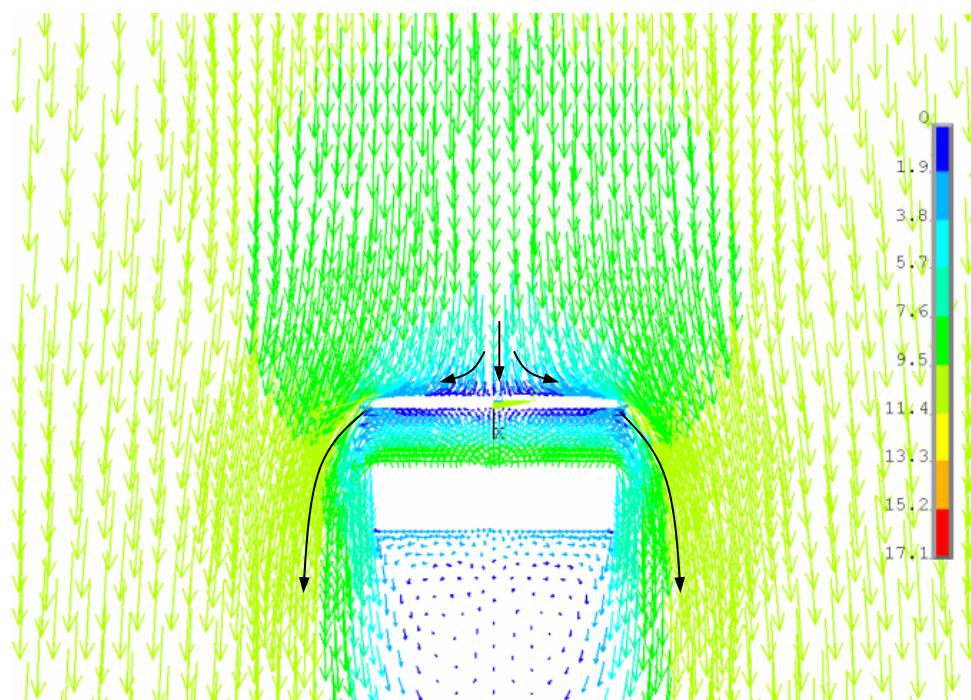


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.65 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

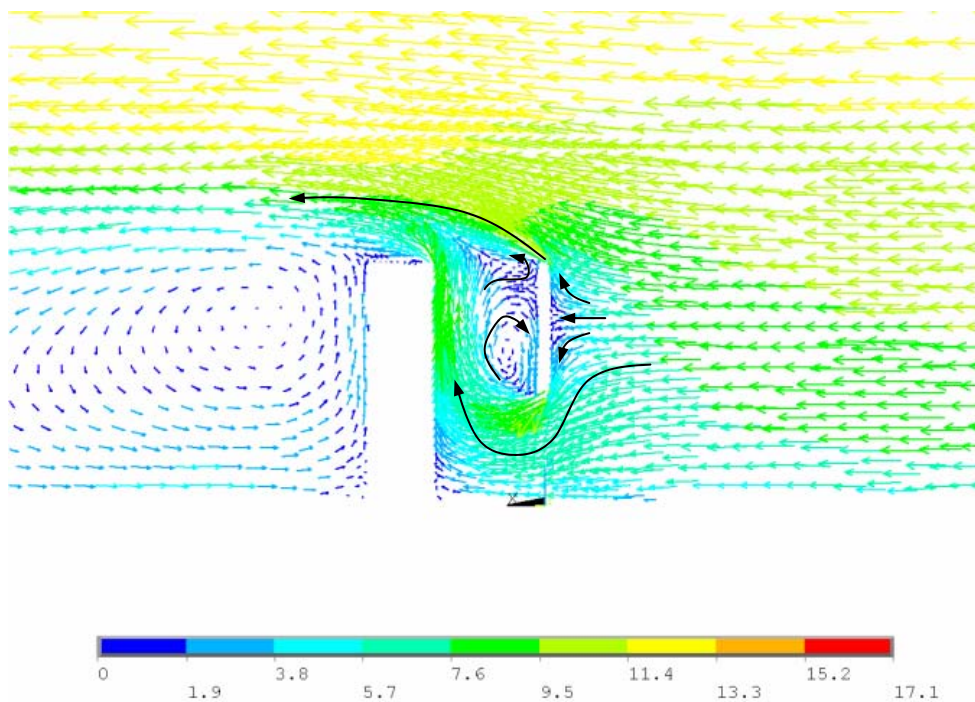


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

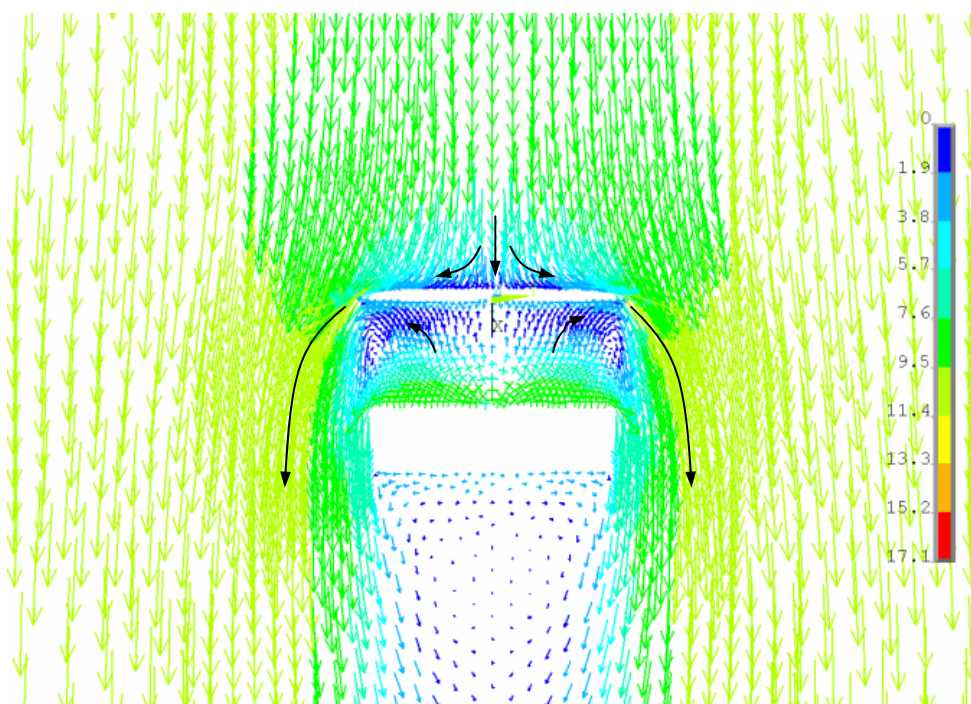


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.66 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

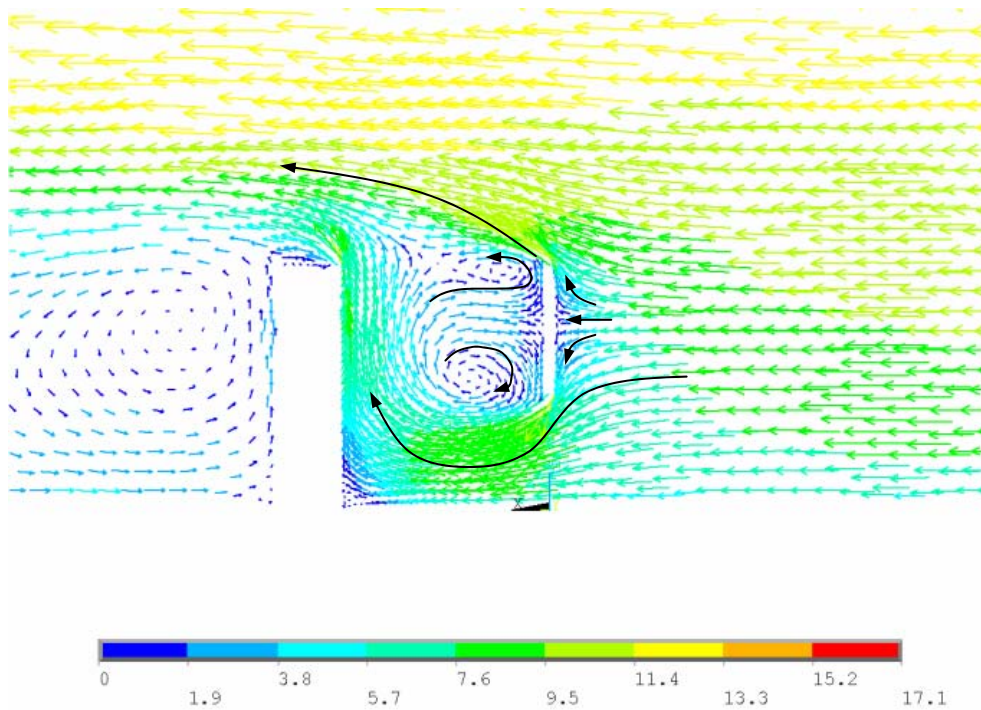


ก. ภาพตัดแนวตั้ง



ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.67 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

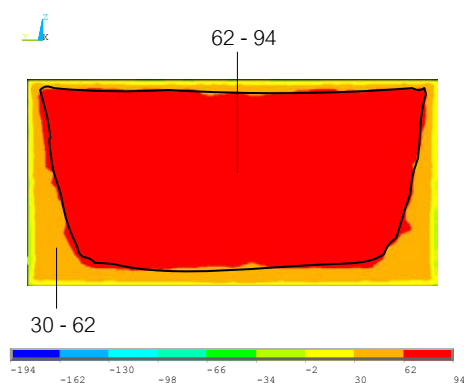


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

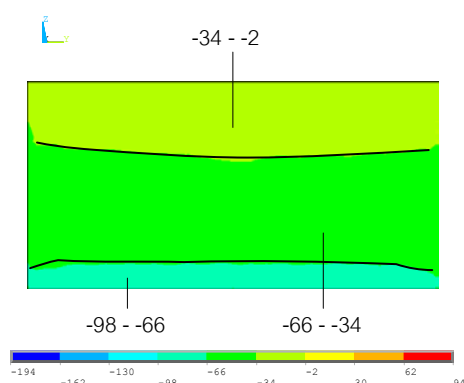


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.68 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

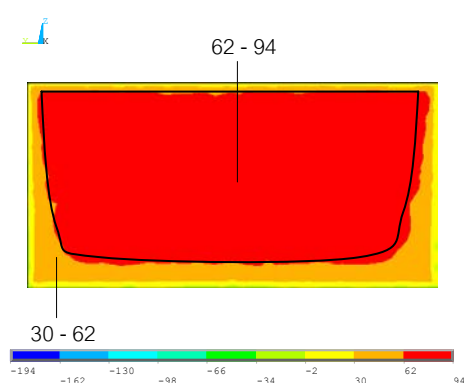


ก. ขอบด้านหน้า

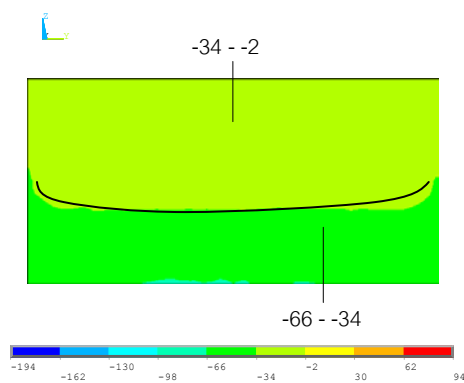


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.69 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

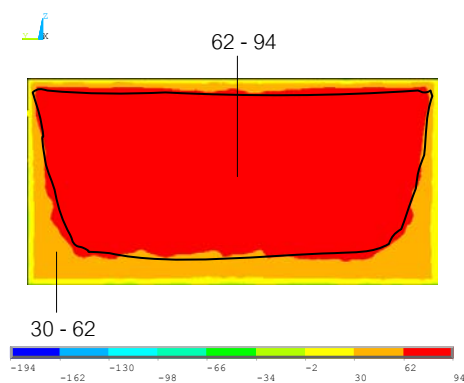


ก. ขอบด้านหน้า

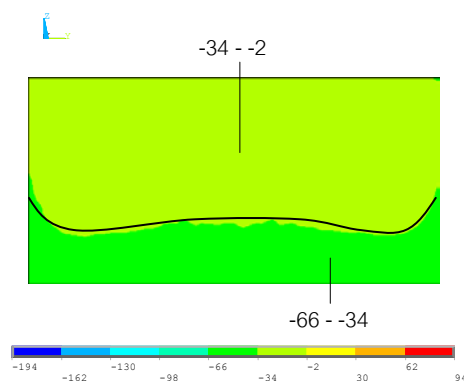


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.70 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

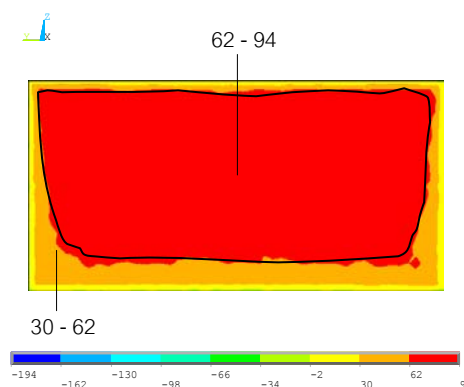


ก. ขอบด้านหน้า

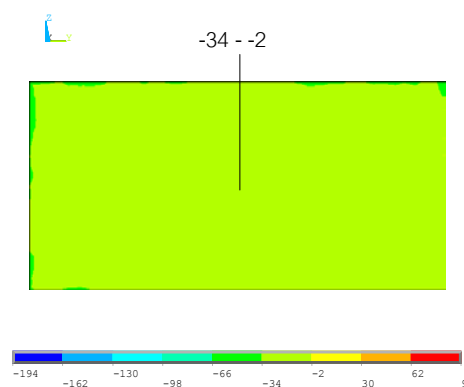


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.71 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

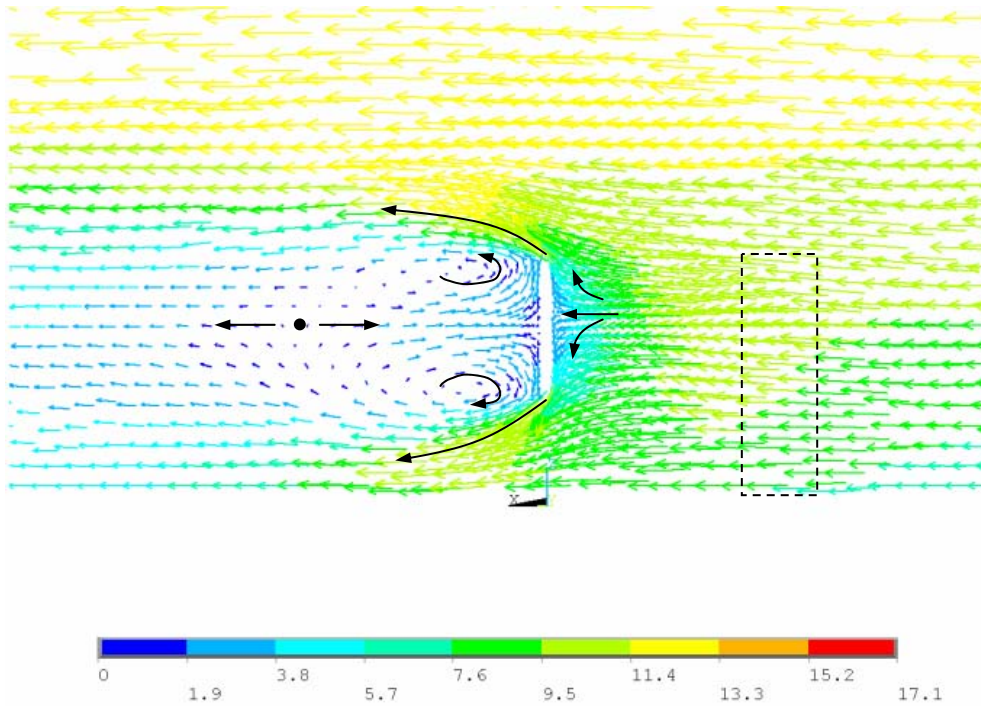


ก. ขอบด้านหน้า

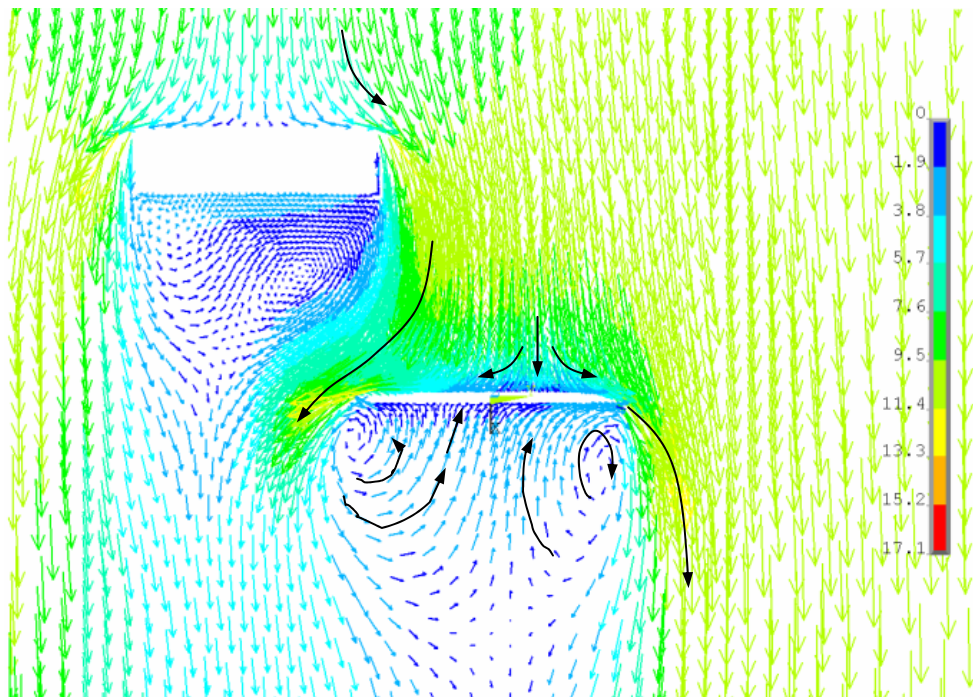


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.72 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

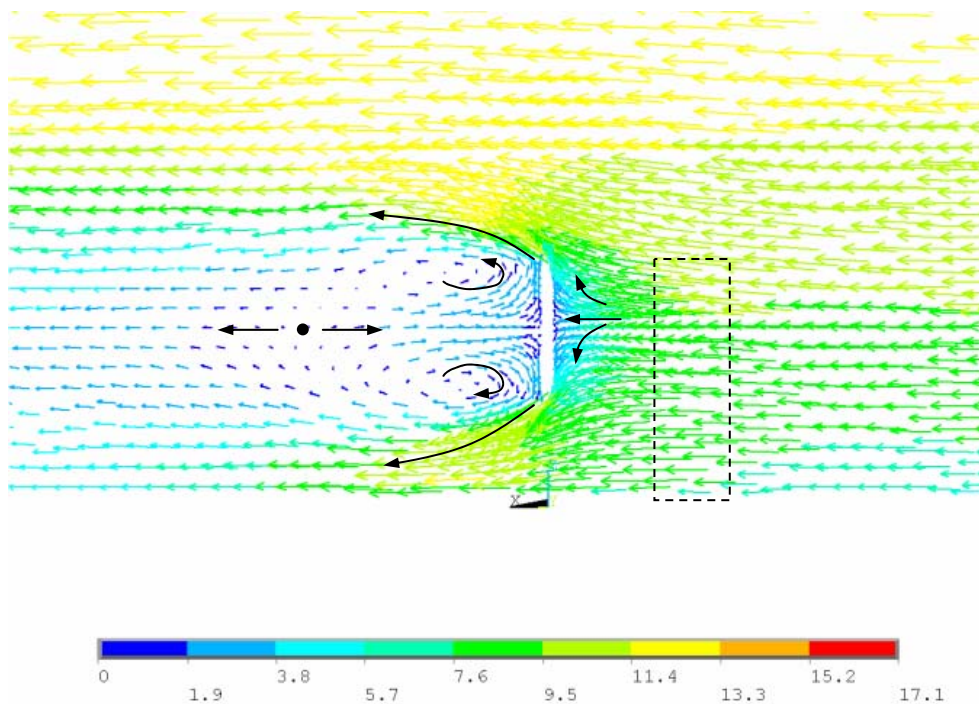


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

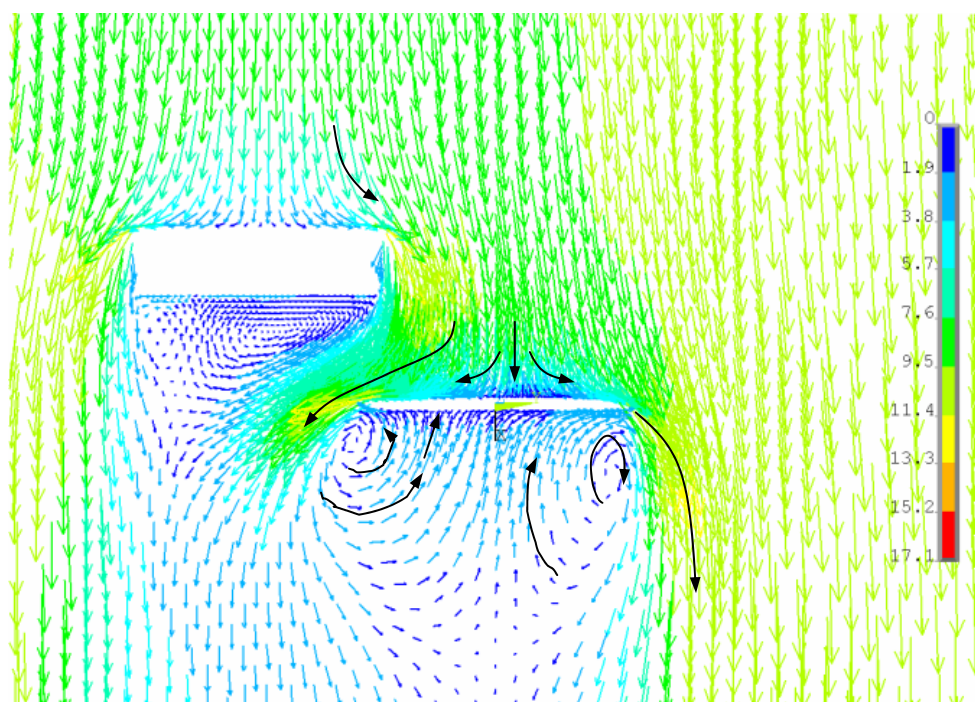


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.73 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

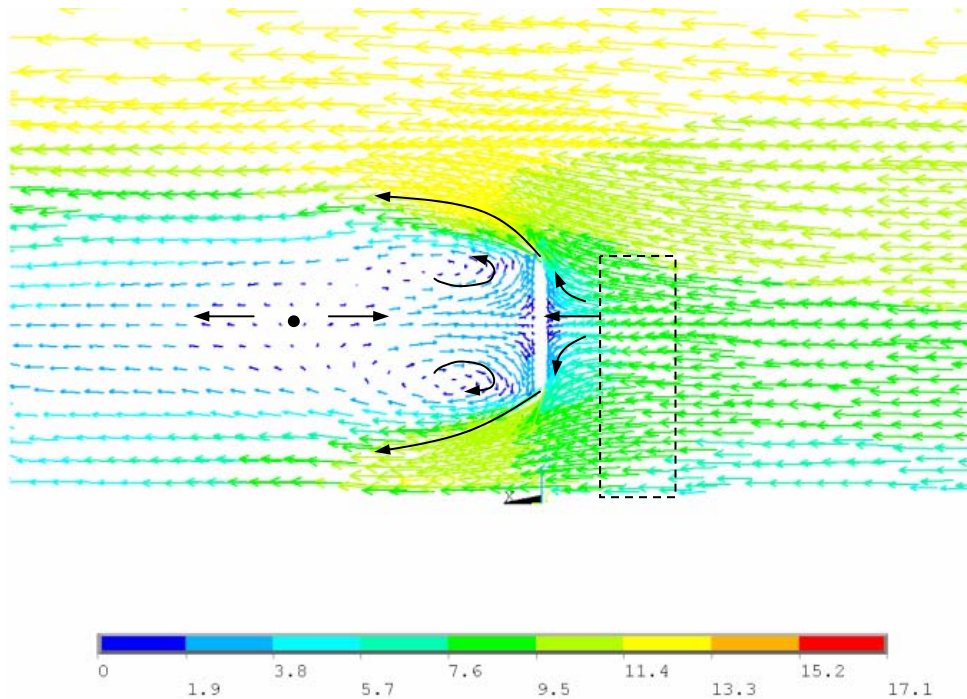


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

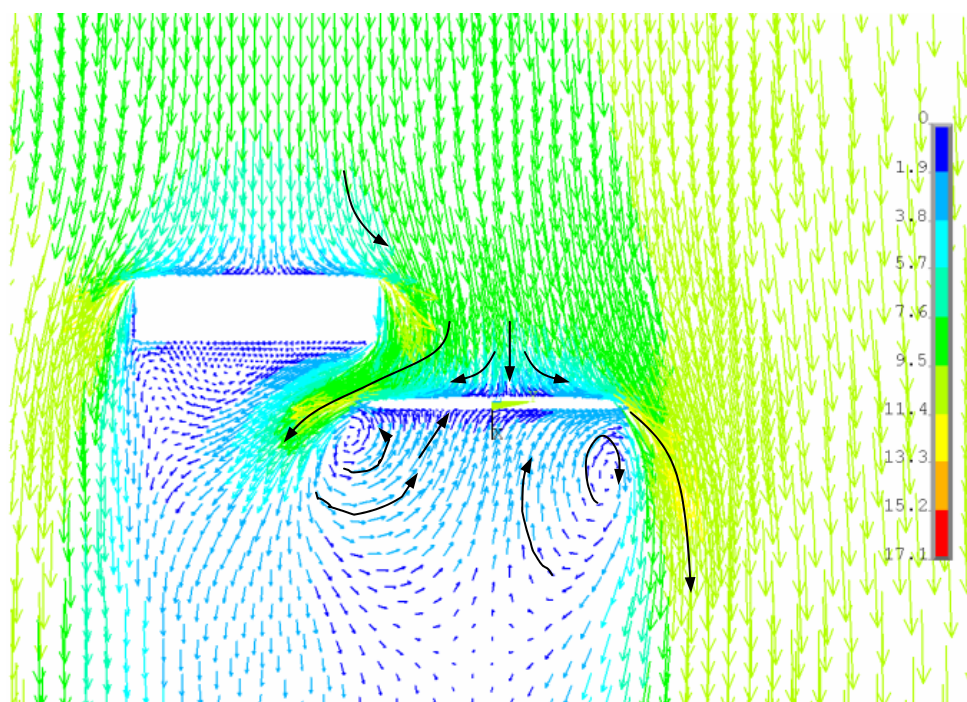


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.74 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

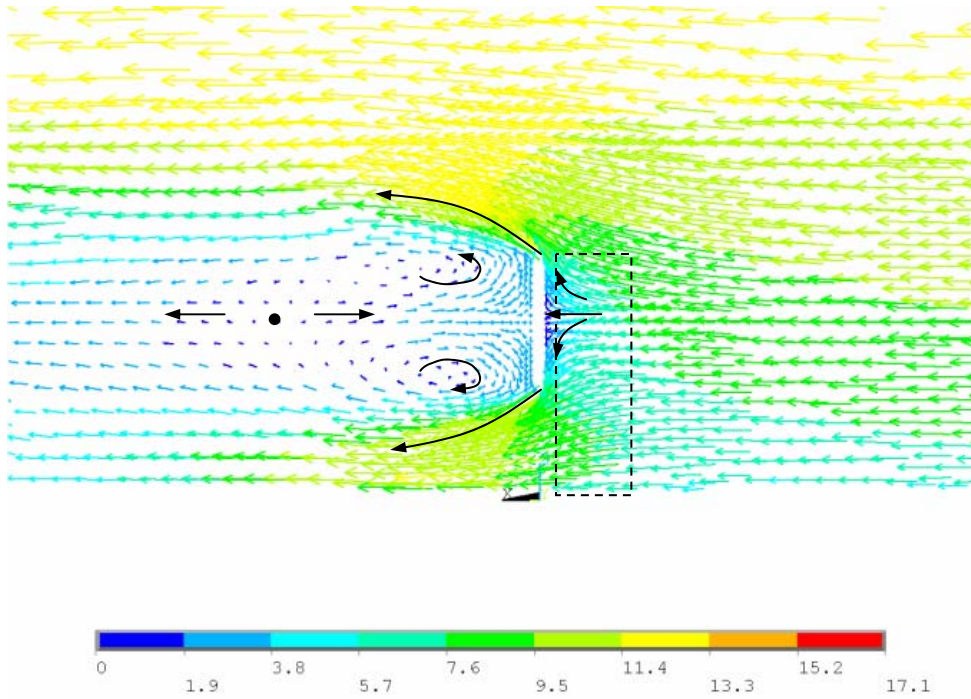


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

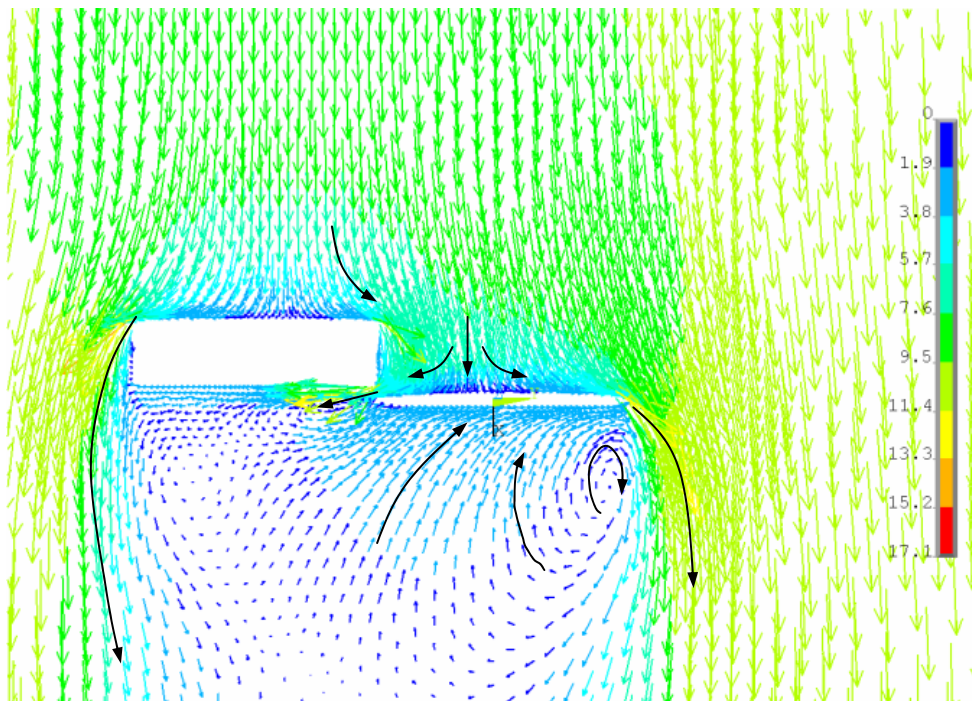


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.75 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

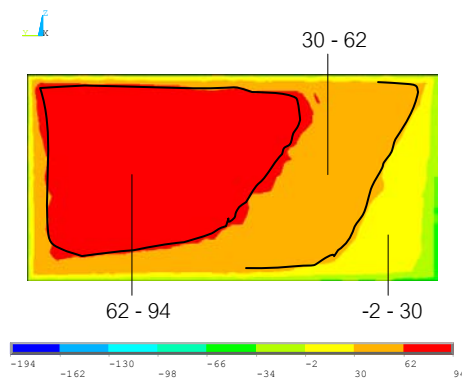


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

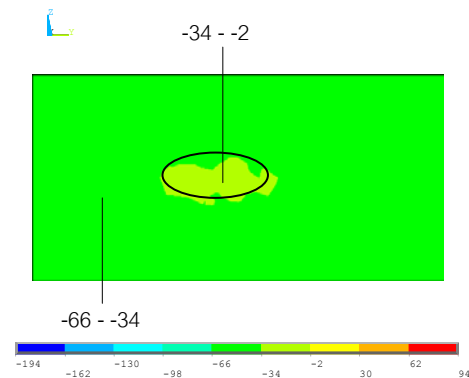


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.76 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

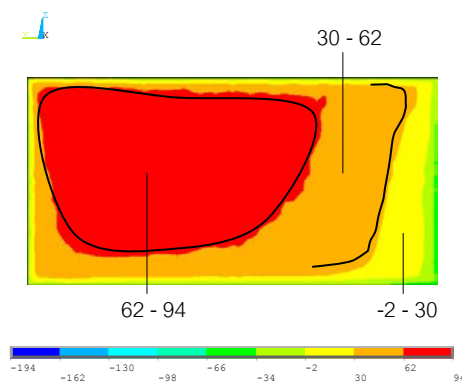


ก. ขอบด้านหน้า

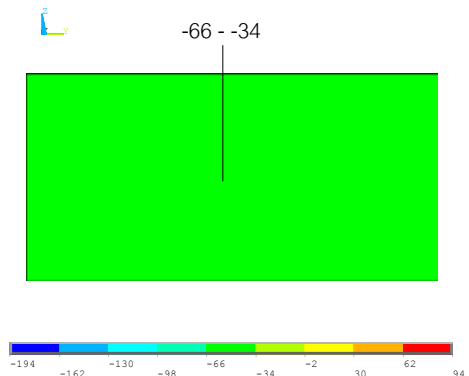


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.77 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

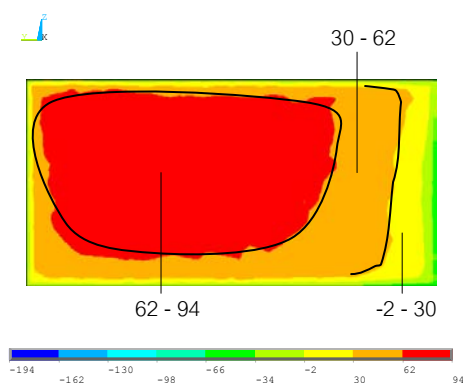


ก. ขอบด้านหน้า

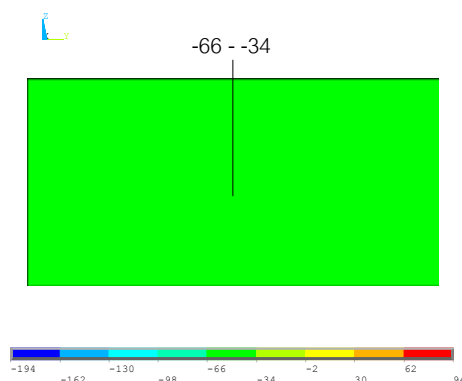


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.78 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

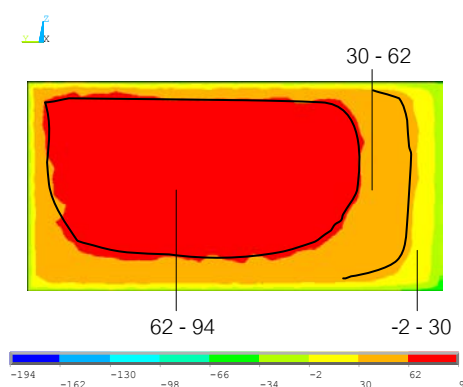


ก. ขอบด้านหน้า

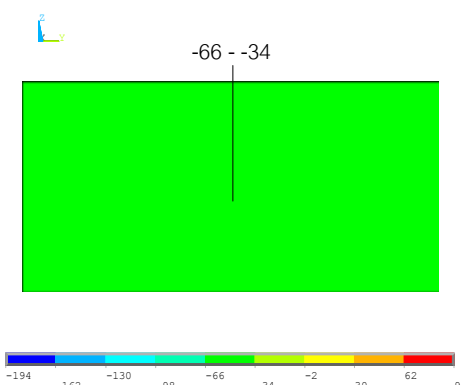


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.79 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

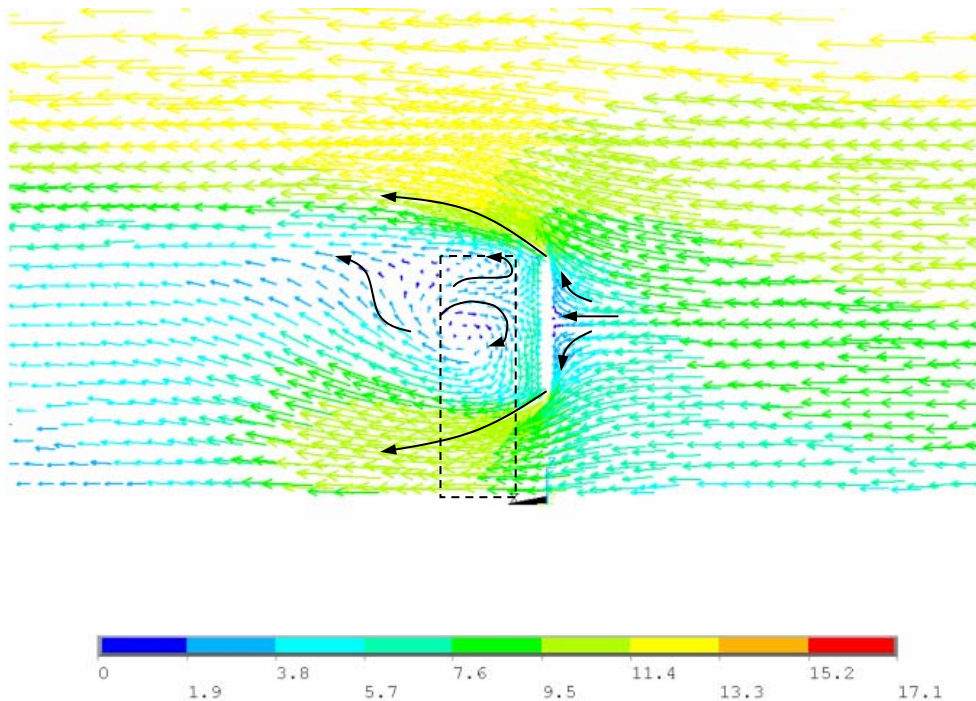


ก. ขอบด้านหน้า

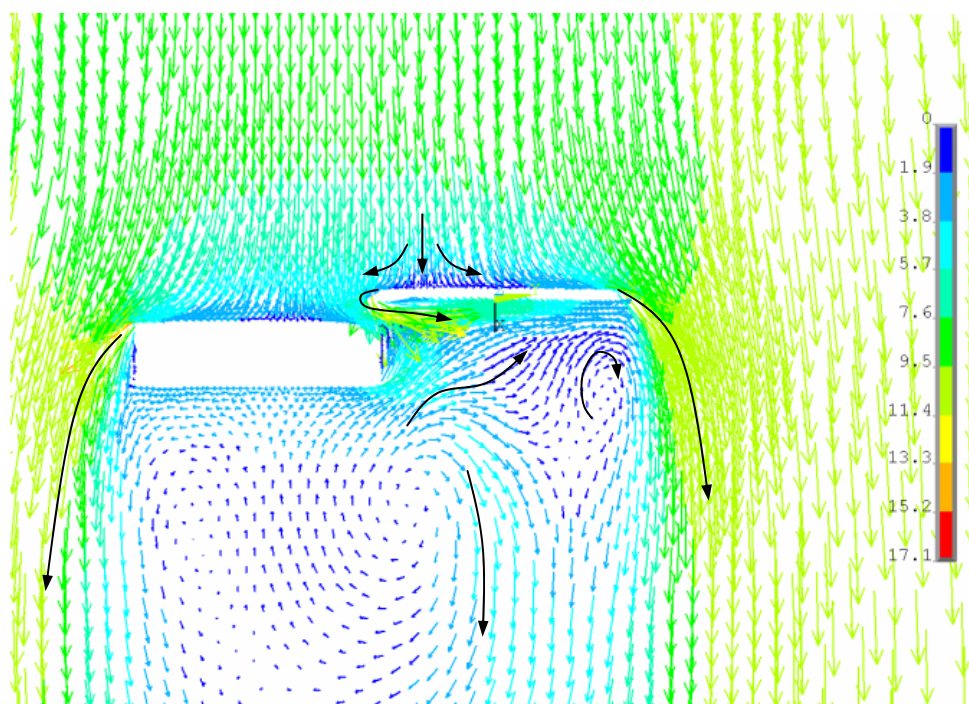


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.80 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

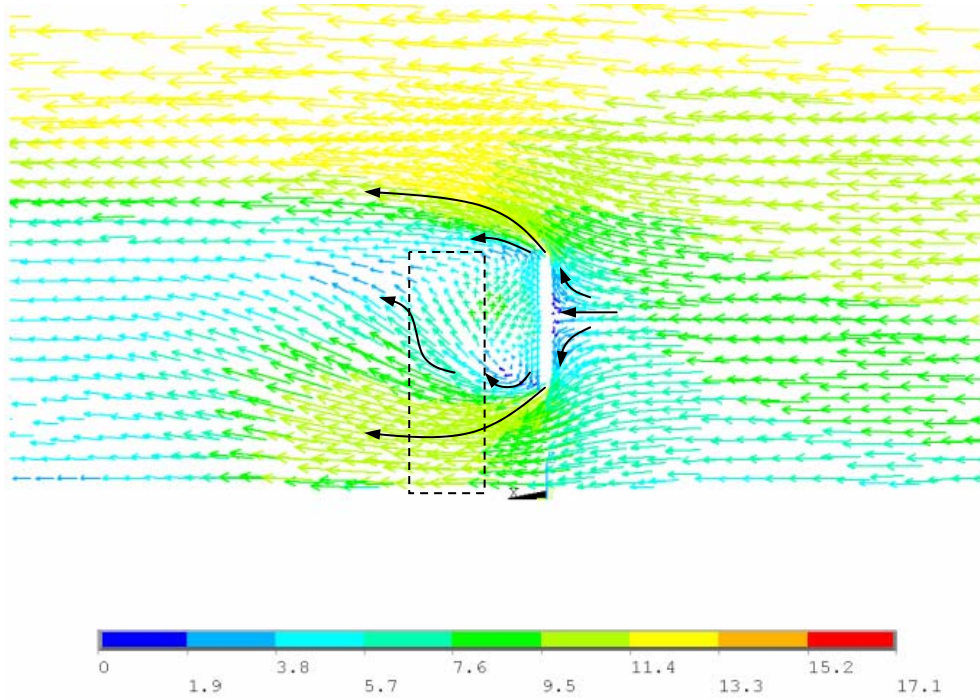


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

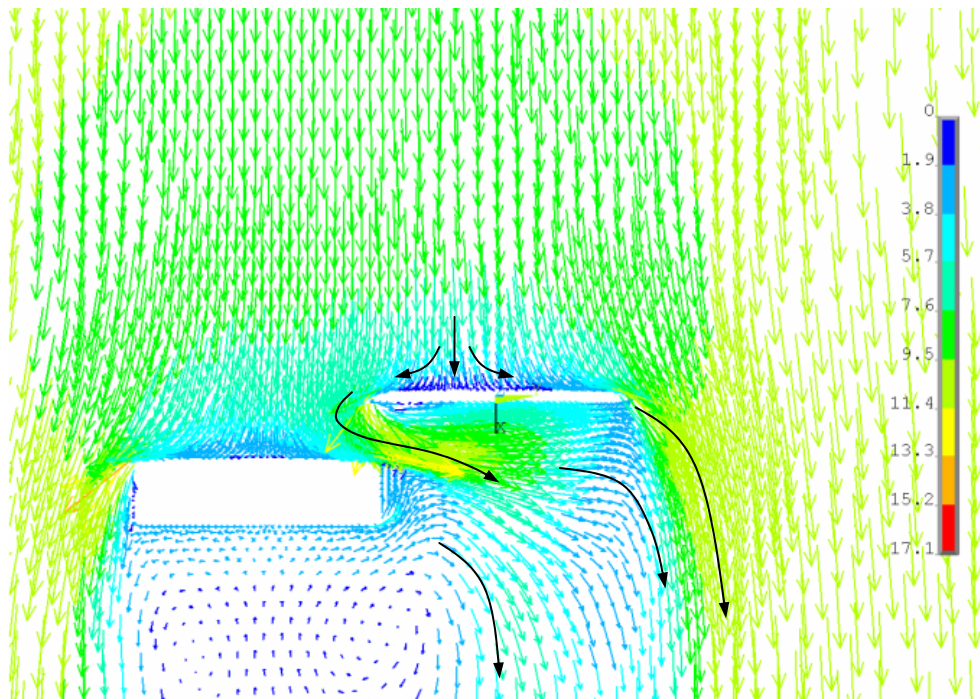


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.81 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

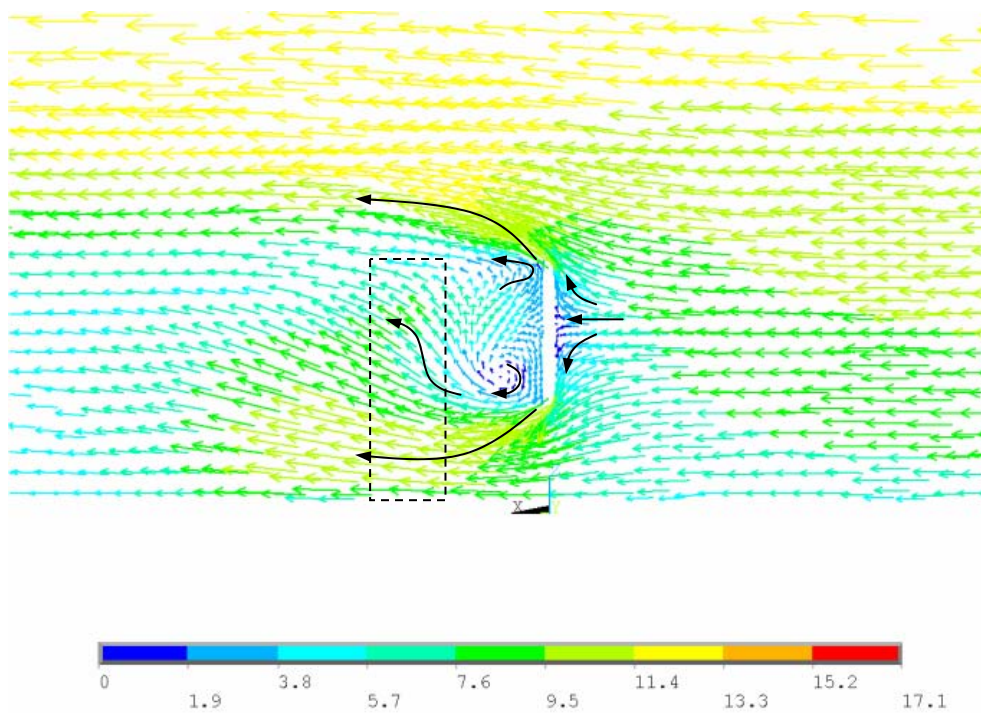


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

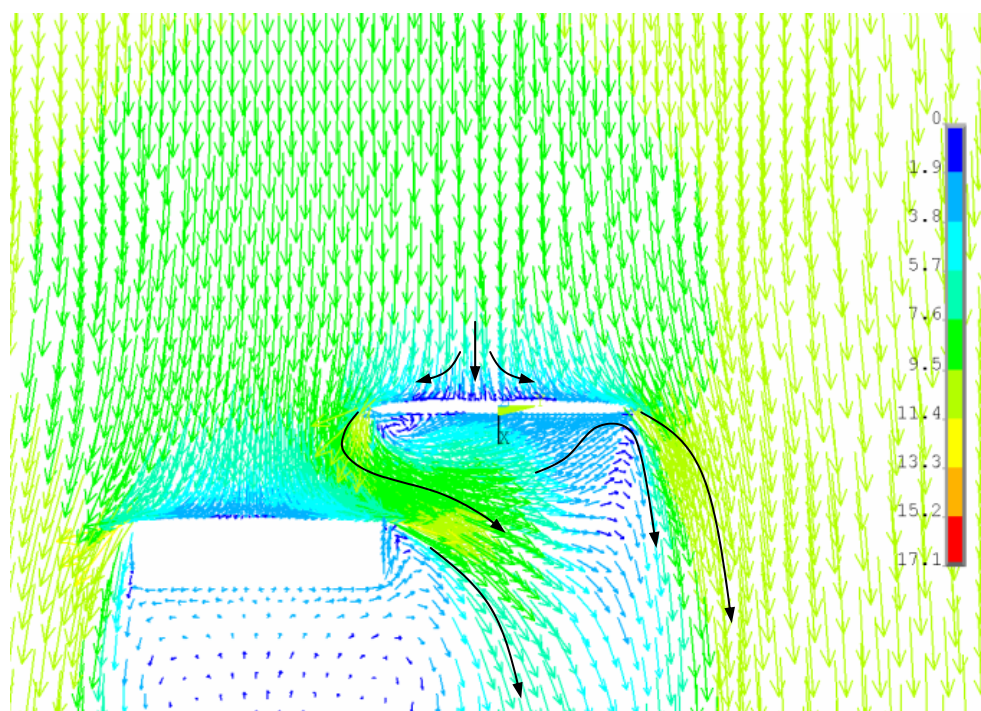


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.82 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

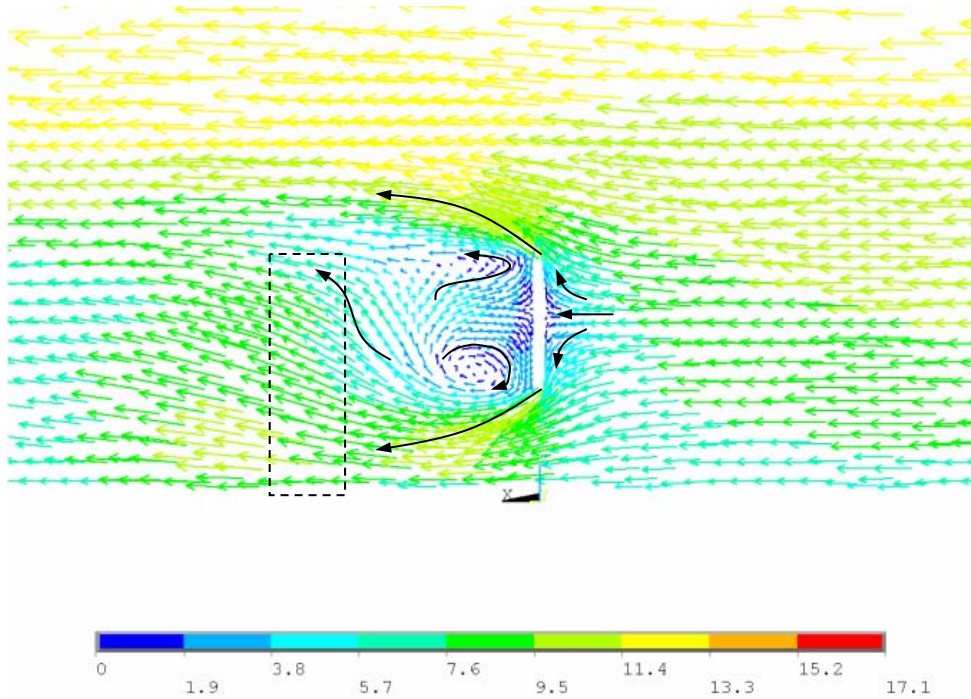


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

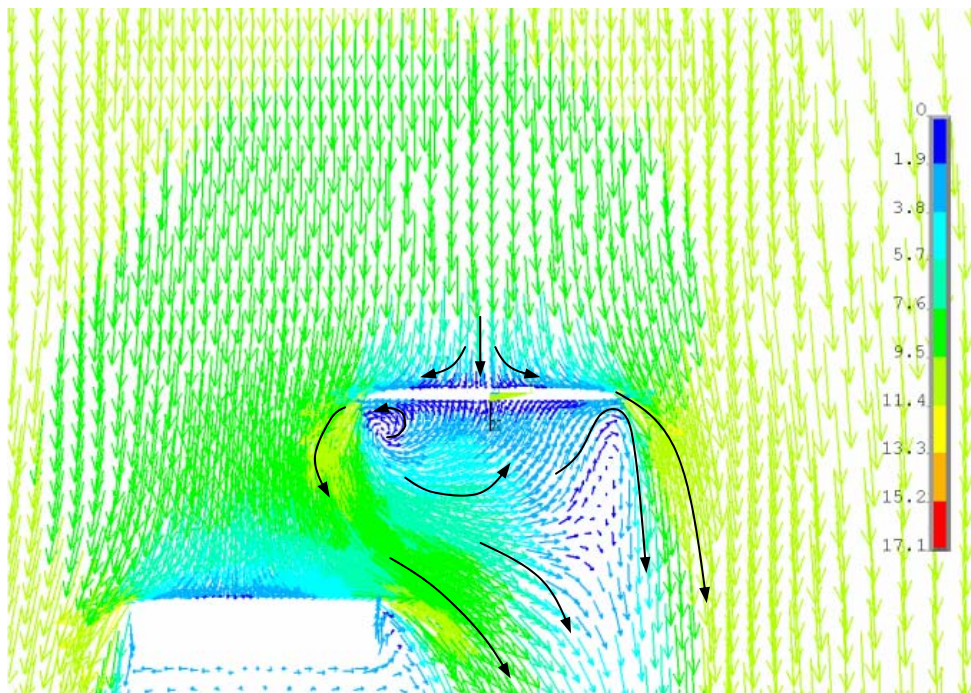


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.83 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

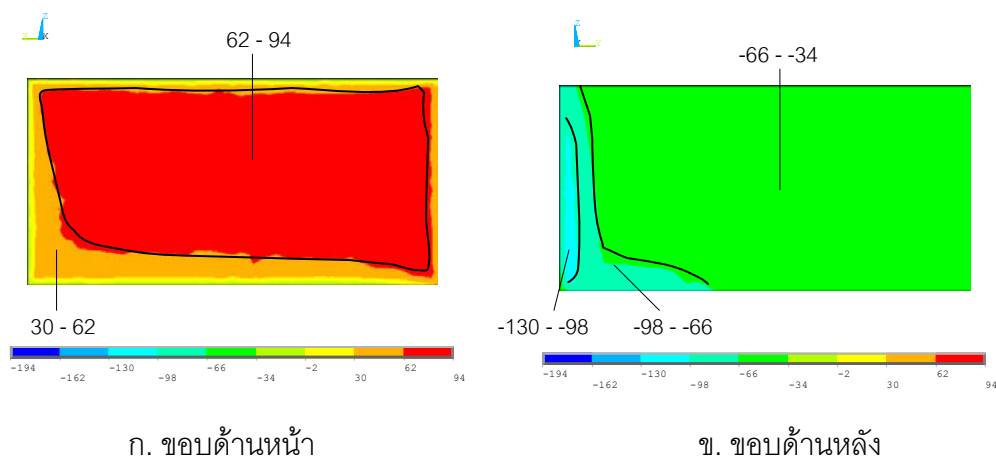


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

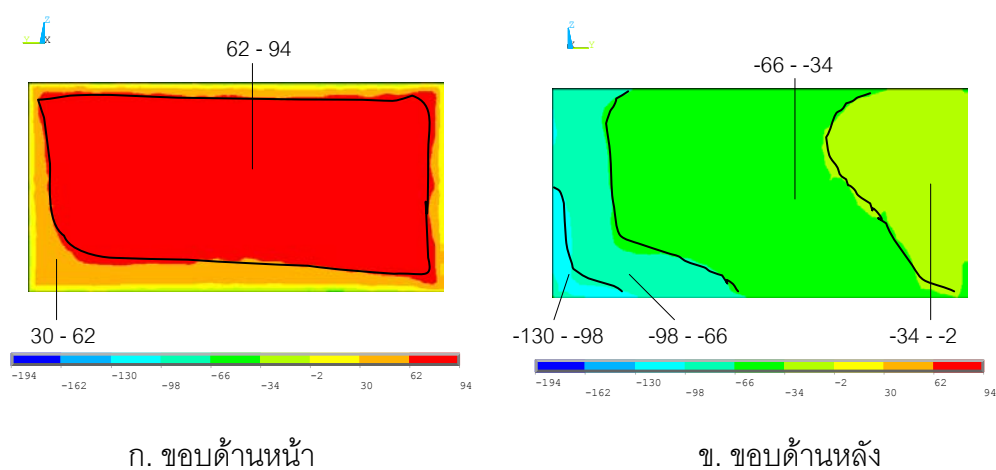


ข. ภาพตัดแนวราบ

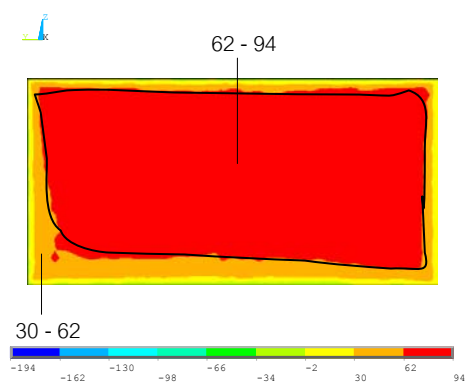
ภาพที่ 7.84 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)



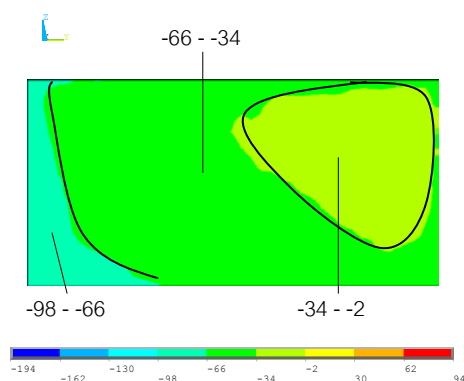
ภาพที่ 7.85 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 7.86 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

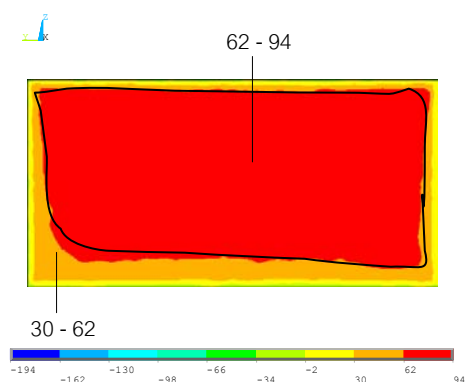


ก. ขอบด้านหน้า

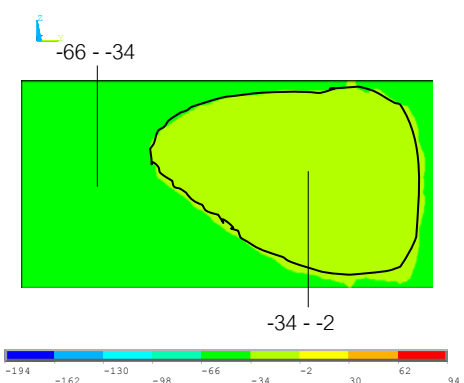


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.87 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



ก. ขอบด้านหน้า



ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.88 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.0h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

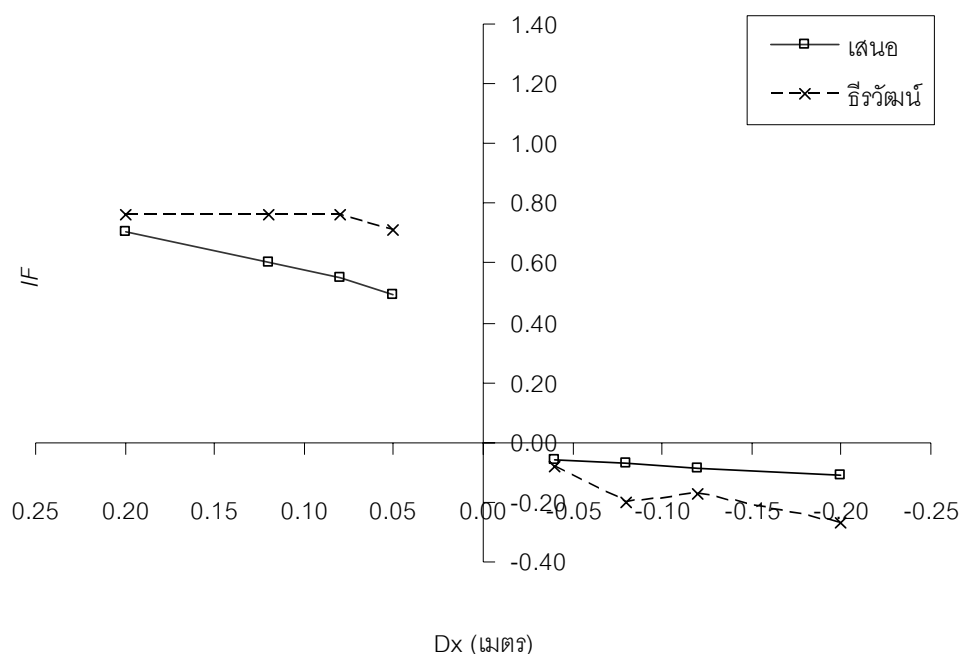
7.5.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$

ผลการวิเคราะห์ค่า Interference Factor (IF) ของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ แสดงได้ดังตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9 ค่า IF ที่ระยะ Dx (เมตร) และ Dy (เมตร) กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$

Dy (เมตร)	อาคารข้างเคียงอยู่ด้านหลัง				อาคารข้างเคียงอยู่ด้านหน้า			
	Dx (เมตร)							
	0.20	0.12	0.08	0.05	-0.04	-0.08	-0.12	-0.20
0	0.70	0.61	0.55	0.49	-0.06	-0.07	-0.08	-0.11
	(0.76)	(0.76)	(0.76)	(0.71)	(-0.08)	(-0.20)	(-0.17)	(-0.27)
-0.2	0.96	1.06	1.12	1.09	0.94	0.94	0.89	0.79
	(1.12)	(1.25)	(1.30)	(1.26)	(0.89)	(0.81)	(0.73)	(0.73)

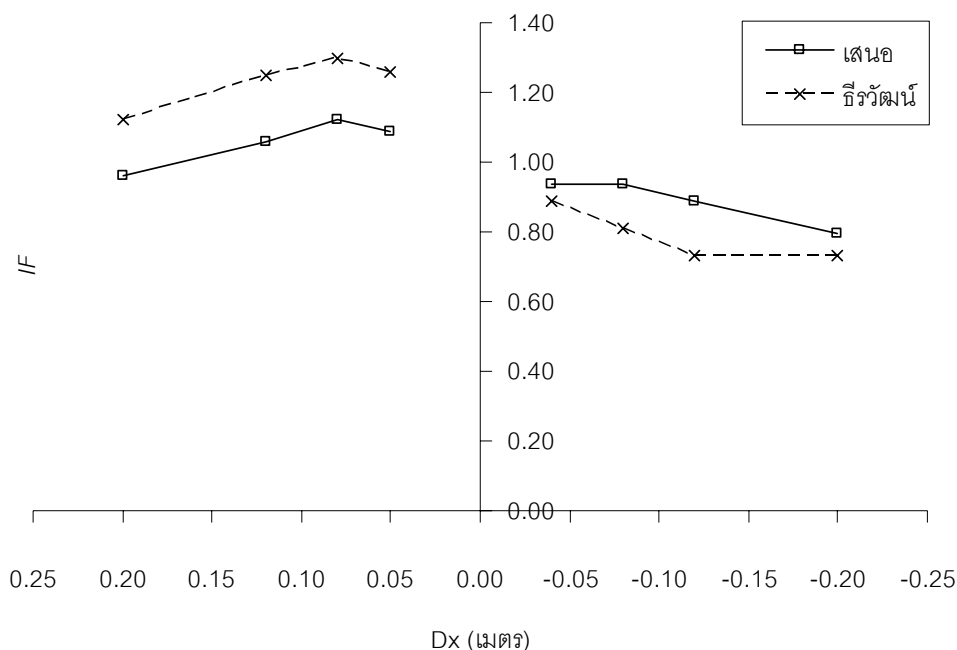
หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บได้จากการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)



ภาพที่ 7.89 ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ
สำหรับ $Dy = 0$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) ตามภาพที่ 7.89 ได้ผลดังนี้

1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนติดลบ และมีแนวโน้มการติดลบมากขึ้นเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง -0.06 ถึง -0.11 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนติดลบ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง -0.08 ถึง -0.27 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF ติดลบน้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)
2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 30 - 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการลดลงแบบเชิงเส้นและตำแหน่งอาคารข้างเคียงที่ไกลออกไปปริมาณการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x จะน้อยลง โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.5 - 0.7 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.71 - 0.76 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF น้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)

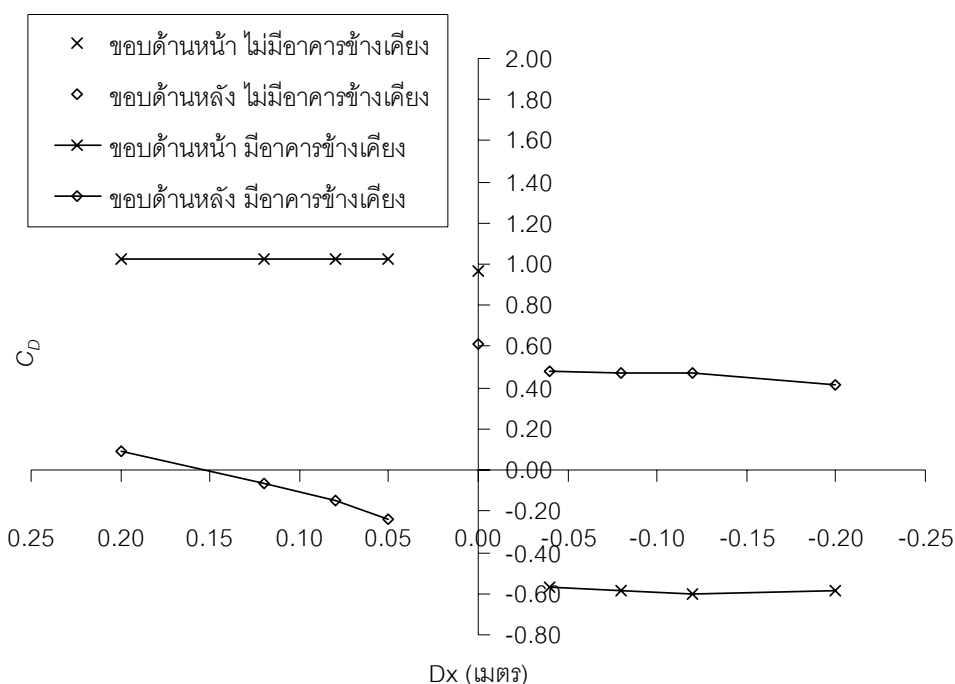


ภาพที่ 7.90 ความสัมพันธ์ของ IF กับ Dx (เมตร) ที่ตำแหน่งต่างๆ
สำหรับ $Dy = -0.20$ เมตร กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร) ตามภาพที่ 7.90 ได้ผลดังนี้

1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มการลดลงเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.8 - 0.94 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.9 - 0.73 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF มากกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสกุล, 2548) เล็กน้อย
2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.96 - 1.12 ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสกุล, 2548) ให้ค่าสัมประสิทธิ์

แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 1.12 – 1.30 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF น้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)



ภาพที่ 7.91 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีที่ไม่และมีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ กับ D_x (เมตร)

สำหรับ $D_y = 0$ เมตร

ข้อสังเกตที่น่าสนใจจากภาพที่ 7.91 กรณีที่อาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ อยู่ตำแหน่ง D_y เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) และพิจารณาตำแหน่งของอาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าการที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนติดลบนั้นเป็นผลมาจากแรงที่กระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงอย่างมากจนมีค่าติดลบ เป็นแรงดูดแบบกลับทิศไปทางด้านต้นลม ในขณะที่แรงดูดที่กระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงเล็กน้อย ส่งผลให้แรงสุทธิกระทำต่อโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าติดลบ การที่แรงกระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าติดลบนั้นเพราะว่า

ลมหมุนบริเวณด้านหลังอาคารข้างเคียงพยายามดูดขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศแกน x (พยายามดูดป้ายคว่ำไปด้านหน้า)

ในขณะที่พิจารณาตำแหน่งของอาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าการที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงประมาณ 30 - 50 เปอร์เซ็นต์นั้นเป็นผลมาจากแรงกระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าลดลงอย่างมากจนบางตำแหน่งมีค่าติดลบ เปลี่ยนจากแรงดูดเป็นแรงดันกลับทิศไปทางด้านต้นลม ในขณะที่แรงกระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่งผลให้แรงสุทธิกระทำต่อโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าลดลง การที่แรงกระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าลดลงนั้นเนื่องจากลมเมื่อพัดผ่านโครงสร้างป้ายโฆษณาแล้วกระทบกับอาคารทำให้กระแสลมบางส่วนได้ย้อนกลับมาเป็นแรงดันกระทำกับขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศแกน x (พยายามดันป้ายคว่ำไปด้านหน้า)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ที่แสดงอยู่ในรูปการไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมและเส้นชั้นความดันลมสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา)

1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.92 ถึงภาพที่ 7.95 การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนติดลบนั้น จากภาพ ก จะเห็นได้ว่าการที่โครงสร้างป้ายโฆษณาอยู่ในตำแหน่งลมหมุน (Wake) ด้านหลังอาคารข้างเคียงซึ่งเป็นความเร็วลมต่ำ ทำให้เกิดลมหมุนบางส่วนพยายามพุ่งขึ้นไปด้านบนออกจากช่องว่างระหว่างโครงสร้างป้ายโฆษณากับอาคารข้างเคียงเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณา ในขณะที่อาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไปลมหมุนบริเวณด้านหน้าและด้านหลังโครงสร้างป้ายมีทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้หากพิจารณาภาพ ข จะเห็นได้ว่าบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีลมหมุนจำนวนสองวง พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ประกอบส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.96 ถึงภาพที่ 7.99 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูด (Suction) ในทิศทางกลับทิศไปทางด้านต้นลมโดยพยายามดูดโครงสร้างป้ายโฆษณาคว่าไปทางด้านหน้า ในขณะที่บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีแรงดูดไปทางด้านท้ายลม สังเกตได้ว่าขอบด้านหน้าโครงสร้าง

ป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดกลับทิศมากกว่าขอบด้านหลังอีกทั้งเมื่อไถลออกไปขอบด้านหลังเป็นแรงดูดลดลง ดังนั้นแรงกระทำสุทธิจึงมีค่าติดลบ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาตามภาพที่ 7.91 พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ

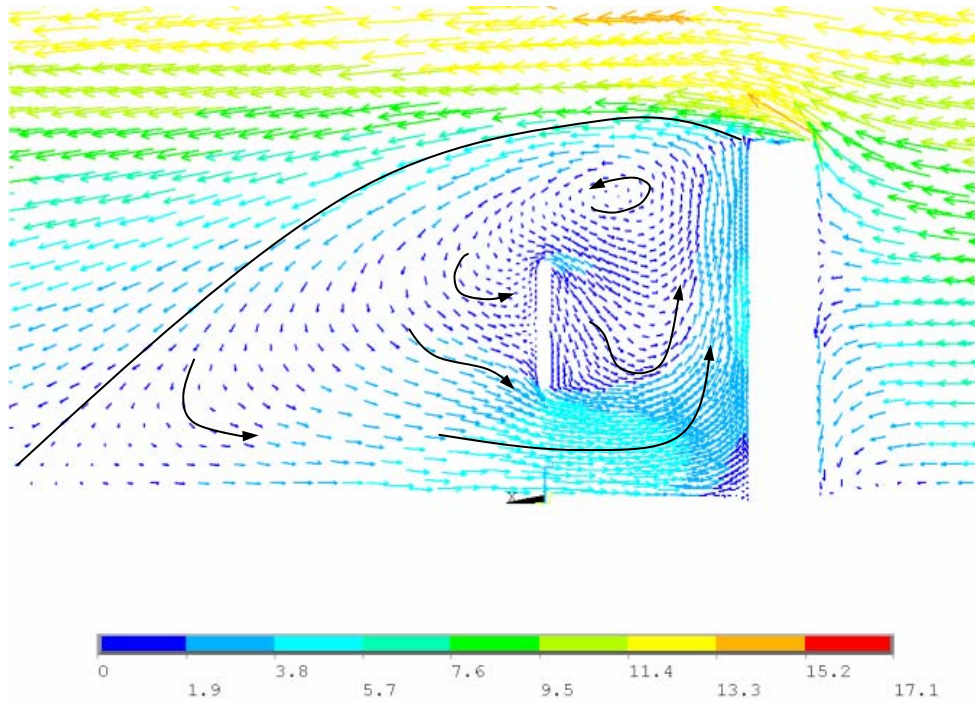
2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.100 ก ถึงภาพที่ 7.103 ก การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 30 - 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x น้อยลงเมื่อตำแหน่งอาคารข้างเคียงที่ไถลออกไป เป็นผลมาจากลมที่ลอดผ่านโครงสร้างป้ายโฆษณาแล้วปะทะกับอาคารข้างเคียงย้อนกลับพุ่งเข้าหาขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาในตำแหน่งที่อาคารข้างเคียงใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณา ในขณะที่อาคารข้างเคียงอยู่ไถลออกไปลมบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นลมหมุนที่มีลักษณะไม่สมบูรณ์ พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ก ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.104 ถึงภาพที่ 7.107 บริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดัน (Pressure) ในทิศทางกลับทิศไปทางด้านต้นลมโดยพยายามผลักโครงสร้างป้ายโฆษณาคว่ำไปทางด้านหน้าในตำแหน่งที่อาคารอยู่ใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณา ในขณะที่อาคารข้างเคียงอยู่ไถลออกไปบริเวณขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ขอบด้านหน้าและขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาตามภาพที่ 7.91 พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ

กรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ อยู่ตำแหน่ง D_y เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเยื้องกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร)

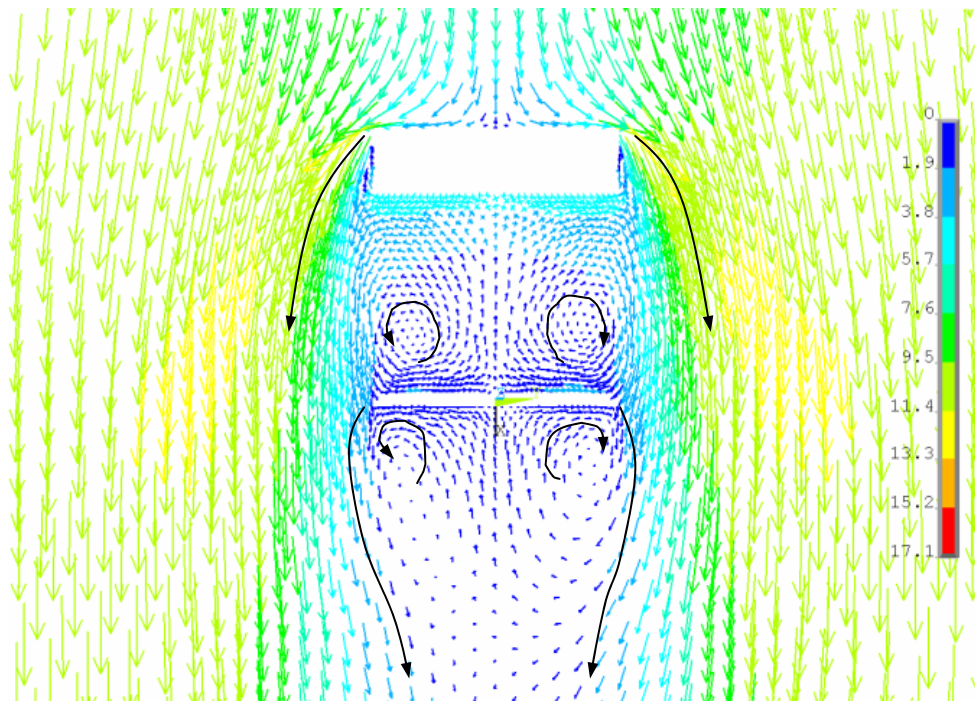
1. เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.108 ข ถึงภาพที่ 7.111 ข การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีแนวโน้มการลดลงเมื่อตำแหน่งอาคารข้างเคียงอยู่ไถลออกไป นั้นเป็นผลมาจากการที่ความเร็วลมลดลงบริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเนื่องจากการขวางลมของอาคารข้างเคียงทำให้เกิดพฤติกรรมการแยกตัว (Separation) ของลมที่ขอบข้างโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงมีความเร็วลดลง การที่ค่า

สัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงโดยมีแนวโน้มการลดลงเมื่อตำแหน่งอาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไปเนื่องจากการที่อาคารข้างเคียงอยู่ใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณาจะมีผลจากพฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณด้านหน้าอาคารกระทบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาในขณะที่ผลกระทบดังกล่าวจะไม่มีผลมากนักเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ข ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.112 ถึงภาพที่ 7.115 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงเป็นแรงดันลดลงและลดลงเรื่อยๆ เมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ

2. เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 7.116 ข ถึงภาพที่ 7.119 ข การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งอาคารอยู่ใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณา นั้นเป็นผลมาจากการที่ตำแหน่งอาคารข้างเคียงใกล้กับโครงสร้างป้ายโฆษณาทำให้พฤติกรรมการแยกตัวของลมบริเวณขอบข้างโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงมีความเร็วมากขึ้นโดยพยายามผ่านช่องว่างระหว่างโครงสร้างป้ายโฆษณากับอาคารข้างเคียง ในขณะที่อาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไปบริเวณด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีลักษณะลมหมุนที่ไม่สมบูรณ์จากเดิมที่มีสองวงสมบูรณ์ พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.17 ข ประกอบ ส่งผลให้เส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 7.120 ถึงภาพที่ 7.123 บริเวณขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาทางฝั่งอาคารข้างเคียงเป็นแรงดันเพิ่มขึ้น ส่วนขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดลดลงเมื่ออาคารข้างเคียงอยู่ไกลออกไป พิจารณาเส้นชั้นความดันลมกรณีไม่มีอาคารข้างเคียงตามภาพที่ 7.18 ประกอบ

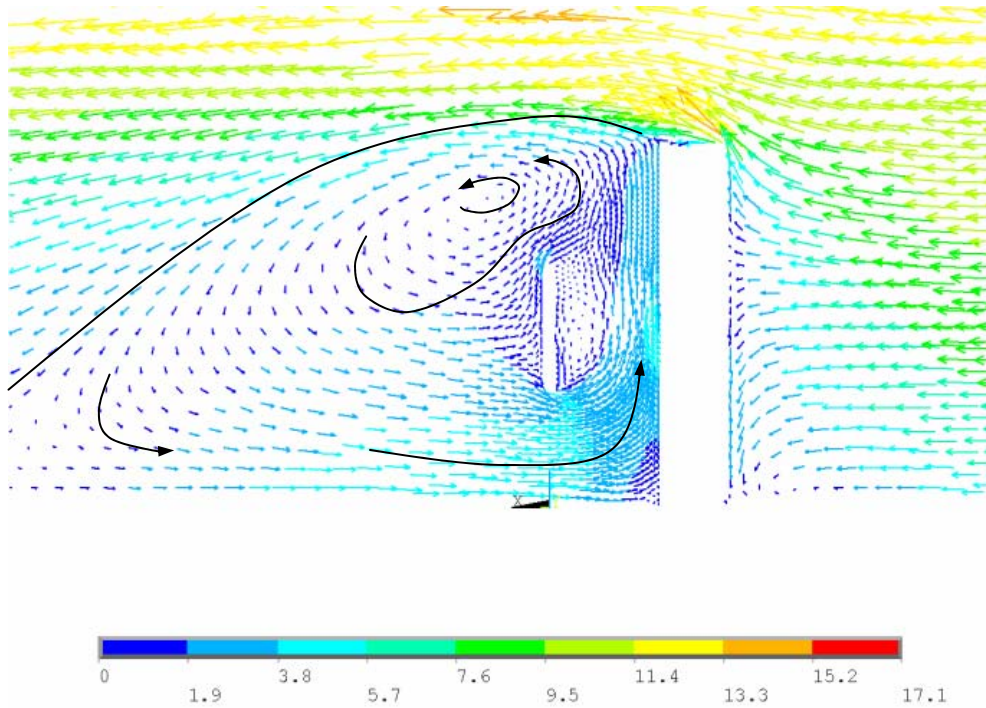


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

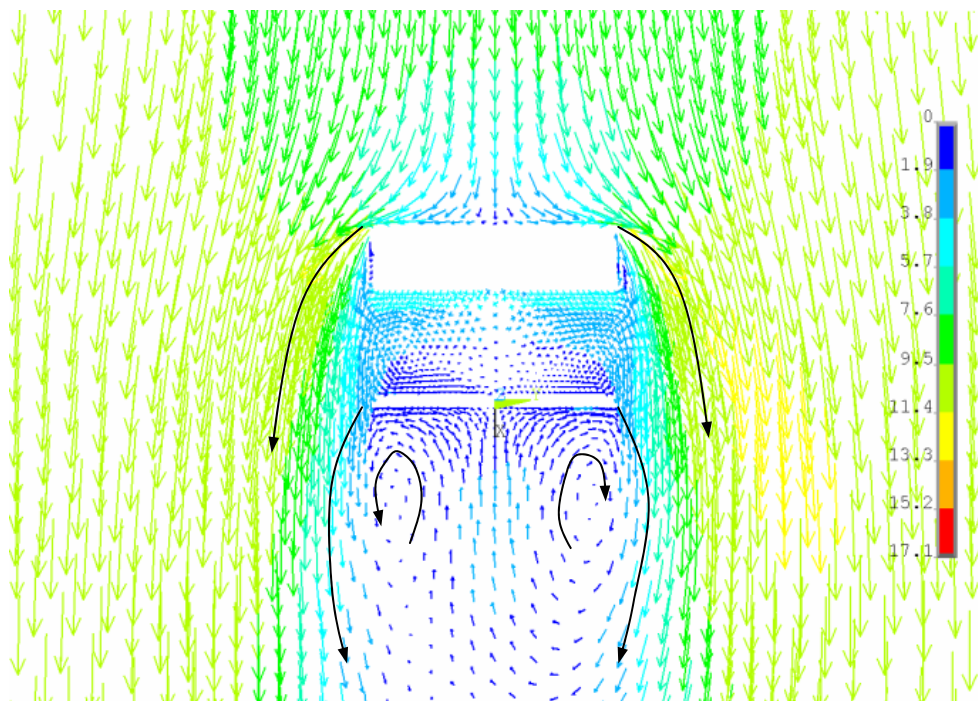


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.92 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

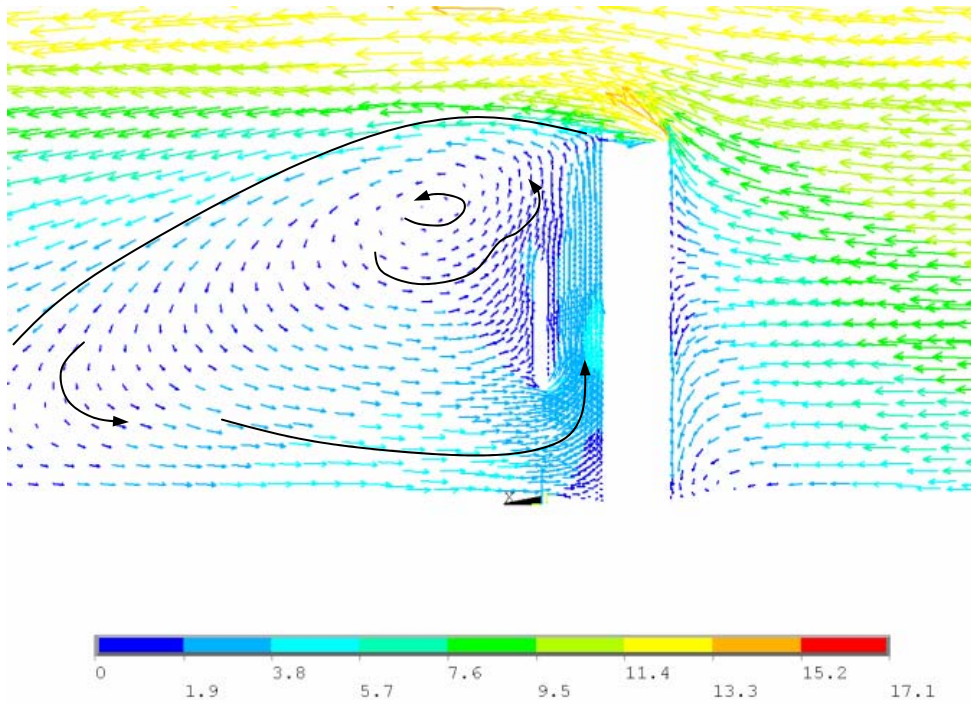


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

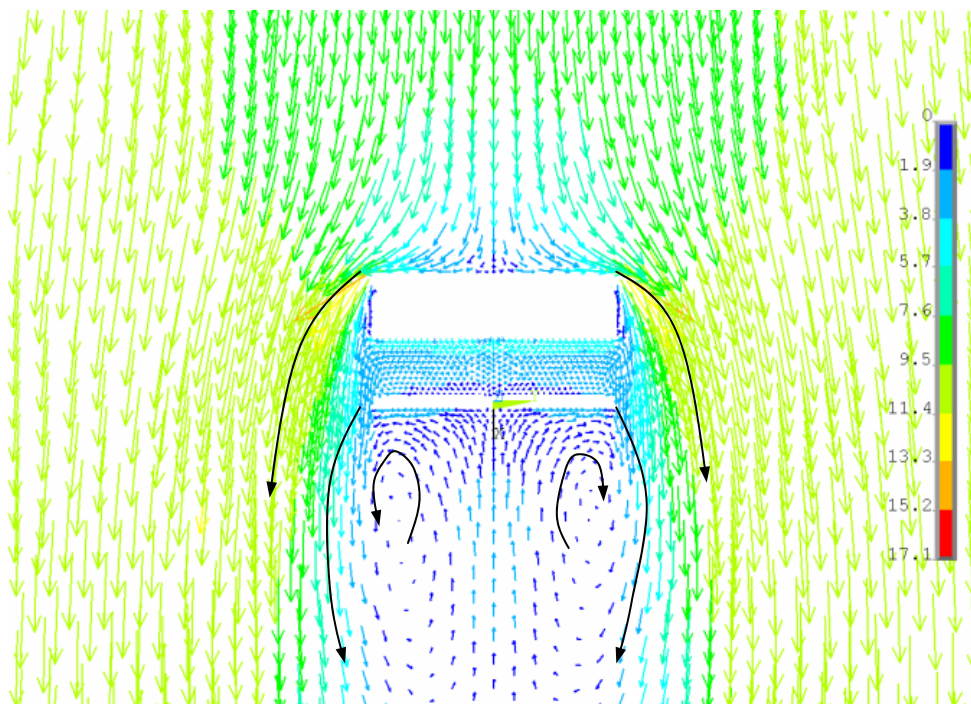


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.93 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

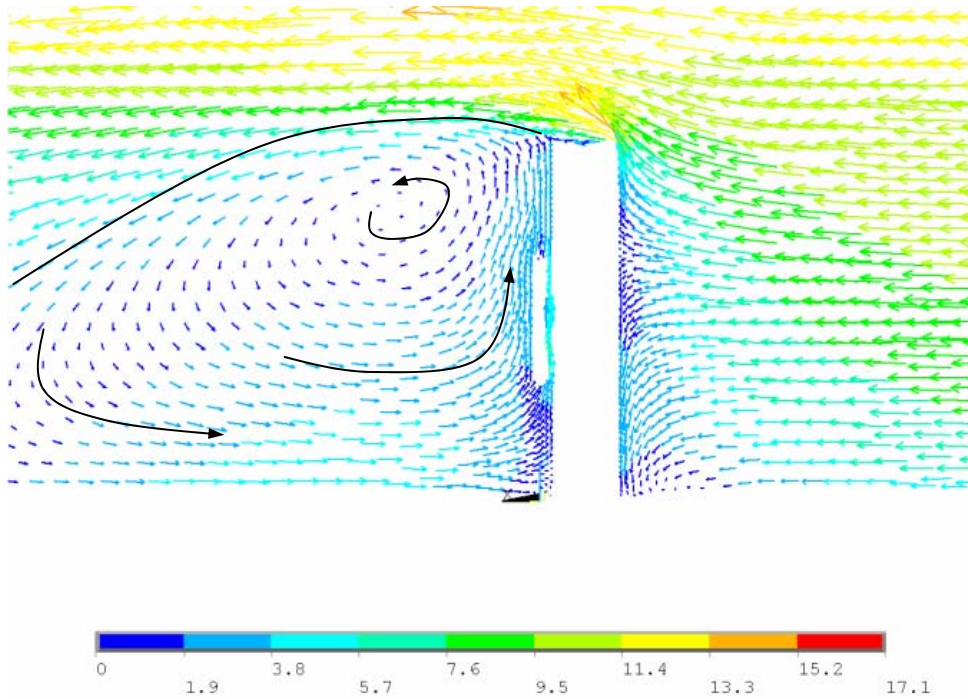


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

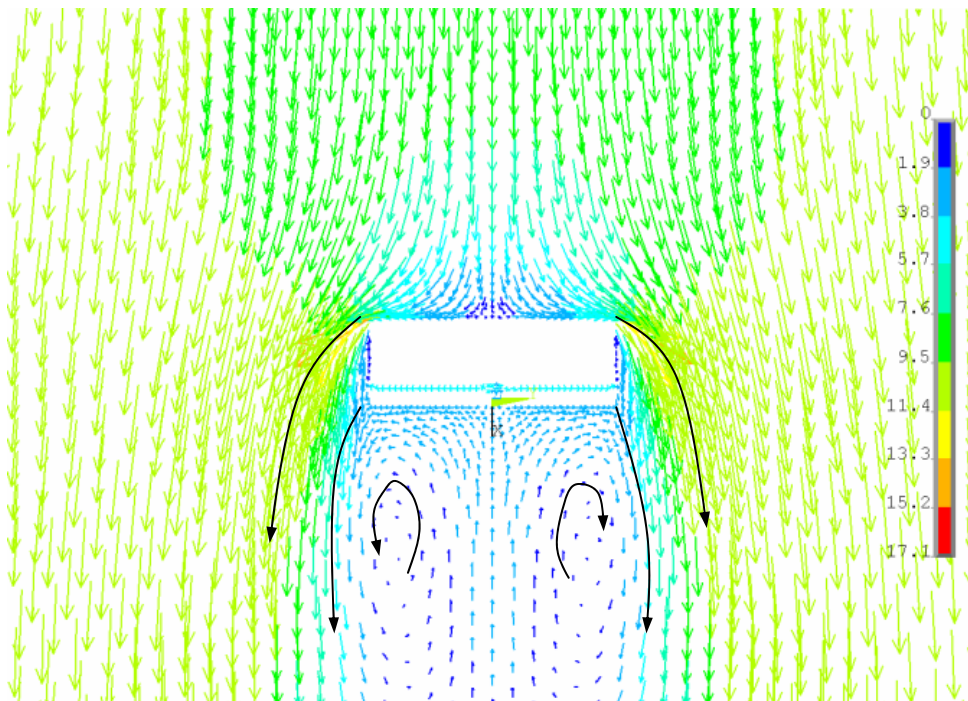


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.94 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

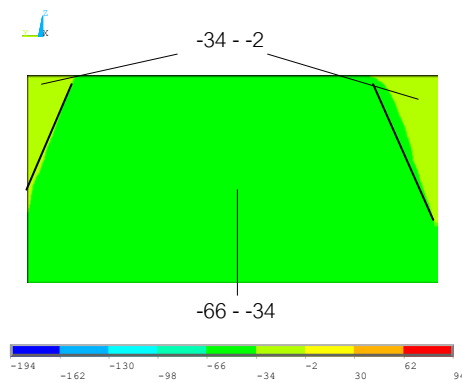


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

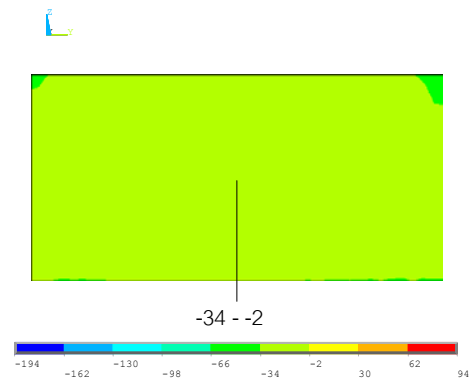


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.95 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

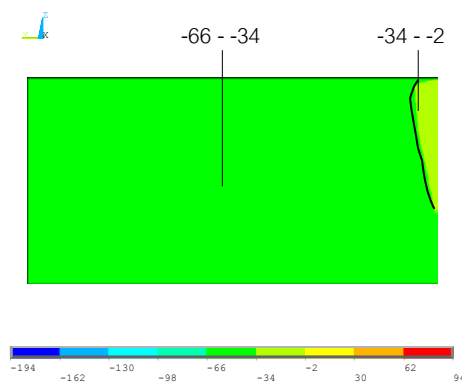


ก. ขอบด้านหน้า

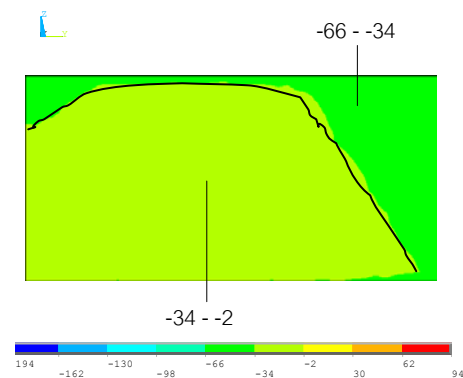


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.96 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

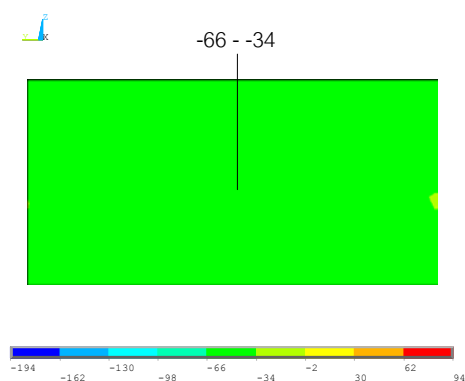


ก. ขอบด้านหน้า

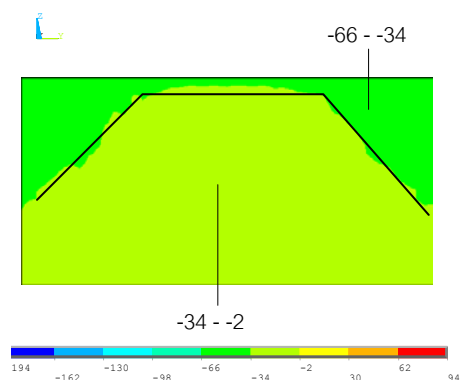


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.97 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

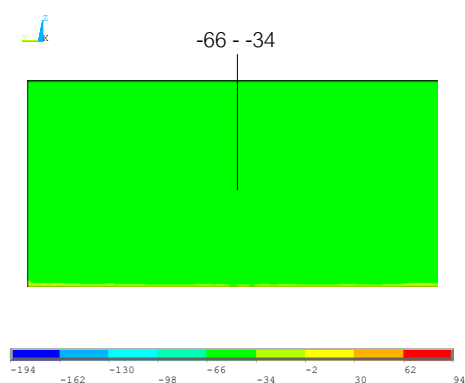


ก. ขอบด้านหน้า

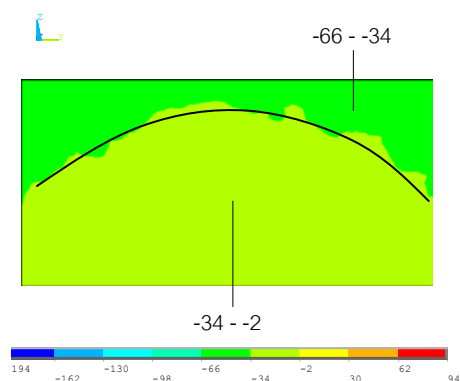


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.98 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

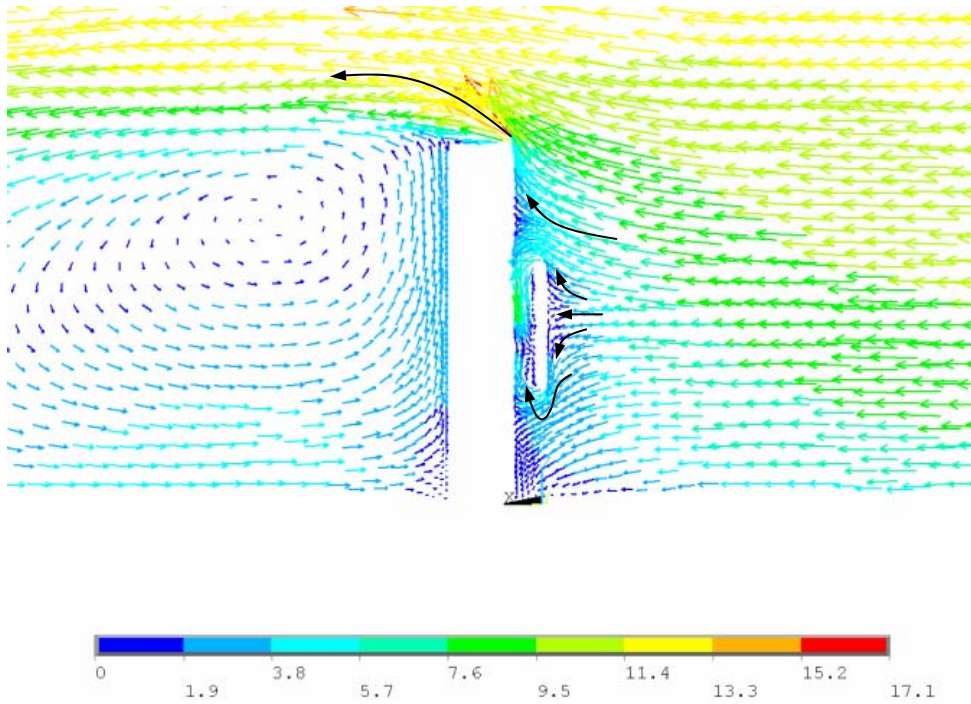


ก. ขอบด้านหน้า

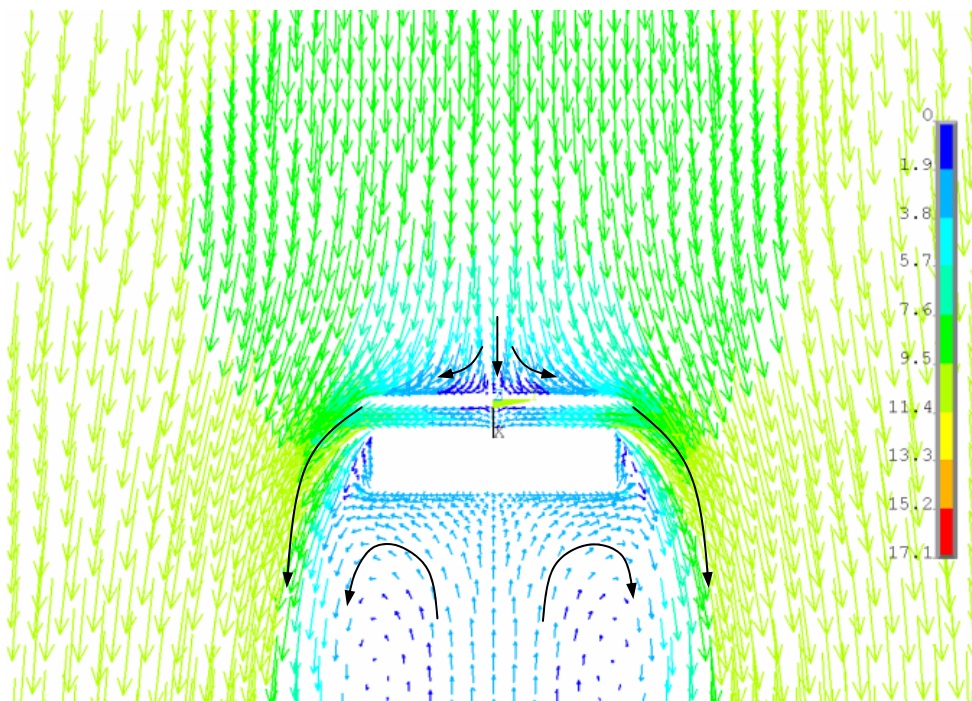


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.99 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

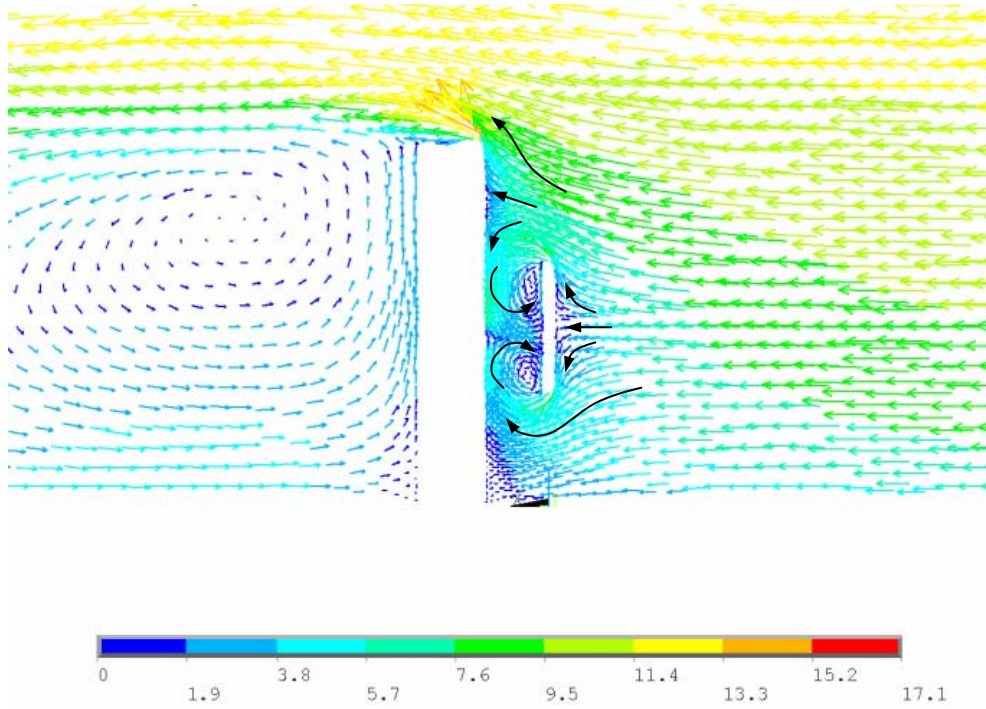


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

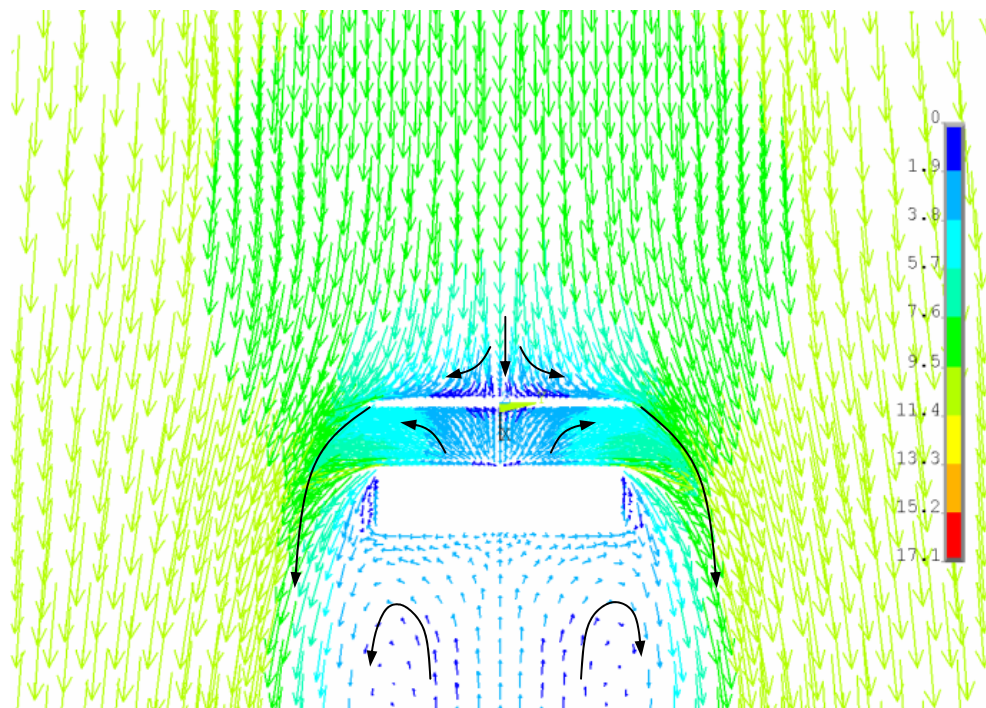


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.100 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

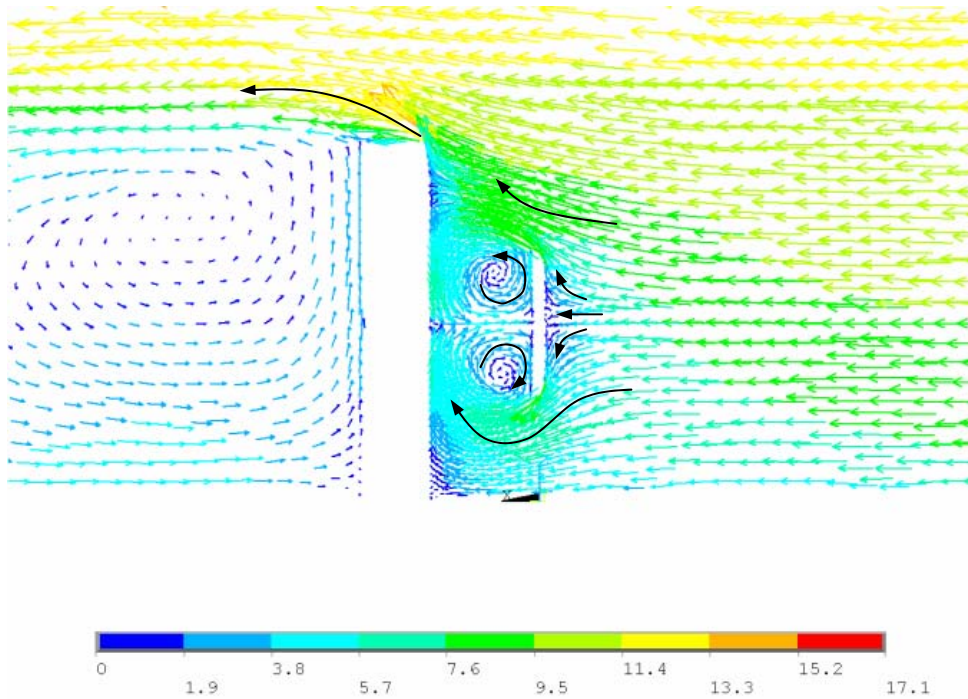


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

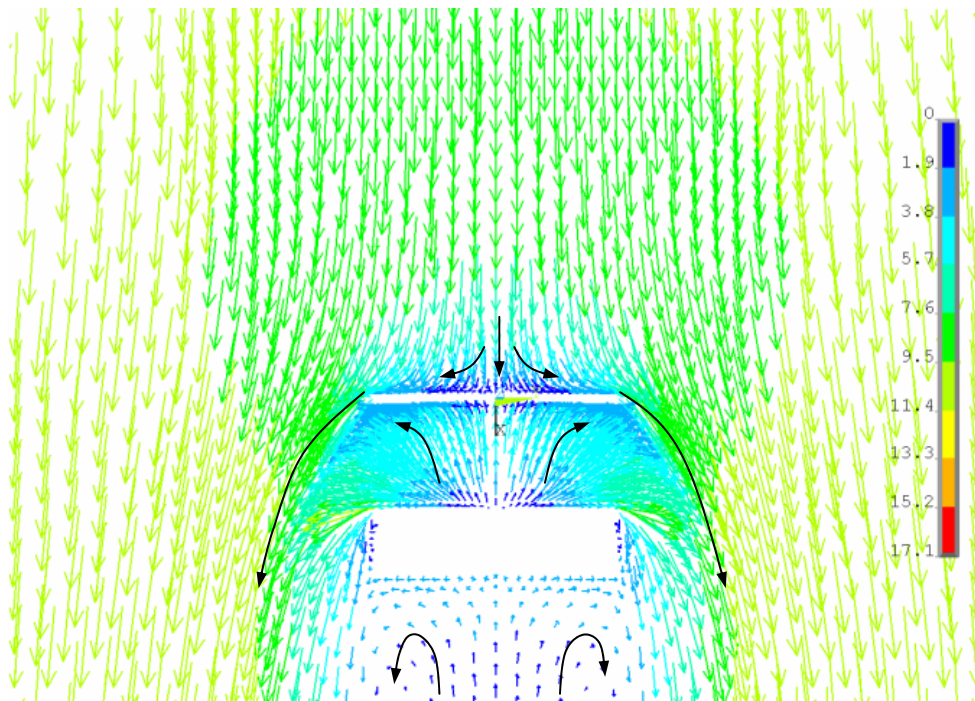


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.101 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

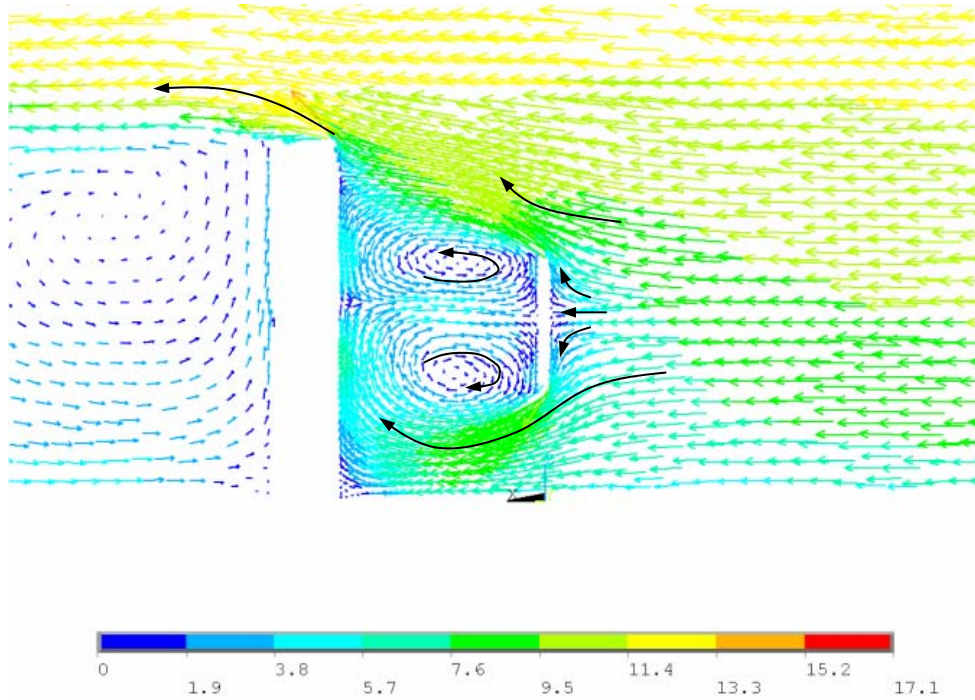


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

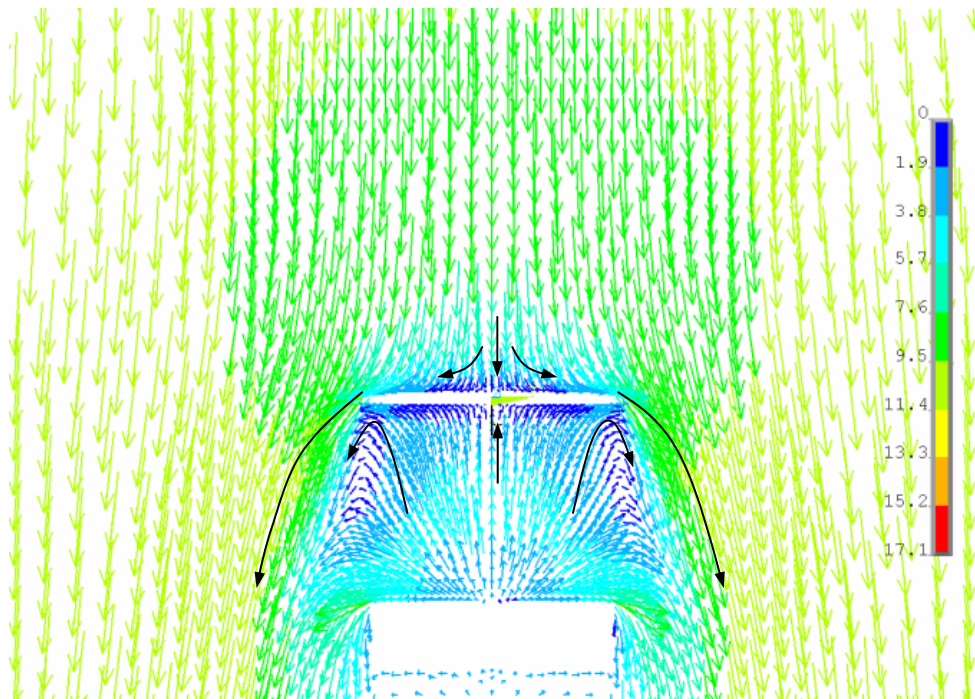


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.102 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

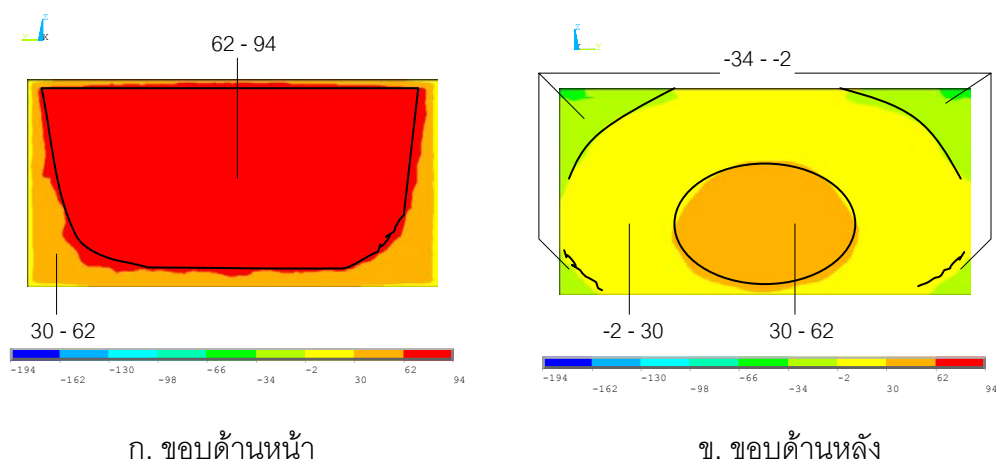


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

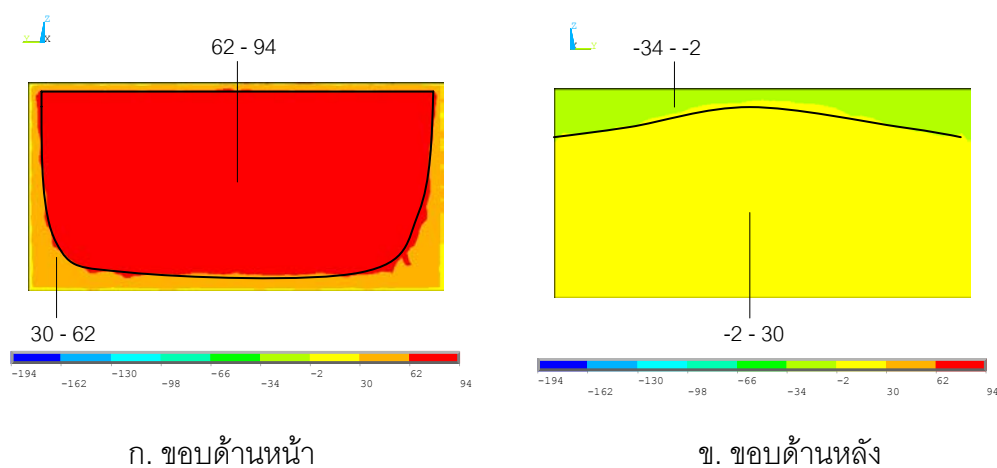


ข. ภาพตัดแนวนอน

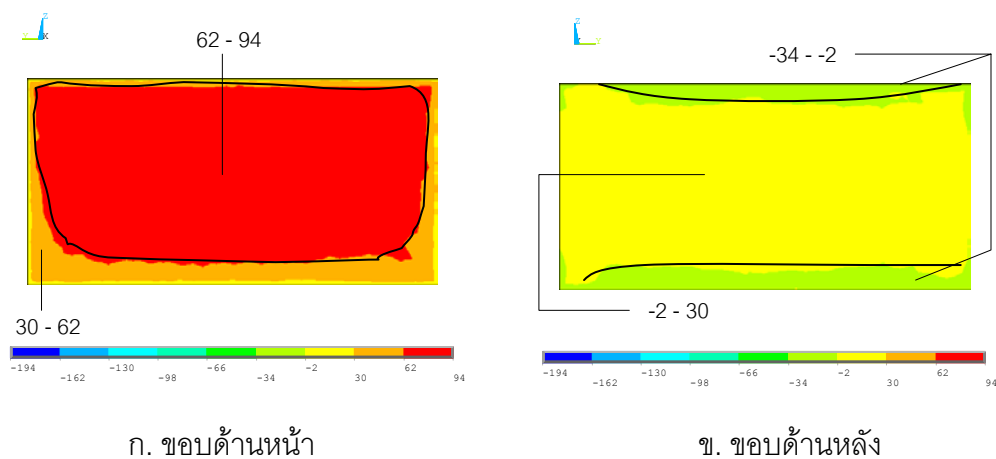
ภาพที่ 7.103 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (เมตรต่อวินาที)



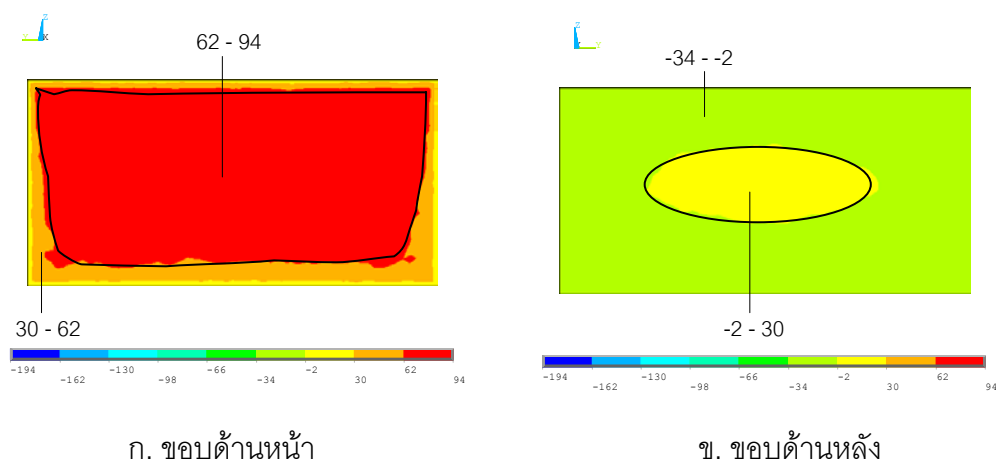
ภาพที่ 7.104 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



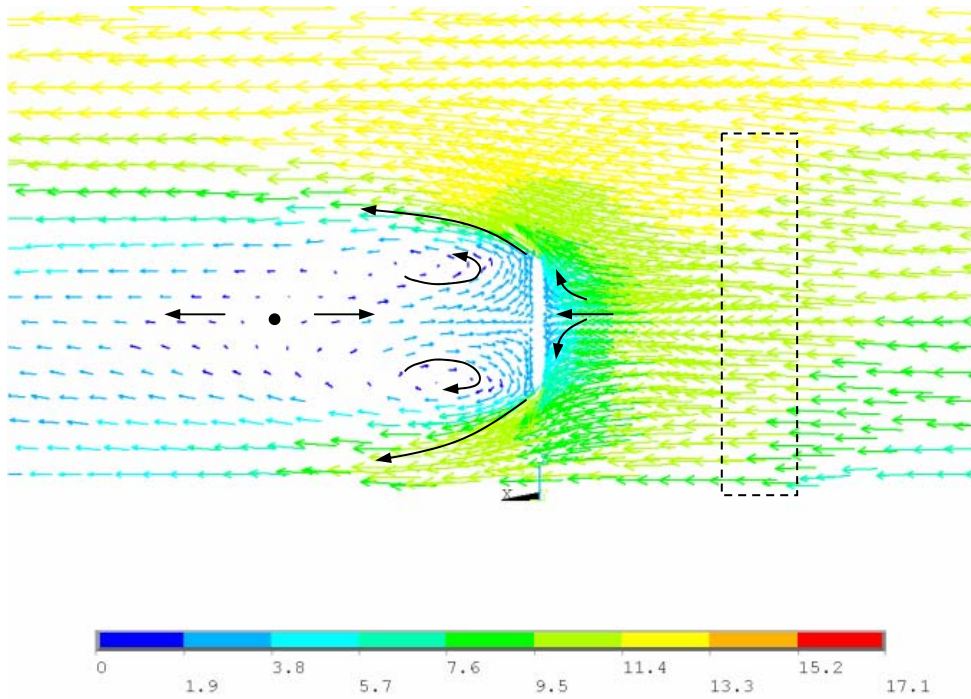
ภาพที่ 7.105 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



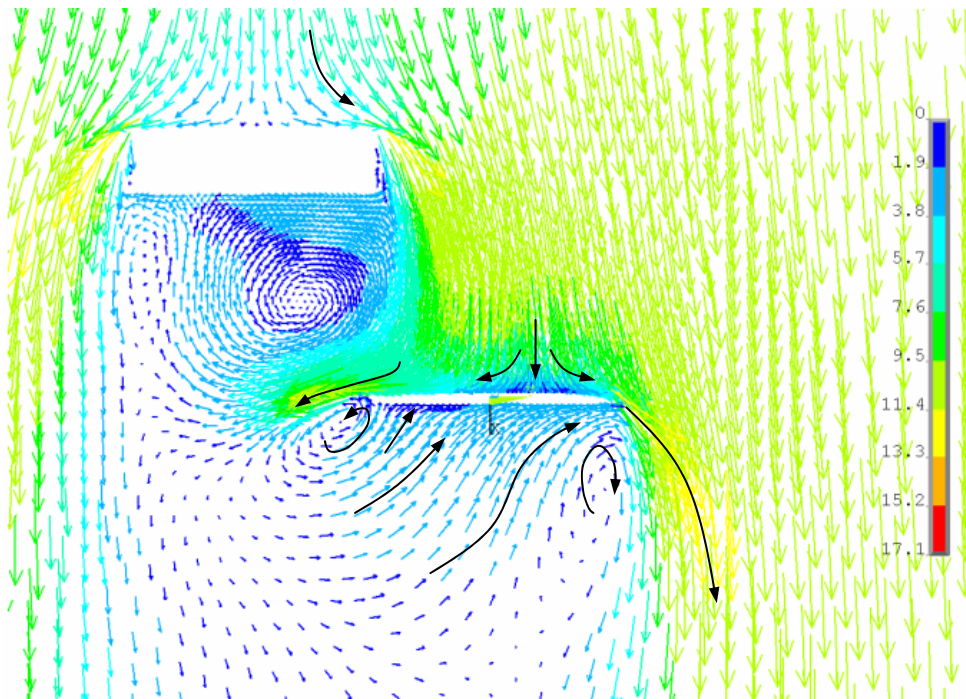
ภาพที่ 7.106 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 7.107 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = 0$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

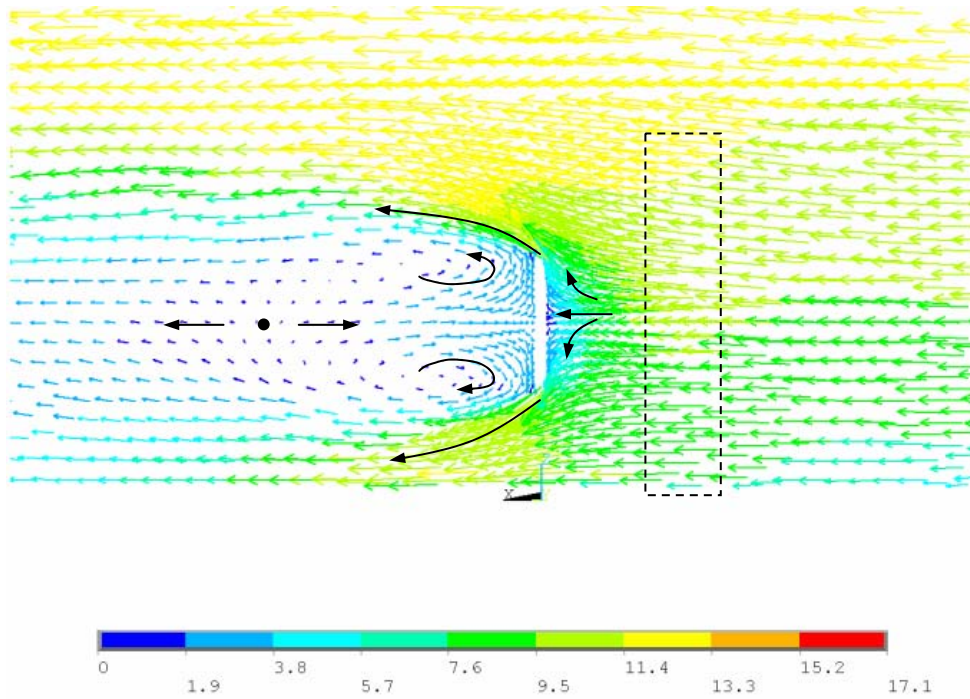


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

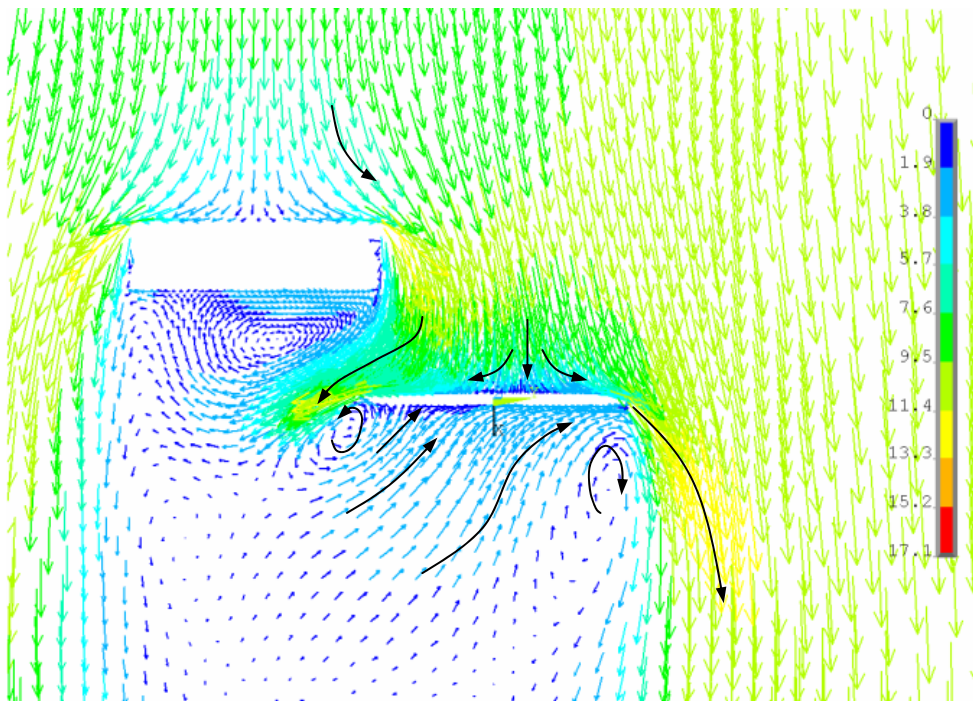


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.108 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

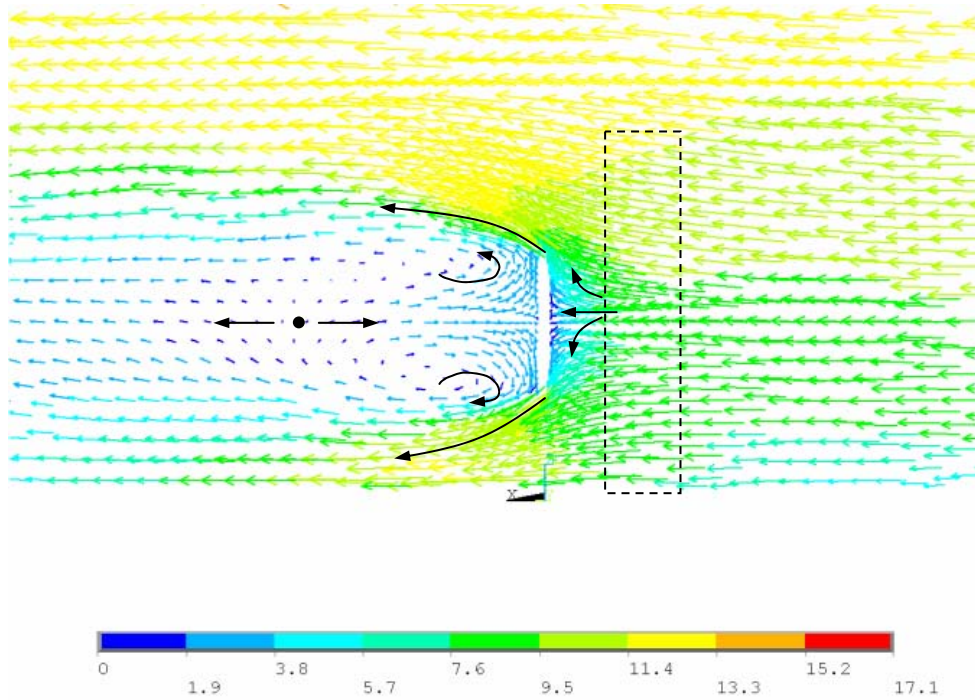


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

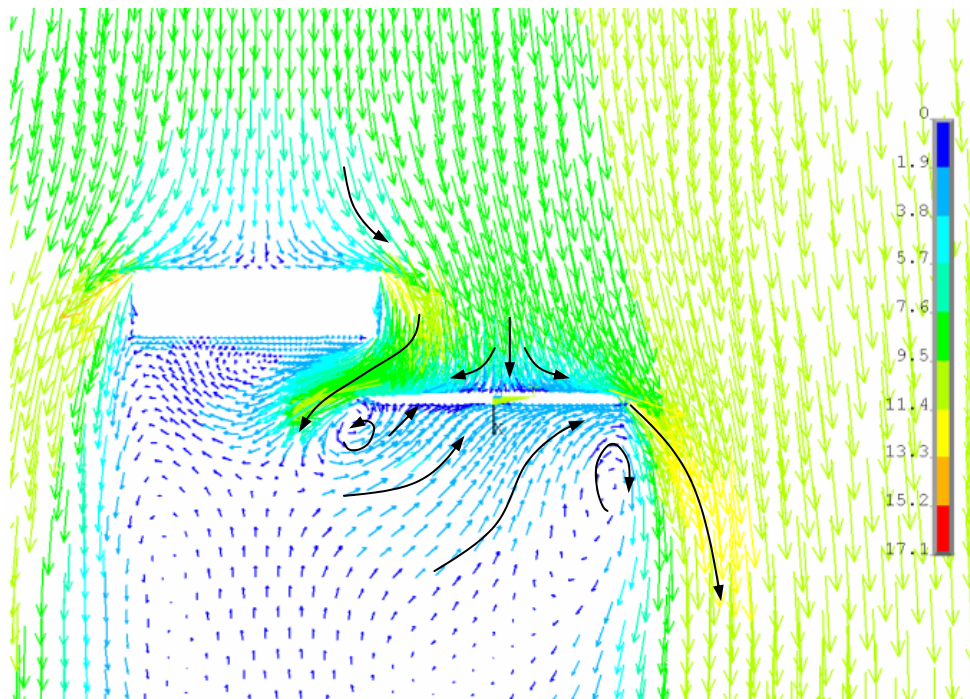


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.109 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

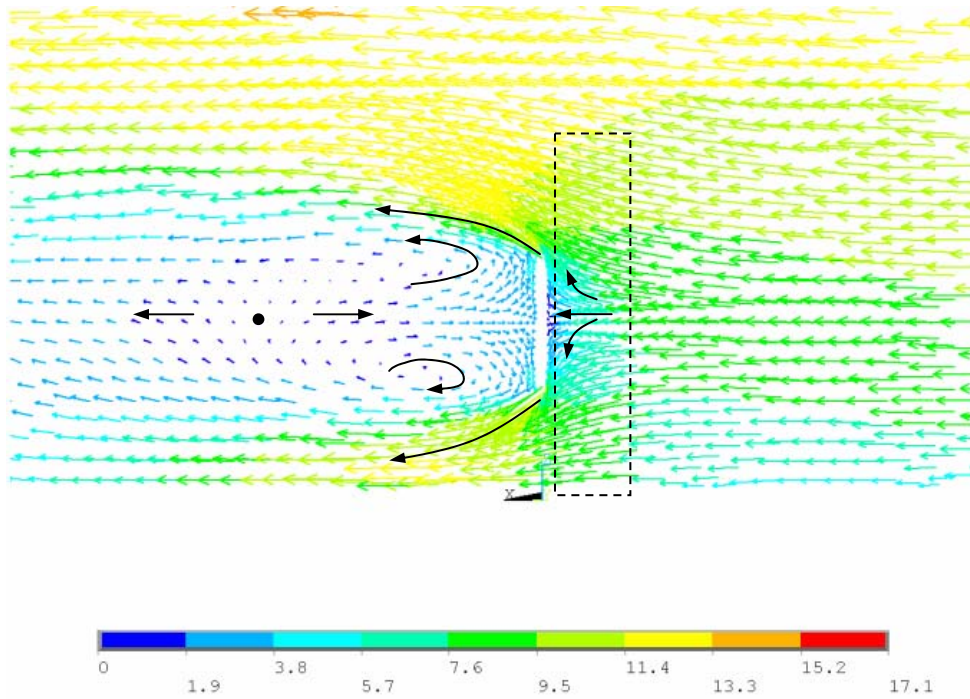


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

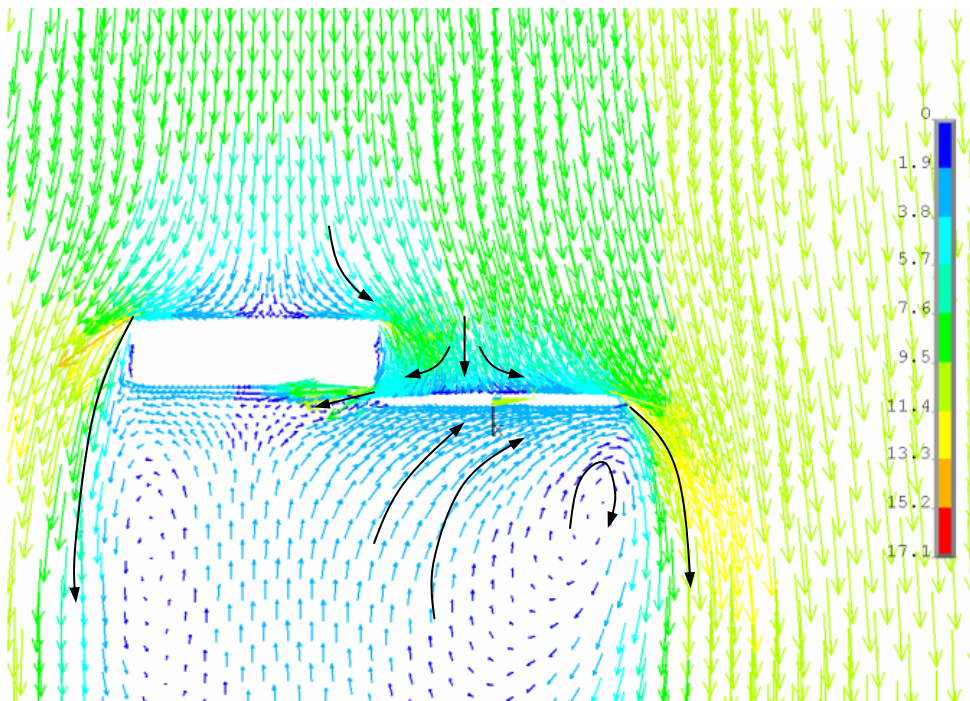


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.110 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

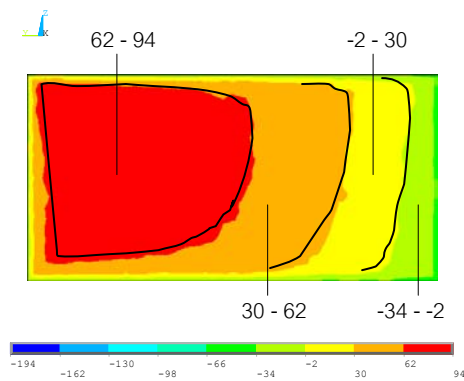


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

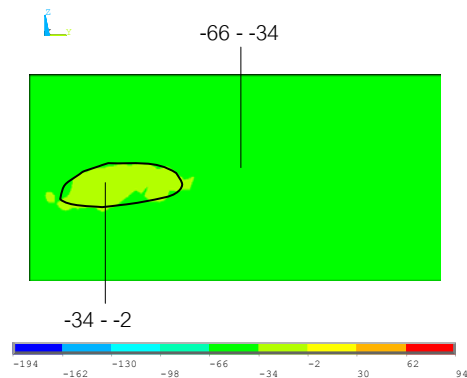


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.111 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

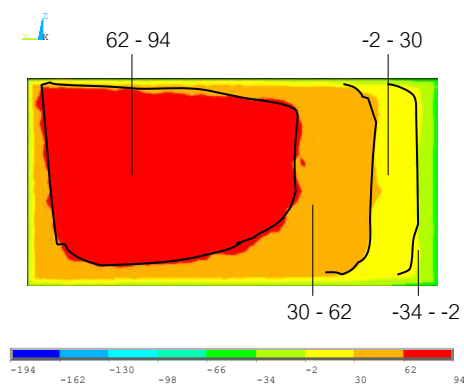


ก. ขอบด้านหน้า

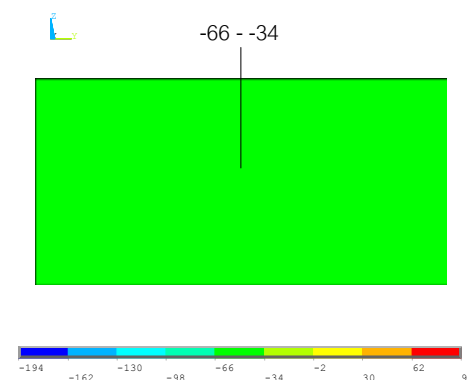


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.112 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

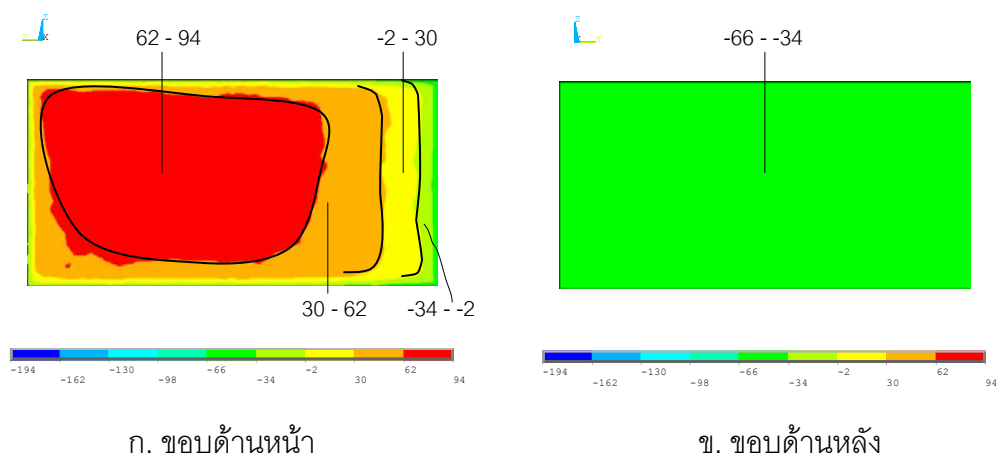


ก. ขอบด้านหน้า

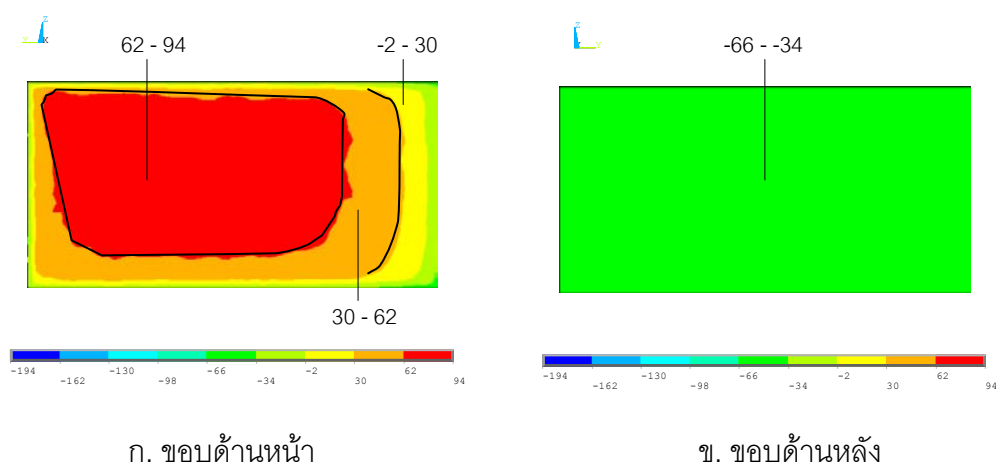


ข. ขอบด้านหลัง

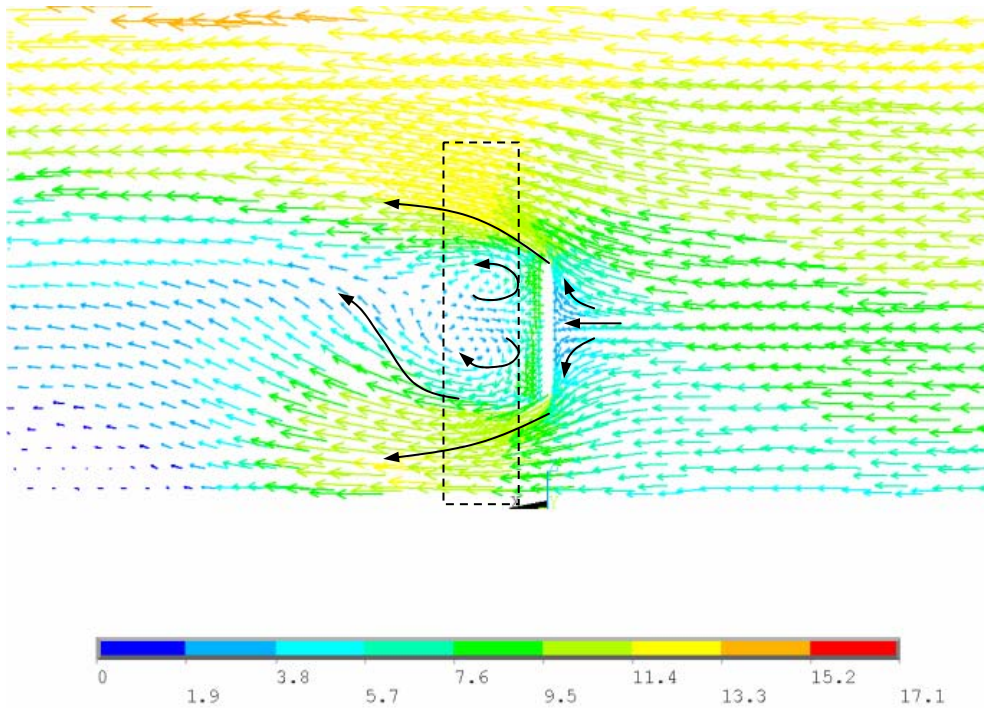
ภาพที่ 7.113 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



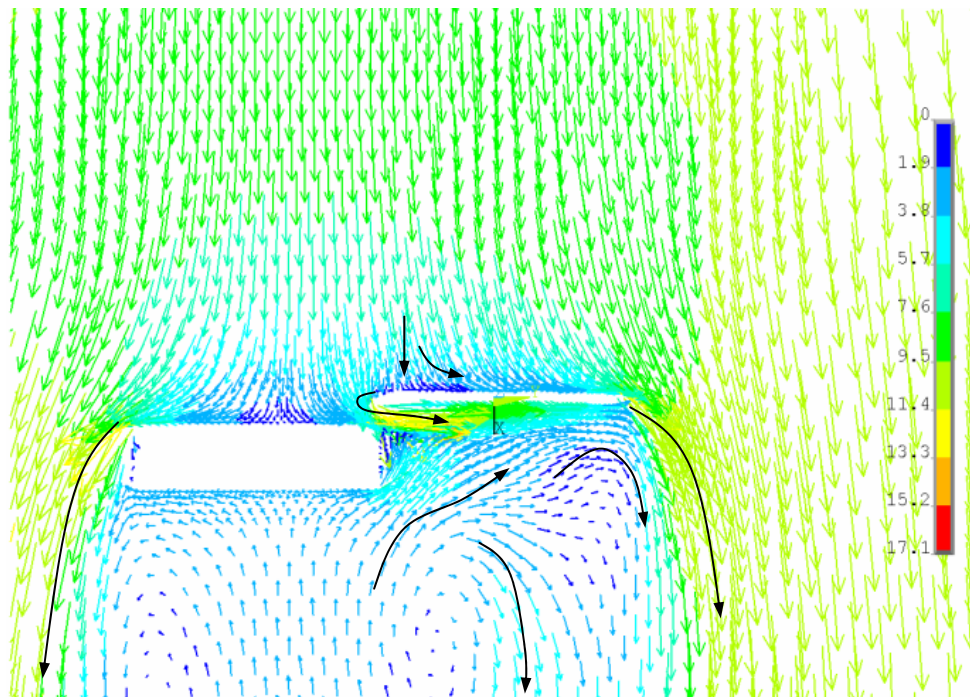
ภาพที่ 7.114 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 7.115 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = -0.04$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

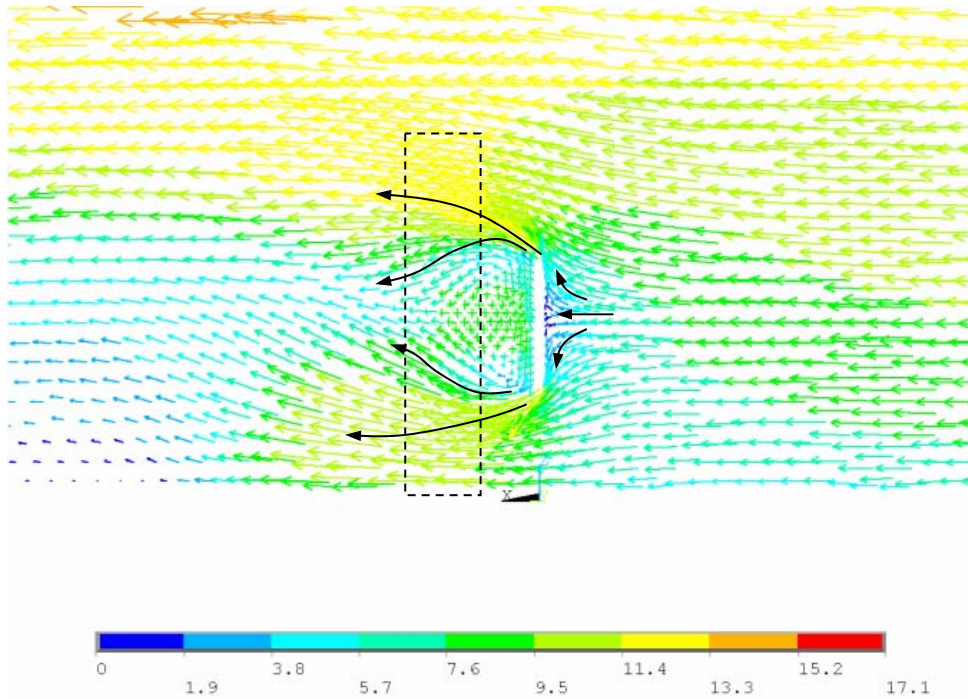


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

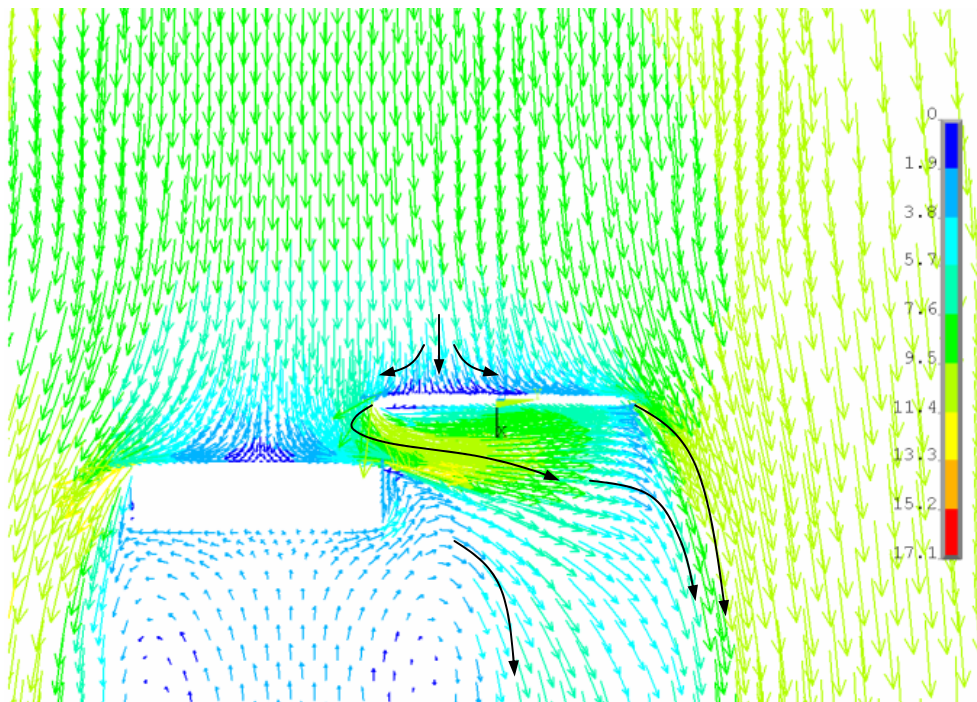


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.116 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

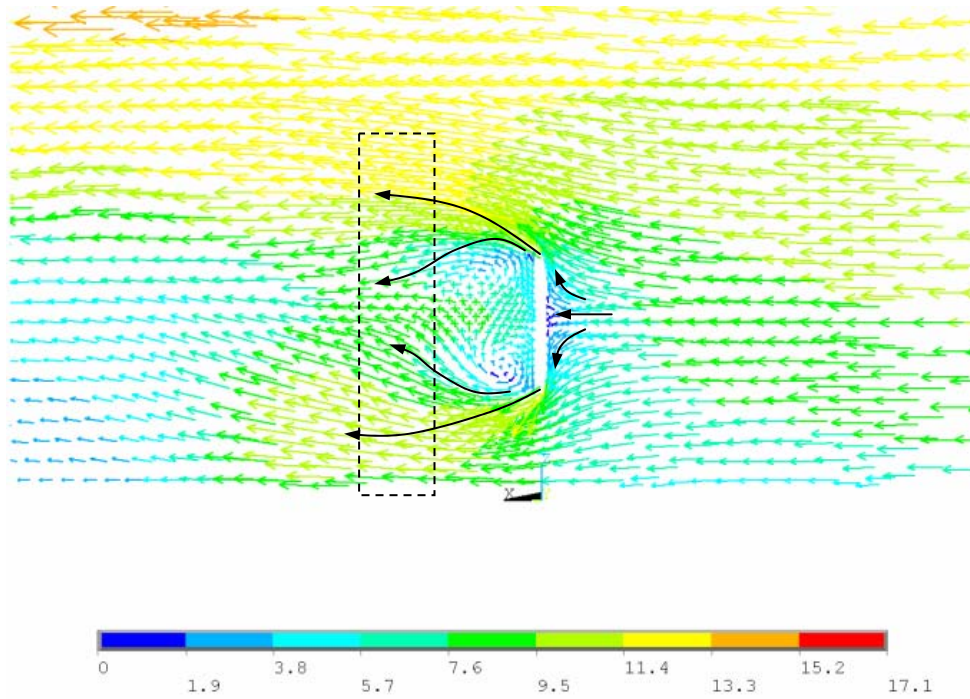


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

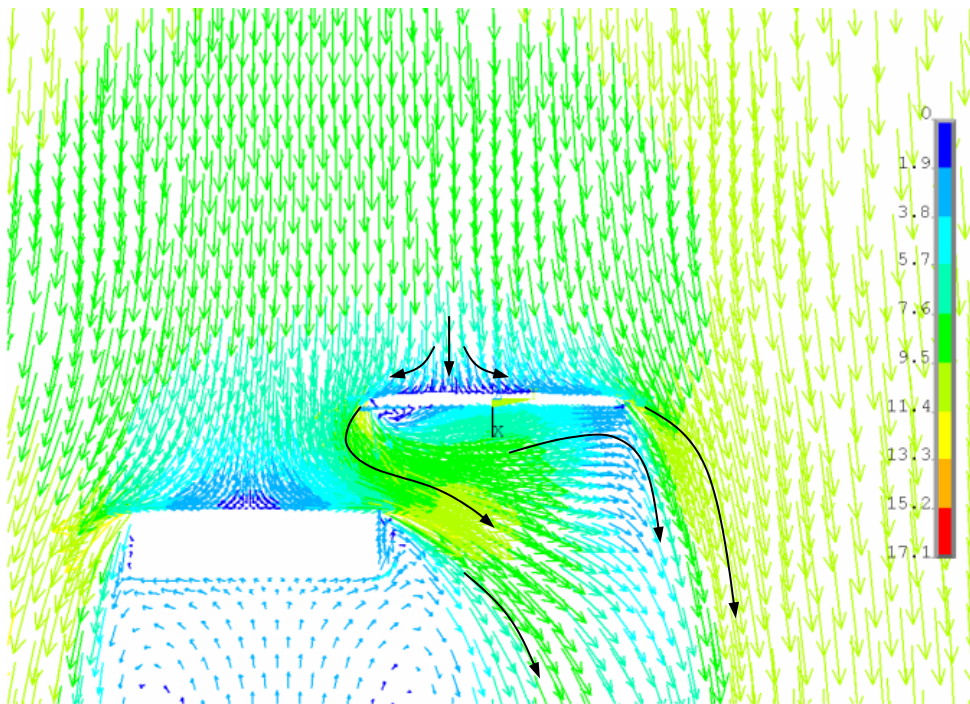


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.117 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

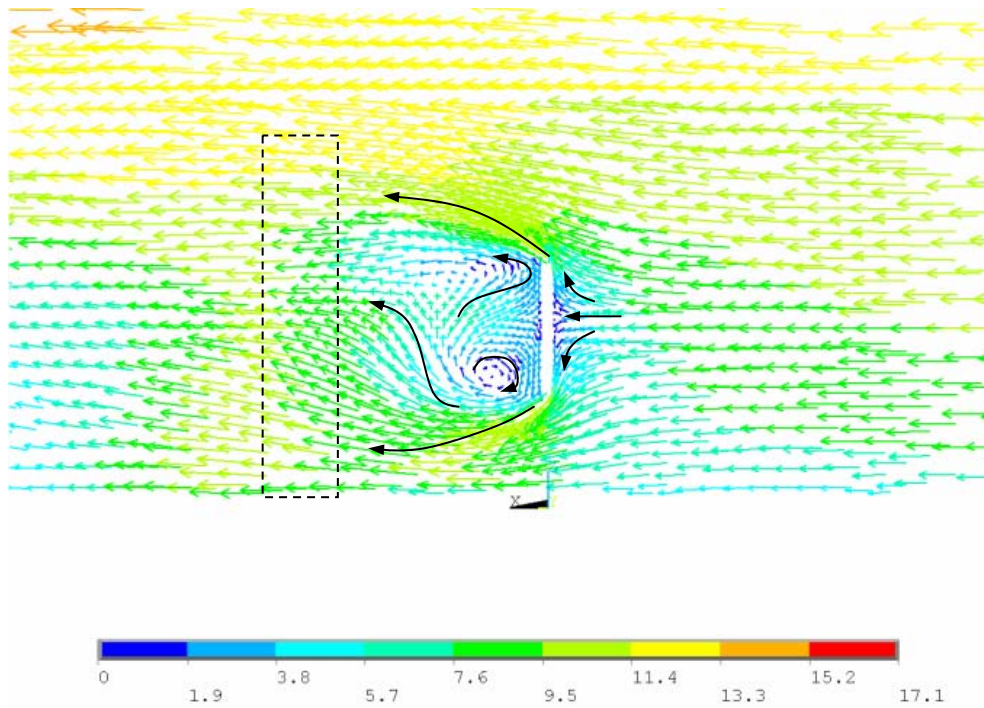


ก. ภาพตัดตัดแนวตั้ง

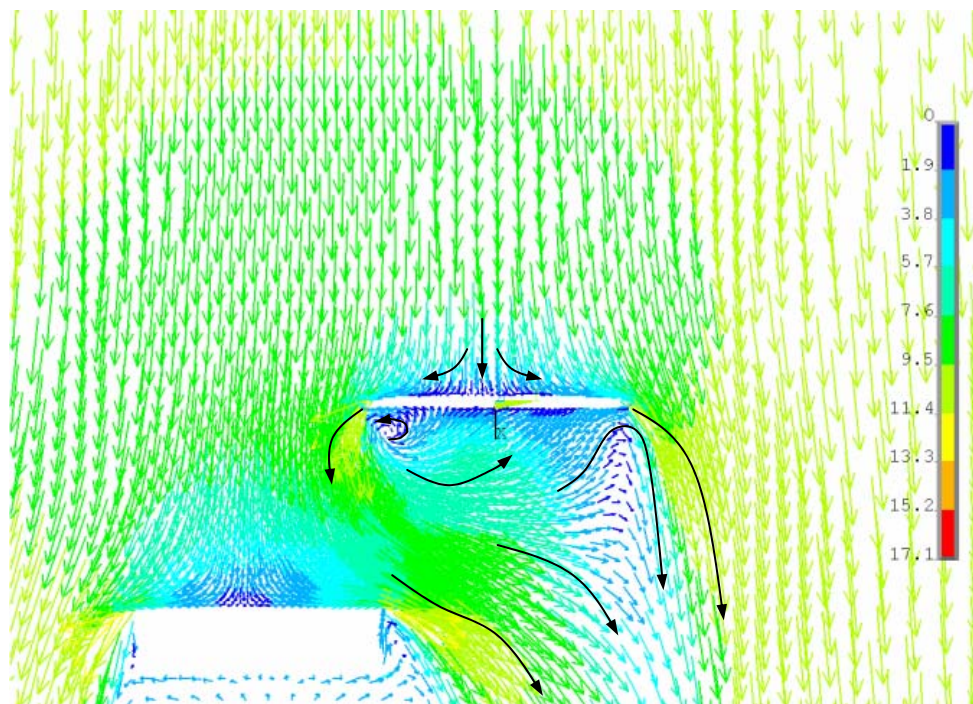


ข. ภาพตัดแนวราบ

ภาพที่ 7.118 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)

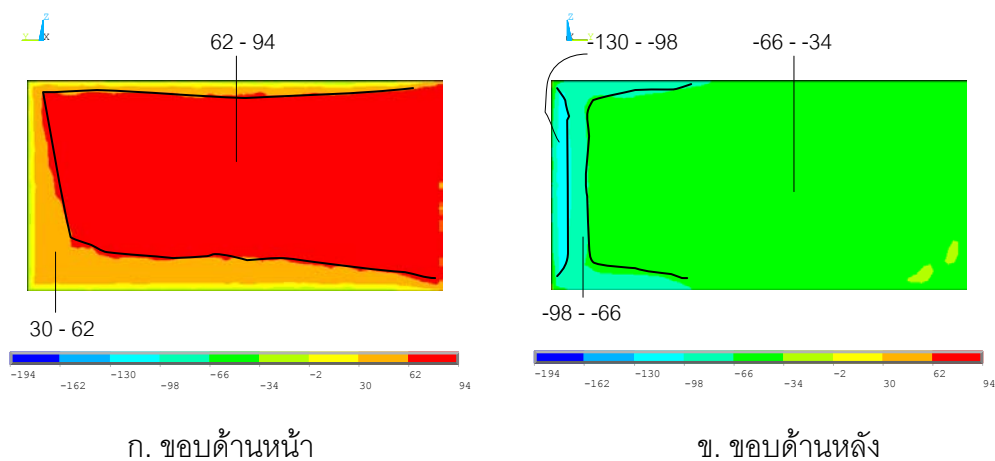


ก. ภาพตัดแนวตั้ง

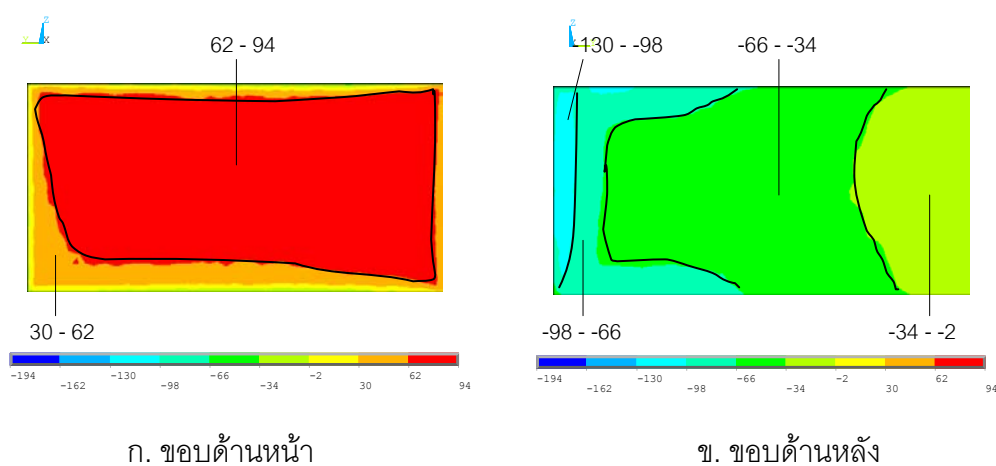


ข. ภาพตัดแนวราบ

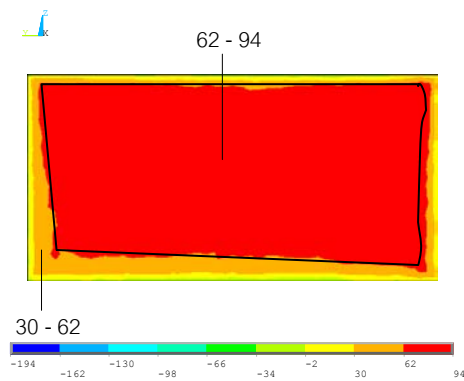
ภาพที่ 7.119 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียง
ขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (เมตรต่อวินาที)



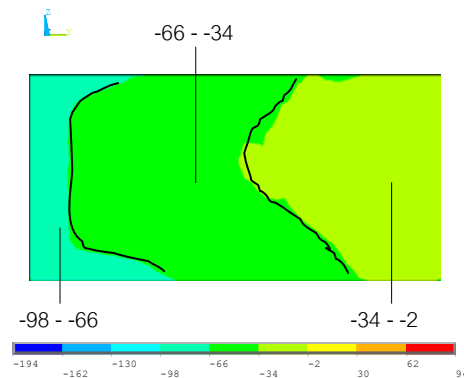
ภาพที่ 7.120 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.05$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 7.121 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.08$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

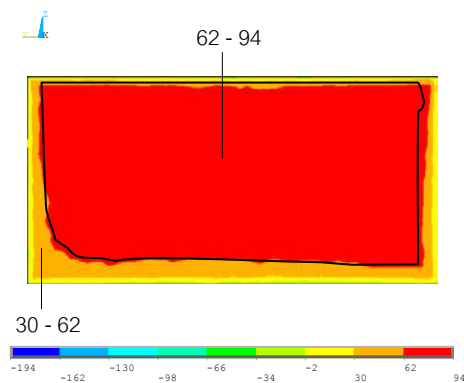


ก. ขอบด้านหน้า

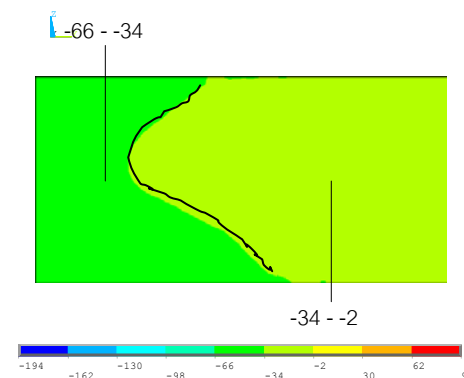


ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.122 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.12$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)



ก. ขอบด้านหน้า



ข. ขอบด้านหลัง

ภาพที่ 7.123 เส้นชั้นความดันลมของโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ตำแหน่ง $Dx = 0.20$ เมตร และ $Dy = -0.20$ เมตร (นิวตันต่อตารางเมตร)

7.6 สรุปผลการวิเคราะห์

สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียง 3 ขนาดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 หัวข้อดังนี้

7.6.1 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$

1. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์
2. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร) เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์
3. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์นั้นเป็นผลมาจากแรงที่กระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ลดลง เพราะว่าแรงถูกลดทอนลงบางส่วนเนื่องจากอาคารที่ตั้งอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ในขณะที่แรงที่กระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา ลดลงเล็กน้อย ส่งผลให้แรงสุทธิกระทำต่อโครงสร้างป้ายโฆษณา ลดลง
4. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x กรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $0.5h$ ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ค่า IF ของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ค่าคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) สูงสุดประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งของอาคารข้างเคียง Dy เท่ากับ -0.20 เมตร และ Dx เท่ากับ -0.04 เมตร

7.6.2 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด 1.0 h

1. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ ในขณะที่เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ตำแหน่งติดกับโครงสร้างป้ายโฆษณา ($Dx = 0.05$ เมตร) มีค่าคงที่ หลังจากนั้นที่ตำแหน่งไกลออกไปค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x จะมีค่าลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์
2. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร) เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 5 - 10 เปอร์เซ็นต์
3. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนเกือบเป็นศูนย์นั้นเป็นผลมาจากแรงที่กระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงอย่างมากจนมีค่าติดลบ ในขณะที่แรงที่กระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงเล็กน้อยส่งผลให้แรงสุทธิกระทำต่อโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าประมาณศูนย์
4. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x กรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด 1.0 h ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ค่า IF ของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ค่าคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) สูงสุดประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งของอาคารข้างเคียง Dy เท่ากับ -0.20 เมตร และ Dx เท่ากับ -0.08 เมตร และในกรณีที่อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF ประมาณศูนย์ ในขณะที่ผลการทดลองอุโมงค์ของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ให้ค่า IF ติดลบ

7.6.3 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณากรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$

1. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร (อาคารอยู่แนวเดียวกับโครงสร้างป้ายโฆษณา) เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนติดลบ ในขณะที่เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงลงประมาณ 30 - 50 เปอร์เซ็นต์
2. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ -0.20 เมตร (อาคารอยู่แนวเอียงกับโครงสร้างป้ายโฆษณาออกไปเป็นระยะ 0.20 เมตร) เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงลงประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่ออาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์
3. กรณีที่อาคารอยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0 เมตร เมื่อพิจารณาตำแหน่งของอาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงจนติดลบนั้นเป็นผลมาจากแรงที่กระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงอย่างมากจนมีค่าติดลบ ในขณะที่แรงที่กระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณาลดลงเล็กน้อย ส่งผลให้แรงสุทธิกระทำต่อโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าติดลบ ในขณะที่พิจารณาตำแหน่งของอาคารอยู่ด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณา การที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าลดลงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์นั้นเป็นผลมาจากแรงกระทำขอบด้านหลังโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าลดลงอย่างมากจนบางตำแหน่งมีค่าติดลบ ในขณะที่แรงกระทำขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่งผลให้แรงสุทธิกระทำต่อโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าลดลง
4. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x กรณีคำนึงถึงผลของอาคารข้างเคียงขนาด $1.5h$ ที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ค่า IF ของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ค่าคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองอุโมงค์ของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548) สูงสุดประมาณ 31 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งของอาคารข้างเคียง Dy เท่ากับ 0 เมตร และ Dx เท่ากับ 0.05 เมตร และในกรณีที่อยู่ตำแหน่ง Dy เท่ากับ 0

เมตร เมื่ออาคารอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณา ผลการวิเคราะห์ให้ค่า IF ติดลบ
น้อยกว่าผลการทดลองอุโมงค์ของ (ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล, 2548)

บทที่ 8

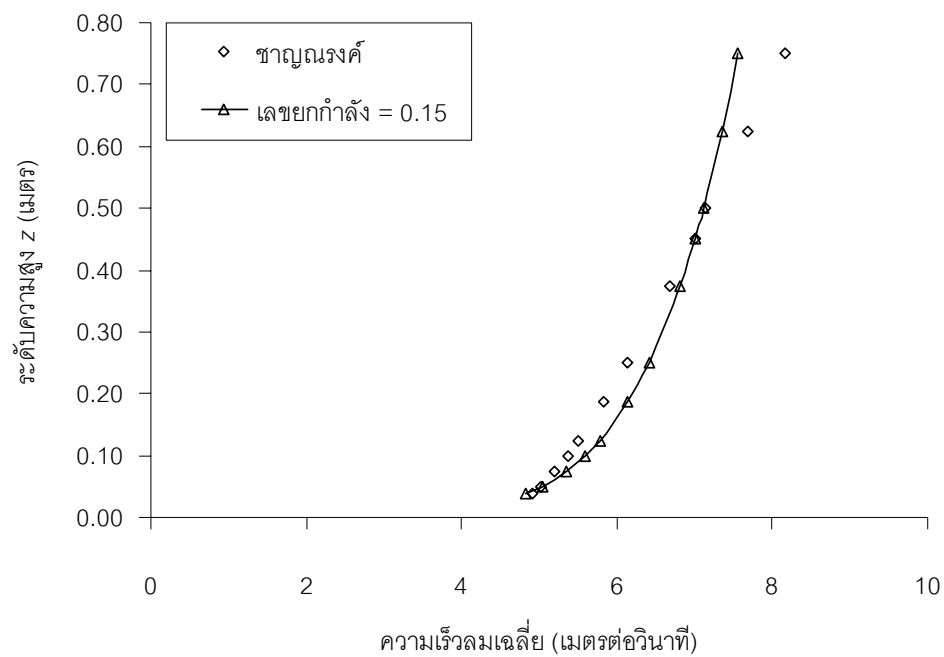
กรณีศึกษา: ผลกระทบของลมที่มีต่ออาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร

8.1 ทัวไป

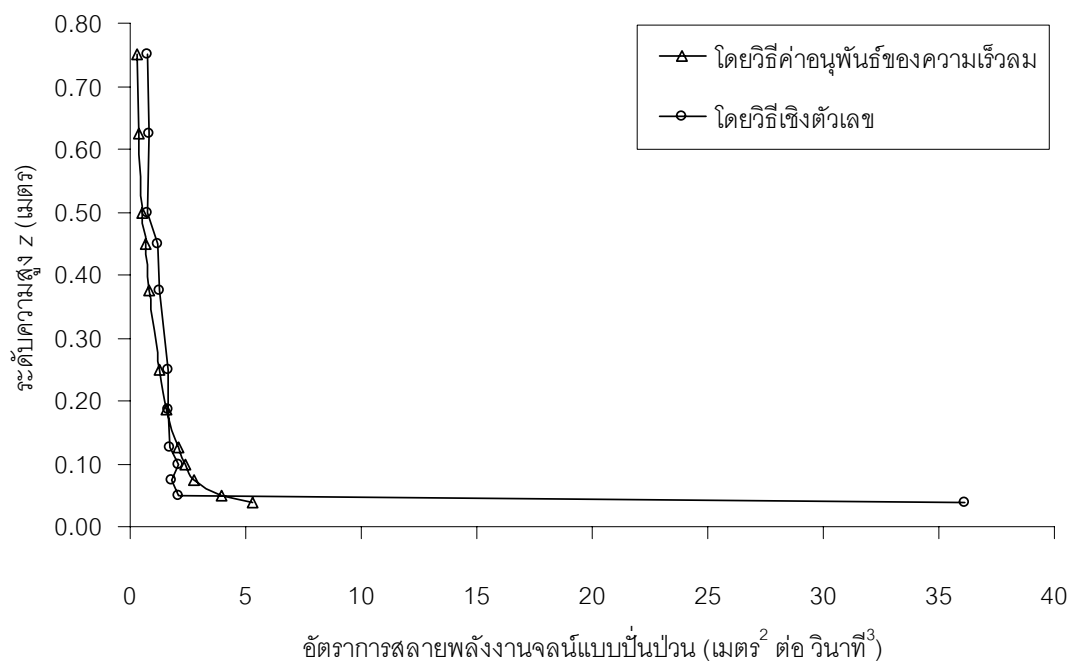
ในการออกแบบอาคารสูง แรงลมเป็นแรงกระทำทางด้านข้างอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการคำนวณและออกแบบโครงสร้าง ในการออกแบบอาคารสูงโดยทั่วไปจะทำการคำนวณโดยวิธีแรงสถิตศาสตร์เทียบเท่า (Equivalent Static Force) คือการออกแบบจากข้อกำหนด (Design Code) ในมาตรฐานต่างๆที่ได้รับการรับรองแล้ว เช่น ข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารแห่งประเทศไทยแคนาดา (National Building Code of Canada, NBC) และข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารของสถาบันแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (American National Standard Institute, ANSI) เป็นต้น แต่วิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารที่มีรูปร่างแตกต่างออกไปจากที่กำหนดอยู่ในมาตรฐาน เช่น อาคารที่มีรูปแบบหน้าตัดรูปทรงพิเศษ หรืออาคารสูงที่มีอาคารข้างเคียงตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่ออาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมก่อนหน้า

การวิเคราะห์ในบทนี้ใช้ข้อมูลอ้างอิงเชิงตัวเลขในการกำหนดสภาพขอบเขตด้านต้นลมในบทที่ 5 หัวข้อ 5.3.2 จากงานวิจัยการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสงกุล, 2547) ที่ได้ทำการทดลองอุโมงค์ลมที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ที่ความสูงของอาคารเท่ากับ 0.45 เมตร ซึ่ง (ชาญณรงค์ พุสงกุล, 2547) ได้กำหนดค่าเลขยกกำลัง (α) เท่ากับ 0.15 ค่า α จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate, ε) ดังแสดงได้ในภาพที่ 8.1 ส่วนค่าความเข้มของความปั่นป่วนของลม (Turbulence Intensity) แสดงได้ดังภาพที่ 8.2

ในบทนี้เลือกการคำนวณค่าอัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนในรูปค่าอนุพันธ์ของความเร็วลม โดยใช้เลขยกกำลัง (α) ที่ได้จากการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสงกุล, 2547) การเลือกวิธีในข้างต้นมีเหตุผลเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 6 หัวข้อ 6.1

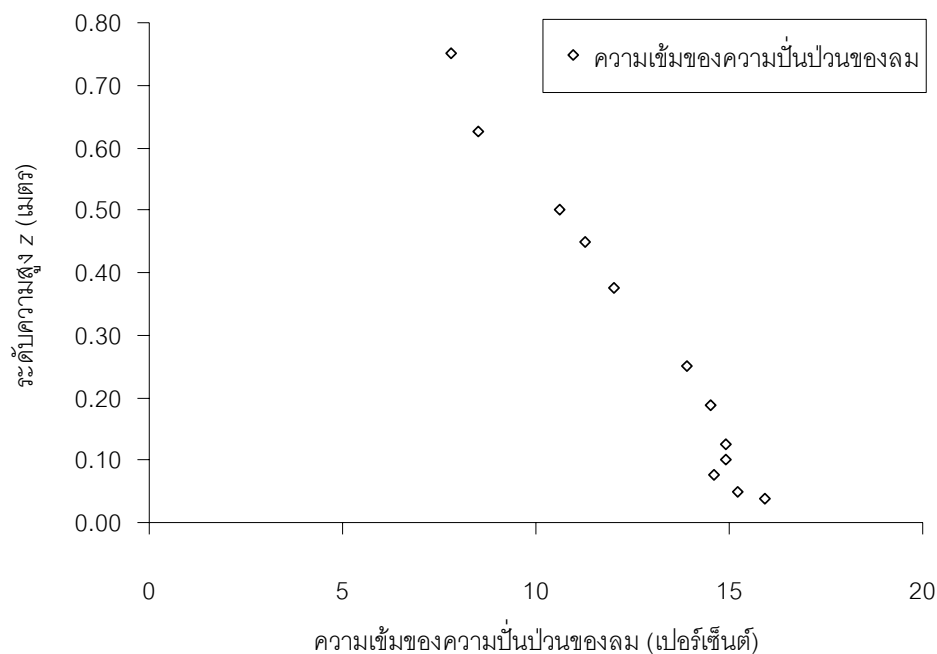


ก. ความเร็วลมเฉลี่ยและค่าเลขยกกำลัง (α)



ข. อัตราการสลายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน

ภาพที่ 8.1 ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ชาณณรงค์ ฟุสกุล, 2547)



ภาพที่ 8.2 ความชื้นของความเป็นปวนของลมที่ระดับความสูงต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์
(ชาญณรงค์ พุสงกุล, 2547)

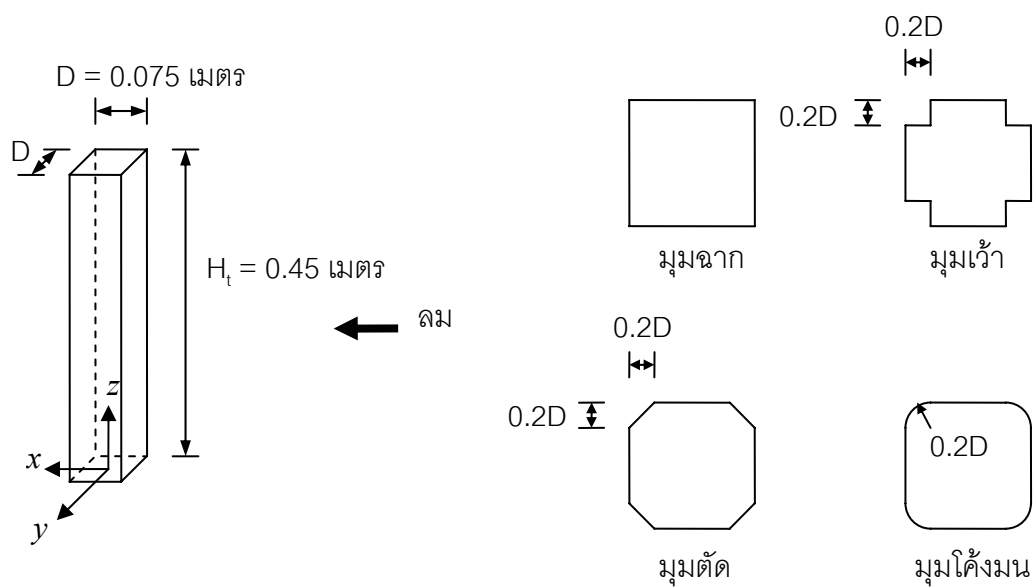
8.2 การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหา

การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกทำความเข้าใจกับลักษณะปัญหา ขั้นตอนที่สองทำการสร้างขอบเขตของการวิเคราะห์ และขั้นตอนสุดท้ายทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์

8.2.1 ลักษณะของปัญหา

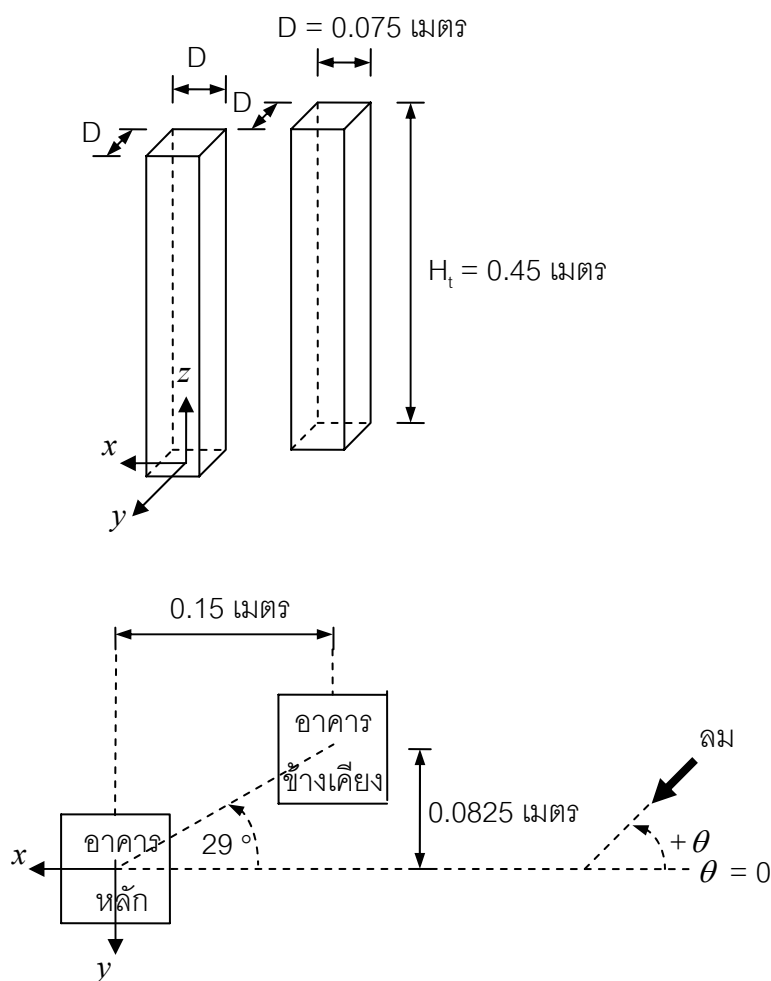
ปัญหามี 2 ลักษณะ ลักษณะแรกเป็นอาคารเดี่ยวโดยหน้าตัดของอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมของอาคารทั้งหมด 4 รูปแบบคือ สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (Square Corner) สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้ารูปสี่เหลี่ยม (Recession Corner) สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (Cut Corner) และสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (Roundness Corner) ลักษณะที่สองเป็นอาคารคู่แฝดประกอบไปด้วยอาคารหลักและอาคารข้างเคียง โดยที่อาคารข้างเคียงมีขนาดและหน้าตัดที่เหมือนกันกับอาคารหลัก วาง

อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับอาคารหลัก สามารถทำความเข้าใจได้โดยพิจารณาภาพที่ 8.3 และภาพที่ 8.4 ประกอบ



ภาพที่ 8.3 ขนาดและรูปแบบหน้าตัดของอาคาร

จากภาพที่ 8.3 ลักษณะอาคารเดี่ยวมีขนาดความกว้าง D เท่ากับ 0.075 เมตร และมีขนาดความสูง H_t เท่ากับ 0.45 เมตร มีหน้าตัด 4 รูปแบบดังได้กล่าวมาแล้วโดยเลือกกรณีการปรับแต่งมุมอาคารเท่ากับ 0.2 เท่าของความกว้างอาคาร D



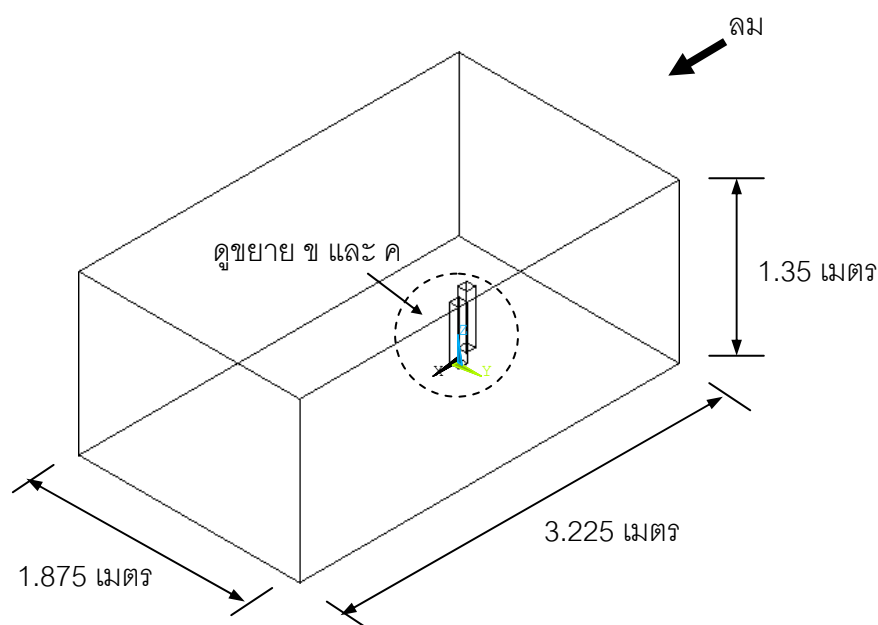
ภาพที่ 8.4 ขนาดและตำแหน่งของอาคารข้างเคียง

จากภาพที่ 8.4 ลักษณะอาคารคู่แฝด มีอาคารหลักและอาคารข้างเคียงโดยที่อาคารข้างเคียงมีขนาดและรูปแบบหน้าตัดเหมือนกับอาคารหลัก สำหรับตำแหน่งของอาคารข้างเคียงมีระยะเยื้องตามทิศแกน x จากจุดศูนย์กลางอาคารหลักถึงจุดศูนย์กลางอาคารข้างเคียงเป็นระยะ - 0.15 เมตร และระยะเยื้องตามทิศแกน y จากจุดศูนย์กลางอาคารหลักถึงจุดศูนย์กลางอาคารข้างเคียงเป็นระยะ - 0.0825 เมตร โดยที่ตำแหน่งอาคารข้างเคียงกับอาคารหลักทำมุมกันประมาณ 29 องศา

การวิเคราะห์ปัญหาทั้งสองลักษณะดังกล่าวจะคำนึงถึงผลของทิศทางลมที่กระทำด้วย โดยมีทิศทางลมที่กระทำ 0, 15, 30 และ 45 องศา ตามลำดับ ให้ทิศทางลมเป็นบวกเมื่ออาคารหมุนตามเข็มนาฬิกา

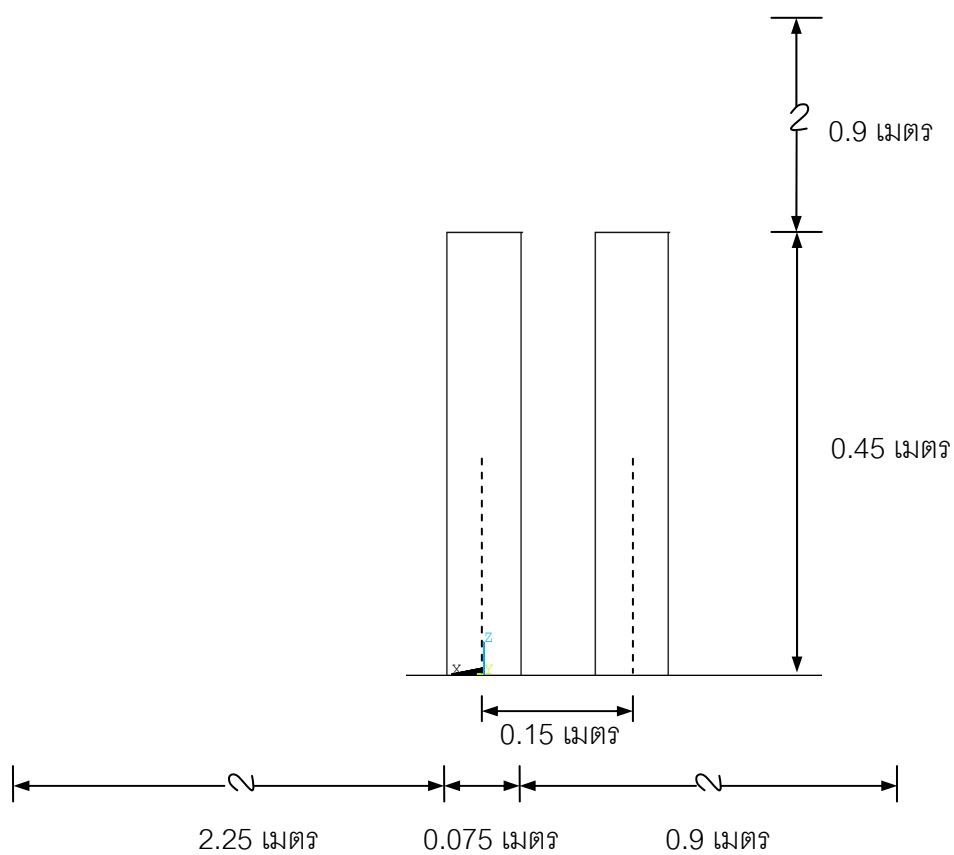
8.2.2 การสร้างขอบเขต

ขอบเขต (Domain) ของอากาศที่ครอบคลุมโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างพอสมควรเพื่อที่จะแน่ใจได้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ที่กำหนดจะไม่รบกวนสภาวะการไหลของลมรอบโครงสร้าง การสร้างขอบเขตการวิเคราะห์อาคารแสดงได้ดังภาพที่ 8.5

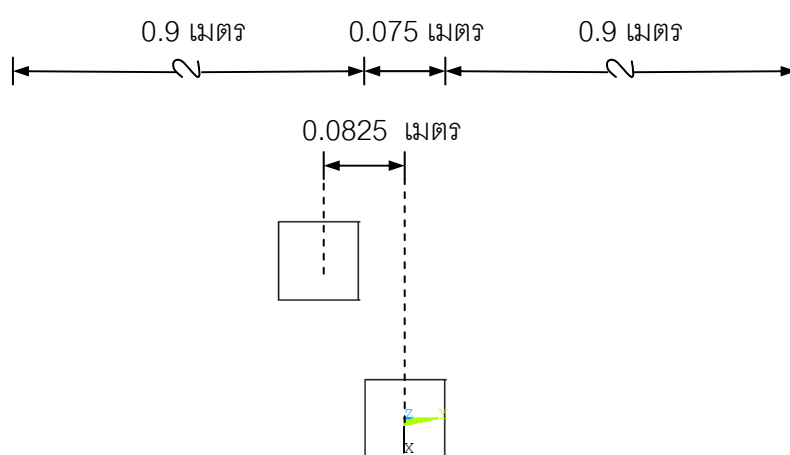


ก. ขนาดขอบเขตโดยรวม

ภาพที่ 8.5 ขนาดขอบเขตของอาคาร



ข. ภาพขยายด้านข้าง



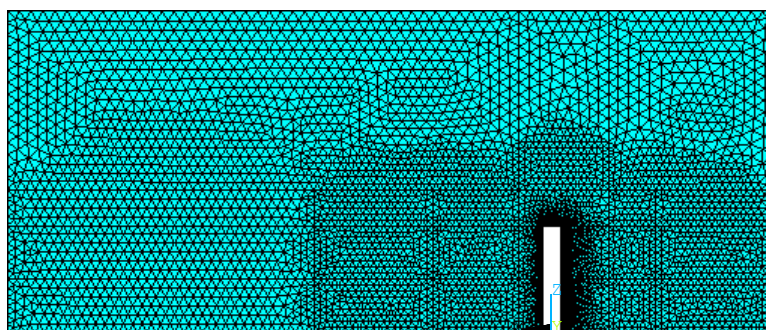
ค. ภาพขยายด้านบน

ภาพที่ 8.5 (ต่อ) ขนาดขอบเขตของอาคาร

จากภาพที่ 8.5 ขนาดขอบเขตของการวิเคราะห์ มีระยะจากขอบด้านหน้าอาคารหลักถึงด้านต้นลมเท่ากับ 0.9 เมตร ระยะจากขอบด้านหลังอาคารหลักถึงด้านท้ายลมเท่ากับ 2.25 เมตร ระยะจากขอบบนอาคารหลักถึงด้านบนเท่ากับ 0.9 เมตร และระยะจากขอบข้างอาคารหลักทั้งสองข้างจนถึงด้านข้างขวาและด้านข้างซ้ายมีระยะเท่ากันคือ 0.9 เมตร ในขณะที่การสร้างแบบจำลองของอาคารจะถูกกำหนดให้สร้างสอดคล้องกับทิศทางลมที่กระทำรวมทั้งลักษณะหน้าตัดของอาคารจะแปรเปลี่ยนไปตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้

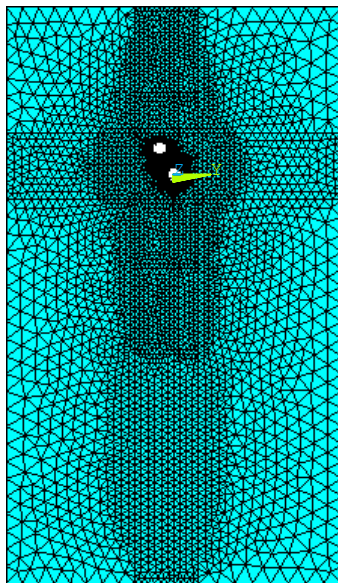
8.2.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เอลิเมนต์ของอากาศที่สร้างขึ้นสำหรับการวิเคราะห์จะมีขนาดประมาณ 0.005 เมตร บริเวณรอบๆอาคาร หลังจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขนาดของเอลิเมนต์เมื่อไกลออกไป ขนาดเอลิเมนต์ที่ใหญ่ที่สุดมีขนาดประมาณ 0.1 เมตร การแบ่งเอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์แสดงได้ดังภาพที่ 8.6

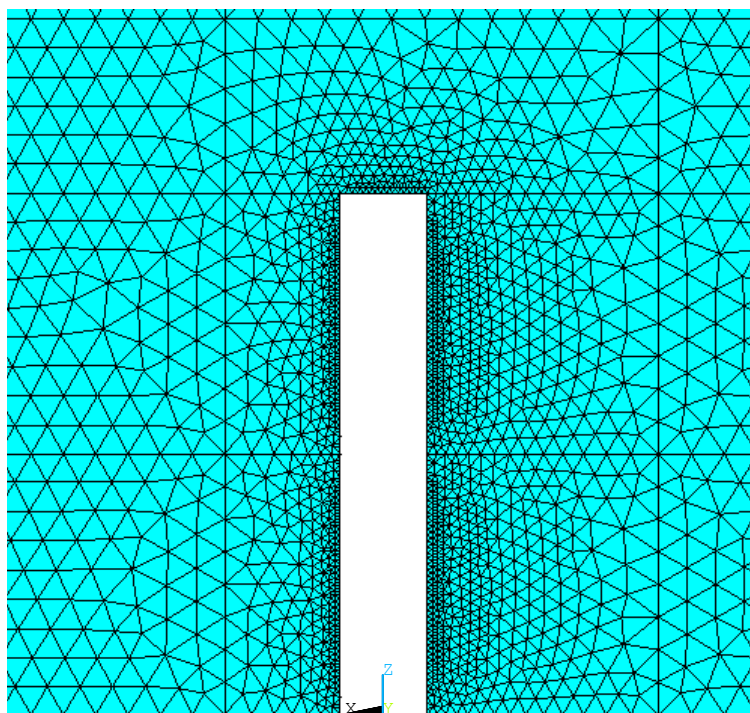


ก. ภาพตัดแนวดิ่งที่จุดศูนย์กลางอาคารหลัก

ภาพที่ 8.6 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆอาคาร

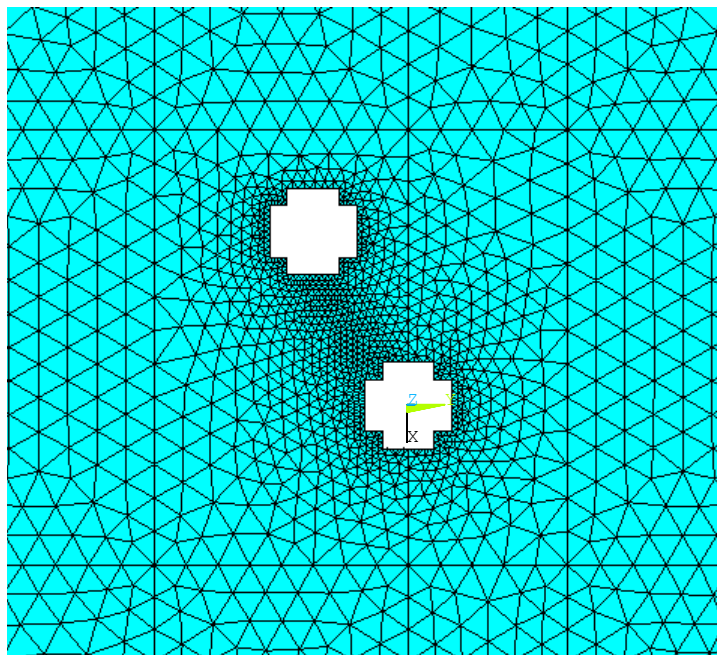


ข. ภาพตัดแนวราบที่จุดศูนย์กลางอาคารหลัก

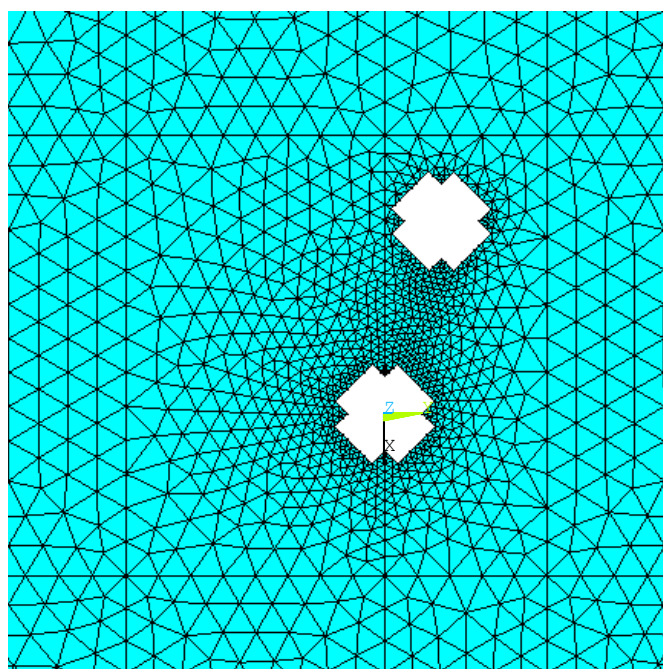


ค. ภาพขยายภาพตัดแนวดิ่ง

ภาพที่ 8.6 (ต่อ) ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆอาคาร



ง. ภาพขยายภาพตัดแนวราบ



จ. ภาพขยายภาพตัดแนวราบกรณีทิศทางลม 45 องศา

ภาพที่ 8.6 (ต่อ) ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์รอบๆอาคาร

8.3 วิธีการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาอาคารเดี่ยวตามสมการที่ 8.1 ส่วนการวิเคราะห์ปัญหาอาคารคู่แฝดโดยจะแสดงผลอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักกรณีมีอาคารข้างเคียงต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหลักกรณีไม่มีอาคารข้างเคียง (Interference Factor, IF) ตามสมการที่ 8.2

$$C_D = \frac{\bar{F}_x}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}_{ref}^2 D H_t} \quad (8.1)$$

$$IF = \frac{C_D \text{ ที่กระทำกับอาคารหลักกรณีมีอาคารข้างเคียง}}{C_D \text{ ที่กระทำกับอาคารหลักกรณีไม่มีอาคารข้างเคียง}} \quad (8.2)$$

โดยที่

C_D	คือ สัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x
$\bar{F}_x$	คือ แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)
ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)
$\bar{u}_{ref}$	คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที (m/s)
D	คือ ความกว้างของอาคารมีค่าเท่ากับ 0.075 เมตร (m)
H_t	คือ ความสูงของอาคารมีค่าเท่ากับ 0.45 เมตร (m)
IF	คือ Interference Factor

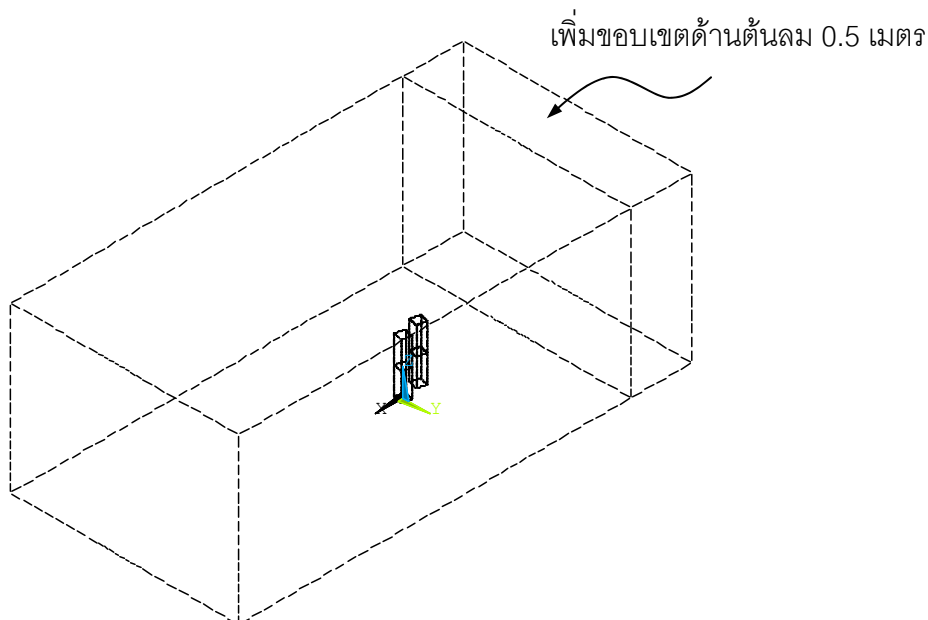
8.4 ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม และการเข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution) ในกรณี

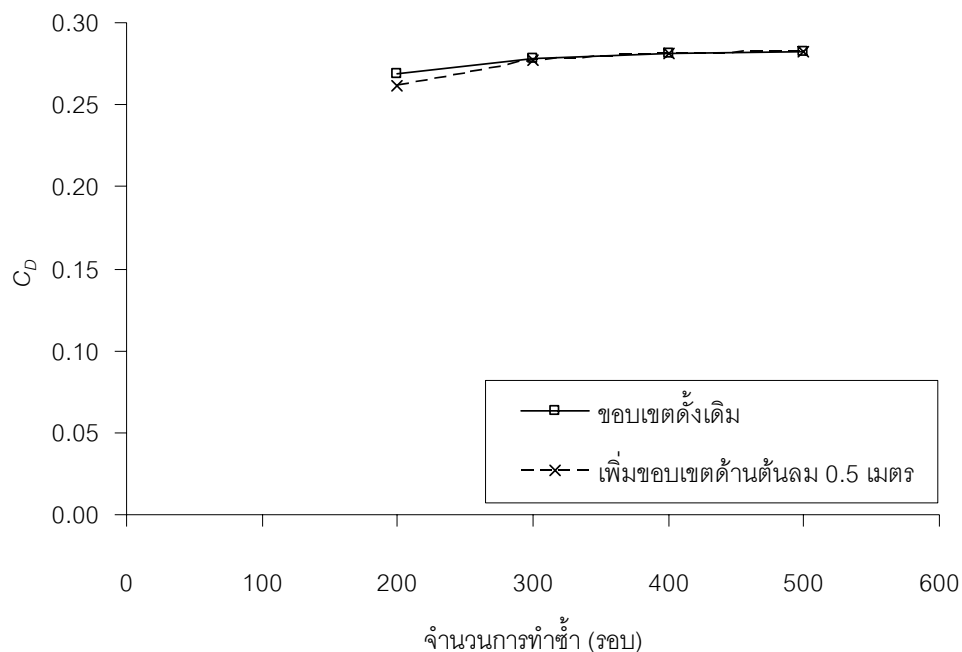
เพิ่มขอบเขตด้านตันลมเพื่อเป็นการตรวจสอบขนาดของขอบเขตที่กำหนดในหัวข้อ 8.2.2 เพราะว่าในการวิเคราะห์ผลของทิศทางลมการสร้างแบบจำลองจะต้องสร้างให้สอดคล้องกับทิศทางลมที่กระทำทำให้ระยะทางการไหลของลมจากด้านตันลมจนถึงอาคารข้างเคียงซึ่งอยู่ด้านหน้าอาคารหลักจะมีระยะสั้นลงซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสภาวะการไหลของลมรอบโครงสร้างได้ สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ภายในขอบเขตที่เหมาะสมที่ใช้ในการวิเคราะห์พิจารณาได้จากบทที่ 6 หัวข้อ 6.4.1

8.4.1 กรณีเพิ่มขอบเขตด้านตันลม

การเพิ่มขอบเขตด้านตันลมจะเพิ่มระยะตามทิศแกน x เท่ากับ 0.5 เมตร โดยเลือกวิเคราะห์อาคารคู่แฝด รูปแบบหน้าตัดของอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (ไม่มีการปรับแต่งมุมอาคาร) ที่ทิศทางลม 15 องศา สามารถทำความเข้าใจได้โดยพิจารณาภาพที่ 8.7 ประกอบ ผลของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักแสดงได้ในภาพที่ 8.8 และตารางที่ 8.1



ภาพที่ 8.7 ลักษณะของขอบเขตกรณีเพิ่มขอบเขตด้านตันลม 0.5 เมตร



ภาพที่ 8.8 ความสัมพันธ์ของจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x สำหรับขอบเขตดั้งเดิมและกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร

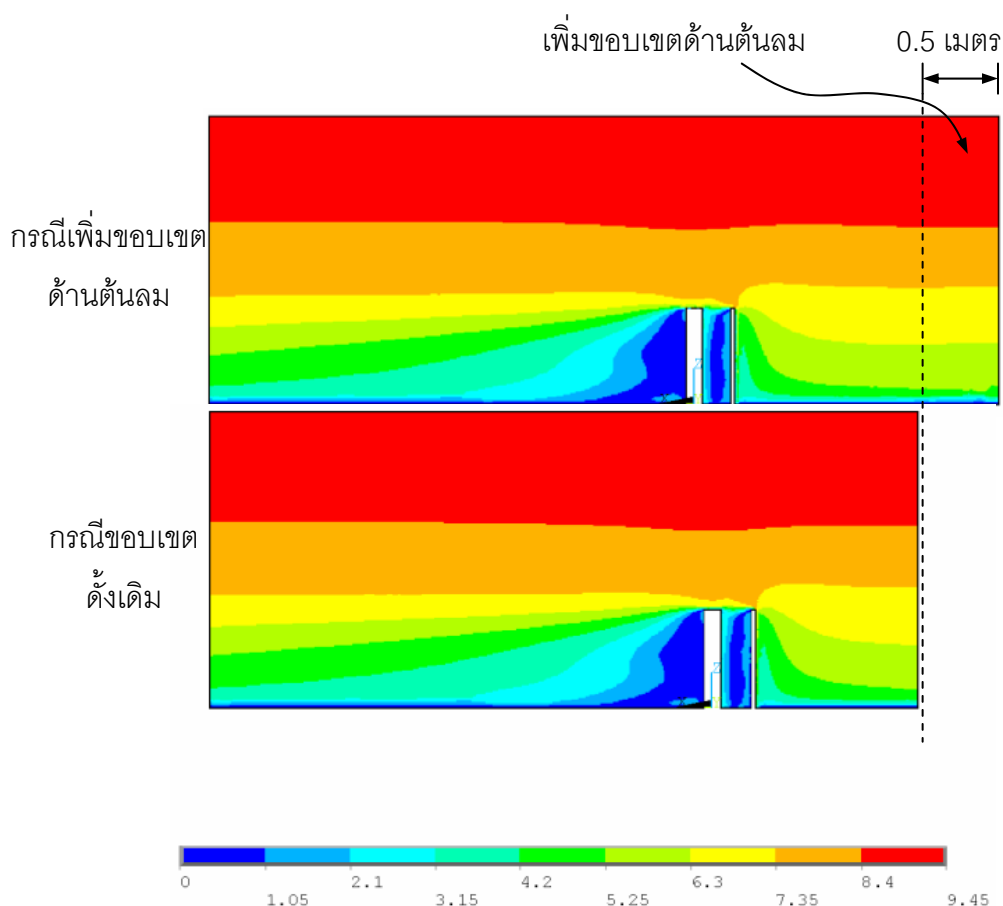
ตารางที่ 8.1

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กรณีขอบเขตดั้งเดิมกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม

แบบจำลอง	จำนวนการทำซ้ำ	C_D	ค่าแตกต่าง
ขอบเขตดั้งเดิม	500	0.282868	0.08 %
เพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร	500	0.282665	

จากภาพที่ 8.8 และตารางที่ 8.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารคู่แฝด หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก ที่ทิศทางลม 15 องศา ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักที่จำนวนการทำซ้ำ 500 สำหรับกรณีขอบเขตดั้งเดิมเท่ากับ 0.282868 ส่วนกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร เท่ากับ 0.282665 โดยที่มีค่าแตกต่างเท่ากับ 0.08 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าน้อยมาก และหากพิจารณาเส้นชั้นความเร็วลมตามภาพที่ 8.9 สังเกตได้ว่าเส้นชั้นความเร็วลมกรณีเพิ่มขอบเขตช่วง 0.5 เมตร เป็นลมที่มีลักษณะ Streamlines

แบบสมบูรณจากทางด้านต้นลมโดยที่ไม่มีการแปรเปลี่ยนความเร็วลมตามความสูงมากนัก ขอบเขตดั้งเดิมที่มีด้านต้นลมที่สั้นกว่าแต่ยังคงอยู่ในช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเมื่อเทียบกับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลมจึงถือว่าอยู่ในวิสัยที่ยอมรับได้ ดังนั้นขนาดของขอบเขตที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 8.2.2 จึงถือว่ามีความถูกต้องเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ในกรณีอื่นๆต่อไป



ภาพที่ 8.9 เปรียบเทียบเส้นชั้นความเร็วลมของกรณีขอบเขตดั้งเดิม
กับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม

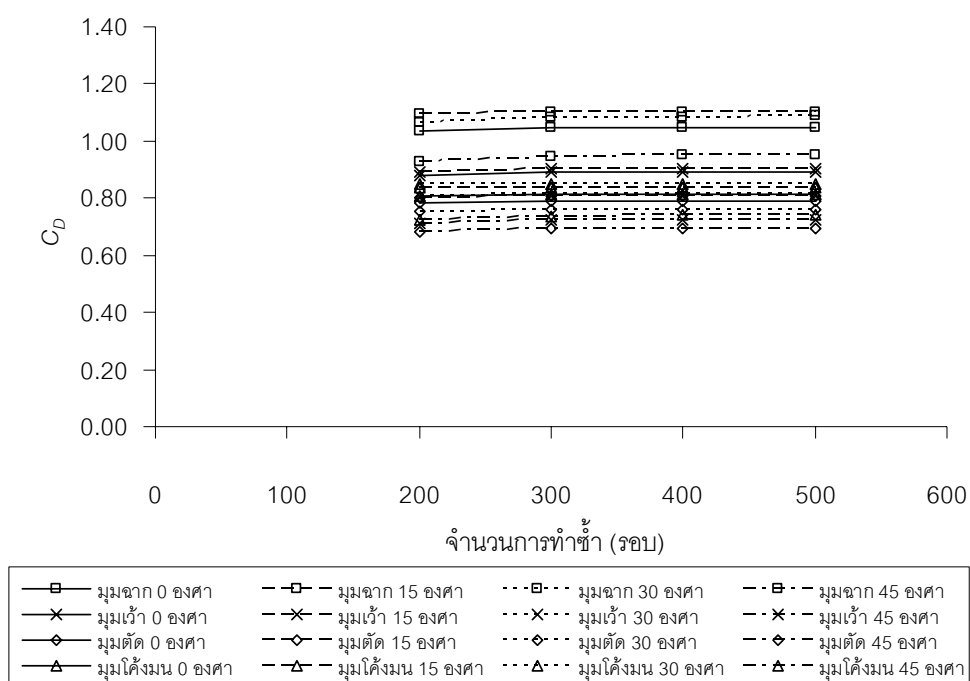
ตารางที่ 8.2

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของกรณีขอบเขตดั้งเดิม
กับกรณีเพิ่มขอบเขตด้านต้นลม

แบบจำลอง	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)			
	200	300	400	500
ขอบเขตดั้งเดิม	0.2685	0.2787	0.2817	0.2829
เพิ่มขอบเขตด้านต้นลม 0.5 เมตร	0.2617	0.2776	0.2813	0.2827

8.4.2 การเข้าสู่ผลลัพธ์ (Converged Solution)

การทำซ้ำ (Iteration) ของผลลัพธ์เลือกการทำซ้ำ 500 การทำซ้ำ โดยจะตรวจสอบการลู่เข้าของผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลัก ภาพที่ 8.10 และภาพที่ 8.11 แสดงผลของการทำซ้ำในกรณีอาคารเดี่ยวและอาคารคู่แฝดตามลำดับ



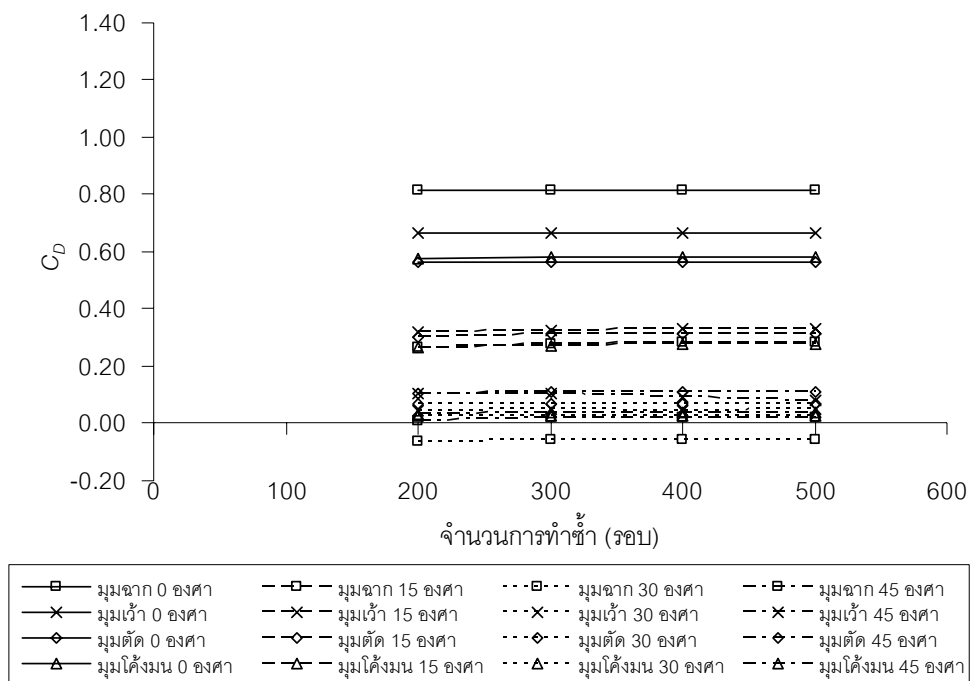
ภาพที่ 8.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x
กรณีอาคารเดี่ยว

จากภาพที่ 8.10 กรณีอาคารเดี่ยว ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารดูเข้าสู่ผลลัพธ์ในระดับเป็นที่น่าสนใจ กล่าวคือผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่จำนวนการทำซ้ำ 400 จนถึงจำนวนการทำซ้ำ 500 ที่มีค่ามากที่สุดได้แก่ กรณีหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากที่ทิศทางลม 45 องศา โดยที่มีค่าแตกต่างเท่ากับ 0.05 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 8.3

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำกรณีอาคารเดี่ยว
รูปแบบต่างๆ

รูปแบบหน้าต่างและทิศทางลม	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)			
	200	300	400	500
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก 0 องศา	1.0376	1.0451	1.0454	1.0454
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก 15 องศา	1.0942	1.1006	1.1012	1.1012
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก 30 องศา	1.0674	1.0838	1.0859	1.0861
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก 45 องศา	0.9274	0.9480	0.9518	0.9522
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า 0 องศา	0.8802	0.8885	0.8889	0.8889
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า 15 องศา	0.8944	0.9005	0.9009	0.9010
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า 30 องศา	0.8049	0.8144	0.8151	0.8151
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า 45 องศา	0.7131	0.7256	0.7267	0.7268
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด 0 องศา	0.7808	0.7875	0.7878	0.7878
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด 15 องศา	0.8018	0.8062	0.8065	0.8065
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด 30 องศา	0.7545	0.7580	0.7582	0.7582
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด 45 องศา	0.6831	0.6938	0.6946	0.6946
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน 0 องศา	0.8074	0.8133	0.8136	0.8136
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน 15 องศา	0.8348	0.8358	0.8358	0.8358
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน 30 องศา	0.8476	0.8508	0.8511	0.8511
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน 45 องศา	0.7266	0.7380	0.7391	0.7391



ภาพที่ 8.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการทำซ้ำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหลักกรณีอาคารคู่แฝด

จากภาพที่ 8.11 กรณีอาคารคู่แฝด ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักเข้าสู่ผลลัพธ์ในระดับเป็นที่น่าสนใจ กล่าวคือผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่จำนวนการทำซ้ำ 400 จนถึงจำนวนการทำซ้ำ 500 ที่มีค่ามากที่สุดได้แก่ กรณีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้าที่ทิศทางลม 45 องศา โดยที่มีค่าแตกต่างเท่ากับ 9.7 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 8.4

แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่แต่ละจำนวนการทำซ้ำของอาคารหลัก
กรณีอาคารคู่แฝดรูปแบบต่างๆ

รูปแบบหน้าตัดและทิศทางลม	จำนวนการทำซ้ำ (รอบ)			
	200	300	400	500
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก 0 องศา	0.8138	0.8143	0.8143	0.8143
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก 15 องศา	0.2685	0.2787	0.2817	0.2829
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก 30 องศา	-0.0618	-0.0568	-0.0559	-0.0552
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก 45 องศา	0.0115	0.0189	0.0186	0.0181
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า 0 องศา	0.6640	0.6638	0.6637	0.6637
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า 15 องศา	0.3192	0.3259	0.3286	0.3295
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า 30 องศา	0.0449	0.0479	0.0477	0.0478
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า 45 องศา	0.1029	0.1068	0.0904	0.0817
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด 0 องศา	0.5615	0.5640	0.5642	0.5642
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด 15 องศา	0.3002	0.3107	0.3133	0.3139
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด 30 องศา	0.0696	0.0708	0.0703	0.0702
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด 45 องศา	0.1066	0.1103	0.1105	0.1105
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน 0 องศา	0.5788	0.5811	0.5813	0.5814
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน 15 องศา	0.2632	0.2737	0.2762	0.2768
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน 30 องศา	0.0248	0.0288	0.0290	0.0290
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน 45 องศา	0.0345	0.0398	0.0402	0.0402

8.5 ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ผลการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว และผลการวิเคราะห์อาคารคู่แฝด ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกกุล, 2547)

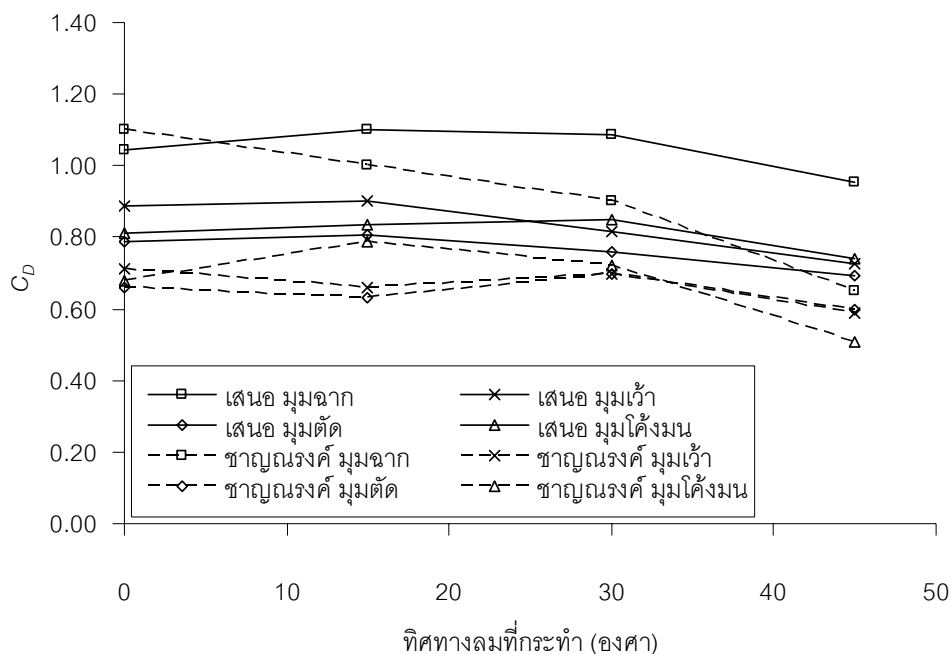
8.5.1 ผลการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารเดี่ยวที่มีรูปแบบหน้าตัดของอาคาร 4 รูปแบบ รวมทั้งคำนึงถึงผลของทิศทางลม 4 ทิศทาง คือ 0, 15, 30 และ 45 องศา แสดงได้ดังตารางที่ 8.5 และภาพที่ 8.12

ตารางที่ 8.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารเดี่ยว

รูปแบบหน้าตัด	ทิศทางลมที่กระทำ (องศา)			
	0	15	30	45
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก	1.05 (1.10)	1.10 (1.00)	1.09 (0.90)	0.95 (0.65)
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า	0.89 (0.71)	0.90 (0.66)	0.82 (0.70)	0.73 (0.59)
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด	0.79 (0.66)	0.81 (0.63)	0.76 (0.70)	0.69 (0.60)
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน	0.81 (0.68)	0.84 (0.79)	0.85 (0.72)	0.74 (0.51)

หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บได้จากการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกกุล, 2547)



ภาพที่ 8.12 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารเดี่ยวที่มีมุมอาคาร
รูปแบบต่างๆ สำหรับทิศทางลมที่กระทำ

เมื่อพิจารณาผลของการปรับแต่งมุมอาคารตามผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 8.5 และภาพที่ 8.12 พบว่า ผลของการปรับแต่งมุมอาคารทั้ง 3 รูปแบบช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ในทุกๆ ทิศทางลมเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุฒกุล, 2547) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน กรณีพิจารณาผลของการปรับแต่งมุมอาคารสำหรับแต่ละทิศทางลมได้ผลดังนี้

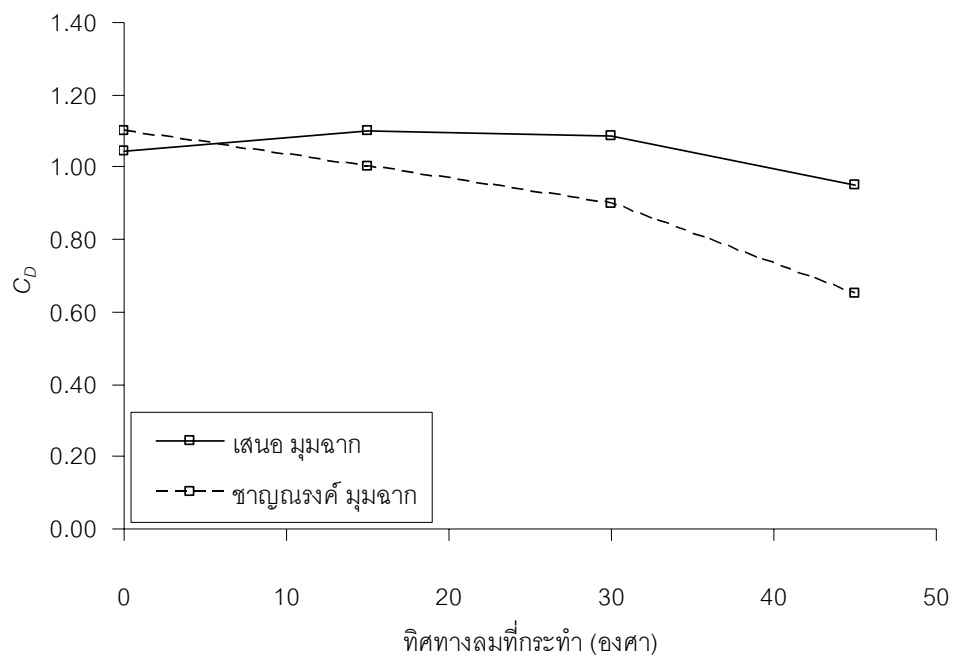
1. ทิศทางลม 0 องศา การปรับแต่งมุมแบบมุมตัดให้ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุด โดยลดลงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุฒกุล, 2547) การปรับแต่งมุมแบบมุมตัดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุดเช่นเดียวกัน โดยลดลงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์
2. ทิศทางลม 15 องศา การปรับแต่งมุมแบบมุมตัดให้ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุด โดยลดลงประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุฒกุล, 2547) การปรับแต่งมุมแบบมุมตัด

ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุดเช่นเดียวกัน โดยลดลงประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์

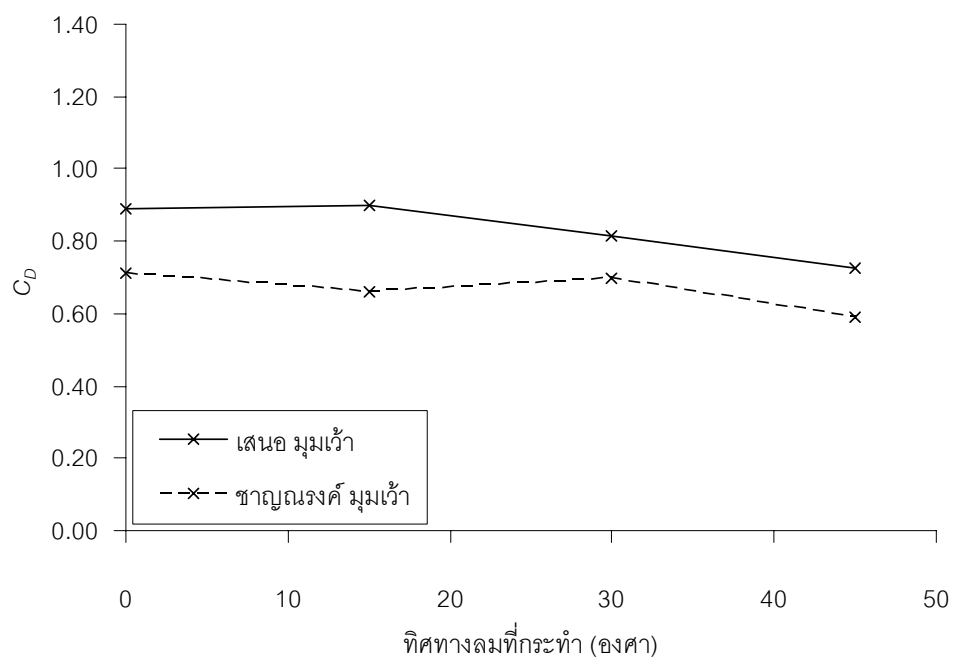
3. ทิศทางลม 30 องศา การปรับแต่งมุมแบบมุมตัดให้ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุด โดยลดลงประมาณ 31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุฒกุล, 2547) การปรับแต่งมุมแบบมุมเว้าและมุมตัดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุดเท่ากัน โดยลดลงประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์
4. ทิศทางลม 45 องศา การปรับแต่งมุมแบบมุมตัดให้ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุด โดยลดลงประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุฒกุล, 2547) การปรับแต่งมุมแบบมุมโค้งมนให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุด โดยลดลงประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 8.13 ถึงภาพที่ 8.16 แสดงผลกรณีพิจารณาผลของทิศทางลมสำหรับหน้าต่างแต่ละ

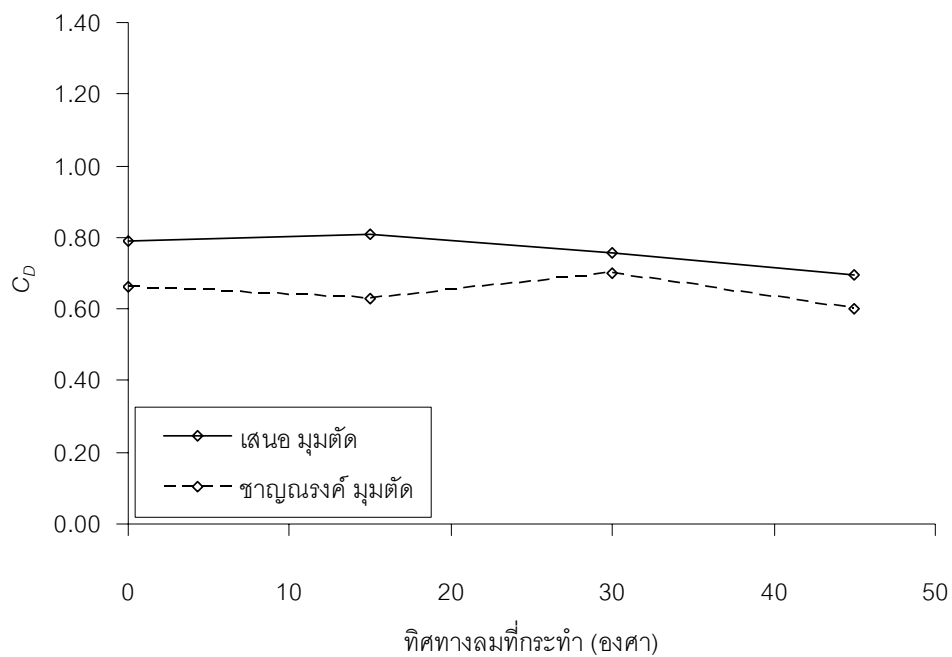
รูปแบบ



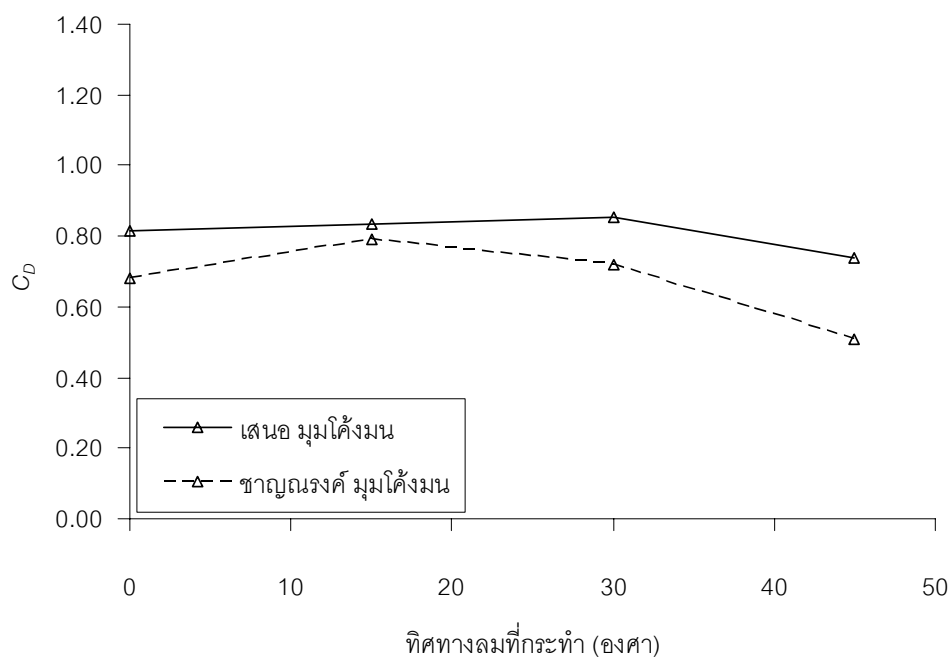
ภาพที่ 8.13 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหน้าต่างดัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก
สำหรับทิศทางลมที่กระทำ



ภาพที่ 8.14 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหน้าต่างดัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า
สำหรับทิศทางลมที่กระทำ



ภาพที่ 8.15 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด สำหรับทิศทางลมที่กระทำ



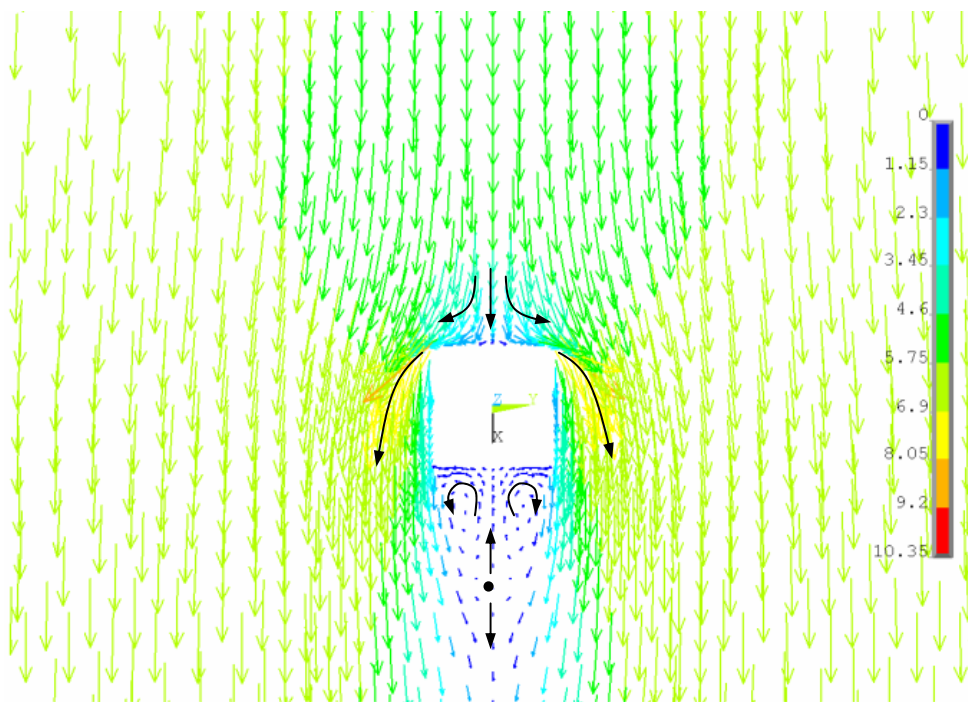
ภาพที่ 8.16 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน สำหรับทิศทางลมที่กระทำ

จากภาพที่ 8.13 ถึงภาพที่ 8.16 กรณีพิจารณาผลของทิศทางลมสำหรับหน้าต่างแต่ละรูปแบบ ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x บ่งชี้ว่า อาคารหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมอาคารทั้ง 4 รูปแบบมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ก่อนข้างคองที่ตั้งแต่ทิศทางลม 0 ถึง 30 องศา หลังจากนั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงที่ทิศทางลม 45 องศา และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกกุล, 2547) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน โดยที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกกุล, 2547) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ก่อนข้างคองที่ตั้งแต่ทิศทางลม 0 ถึง 30 องศา และให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงที่ทิศทางลม 45 องศา สำหรับอาคารหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า มุมตัด และมุมโค้งมน ยกเว้นอาคารหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากจากการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกกุล, 2547) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงแบบเชิงเส้นตั้งแต่ 0 ถึง 45 องศา

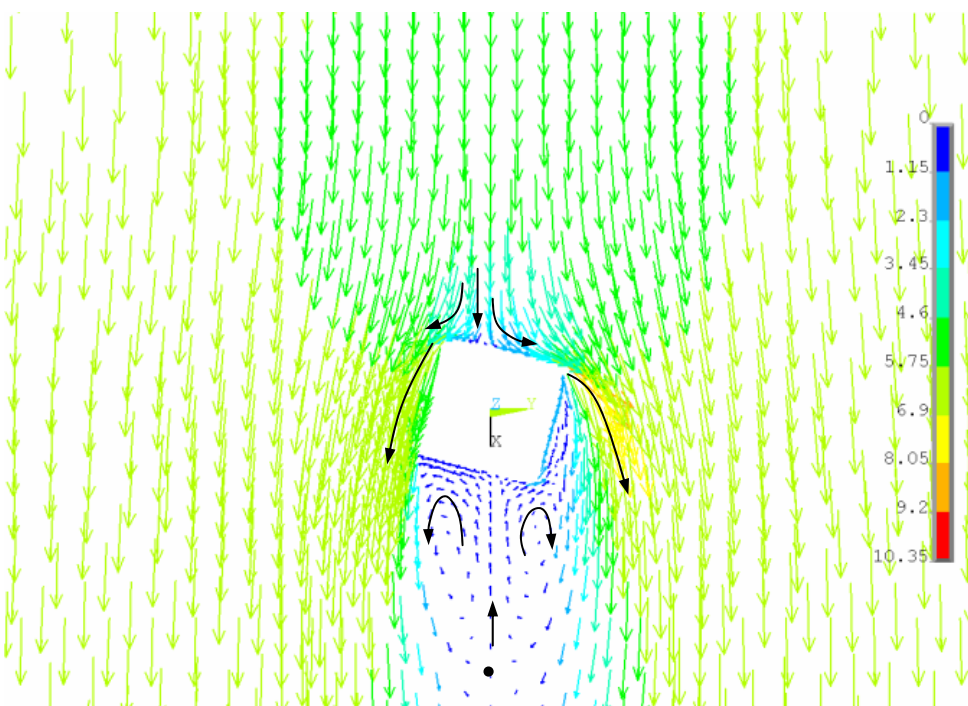
การไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมและเส้นชั้นความดันลมที่กระทำรอบๆขอบอาคารสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 8.17 ถึงภาพที่ 8.20 พบว่าลักษณะของลมที่กระทำรอบๆ อาคารหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก มุมเว้า มุมตัด และมุมโค้งมน โดยรวมแล้วไม่แตกต่างกันมากนักในทุกๆ กรณี อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของการปรับแต่งมุมอาคารสำหรับทิศทางลมหนึ่งๆ ข้อสังเกตที่พบคือพฤติกรรมการแยกตัว (Separation) ของลมบริเวณมุมอาคารหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากมีลักษณะขวางลม ในขณะที่หน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า มุมตัด และมุมโค้งมน มีลักษณะลู่ลมมากกว่า อีกทั้งลักษณะลมหมุน (Wake) บริเวณด้านหลังอาคารทั้งสามรูปแบบนี้เป็นลมหมุนที่มีขนาดวงเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากซึ่งมีลมหมุนวงใหญ่กว่าดังนั้นผลของการปรับแต่งมุมอาคารจะทำให้เกิดการลู่ลมมากขึ้น ในกรณีที่พิจารณาผลของทิศทางลมพบว่าเมื่อทิศทางลมเริ่มเปลี่ยนไปจาก 0 ถึง 45 องศา ลมหมุนบริเวณด้านหลังอาคารยิ่งไกลออกไป

จากเส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 8.21 ถึงภาพที่ 8.24 จะเห็นได้ว่าด้านที่ปะทะลมของอาคารมีลักษณะเป็นแรงดัน (Pressure) ส่วนด้านที่เหลื่อมมีลักษณะเป็นแรงดูด (Suction) โดยที่หน้าต่างที่มีการปรับแต่งมุมด้านที่ปะทะลมเป็นแรงดันลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก เนื่องจากมีลักษณะลู่ลมมากกว่าตามที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น ด้วยเหตุนี้การปรับแต่งมุมอาคารจึงให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลง

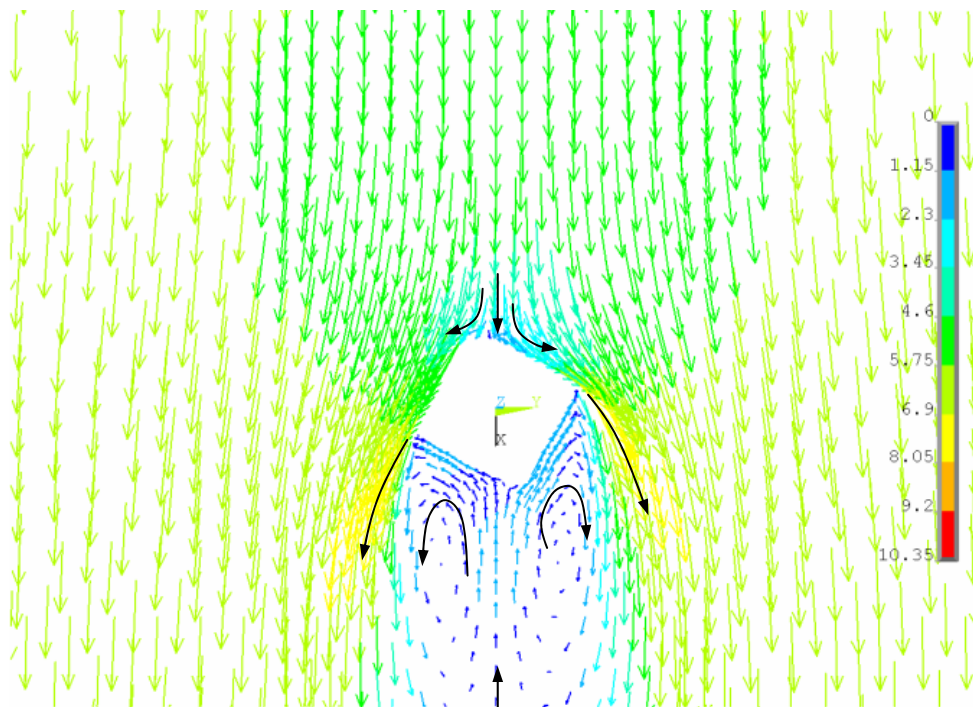


ก. 0 องศา

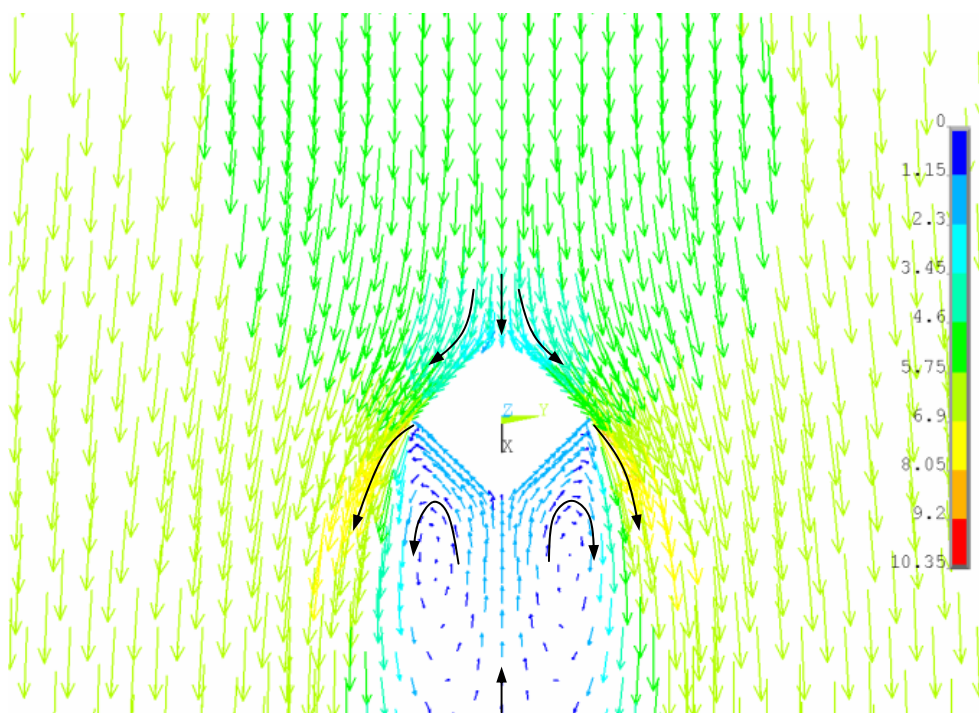


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.17 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยว
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (เมตรต่อวินาที)

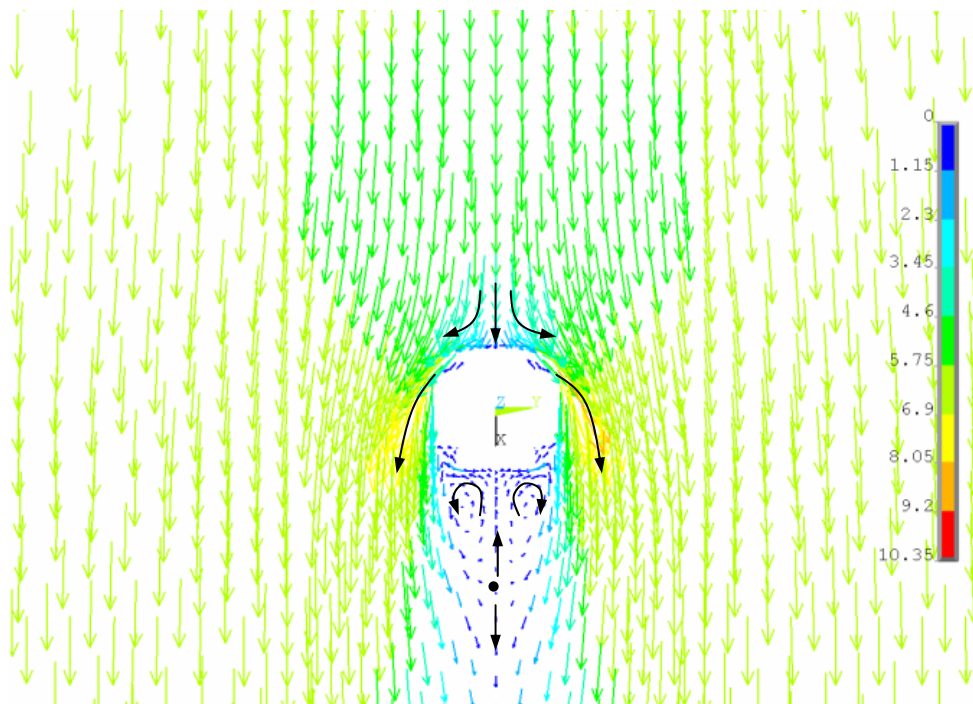


ค. 30 องศา

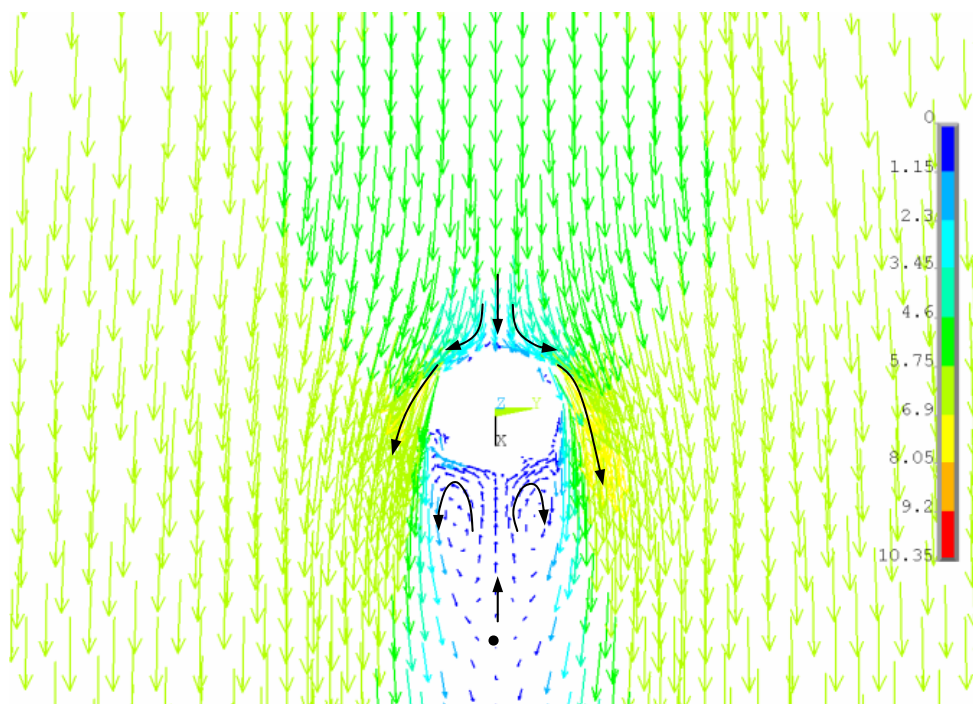


ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.17 (ต่อ) เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยว
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (เมตรต่อวินาที)

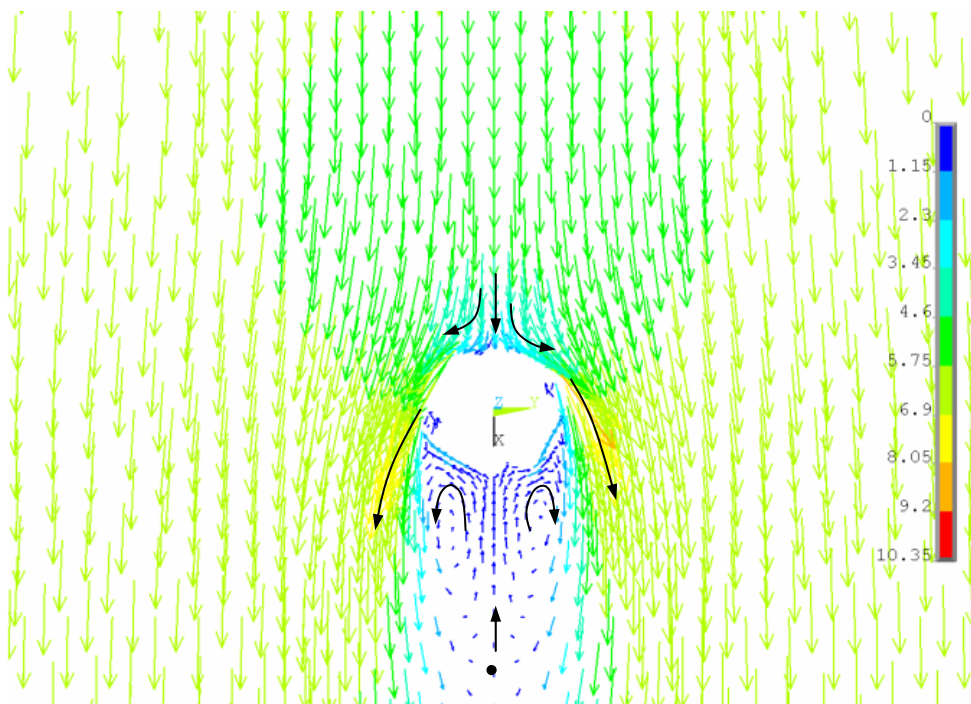


ก. 0 องศา

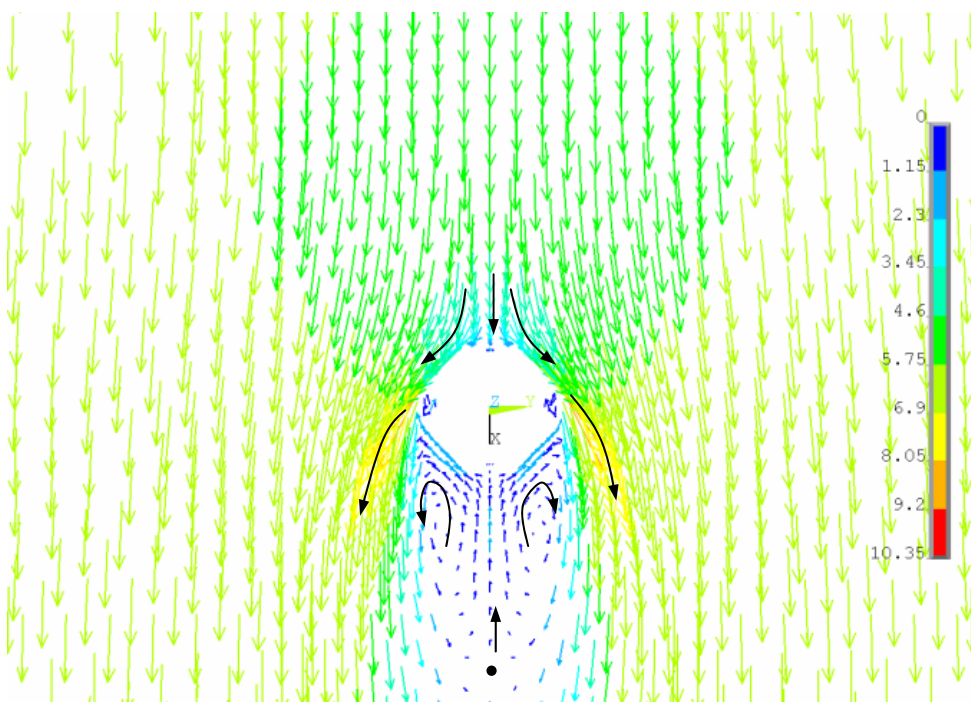


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.18 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยว
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า (เมตรต่อวินาที)

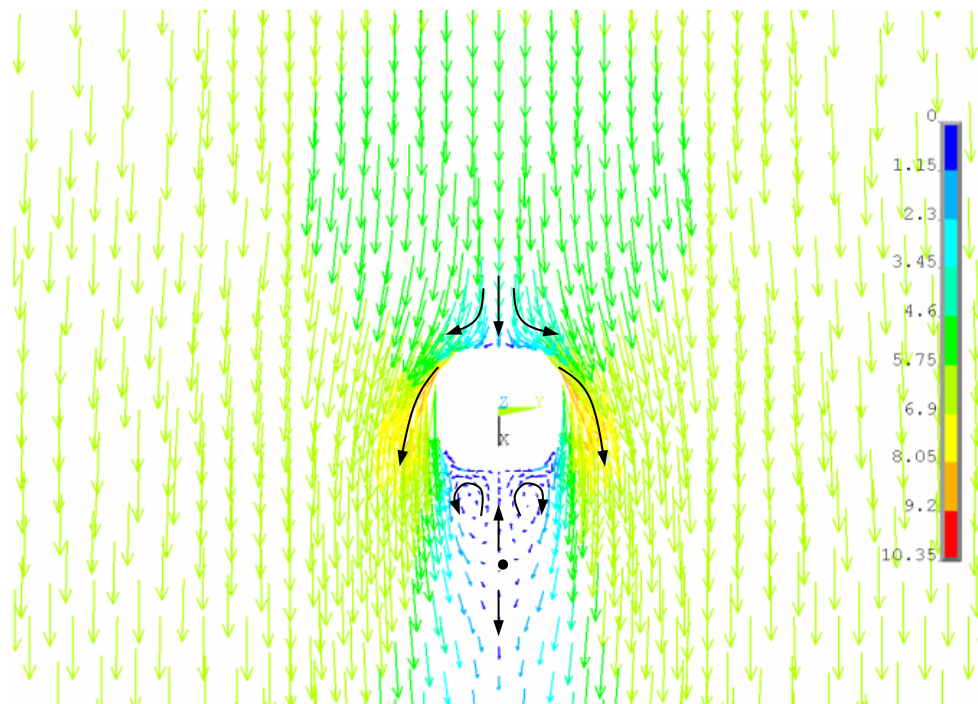


ค. 30 องศา

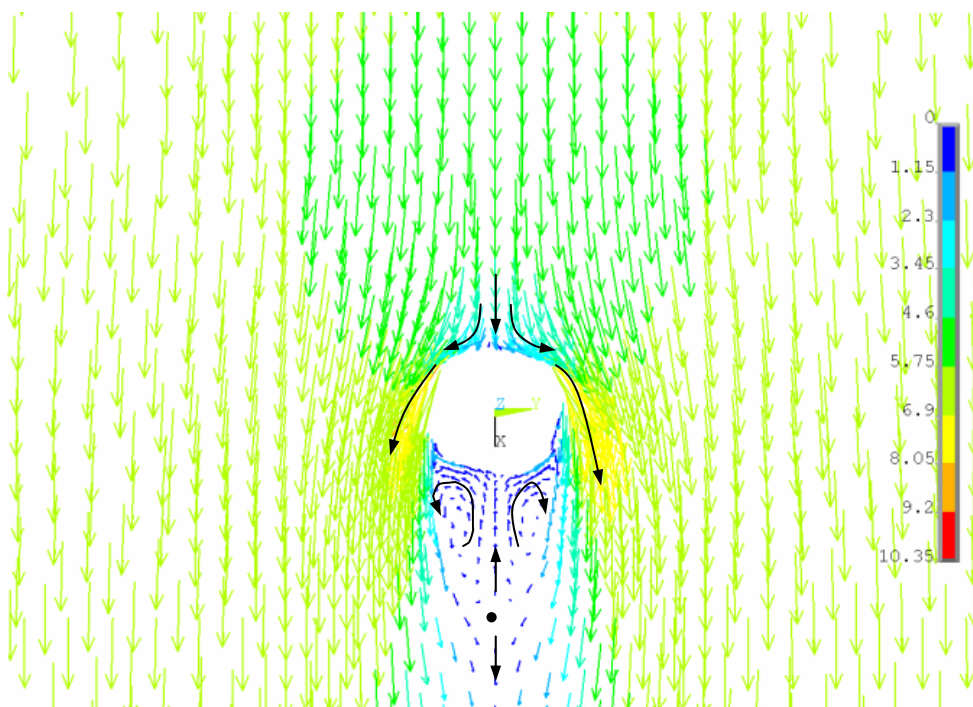


ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.18 (ต่อ) เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยว
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า (เมตรต่อวินาที)

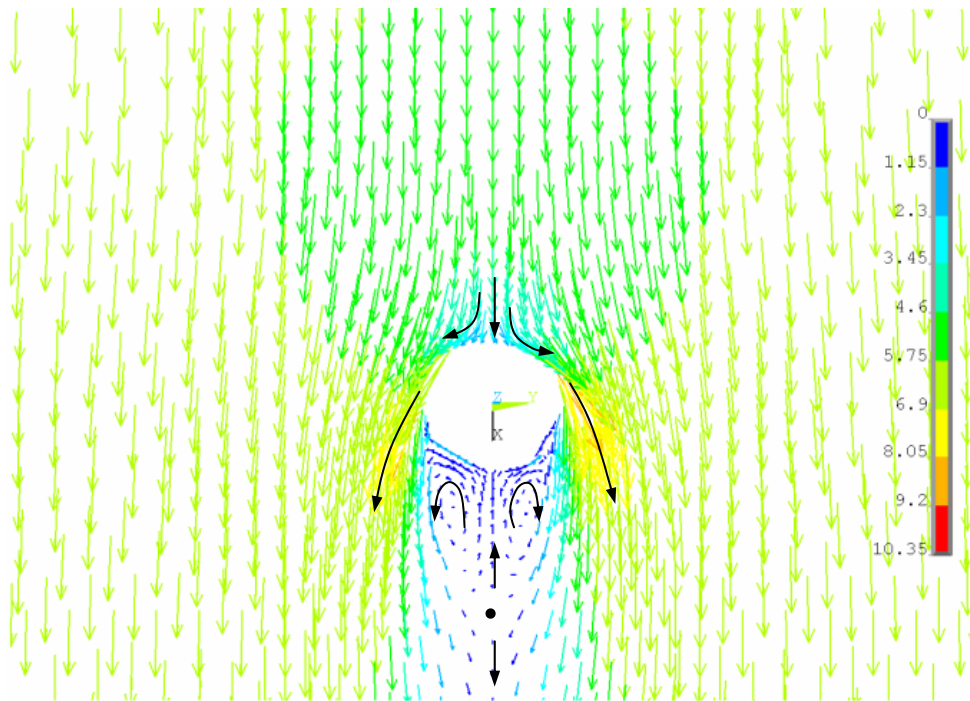


ก. 0 องศา

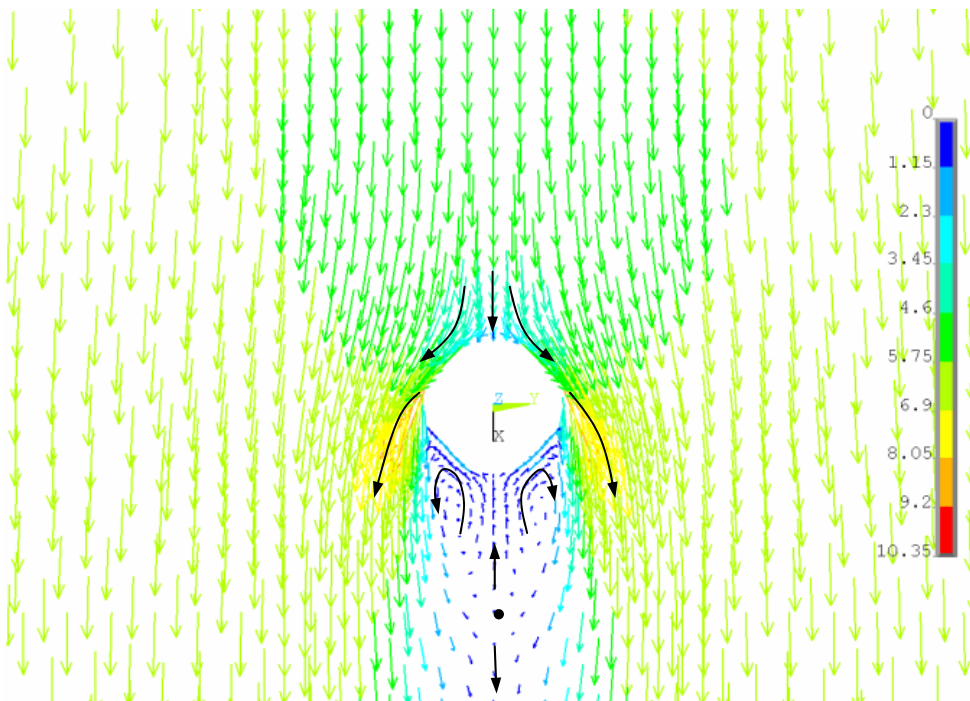


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.19 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยว
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (เมตรต่อวินาที)

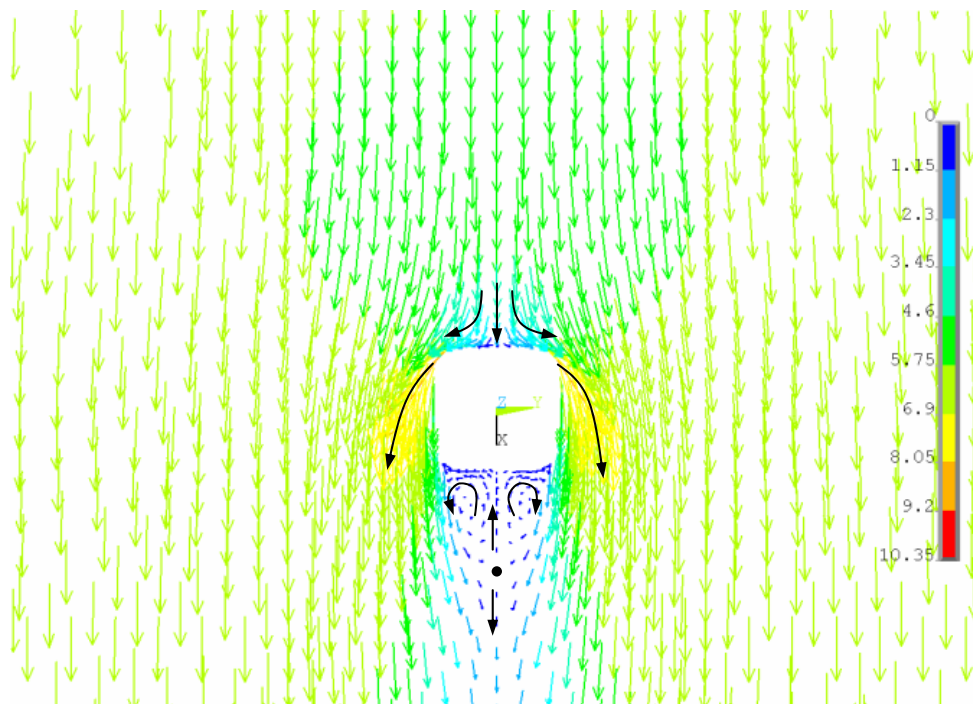


ค. 30 องศา

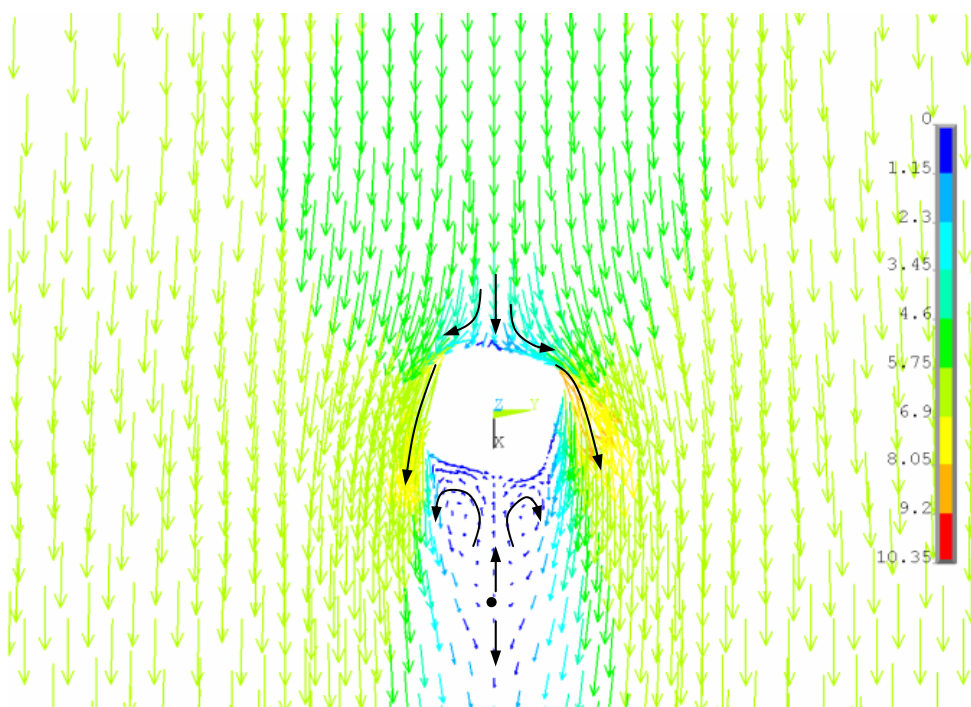


ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.19 (ต่อ) เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยว
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (เมตรต่อวินาที)

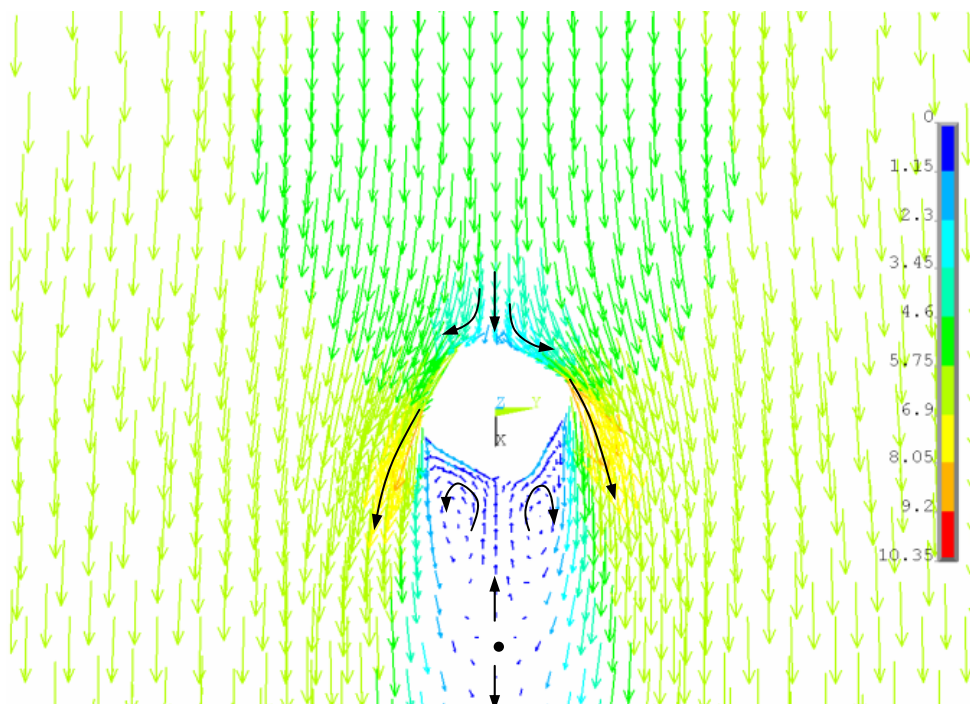


ก. 0 องศา

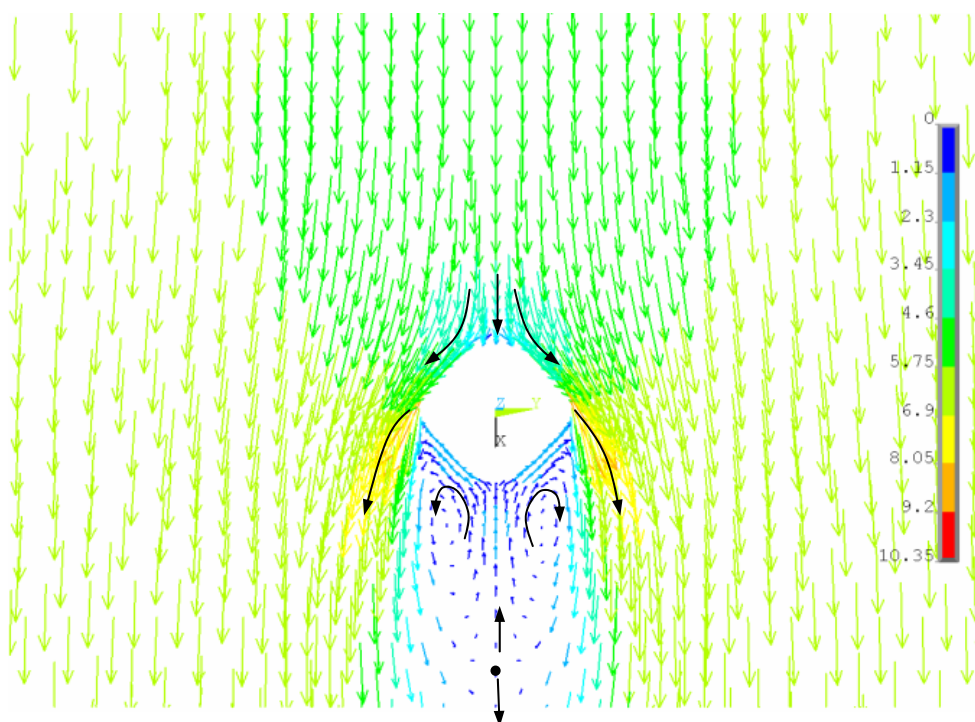


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.20 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยว
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (เมตรต่อวินาที)

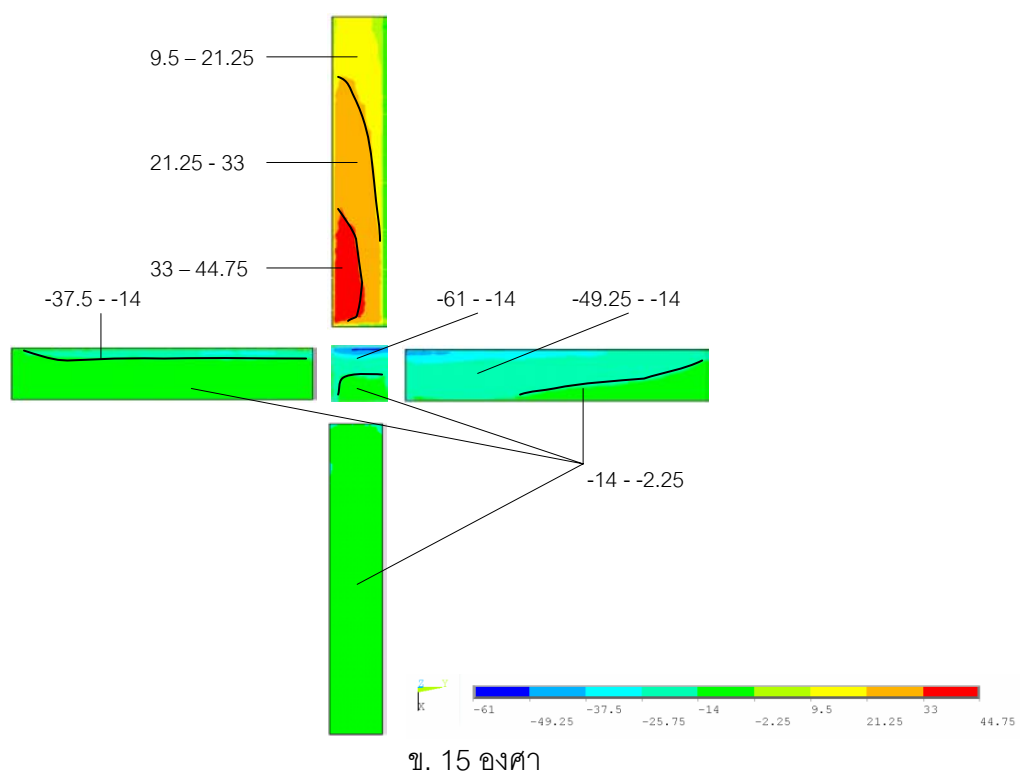
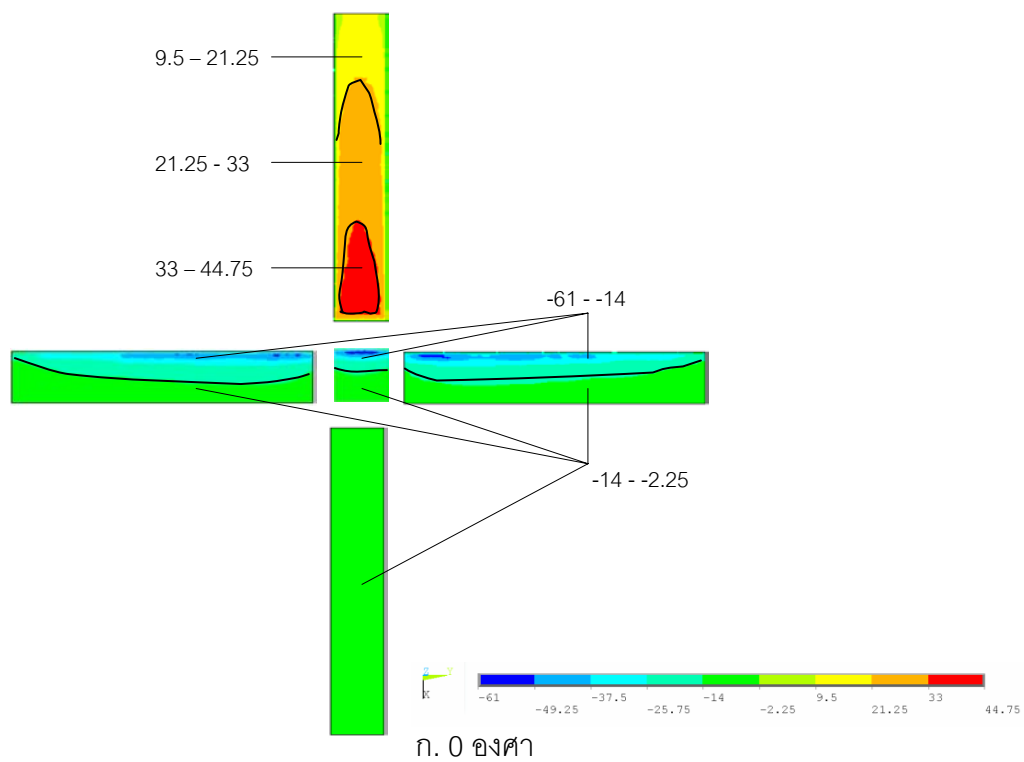


ค. 30 องศา

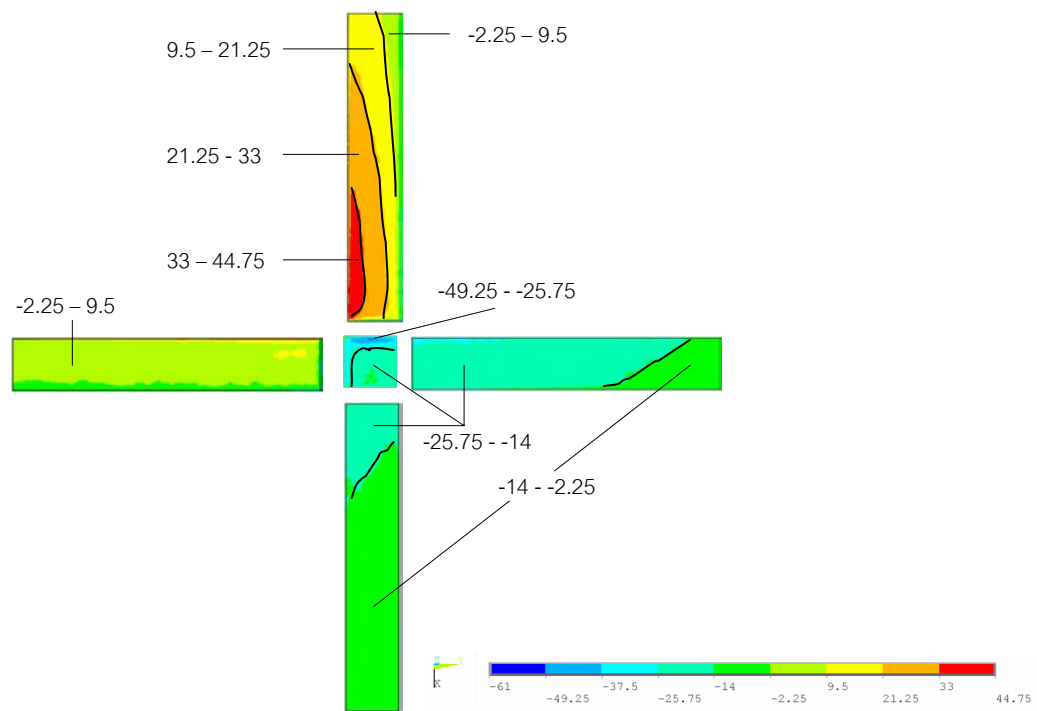


ง. 45 องศา

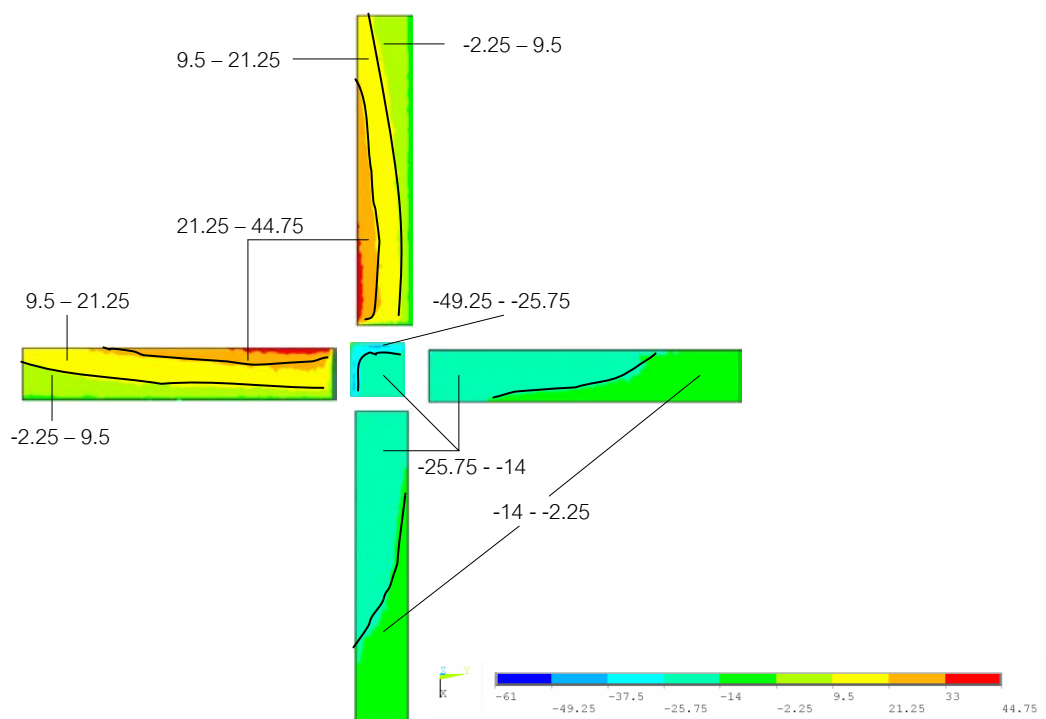
ภาพที่ 8.20 (ต่อ) เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารเดี่ยว
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (เมตรต่อวินาที)



ภาพที่ 8.21 ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก
(นิวตันต่อตารางเมตร)

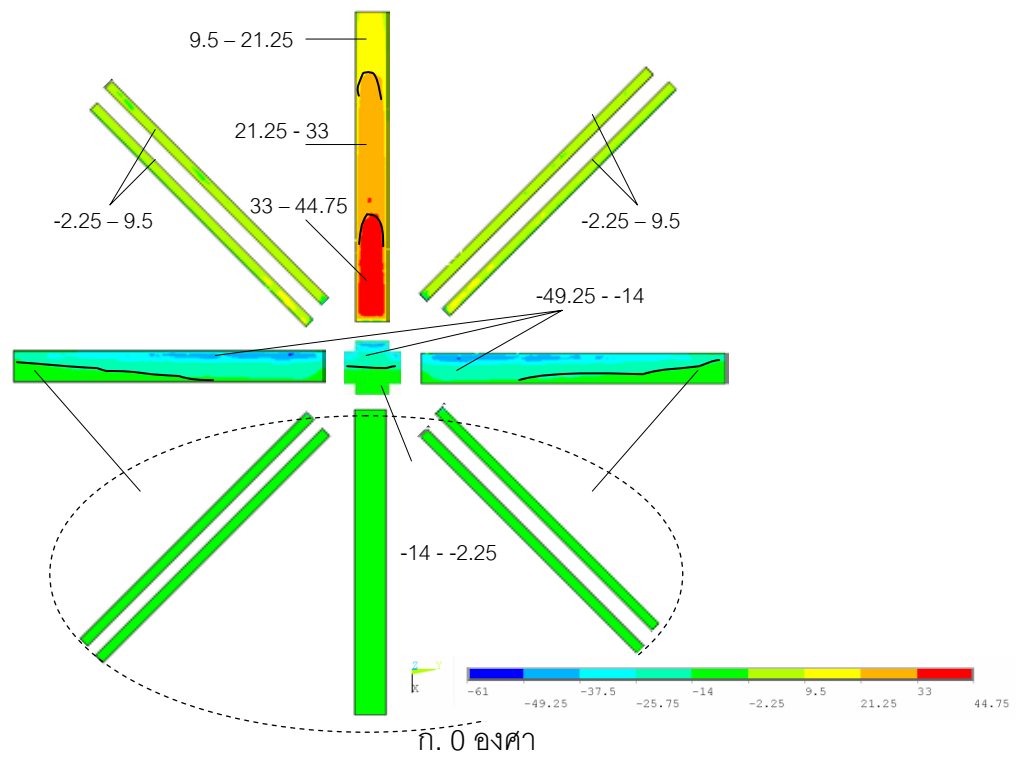


ค. 30 องศา

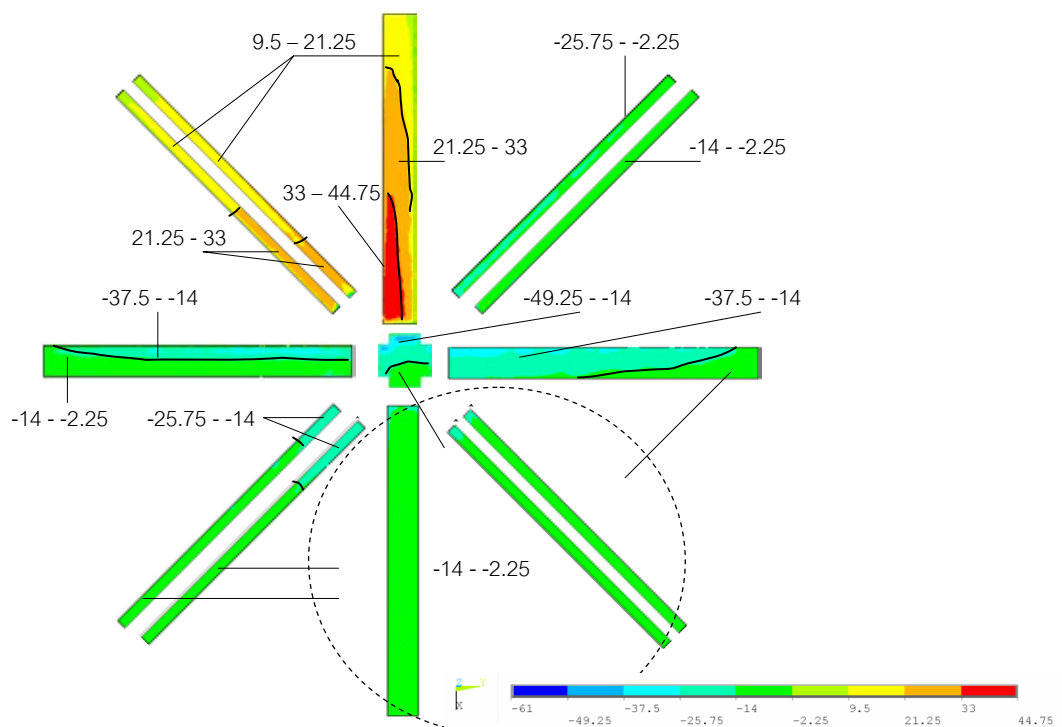


ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.21 (ต่อ) ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก
(นิวตันต่อตารางเมตร)

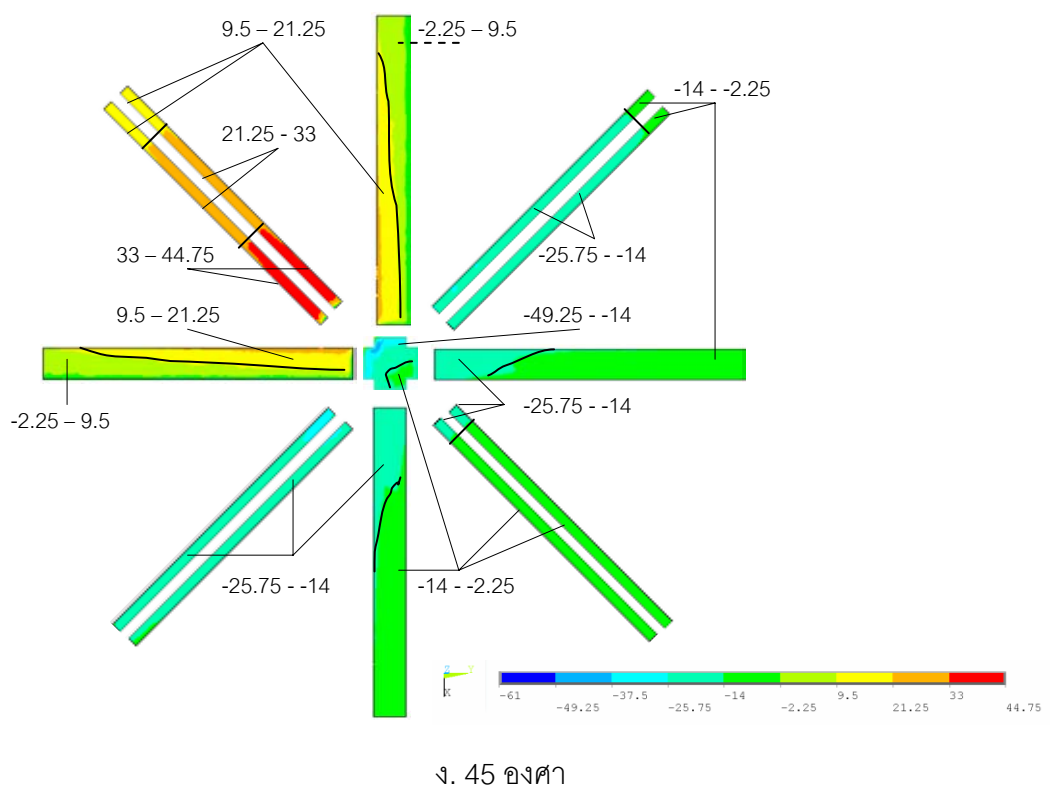
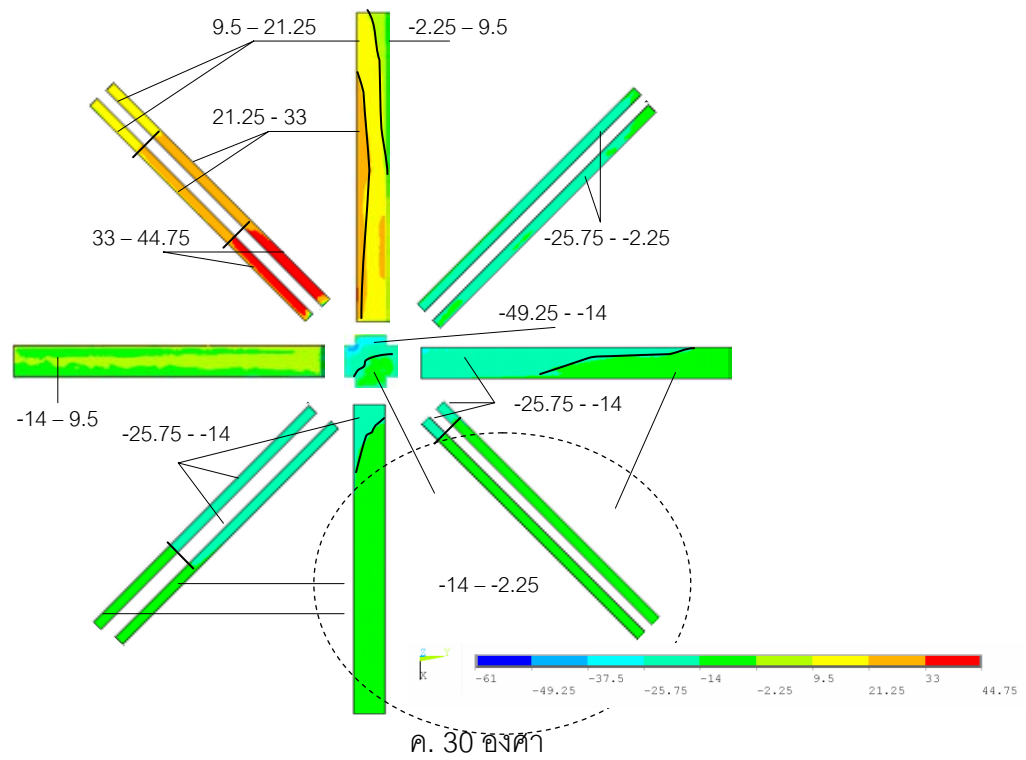


ก. 0 องศา

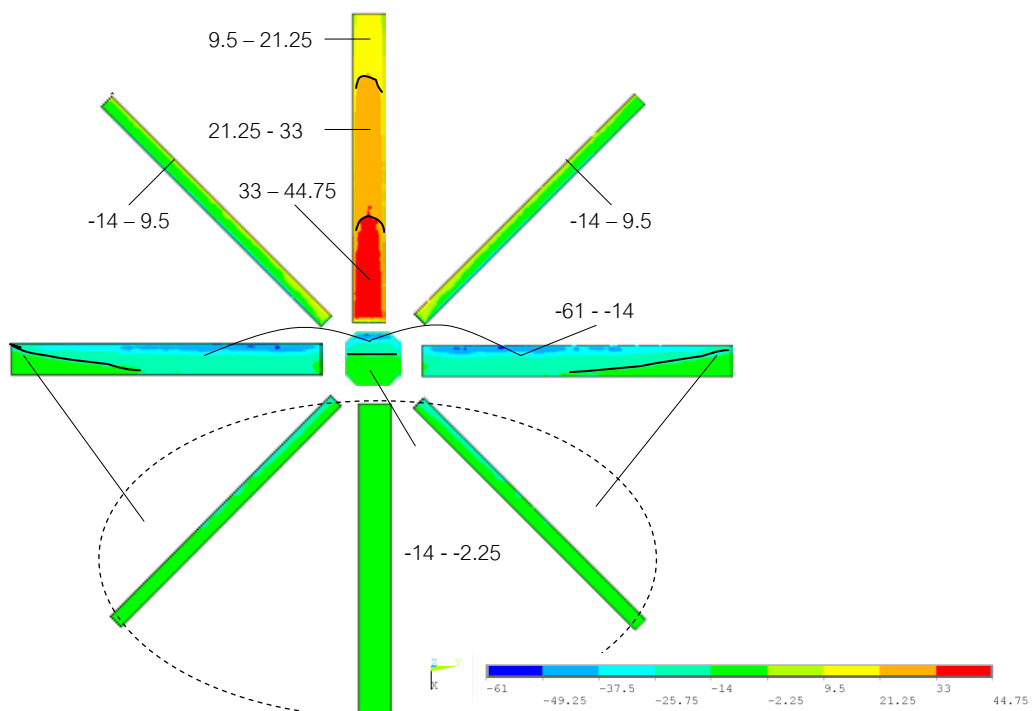


ข. 15 องศา

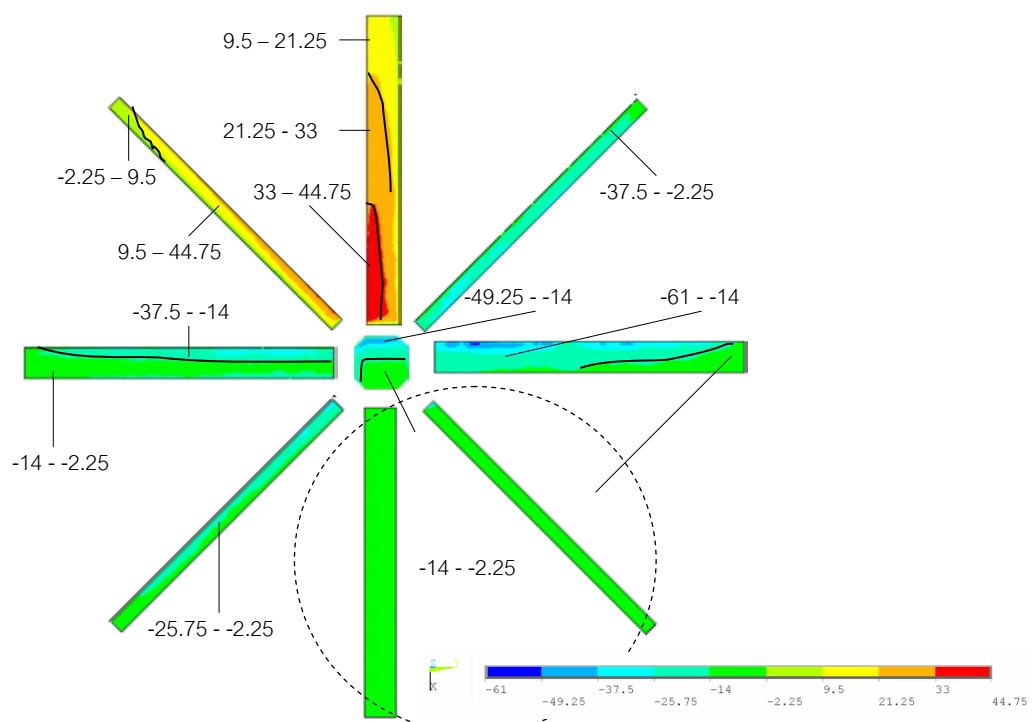
ภาพที่ 8.22 ภาพคลื่นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า
(นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 8.22 (ต่อ) ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า
(นิวตันต่อตารางเมตร)

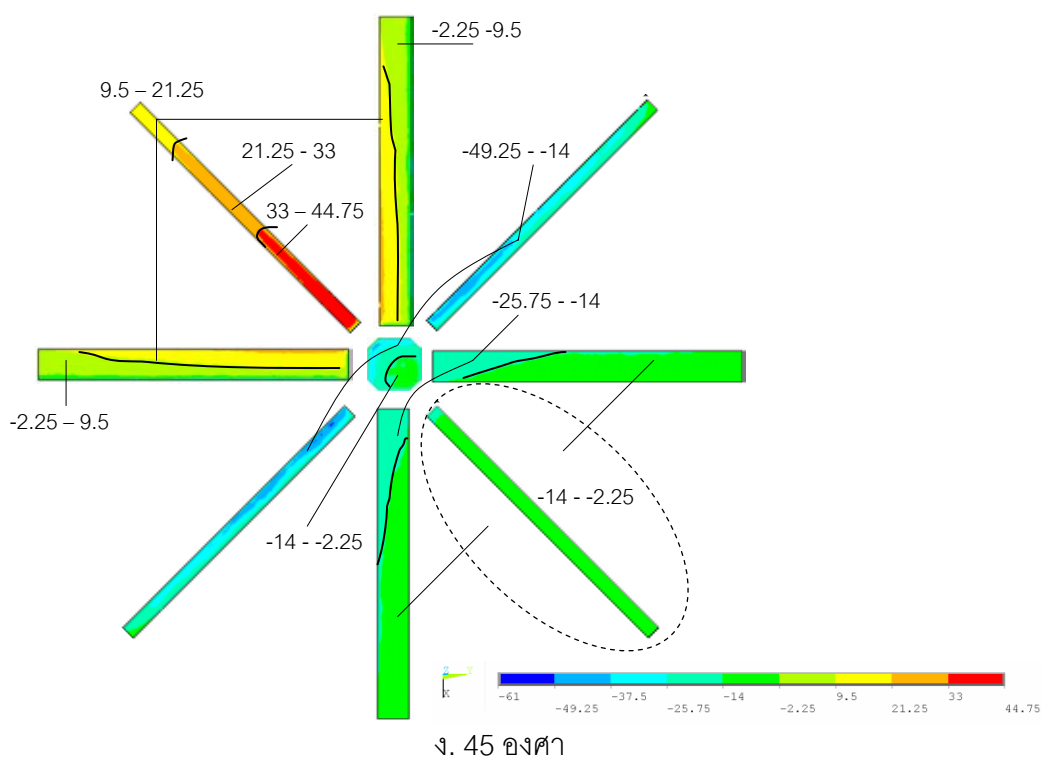
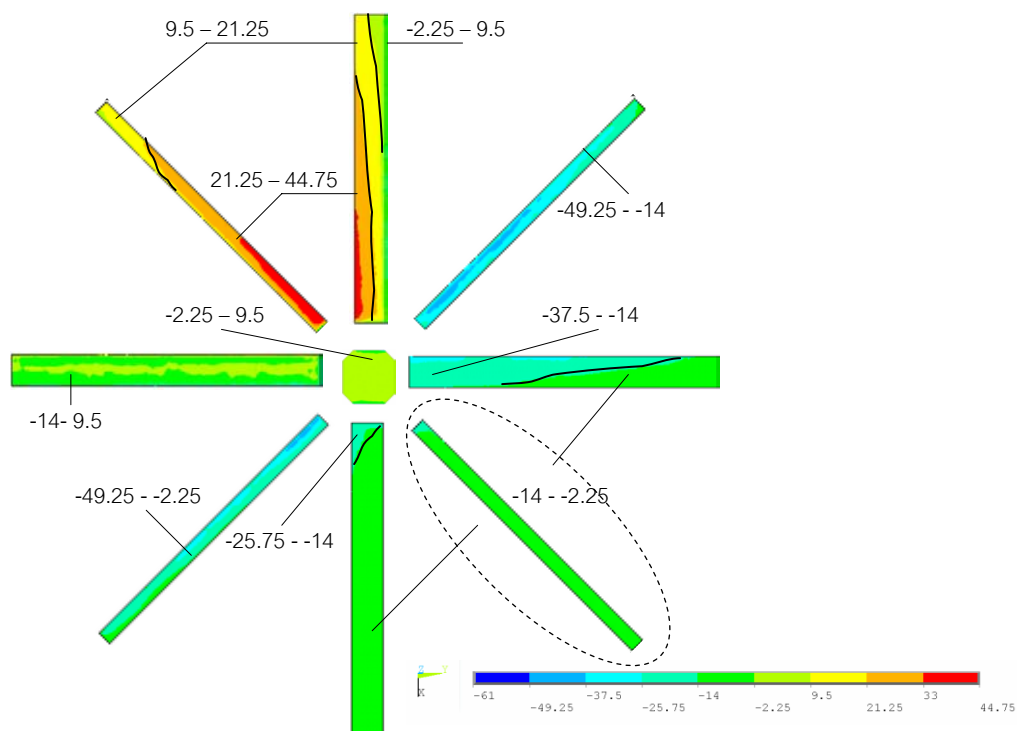


ก. 0 องศา

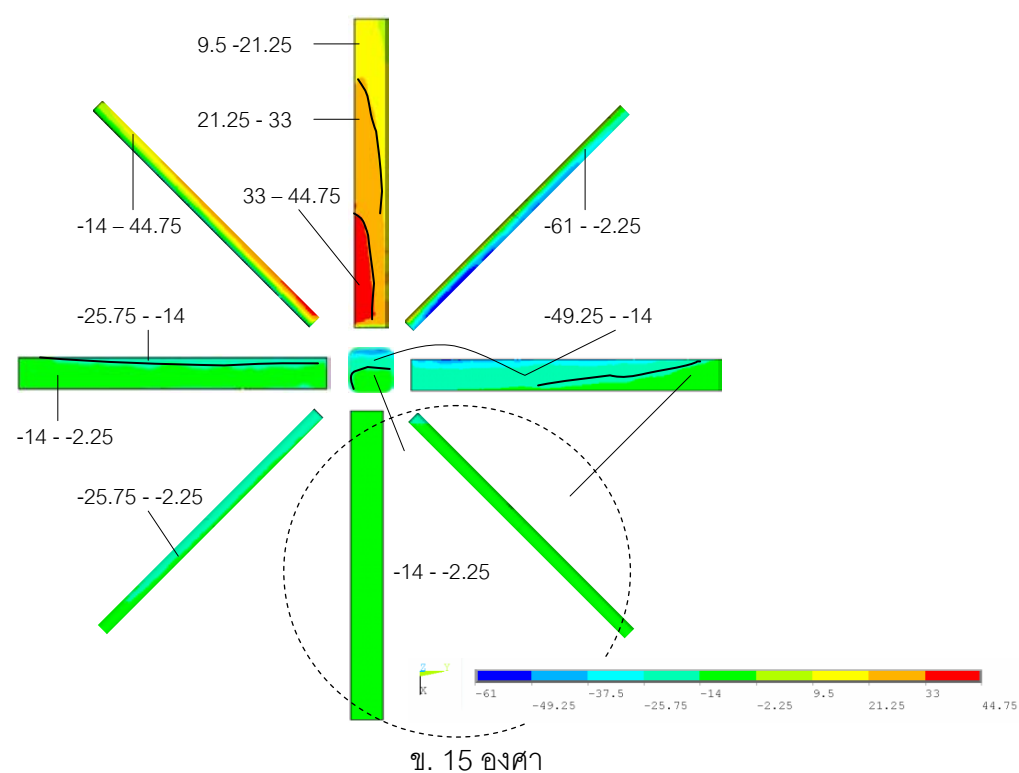
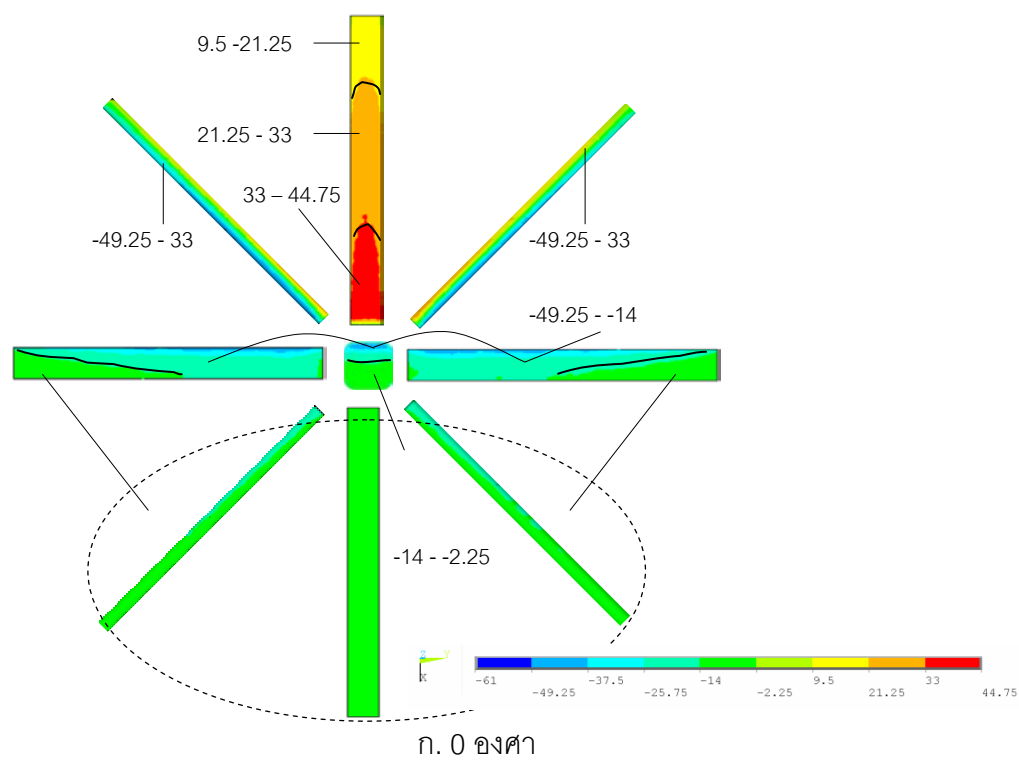


ข. 15 องศา

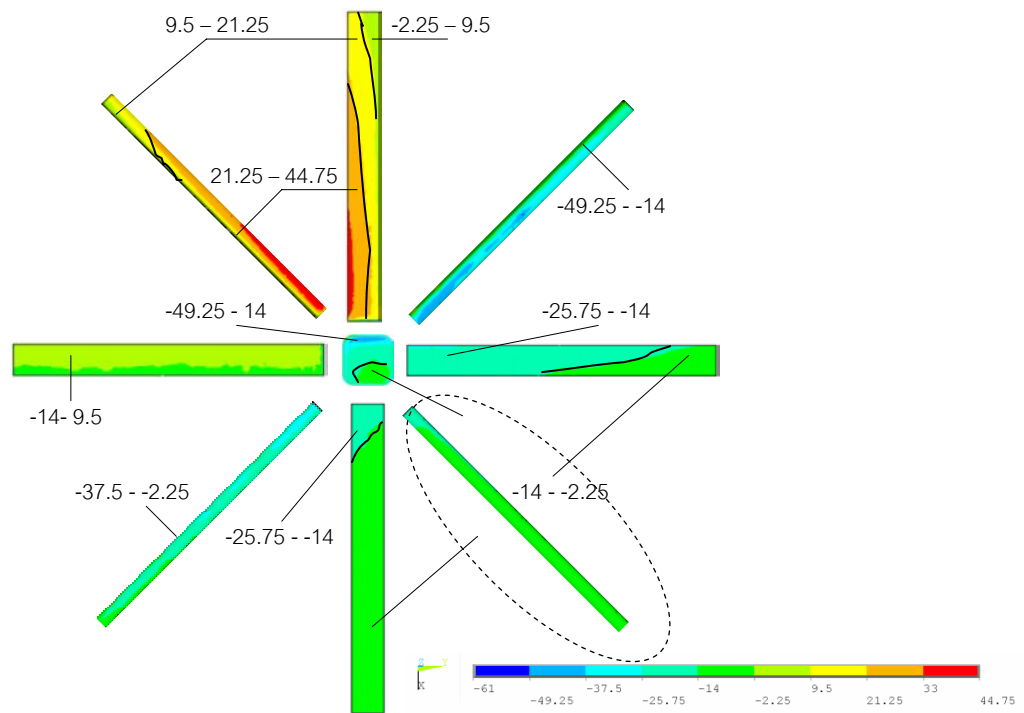
ภาพที่ 8.23 ภาพคลื่นเส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด
(นิวตันต่อตารางเมตร)



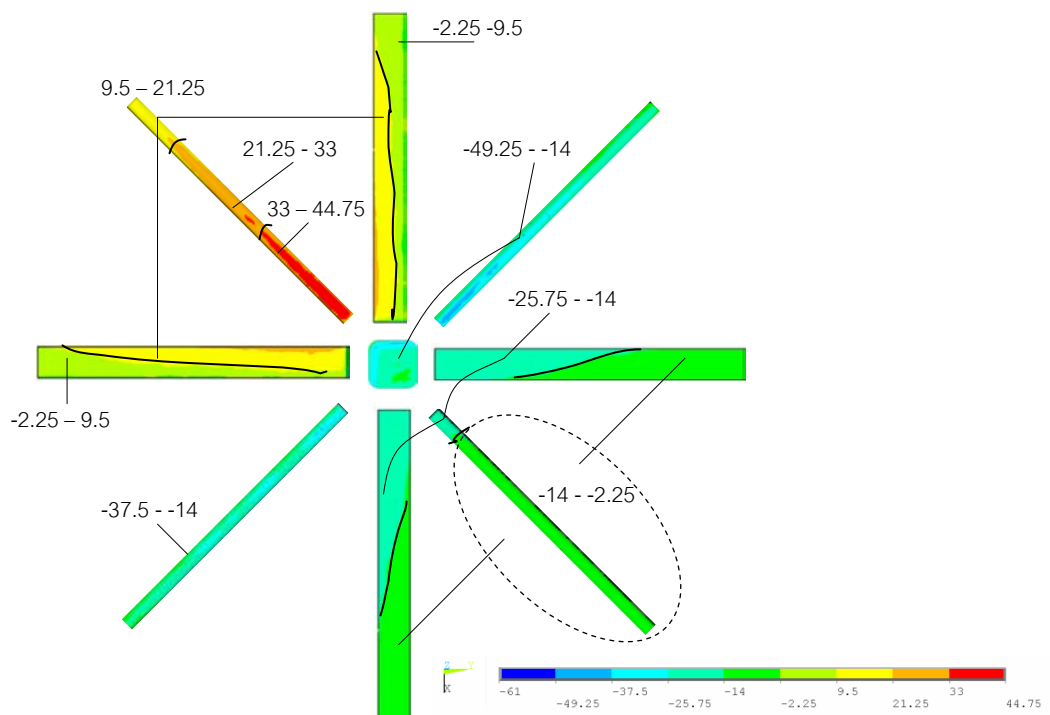
ภาพที่ 8.23 (ต่อ) ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด
(นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 8.24 ภาพคลื่นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน
(นิวตันต่อตารางเมตร)



ค. 30 องศา



ง. 45 องศา

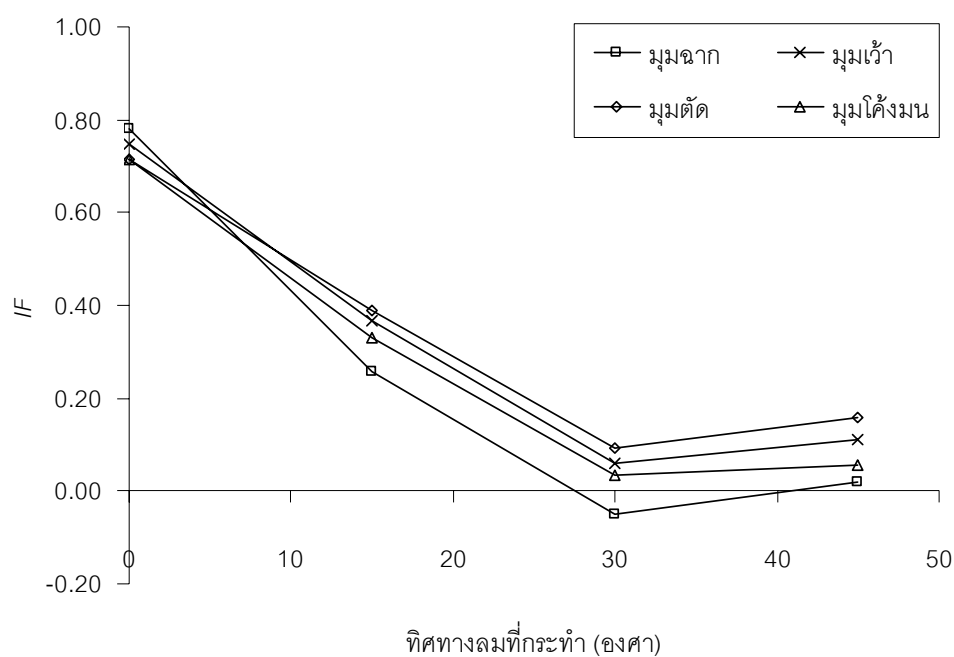
ภาพที่ 8.24 (ต่อ) ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน
(นิวตันต่อตารางเมตร)

8.5.2 ผลการวิเคราะห์อาคารคู่แฝด

การวิเคราะห์กรณีอาคารคู่แฝดเสนอในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักกรณีมีอาคารข้างเคียงต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารหลักกรณีไม่มีอาคารข้างเคียง (Interference factors, IF) ตามสมการที่ 8.2 ผลการวิเคราะห์ค่า IF แสดงได้ดังตารางที่ 8.6 และภาพที่ 8.25

ตารางที่ 8.6 ผลการวิเคราะห์ค่า IF ของอาคารหลัก

รูปแบบหน้าต่าง	ทิศทางลมที่กระทำ (องศา)			
	0	15	30	45
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก	0.78	0.26	-0.05	0.02
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า	0.75	0.37	0.06	0.11
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด	0.72	0.39	0.09	0.16
สี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน	0.71	0.33	0.03	0.05

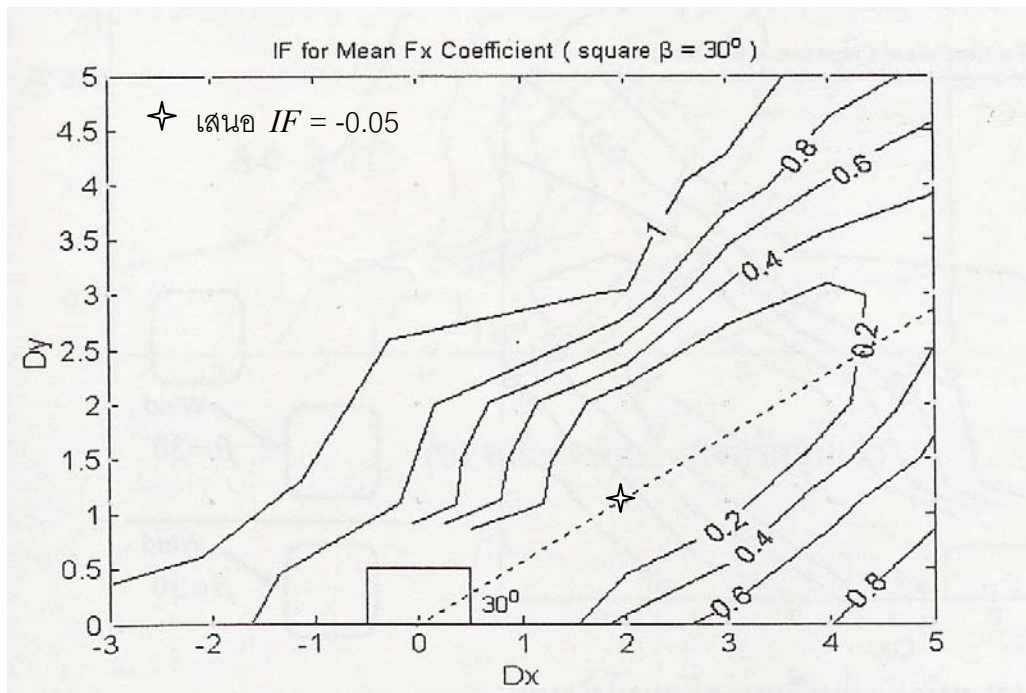


ภาพที่ 8.25 ค่า IF ของอาคารหลักที่มีรูปแบบหน้าต่างต่างๆ สำหรับทิศทางลมที่กระทำ

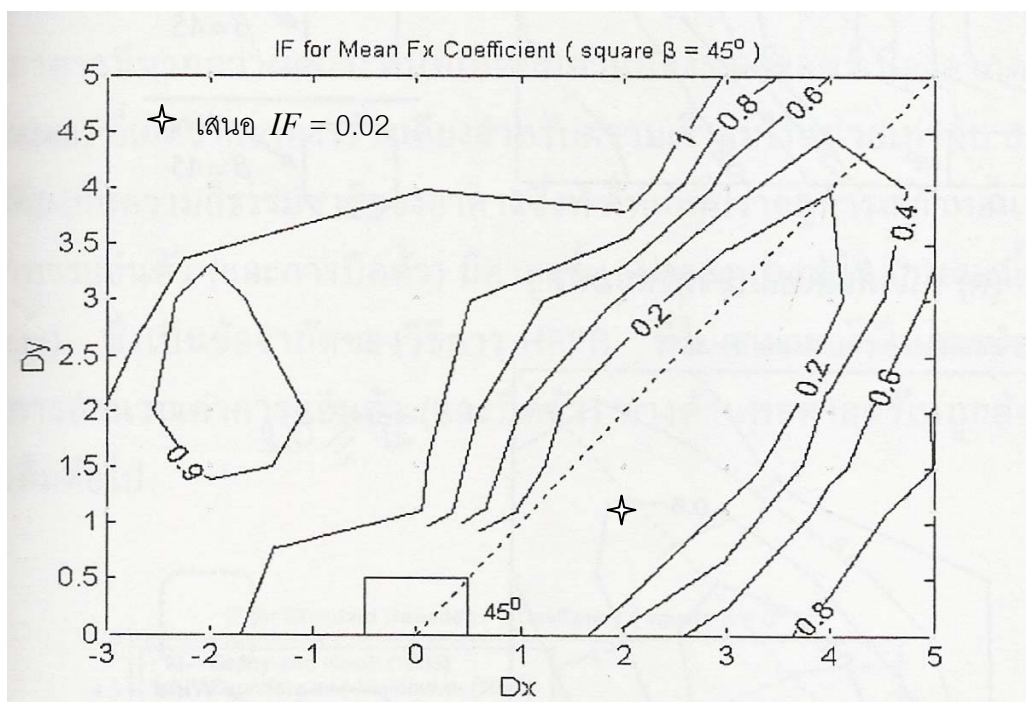
เมื่อพิจารณาผลของการปรับแต่งมุมอาคารสำหรับแต่ละทิศทางลมกรณีอาคารคู่แฝดตามผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 8.6 และภาพที่ 8.25 พบว่า ผลของการปรับแต่งมุมอาคารทั้ง 3 รูปแบบไม่มีอิทธิพลมากนักต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักในทุกๆ ทิศทางลมเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก โดยที่ทิศทางลม 0 องศา หน้าตัดทุกรูปแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.71 – 0.78 ที่ทิศทางลม 15 องศา หน้าตัดทุกรูปแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.26 – 0.39 ที่ทิศทางลม 30 องศา หน้าตัดทุกรูปแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง -0.05 – 0.09 และที่ทิศทางลม 45 องศา หน้าตัดทุกรูปแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.02 – 0.16

อาคารข้างเคียงที่ตั้งอยู่บริเวณเหนือลมตามทิศแกน x มีผลอย่างมากต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักโดยเฉพาะเมื่อทิศทางลมตั้งแต่ 15 ถึง 45 องศา สำหรับที่ทิศทางลม 30 องศา อาคารหลักมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงมากที่สุดโดยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทั้งนี้สอดคล้องกันกับทิศทางของอาคารข้างเคียงกับอาคารหลักซึ่งทำมุมกันโดยประมาณ 29 องศา

กรณีพิจารณาผลของทิศทางลมสำหรับหน้าตัดแต่ละรูปแบบ ผลการวิเคราะห์ค่า IF ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสงกุล, 2547) โดยที่ผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสงกุล, 2547) แสดงอยู่ในรูปของเส้นชั้น (Contour) IF ($1D_x = 1D_y = 0.075$ เมตร) ให้สัญลักษณ์ ✨ แทนตำแหน่งของอาคารข้างเคียง แสดงได้ดังภาพที่ 8.26 ถึงภาพที่ 8.29



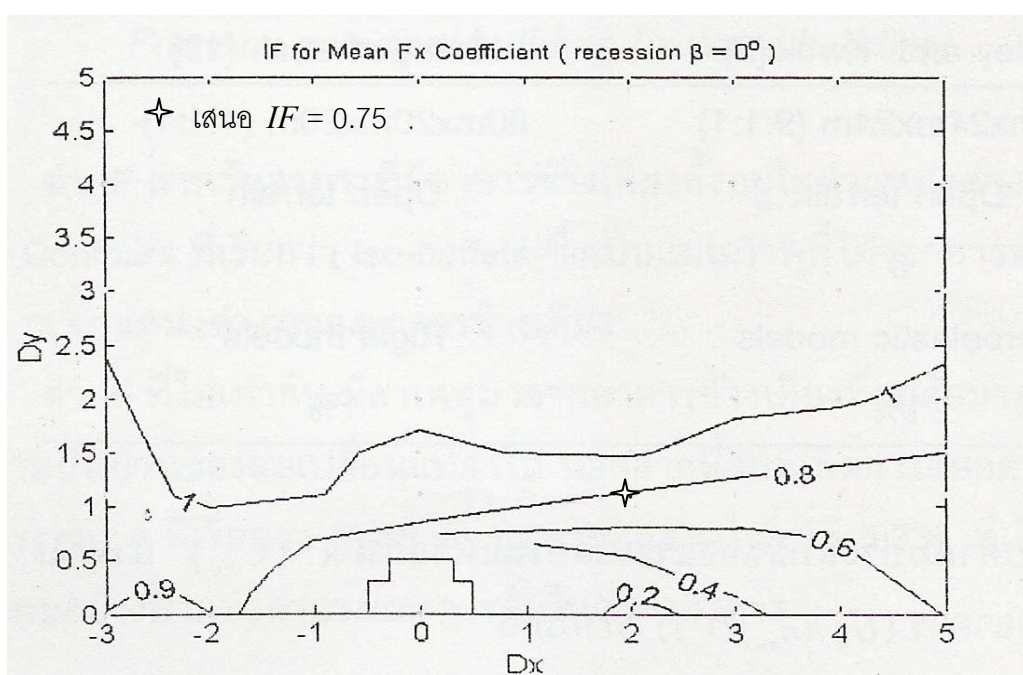
ค 30 องศา



ง. 45 องศา

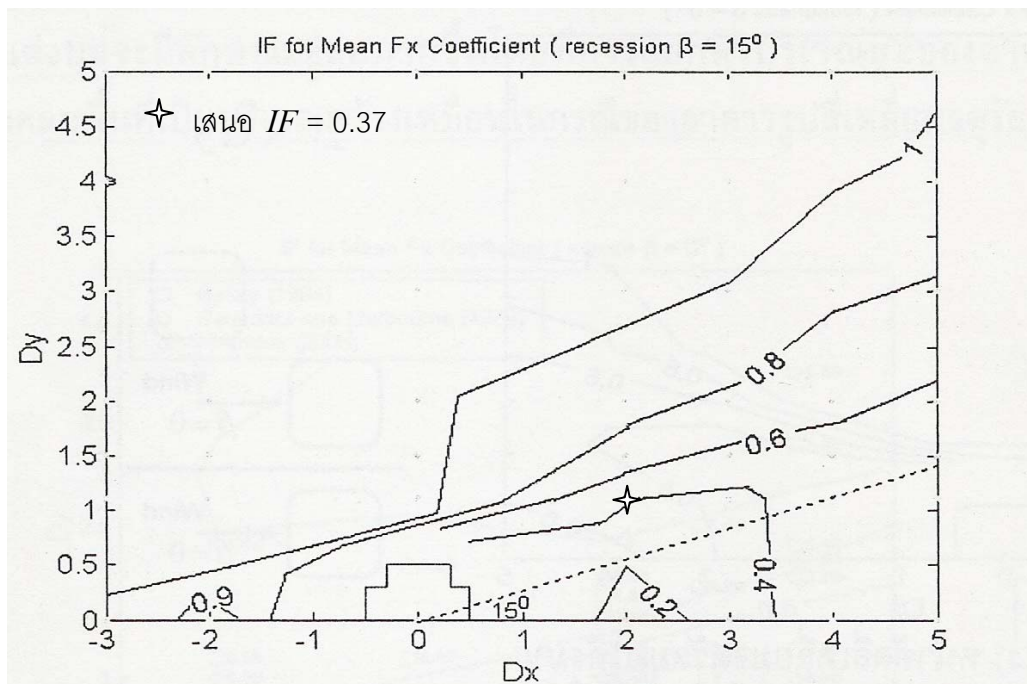
ภาพที่ 8.26 (ต่อ) ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก

จากภาพที่ 8.26 กรณีอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าอาคารข้างเคียงที่ตั้งอยู่บริเวณเหนือลมตามทิศแกน x มีผลอย่างมากต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลัก โดยทิศทางลมที่ 30 องศา ช่วยลดค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารหลักมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน กล่าวคือที่ทิศทางลม 0 องศาผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.78 ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ได้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.4 - 0.6 ค่า IF ที่ได้ถือว่าไม่แตกต่างกันมากนัก อีกทั้งบริเวณดังกล่าวผลการทดลองอุโมงค์ลมของบุคคลอื่นๆ ให้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.4 - 0.8 และหากพิจารณาภาพที่ 8.26 ก จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของอาคารข้างเคียงมีผลต่อการผันผวนค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารหลักอย่างมาก ในขณะที่ทิศทางลม 15, 30 และ 45 องศา ผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.26, -0.05 และ 0.02 ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ได้ค่า IF น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.2 แสดงได้ดังภาพที่ 8.26 ข-ง

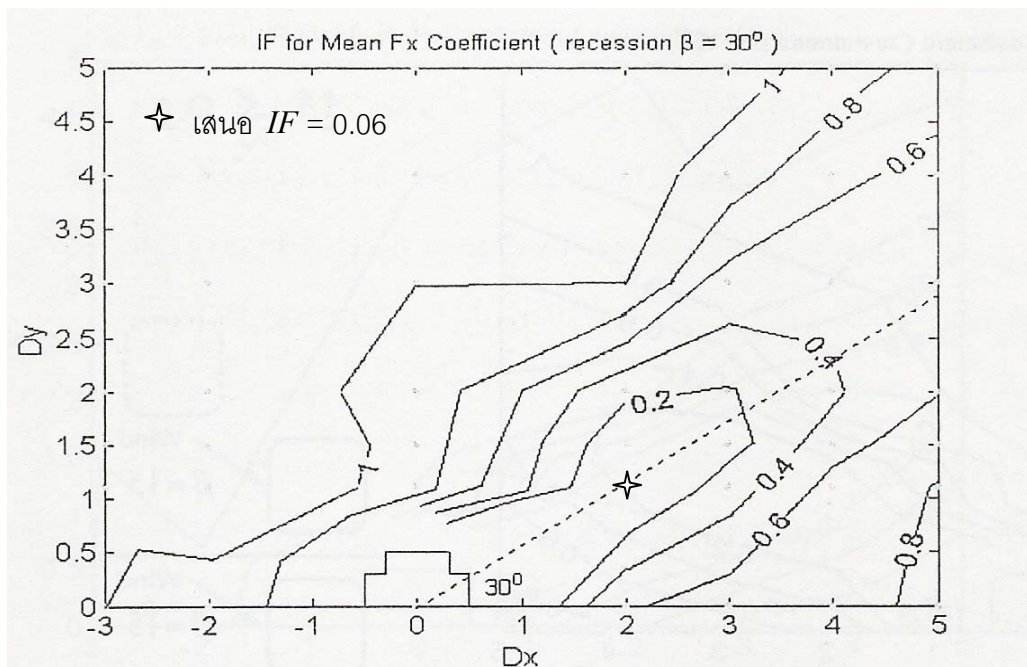


ก. 0 องศา

ภาพที่ 8.27 ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก

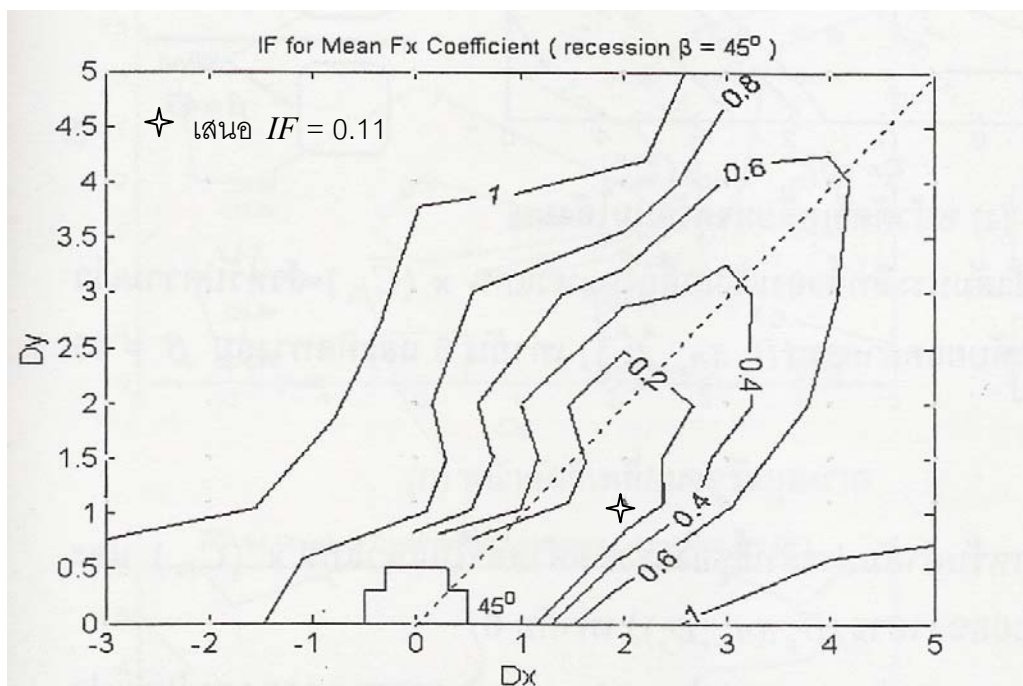


ข. 15 องศา



ค. 30 องศา

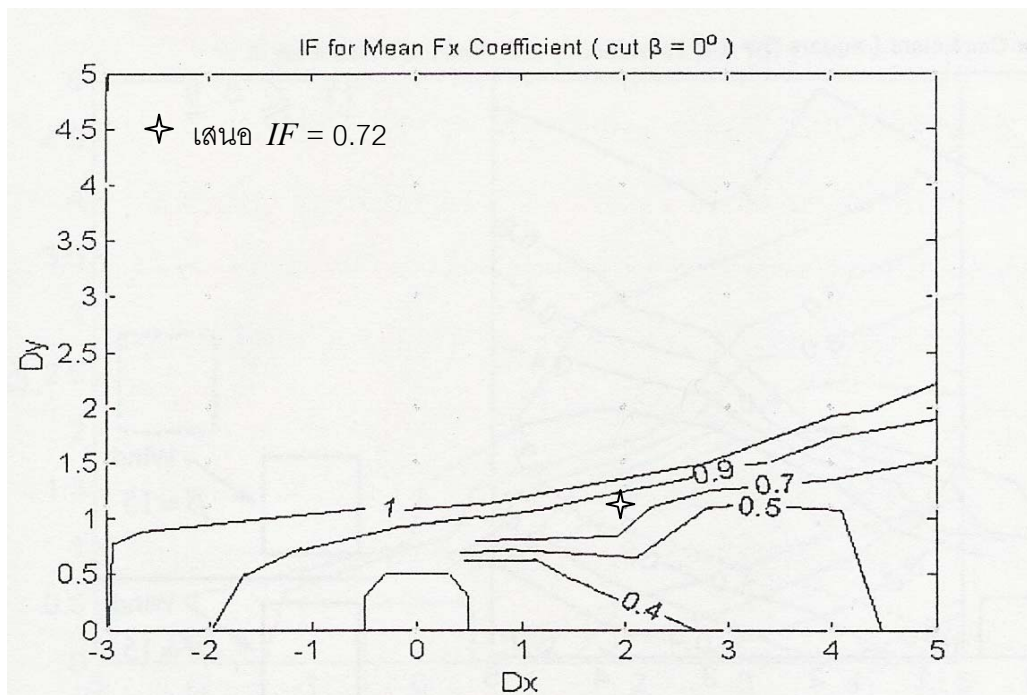
ภาพที่ 8.27 (ต่อ) ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า



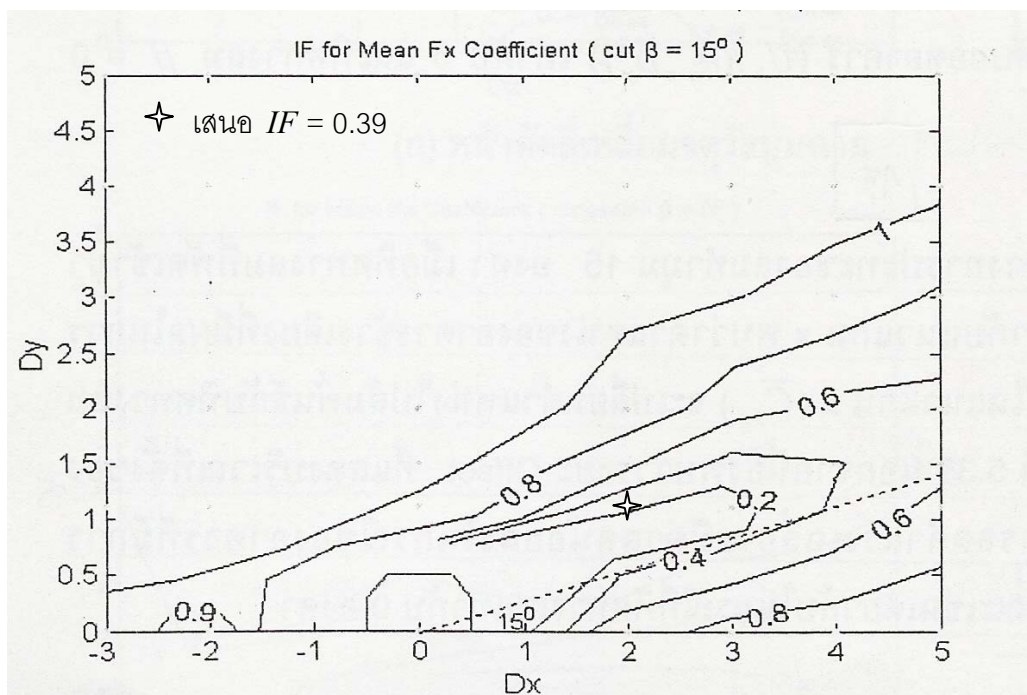
ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.27 (ต่อ) ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า

จากภาพที่ 8.27 กรณีอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้าผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าอาคารข้างเคียงที่ตั้งอยู่บริเวณเหนือลมตามทิศแกน x มีผลอย่างมากต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลัก โดยทิศทางลมที่ 30 องศา ช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน กล่าวคือที่ทิศทางลม 0 องศาผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.75 ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ได้ค่า IF ประมาณ 0.8 ที่ทิศทางลม 15 องศา ผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.37 ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ได้ค่า IF ประมาณ 0.4 ในขณะที่ทิศทางลม 30 และ 45 องศา ผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.06 และ 0.11 ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ที่ทิศทางลม 30 และ 45 องศาได้ค่า IF น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.2 แสดงได้ดังภาพที่ 8.27 ค-ง

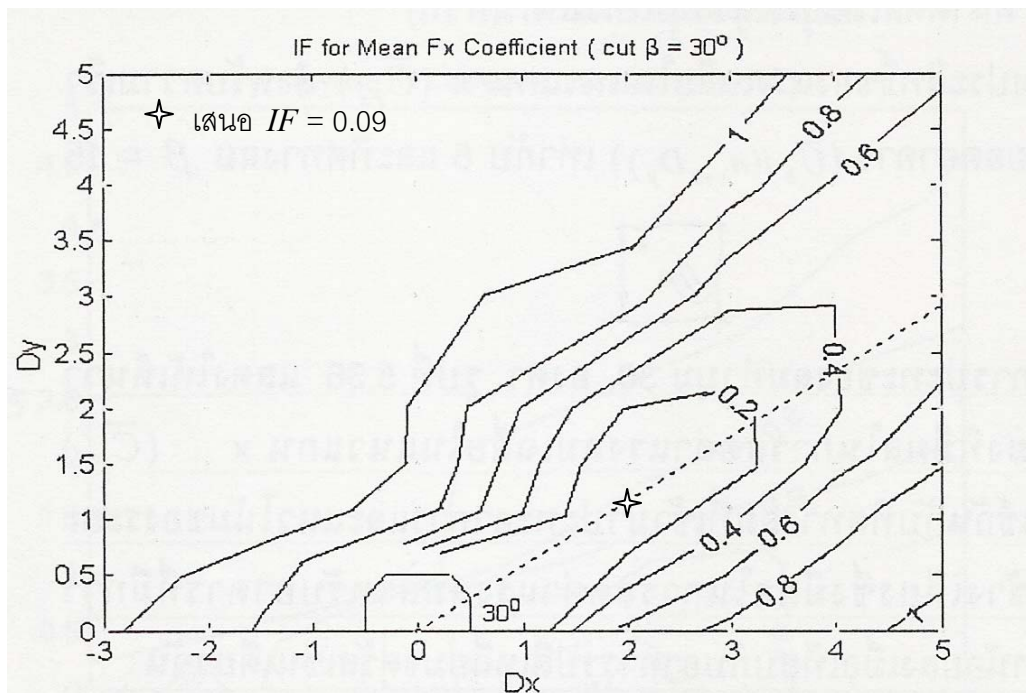


ก. 0 องศา

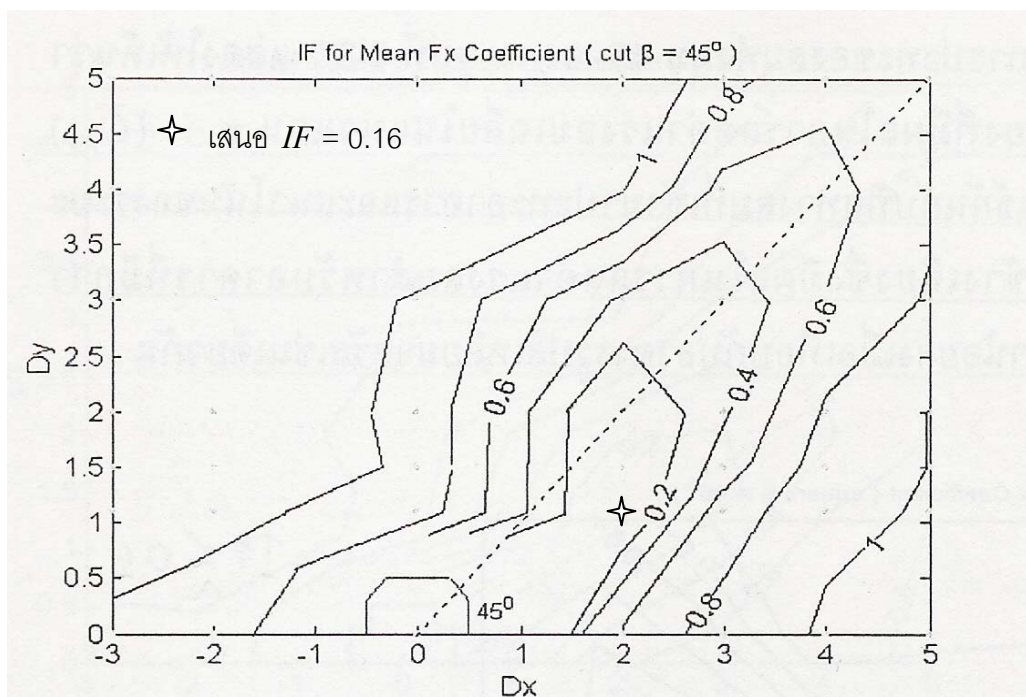


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.28 ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด



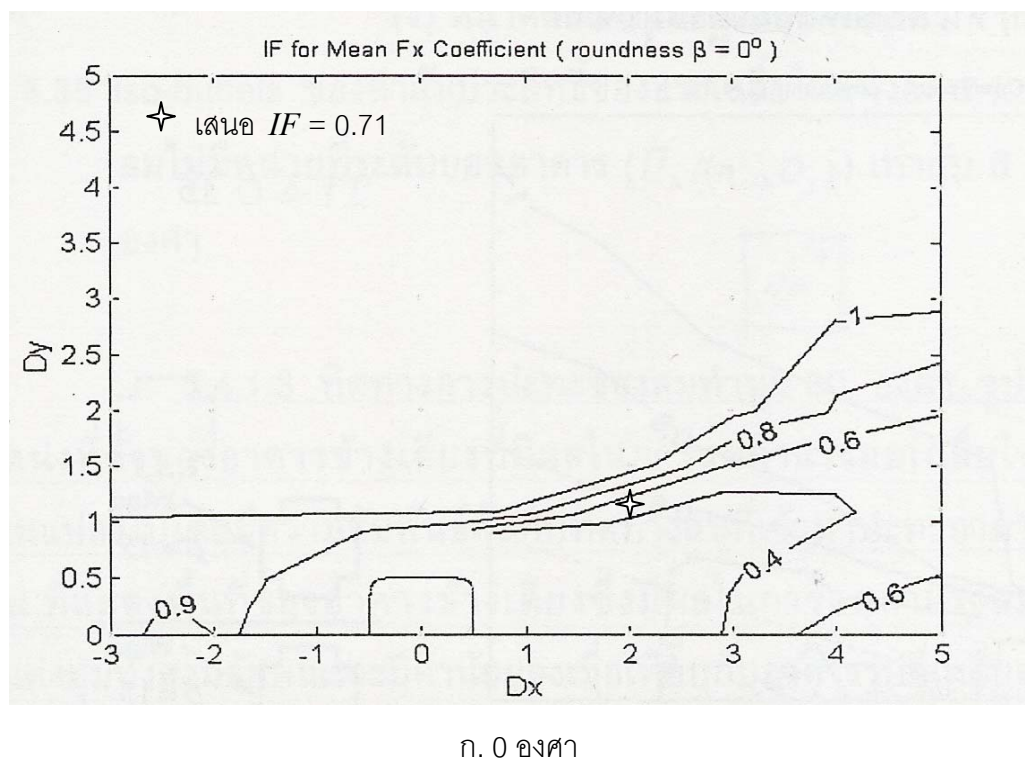
ค. 30 องศา



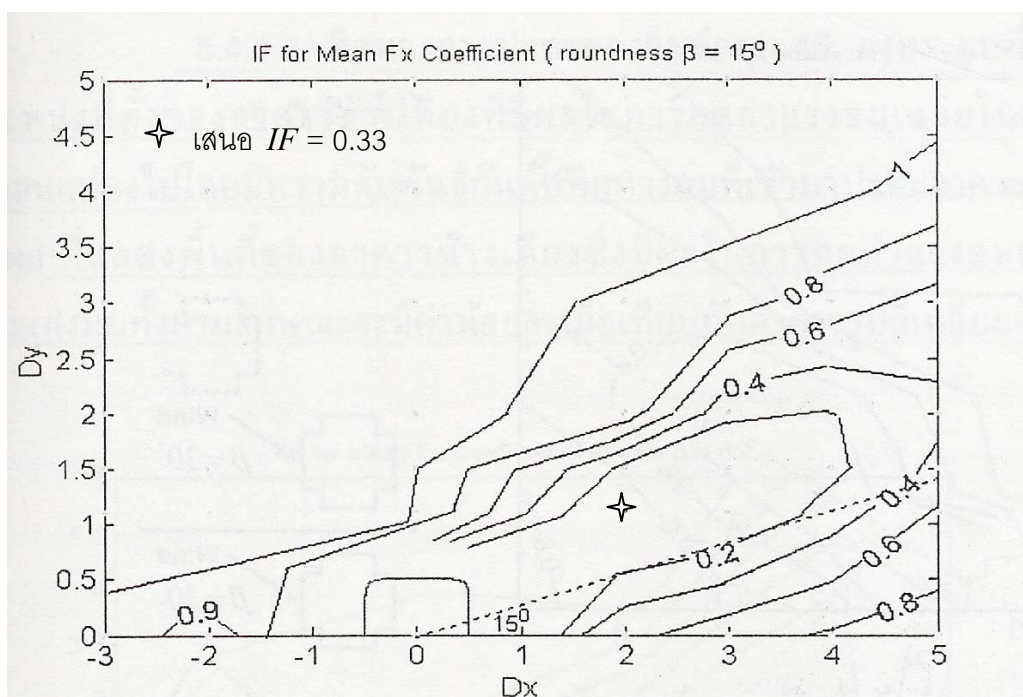
ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.28 (ต่อ) ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด

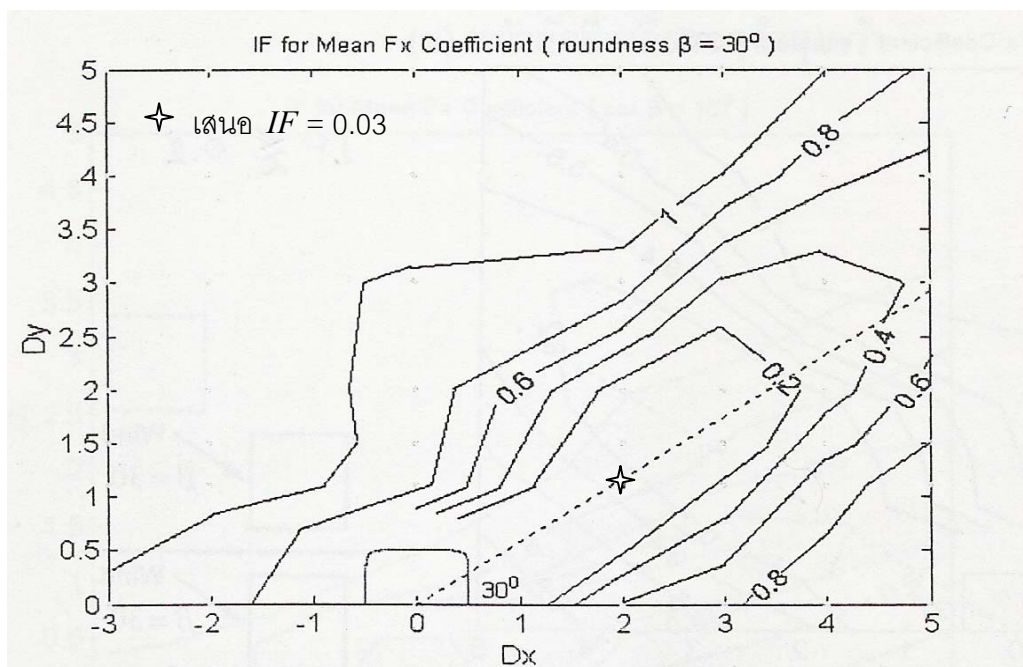
จากภาพที่ 8.28 กรณีอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัดผลการวิเคราะห์ห้บ่งชี้ว่าอาคารข้างเคียงที่ตั้งอยู่บริเวณเหนือลมตามทิศแกน x มีผลอย่างมากต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลัก โดยทิศทางลมที่ 30 องศา ช่วยลดค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารหลักมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน กล่าวคือที่ทิศทางลม 0 องศาผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.72 ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ได้ค่า IF ประมาณ 0.8 ในขณะที่ทิศทางลม 15, 30 และ 45 องศา ผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.39, 0.09 และ 0.16 ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ได้ค่า IF น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.2 แสดงได้ดังภาพที่ 8.28 ข-ง



ภาพที่ 8.29 ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน

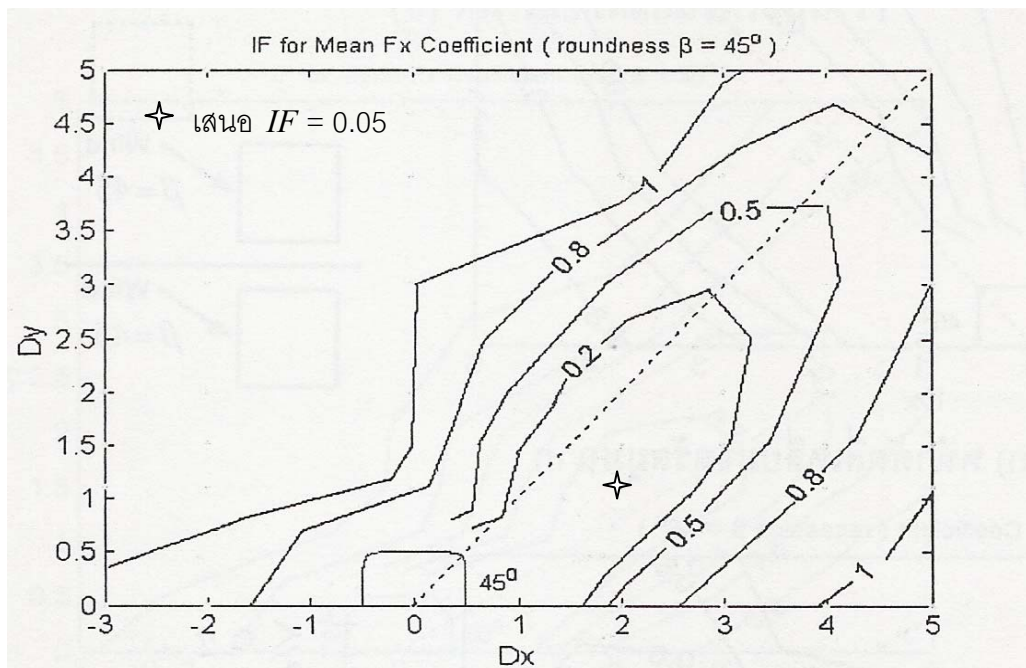


ข. 15 องศา



ค. 30 องศา

ภาพที่ 8.29 (ต่อ) ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน



ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.29 (ต่อ) ค่า IF ของอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน

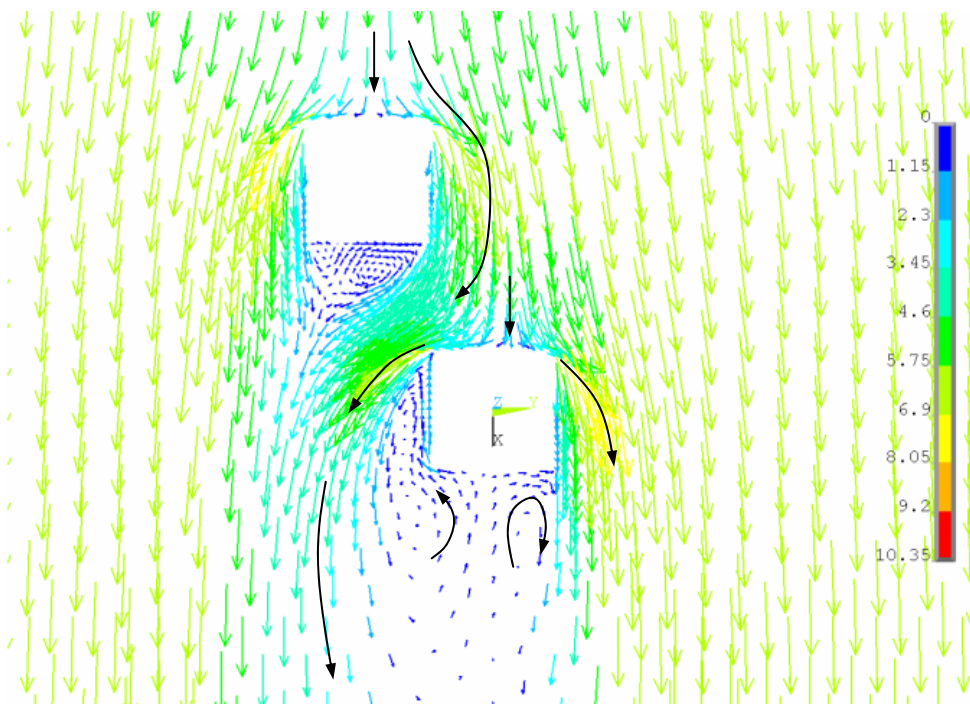
จากภาพที่ 8.29 กรณีอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมนผลการวิเคราะห์พบว่า อาคารข้างเคียงที่ตั้งอยู่บริเวณเหนือลมตามทิศแกน x มีผลอย่างมากต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลัก โดยทิศทางลมที่ 30 องศา ช่วยลดค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารหลักมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสสุกุล, 2547) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน กล่าวคือที่ทิศทางลม 0 องศาผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.71 ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสสุกุล, 2547) ได้ค่า IF อยู่ระหว่าง 0.4-0.6 ค่า IF ที่ได้ถือว่าไม่แตกต่างกันมากนักหากพิจารณาภาพที่ 8.29 ก จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของอาคารข้างเคียงมีผลต่อการผันผวนค่าแรงลมที่กระทำกับอาคารหลักอย่างมาก ในขณะที่ทิศทางลม 15, 30 และ 45 องศา ผลการวิเคราะห์ได้ค่า IF เท่ากับ 0.33, 0.03 และ 0.05 ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสสุกุล, 2547) ได้ค่า IF น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.2 แสดงได้ดังภาพที่ 8.29 ข-ง

การไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมบริเวณอาคารคู่แฝดและเส้นชั้นความดันลมที่กระทำรอบๆขอบอาคารหลักสามารถอธิบายได้ดังนี้

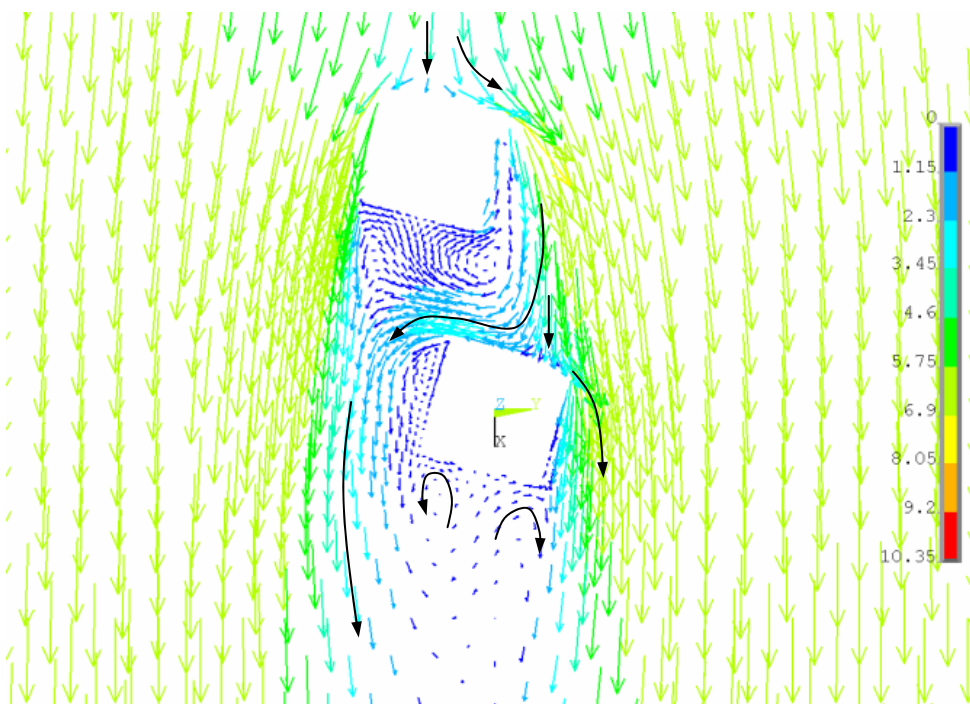
จากเวกเตอร์ความเร็วลมตามภาพที่ 8.30 ถึงภาพที่ 8.33 และเส้นชั้นความดันลมตามภาพที่ 8.34 ถึงภาพที่ 8.37 เมื่อพิจารณาผลของการปรับแต่งมุมอาคารพบว่า การปรับแต่งมุมอาคารไม่ได้ทำให้ลักษณะการไหลของลมที่เกิดขึ้นรอบๆ อาคารคู่แฝดแตกต่างกันมากนัก สังเกตได้จากเส้นชั้นความดันลมที่มีลักษณะการกระจายที่คล้ายคลึงกันซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า IF สำหรับอาคารหลักใกล้เคียงกันสำหรับทิศทางลมหนึ่งๆ

เมื่อพิจารณาผลของทิศทางลม 0 ถึง 45 องศา สำหรับหน้าตัดแต่ละรูปแบบพบว่ามีลักษณะการไหลของลมมีลักษณะคล้ายคลึงกัน การที่อาคารหลักมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ลดลงเข้าใกล้ศูนย์นั้นเป็นผลมาจากการที่มีอาคารข้างเคียงตั้งอยู่ทางด้านต้นลม ส่งผลให้ลมที่ปะทะอาคารหลักลดลง สังเกตได้จากพฤติกรรมการแยกตัว (Separation) ของลมที่บริเวณมุมอาคารหลักเกิดน้อยลง พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วลมกรณีอาคารเดี่ยวตามภาพที่ 8.17 ถึงภาพที่ 8.20 ประกอบ ที่ทิศทางลม 15 องศา พฤติกรรมการแยกตัวของลมที่บริเวณมุมอาคารหลักจะค่อยๆ หายไปเนื่องจากอาคารข้างเคียงที่อยู่ด้านหน้าอาคารหลักจะขวางลมมากขึ้น ทั้งนี้ที่ทิศทางลม 30 องศา อาคารข้างเคียงจะขวางลมอย่างสมบูรณ์ ซึ่งลมที่กระทำกับอาคารหลักจะเป็นลมหมุน (Wake) ความเร็วต่ำ เนื่องจากที่ทิศทางลม 30 องศา อาคารหลักจะอยู่ในบริเวณลมหมุนด้านหลังของอาคารข้างเคียงอย่างสมบูรณ์ซึ่งบริเวณดังกล่าวนี้เป็นบริเวณที่มีความเร็วลมต่ำ โดยมีลมหมุนระหว่างอาคารหลักกับอาคารข้างเคียงและมีลมหมุนบริเวณด้านหลังอาคารหลัก ที่ทิศทาง 45 องศา ลักษณะการไหลของลมที่กระทำกับอาคารหลักมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับที่ทิศทางลม 15 องศา โดยที่ผลกระทบของลมหมุนด้านหลังของอาคารข้างเคียงมีน้อยลง ในขณะที่มีการเกิดขึ้นของพฤติกรรมการแยกตัวของลมที่บริเวณมุมอาคารหลักเล็กน้อย สังเกตได้ว่าเส้นชั้นความดันลมที่กระทำกับอาคารหลัก มีแรงดัน (Pressure) ลดลง ที่ผนังของอาคารหลัก และที่ทิศทางลม 30 องศา บริเวณผนังของอาคารหลักแทบทั้งหมดเป็นแรงดูด (Suction) นอกจากผนังทำให้แรงสุทธิที่กระทำกับอาคารหลักมีค่าประมาณศูนย์

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ค่า IF ของอาคารข้างเคียงที่ตั้งอยู่ด้านหน้าทางด้านต้นลมของอาคารหลักเพิ่มเติม ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าการที่อาคารหลักซึ่งอยู่ด้านหลังอาคารข้างเคียงไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารข้างเคียงมากนัก โดยที่อาคารข้างเคียงในทุกกรณีส่วนใหญ่ให้ค่า IF เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตามค่า IF ที่มากที่สุดได้แก่กรณีอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากที่ทิศทางลม 45 องศา โดยให้ค่า IF เท่ากับ 1.07 ส่วนในกรณีค่า IF ที่น้อยที่สุดได้แก่กรณีอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากที่ทิศทางลม 45 องศา โดยให้ค่า IF เท่ากับ 0.85

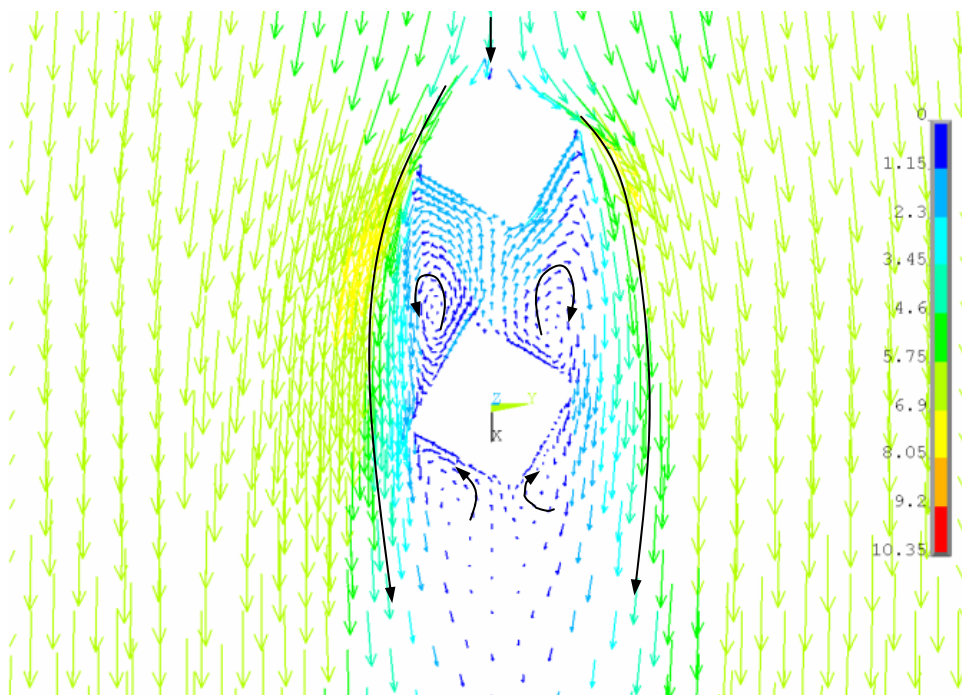


ก. 0 องศา

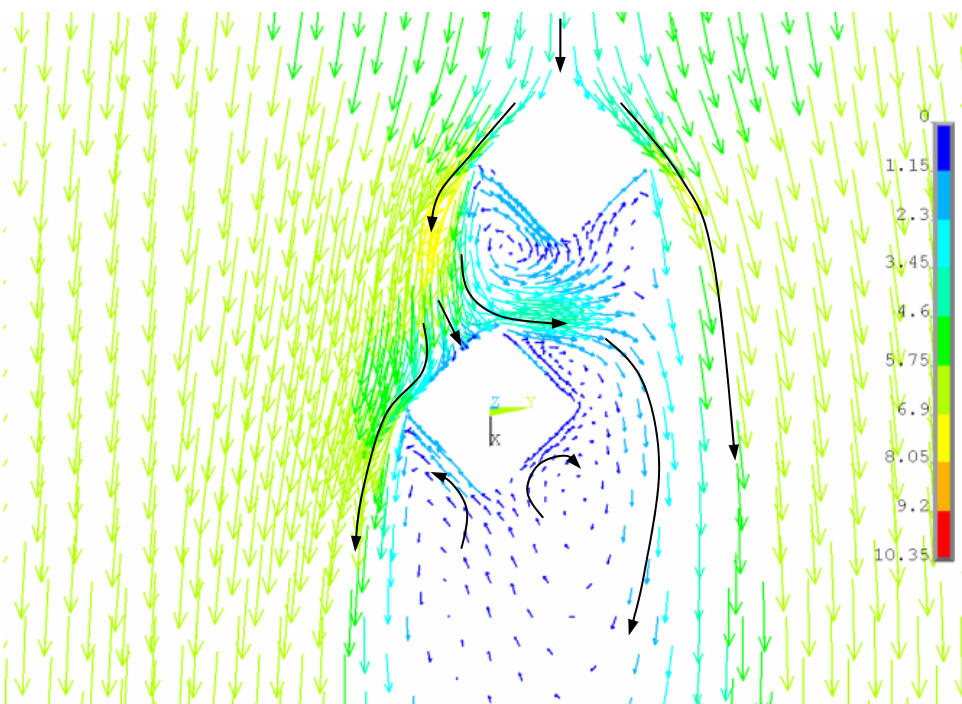


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.30 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝด
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (เมตรต่อวินาที)

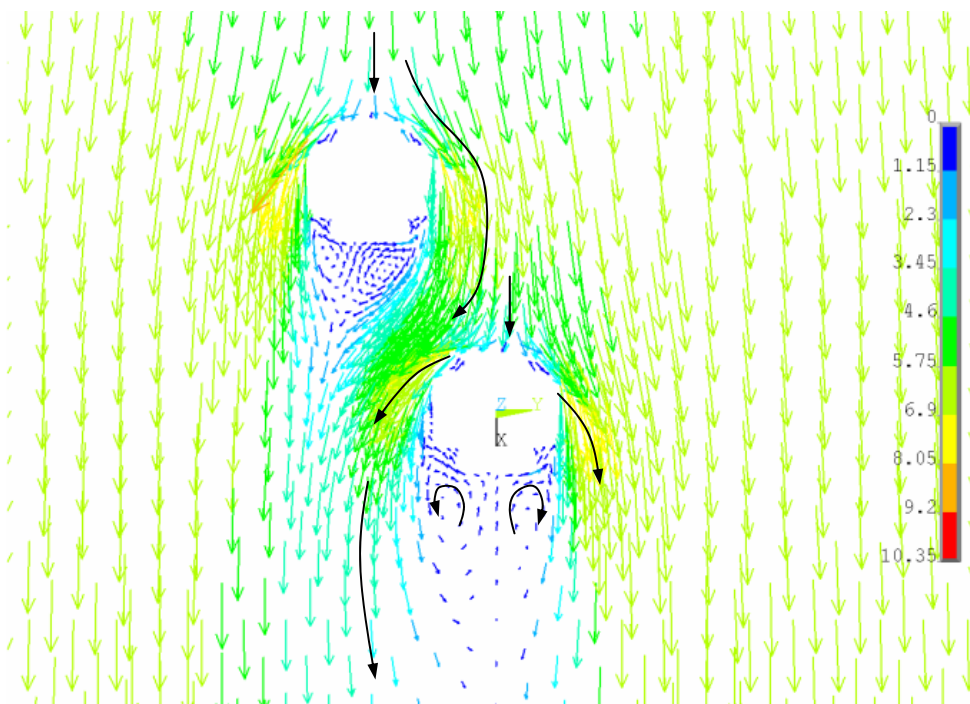


ค. 30 องศา

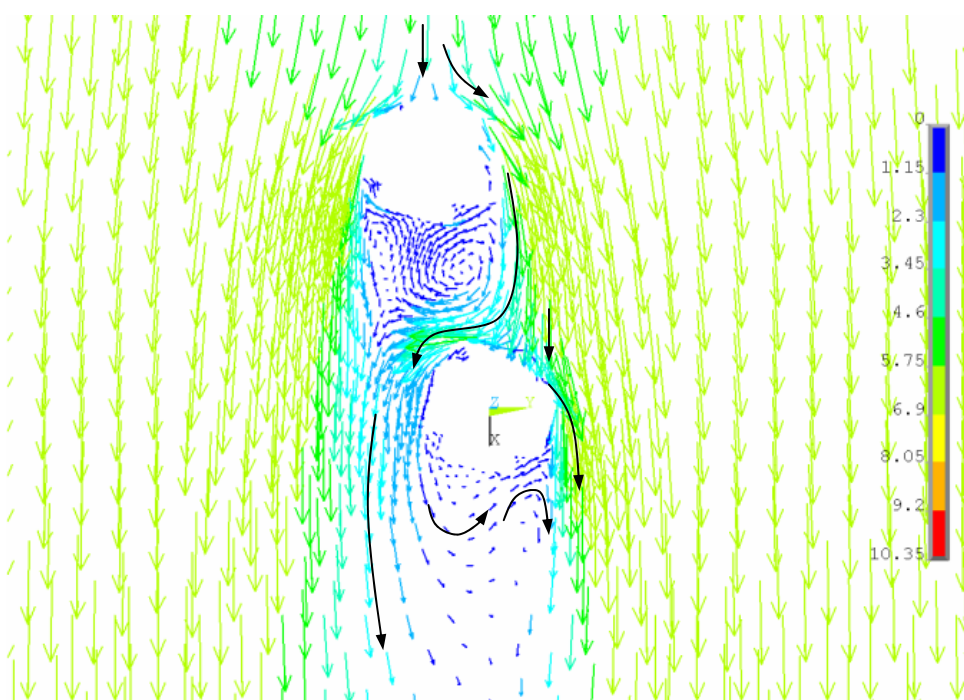


ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.30 (ต่อ) เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝด
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก (เมตรต่อวินาที)

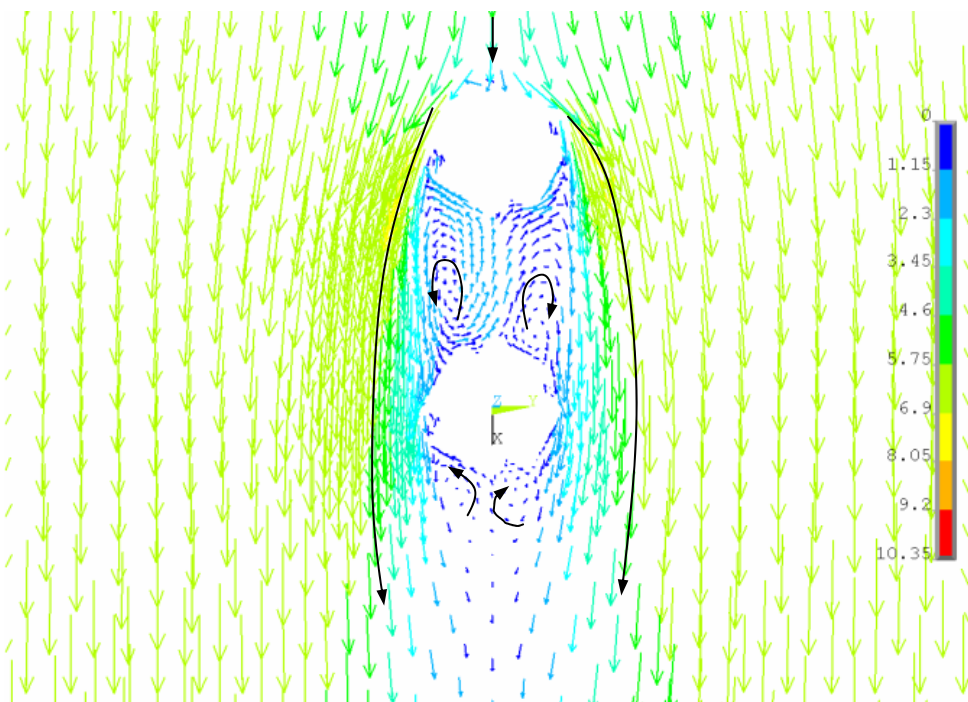


ก. 0 องศา

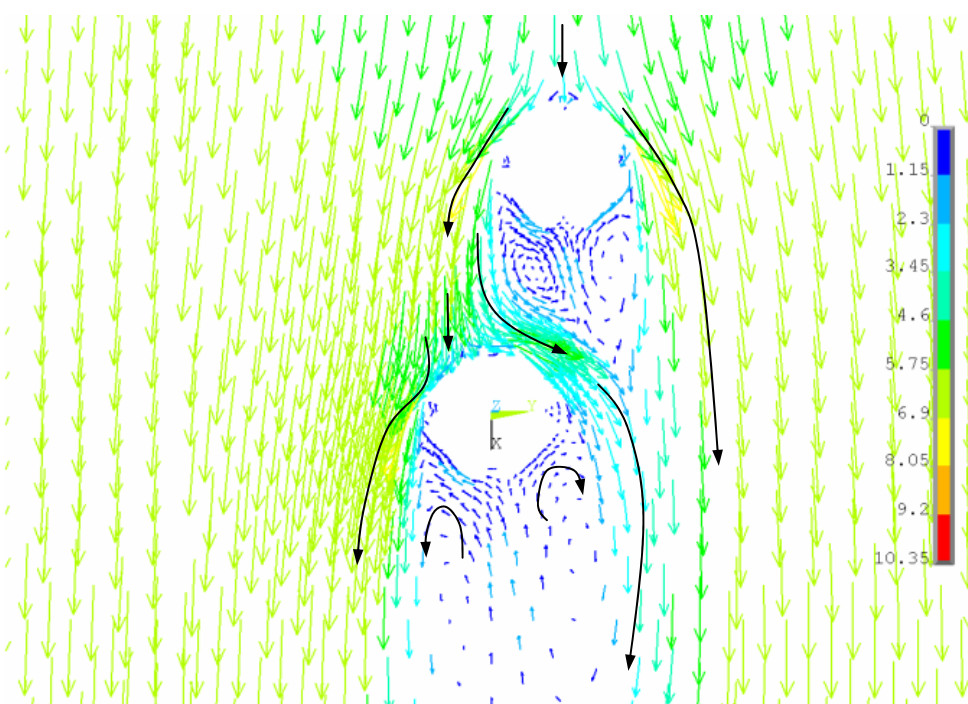


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.31 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝด
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมกว้าง (เมตรต่อวินาที)

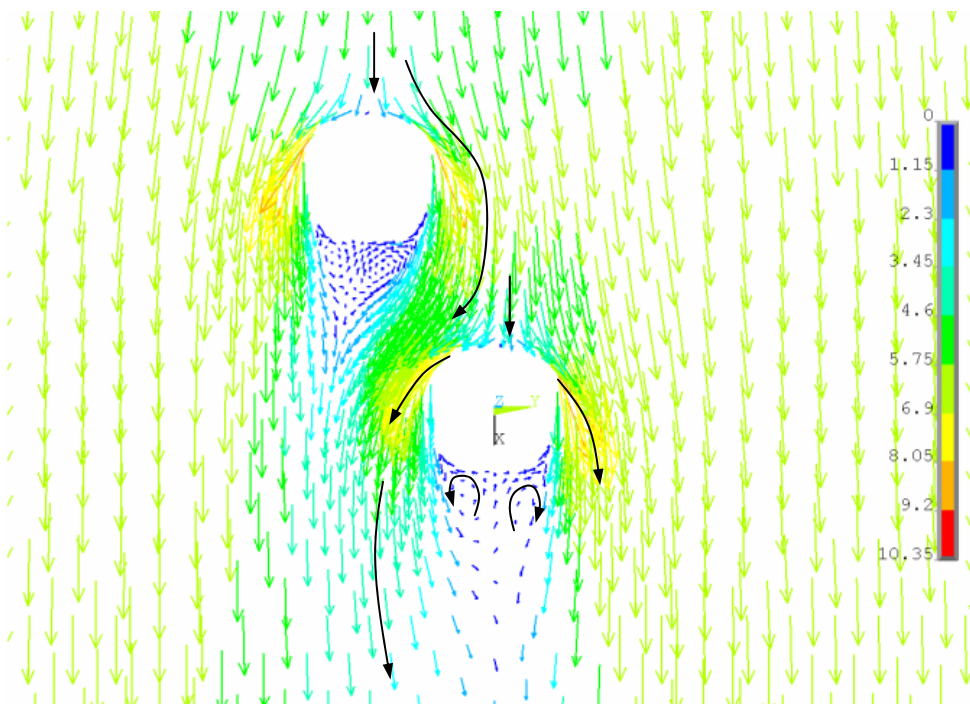


ค. 30 องศา

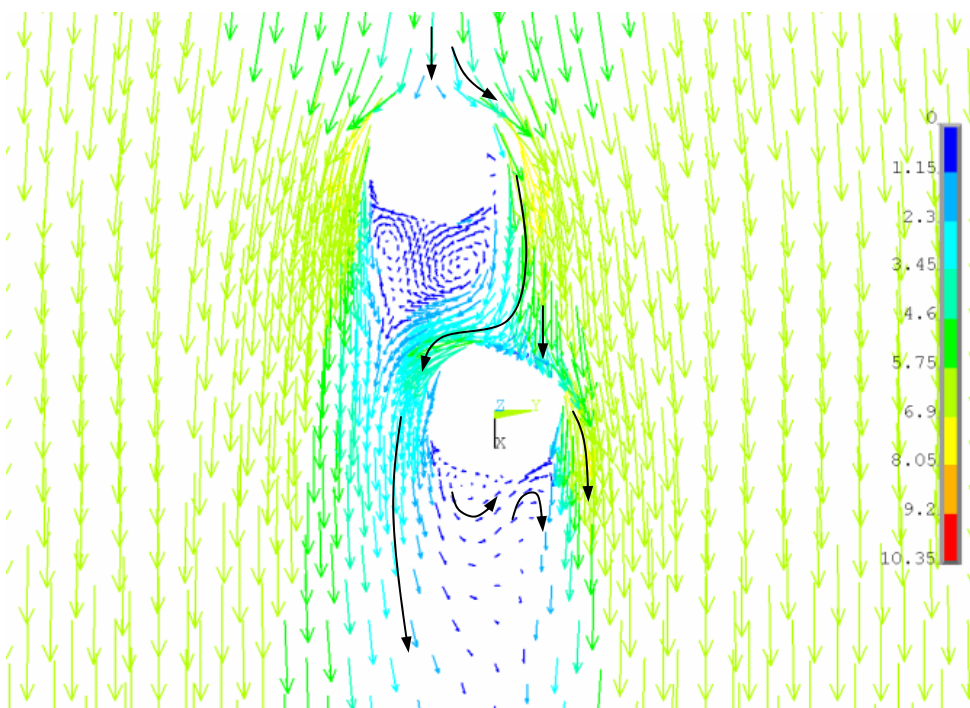


ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.31 (ต่อ) เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝด
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า (เมตรต่อวินาที)

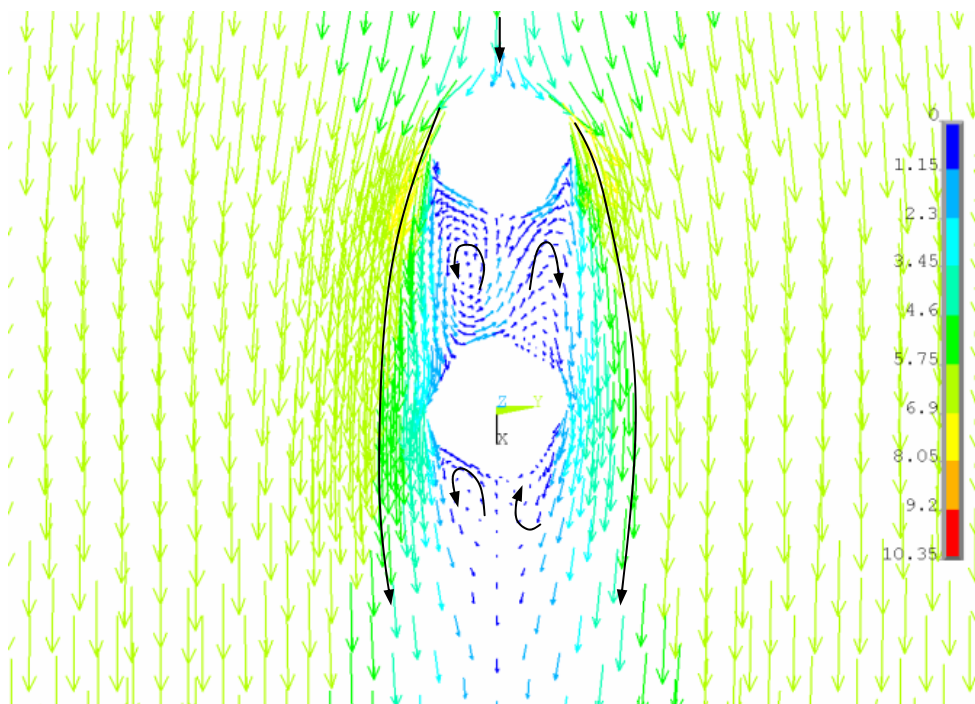


ก. 0 องศา

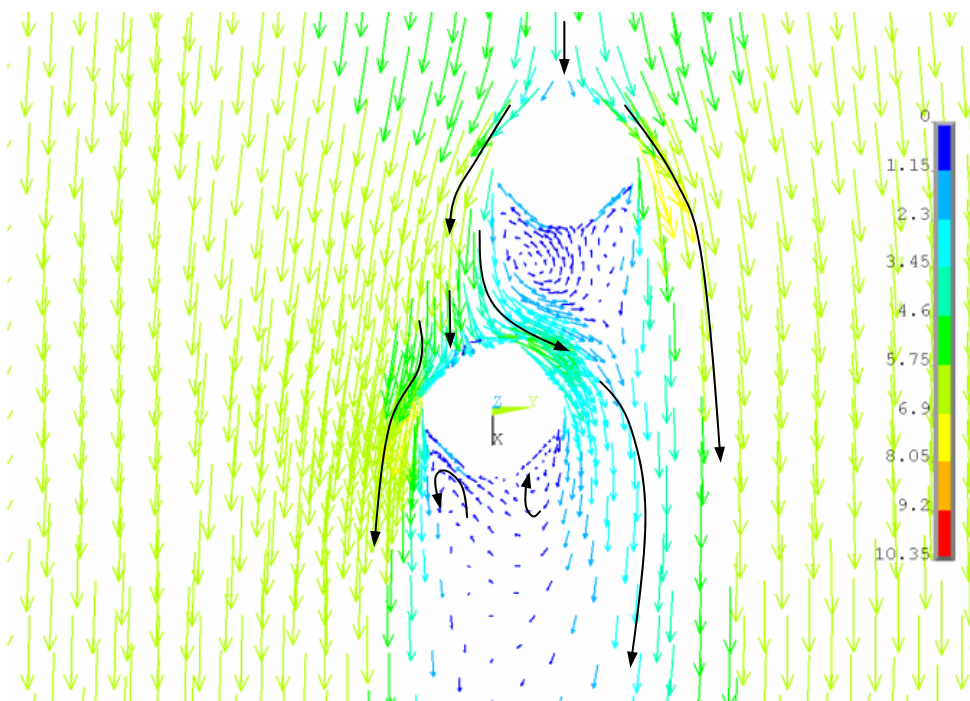


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.32 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝด
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (เมตรต่อวินาที)

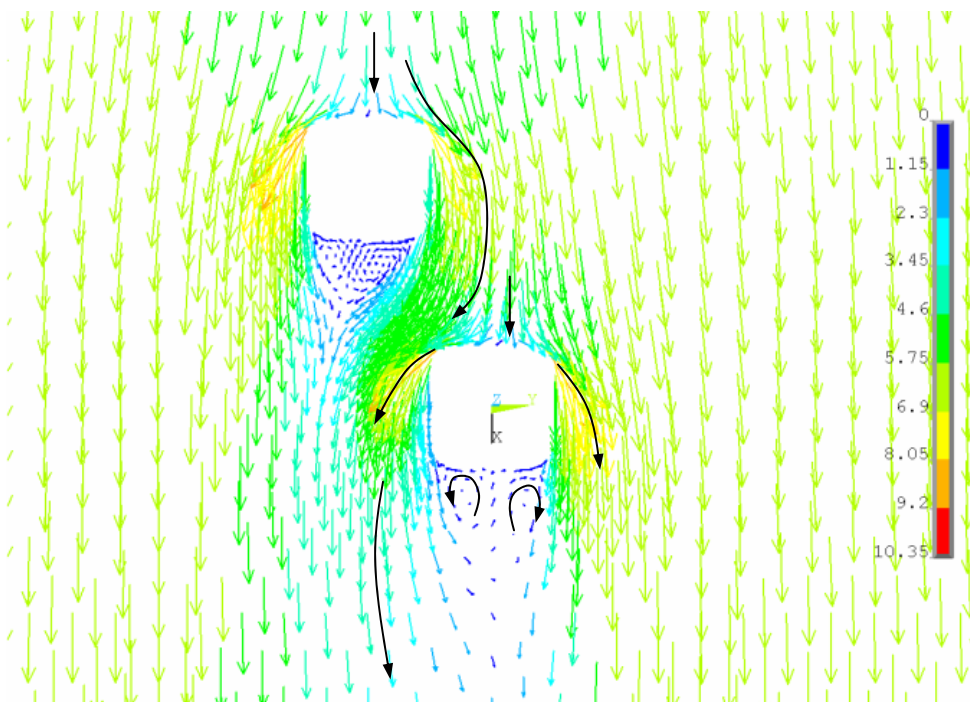


ค. 30 องศา

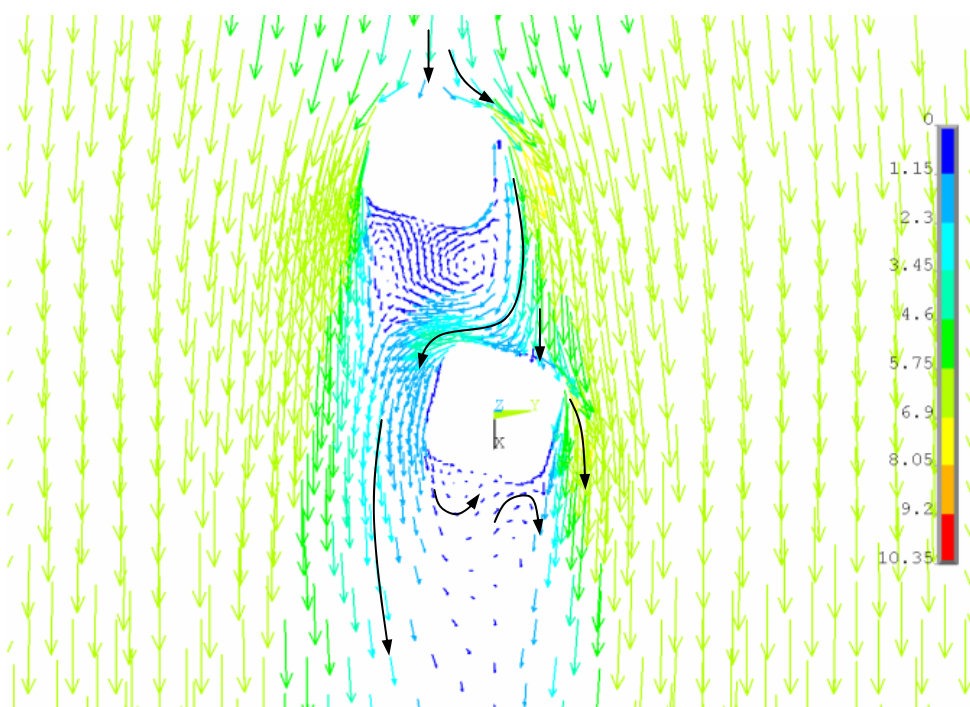


ง. 45 องศา

ภาพที่ 8.32 (ต่อ) เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝด
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด (เมตรต่อวินาที)

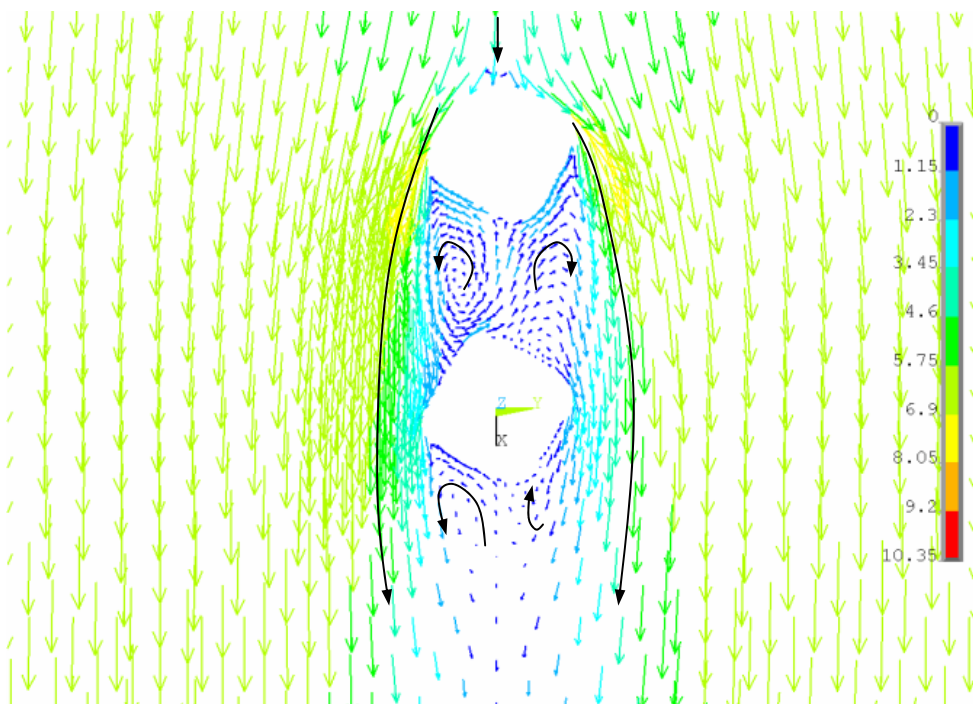


ก. 0 องศา

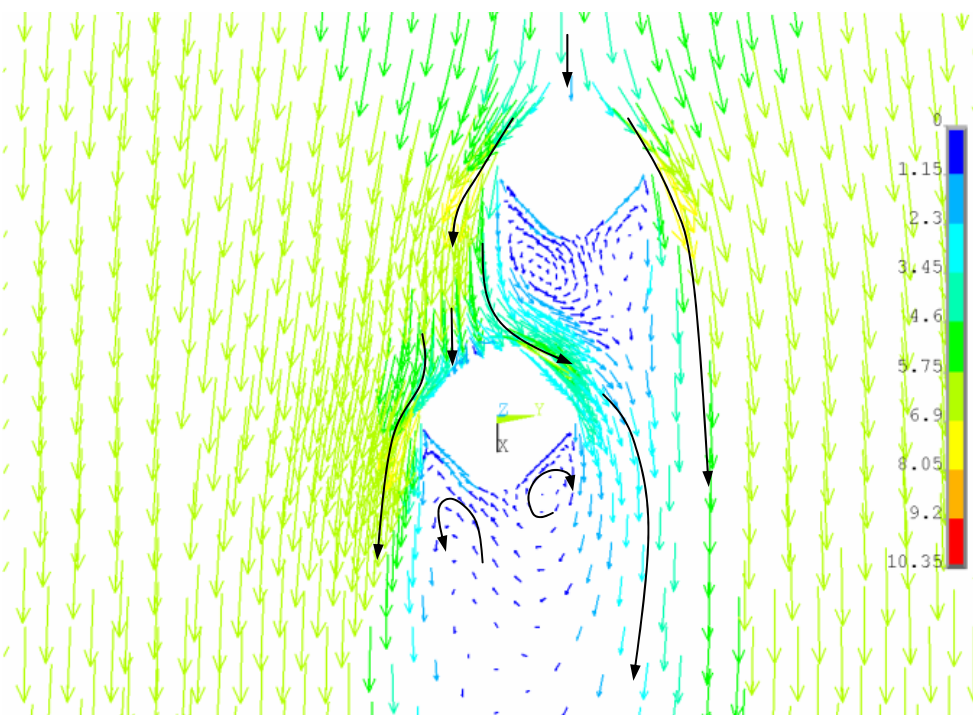


ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.33 เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝด
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (เมตรต่อวินาที)

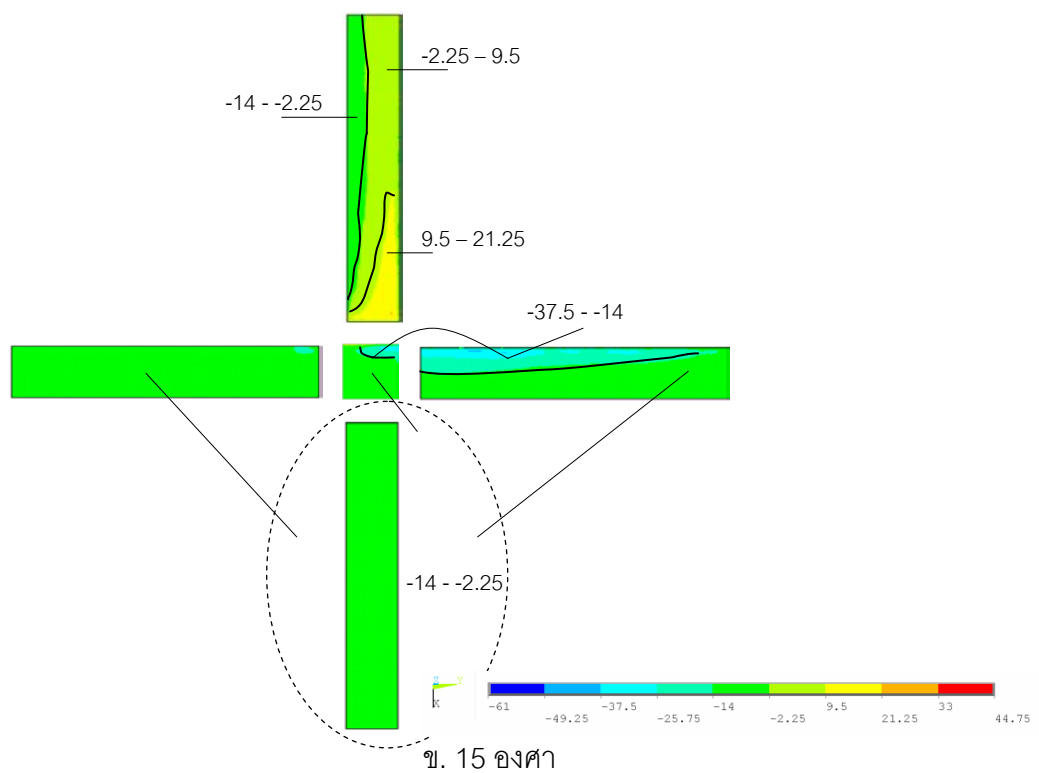
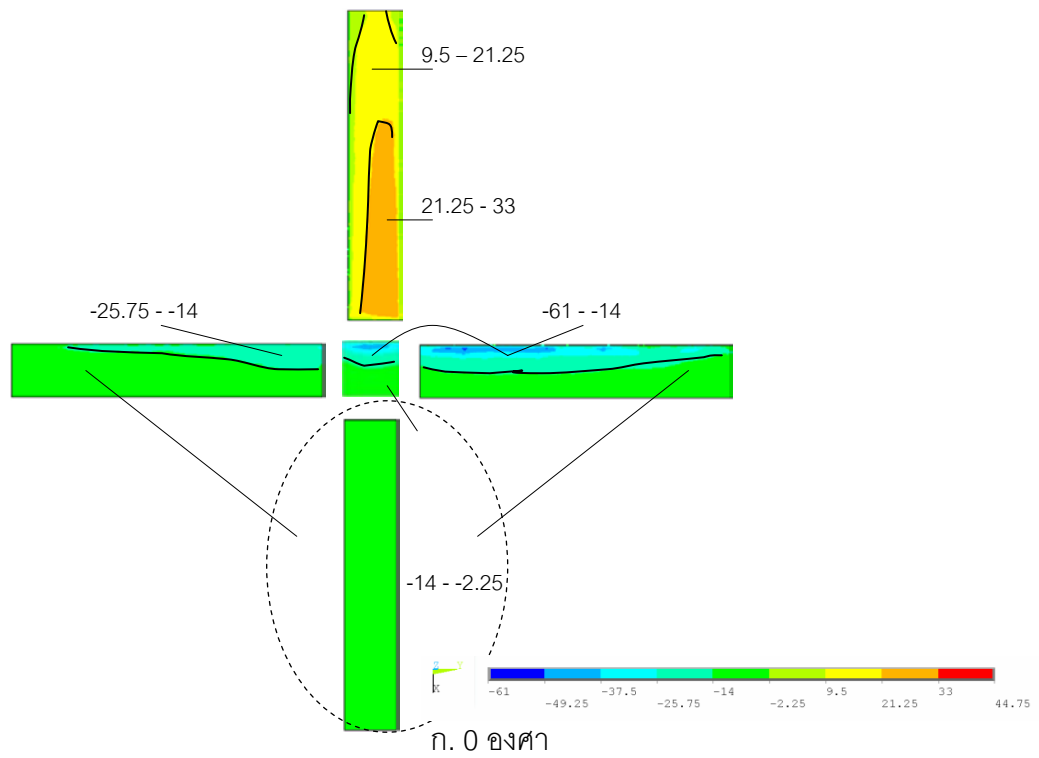


ค. 30 องศา

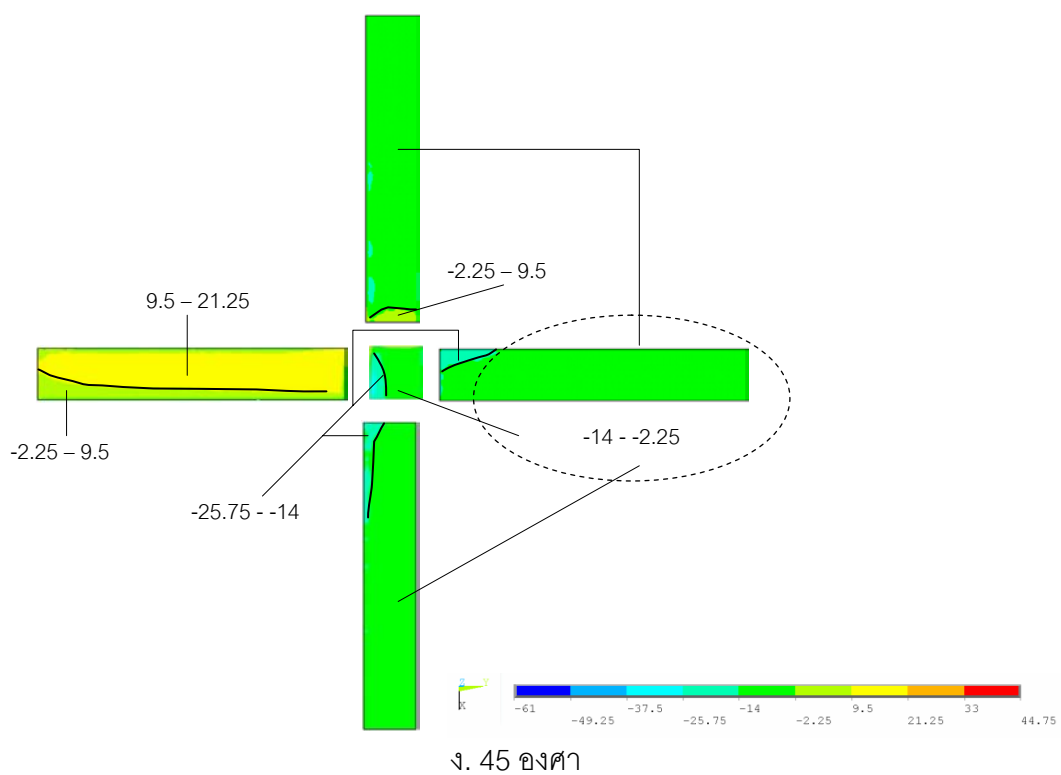
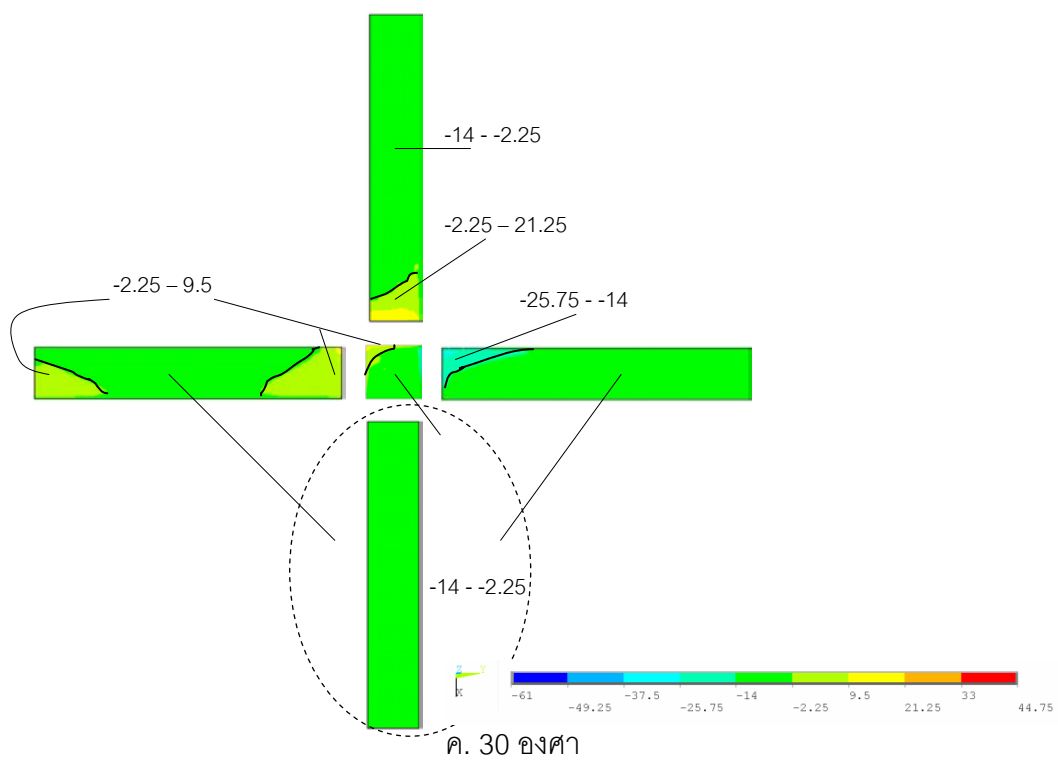


ง. 45 องศา

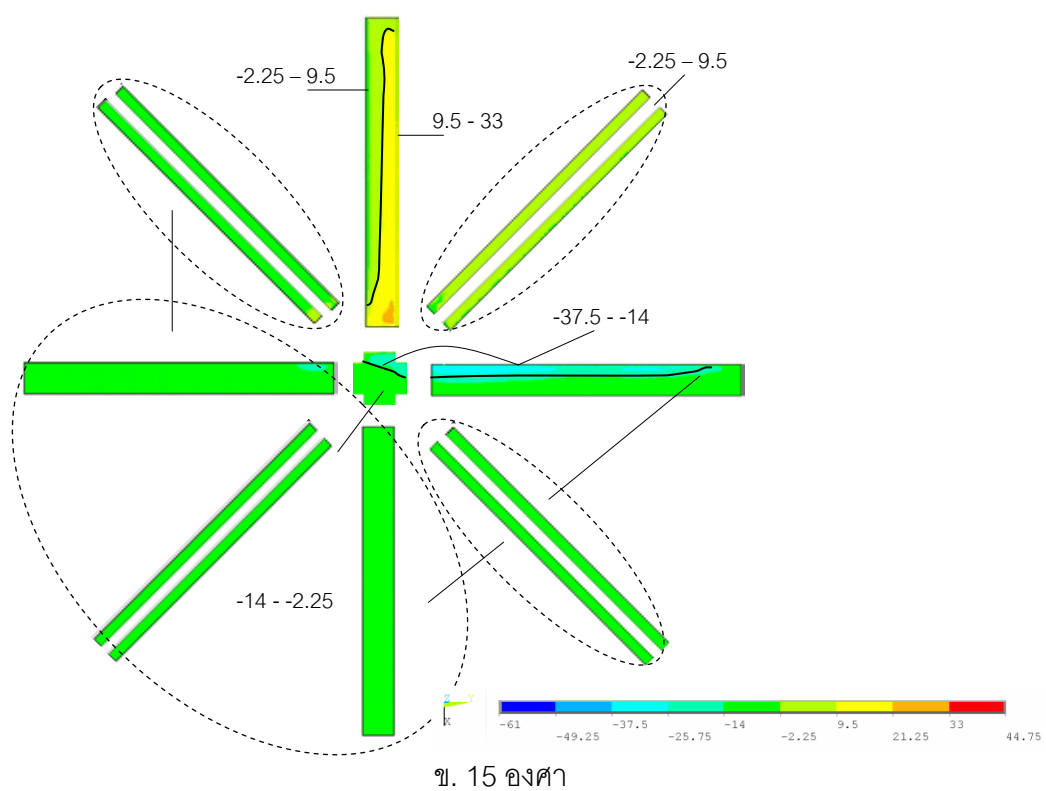
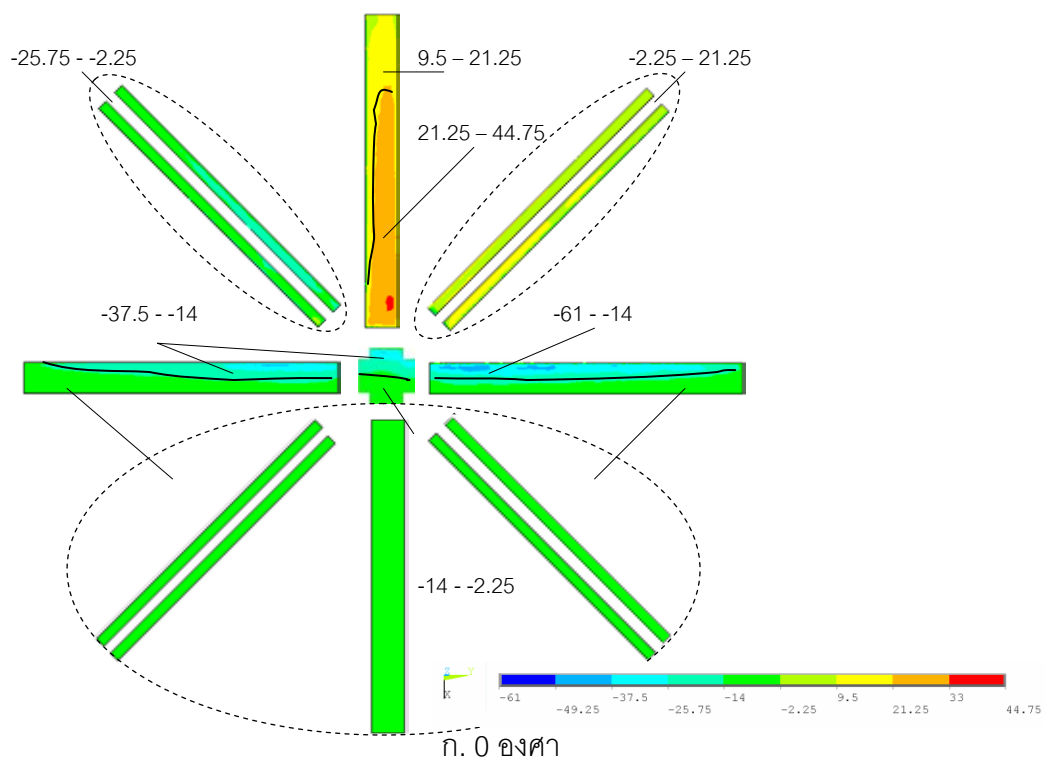
ภาพที่ 8.33 (ต่อ) เวกเตอร์ความเร็วลมที่จุดศูนย์กลางแนวราบของอาคารคู่แฝด
หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน (เมตรต่อวินาที)



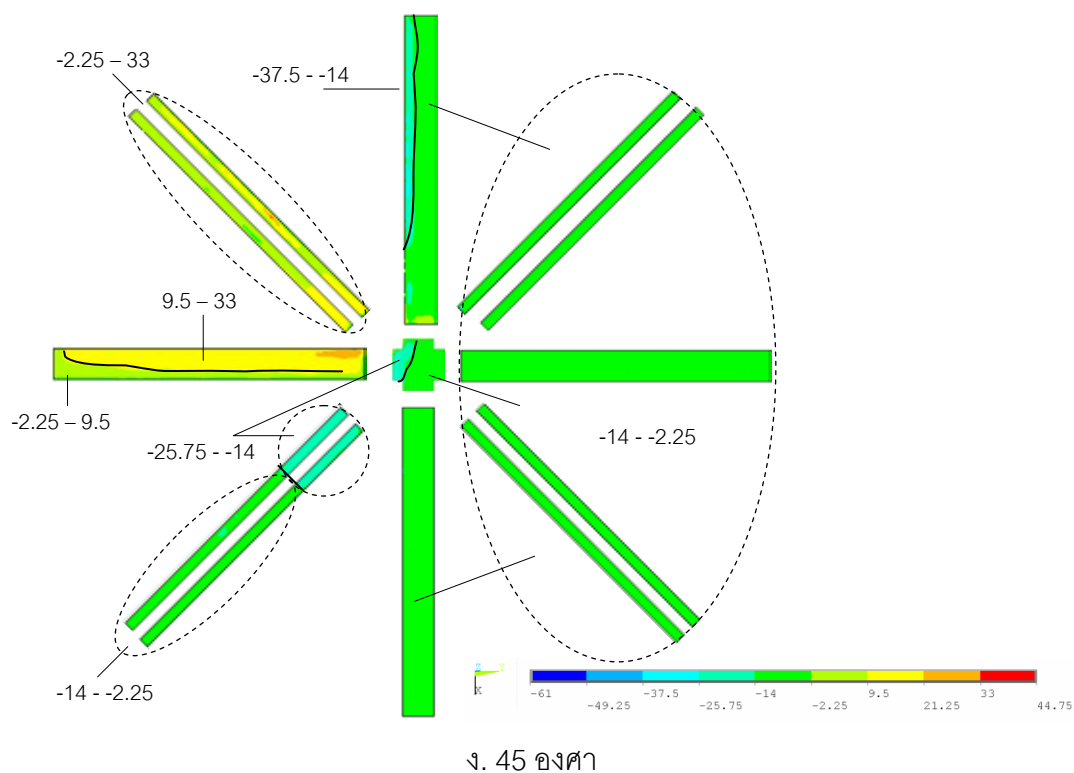
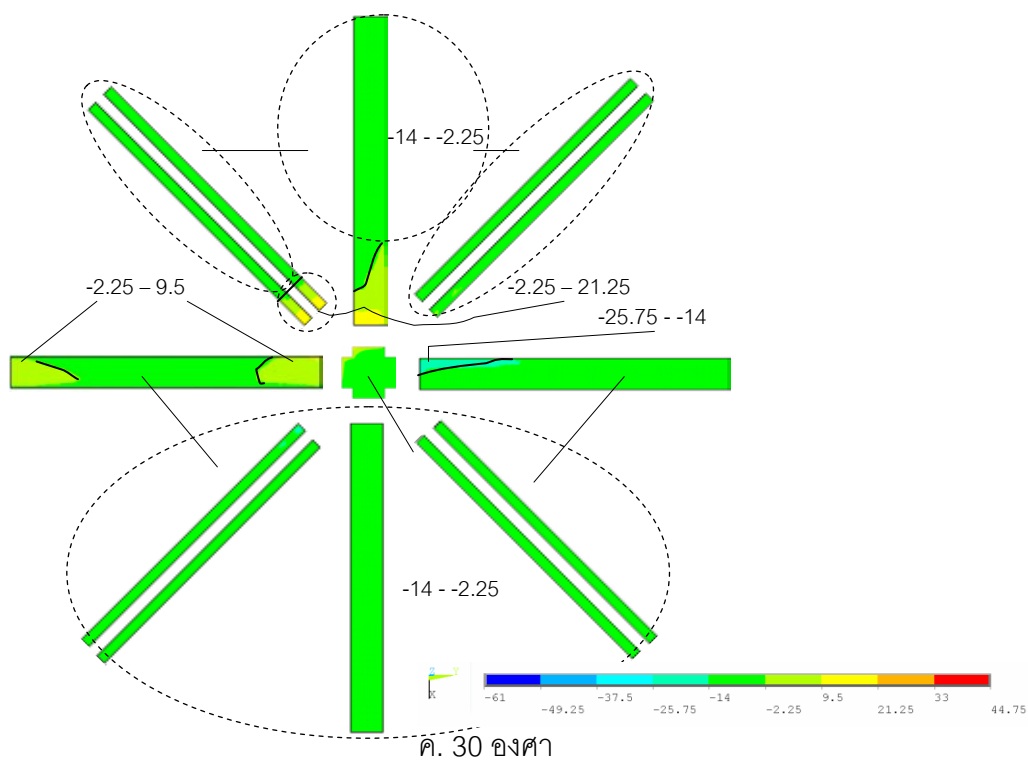
ภาพที่ 8.34 ภาพคลี่เส้นชั้นความดันของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก
(นิวตันต่อตารางเมตร)



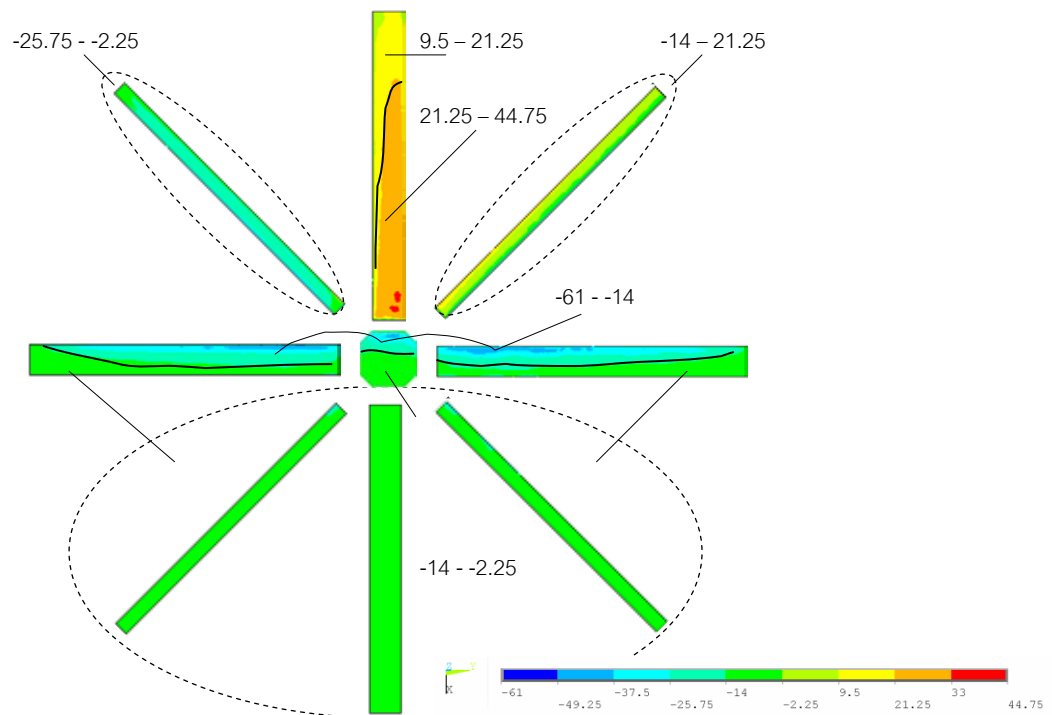
ภาพที่ 8.34 (ต่อ) ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉาก
(นิวตันต่อตารางเมตร)



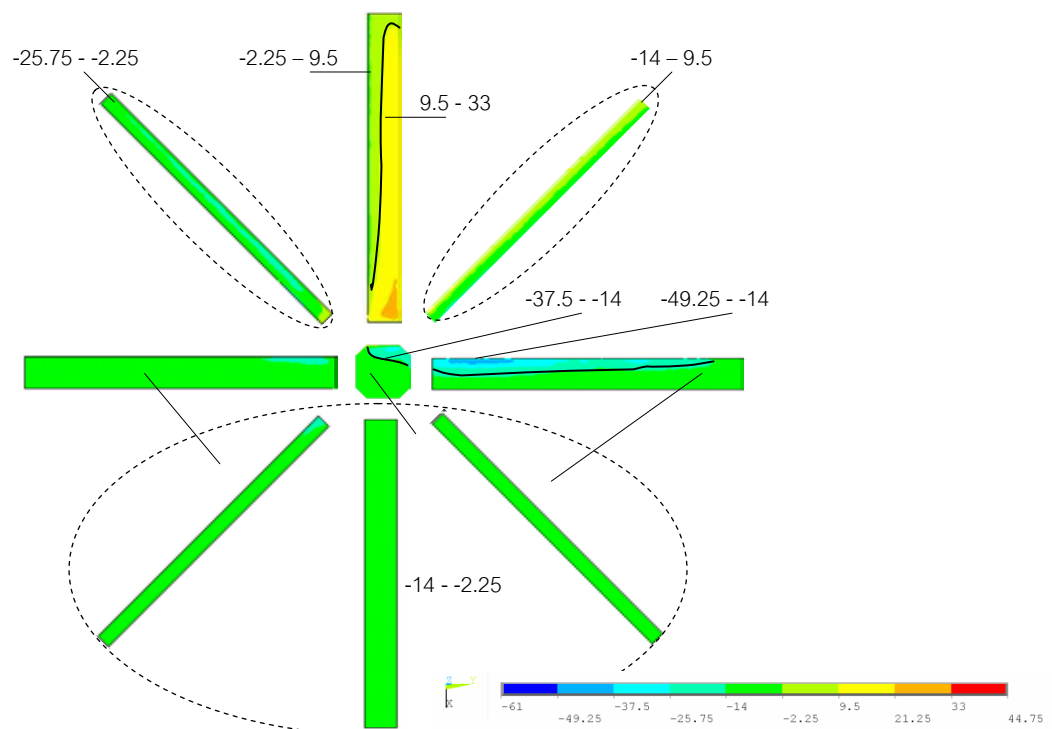
ภาพที่ 8.35 ภาพคลื่นเส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า
(นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 8.35 (ต่อ) ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมเว้า
(นิวตันต่อตารางเมตร)

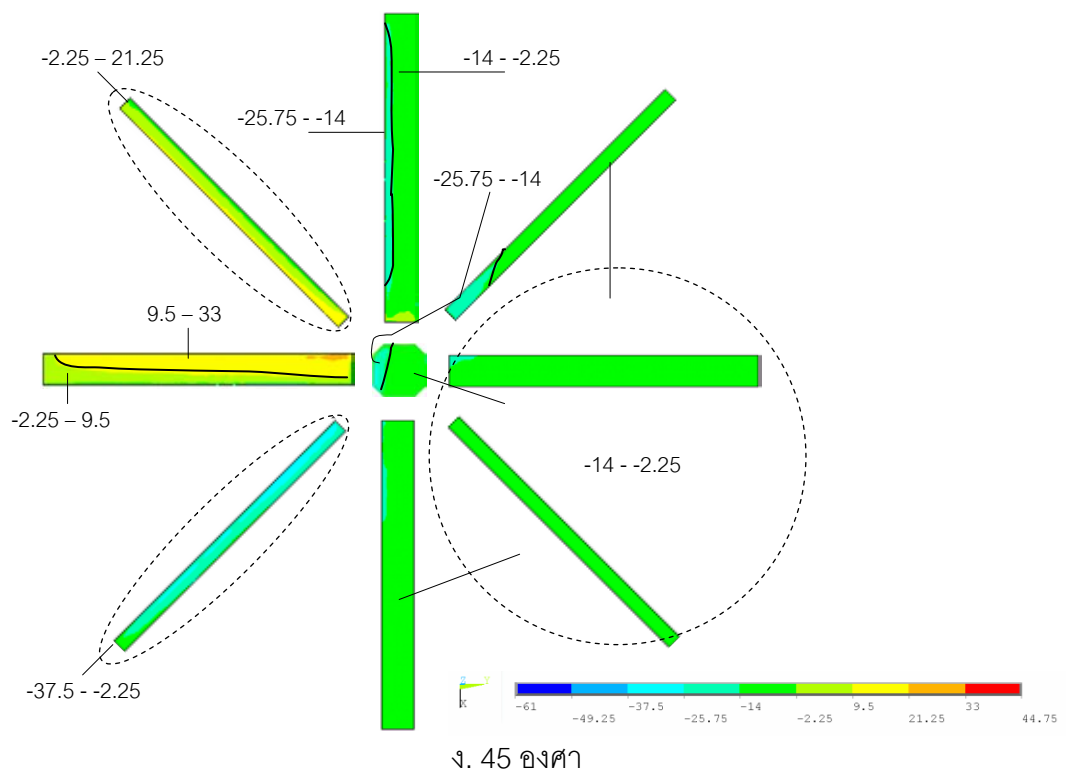
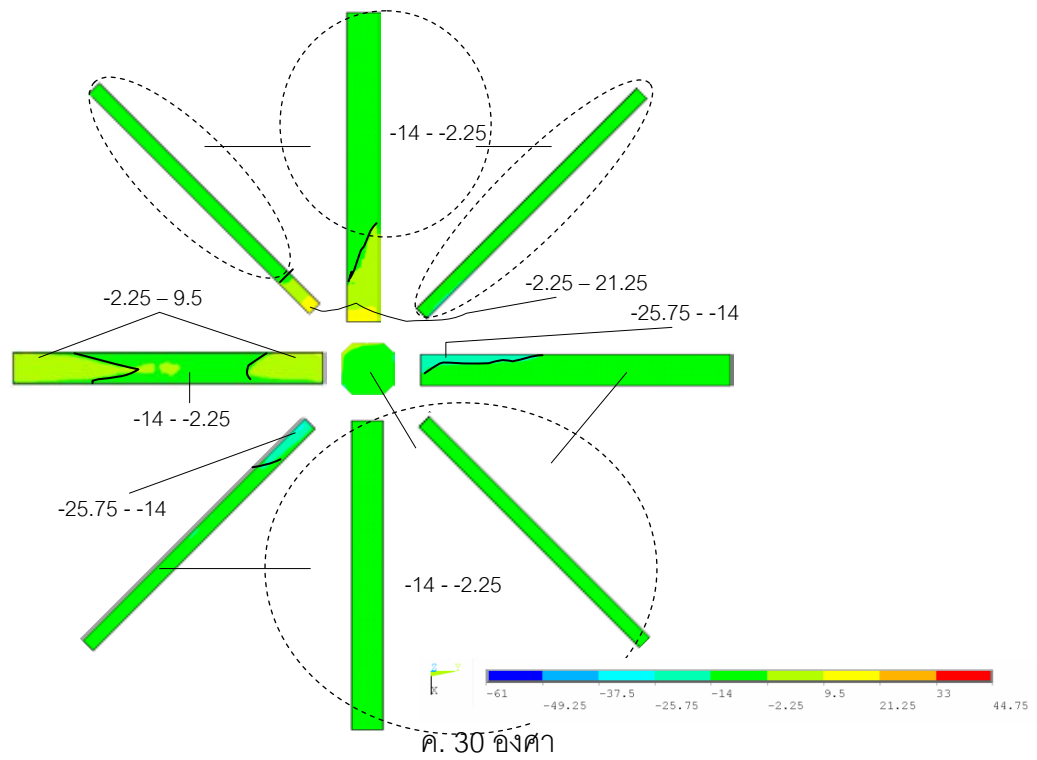


ก. 0 องศา

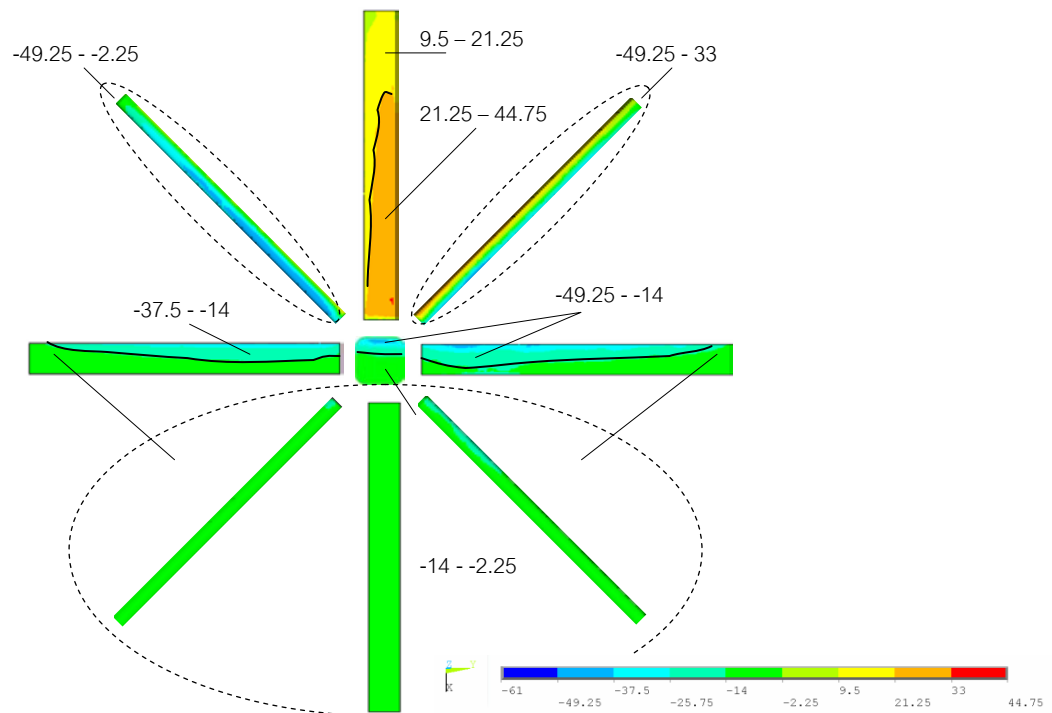


ข. 15 องศา

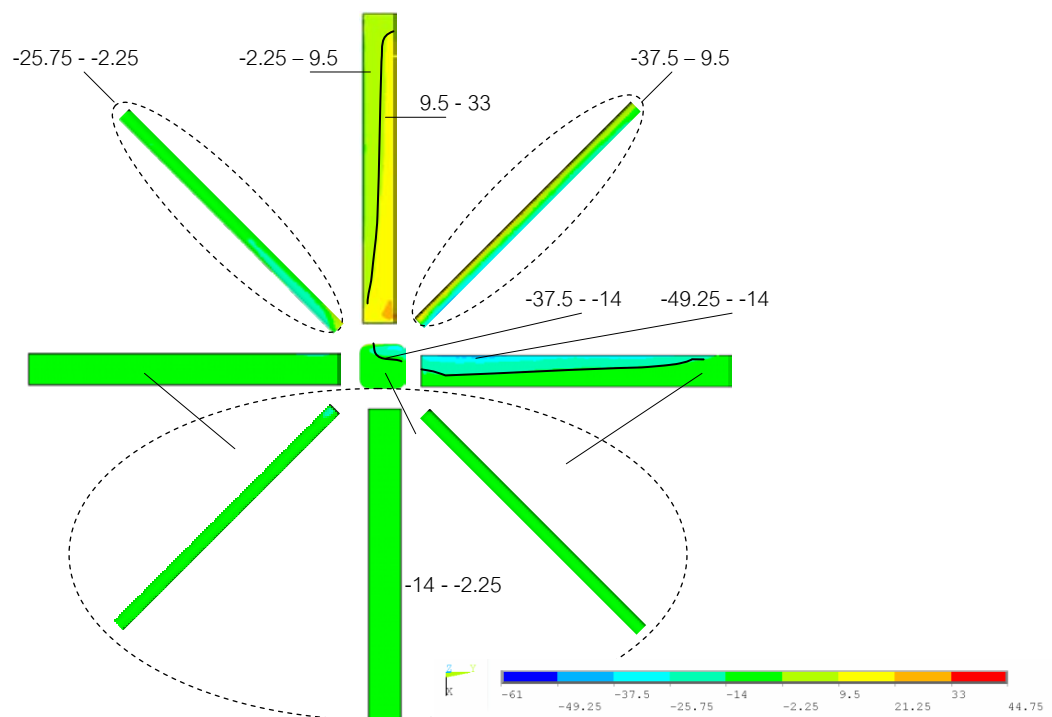
ภาพที่ 8.36 ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด
(นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 8.36 (ต่อ) ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมตัด
(นิวตันต่อตารางเมตร)

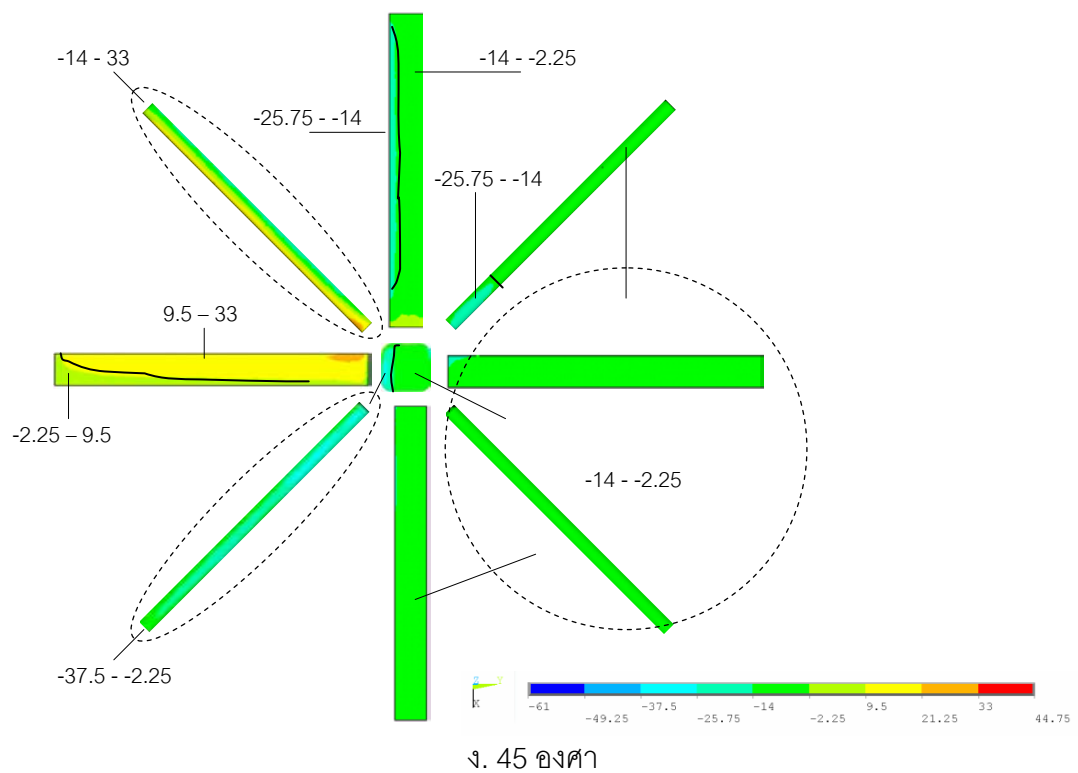
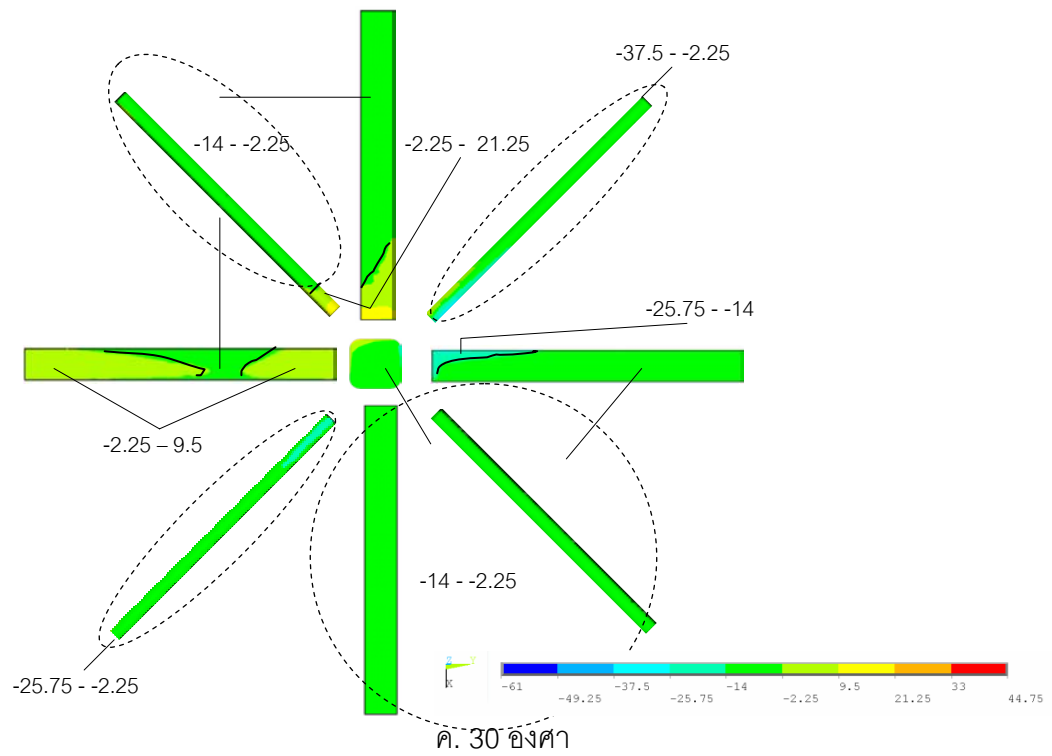


ก. 0 องศา



ข. 15 องศา

ภาพที่ 8.37 ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตึกลีเทียมจัตุรัสมุมโค้งมน
(นิวตันต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 8.37 (ต่อ) ภาพคลี่เส้นชั้นความดันลมของอาคารหลักหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมโค้งมน
(นิวตันต่อตารางเมตร)

8.6 สรุปผลการวิเคราะห์

สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่ออาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคารสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 หัวข้อดังนี้

8.5.1 สรุปผลการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว

1. กรณีพิจารณาผลของการปรับแต่งมุมอาคารจากผลการวิเคราะห์พบว่า อาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารได้มากที่สุดในทุกทิศทางลม โดยที่ทิศทางลมที่ 30 องศาช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ได้มากที่สุด โดยลดลงประมาณ 31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากที่ทิศทางลมเดียวกัน
2. กรณีพิจารณาผลของทิศทางลมจากผลการวิเคราะห์พบว่า อาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมอาคารทั้ง 4 รูปแบบมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ทิศทางลม 0 ถึง 30 องศา หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x จะลดลงที่ทิศทางลม 45 องศา
3. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ของอาคารเดี่ยวที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) ผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ค่าคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ พุสกุล, 2547) สูงสุดประมาณ 32 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีของหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากที่ทิศทางลม 45 องศา

8.5.2 สรุปผลการวิเคราะห์อาคารคู่แฝด

1. อาคารข้างเคียงที่ตั้งอยู่บริเวณเหนือลมตามทิศแกน x มีผลอย่างมากต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลัก โดยเฉพาะเมื่อทิศทางลมตั้งแต่ 15 ถึง 45 องศา

2. กรณีพิจารณาผลของการปรับแต่งมุมอาคารจากผลการวิเคราะห์พบว่า ผลของการปรับแต่งมุมอาคารทั้ง 3 รูปแบบไม่มีอิทธิพลมากนักต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักในทุกๆ ทิศทางลมเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมฉากที่ทิศทางลมเดียวกัน
3. กรณีพิจารณาผลของทิศทางลมจากผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่า อาคารทุกหน้าตัดที่มุมกระแทก 30 องศา ช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x ที่กระทำกับอาคารหลักได้มากที่สุด โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเฉลี่ยตามทิศแกน x มีค่าเข้าใกล้ศูนย์
4. ผลการวิเคราะห์ค่า IF ของอาคารคู่แฝดที่ได้จากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมของ (ชาญณรงค์ ฟุสกุล, 2547) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ผลกระทบของลมที่มีต่อโครงสร้างในลักษณะต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) CFD เป็นการประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) ควบคู่กับความรู้ทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงประสิทธิภาพของ CFD และชี้ให้เห็นถึงประโยชน์ของวิธีการดังกล่าว โดยที่ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างต่างๆ ด้วยวิธี CFD จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลมก่อนหน้า

จุดเริ่มต้นของงานวิจัยนี้คือการทำความเข้าใจกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานทางด้านพลศาสตร์ของไหล งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากสมการนาเวียร์-สโตกส์ควบคู่กับการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งถือว่าเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองของอากาศ โดยที่โครงสร้างลักษณะต่างๆ พิจารณาเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Bluff Body) ผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพของเทคโนโลยี CFD ในการวิเคราะห์ผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้าง

โดยรวมแล้วผลการวิเคราะห์ CFD มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลองอุโมงค์ลม โดยให้ค่าแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างมากกว่าผลการทดลองอุโมงค์ลมในหลายกรณี ดังเห็นได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณาขนาดต่างๆ ในบทที่ 6 และผลการวิเคราะห์อาคารในบทที่ 8

การแปรเปลี่ยนความเร็วลมในพื้นที่เล็กๆ รอบโครงสร้างหรือโครงสร้างที่มีรูปแบบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเพียงเล็กน้อย CFD ให้ค่าแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่สังเกตเห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าวได้ในผลการทดลองอุโมงค์ลม สังเกตได้จากผลการวิเคราะห์กรณีป้ายติดพื้นกับกรณีป้ายที่ลอยจากพื้นเพียงเล็กน้อยในบทที่ 6 และผลการวิเคราะห์อาคารที่มีมุมอาคารแตกต่างกันสี่รูปแบบในบทที่ 8

โดยสรุปแล้วประสิทธิภาพของเทคโนโลยี CFD โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ Model ในงานวิจัยนี้อยู่ในระดับที่ไม่ถึงกับดีมาก ทั้งนี้ค่าคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นมีความเป็นไปได้ว่ามาจากข้อบกพร่องของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ Model ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมาจากทฤษฎีพื้นฐานของ Eddy Viscosity Model (EVM) ซึ่งแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ Model ที่ประดิษฐ์ขึ้นจาก EVM จะให้ค่าพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k) บริเวณมุมด้านหน้าของโครงสร้างมากเกินไป อีกทั้งยังมีความไม่ถูกต้องในการจำลองลมซับซ้อนบริเวณตำแหน่ง Stagnation Point และ Separation Point แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ Model นั้นเหมาะกับการไหลแบบง่าย เช่น การไหลในท่อ (Pipe Flow) เป็นต้น (Murakami, 1997), (Tsuchiya, Murakami, Mochida, Kondo and Ishida, 1997) และ (Jeong, Koh and Lee, 2002)

2. ผลที่ได้จาก CFD สามารถช่วยอธิบายเพิ่มเติมผลการทดลองที่ได้จากอุโมงค์ลม

การไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมช่วยอธิบายให้เห็นถึงพฤติกรรมของลมที่กระทำรอบๆ โครงสร้างได้ ดังเห็นได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณาในบทที่ 6 สังเกตว่าเมื่อลมมีมุมปะทะเปลี่ยนไปแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาจะลดลง ซึ่งหากสังเกตการไหลของเวกเตอร์ความเร็วลมรอบๆ โครงสร้างป้ายโฆษณาจะเห็นได้ว่ามีลักษณะลู่ลมมากขึ้น โดยที่ลมมีทิศทางขนานกับโครงสร้างป้ายโฆษณามากขึ้น หรือการวิเคราะห์หอคาคู่แฝดในบทที่ 8 จะเห็นได้ว่าในบางทิศทางของลม อาคารด้านท้ายลมไม่มีแรงกระทำเลย ทั้งนี้ตำแหน่งของอาคารด้านท้ายลมอยู่ในบริเวณลมหมุนที่มีความเร็วลมต่ำมากทางด้านหลังของอาคารด้านต้นลม

การกระจายตัวของเส้นชั้นความดันลมช่วยอธิบายถึงตำแหน่งและทิศทางของแรงที่กระทำได้ ดังเห็นได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณาในบทที่ 6 เมื่อโครงสร้างป้ายโฆษณาลอยขึ้นระยะเยื้องศูนย์แนวตั้งของแรงลดลง ทั้งนี้เส้นชั้นความดันลมมีการกระจายตัวแบบสมมาตรเต็มพื้นที่มากขึ้น หรือในกรณีที่โครงสร้างป้ายโฆษณามีผลของอาคารที่อยู่บริเวณใกล้ๆ ตามการวิเคราะห์ในบทที่ 7 ซึ่งอาคารสามารถส่งผลต่อการผันผวนค่าแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาได้ เช่นในกรณีอาคารตั้งอยู่ด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาทางด้านต้นลม แรงที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณามีค่าติดลบ

ทั้งนี้เนื่องมาจากเส้นชั้นความดันลมขอบด้านหน้าโครงสร้างป้ายโฆษณาเป็นแรงดูดมากไปในทิศด้านต้นลม

3. ประโยชน์ในการใช้ CFD ควบคู่กับการทดลองอุโมงค์ลม

การใช้ CFD ควบคู่ไปกับการทดลองอุโมงค์ลมนั้นมีข้อประโยชน์ไม่น้อย นอกจากจะช่วยเพิ่มความมั่นใจในผลการทดลองที่ได้ CFD ยังช่วยในการตรวจสอบวิธีการในระหว่างทำการทดลองอุโมงค์ลมได้และหากมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น CFD อาจชี้ให้เห็นเป็นเบื้องต้นได้ว่าสิ่งหนึ่งสิ่งใดมีผลต่อข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นหรือไม่ซึ่งส่งผลให้สามารถดัดแปลงแก้ไขในระหว่างทำการทดลองอุโมงค์ลมได้ทันที ดังสังเกตได้จากการศึกษาแรงที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาในบทที่ 6 การทดลองอุโมงค์ลมจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองเสาเพื่อการหาค่าแรงที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณา ดังนั้นวิธีการทดลองอุโมงค์จึงต้องมีการหักลบผลของเสาด้วยหลักการ Superposition และหลักการดังกล่าวได้ถูกพิสูจน์ด้วย CFD ว่าอยู่ในวิสัยที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามเมื่อมุมปะทะของลมกับโครงสร้างป้ายโฆษณาเปลี่ยนไป แรงในทิศตั้งฉากลมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างป้ายโฆษณาของผลการทดลองอุโมงค์ลมมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นโดยให้ความเห็นว่ามาจากผลของเสา ซึ่งผลการวิเคราะห์ CFD ชี้ให้เห็นว่าไม่ได้สอดคล้องกับค่ากล่าวนั้นมากนัก ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่าข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจมาจากส่วนอื่นรวมอยู่ด้วย

9.2 ข้อเสนอแนะ

1. ด้วยประสิทธิภาพทางด้านคอมพิวเตอร์ ซึ่งงานวิจัยนี้อยู่บนพื้นฐานระบบ Hardware ของ Intel Pentium 4 processor 2.2 GHz, 1 GB of Ram สำหรับ Desktop และ Intel Pentium M processor 1.86 GHz, 1 GB of Ram สำหรับ Notebook ดังนั้นหากมีการปรับเปลี่ยนชนิด Hardware ให้สอดคล้องตามที่ระบุในคู่มือการใช้งานโปรแกรม (ANSYS) ไม่เพียงแต่จะสามารถสร้างแบบจำลองที่มีความละเอียดสูงแต่ยังช่วยให้ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมกับโปรแกรมสะดวกขึ้น
2. การวิเคราะห์ในแต่ละกรณีแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างฉับพลัน เช่น การไหลของความเร็วลมบริเวณด้านหลังของโครงสร้างจากความเร็วลมสูงแปรเปลี่ยนเป็นความเร็วลมต่ำ ผลการวิเคราะห์จะมีความถูกต้องมากขึ้นหากทำการวิเคราะห์ซ้ำด้วยการปรับเปลี่ยนการแบ่งเอลิเมนต์ (Remesh) ในบริเวณดังกล่าวโดยใช้

เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดสูง แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านเวลาและประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้จึงมิได้พิจารณาปรับปรุงขนาดของเอลิเมนต์บริเวณดังกล่าว

3. แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจาก Eddy Viscosity Model (EVM) ดังได้กล่าวแล้วเป็นเบื้องต้นในบทที่ 4 มีทั้งหมด 8 แบบจำลอง ด้วยข้อจำกัดทางด้านเวลาในงานวิจัยนี้จึงเสนอผลการวิเคราะห์เฉพาะแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ Model ดังนั้นจึงควรวิเคราะห์แบบจำลองอื่นๆ เพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่หลากหลายแบบจำลอง การประยุกต์ใช้แบบจำลอง Large Eddy Simulation (LES) ซึ่งมีทฤษฎีแตกต่างไปจาก EVM น่าจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น
4. ในกรณีโครงสร้างป้ายโฆษณาอยู่บนอาคารในปัจจุบันมีอยู่จำนวนไม่น้อยและยังไม่ได้มีการศึกษากันมากนัก ซึ่งตำแหน่งของโครงสร้างป้ายโฆษณาที่อยู่บนอาคารอาจส่งผลต่อค่าแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างป้ายโฆษณาได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยทำการทดลองอุโมงค์ลมควบคู่ไปกับการจำลองพฤติกรรมของลมด้วย CFD

บรรณานุกรม

- ชาญณรงค์ พูลกุล. “พฤติกรรมการรับแรงลมและการตอบสนองของอาคารคู่แฝดที่มีการปรับแต่งรูปร่างบริเวณมุมอาคาร.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2547
- เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ดี. 2548.
- ธีรวัฒน์ ธีรสุขสกุล. “การทดสอบในอุโมงค์ลมสำหรับป้ายโฆษณาที่มีผลของอาคารข้างเคียง.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2548
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- ปวิพท์ แจ่มมั่งคั่ง. “ผลกระทบของทิศทางลมต่อค่าแรงลมสูงสุด สำหรับการออกแบบผนังรอบอาคาร.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- พูลศักดิ์ เพียรสุขสม. “แรงลมเฉพาะจุดสำหรับการออกแบบ CLADDING GLASS ในอาคารสูง.” เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2535):395-403.
- วิโรจน์ ลิ้มตะการ. “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างการไหลความเร็วสูงและโครงสร้าง.” วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

สุกิตย์ เทพมังกร, เป็นหนึ่ง วานิชชัย, ปณิธาน ลักษณะประสิทธิ์ และ วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย.

“การศึกษาพฤติกรรมการโยกตัวของอาคารพญาพาร์คทาวเวอร์เมื่อรับแรงลมโดยการทดสอบในอุโมงค์ลม.” เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 1 (2537):CE239-259.

สุวรรณสาม คีรีวิเชียร. “แรงลมสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้ายโฆษณา.” วิทยานิพนธ์
มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2546

โสภณ ศุภการพิทยากุล. “ผลจากการปิดกั้นต่อแรงลมบนแบบจำลองโครงสร้างหลังคาสนามกีฬา
เฉลิมพระเกียรติ.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2537

อัศวพล ตนสุขชื่น. “การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและตอบสนองของอาคารสูงที่มีการปรับแต่ง
มุมอาคารโดยการทดสอบในอุโมงค์ลมด้วยเทคนิค High Frequency Force Balance.”
วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2546

Anderson, J. D. JR. Computational Fluid Dynamics. International Editions. Singapore:
McGraw-Hill, 1995.

ANSYS Incorporated. ANSYS. ANSYS Help.

Bathe, K. J. Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice-Hall, 1996

Bottema, M. “Turbulence Closure Model “Constants” and the Problems of “Inactive”
Atmospheric Turbulence.” Journal of Wind Engineering and Industrial
Aerodynamics 67&68 (1997):897-908.

- Castro, I. P., and Robins, A. G. "The Flow around a Surface-Mounted Cube in the Uniform and Turbulent Streams." Journal of Fluids Mechanics 79 part 2 (1977):307-335.
- Cowan, I. R., Castro, I. P., and Robins, A. G. "Numerical Considerations for Simulations of Flow and Dispersion around Buildings." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997):535-545.
- Delaunay, D., Lakehal, D., Barre, C., and Sacre, C. "Numerical and Wind Tunnel Simulation of Gas Dispersion around a Rectangular Building." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997):721-732.
- Huser, A., Nilsen, P. J., and Skatun, H. "Application of $k - \varepsilon$ Model to the Stable ABL: Pollution in Complex Terrain." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997):425-436.
- Jeong, U. N., Koh, H. M., and Lee, H. S. "Finite Element Formulation for the Analysis of Turbulent Wind Flow Passing Bluff Structures using the RNG $k - \varepsilon$ Model." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002):151-169.
- Kim, K. C., Ji, H. S., and Seong, S. H. "Flow Structure around a 3-D Rectangular Prism in a Turbulent Boundary Layer." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003):653-669.
- Kobchai Poemsantitham. "Interference Effects from Adjacent Structures on Wind-Induced Forces in Large Billboards." Master's thesis, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 2005.

- Launder, B.E., and Spalding, D.B. "The Numerical Computation of Turbulent Flow." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3 (1974):269-289.
- Leitl, B. M., and Meroney, R. N. "Car Exhaust Dispersion in a Street Canyon. Numerical Critique of a Wind Tunnel Experiment." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 67&68 (1997):293-304.
- Letchford, C. W. "Wind Loads on Rectangular Signboards and Hoardings." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89 (2001):135-151.
- Lien, F. S., Yee, E., and Cheng, Y. "Simulation of Mean Flow and Turbulence over a 2D Building Array using High-Resolution CFD and a Distributed Drag Force Approach." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004):117-158.
- Loi, L.V. "Numerical Analysis of Wind Effects on Billboards Structures." Master's thesis, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 2004.
- Lun, F. Y., Mochida, A., Murakami, S., Yoshino, H., and Shirasawa, T. "Numerical Simulation of Flow over Topographic Features by Revised $k - \varepsilon$ Models." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003):231-245.
- Murakami, S. "Current Status and Future Trends in Computational Wind Engineering." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997):3-34.
- Reddy, J. N. and Gartling, D. K. The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics. 2nd ed. New York: CRC Press, 2000.

- Reichrath, S., and Davies, T. W. "Computational Fluid Dynamics Simulations and Validation of the Pressure Distribution on the Roof of a Commercial Multi-Span Venlo-Type Glasshouse." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002):139-149.
- Selvam, R. P. "Numerical Simulation of Pollutant Dispersion around a Building using FEM." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997):805-814.
- Senthoooran, S., Lee, D. D., and Parameswaran, S. "A Computational Model to Calculate the Flow-Induced Pressure Fluctuations on Buildings." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004):1131-1145.
- Shklyar, A., and Arbel, A. "Numerical Model of the Three-Dimensional Isothermal Flow Patterns and Mass Fluxes in a Pitched-Roof Greenhouse." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004):1039-1059.
- Simiu, E. and Scanlan, R. H. Wind Effects on Structural. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- Srinivas, K., and Fujisawa, N. "Effect of Rotational Oscillation upon Fluid Forces about a Circular Cylinder." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003):637-652.
- Stathopoulos, Y. L. "Numerical Evaluation of Wind-Induced Dispersion of Pollutants around a Building." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997):757-766.

Suksit Sinthuwong. "Wind tunnel Model Test of Large Rectangular Billboards." Master's thesis, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 2004.

Tsuchiya, M., Murakami, S., Mochida, A., Kondo, K., and Ishida, Y. "Development of a New $k - \varepsilon$ Model for Flow and Pressure Fields around Bluff Body." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997):169-182.

Watakabe, M., Ohashi, M., Okada, H., Okuda, Y., Kikitsu, H., Ito, S., Sasaki, Y., Yasui, K., Yoshikawa, K., and Tonagi, M. "Comparison of Wind Pressure Measurements on Tower-Like Structure Obtained from Full-Scale Observation, Wind Tunnel Test, and the CFD Technology." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002):1817-1829.

White, F. M. Fluid Mechanics. 5th ed. Singapore: McGraw-Hill, 2005.

White, F. M. Viscous Fluid Flow. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill, 2006.

ประวัติการศึกษา

ชื่อ	นายทวิช รุ่งมิตรจรัสแสง
วัน เดือน ปีเกิด	17 กุมภาพันธ์ 2523
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร