

การคำนวณการไหลของอากาศผ่านอาคารแบบ 3 มิติ



นายสืบศักดิ์ ประसारสุข

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6923-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# COMPUTATION OF THREE DIMENSIONAL AIRFLOW OVER BUILDINGS



Mr.Suebsak Prasansuk

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6923-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การคำนวณการไหลของอากาศผ่านอาคารแบบ 3 มิติ

โดย

นายสืบศักดิ์ ประสารสุข

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ทวีเวชพฤติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ไพบูรณ์ ศรีภคกร)

สืบศักดิ์ ประสารสุข : การคำนวณการไหลของอากาศผ่านอาคารแบบ 3 มิติ. (COMPUTATION OF THREE DIMENSIONAL AIRFLOW OVER BUILDINGS) อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, 122 หน้า. ISBN 974-17-6923-7.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา และทำนายลักษณะการไหลของอากาศที่ผ่านอาคารในรูปแบบต่างๆจำนวนหนึ่ง โดยแสดงผลเป็นความเร็วและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อประโยชน์ในการนำข้อมูลที่ได้จากการทำนาย ไปใช้ในงานวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคาร

การทำวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการสร้างความเชื่อมั่นในการใช้โปรแกรมด้าน CFD ซึ่งผู้ทำวิจัยได้ทดสอบและเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีผู้ศึกษามาก่อน โดยเริ่มจากปัญหาการไหลแบบง่ายๆ ไปจนถึงปัญหาที่ยากและมีลักษณะใกล้เคียงกับอาคารจริงแบบ 3 มิติ พบว่าผลจากการทดสอบในกรณีที่เป็นปัญหาการไหลแบบราบเรียบจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลอง ในกรณีที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนผลที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับการทดลองมาก

ในส่วนที่สองเป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมด้าน CFD กับอาคารที่มีคนใช้งานจริง โดยใช้อาคาร JEWELRY TRADE CENTER เป็นกรณีศึกษา แบ่งการศึกษาเป็นสองแบบ คือแบบที่ไม่คิดผลกระทบจากอาคารข้างเคียง กับแบบที่เป็นกลุ่มอาคารมีผลจากอาคารข้างเคียง จากการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีผู้ทำการทดลองมาก่อนแล้วในอุโมงค์ลม โดยทำการเปรียบเทียบที่ระดับความสูงของอาคาร 7 ระดับ ผลการคำนวณที่ได้อยู่ในช่วงของผลการทดลองซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2547.....

# # 4570597421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: COMPUTATION / THREE DIMENSIONAL / AIRFLOW OVER BUILDINGS

SUEBSAK PRASANSUK: COMPUTATION OF THREE DIMENSIONAL AIRFLOW OVER BUILDINGS. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D, 122 pp. ISBN 974-17-6923-7.

The objective of this research is to study and predict phenomena of airflow over a building by calculating the velocity and pressure at all points of domain. The obtained data is used for the purpose of building design concerning engineering and architecture.

The research is divided into two parts. The first part focuses on creating confidence in using CFD code in comparison with the pre-research, beginning with simple flow problems to the complex flow ones that are similar to the real 3-dimension building. For the case of laminar flows, the calculation agrees well with the experiments. For turbulent flows, the results from CFD code have the same trend as the measurements.

In the second part of the thesis, prediction of air flow over of the JEWELRY TRADE CENTER is performed as a case study. The study is divided into two cases: single building without and with effects from the blocks nearby. Comparing with the result of a previous research in wind tunnel at the seventh level of the building reveals that results from CFD code is between the maximum and minimum values obtained from experiments; thus showing the reliability of the present numerical method.

Department.....Mechanical Engineering... Student's signature.....  
 Field of study..Mechanical Engineering.. Advisor's signature.....  
 Academic year.....2004.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้ อีกทั้งได้คอยดูแลติดตามจนกระทั่งวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤติ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา และ ดร. ไพบุลย์ ศรีภคากร กรรมการฯ ที่ได้กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาอันเป็นที่รักยิ่ง ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาตลอด อนึ่งคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตามบูชาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้ที่มีพระคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	บ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ป
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีทางด้านอากาศพลศาสตร์.....	8
3.1 การไหลของอากาศ.....	8
3.2 ชั้นของการไหล (Boundary Layer) และการไหลที่ถูกแยก (Separation).....	10
3.3 สัมประสิทธิ์ความดัน (Pressure coefficient).....	11
3.4 กฎยกกำลัง (Power Law).....	12
บทที่ 4 ทฤษฎีไฟไนต์วอลุ่ม.....	14
4.1 สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equations).....	14
4.1.1 สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล.....	14
4.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	14
4.1.3 สมการ Transport.....	15
4.2 หลักการของระเบียบวิธี Finite Volume .....	15

4.2.1 การดิสครีไทซ์ .....	16
4.2.2 Shape function .....	18
4.2.3 The Coupled system of Equations .....	20
4.2.4 ผลเฉลยทั่วไปของสมการ .....	21
4.2.5 การหาผลเฉลยของสมการเชิงเส้น .....	23
4.2.6 วิธีหาค่าเศษตกค้าง .....	23
4.3 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model).....	24
4.3.1 Standard $k - \epsilon$ model .....	25
4.3.2 Shear stress transport (SST) $k - \omega$ based model .....	27
4.3.3 Wall function .....	28
4.4 Boundary conditions .....	29
<b>บทที่ 5 การทดสอบสมรรถนะของโปรแกรม CFD .....</b>	<b>32</b>
5.1 การไหลผ่าน Backward-facing step.....	32
5.1.1 กรณีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow).....	33
5.1.2 กรณีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow).....	36
5.1.3 สรุปผลการไหลผ่าน Backward – facing step .....	39
5.2 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบสองมิติ .....	39
5.2.1 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบราบเรียบ (Laminar flow).....	40
5.2.2 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบปั่นป่วน (Turbulent flow).....	43
5.2.3 สรุปผลการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	47
5.3 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงลูกบาศก์แบบสามมิติ .....	47
5.3.1 สรุปผลการไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบสามมิติ.....	57
<b>บทที่ 6 การคำนวณการไหลของลมผ่านอาคารจริง.....</b>	<b>58</b>
6.1 รายละเอียดและตำแหน่งที่ตั้งของอาคาร.....	58
6.2 การสร้างแบบจำลอง .....	59
6.3 การจำลองสภาพลมบริเวณที่ตั้งอาคาร.....	60
6.4 ลักษณะของการจำลองของโดเมนปัญหา.....	61
6.4.1 กรณีการไหลของอากาศจากทิศเหนือผ่านอาคารเดี่ยว.....	61
6.4.2 กรณีการไหลของอากาศจากทิศตะวันออกผ่านอาคารเดี่ยว.....	74
6.4.3 กรณีการไหลของอากาศจากทิศเหนือผ่านกลุ่มอาคาร .....	88



6.4.4 กรณีการไหลของอากาศจากทิศตะวันออกผ่านกลุ่มอาคาร.....	102
6.5 สรุปและวิเคราะห์ผล.....	115
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	116
รายการอ้างอิง.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	122



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ทิศทางของลมผ่านอาคารเดี่ยว .....	2
รูปที่ 1.2	ทิศทางของลมผ่านกลุ่มอาคาร.....	3
รูปที่ 3.1	ลักษณะของตัวแปรในการไหลแบบปั่นป่วน .....	9
รูปที่ 3.2	Boundary layer บนแผ่นเรียบ .....	10
รูปที่ 3.3	การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง .....	11
รูปที่ 4.1	ปริมาตรควบคุม.....	15
รูปที่ 4.2	การแบ่งโดเมนปริมาตรควบคุมตามวิธีแบบ Vertex-Centered รอบจุดต่อ.....	16
รูปที่ 4.3	เอลิเมนต์และตำแหน่งจุดต่อเพื่อทำการอินทิเกรต .....	17
รูปที่ 4.4	เอลิเมนต์รูปทรงหกหน้าทั่วไป .....	19
รูปที่ 4.5	Flow chart เพื่อหาค่าคำตอบของปัญหา .....	22
รูปที่ 5.1	รูปแบบของปัญหาแบบ Backward-facing step (Not to scale).....	32
รูปที่ 5.2	การตัดกริดในรูปแบบการไหล Backward-facing step รูปบนแสดงขนาดเต็ม รูปล่างแสดงบริเวณส่วนขยายที่เป็นการเปลี่ยนช่องขนาดการไหลอย่างทันทีทันใด (Not to scale).....	33
รูปที่ 5.3	เวกเตอร์ของความเร็วการจำลองไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า $Re = 100$ (Not to scale).....	34
รูปที่ 5.4	รายละเอียดของเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณการไหลหมุนวนขยายจากรูปที่ 5.3 (Not to scale).....	34
รูปที่ 5.5	Pressure contour การไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า $Re = 100$ (Not to scale).....	35
รูปที่ 5.6	Velocity profile ที่ $Re = 100$ (Not to scale).....	35
รูปที่ 5.7	การตัดกริดแบบ Unstructured ของการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า $Re_H = 36,000$ (Not to scale).....	36
รูปที่ 5.8	ภาพขยายของกริดละเอียดที่ช่องการไหลเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ของการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า $Re_H = 36,000$ (Not to scale).....	36
รูปที่ 5.9	เวกเตอร์ของความเร็วการจำลองไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า $Re_H = 36,000$ (Not to scale).....	37

รูปที่ 5.10	รูปขยายเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณการไหลหมุนวน (Not to scale) .....	37
รูปที่ 5.11	Pressure contour การไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า $Re_H = 36,000$ (Not to scale).....	38
รูปที่ 5.12	รูปร่างของความเร็วโดยการเปรียบเทียบผลกับการทดลองที่ค่า $Re_H = 36,000$ (Not to scale).....	38
รูปที่ 5.13	รูปแบบของปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในช่องทางไหล (Not to scale).....	39
รูปที่ 5.14	การขยายกริดที่ละเอียดบริเวณรอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ของการจำลองการ ไหลผ่านรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่า $Re_H = 144$ (Not to scale).....	40
รูปที่ 5.15	เวกเตอร์ความเร็วการจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่า $Re_H = 144$ (Not to scale) .....	41
รูปที่ 5.16	ส่วนขยายของบริเวณที่เกิดการไหลหมุนวนจากการจำลองการไหลผ่าน รูปทรงสี่เหลี่ยม แบบผืนผ้าที่ค่า $Re_H = 144$ (Not to scale) .....	41
รูปที่ 5.17	Pressure contour การไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่า $Re_H = 144$ (Not to scale).....	42
รูปที่ 5.18	รูปร่างความเร็วการไหลผ่านรูปสี่เหลี่ยมโดยการเปรียบเทียบผลกับการ ทดลองที่ค่า $Re_H = 144$ (Not to scale).....	42
รูปที่ 5.19	การตีกริดแบบ Unstructured ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรง สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า $Re_H = 1480$ (Not to scale).....	44
รูปที่ 5.20	การขยายของกริดที่ละเอียดที่บริเวณรอบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของ การจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า $Re_H = 1480$ (Not to scale).....	44
รูปที่ 5.21	เวกเตอร์ความเร็วการจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า $Re_H = 1480$ (Not to scale).....	45
รูปที่ 5.22	ส่วนขยายของบริเวณที่เกิดการไหลหมุนวนจากการจำลองการไหลผ่าน รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า $Re_H = 1480$ (Not to scale) .....	45
รูปที่ 5.23	Pressure contour การไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า $Re_H = 1480$ (Not to scale).....	46
รูปที่ 5.24	ความเร็วในแนวแกน $x$ โดยเปรียบเทียบผลจากการจำลองการไหลกับ ผลของการทดลองที่ค่า $Re_H = 1480$ (Not to scale).....	46

รูปที่ 5.25	รูปทรงลูกบาศก์ที่ใช้ทดลองในอุโมงค์ลม .....	
รูปที่ 5.26	รูปแบบและขนาดของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ (Not to scale) .....	48
รูปที่ 5.27	การตัดกริดแบบ Unstructured ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ (Not to scale).....	49
รูปที่ 5.28	การสร้าง Mesh แบบ Unstructured ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์แบบรูปสามมิติ (Not to scale).....	50
รูปที่ 5.29	ส่วนขยายการสร้าง Mesh ที่ละเอียดบริเวณรอบรูปทรงลูกบาศก์ (Not to scale).....	50
รูปที่ 5.30	เวกเตอร์ความเร็วการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างในระนาบแนวตั้งที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ (Not to scale) .....	51
รูปที่ 5.31	เวกเตอร์ความเร็วของการทดลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างในระนาบแนวตั้งที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ (Not to scale) .....	51
รูปที่ 5.32	เวกเตอร์ความเร็วการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงในระนาบแนวนอนที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ (Not to scale).....	52
รูปที่ 5.33	เวกเตอร์ความเร็วของการทดลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของ ความสูงในระนาบแนวนอนที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ (Not to scale).....	52
รูปที่ 5.34	เวกเตอร์ความเร็ว การจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างในระนาบแนวตั้งแบบสามมิติที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ (Not to scale).....	52
รูปที่ 5.35	Streamline plot ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างในระนาบแนวตั้งแบบสามมิติที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ (Not to scale).....	53
รูปที่ 5.36	Pressure contour ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างในระนาบแนวตั้งและพื้นระนาบล่างแบบสามมิติที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ .....	53
รูปที่ 5.37	Pressure contour การจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ ที่ตำแหน่งบนผิวด้านนอกของสิ่งกีดขวาง โดยรูปบนแสดงส่วนผิวด้านที่ปะทะลม ส่วนรูปล่างแสดงผิวด้านหลัง แบบสามมิติที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ .....	54

รูปที่ 5.38	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน จากผลการจำลองกับผลจากการทดลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ผิวด้านนอกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างในแนวตั้งของลูกบาศก์ ที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ (Not to scale).....	56
รูปที่ 5.39	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน จากผลการจำลองกับผลจากการทดลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ผิวด้านนอกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความสูงในแนวระนาบของลูกบาศก์ที่ค่า $Re = 7 \times 10^4$ (Not to scale).....	56
รูปที่ 6.1	อาคาร JEWELRY TRADE CENTER .....	58
รูปที่ 6.2	โดเมนของปัญหาการจำลองลมผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER.....	59
รูปที่ 6.3	ทิศทางลมจากทิศเหนือกระทบตัวอาคาร JEWELRY TRADE CENTER.....	62
รูปที่ 6.4	การสร้าง Mesh จำลองการไหลของอากาศจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีของอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	62
รูปที่ 6.5	รูปขยายของ Mesh ในบริเวณที่มีความละเอียด ของการจำลองการไหลผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีของอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	63
รูปที่ 6.6	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	64
รูปที่ 6.7	สัดส่วนความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างที่รับแรงลมปะทะ ที่ตำแหน่งต่างๆในแนวแกน $x$ กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	65
รูปที่ 6.8	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างแบบ 3 มิติ กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	65
รูปที่ 6.9	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระดับความสูงจากพื้นระนาบ 100 เมตร กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	66

รูปที่ 6.10	Pressure contour บนผนังอาคารและระนาบกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะของการไหลของลมจากทิศเหนือ ผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)....	66
รูปที่ 6.11	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 44 เมตร กรณี แบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	67
รูปที่ 6.12	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 48 เมตร กรณี แบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	68
รูปที่ 6.13	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 84 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale) .....	68
รูปที่ 6.14	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 88 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	69
รูปที่ 6.15	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 116 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	69
รูปที่ 6.16	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 120 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	70
รูปที่ 6.17	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 140 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	70
รูปที่ 6.18	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 144 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	71
รูปที่ 6.19	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 164 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	71



รูปที่ 6.20	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 168 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	72
รูปที่ 6.21	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 188 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	72
รูปที่ 6.22	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 192 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	73
รูปที่ 6.23	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 206 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	73
รูปที่ 6.24	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 210 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	74
รูปที่ 6.25	ทิศทางลมจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอาคาร JEWELRY TRADE CENTER.....	75
รูปที่ 6.26	การสร้าง Mesh จำลองปัญหาการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	75
รูปที่ 6.27	รูปขยาย Mesh ที่มีความละเอียด การจำลองปัญหาการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	76
รูปที่ 6.28	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	77
รูปที่ 6.29	สัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆในแนวแกน $x$ ของระนาบกึ่งกลางความกว้างรับแรงลมปะทะ ของการไหลของลมจากทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	78

รูปที่ 6.30	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออก ผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระดับความสูงจากพื้นระนาบ 100 เมตร (Not to scale).....	78
รูปที่ 6.31	Pressure contour บนผนังอาคารและที่ระนาบกึ่งกลาง ของการไหลของลมจากทางทิศตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER มุมมองด้านหน้า และด้านหลัง กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale).....	79
รูปที่ 6.32	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออก ผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระนาบสูง 100 เมตร จากพื้นดิน และระนาบกึ่งกลางโดเมนการไหล กรณีอาคารเดี่ยว แบบ 3 มิติ (Not to scale).....	80
รูปที่ 6.33	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 44 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	81
รูปที่ 6.34	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 48 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	82
รูปที่ 6.35	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 84 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	82
รูปที่ 6.36	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 88 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	83
รูปที่ 6.37	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 116 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	83
รูปที่ 6.38	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 120 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	84



รูปที่ 6.39	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 140 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	84
รูปที่ 6.40	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 144 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	85
รูปที่ 6.41	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 164 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	85
รูปที่ 6.42	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 168 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	86
รูปที่ 6.43	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 188 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	86
รูปที่ 6.44	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 192 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	87
รูปที่ 6.45	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 206 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	87
รูปที่ 6.46	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 210 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	88
รูปที่ 6.47	ทิศทางลมจากทิศเหนือกระทบกลุ่มอาคาร JEWELRY TRADE CENTER .....	89
รูปที่ 6.48	Mesh ที่ผิวภายนอกอาคารของการไหล ของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale).....	89

รูปที่ 6.49	รูปขยาย Mesh ที่ผิวภายนอกอาคาร ของการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale).....	90
รูปที่ 6.50	สัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆในแนวแกน $x$ ของการไหลของลมจากทางทิศเหนือผ่านกลุ่มอาคาร ที่ระนาบกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ (Not to scale).....	91
รูปที่ 6.51	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale).....	92
รูปที่ 6.52	เวกเตอร์ความเร็ว การไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระนาบสูง 40 เมตร จากพื้นดิน กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale).....	92
รูปที่ 6.53	Pressure contour บนผนังอาคารและที่พื้นระนาบกับระนาบตรงกลาง การไหลของลมจากทิศเหนือผ่านกลุ่มอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ทั้งมุมมองด้านหน้า และด้านหลัง (Not to scale).....	93
รูปที่ 6.54	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระนาบสูง 40 เมตร จากพื้นดิน และที่ระนาบกึ่งกลางของความกว้าง กรณีกลุ่มอาคารแบบสามมิติ (Not to scale).....	94
รูปที่ 6.55	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 44 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	95
รูปที่ 6.56	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 48 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	95
รูปที่ 6.57	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 84 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	96
รูปที่ 6.58	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 88 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	96



รูปที่ 6.69	ทิศทางลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือกระทบกลุ่มอาคาร JEWELRY TRADE CENTER (Not to scale).....	102
รูปที่ 6.70	Mesh ที่ผิวภายนอกอาคารของการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านกลุ่มอาคาร JEWELRY TRADE CENTER (Not to scale).....	103
รูปที่ 6.71	รูปขยาย Mesh ที่ผิวภายนอกอาคารของการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale).....	103
รูปที่ 6.72	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale).....	105
รูปที่ 6.73	สัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆในแนวแกน $x$ ของการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านกลุ่มอาคารที่ระนาบกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ (Not to scale).....	105
รูปที่ 6.74	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระนาบสูง 40 เมตร จากพื้นดิน กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale).....	106
รูปที่ 6.75	เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งความสูง 40 เมตร จากพื้น กรณีกลุ่มอาคารแบบสามมิติ (Not to scale).....	106
รูปที่ 6.76	Pressure contour การไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านกลุ่มอาคารที่ผิวภายนอกอาคาร ทั้งมุมมองด้านหน้า และด้านหลัง (Not to scale).....	107
รูปที่ 6.77	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 44 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	108
รูปที่ 6.78	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 48 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	108
รูปที่ 6.79	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 84 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale).....	109



รูปที่ 6.90 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 210 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนว ลูกศร (Not to scale).....



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดลักษณะภูมิประเทศ ตามข้อกำหนดของ ANSI A58.1-1982 ..... 12



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่หน้าตัดการไหลผ่านปริมาตรควบคุม
$B$	ผลรวมของแรงเนื่องมาจากน้ำหนักตัวเอง
$\alpha$	ค่าตัวเลขยกกำลัง
$C_p$	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันลม
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอก, ความกว้างของสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยม, ความกว้างของแผ่นคู่ขนาน, Diffusion conductance
$D^*$	อัตราส่วน $D/\delta^*$
$E$	ค่าความขรุขระของผิว
$H$	ความสูงของช่องทางไหล
$h$	ความสูงของสิ่งกีดขวาง
$\vec{J}$	เวกเตอร์การแพร่
$k$	Turbulent Kinetic energy
$L_R$	ความยาวของบริเวณการหมุนวน
$L$	ความยาวทั้งหมดของโดเมนการไหล
$L_{in}$	Entrance length
$l$	ความยาวของสิ่งกีดขวาง
$\bar{n}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วย
$Pe$	Peclet number
$p_0$	ค่าความดันลมสถิตย์
$p$	ค่าความดัน ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดค่า
$p'$	Modified pressure
$P$	The turbulent production term ของสมการ $k$
$r_\phi$	ค่าเศษตกค้างของปริมาตรควบคุม
$Re$	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
$Re_h$	Step-height Reynolds number
$S$	พื้นที่ผิวปริมาตรควบคุม
$S_\phi$	Source term
$t$	เวลา
$U$	ค่าความเร็วลมเฉลี่ย
$U_\infty$	ความเร็วในทิศ $x$ ที่ Free-stream



$u$	ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงใดๆ
$u_g$	ค่าความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์
$u^+$	ค่าความเร็วที่ใกล้ผนัง
$V$	ปริมาตรควบคุม
$v$	ความเร็วในแนวแกน $y$
$w$	ความกว้างของสิ่งกีดขวาง
$x$	ระยะในแนวแกน $x$
$y$	ระยะในแนวแกน $y$
$y_p$	ระยะที่วัดจากผนัง
$y^+$	ค่าไร้หน่วยของระยะทางจากผนัง
$z$	ค่าความสูงใดๆ
$z_g$	ค่าความสูงเกรเดียนต์
$\beta$	ตัวแก้เพื่อให้คำตอบมีความแม่นยำ
$\rho$	ความหนาแน่น
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์
$\mu_{eff}$	Effective viscosity
$\nu$	ความหนืดจลศาสตร์
$\phi$	ตัวแปรสเกลาร์
$\phi_\epsilon$	The destruction term ของสมการ $\epsilon$
$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การแพร่
$\delta^*$	Displacement thickness
$\tau_{ij}$	Reynolds stress
$\tau_w$	ความเค้นเฉือนที่ผนัง
$\epsilon$	Turbulence eddy dissipation
$\omega$	Turbulent frequency
$\kappa$	Von karman constant

## ตัวห้อย (Subscripts)

$ip$	จุดที่ทำกรอินทิเกรต
$nb$	จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง
$i, j, k$	Cartesian indices
$t$	Turbulent

## ตัวยก (Superscripts) และ Overbars

'	ส่วนการสั่นที่ได้จาก Reynolds decomposition
*	Current value
-	ค่าเฉลี่ย
+	ค่า Normalized ใน Wall function

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลของอากาศผ่านอาคารขนาดใหญ่และมีความสูงมาก ผนังของอาคารต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนทานต่อความดันลมกระทำบนผิวผนังรอบอาคาร และด้วยความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมสมัยใหม่ วัสดุหลายประเภทถูกนำมาใช้แทนการใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูนทั้งโดยรอบอาคารและภายในอาคาร เนื่องจากความต้องการความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรมและความรวดเร็วในการติดตั้ง ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้างลงได้ แต่ความแข็งแรงทนทานของผนังที่ใช้วัสดุประเภทอื่น อาจจะน้อยกว่าผนังอิฐฉาบปูน วิศวกรและผู้ออกแบบตัวอาคารต้องมีข้อมูลช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุมาทำผนังอาคาร นอกจากความแข็งแรงของผนังอาคารแล้ว การไหลของอากาศผ่านอาคารยังมีผลต่อการกระจายของกระแสลมซึ่งเป็นผลในด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวกับความสบายของผู้ใช้อาคารและผู้ที่อยู่ข้างเคียง

การคำนวณการไหลของอากาศผ่านตัวอาคาร จะให้ค่าแรงลมที่กระทำต่อผนังรอบอาคารเป็นค่าความดันที่ตำแหน่งต่างๆบนผนังอาคาร และค่าการเคลื่อนที่ของกระแสลม เป็นค่าความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบผนังของอาคาร เพื่อไม่ให้เกิดอุบัติเหตุอันนำไปสู่อันตรายต่อผู้ใช้อาคารและผู้สัญจรไปมา

การเคลื่อนที่ของลมผ่านตัวอาคารและกลุ่มอาคาร จะเกิดผลกระทบในแง่ต่างๆดังนี้

1. ในแง่ของโครงสร้าง เช่น แรงของลมกระทำที่ตัวอาคารอาจทำให้อาคารชำรุดได้ และการสั่นของตัวอาคารที่เนื่องจากกระแสลมมาปะทะก็อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของตัวอาคาร

2. ในแง่ของสิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะที่กระจายมากับกระแสลมปะทะกับตัวอาคาร อาจทำให้เกิดความไม่สบายของผู้ที่อยู่อาศัยบริเวณนั้น

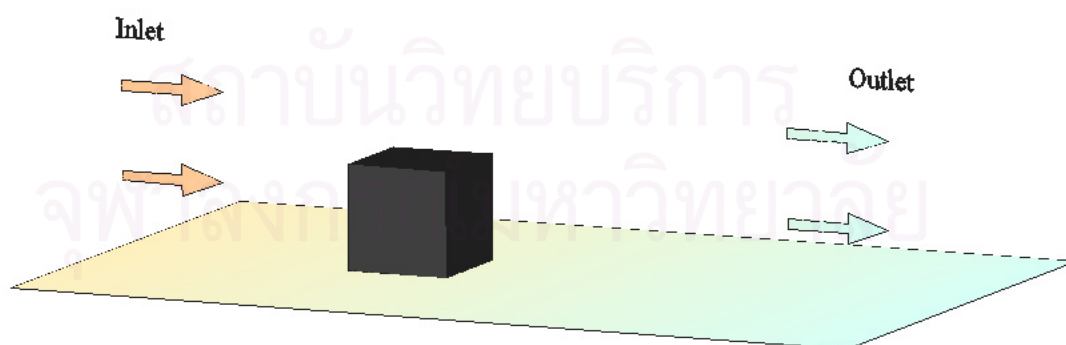
3. ในแง่ของพลังงาน เช่น มีความร้อนสูญเสียไปกับลม อากาศที่ภายในอาคารรั่วออกมาและอากาศจากภายนอกเข้าไปในตัวอาคารเกิดผลกระทบต่อระบบอากาศภายในตัวอาคาร

ดังนั้นผู้ออกแบบอาคารจะต้องคำนึงถึงผลกระทบที่กล่าวมาทั้งหมด เพื่อทำให้เกิดความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย การศึกษาผลกระทบเหล่านั้นอาจทำได้โดย

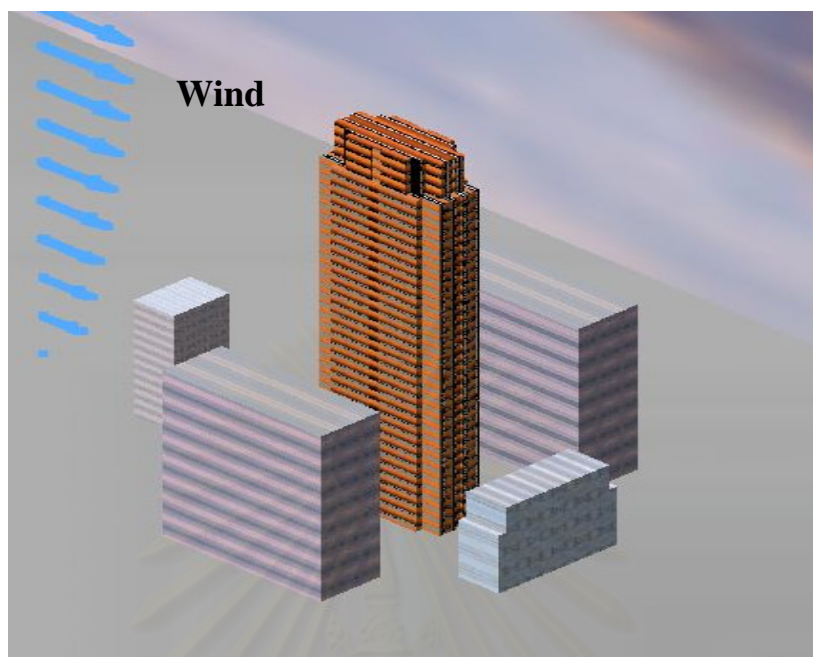
1. สร้างโมเดลเพื่อทำการทดลองในอุโมงค์ลม ซึ่งจะเก็บข้อมูลเป็นค่าความเร็วแล้วแปลงเป็นค่าความดันออกมา ซึ่งผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือแค่ไหนก็ขึ้นอยู่กับว่าเงื่อนไขในการทดลองใกล้เคียงความเป็นจริงมากแค่ไหน และการเก็บข้อมูลจากการทดลองมีความแม่นยำเพียงพอหรือไม่ ค่าใช้จ่ายที่ต้องลงทุนมากในการทำการทดลอง ทำให้จำนวนการทดลองในเรื่องของผลกระทบของอากาศที่เคลื่อนที่มากระทบ และผ่านกลุ่มอาคารนั้นมีน้อย

2. คำนวณผลลัพธ์โดยใช้หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็นวิธีที่เริ่มได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากวิธีนี้มีความละเอียดสมบูรณ์ และเวลาที่ใช้ในการออกแบบก็น้อยกว่าการทดลอง ทำให้สามารถออกแบบการวิเคราะห์ได้หลายแบบและเลือกแบบที่ดีที่สุดในเวลาที่สุดเร็ว โดยมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ

ในงานวิจัยนี้ ใช้หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนในการทำนายปรากฏการณ์ของลมผ่านตัวอาคาร โดยแบบจำลองที่ใช้คือ Standard  $k-\epsilon$  Model กับ Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  Based Model สำหรับโดเมนการคำนวณที่เป็นอาคารแบบซับซ้อนนั้น จะใช้ Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  Based Model เนื่องจากข้อได้เปรียบในการทำนายไหลแบบแยก (Separation flow) ที่ดีกว่า Standard  $k-\epsilon$  Model ส่วนของตัวอาคารที่ทำการทำนายการไหลผ่านของลมนั้น จะใช้ตัวอาคารทรงลูกบาศก์ที่มีอยู่จริงในกรุงเทพฯ โดยทำการจำลองปัญหาของการไหลของอากาศผ่านอาคารทั้งแบบอาคารเดี่ยวและแบบกลุ่มอาคาร จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีการทำมาก่อนหน้านี้



รูปที่ 1.1 ทิศทางของลมผ่านอาคารเดี่ยว



รูปที่ 1.2 ทิศทางของลมผ่านกลุ่มอาคาร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษา และทำนายลักษณะการไหลของอากาศที่ผ่านอาคารในรูปแบบต่างๆจำนวนหนึ่ง โดยแสดงผลเป็นความเร็วและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการคำนวณ Pressure distribution (ในรูปแบบของ Pressure coefficients) และ Velocity distribution ที่ตำแหน่งต่างๆของอาคารโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้าน CFD เพื่อศึกษาผลของการไหลผ่านอาคารที่มีความสูงต่างกัน โดยเปลี่ยนตำแหน่งทิศทางของลมที่ปะทะกับอาคาร

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำค่า Pressure และ Velocity distribution ที่คำนวณได้ ไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อช่วยในงานด้านวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคาร

#### 1.5 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีทางด้าน CFD เช่น ศึกษาสมการพื้นฐานของของไหลซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ประกอบด้วย สมการนาเวียร์-สโตกส์ และสมการความต่อเนื่อง รวมถึงการประยุกต์วิธีไฟไนต์วอลุ่มกับสมการพื้นฐานเหล่านี้ในโปรแกรมสำเร็จรูป
2. ศึกษาการใช้งานของโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้าน CFD เช่น การสร้างแบบจำลองของอาคารต่างๆในโปรแกรมสำเร็จรูป การสร้างเอลิเมนต์แบบต่างๆ และการเลือกใช้ Turbulence model โดยเริ่มประยุกต์ใช้กับปัญหาแบบง่ายๆ ไปทีละขั้น
3. ทำการวิเคราะห์การไหลของลมผ่านอาคารและกลุ่มอาคารที่ต้องการศึกษา
4. วิเคราะห์ผลที่ได้และปรับปรุงเทคนิคการคำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น
5. สรุปผล
6. จัดทำวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Murakami and Mochida (1988) ทำการจำลองอากาศไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปทรงลูกบาศก์โดยใช้  $k - \epsilon$  model สำหรับค่า Reynolds number เท่ากับ  $7 \times 10^4$  และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ทำไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งจากการเปรียบเทียบกัน ทำให้เห็นว่าผลจากการจำลองแบบโดยใช้  $k - \epsilon$  model ให้ค่าที่มีความสอดคล้องกับการทดลองมาก

Petersen et al. (1999) ทำการทดลองเกี่ยวกับตำแหน่งการตกกระทบของควันที่ถูกปล่อยออกจากปล่องไฟที่ติดตั้งบนหลังคาของอาคาร โดยทำการทดลองสร้างแบบจำลองของอาคารสูงและอาคารต่ำที่มีปล่องไฟติดตั้งบนหลังคา แล้วปล่อยควันสีออกจากปล่องไฟและใช้พัดลมเป่าลมผ่านตัวอาคาร ซึ่งจากการทดลองพบว่าตำแหน่งตกกระทบของควันที่ถูกปล่อยจะขึ้นอยู่กับความเร็วของปล่องไฟ รวมไปถึงความเร็วและทิศทางลมที่พัดผ่านตัวอาคาร

Sun and Huang (2001) ได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทำนายลักษณะของลมผ่านตัวอาคารทรงลูกบาศก์แบบสามมิติโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \epsilon$  model จากการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องกับค่าที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลม พบว่าผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองเมื่อเพิ่มจำนวนของ mesh ที่บริเวณใกล้ตัวอาคารให้มากขึ้น

Schofield and Logan (1990) ทำการวิเคราะห์สนามการไหลเฉื่อยรอบ ๆ สิ่งกีดขวางที่ติดกับผนัง ภายใต้ Turbulent boundary layer และพิจารณาถึงลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของสิ่งกีดขวางที่มีอิทธิพลต่อสนามการไหลกับ Shear layer ที่เกิดขึ้น ผลจากการวิเคราะห์พบว่าในกรณีที่มี Reynolds number มีค่าสูง ชั้นของ Shear layer จะมีขนาดหนากว่าในบริเวณที่ใกล้กับสิ่งกีดขวาง

Lai and Makomaski (1989) ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TEACH เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลที่ Upstream ของสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่วางใน Turbulent boundary layer โดยนำผลการทำนายไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Blair (1984) พบว่าผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างมิติของ Vortex การกระจายตัวของ

Wall static pressure และตำแหน่ง Saddle point กับ  $Re = U_\infty \delta^* / \nu$  และ  $D^* = D / \delta^*$  พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกันกับผลการทดลองของการไหลผ่านทรงกระบอกกลม (Eckerle and Langston, 1987 : Baker,1980) โดยตำแหน่งของ Saddle point พบว่าขึ้นกับ Turbulence intensity ใน Vortex แรก และสัมพันธ์กับความดันที่ปลายของสิ่งกีดขวางขึ้นกับค่า  $D^*$  เพียงอย่างเดียวถ้าไม่เกิด Vortex ขึ้นที่มุมของสิ่งกีดขวาง แต่ค่าสัมพันธ์ความดันนี้มีค่าลดลงเมื่อเกิด Vortex ขึ้นที่มุมดังกล่าว รูปแบบการไหลจากการคำนวณมีลักษณะเช่นเดียวกันกับ One-vortex model ของ Eckerle and Langston (1987)

Martinuzzi and Tropea (1993) ทำการทดลองโดยใช้เทคนิค Crystal violet, Oil-film และ Laser-sheet flow visualization เพื่อศึกษาการไหลรอบ ๆ สิ่งกีดขวางลักษณะปริซึมที่มีความกว้าง (Spanwise) หลาย ๆ ขนาดต่างกันซึ่งวางติดกับพื้นผิว โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างสนามการไหลรอบปริซึมสองมิติและสามมิติ ทุกการทดลองกระทำใน Fully developed channel flow ซึ่งมี Reynolds number อยู่ระหว่าง  $8 \times 10^4$  ถึง  $1.2 \times 10^5$  โดยค่า Reynolds number ขึ้นกับขนาดความสูงของช่องทางไหล จากผลการทดลองพบว่าบริเวณตรงกลางของ Wake จะประมาณได้ว่าเป็นการไหลแบบ 2 มิติ เมื่อปริซึมมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง (W/H) มากกว่า 6 ส่วนบริเวณที่เกิดการแยกไหลด้านหน้าของปริซึมที่มีอัตราส่วนความกว้างมาก ๆ จะสังเกตเห็นได้มีการกระจายตัวของ Saddle point และ Nodal point ตลอดแนวด้านหน้าของปริซึม ซึ่งโครงสร้างการไหลในลักษณะนี้เป็นโครงสร้างการไหลแบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วย จุด Separation และจุด Stagnation

Acharya et al. (1994) ทำการศึกษาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางติดตั้งภายในท่อแบบ 2 มิติ โดยใช้ Nonlinear  $k - \varepsilon$  turbulence model เปรียบเทียบกับการใช้ Standard  $k - \varepsilon$  model และผลจากการทดลอง ซึ่งพบว่าการใช้ Nonlinear  $k - \varepsilon$  model ให้ผลการทำนายที่ดีกว่าในการคำนวณเกี่ยวกับ Turbulence intensities, ความเร็วเฉลี่ยใกล้ขอบที่มีความเร็วสูงของ Shear layer ที่เกิดการแยกไหล และบริเวณการหมุนวนที่ Downstream นอกจากนั้นยังให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่าสำหรับเทอมการผลิต (Production) และการแยกสลาย (Dissipation) ของ Turbulent kinetic energy ใกล้กับบริเวณการหมุนวน อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในบริเวณการแยกไหล และบริเวณ Shear-layer ที่ติดกับสิ่งกีดขวาง

Martinuzzi and Havel (2000) ทำการทดลองโดยการฉีด Oil-film ให้ไหลผ่านลูกบาศก์สี่เหลี่ยมซึ่งวางเรียงกันตามแนวยาว 2 อัน ภายใน Thin laminar boundary layer การ



ทดลองถูกกระทำโดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างลูกบาศก์ทั้งสองที่ค่า Reynolds number ประมาณ 22,000 ซึ่งค่า Re จะขึ้นอยู่กับความเร็วและความสูงของลูกบาศก์ ความเร็วเฉลี่ยถูกวัดด้วย Laser-doppler velocimetry และลักษณะรูปร่างของการไหลผ่านพื้นผิวถูกแสดงโดย การใช้เทคนิค Oil-film จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะของสมการไหลโดยเฉลี่ยนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ซึ่งขึ้นกับระยะห่างระหว่างลูกบาศก์ และจากผลของ Frequency spectra of velocity และ Surface pressure fluctuation โดยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างการไหลทั้งสามนั้นมีความสัมพันธ์กับ Wake flow periodicity ที่เกิดขึ้น สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างลูกบาศก์มีค่าน้อย Shear layer ซึ่งเกิดขึ้นจากการแยกไหลที่ลูกบาศก์ลูกแรก จะไหลกลับมาติดด้านข้างของลูกบาศก์ลูกที่ 2 และ Wake periodicity สามารถพบได้ใน Wake ที่ Downstream เท่านั้น สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างลูกบาศก์อยู่ที่ค่าวิกฤตินั้นจะเกิด Fluctuation ในช่องว่างระหว่างลูกบาศก์ และเกิด Wake เพิ่มขึ้นมาด้วย และสำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างลูกบาศก์มาก ๆ จะพบว่าเกิด Horseshoe vortex ลูกที่สองขึ้นที่หน้าลูกบาศก์ลูกที่สอง จากการทำ Flow visualization โดยใช้เทคนิค Dye-injection และ Smoke-wire พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ทฤษฎีทางด้านอากาศพลศาสตร์

#### 3.1 การไหลของอากาศ

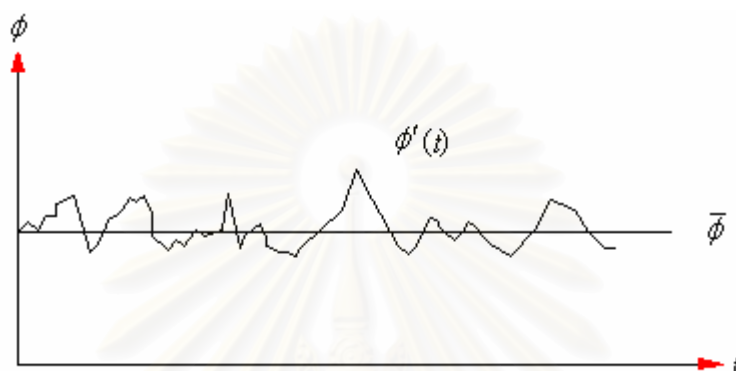
ลมหรือการเคลื่อนที่ของอากาศ เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดันอากาศระหว่างจุดสองจุดในระดับความสูงเดียวกัน ความแตกต่างของความดันอากาศนี้เกิดขึ้นจากการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์และการสะสมความร้อนของผิวโลก เมื่อใดที่จุดใดจุดหนึ่งได้รับความร้อนสูงกว่า อากาศบริเวณนั้นจะเกิดการขยายตัวและลอยตัวขึ้นสูง ก่อให้เกิดบริเวณความกดอากาศต่ำ ทำให้อากาศบริเวณที่มีความกดอากาศสูงกว่า หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่และก่อให้เกิดลมขึ้น

การไหลของอากาศผ่านวัตถุอาจเป็นการไหลแบบ Steady หรือ Unsteady ก็ได้ โดยลักษณะการไหลอาจเป็นแบบ Laminar หรือ Turbulent กรณีที่การไหลเป็นแบบ Laminar นั้นหมายความว่ามีการไหลของของไหลแต่ละชั้นบางๆ (Layer) ที่ยึดติดกัน ซึ่งแม้จะมีความเร็วต่างกันเพราะมีแรงเสียดทานจากความหนืดก็ตาม ต่างก็จะไหลอยู่ในชั้นของตัวเองโดยไม่มี การไหลเข้าไปผสมในชั้นอื่นๆ ส่วนกรณีที่เป็นการไหลแบบ Turbulent อนุภาคจะเคลื่อนที่อลวนไป ในทิศทางต่างๆกันโดยอาจกระโดดไปไหลในชั้นอื่นๆกลับไปกลับมา การเคลื่อนที่แบบ Turbulent ที่เรามองเห็นอยู่นั้นเป็นการเคลื่อนที่ Mean motion ของของไหลเท่านั้น ซึ่งค่า Reynolds number เป็นตัวบ่งชี้ว่าลักษณะการไหลเป็นแบบไหน สำหรับการไหลผ่านแผ่นเรียบ การไหลจะเป็นแบบ Turbulent เมื่อ Reynolds number มีค่าตั้งแต่ 2000 ขึ้นไป

โดยปกติแล้ว ค่าของตัวแปรในการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าไม่คงที่ และค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป ดังเช่นตัวอย่างของความเร็ว ทำให้การคำนวณค่าตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นเป็นอันมาก เพราะฉะนั้นจึงสมมติว่าคุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยใช้หลักการ Reynolds decomposition กล่าวคือ แบ่งออกเป็นค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลาเช่น  $\bar{u}, \bar{v}$  หรือ  $\bar{p}$  กับส่วนที่แทนผลของ Fluctuation ที่ขึ้นกับเวลาเช่น  $u', v'$  หรือ  $p'$  ดังนั้นค่าความเร็วและความดันที่ขณะใดขณะหนึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\phi$  แทนตัวแปรทั่วไปตัวหนึ่ง โดยสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเมื่อเวลาเปลี่ยนไปได้ดังรูปที่ 3.1



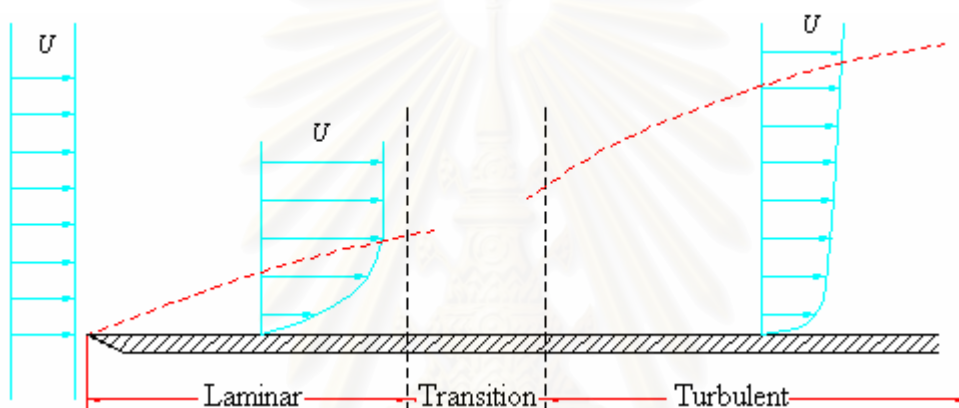
รูปที่ 3.1 ลักษณะของตัวแปรในการไหลแบบปั่นป่วน

โดยปกติแล้วการไหลของลมจะมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบไหลวน เนื่องจากคุณสมบัติของความหนืดที่ค่อนข้างต่ำ ค่าความเร็วลมจึงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตลอดความสูงในชั้นบาวดารีเลเยอร์ (Boundary layer) ค่าของความเร็วลม ณ ความสูงจากพื้นดินที่ระดับใดระดับหนึ่ง จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในลักษณะเดียวกันกับตัวแปร  $\phi$  ในรูปที่ 3.1

อากาศเป็นของไหลที่มีคุณสมบัติของความหนืดและความเสียดทาน ดังนั้นบริเวณที่อากาศเคลื่อนที่ติดกับผิวโลกซึ่งมีความขรุขระย่อมทำให้เกิดแรงเสียดทานซึ่งส่งผลให้ความเร็วของการเคลื่อนที่ลดลง และเกิดการไหลแบบหมุนวน (Recirculation flow) อย่างไรก็ตามผลกระทบจากแรงเสียดทานของผิวโลกจะลดลงขณะที่ความสูงจากผิวโลกเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงความสูงระดับหนึ่ง โดยผลของแรงเสียดทานน้อยมากจนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา ความสูงนี้เรียกว่า ความสูงเกรเดียนต์ (Gradient height) และชั้นของบรรยากาศที่อยู่ระหว่างผิวโลกและความสูงเกรเดียนต์นี้เรียกว่า บาวดารีเลเยอร์ (Boundary layer)

### 3.2 ชั้นของการไหล (Boundary Layer) และการไหลที่ถูกระบาย (Separation)

อากาศจะถูกพิจารณาเป็นของไหลแบบ Newtonian ซึ่งมีความหนืดอยู่ในตัว ดังนั้นเมื่ออากาศไหลผ่านผิววัตถุ ก็จะมีแรงเสียดทานระหว่างผิวของวัตถุกับอากาศ ความเร็วของอนุภาคอากาศที่จุดสัมผัสกับของแข็งจะเป็นศูนย์ ที่จุดนี้จะมี Velocity gradient มากที่สุด และ Shear stress สูงสุด ผิวของวัตถุแข็งมีอิทธิพลต่อการไหลของอากาศทำให้เกิดมีการไหลชั้น (Layer) ที่บริเวณอากาศไหลใกล้กับผิวของวัตถุ บริเวณนี้เรียกว่า Boundary layer

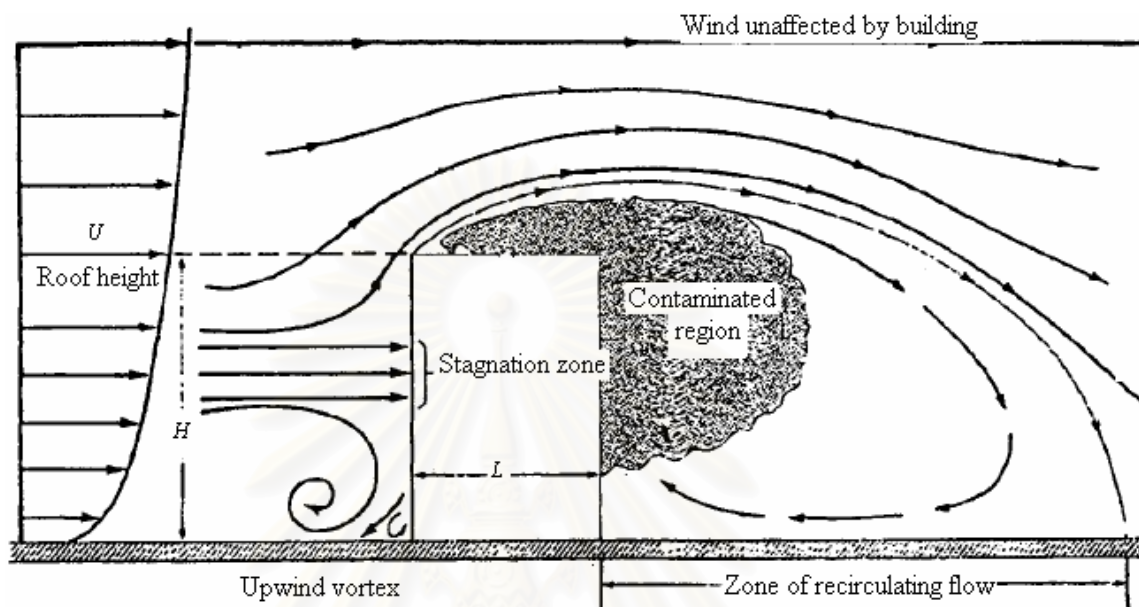


รูปที่ 3.2 Boundary layer บนแผ่นเรียบ

เมื่ออากาศไหลผ่านกระทบที่หน้าแผ่นเรียบก็จะเริ่มเกิด Boundary layer ที่ขอบหน้าสุด จากนั้นก็จะเกิดความหนาของชั้น layer เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ Boundary layer มีสองรูปแบบคือ Laminar และ Turbulent ซึ่งการที่จะเกิดเป็นรูปแบบใดนั้นจะขึ้นกับค่า Reynolds number ( $Re_x = \rho Ux / \mu$ ) อย่างไรก็ตามแม้จะเกิดเป็น Turbulent flow แบบเต็มที่แล้วก็ยังมีการไหลชั้น (Laminar sublayer) อยู่ในแนวการไหลชั้นชิดติดกับผิว ซึ่ง Sublayer นี้จะเป็นชั้นที่บางมาก บริเวณระหว่างการไหล Laminar กับการไหลแบบ Turbulent เรียกว่าเป็น Transition region ซึ่งเป็นบริเวณที่การไหลแบบ Laminar จะเริ่มแปรเปลี่ยนเป็น Turbulent ไปในที่สุด

การไหลผ่านสิ่งกีดขวางจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ของการไหลที่แยกกัน (Separated flow) การแยกไหลเกิดขึ้นที่ขอบของสิ่งกีดขวาง และมีการไหลมาบรรจบกันเกิดขึ้นที่พื้นด้านล่างหลังของสิ่งกีดขวาง มีบริเวณเกิดการไหลหมุนวนที่ด้านหลัง ด้านบนและมุมล่างด้านหน้าของสิ่งกีดขวาง การไหลหยุดนิ่งหรือความเร็วหยุดนิ่งเกิดที่ตำแหน่งสูงกว่าครึ่งหนึ่งของความสูง

วัตถุ ซึ่งตำแหน่งที่สูงกว่าและต่ำกว่าตำแหน่งการไหลหยุดนิ่งนี้ การไหลจะเป็นแบบไหลแยกขึ้นด้านบนและไหลแยกลงมาด้านล่างตามลำดับ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (ภาพจาก ASHRAE Fundamentals Handbook (SI))

### 3.3 สัมประสิทธิ์ความดัน (Pressure Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมเป็นค่าที่ไร้นิติ มีทั้งค่าบวกและค่าลบขึ้นอยู่กับทิศทางของความดันที่กระทำกับผิวหน้าของส่วนที่ลมปะทะ โดยกำหนดเป็นค่าอัตราส่วนของค่าความดันที่ระดับใดๆ ต่อค่าความดันพลวัต (Dynamic Pressure) ที่ระดับอ้างอิง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความดันสามารถบอกถึงขนาดของความดันและทิศทางการเคลื่อนที่ของลม ณ ตำแหน่งใดๆ ค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (3.2)$$

โดยที่  $p$  คือ ค่าความดัน ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดค่า

$p_0$  คือ ค่าความดันลมสถิตย์ที่อ้างอิง

$U$  คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ย

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ

### 3.4 กฎยกกำลัง (Power Law)

Davenport (1967) ได้เสนอรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความสูงจากระดับของพื้นดิน ในรูปแบบของกฎยกกำลัง โดยขึ้นกับสภาพภูมิประเทศเท่านั้น และสำหรับภูมิประเทศแบบหนึ่งค่าตัวเลขยกกำลังจะมีค่าคงที่จนถึงระดับความสูงเกรเดียนต์ นั่นคือ

$$u = u_g \left( \frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (3.3)$$

โดยที่

- $u$  คือ ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงใดๆ
- $u_g$  คือ ค่าความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์
- $z$  คือ ค่าความสูงใดๆ
- $z_g$  คือ ค่าความสูงเกรเดียนต์
- $\alpha$  คือ ค่าตัวเลขยกกำลัง

ต่อมา ANSI A58.1-1982 ได้แบ่งลักษณะภูมิประเทศที่มีอิทธิพลต่อความเร็วลมออกเป็น 4 แบบดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดลักษณะภูมิประเทศ ตามข้อกำหนดของ ANSI A58.1-1982

พื้นที่ชายฝั่ง (Coastal Area)		ที่โล่ง (Open Terrain)		ชานเมือง (Suburban Terrain)		ใจกลางเมืองใหญ่ (Center of Large Cities)	
$\alpha$	$z_g$ (m)	$\alpha$	$z_g$ (m)	$\alpha$	$z_g$ (m)	$\alpha$	$z_g$ (m)
1/10	215	1/7	275	1/4.5	370	1/3	460

คำนิยามของบริเวณต่างๆในตารางที่ 3.1 มีดังนี้

ใจกลางเมืองใหญ่ คือ ที่ศูนย์กลางของเมือง มีอาคารสูงเกิน 21 เมตร อย่างน้อย 50% ของอาคารทั้งหมด โดยที่พิจารณาจากลักษณะภูมิประเทศที่ด้านเหนือลมของอาคารที่สนใจ เป็นระยะทางน้อยที่สุด 800 เมตร หรือ 10 เท่าของความสูงของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่า



ชานเมือง คือ พื้นที่รอบชานเมือง พื้นที่ป่าหรือสภาพภูมิประเทศที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ใกล้ชิดกัน โดยที่พิจารณาจากลักษณะภูมิประเทศที่ด้านเหนือลมของอาคารที่สนใจ เป็นระยะทางน้อยที่สุด 460 เมตร หรือ 10 เท่าของความสูงของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่า

ที่โล่ง คือ สภาพภูมิประเทศที่มีสิ่งกีดขวางที่มีความสูงน้อยกว่า 9 เมตร รวมทั้งพื้นที่ทุ่งราบ ทุ่งหญ้า

พื้นที่ชายฝั่ง คือ พื้นที่ชายฝั่งที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยที่พิจารณาจากลักษณะภูมิประเทศที่ด้านเหนือลมของอาคารที่สนใจ เป็นระยะทางน้อยที่สุด 460 เมตร หรือ 10 เท่าของความสูงของอาคาร โดยใช้ค่าที่มากกว่า



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ทฤษฎีไฟในตัวของลุม

#### 4.1 สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equations)

##### 4.1.1 สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล

จากหลักของการอนุรักษ์มวลจะได้ว่าผลรวมของการไหลออกของมวลผ่านปริมาตรทั้งหมดมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรเทียบกับเวลา โดยสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (4.1)$$

เมื่อพจน์แรก  $\partial \rho / \partial t$  หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น ณ ตำแหน่งก้อนมวลที่พิจารณา และพจน์ที่สอง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟลักซ์ของมวลที่ผ่านก้อนมวลในทิศทาง  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ

##### 4.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_{u_i} \quad (4.2)$$

เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์โมเมนตัมหรือเรียกอีกอย่างว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) ในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation form) โดยที่ตั้งสมมติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) กล่าวคือสามารถนำกฎความเสียดทานของ สโตกส์ (Stokes's law) มาใช้



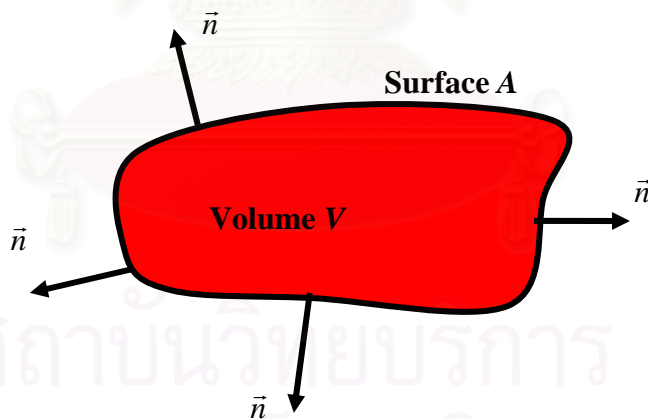
### 4.1.3 สมการ Transport ทั่วไป

เป็นสมการของการส่งผ่านมวลของไหล ที่บ่งบอกว่ามวลของของไหลไม่มีการสูญหาย โดยพจน์ด้านซ้ายของสมการหมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลสัมบูรณ์ ส่วนพจน์ทางขวามือของสมการคือการแพร่ของสัดส่วนมวล และ Source term

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\phi \quad (4.3)$$

### 4.2 หลักการของระเบียบวิธี Finite Volume

หลักการของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้เริ่มด้วยการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของตัวแปร  $\phi$  (สมการที่ 4.3) ตลอดทั้งปริมาตรควบคุม แล้วทำการดิสครีไทซ์ (Discretize) ลงบนจุดต่อต่างๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่จะนำมาสร้างเป็น Mesh เพื่อใช้ในขั้นตอนการคำนวณให้ครอบคลุมทั้งปริมาตรควบคุมที่กำลังสนใจอยู่



รูปที่ 4.1 ปริมาตรควบคุม

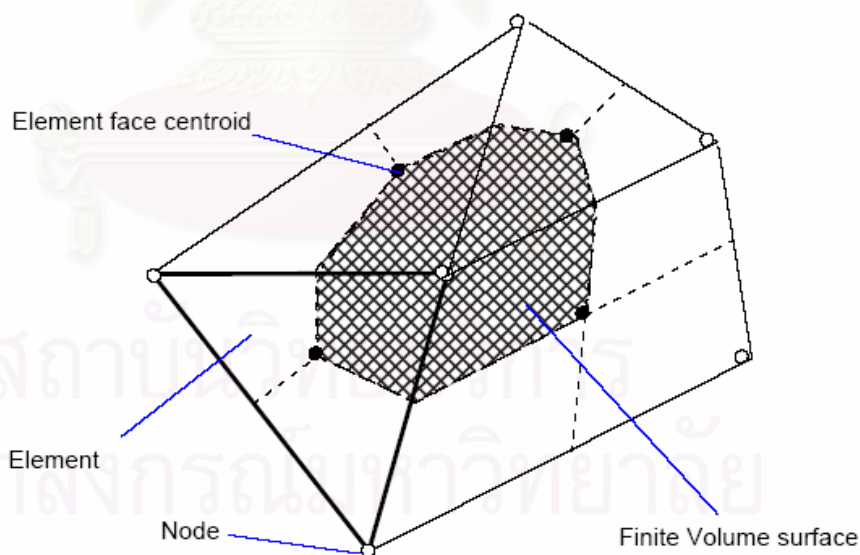
ปริมาตรควบคุมทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยที่ A คือพื้นที่ผิวของปริมาตรควบคุม ส่วน  $\vec{n}$  คือ เวกเตอร์พื้นผิวหนึ่งหน่วย (Normal Surface Vector) ใช้ Gauss theorem ทำการแปลงการอินทิเกรตของเทอมที่สองกับเทอมที่สามของสมการ (4.3) จัดเทอมต่างๆที่ได้จากการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของตัวแปร  $\phi$  (สมการ (4.3)) ตลอดทั้งปริมาตรควบคุม จะได้

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \vec{n} \bar{U} \rho \phi dA = \oint_A \vec{n} \bar{J} dA + \int_V S_\phi dV \quad (4.4)$$

เมื่อพจน์แรกคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของของไหล  $\phi$  ภายในปริมาตรควบคุม พจน์ที่สองคือเทอมของการส่งผ่าน (Transport term) ที่เกี่ยวข้องกับทั้งขนาดและทิศทางของการไหลในแต่ละจุดในโดเมนการไหล พจน์ที่สามคือพจน์ของการแพร่ (Diffusion term) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับความเร็วของของไหล และพจน์ที่สี่คือ Source term

#### 4.2.1 การดิสครีไทซ์ (Discretization)

ทำการดิสครีไทซ์ในแต่ละปริมาตรควบคุม โดยใช้การประมาณค่าภายในแบบจุดกลาง (Mid-point rule) รูปที่ 4.2 แสดงการสร้างปริมาตรควบคุมรอบจุดต่อแต่ละจุดต่อ โดยเริ่มจากการหาจุด Centroid ของเอลิเมนต์แล้วจึงสร้างเส้นต่อระหว่างจุด Centroid เหล่านี้กับจุดกึ่งกลางขอบของเอลิเมนต์ ทำให้ได้เส้นขอบของปริมาตรควบคุมใหม่รอบจุดต่อคือพื้นที่แรเงาสีเทา ซึ่งจะได้ผลจากการอินทิเกรตสมการ (4.4) ดังนี้



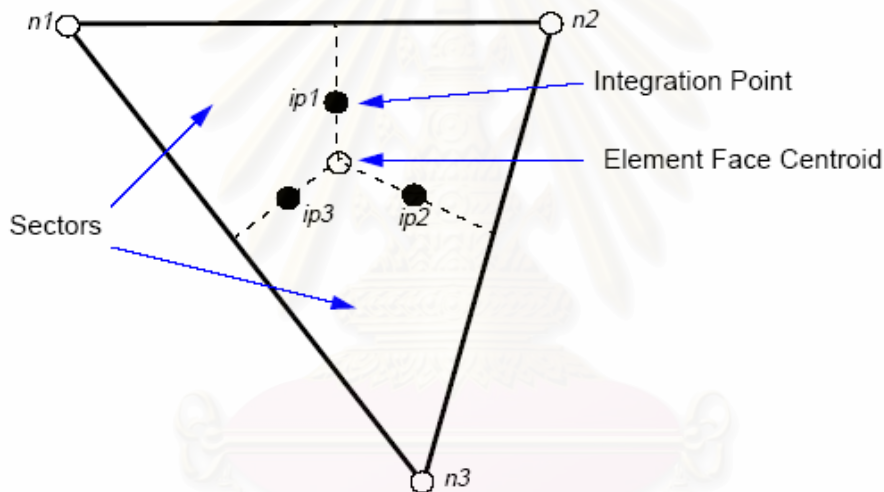
รูปที่ 4.2 การแบ่งโดเมนปริมาตรควบคุมตามวิธีแบบ Vertex-Centered รอบจุดต่อ

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_A \rho U_j dn_j = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_A \rho U_j U_i dn_j = - \int_A P dn_j + \int_A \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV \quad (4.6)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_A \rho U_j \phi dn_j = \int_A \Gamma_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\phi dV \quad (4.7)$$

โดยที่  $V$  คือปริมาตรควบคุม  $A$  คือพื้นที่ผิว  $dn_j$  คือส่วนเล็กๆของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแต่ละทิศทางของแกน  $x, y$  และ  $z$  ทำการแปลงสมการข้างบนโดยการดิฟเฟอเรนเชียลตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เอลิเมนต์และตำแหน่งจุดต่อเพื่อทำการอินทิเกรต

จะได้สมการดังนี้

$$\rho V \left( \frac{\rho - \rho^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (4.8)$$

$$\rho V \left( \frac{U_i - U_i^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (p \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \bar{S}_{U_i} V \quad (4.9)$$

$$\rho V \left( \frac{\phi - \phi^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \phi_{ip} = \sum_{ip} \left( \Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \bar{S}_\phi V \quad (4.10)$$

$$\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip}^o \quad (4.11)$$

โดยที่  $ip$  คือจุดที่ทำการอินทิเกรต เอลิเมนต์ในรูปที่ 4.3 จะประกอบด้วยปริมาตรควบคุมย่อย 3 ส่วน โดยมีตำแหน่งของจุดอินทิเกรชันของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุด คือ  $ip 1$ ,  $ip 2$  และ  $ip 3$  ที่ตำแหน่งตรงกลางของเส้นขอบปริมาตรควบคุมทั้งสามภายในเอลิเมนต์

#### 4.2.2 Shape function

การใช้ Shape function ของเอลิเมนต์ที่เหมาะสม จะทำให้ความแม่นยำของผลลัพธ์ที่คำนวณได้เพิ่มขึ้น การกระจายของผลเฉลยโดยประมาณในเอลิเมนต์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

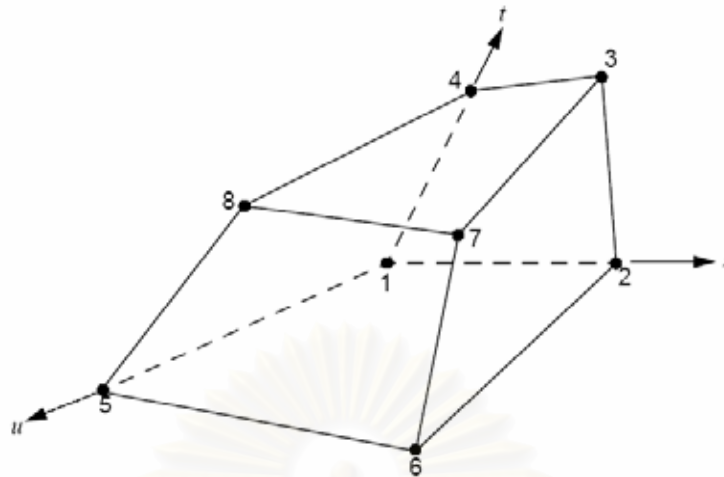
$$\phi = \sum_{i=1}^{N_{node}} N_i \phi_i \quad (4.12)$$

โดยที่ผลรวมของตัวประมาณคือ

$$\sum_{i=1}^{N_{node}} N_i = 1 \quad (4.13)$$

$$\text{โดยที่ Node } i, N_i = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (4.14)$$

พิจารณาการกำหนดค่าการประมาณของรูปร่างเอลิเมนต์ที่เป็นรูปทรงหกหน้าทั่วไปแบบแปดจุดต่อที่แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เอลิเมนต์รูปทรงหกหน้าทั่วไป

แต่ละจุดต่อสามารถกำหนดค่าได้ดังนี้

$$N_1(s, t, u) = (1-s)(1-t)(1-u)$$

$$N_2(s, t, u) = s(1-t)(1-u)$$

$$N_3(s, t, u) = st(1-u)$$

$$N_4(s, t, u) = (1-s)t(1-u)$$

$$N_5(s, t, u) = (1-s)(1-t)u$$

$$N_6(s, t, u) = s(1-t)u$$

$$N_7(s, t, u) = stu$$

$$N_8(s, t, u) = (1-s)tu$$

เราสามารถสรุป Shape function ที่ใช้ประมาณค่าในแต่ละแกน โคออร์ดิเนตได้ดังนี้

$$x = \sum_{i=1}^{N_{node}} N_i x_i, \quad y = \sum_{i=1}^{N_{node}} N_i y_i, \quad z = \sum_{i=1}^{N_{node}} N_i z_i$$

ใช้ Shape function ของเอลิเมนต์กับเทอมของการแพร่กระจาย (Diffusion terms) สามารถหาค่าประมาณของการอินทิเกรตที่ตำแหน่งจุดต่อได้ดังนี้

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{ip} = \sum_n \frac{\partial N_n}{\partial x} \Big|_{ip} \phi_n \quad (4.15)$$

การประมาณค่าการอินทิเกรตบนพื้นผิวของค่าเกรเดียนต์ของความดัน (Pressure gradient) สามารถหาการประมาณค่าโดยใช้ Shape function ที่จุดต่อการอินทิเกรต  $P_{ip}$  ได้ดังนี้

$$P_{ip} = \sum_n N_n(s_{ip}, t_{ip}, u_{ip}) P_n \quad (4.16)$$

กรณีการเคลื่อนที่พาความร้อน Convection Term โดยการใช้ Shape function ของเอลิเมนต์หาค่าประมาณของการอินทิเกรตที่ตำแหน่งจุดต่อได้ดังนี้

$$\phi_{ip} = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta \bar{r} \quad (4.17)$$

โดยที่  $\phi_{up}$  คือค่าที่ Upwind node และ  $\bar{r}$  คือค่าเวกเตอร์จาก Upwind node ถึงจุดที่อินทิเกรต  $ip$  ส่วน  $\beta$  คือตัวแก้เพื่อให้คำตอบมีความใกล้เคียงค่าแน่นอนตรง ซึ่งมีค่าขึ้นกับ Numerical scheme แต่ละแบบที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ใช้ High resolution scheme ที่ค่าขนาดของเวกเตอร์  $\beta$  เท่ากับ  $\sqrt{3}$

### 4.2.3 The Coupled system of Equations

การประยุกต์สมการเข้ากับโดเมนของการไหลที่แบ่งย่อย ทำให้ต้องแบ่งย่อยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจากวิธี Finite volume กับสมการ (4.8) – (4.11) ทำให้ได้ระบบสมการสมการเชิงเส้นที่ทำงานเอลิเมนต์ทั้งหมดในโดเมนของการไหล (Simultaneous equations) หลายสมการซึ่งสามารถเขียนรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$\sum_{nb_i} a_i^{nb} \phi_i = b_i \quad (4.18)$$

โดยที่  $\phi$  คือผลลัพธ์ของปัญหาที่ต้องการ  $b$  คือค่าผลลัพธ์ทางขวามือ  $a$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ  $i$  คือตัวบ่งชี้จำนวนของจุดต่อของปัญหา และ  $nb$  คือตำแหน่งจุดต่อข้างเคียงซึ่งสามารถใช้กับจุดต่อที่ Mesh เป็นแบบ Structured mesh และ Unstructured mesh โดยที่จัดสมการทั้งหมดจากวิธี Finite volume ให้เป็นแบบเชิงเส้น สำหรับสมการที่เกี่ยวข้องกันของสมการมวลและโมเมนตัมแบบสามมิติ สามารถเขียนในรูปแบบของเมตริกซ์ ได้ดังนี้



$$a_i^{nb} = \begin{bmatrix} a_{uu} & a_{uv} & a_{uw} & a_{up} \\ a_{vu} & a_{vv} & a_{vw} & a_{vp} \\ a_{wu} & a_{wv} & a_{ww} & a_{wp} \\ a_{pu} & a_{pv} & a_{pw} & a_{pp} \end{bmatrix}_i^{nb}$$

และ

$$\phi_i = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{bmatrix}_i$$

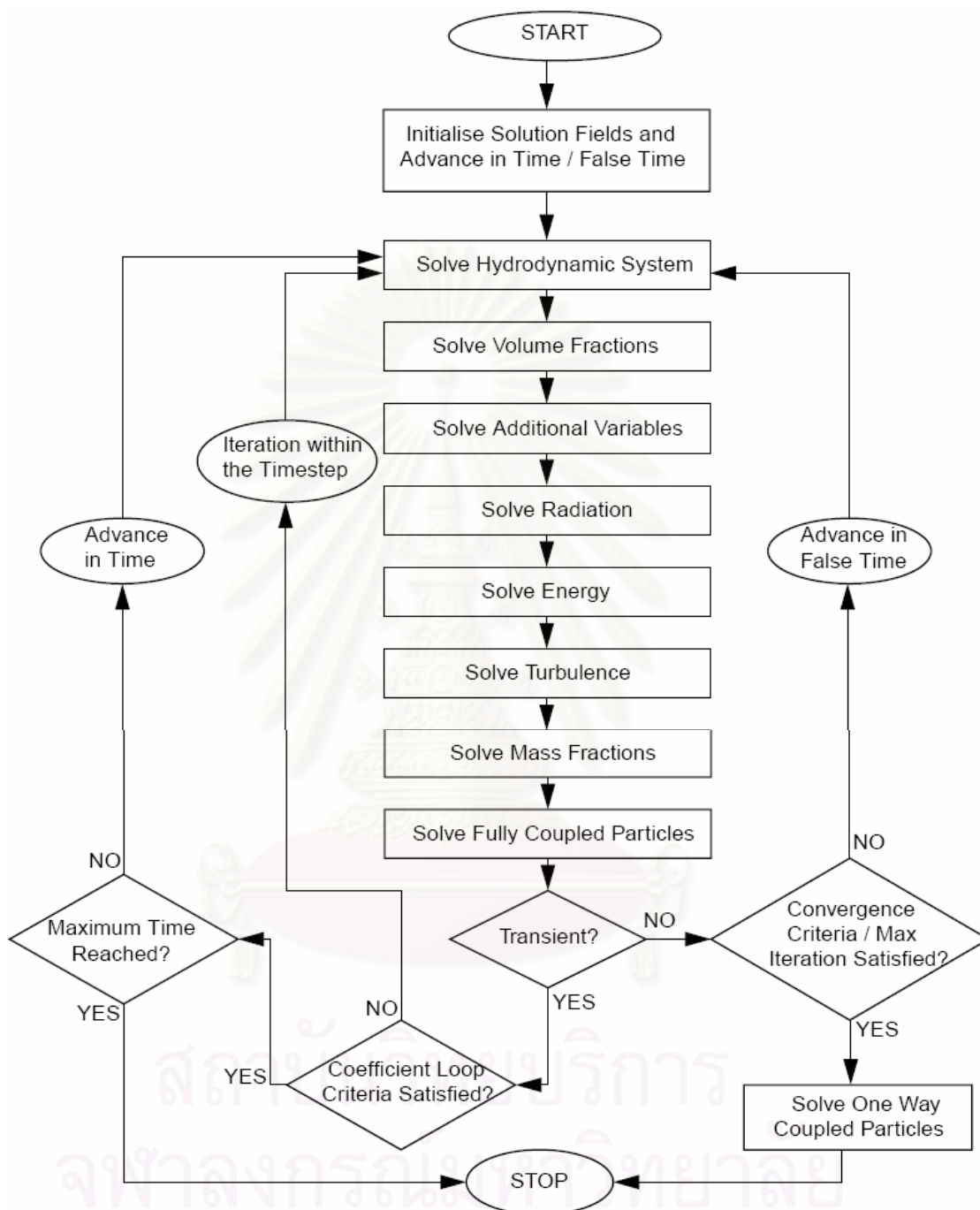
$$b_i = \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \end{bmatrix}_i$$

เนื่องจากในแต่ละจุดต่อจะมีตัวแปรหลายตัว เช่น ความเร็ว ความดันและอุณหภูมิ ทำให้ระบบสมการรวมที่ได้มีลักษณะเกี่ยวพันกัน (Coupled System of Equations) การแก้ระบบสมการรวมแบบปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวจะใช้ขั้นตอนวิธีโดยปริยาย (Implicit Algorithm) โดยแก้สมการทั้งหมดพร้อมกัน

#### 4.2.4 ผลเฉลยทั่วไปของสมการ

วิธีหาผลเฉลยทั่วไปของสมการที่มีความเกี่ยวพันกัน สามารถแสดงขั้นตอนแบบ Flow chart ได้ดังรูปที่ 4.5 โดยที่การแก้ปัญหาของแต่ละสมการที่แสดงใน Flow chart นั้นสามารถทำได้โดย

1. แปลงสมการไม่เชิงเส้นเป็นสมการเชิงเส้น (โดยตัวคูณซ้ำ) แล้วมารวมกันในรูปแบบเมตริกซ์
2. ทำการหาผลลัพธ์ของสมการเชิงเส้น (โดยกระบวนการทำซ้ำ) หาค่าความเร็วและความดันของปัญหา



รูปที่ 4.5 Flow chart สำหรับหาคำคำตอบของปัญหา

#### 4.2.5 การหาผลเฉลยของสมการเชิงเส้น

ระบบสมการเชิงเส้นที่ทำการดิสครีไทซ์แล้ว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ทั่วไป ดังนี้

$$[A] \cdot [\phi] = [b] \quad (4.19)$$

โดยที่  $[A]$  คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์  $[\phi]$  คือ เวกเตอร์ของคำตอบ และ  $[b]$  คือ เทอมอื่นๆ เช่น Source term สมการข้างบนสามารถหาคำตอบได้ด้วยกระบวนการทำซ้ำๆ หลายรอบ โดยเริ่มจากการประมาณค่าที่รอบ  $n$  ดังนี้

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi' \quad (4.20)$$

โดยที่  $\phi'$  คือผลที่ได้จาก

$$\dot{A} \cdot \phi' = r^n \quad (4.21)$$

และ  $r^n$  คือค่าตกค้างจาก

$$r^n = b - A \cdot \phi^n \quad (4.22)$$

ซึ่งกระบวนการทำซ้ำจะให้คำตอบที่ถูกต้องมากขึ้น โดยการใช้วิธีของ IUL (Incomplete Lower Upper) จัดตัวเลขในเมทริกซ์ จะทำให้ลดจำนวนรอบในการหาคำตอบได้ในขณะที่เพิ่มจำนวนของ Mesh elements

#### 4.2.6 วิธีหาค่าเศษตกค้าง

ส่วนที่เหลือตกค้างคือ  $[r]$  เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณที่ไม่เท่ากันของสมการเชิงเส้น ซึ่งค่าที่ตกค้างนี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการลู่เข้าสู่ค่าใดๆที่ยอมรับได้ สำหรับแต่ละตัวแปรของการแก้ปัญหา ค่าเศษตกค้างของ  $\phi$  สามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$[\tilde{r}_\phi] = \frac{[r_\phi]}{a_p \Delta\phi} \quad (4.23)$$

โดยที่  $r_\phi$  คือค่าเศษตกค้างของปริมาตรควบคุม  $a_p$  คือสัมประสิทธิ์ของปริมาตรควบคุม และ  $\Delta\phi$  คือช่วงของตัวแปร โดยมีข้อแนะนำดังนี้

1. ค่าเศษตกค้างขึ้นกับค่าเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหา
2. ค่าเศษตกค้างขึ้นกับค่าเริ่มต้นที่ใช้
3. กรณีที่เป็นของไหลหลายสถานะ จะต้องพิจารณาตัวประกอบของปริมาตร (Volume fraction) ด้วย

### 4.3 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model)

แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) เป็นแบบจำลองที่ช่วยในการคำนวณสมการความต่อเนื่องและสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน โดยจะใช้ในการหาค่า Reynolds stress ซึ่งในการคำนวณนั้นไม่จำเป็นต้องหาค่า Fluctuation โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ดีนั้นต้องสามารถคำนวณพฤติกรรม การไหลในลักษณะต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ รวมทั้งช่วยประหยัดหน่วยความจำ

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันอยู่ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมีอยู่หลายแบบด้วยกัน ตัวอย่างเช่น

- Standard  $k-\varepsilon$  model (Launder and Spalding, 1974), modified  $k-\varepsilon$  model (Sloan et al .,1986), non-linear  $k-\varepsilon$  model (Speziale,1987),  $k-\omega$  model (Wilcox , 1993)
- Algebraic Reynolds stress model (Rodi, 1976), simplified version of the algebraic Reynolds stress model (Zhang et al., 1992)
- Different Reynolds stress transport equation models. (Launder et al ., 1975; Wilcox, 1993)

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเพียงสองโมเดลคือ Standard  $k-\varepsilon$  model กับ Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  Based Model

### 4.3.1 Standard $k - \varepsilon$ model

ในที่นี้  $k$  คือค่า Turbulent kinetic energy ถูกนิยามมาจากการผันแปรของความเร็ว มีมิติ คือ  $(L^2 T^{-2})$ , เช่น  $m^2/s^2$  มีสมการดังนี้

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

$\varepsilon$  คือค่า Turbulence eddy dissipation คือ อัตราซึ่งความเร็วผันแปรถูกสลาย และมีมิติ คือ  $k$  ต่อหน่วยเวลา  $(L^2 T^{-3})$ , เช่น  $m^2/s^3$

โดยเริ่มจากสมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4.24)$$

และสมการโมเมนตัมเป็น

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (4.25)$$

โดยที่  $B$  คือผลรวมของแรงเนื่องมาจากน้ำหนักตัวเอง (Body forces),  $\mu_{eff}$  คือ Effective viscosity และ  $p'$  คือ Modified pressure ซึ่งสามารถนิยามได้ดังสมการ (4.26)

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (4.26)$$

และ

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4.27)$$

โดยที่  $\mu_t$  คือ Turbulence viscosity ในการใช้  $k - \varepsilon$  model ค่า Turbulence viscosity มีการสมมติค่าที่มีความเกี่ยวข้องกับ Turbulence kinetic energy และ Dissipation ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.28)$$

โดยที่  $C_\mu$  เป็นค่าคงที่ ส่วนค่าของ  $k$  และ  $\varepsilon$  ได้จากค่าอนุพันธ์ของสมการ Transport สำหรับ Turbulence kinetic energy และ Turbulence dissipation rate ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (4.30)$$

โดยมีค่าคงที่ตัวแปรคือ  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$  สำหรับ  $P_k$  คือ Turbulence production อันเนื่องมาจากความหนืดและแรงลอยตัว ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (4.31)$$

สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ นั่นคือ  $\nabla \cdot U$  ทางขวามือ ถือว่ามีค่าน้อย ไม่มีส่วนสำคัญในเทอมการผลิต แต่สำหรับการไหลแบบอัดตัวได้นั้น เทอมของ  $\nabla \cdot U$  ถือว่ามีค่ามาก ทำให้มีความเร็วสูง ซึ่งเมื่อทำการหาค่าคำตอบด้วยกระบวนการทำซ้ำมีโอกาสที่ทำให้คำตอบไม่เข้าสู่ค่าใดๆได้ ส่วน  $P_{kb}$  เป็นเทอมของแรงลอยตัว แสดงตามสมการที่ (4.32)

$$P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} g \cdot \nabla \rho \quad (4.32)$$

และถ้าเป็น Boussinesq buoyancy model สมการจะเป็นดังนี้

$$P_{kb} = \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \rho \beta g \cdot \nabla T \quad (4.33)$$

$$P_{sb} = C_3 \cdot \max(0, P_{kb})$$

$$P_{sb} = C_3 \cdot \max(0, P_{kb}) \cdot \sin \alpha$$

เมื่อ  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  = Eddy viscosity และ  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_3 = 1$



### 4.3.2 Shear Stress Transport (SST) $k - \omega$ Based Model

โมเดลนี้เป็นโมเดลที่พิจารณาผลของความเค้นเฉือนอันเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent shear stress) ที่ให้ผลการทำนายมีความแม่นยำสูง ในปัญหาที่มีการไหลมากระทบสิ่งกีดขวาง และการไหลแบบแยกกันภายใต้บริเวณที่เกิด Adverse pressure gradients

$k - \omega$  Model ถูกสมมติว่า Turbulence viscosity มีความเกี่ยวข้องกับ Turbulence kinetic energy และ Turbulent frequency ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (4.34)$$

โดยที่มีสมการ Transport ของ  $k$  คือ

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (4.35)$$

และสมการ Transport ของ  $\omega$  คือ

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (4.36)$$

ในทางปฏิบัติ ค่าความหนาแน่น  $\rho$  และค่าเวกเตอร์ของความเร็ว  $U$  สามารถหาได้จากสมการ Navier-Stokes ส่วนค่า  $P_k$  คือค่า Turbulence production และมีค่าคงที่ของตัวแปรอื่นในโมเดลนี้ ดังนี้

$$\beta' = 0.09 \quad \alpha = 5/9 \quad \beta = 0.075 \quad \sigma_k = 2 \quad \sigma_\omega = 2$$

ค่า Stress tensor หาได้จาก

$$\tau = \mu_t 2s - \rho \frac{2}{3} \delta k \quad (4.37)$$

### 4.3.3 Wall function

เป็นวิธีของ Launder และ Spalding (1974) ที่แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วมัธยสโกล์ผนังกับค่าความเค้นเฉือนของผนัง โดยแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ย logarithmic ตามสูตร log-law

ค่าของ Wall-function ทำให้ค่าของความหนืดมีผลต่อชั้นย่อยๆ ที่ก่อตัวขึ้นมา จากการทดลองจะได้สูตรที่เกี่ยวข้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ใกล้ผนัง สำหรับการไหล ค่าเฉลี่ยและสมการ Turbulence transport ซึ่งสูตรนี้ต้องมีเงื่อนไขที่ผนัง (เช่น ค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง) ซึ่งขึ้นกับค่าตัวแปรของจุดต่อ (node) ที่ใกล้ผนัง ซึ่งสมมติให้เป็นเสมือน Fully-turbulent ของชั้นขอบเขต โดยที่ความสัมพันธ์สำหรับความเร็วที่ใกล้ผนังให้ค่าในรูปแบบ logarithmic ดังนี้

$$u^+ = \frac{U_t}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad (4.38)$$

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu} \quad (4.39)$$

$$\mu_\tau = \left( \frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.40)$$

โดยที่  $u^+$  คือค่าความเร็วที่ใกล้ผนัง  $\mu_\tau$  คือค่าความเสียดทานความเร็ว  $U_t$  คือค่าความเร็วมัธยสโกล์ผนังที่ระยะทางเป็น  $\Delta y$  จากผนัง  $y^+$  คือค่าไร้หน่วยของระยะทางจากผนัง  $\tau_w$  คือค่าความเค้นเฉือนของผนัง  $\kappa$  คือค่าคงที่ของ Von Karman และ  $C$  คือค่าคงที่ Log-layer ขึ้นกับความหยาบของผิวผนัง

### 4.4 Boundary conditions

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของโดเมนของปัญหาที่ต้องวิเคราะห์หาผลเฉลย เป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญในการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธี Finite volume เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขตนี้จะเป็นตัวกำหนดลักษณะเฉพาะของแต่ละปัญหา ซึ่งมีวิธีกำหนดดังนี้

**Inlet** เป็นการกำหนดค่าของคุณสมบัติของของไหลก่อนที่จะไหลข้ามขอบเขตทางเข้าของโดเมนของปัญหา ซึ่งโดยทั่วไปจะรู้ค่าของคุณสมบัติของไหลก่อนแล้ว การกำหนดโดยทั่วไปดังนี้

1. กำหนดเงื่อนไขทางเข้าด้วยค่า Normal Speed แสดงสมการของความเร็ว ดังนี้

$$U_{inlet} = U_{spec} i + V_{spec} j + W_{spec} k$$

หรือ

$$U_{inlet} = U_{r,spec} \hat{r} + U_{\theta,spec} \hat{\theta} + U_{z,spec} \hat{z}$$

2. กำหนดทางเข้าด้วยเงื่อนไขของความดันทางเข้า คือระบุค่าของความดัน
3. กำหนดทางเข้าด้วยค่าของอัตราการไหลเข้า โดยการระบุค่า ฟลักซ์ของมวล
4. กำหนดค่าของ Turbulence คือค่า  $k$  และค่า  $\varepsilon$

ซึ่งสามารถประมาณค่า Turbulence kinetic energy การไหลในท่อด้วยสูตร  $k_{inlet} = \frac{3}{2} I^2 U^2$

และประมาณค่า Turbulence dissipation จาก  $\varepsilon_{inlet} = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\mu_t}$

ค่าความเข้มข้นของ Turbulence จาก  $I = \frac{u}{U}$

โดยทั่วไปจะกำหนดค่าความเข้มข้นของ Turbulence ดังนี้  $I = \frac{u}{U} = 0.037$

โดยที่ค่า  $\mu_t = 1000 I \mu$

**Outlet** เป็นการกำหนดค่าของคุณสมบัติของของไหลที่ไหลข้ามขอบเขตทางออกของโดเมนปัญหา โดยทั่วไปจะไม่ทราบค่าของคุณสมบัติของของไหล การกำหนดค่าโดยทั่วไปดังนี้

1. กำหนดเงื่อนไขทางออกด้วยค่า Static Pressure (uniform) แสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_{stat,outlet} = P_{spec}$$

2. กำหนดเงื่อนไขทางออกด้วยค่า Normal speed เป็นการระบุค่าความเร็วตามทิศทางของการไหล มีรูปแบบของสมการตามนี้

$$U_{outlet} = U_{spec} i + V_{spec} j + W_{spec} k$$

หรือ

$$U_{outlet} = U_{r,spec} \hat{r} + U_{\theta,spec} \hat{\theta} + U_{z,spec} \hat{z}$$

3. กำหนดเงื่อนไขทางออกด้วยค่า Average static pressure มีรูปแบบของสมการตามนี้

$$\bar{P}_{spec} = \frac{1}{A} \int_A P_n dA$$

4. กำหนดเงื่อนไขทางออกด้วยค่า Mass flow rate มีรูปแบบของสมการตามนี้

$$\dot{m}_{ip} = \rho_{ip} A_{ip} U_{ip}$$

ประมาณค่าอัตราการไหลผ่านขอบเขตทางออกดังนี้

$$m_{tot}^{est} = \sum_{all} \dot{m}_{ip}$$

**Opening** ใช้เมื่อทราบว่ามีการไหลในทั้งสองทิศทางตามขอบเขต คือทั้งทิศทางที่สัมผัสกับแนวผนัง และทิศทางที่ตั้งฉากกับผนังของโดเมนปัญหาการไหลของของไหล การกำหนดเงื่อนไขแบบ Opening ด้วยค่าองค์ประกอบความเร็วแต่ละทิศทาง มีรูปแบบของสมการตามนี้

$$U_{opent} = U_{spec} i + V_{spec} j + W_{spec} k$$

และค่าความดัน

$$P_{opent} = P_{spec}$$

**Wall** สำหรับงานวิจัยนี้สามารถใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ผนังสองลักษณะคือ เงื่อนไขที่ไม่มี การลื่นไถล และเงื่อนไขผนังลื่นไถลเคลื่อนที่

1. เงื่อนไขแบบ No slip ค่าความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งขอบเขตของผนังมีค่าเป็นศูนย์

$$U_{wall} = 0$$

2. เงื่อนไขแบบ Free slip ในกรณีนี้ค่าความเร็วที่อยู่ในแนวขนานกับผนังมีค่าไม่เป็นศูนย์ แต่ความเร็วในแนวที่ตั้งฉากกับผนังและค่าความเค้นเฉือนของผนัง ถูกกำหนดค่าให้เป็นศูนย์

$$U_{wall} = 0$$

$$\tau_w = 0$$

**Symmetry plane** ใช้เมื่อโดเมนของปัญหาที่มีความสมมาตรทั้งรูปร่างและคุณสมบัติของของไหล เพื่อเป็นการประหยัดหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ และลดเวลาในการคำนวณ โดยมีเงื่อนไขตามนี้คือความเร็วในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบที่สมมาตรกำหนดให้เป็นศูนย์  $U_n = 0$  และทุกตัวแปรกำหนดไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลง  $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$

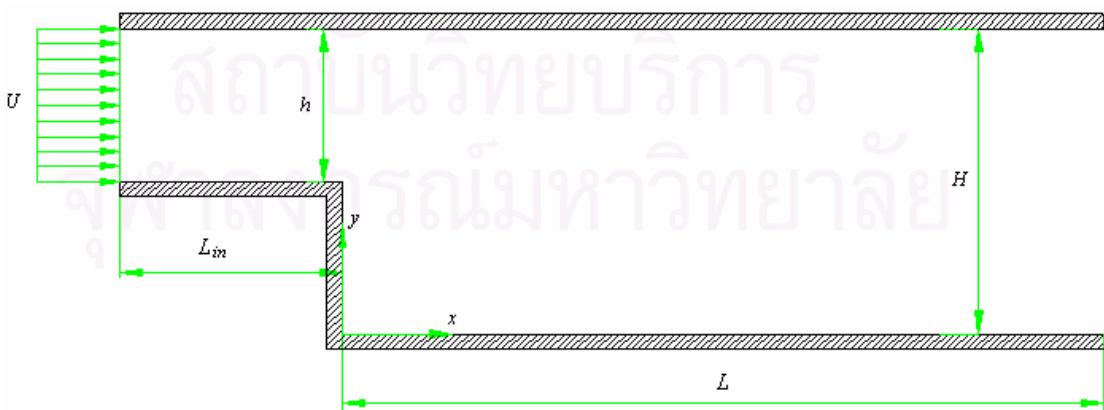
## บทที่ 5

### การทดสอบสมรรถนะของโปรแกรม CFD

เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการที่จะไปวิเคราะห์ปัญหาอาคารได้จริงๆ ทางผู้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ด้าน CFD ต้องทดสอบโปรแกรมกับปัญหาที่มีผลการทดลองที่เชื่อถือได้ เพื่อเปรียบเทียบผลกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบกับปัญหาต่างๆที่มีผลการทดลองได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิจัยดังต่อไปนี้

#### 5.1 การไหลผ่าน Backward-facing step

การที่เลือกทดสอบกับกรณีนี้ เพราะการไหลของลมที่ผ่านอาคารจะเกิดการไหลแบบหมุนวนที่ด้านหลังตัวอาคาร และการไหลผ่าน Backward-facing step เกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นเมื่อผ่านขอบของช่องการไหล ซึ่งเป็นลักษณะบริเวณคล้ายกัน โดยการไหลแบบแยกเกิดที่ตำแหน่งขอบของช่องทางไหลซึ่งกรณีอาคารก็คือขอบของหลังคาด้านหลัง การไหลผ่าน Backward-facing step มีโครงสร้างของการไหลซับซ้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนาตัวเองอีกครั้งของ Boundary layer และปรากฏการณ์การแยกไหลซึ่งเกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของพื้นที่หน้าตัดในช่องทางไหล ซึ่งจะทำการทดสอบในรูปแบบปัญหา 2 มิติที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)



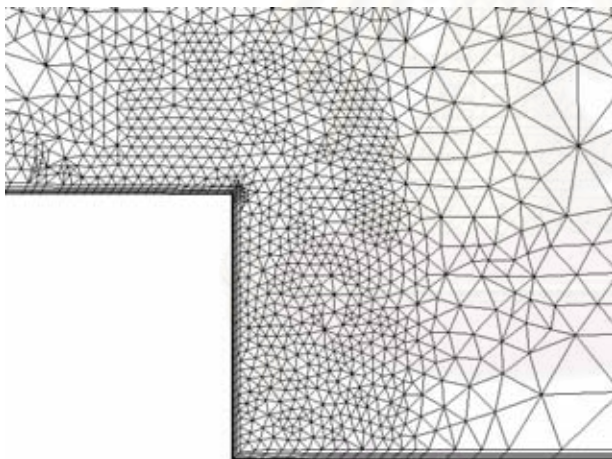
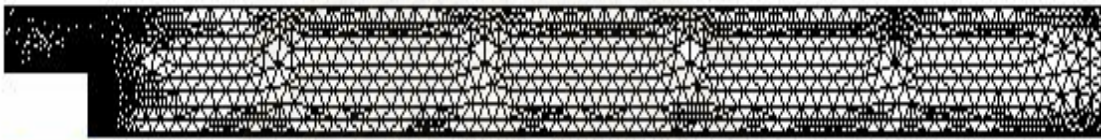
รูปที่ 5.1 รูปแบบของปัญหาแบบ Backward-facing step (Not to scale)



### 5.1.1 กรณีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

ในกรณีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) นั้นได้ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของ Armaly et al. (1983) ที่ค่า  $Re = 100$  เป็นตัวอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบผลกัน

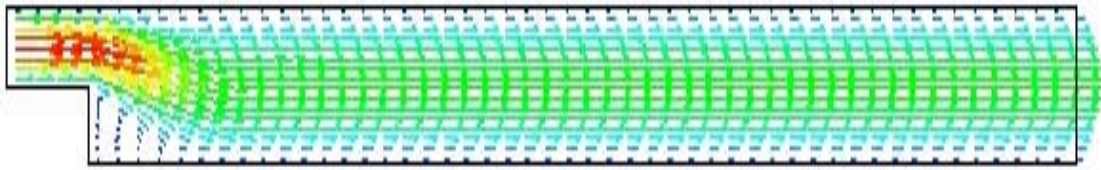
รูปที่ 5.1 แสดงรูปทรงของ Backward-facing step โดยที่ทางเข้าก่อนถึงขั้นบันไดมีความยาว  $L_{in} = 10$  mm ช่องทางไหลที่ทางเข้า  $h = 5$  mm โดยมีความสูงของช่องทางไหลที่ขยายแล้ว  $H = 10$  mm และมีความยาว  $L = 127.5$  mm ซึ่งในการจำลองการไหลนี้ใช้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 91495 เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ชนิด Tetrahedrons จำนวน 85100 เอลิเมนต์ และเป็นเอลิเมนต์ชนิด Prism จำนวน 6395 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กที่สุดคือ 0.1 mm



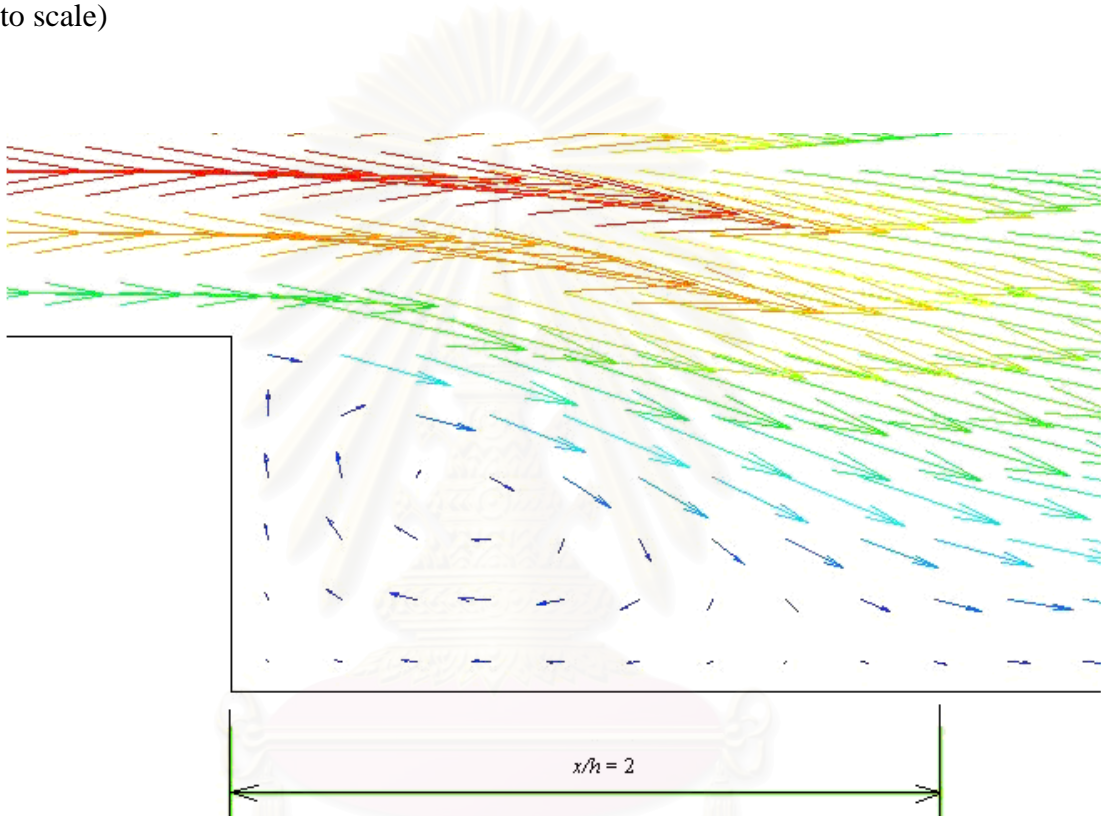
รูปที่ 5.2 การตัดกริดในรูปแบบการไหล Backward-facing step รูปบนแสดงขนาดเต็ม รูปล่างแสดงบริเวณส่วนขยายที่เป็นการเปลี่ยนช่องขนาดการไหลอย่างทันทีทันใด (Not to scale)

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม

รูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ที่  $Re = 100$  ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณการหมุนวน (Reattachment region) เกิดขึ้นที่ผนังด้านล่างใกล้กับช่องทางไหลที่ขยายออก มีขนาดความยาวของการไหลหมุนวนเป็น 2 เท่าของความสูงของช่องที่ไหลเข้า โดยมีภาพขยายของบริเวณการหมุนวนนี้แสดงในรูปที่ 5.4

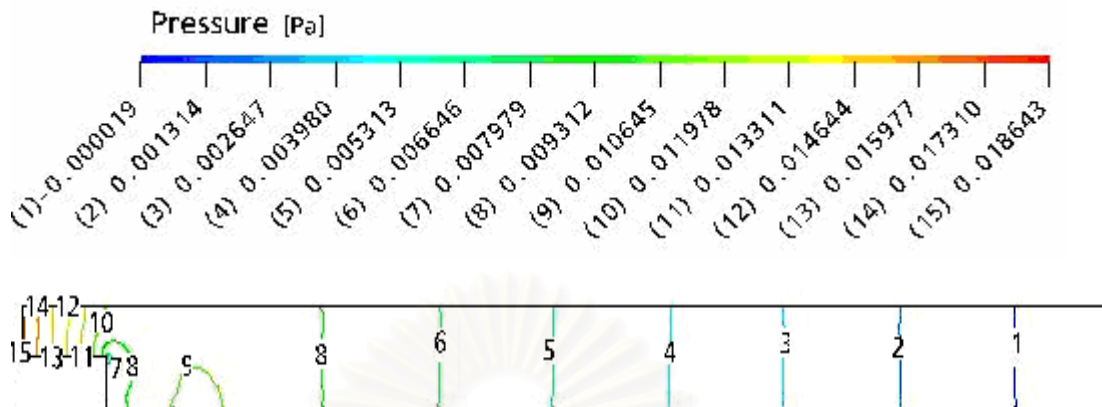


รูปที่ 5.3 เวกเตอร์ของความเร็วการจำลองไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า  $Re = 100$  (Not to scale)



รูปที่ 5.4 รายละเอียดของเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณการไหลหมุนวนขยายจากรูปที่ 5.3 (Not to scale)

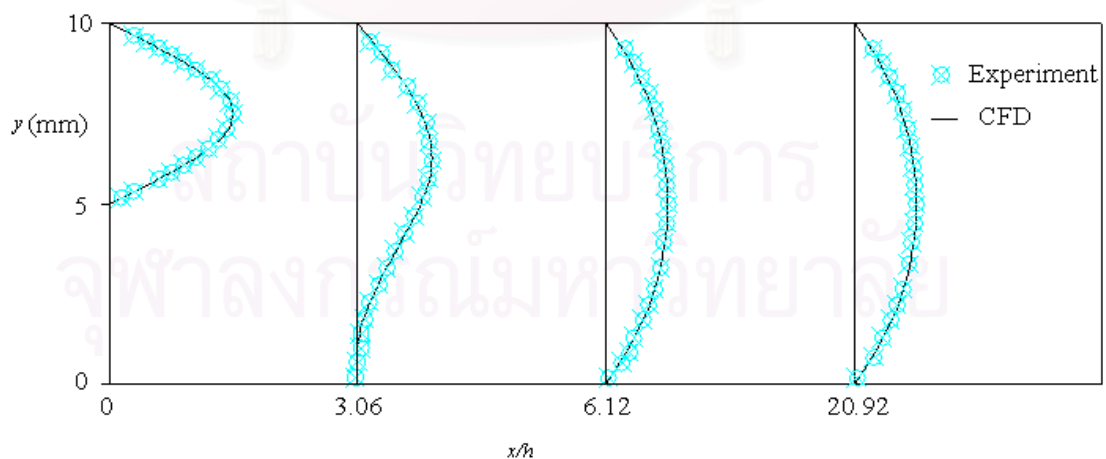
เมื่อพิจารณา Contour ของความดันที่ค่า  $Re = 100$  ดังแสดงในรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าความดันที่ทางไหลออกจะน้อยสุด และความดันที่หน้าตัดใกล้กับมุมของ Step มีค่าน้อยกว่าความดันที่ตำแหน่งถัดไป ซึ่งทำให้เกิดการไหลย้อนกลับขึ้น และเกิดการไหลหมุนวนที่บริเวณด้านหลังของช่องการไหลที่เพิ่มขนาดขึ้น โดยจะมีความสอดคล้องกับรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.5 Pressure contour การไหลผ่าน Backward-facing step ที่  $Re = 100$  (Not to scale)

#### ผลการเปรียบเทียบกับการทดลอง

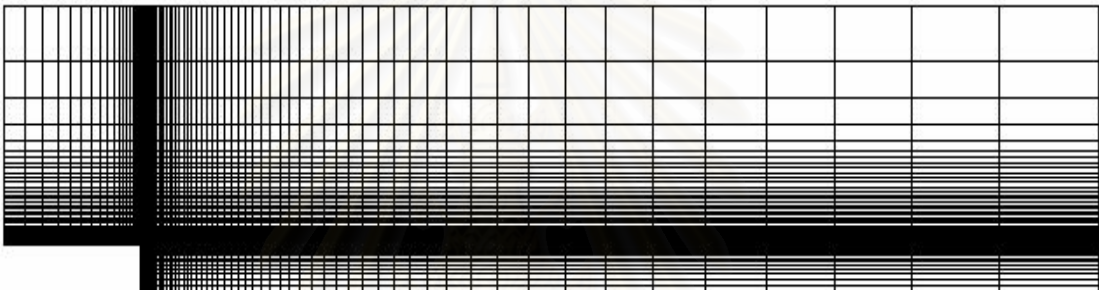
รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วกับผลการทดลอง ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก สอดคล้องกับผลการทดลองทุกช่วงของการไหล ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้โปรแกรม CFD ทำนายการไหลในกรณีที่มีการไหลแบบราบเรียบผ่าน Backward-facing step นั้น ให้ผลได้ใกล้เคียงกับการทดลอง



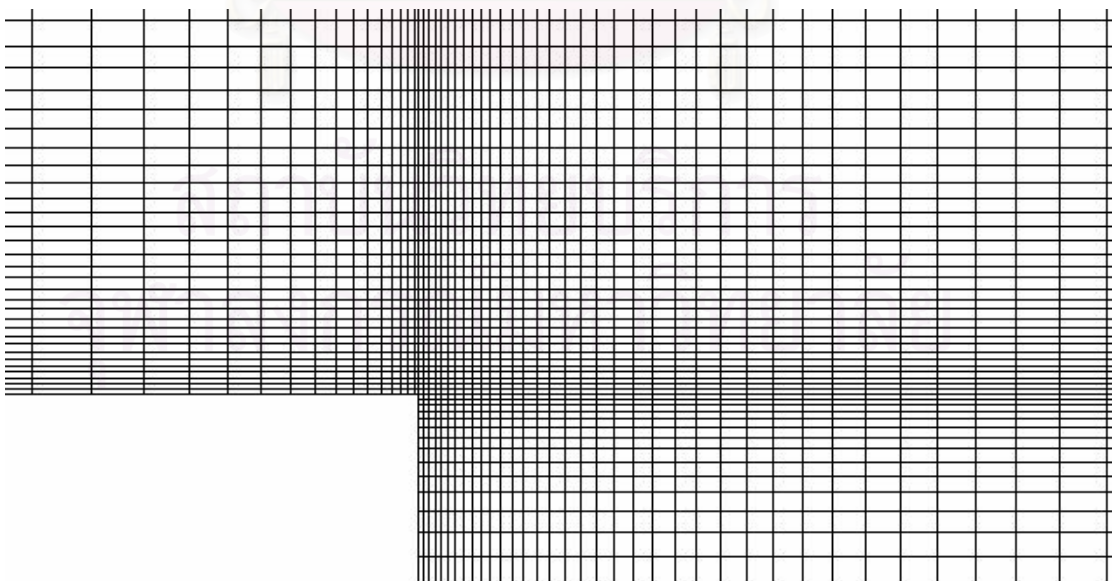
รูปที่ 5.6 Velocity profile ที่  $Re = 100$  (Not to scale)

### 5.1.2 กรณีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

กรณีที่เป็นกรไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ผ่าน Backward-facing step นั้นได้ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของ Adams and Eaton (1988) เป็นเอกสารอ้างอิงเพื่อทำการเปรียบเทียบผลกัน โดยที่ทางเข้าก่อนถึงขั้นบันไดมีความยาว  $L_{in} = 127$  mm ช่องทางไหลกว้าง  $h = 152$  mm ช่องทางการไหลทั้งหมดสูง  $H = 190$  mm และมีความยาว  $L = 889$  mm ซึ่งในการจำลองการไหลนี้ใช้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 10521 เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ชนิด Hexahedrons จำนวน 10521 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์มีขนาดเล็กที่สุดคือ 0.5 mm ซึ่งในการจำลองการไหลกรณีนี้ใช้ค่า  $Re_H = 36,000$  โดยที่ทางเข้ามีความเร็ว  $U_{ref} = 15$  m/s



รูปที่ 5.7 การตัดกริดแบบ Unstructured ของการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า  $Re_H = 36,000$  (Not to scale)



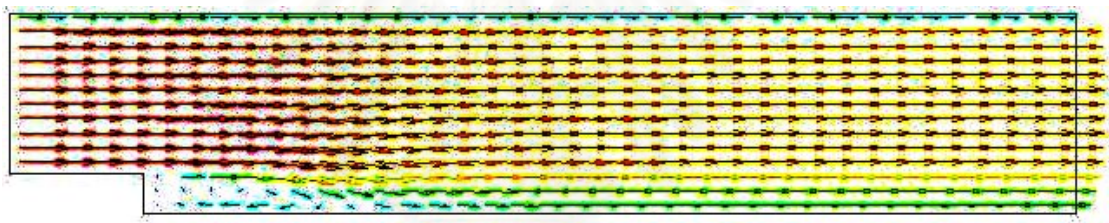
รูปที่ 5.8 ภาพขยายของกริดละเอียดที่ช่องการไหลเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ของการจำลองการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า  $Re_H = 36,000$  (Not to scale)



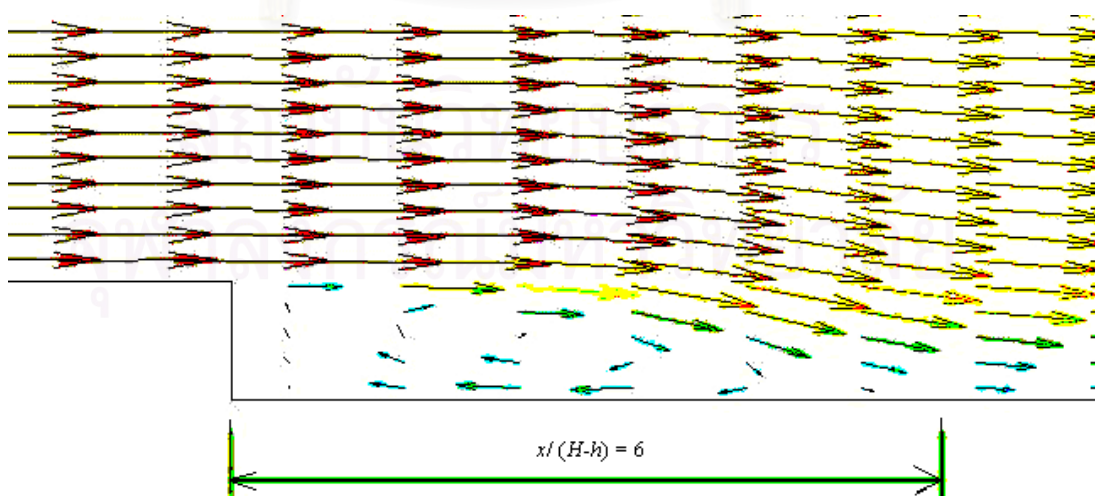
### ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม

รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ที่  $Re_H = 36,000$  ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณการหมุนวน (Reattachment region) เกิดขึ้นที่ผนังด้านล่างใกล้กับช่องทางไหลที่ขยายออก มีขนาดความยาวของการไหลหมุนวนเป็น 6 เท่าของความสูงของช่องที่ไหลเข้า โดยมีภาพขยายของบริเวณการหมุนวนนี้แสดงในรูปที่ 5.10

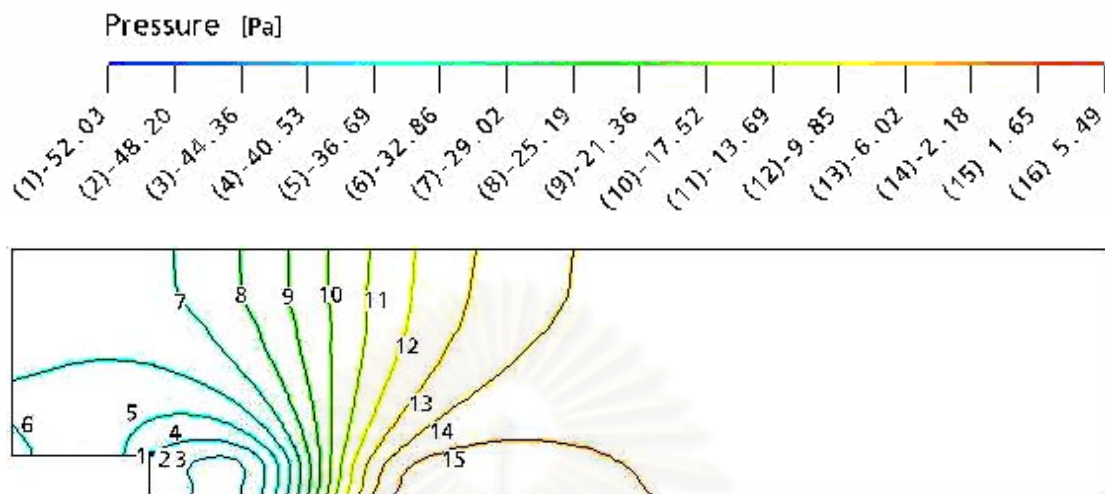
เมื่อพิจารณา Pressure contour ที่ค่า  $Re_H = 36,000$  ดังแสดงในรูปที่ 5.11 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนี้ จะเห็นว่าความดันที่มากที่สุดจะอยู่บริเวณช่วงกลางของรูปที่ติดกับผิวล่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่การไหลเลยตำแหน่งของการไหลหมุนวน ความดันนี้จะดันของไหลไปสู่ทางออกที่มีความดันต่ำกว่า ส่วนความดันที่หน้าตัดใกล้กับมุมของ Step มีค่าน้อยกว่าความดันที่ตำแหน่งถัดไป ซึ่งทำให้เกิดการไหลย้อนกลับขึ้น โดยสอดคล้องกับรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 เวกเตอร์ความเร็วการไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า  $Re_H = 36,000$  (Not to scale)



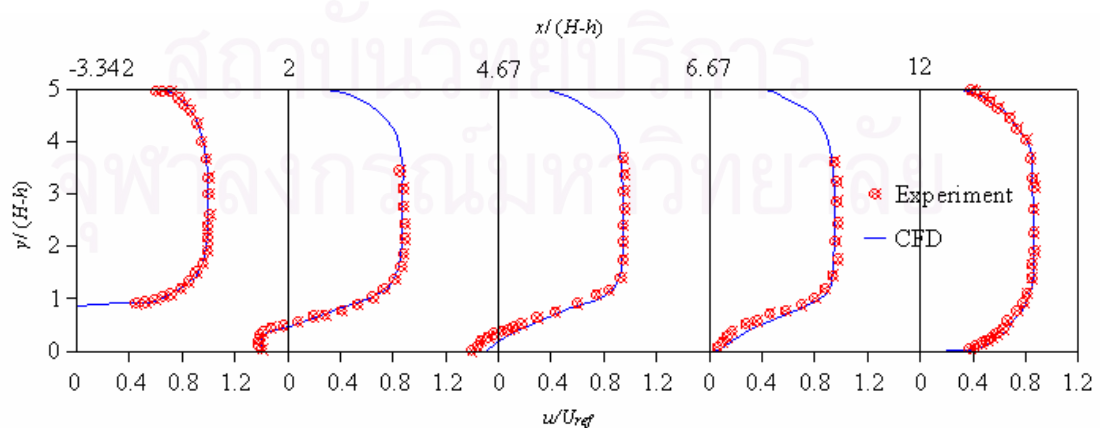
รูปที่ 5.10 รูปขยายเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณการไหลหมุนวน (Not to scale)



รูปที่ 5.11 Pressure contour การไหลผ่าน Backward-facing step ที่ค่า  $Re_H = 36,000$  (Not to scale)

#### ผลการเปรียบเทียบกับทดลอง

จากรูปที่ 5.12 สามารถสรุปได้ว่าการใช้โปรแกรม CFD ทำนายการไหลในกรณีที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่การไหลผ่าน Backward-facing step นั้นผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี โดยพิจารณาจากค่าความเร็วที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง และพบว่าเกิดการไหลย้อนกลับขึ้นที่บริเวณผนังด้านล่าง



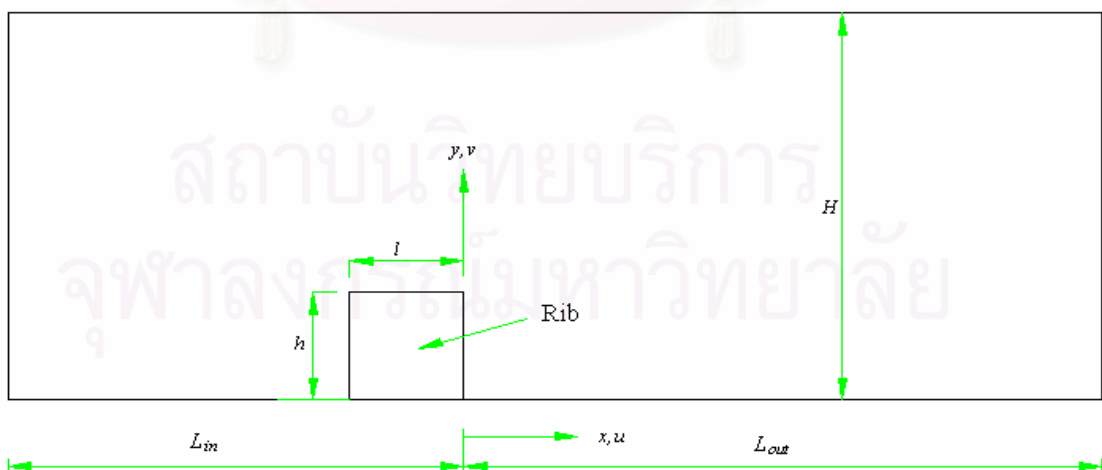
รูปที่ 5.12 รูปร่างของความเร็วโดยการเปรียบเทียบผลกับการทดลองที่ค่า  $Re_H = 36,000$  (Not to scale)

### 5.1.3 สรุปผลการไหลผ่าน Backward – facing step

ผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบการไหลผ่าน Backward-facing step โดยใช้โปรแกรมทาง CFD ทำนายการไหลนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองทั้งแบบการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน จะเห็นว่าผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก ทำให้มีความเชื่อมั่นในการที่จะนำตัวโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้งานกับปัญหาอื่นๆ

### 5.2 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบสองมิติ

การที่เลือกทดสอบกับลักษณะปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปสี่เหลี่ยมแบบสองมิติ นั้น เพราะมีความใกล้เคียงในด้านของรูปทรงของอาคารจริง แต่ในกรณีนี้เป็นแบบสองมิติจะทำให้ลดเวลาในการทดสอบและการเปรียบเทียบผลกันง่าย ซึ่งการไหลผ่านรูปสี่เหลี่ยมจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ของการไหลที่แยกกัน (Separated flow) โดยที่การแยกไหลเกิดขึ้นที่ขอบของสิ่งกีดขวาง และมีการไหลมาบรรจบกันเกิดขึ้นที่พื้นที่ด้านหลังของสิ่งกีดขวาง การไหลหมุนวนเกิดขึ้นที่มุมล่างด้านหน้า ด้านบนและด้านหลังด้านหลังของสิ่งกีดขวาง การทดสอบในหัวข้อนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นการไหลแบบราบเรียบที่  $Re = 144$  กับส่วนที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่  $Re = 1480$  โดยในการคำนวณทั้งสองส่วนนี้ได้สมมติให้ของไหลเป็นอากาศมีความหนาแน่น  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  และความหนืดสัมบูรณ์  $\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$  เพื่อศึกษา ลักษณะรูปร่างของความเร็วและการไหลหมุนวนของการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน และทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลอง โดยโดเมนของปัญหานี้แสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 รูปแบบของปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในช่องทางไหล (Not to scale)



### 5.2.1 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบราบเรียบ (Laminar flow)

กรณีการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของการไหลแบบราบเรียบนั้น จะใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของ Tropea and Gackstatter (1985) เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลอง โดยที่ค่าของตัวแปรเป็นดังนี้ สิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยมยาว  $l = 20 \text{ mm}$  มีความสูง  $h = 5 \text{ mm}$  วางติดกับผนังด้านล่างในช่องทางไหลซึ่งสูง  $H = 10 \text{ mm}$  และระยะจากทางเข้าถึงจุดเริ่มต้นของแกน  $x, y$  คือ  $L_{in} = 60 \text{ mm}$  และระยะทางจากจุดเริ่มต้นของแกน  $x, y$  จนถึงทางออก คือ  $L_{out} = 120 \text{ mm}$  ซึ่งค่านี้มากพอที่จะทำให้ความเร็วที่ทางออกมีลักษณะที่พัฒนาเต็มที่ ซึ่งในการจำลองการไหลนี้ใช้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 19952 เอลิเมนต์ เป็นเอลิเมนต์ชนิด Hexahedrons จำนวน 19952 เอลิเมนต์ โดยมีเอลิเมนต์ขนาดเล็กที่สุดคือ  $0.5 \text{ mm}$  การจำลองการไหลนี้ที่ค่า  $Re_H = 144$  โดยที่ทางเข้ากำหนดความเร็วเป็นแบบ Fully developed (รูปที่ 5.14)



รูปที่ 5.14 การขยายกริดที่ละเอียดบริเวณรอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ของการจำลองการไหลผ่านรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่า  $Re_H = 144$  (Not to scale)

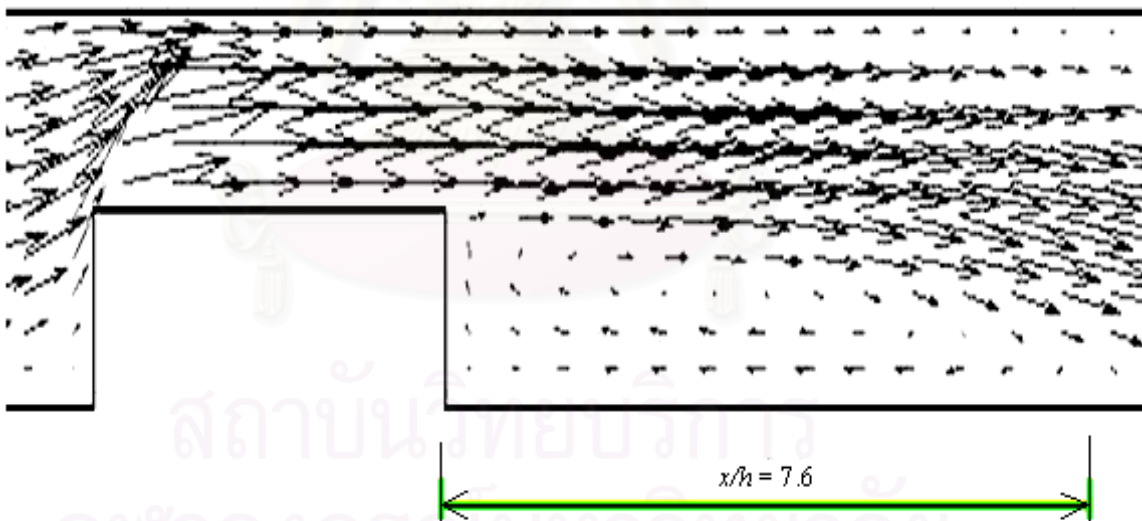
ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม

รูปที่ 5.15 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วในทิศทาง  $x$  ที่ค่า  $Re_H = 144$  ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณการหมุนวน (Reattachment region) เกิดขึ้นที่ Downstream ของสิ่งกีดขวางโดยมีขนาดความยาวของการไหลหมุนวนเป็น 7.6 เท่าของความสูงของรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และที่มุมล่างด้านหน้าของรูปทรงสี่เหลี่ยมส่วนหนึ่งด้วย โดยมีภาพขยายของบริเวณการหมุนวนนี้แสดงในรูปที่ 5.16

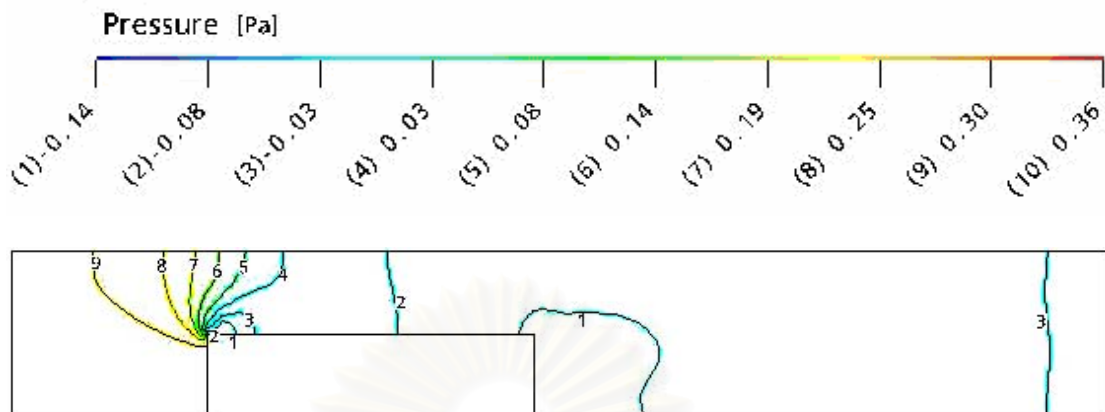
เมื่อพิจารณา Contour ของความดันที่  $Re_H = 144$  ดังแสดงในรูปที่ 5.17 เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) จะเห็นว่าช่วงการไหลเข้าจนปะทะสิ่งกีดขวางความดันเริ่มจากมากที่สุดไปหาน้อย ส่วนบริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวางนั้น ค่าความดันเป็นค่าลบในบริเวณที่เกิดการไหลแบบหมุนวน และความดันในแนวหน้าตัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในแนวหน้าตัดถัดไป ที่เรียกว่า การเกิด Adverse pressure gradient ผลจากการเกิดลักษณะเช่นนี้จึงทำให้เกิดบริเวณการหมุนวนขึ้นที่ Downstream ของสิ่งกีดขวางนั่นเองโดยสอดคล้องกับทิศทางของความเร็วในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.15 เวกเตอร์ความเร็วการจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่า  $Re_H = 144$  (Not to scale)



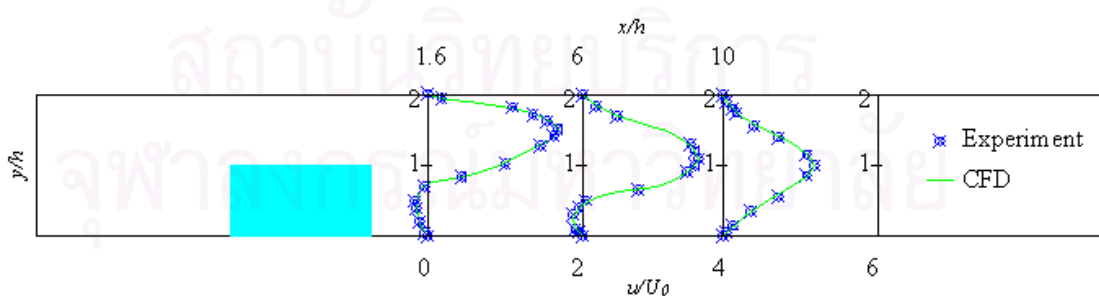
รูปที่ 5.16 ส่วนขยายของบริเวณที่เกิดการไหลหมุนวนจากการจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่า  $Re_H = 144$  (Not to scale)



รูปที่ 5.17 Pressure contour การไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่า  $Re_H = 144$  (Not to scale)

#### ผลการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วระหว่างผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CFD ทำนายการไหลกับผลการทดลองในกรณีที่มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) สำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 5.18 พบว่าผลการคำนวณมีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลองสำหรับการไหลแบบราบเรียบ โดยค่าความเร็วที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง และมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับการทดลองทุกช่วงของการเปรียบเทียบกัน ดังนั้นจึงทำให้มีความเชื่อมั่นในการที่จะใช้โปรแกรมนี้ระดับหนึ่ง ก่อนที่จะใช้กับอาคารที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.18 รูปร่างความเร็วการไหลผ่านรูปสี่เหลี่ยมโดยการเปรียบเทียบผลกับการทดลองที่ค่า  $Re_H = 144$  (Not to scale)

## 5.2.2 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

ในกรณีที่เป็นกรไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) นั้นได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Acharya et al. (1994) โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้เพื่อทำการจำลองการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นปัญหาแบบสองมิติที่ค่า  $Re_H = 1480$

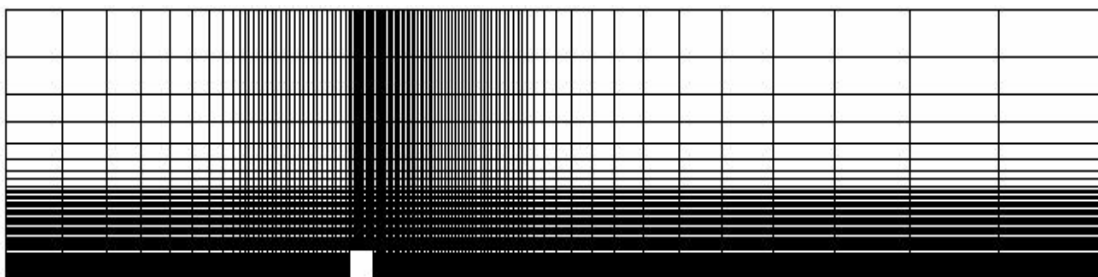
โดยที่ค่าของตัวแปรเป็นดังนี้ ความสูงและความยาวของรูปทรงสี่เหลี่ยมคือ สูง  $h = 6.35$  mm ยาว  $l = 6.35$  mm ช่องทางไหลสูง  $H = 61$  mm ระยะจากทางเข้าถึงจุดเริ่มต้นของแกน  $x,y$  คือ  $L_{in} = 95.25$  mm และระยะทางจากจุดเริ่มต้นของแกน  $x,y$  จนถึงทางออก คือ  $L_{out} = 190$  mm โดยกำหนดให้อากาศเป็นของไหลมีความหนาแน่น  $\rho = 1.2$  kg/m<sup>3</sup> และค่าความหนืดสัมบูรณ์  $\mu = 1.85 \times 10^{-5}$  N.s/m<sup>2</sup> สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ คือ การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ ซึ่งในการจำลองการไหลนี้ใช้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 14724 เอลิเมนต์ ซึ่งเป็น เอลิเมนต์ชนิด Hexahedrons จำนวน 14724 เอลิเมนต์ โดยที่ขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กสุดมีขนาดคือ 0.5 mm การจำลองการไหลนี้ใช้ที่ค่า  $Re_H = 1480$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของความเร็วที่ทางเข้า ในกรณีที่มีการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่มีค่า  $Re = 1480$  เป็นดังสมการนี้

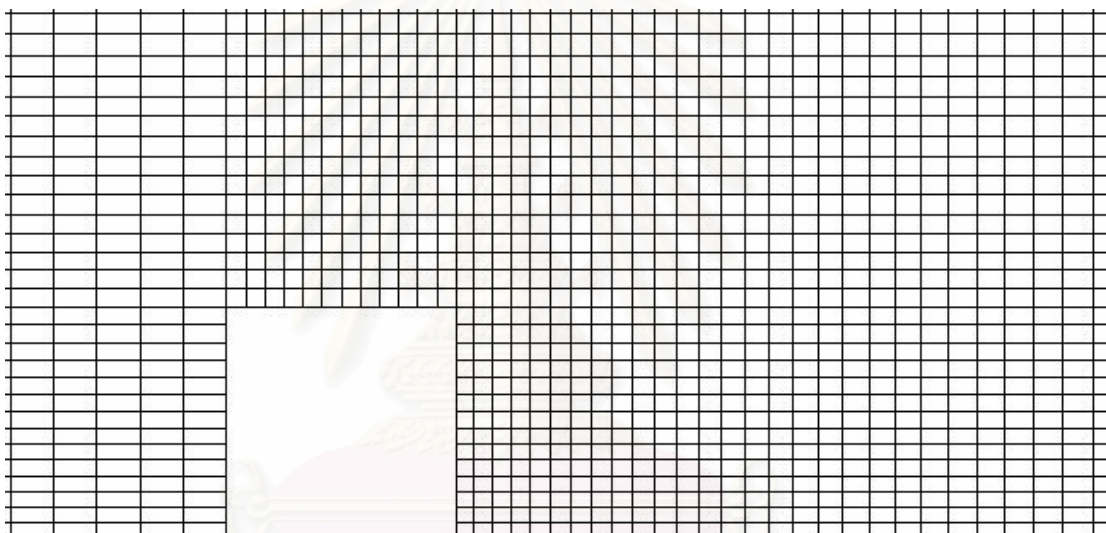
$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta_u}\right)^{\frac{1}{5.6}} \quad \text{ถ้า} \quad \frac{y}{\delta_u} < 1 \quad \text{และ} \quad \frac{y}{\delta_u} > \left(\frac{H}{\delta_u} - 1\right);$$

$$\frac{u}{U_0} = 1 \quad \text{ถ้า} \quad 1 \leq \frac{y}{\delta_u} \leq \left(\frac{H}{\delta_u} - 1\right)$$

โดย  $\delta_u$  คือ Boundary layer thickness มีค่า  $3.3h$  และขนาดของความเร็วที่ Free stream คือ  $U_0 = 3.6$  m/s



รูปที่ 5.19 การตีกริดแบบ Unstructured ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า  $Re_H = 1480$  (Not to scale)

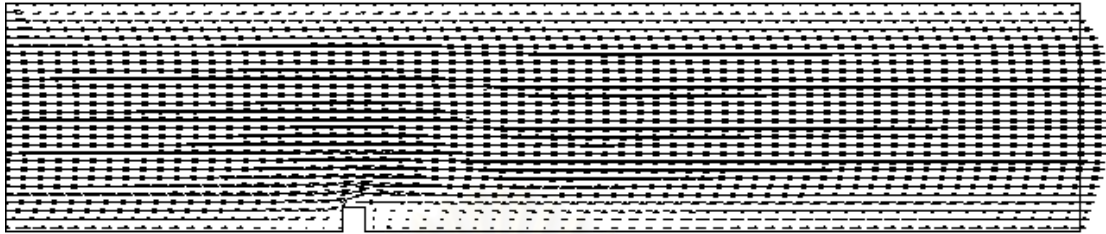


รูปที่ 5.20 การขยายของกริดที่ละเอียดที่บริเวณรอบๆรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า  $Re_H = 1480$  (Not to scale)

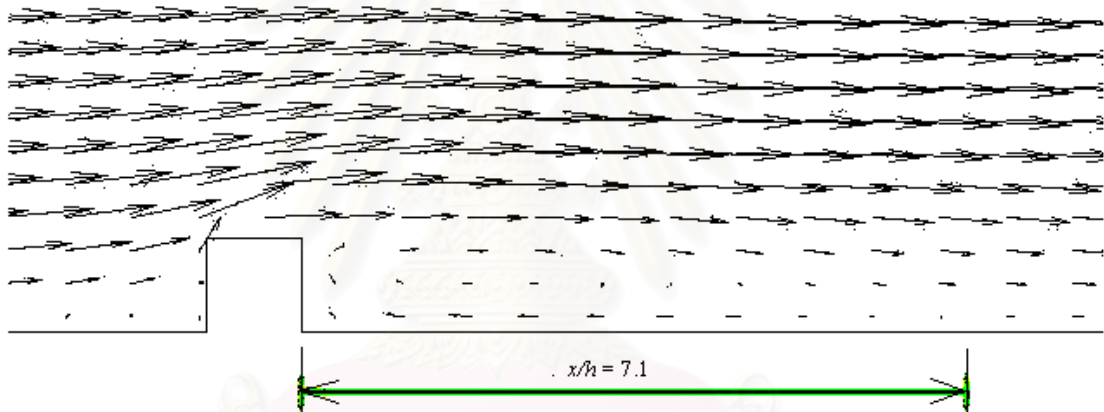
### ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม

รูปที่ 5.21 และ 5.22 แสดงเวกเตอร์ของความเร็ว ที่  $Re_H = 1480$  ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณการหมุนวน (Reattachment region) เกิดขึ้นที่ Downstream ของสิ่งกีดขวางโดยมีขนาดความยาวของการไหลหมุนวนเป็น 7.1 เท่าของความสูงของรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส และเกิดขึ้นที่มุมล่างด้านหน้าของรูปทรงสี่เหลี่ยมส่วนหนึ่งด้วย ซึ่งลักษณะของเวกเตอร์ความเร็วจะคล้ายกับกรณีที่เป็นไหลแบบราบเรียบ โดยมีภาพขยายของบริเวณการหมุนวนนี้แสดงในรูปที่ 5.22



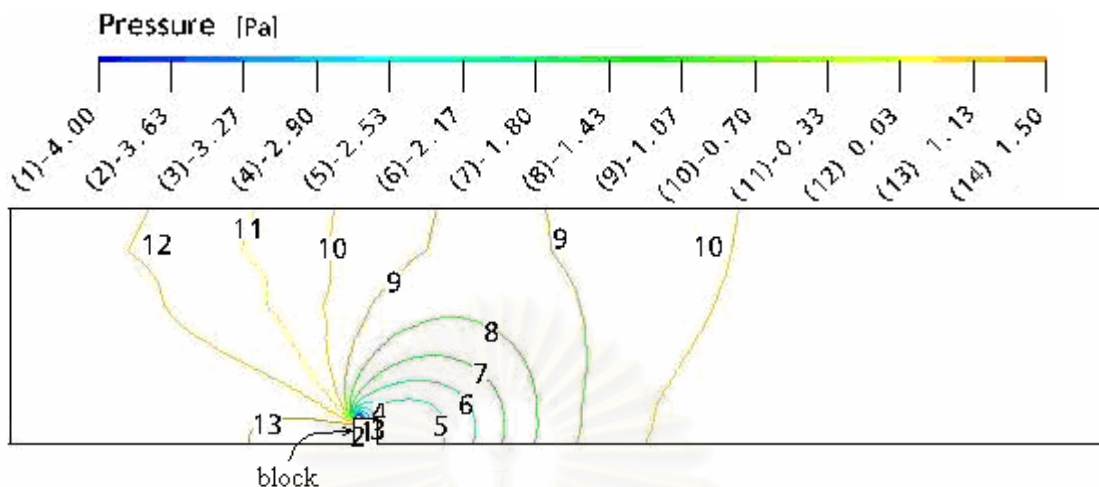


รูปที่ 5.21 เวกเตอร์ความเร็วการจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า  $Re_H = 1480$  (Not to scale)



รูปที่ 5.22 ส่วนขยายของบริเวณที่เกิดการไหลหมุนวนจากการจำลองการไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า  $Re_H = 1480$  (Not to scale)

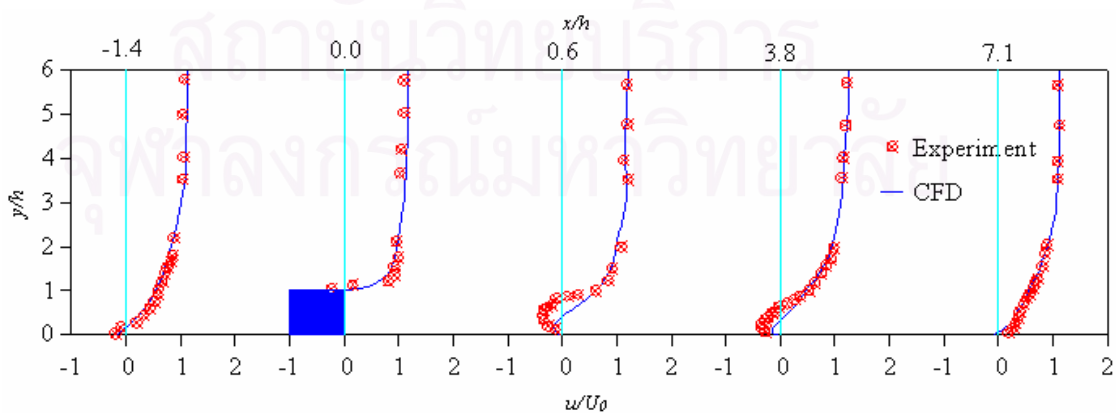
Pressure contour ที่  $Re_H = 1480$  ที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม พิจารณาจากรูปที่ 5.23 จะเห็นว่าช่วงการไหลเข้าจนปะทะสิ่งกีดขวางความดันเริ่มจากมากที่สุดไปหาค่าน้อย ส่วนบริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวางนั้น จะเกิด Adverse pressure gradient ซึ่งทำให้เกิดบริเวณการหมุนวนขึ้นที่ Downstream ของสิ่งกีดขวางนั่นเอง โดยสอดคล้องกับทิศทางความเร็วในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.23 Pressure contour การไหลผ่านรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่า  $Re_H = 1480$  (Not to scale)

#### ผลการเปรียบเทียบกับทดลอง

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ของอากาศผ่านสิ่งกีดขวางรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลจากการเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วของการทำนายการไหลกับผลการทดลองที่ค่า  $Re_H = 1480$  ดังแสดงในรูปที่ 5.24 พบว่าผลการคำนวณมีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง โดยพิจารณาจากค่าความเร็วที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง แต่ที่บริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวางให้ค่าความเร็วที่คลาดเคลื่อนจากการทดลองเล็กน้อย เนื่องจากในการทำนายการไหลนี้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน แต่จากค่า Reynolds number เท่ากับ 1480 นั้นถือว่ายังไม่เป็นการไหลแบบ Turbulent flow เต็มตัว หรือเรียกว่าอยู่ในช่วงการไหลแบบ Transition flow



รูปที่ 5.24 ความเร็วในแนวแกน  $x$  โดยเปรียบเทียบผลจากการจำลองการไหลกับผลของการทดลองที่  $Re_H = 1480$  (Not to scale)



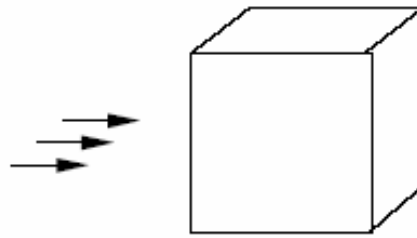
### 5.2.3 สรุปผลการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม

ผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ทั้งสองกรณีที่เป็นปัญหาแบบสองมิติโดยใช้โปรแกรมด้าน CFD ทำการวิเคราะห์การไหลนั้น เมื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลองแล้ว พบว่าในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ จะให้ผลได้ใกล้เคียงกับการทดลองมาก ส่วนในกรณีที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนนั้น จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อยที่บริเวณด้านหลังสิ่งกีดขวางที่เกิดการไหลหมุนวน โดยเฉพาะที่บริเวณใกล้กับพื้นผิวด้านล่างของโดเมนปัญหานี้ แต่เป็นค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยภาพรวมถือว่ายอมรับได้ เพราะมีแนวโน้มของผลที่ได้สอดคล้องกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าสามารถใช้โปรแกรมนี้ทำนายการไหลผ่านวัตถุรูปสี่เหลี่ยมแบบสองมิติได้ ทำให้มีความเชื่อมั่นในการที่จะใช้โปรแกรมนี้ไปประยุกต์กับปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางกรณีอื่นที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยเฉพาะการไหลผ่านอาคารจริง ซึ่งเป็นโดเมนการไหลแบบสามมิติ ดังนั้นก่อนที่จะใช้โปรแกรมด้าน CFD นี้กับอาคารจริงต้องทดสอบการใช้กับปัญหาการไหลแบบสามมิติดังขั้นตอนต่อไป

### 5.3 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงลูกบาศก์แบบสามมิติ

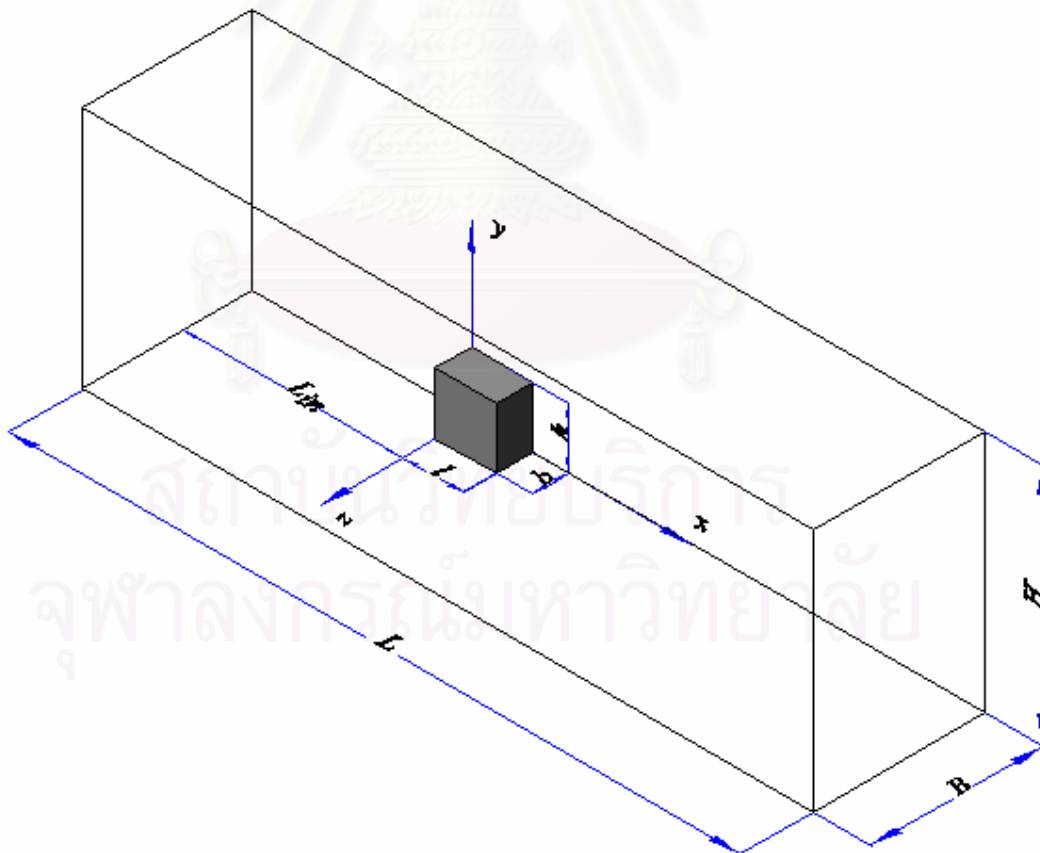
เป็นการทดสอบโปรแกรมครั้งสุดท้าย ก่อนที่จะตัดสินใจนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้กับอาคารที่มีคนใช้งานจริง การเลือกที่ทดสอบกับปัญหานี้เพราะต้องการให้เกิดความมั่นใจในการใช้งานโปรแกรมที่เป็นปัญหาแบบสามมิติ การทำนายการไหลผ่านสิ่งกีดขวางนั้น จะสมบูรณ์ต้องมีการจำลองกับปัญหาแบบสามมิติ เพราะในความเป็นจริงสิ่งกีดขวางจะมีรูปแบบสามมิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลจากการจำลองการไหลผ่านสิ่งกีดขวางสามารถนำไปวิเคราะห์กับปัญหาจริงได้ใกล้เคียง

ลักษณะรูปแบบของปัญหาที่ทำกรจำลองนั้น ให้ของไหลเป็นอากาศไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่มีรูปทรงเป็นรูปทรงลูกบาศก์ โดยจะทำการเปรียบเทียบผลจากการจำลองการไหลที่ใช้โปรแกรมทางด้าน CFD มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Murakami and Mochida (1988) ที่มีค่า Reynolds number ของการทดลองเป็น  $7 \times 10^4$  โดยที่ขนาดของรูปทรงลูกบาศก์มีขนาดเป็น  $200 \times 200 \times 200$  mm



รูปที่ 5.25 รูปทรงลูกบาศก์ที่ใช้ทดลองในอุโมงค์ลม

สร้างรูปแบบจำลองของการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ของปัญหานี้ โดยอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยของ Murakami and Mochida (1988) เนื่องจากปัญหานี้มีความสมมาตรกัน สามารถใช้ค่าของตัวแปรตามรูปที่ 5.26 ดังนี้ ขนาดความยาว ความกว้าง และความสูง ของโดเมนปัญหา  $L = 3140$  mm  $B = 970$  mm และ  $H = 1040$  mm ตามลำดับ และจากทางไหลเข้าจนถึงด้านหน้าของรูปทรงลูกบาศก์ยาว  $L_{in} = 916$  mm ขนาดของสิ่งกีดขวางมีขนาด  $l = 200$  mm  $h = 200$  mm และ  $b = 100$  mm



รูปที่ 5.26 รูปแบบและขนาดของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ (Not to scale)

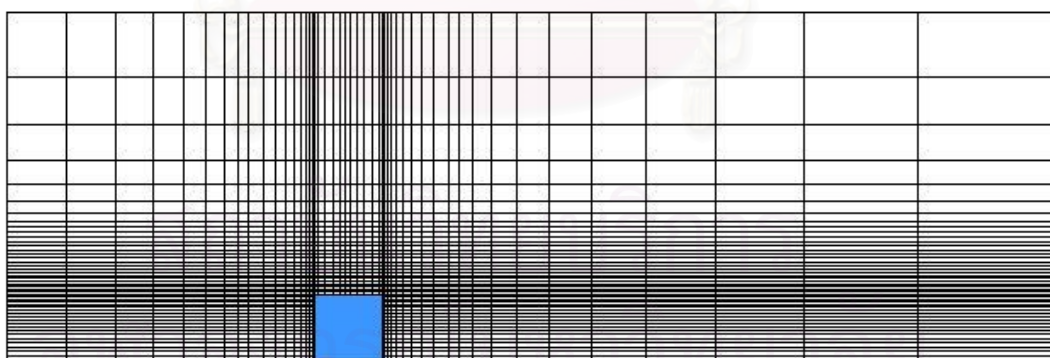
ซึ่งในการจำลองการไหลนี้ใช้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดคือ  $55 \times 50 \times 32 = 88,000$  เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ชนิด Hexahedron จำนวน 88,000 เอลิเมนต์ โดยที่ขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กสุดมีขนาดคือ 8 mm การจำลองการไหลนี้ใช้ที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$

โดยกำหนดคุณสมบัติของของไหลเป็นดังนี้ คือใช้อากาศเป็นของไหลมีค่าความหนาแน่น  $\rho = 1.0 \text{ kg/m}^3$  และค่าความหนืดสัมบูรณ์  $\mu = 2.0 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$  สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณคือ การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของความเร็วที่ทางเข้า ในกรณีที่การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ที่มีค่า  $Re = 7 \times 10^4$  ใช้ค่าที่ได้จากสมการ (3.3) ในบทที่ 3 ดังนี้

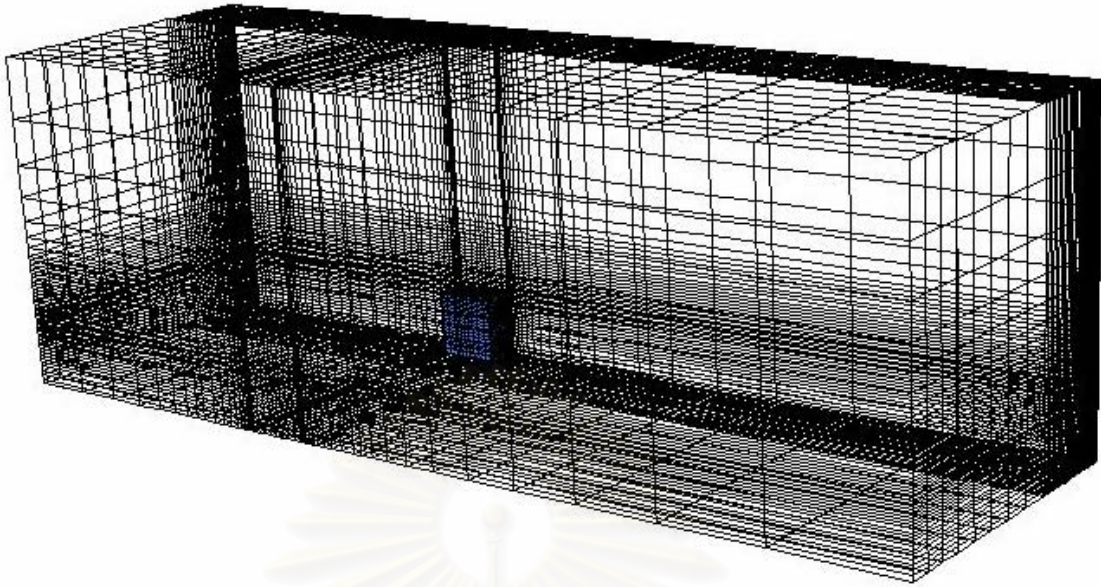
$$u = u_g (z / z_g)^\alpha$$

โดยที่  $u$  คือ ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงใดๆ  $u_g$  คือ ค่าความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์ ในปัญหานี้มีค่า  $u_g = 7 \text{ m/s}$   $z$  คือ ค่าความสูงใดๆ  $z_g$  คือ ค่าความสูงเกรเดียนต์ ใช้ค่า  $z_g = 200 \text{ mm}$  และ  $\alpha$  คือค่าตัวเลขยกกำลัง  $\alpha = 2.8$  เริ่มทำการสร้าง Mesh ในโดเมนของการจำลอง ดังรูปที่ 5.27 ถึงรูปที่ 5.29

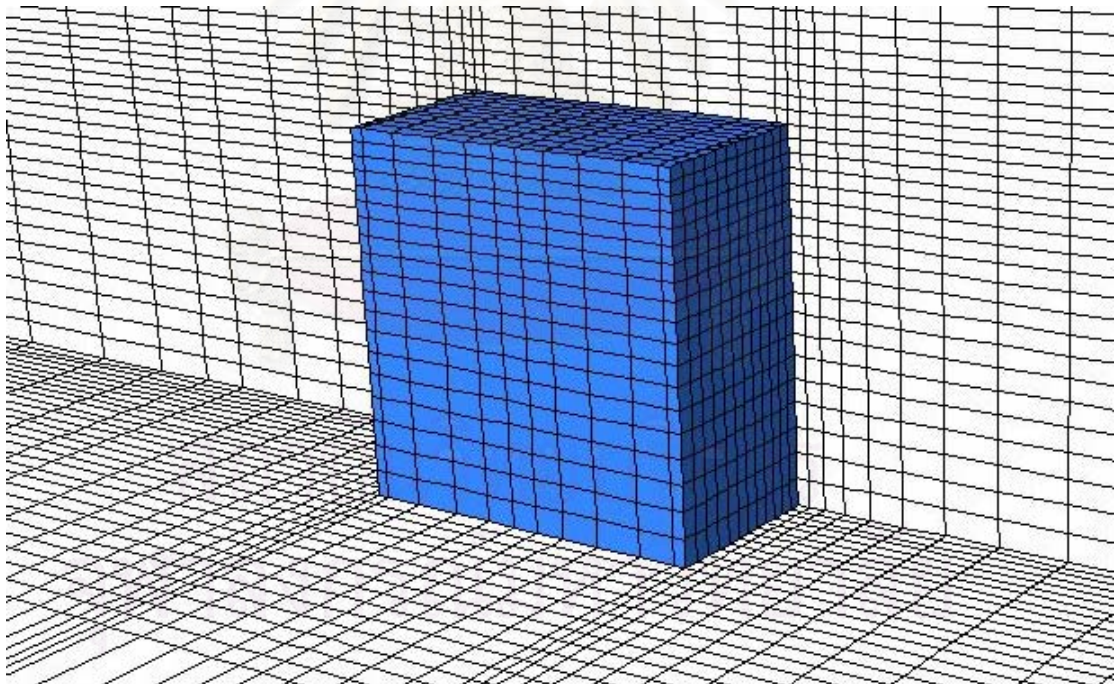


รูปที่ 5.27 การตีกริดแบบ Unstructured ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ (Not to scale)





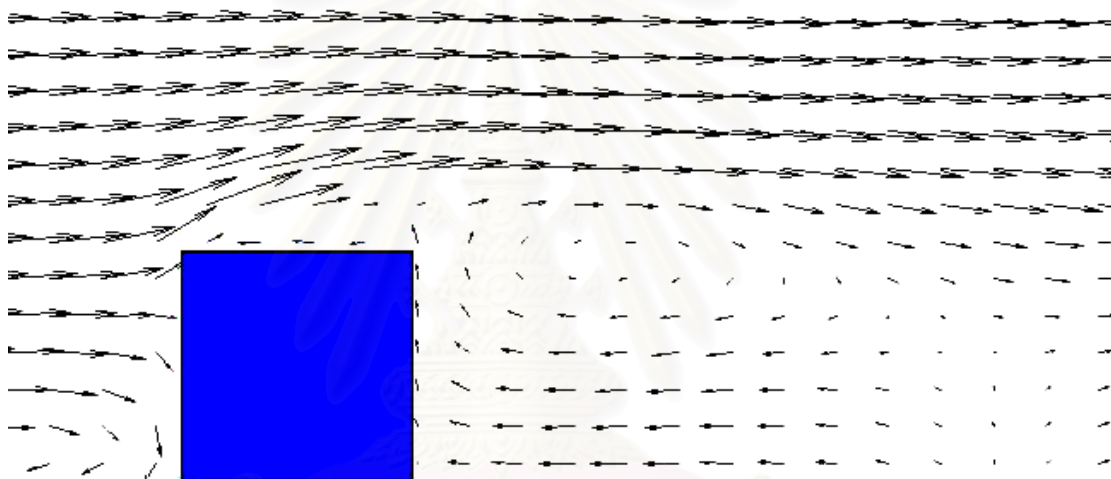
รูปที่ 5.28 การสร้าง Mesh แบบ Unstructured ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์แบบรูปสามมิติ (Not to scale)



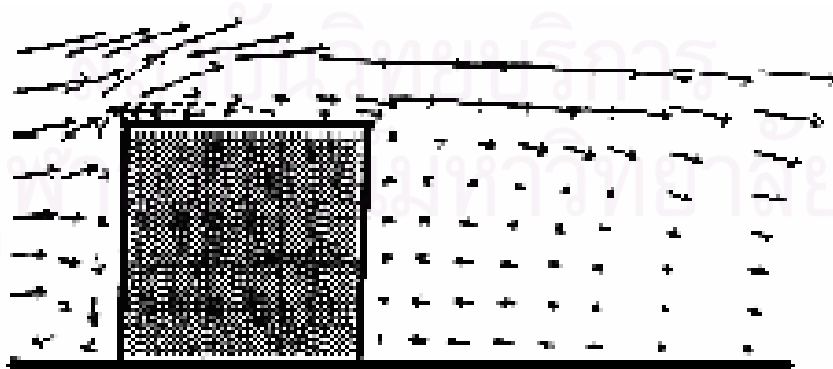
รูปที่ 5.29 ส่วนขยายการสร้าง Mesh ที่ละเอียดบริเวณรอบรูปทรงลูกบาศก์ (Not to scale)

## ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม

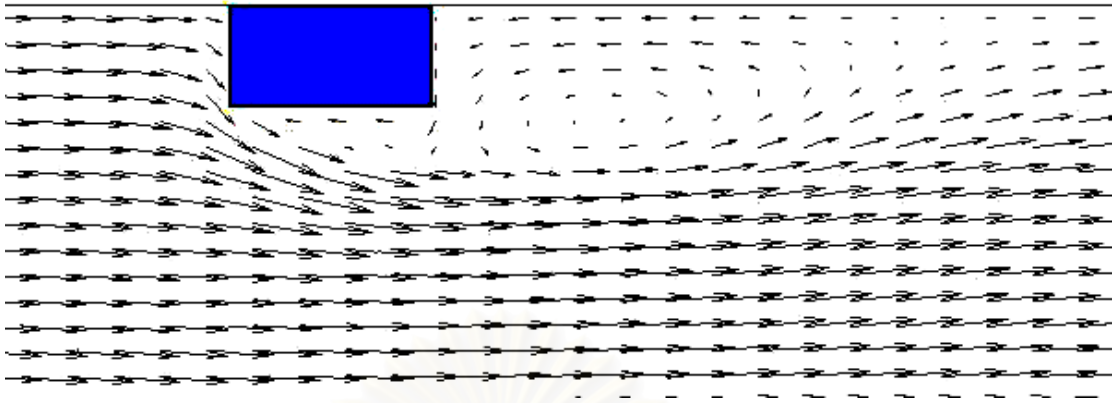
รูปที่ 5.30 ถึง 5.35 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วที่ของการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างในระนาบแนวตั้ง และที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงในระนาบแนวนอน รวมทั้งแสดงเส้น Streamline ของการไหลด้วย ที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่งที่เป็นบริเวณการไหลหมุนวน (Reattachment region) มีหลายตำแหน่งดังนี้คือ เกิดขึ้นที่ด้านหลัง ที่ด้านบน ที่ด้านข้าง และที่มุมล่างด้านหน้าของของสิ่งกีดขวางด้วยส่วนหนึ่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลของการทดลองที่แสดงเวกเตอร์ความเร็วจะมีลักษณะคล้ายกันมาก



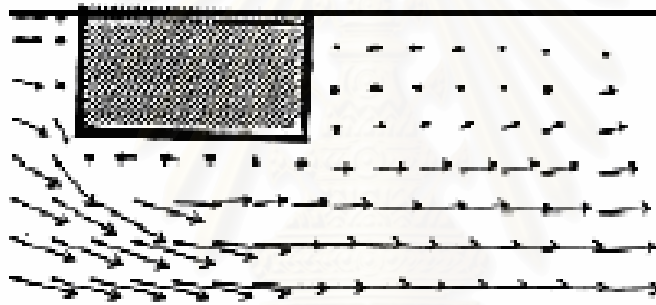
รูปที่ 5.30 เวกเตอร์ความเร็วของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างในระนาบแนวตั้งที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  (Not to scale)



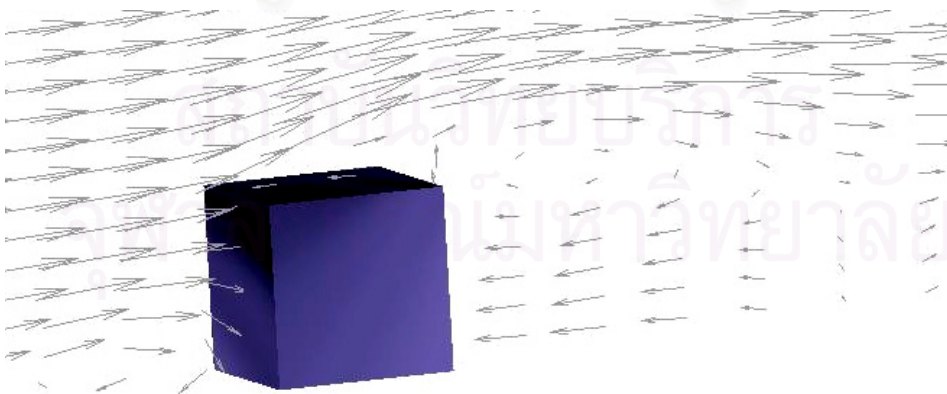
รูปที่ 5.31 เวกเตอร์ความเร็วของการทดลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างในระนาบแนวตั้งที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  (Not to scale)



รูปที่ 5.32 เวกเตอร์ความเร็วของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงในระนาบแนวนอนที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  (Not to scale)

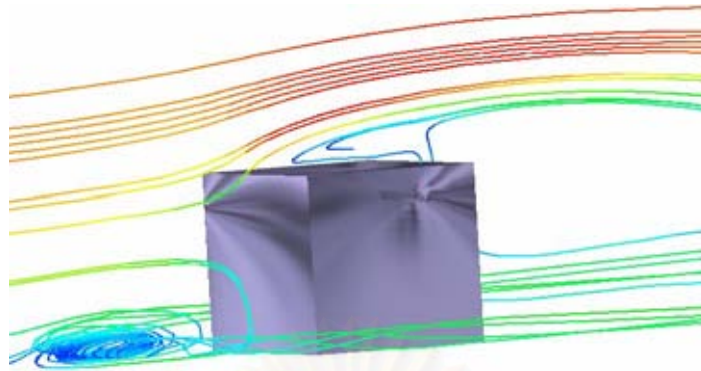


รูปที่ 5.33 เวกเตอร์ความเร็วของการทดลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงในระนาบแนวนอนที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  (Not to scale)

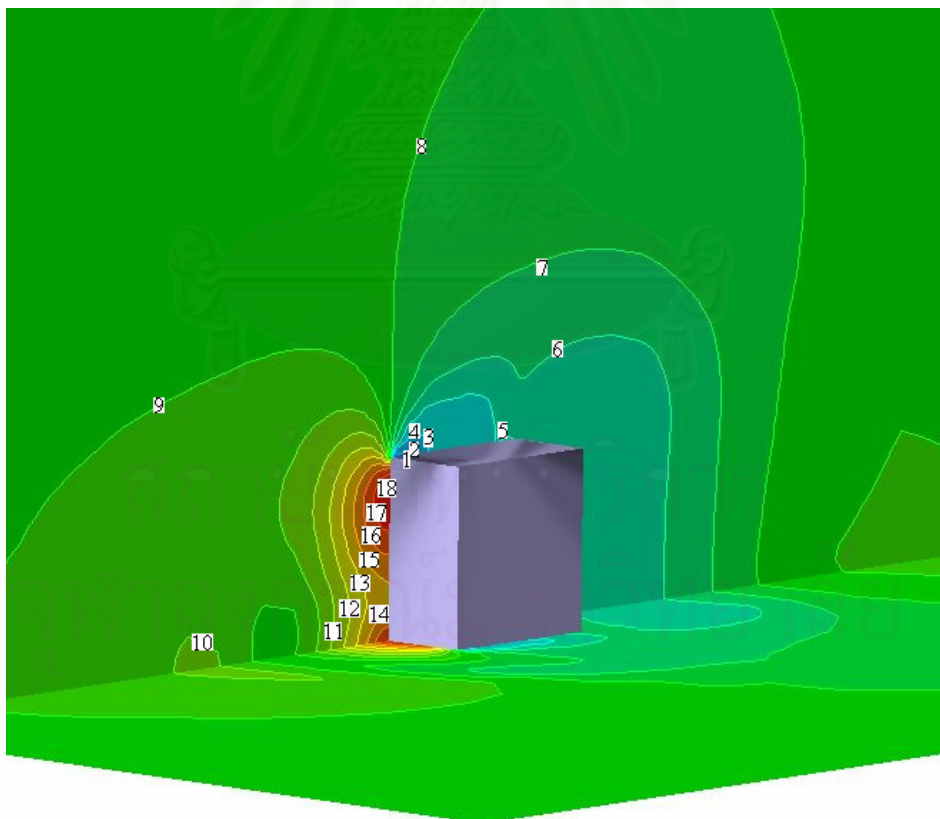
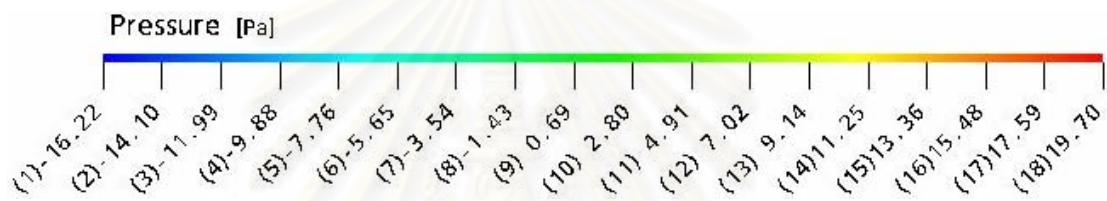


รูปที่ 5.34 เวกเตอร์ความเร็วของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างในระนาบแนวตั้งแบบสามมิติที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  (Not to scale)



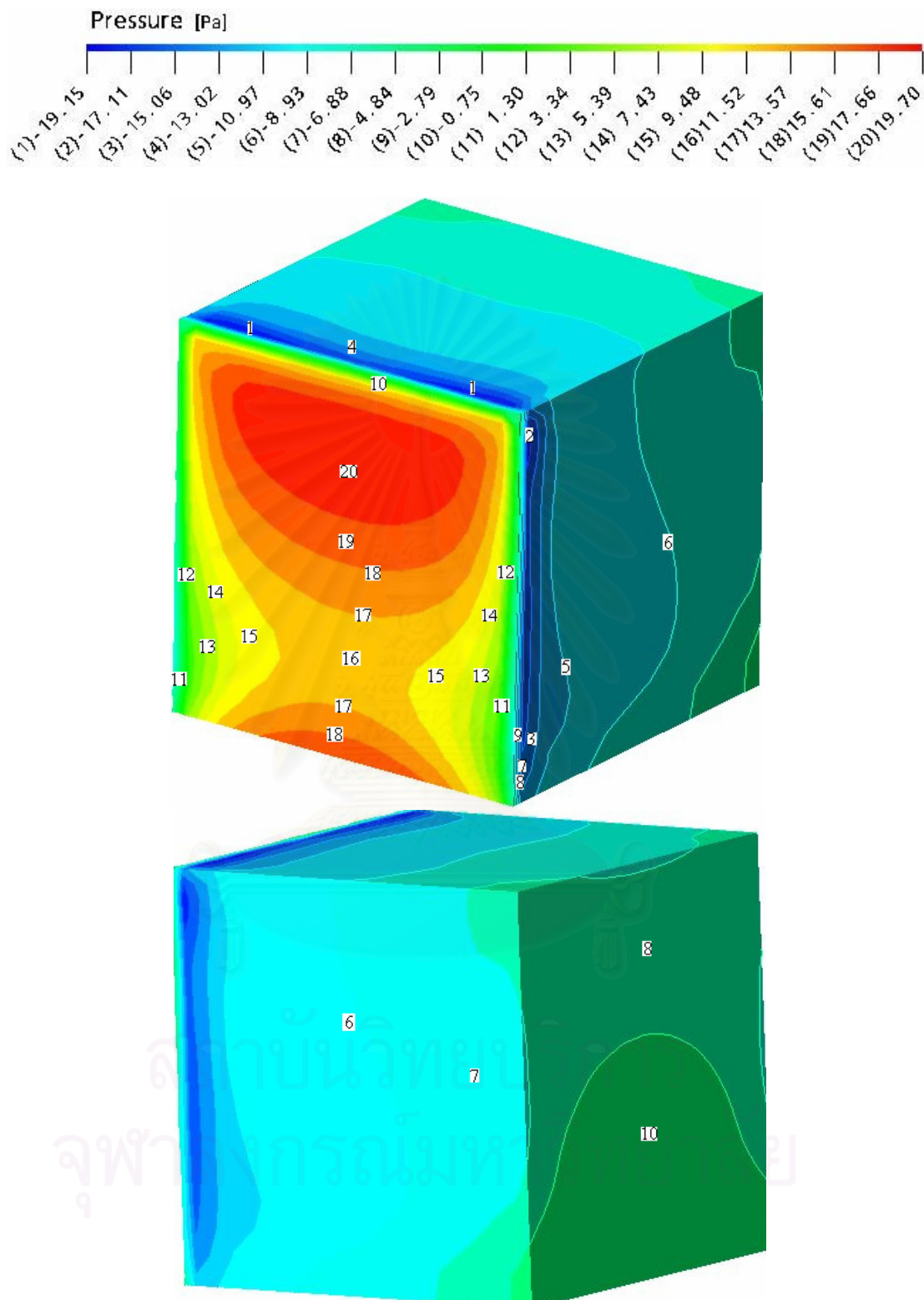


รูปที่ 5.35 Streamline plot ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างในระนาบแนวตั้งแบบสามมิติที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$



รูปที่ 5.36 Pressure contour ของการจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างในระนาบแนวตั้งและพื้นระนาบล่างแบบสามมิติที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$





รูปที่ 5.37 Pressure contour การจำลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ตำแหน่งบนผิวด้านนอกของสิ่งกีดขวาง โดยรูปบนแสดงส่วนผิวหน้าที่ปะทะลม ส่วนรูปล่างแสดงผิวด้านหลัง แบบสามมิติ ที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$

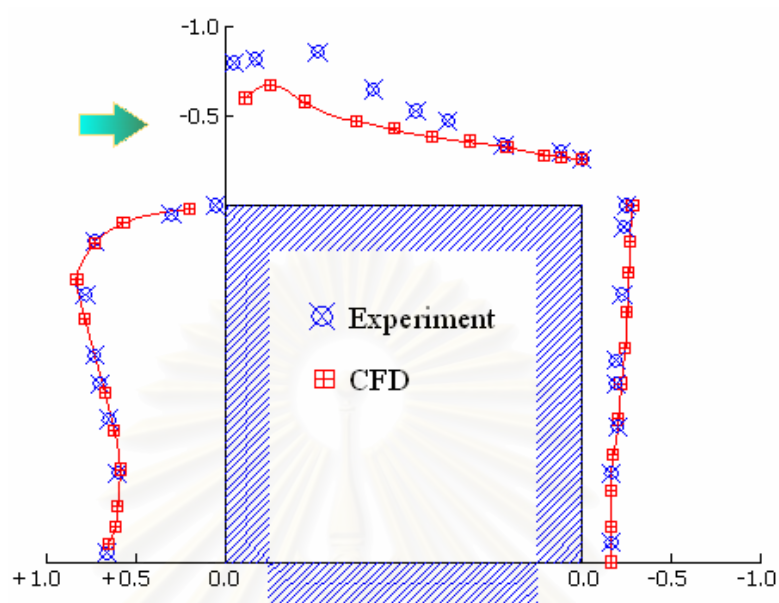
Pressure contour ในกรณีที่เป็นการไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบสามมิติ ที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  พิจารณาผลที่แสดงในรูปที่ 5.38 และ 5.39 จะเห็นว่าช่วงการไหลเข้าจนปะทะสิ่งกีดขวางความดันจะเริ่มจากค่ามากค่าหนึ่งเพื่อดันของไหลให้ผ่านสิ่งกีดขวางแล้วความดันจะเริ่มมีค่าน้อยลงจนกระทั่งของไหลปะทะสิ่งกีดขวางทำให้ความดันบริเวณด้านหน้าของสิ่งกีดขวางมีความดันเพิ่มขึ้นสูงมากที่สุด ส่วนบริเวณมุมด้านบนของสิ่งกีดขวางนั้นจะมีค่าความดันเริ่มจากน้อยไปหามากเป็นบริเวณหนึ่งซึ่งเมื่อดูจากรูปที่ 5.30 บริเวณนี้เกิดการไหลแบบแยก (Separation flow) ทำให้เกิดการไหลหมุนวนที่ด้านบนของสิ่งกีดขวางด้วยซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องตามความเป็นจริง ที่บริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวางนั้น จะเกิด Adverse pressure gradient ซึ่งทำให้เกิดบริเวณการหมุนวนขึ้นที่ Downstream ของสิ่งกีดขวางนั่นเอง โดยผลที่ได้จะสอดคล้องกับรูปที่ 5.30 ส่วนความดันบนผิวด้านนอกของสิ่งกีดขวางมีความสัมพันธ์กับความดันในบริเวณที่ใกล้กับผิวด้านนอกของสิ่งกีดขวาง ซึ่งแสดงได้ไว้ในรูปที่ 5.37 เป็นค่าความดันที่มากที่สุดที่ตำแหน่งประมาณ  $2/3$  ของความสูงของสิ่งกีดขวางที่ผิวด้านหน้าที่ปะทะลม ซึ่งบริเวณนี้ความเร็วลมที่ปะทะมีค่าเป็นศูนย์ทำให้เกิดการดันให้ของไหลเคลื่อนที่ไปด้านบนส่วนหนึ่งและเคลื่อนที่ลงด้านล่างส่วนหนึ่ง ในส่วนที่เคลื่อนที่ลงด้านล่างจะทำให้เกิดการไหลหมุนวนที่ตำแหน่งมุมด้านล่างด้านหน้าของสิ่งกีดขวาง

### ผลการเปรียบเทียบกับ การทดลอง

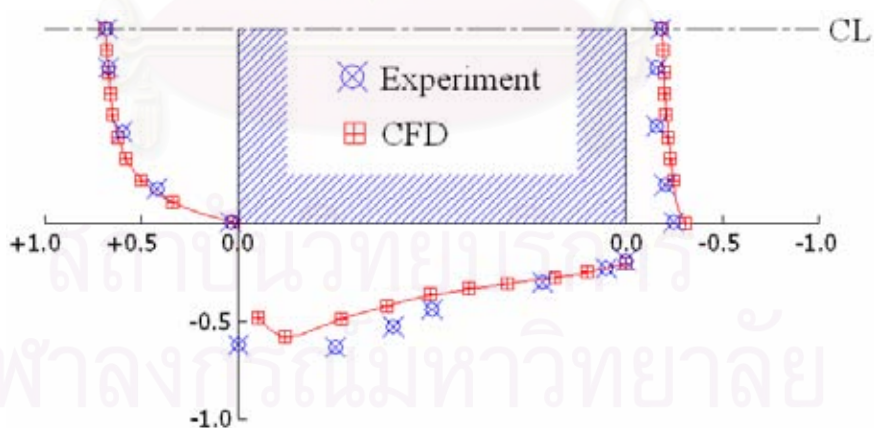
การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองของการทดสอบโปรแกรมกรณีนี้ ใช้ที่ทำการเปรียบเทียบกันคือค่าสัมประสิทธิ์ความดันลม (Pressure coefficient) ซึ่งเป็นค่าที่ไร้หน่วย โดยเป็นอัตราส่วนของค่าความดันที่ระดับใดๆต่อค่าความดันพลวัต (Dynamic Pressure) ที่ระดับอ้างอิง โดยในบทที่ 3 สมการที่ (3.2) แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมดังนี้

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

โดยที่  $p$  คือ ค่าความดัน ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความดัน  $p_0$  คือ ค่าความดันลมสถิตย์ที่ใช้อ้างอิง  $U$  คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ย  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ



รูปที่ 5.38 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน จากผลการจำลองกับผลจากการทดลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ผิวด้านนอกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างในแนวตั้งของลูกบาศก์ที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  (Not to scale)



รูปที่ 5.39 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน จากผลการจำลองกับผลจากการทดลองการไหลผ่านรูปทรงลูกบาศก์ที่ผิวด้านนอกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความสูงในแนวระนาบของลูกบาศก์ที่ค่า  $Re = 7 \times 10^4$  (Not to scale)

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน (Pressure coefficient) ที่ตำแหน่งต่างๆที่ผิวด้านนอกของสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปทรงลูกบาศก์ ซึ่งผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม CFD กับผลการทดลองพบว่าผลการคำนวณมีความสอดคล้องและผลที่ได้ไปในแนวทางเดียวกันกับผลการทดลอง สำหรับบางตำแหน่งที่ผลลัพธ์ไม่ใกล้เคียงกันนั้นอาจเนื่องมาจากการแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ไม่เหมือนความเป็นจริงทีเดียว แต่จะใกล้เคียงความเป็นจริงในระดับที่ผลลัพธ์น่าพอใจมาก และอีกเหตุผลหนึ่งคือความไม่แน่นอนของผลการทดลองเอง

### 5.3.1 สรุปผลการไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบสามมิติ

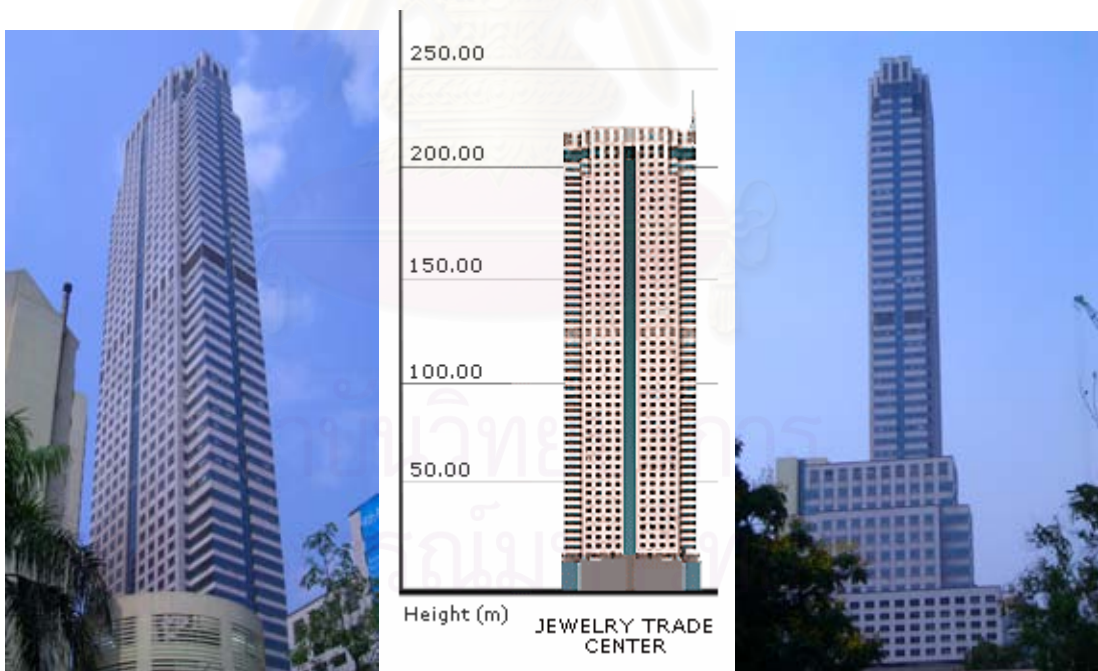
ผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปทรงลูกบาศก์ ในกรณีที่เป็นปัญหาแบบสามมิติโดยใช้โปรแกรมทาง CFD ทำการวิเคราะห์การไหลนั้น เมื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลองแล้วนั้นผลที่ได้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นทำให้เกิดความเชื่อมั่นในการที่จะนำโปรแกรมนี้ออกไปประยุกต์ใช้งานกับอาคารจริงๆ ซึ่งจะทำให้การจำลองการไหลผ่านอาคารจริงในบทถัดไป

## บทที่ 6

### การคำนวณการไหลของลมผ่านอาคารจริง

#### 6.1 รายละเอียดและตำแหน่งที่ตั้งของอาคาร

การจำลองการไหลของลมผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ซึ่งเป็นอาคารประเภทอาคารสำนักงานและศูนย์การค้า ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของสี่แยกมเหสักข์ ซึ่งเป็นจุดตัดของถนนสีลมและถนนสุรศักดิ์บริเวณใจกลางของกรุงเทพมหานคร อาคารมีขนาดกว้าง 26.8 เมตร ยาว 60.2 เมตร สูง 221.1 เมตร ทิศตะวันตกของอาคารเป็นโรงแรมมีความสูง 81 เมตร และมีอาคารที่มีความสูง 70 เมตร ทางด้านทิศตะวันออกมีอาคารสูง 120 เมตร ในระยะห่างประมาณ 60 เมตร ส่วนทิศเหนือและทิศใต้จะเป็นกลุ่มอาคารขนาดความสูง 4-7 ชั้น โดยที่อาคารทิศเหนือมีความสูงมากที่สุดคือ 67 เมตร ส่วนทิศใต้อาคารที่มีความสูงที่สุดคือ 40 เมตร

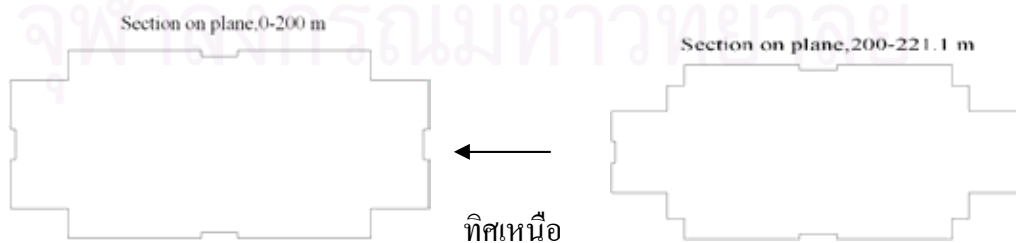
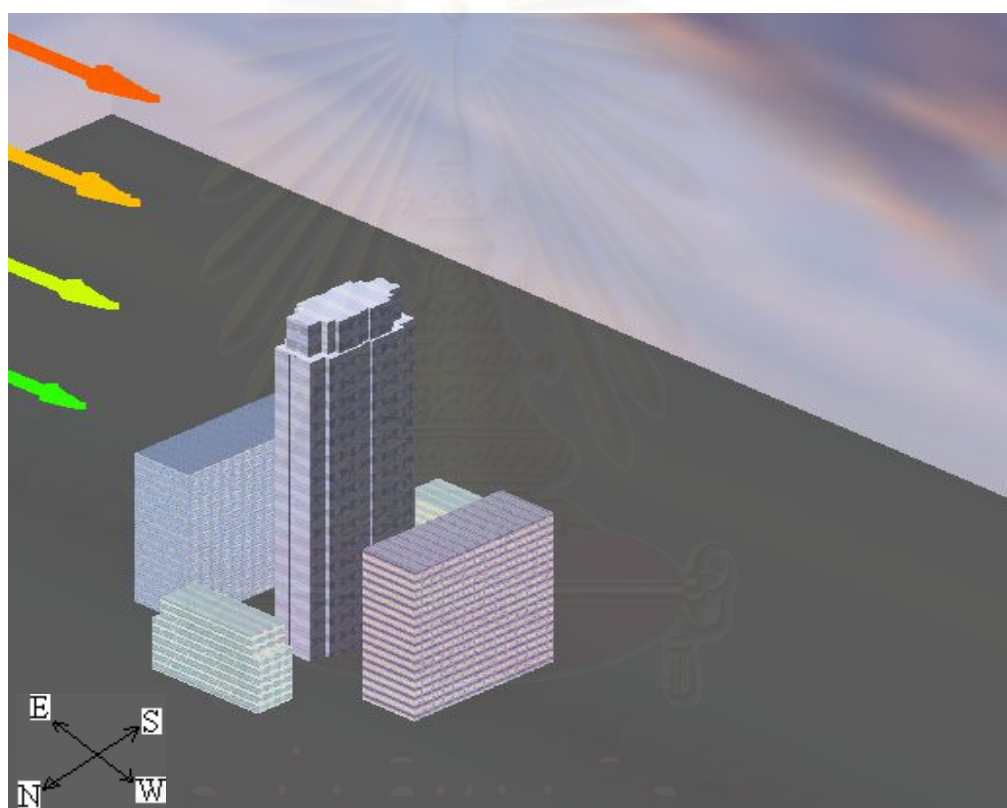


รูปที่ 6.1 อาคาร JEWELRY TRADE CENTER



## 6.2 การสร้างแบบจำลอง

เนื่องจากต้องการลดจำนวนของเอลิเมนต์ในโดเมนของปัญหา เพื่อให้ประหยัดเวลาในการประมวลผล จะทำการสร้างโดเมนที่มีการแบ่งครึ่งแบบสมมาตร ในส่วนของการสร้างตัวอาคารต่างๆ ที่ใช้ในโดเมนนี้ จะพิจารณาผลกระทบจากอาคารอื่นที่อยู่ใกล้กับอาคารที่ทำการวิเคราะห์ โดยวางอาคารอื่นในสี่ทิศทาง แต่ละทิศทางมีหนึ่งอาคาร โดยให้ใกล้เคียงกับสถานที่จริง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่กำลังพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 โดเมนของปัญหาการจำลองลมผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER

### 6.3 การจำลองสภาพลมบริเวณที่ตั้งอาคาร

ในการจำลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่ผนังด้านนอกของอาคารจริงนั้น ทางผู้ทำการจำลองนี้ได้ใช้ข้อมูลของ ปฏิพัทธ์ แจ่มม่วงคั่ง (2538) ที่ได้ทำการทดลองหาผลกระทบของทิศทางลมต่อค่าแรงลมสูงสุดสำหรับการออกแบบผนังรอบอาคาร ซึ่งเป็นการทดลองโดยย่อสัดส่วน 1 ต่อ 400 ในอุโมงค์ลม โครงการอยู่ในใจกลางของกรุงเทพมหานคร ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับสภาพภูมิประเทศใจกลางเมืองใหญ่ตามข้อกำหนด ANSI A58.1-1982 หรือสภาพภูมิประเทศที่มีสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่จำนวนมากกระจายอยู่ ค่าความสูงเกรเดียนต์และค่าตัวเลขยกกำลัง จะมีค่าอยู่ระหว่าง 400 - 500 เมตร และ 0.25 - 0.40 ตามลำดับ โดยการกำหนดค่าความสูงเกรเดียนต์เป็น 460 เมตร และค่าตัวเลขยกกำลังมีค่าเป็น 0.34 ซึ่งจะนำไปประยุกต์กับกฎยกกำลังของ Davenport ที่แสดงในสมการ (3.3) ของบทที่ 3

$$u = u_g (z / z_g)^\alpha \quad (3.3)$$

เมื่อ  $u$  คือ ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงใดๆ  $u_g$  คือ ค่าความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์  $z$  คือ ค่าความสูงใดๆ  $z_g$  คือ ค่าความสูงเกรเดียนต์ และ  $\alpha$  คือ ค่าตัวเลขยกกำลัง

จากการศึกษาของหน่วยวิจัยแผ่นดินไหวและการสั่นสะเทือนของสถานีตรวจอากาศดอนเมือง พบว่าความเร็วลมสูงสุดในรอบ 50 ปี สำหรับภูมิประเทศใจกลางเมืองใหญ่ที่ระดับความสูง 200 เมตร มีค่าเป็น 30.02 เมตร/วินาที โดยการประมาณความสูงระดับยอดอาคารของปัญหานี้เป็น 200 เมตร ซึ่งเราสามารถหาค่าความเร็วลมที่ความสูงเกรเดียนต์ได้จากสมการ (3.3) ดังนี้

$$\begin{aligned} u_g &= 30.02 / (200 / 460)^{0.34} \\ &= 40 \text{ เมตร/วินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้นสภาพลมบริเวณที่ตั้งอาคารสามารถเขียนด้วยกฎยกกำลัง ดังนี้

$$u = 40(z / 460)^{0.34} \quad \text{เมตร/วินาที} \quad (6.1)$$



## 6.4 ลักษณะของการจำลองของโดเมนปัญหา

เป็นการจำลองปัญหาที่พิจารณาทิศทางของกระแสลมกระทบอาคาร 2 ทิศทาง คือในทิศเหนือกับทิศตะวันออก และแบ่งลักษณะอาคารเป็น 2 แบบคือ

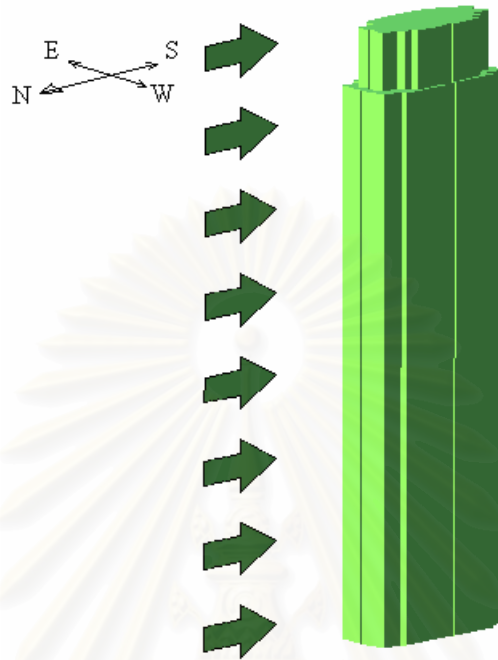
1. โดเมนของปัญหาที่ไม่มีอาคารข้างเคียง
2. โดเมนของปัญหาที่มีอาคารข้างเคียงเกี่ยวข้องเป็นรูปทรงสมมาตรแบบไม่ซับซ้อน

ซึ่งสามารถแบ่งการสร้างโดเมนของอากาศไหลผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ได้เป็นสี่ลักษณะดังนี้

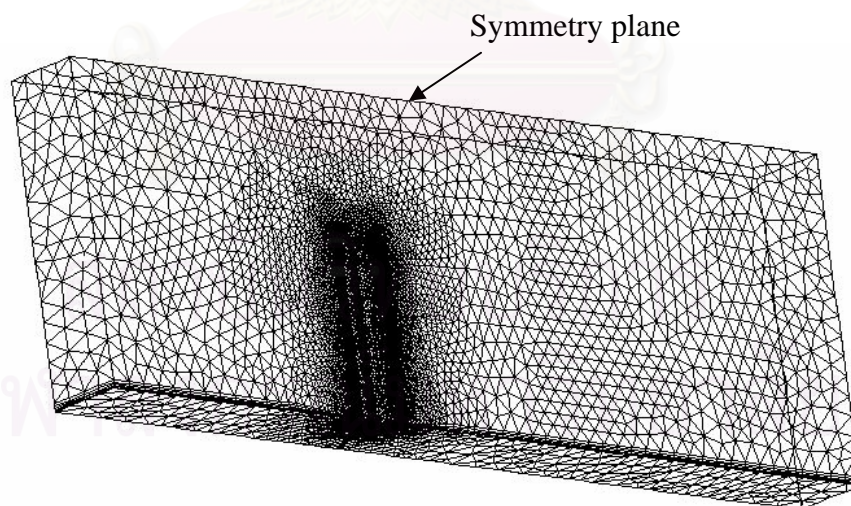
1. กรณีการไหลของอากาศจากทิศเหนือผ่านอาคารเดี่ยว
2. กรณีการไหลของอากาศจากทิศตะวันออกผ่านอาคารเดี่ยว
3. กรณีการไหลของอากาศจากทิศเหนือผ่านกลุ่มอาคาร
4. กรณีการไหลของอากาศจากทิศตะวันออกผ่านกลุ่มอาคาร

### 6.4.1 กรณีการไหลของอากาศจากทิศเหนือผ่านอาคารเดี่ยว

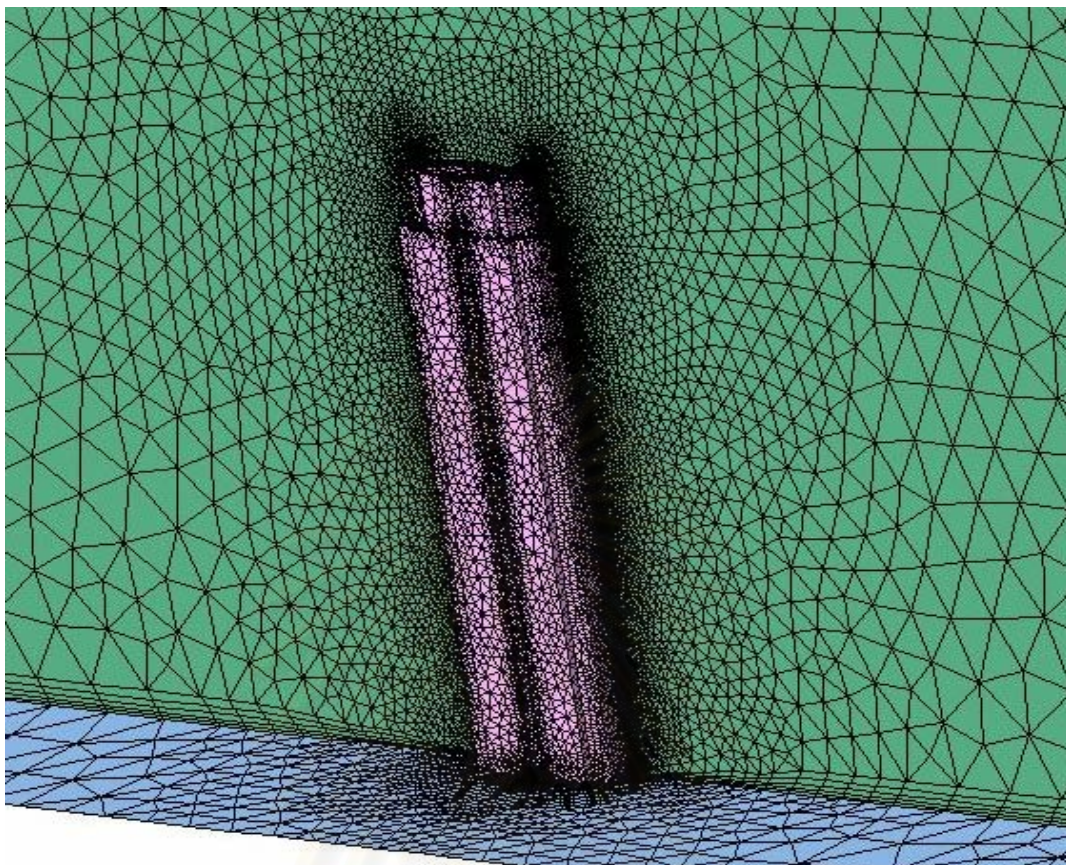
การจำลองการไหลเป็นอาคารเดี่ยวโดยมีกระแสลมจากทิศเหนือกระทบอาคาร ดังรูปที่ 6.3 โดยกำหนดให้ของไหลเป็นอากาศมีความหนาแน่น  $\rho = 1.46 \text{ kg/m}^3$  และความหนืดสัมบูรณ์  $\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$  สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ คือ การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ และทำการสร้าง Mesh ในโดเมนของการจำลองการไหล ดังรูปที่ 6.4 และ 6.5 ซึ่งในการจำลองการไหลของกรณีนี้ได้ใช้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดคือ 409,782 เอลิเมนต์ เป็นเอลิเมนต์ชนิด Tetrahedron จำนวน 356,617 เอลิเมนต์ และชนิด Prism จำนวน 53,165 เอลิเมนต์ โดยที่ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดคือ 1 m



รูปที่ 6.3 ทิศทางลมจากทิศเหนือกระทบตัวอาคาร JEWELRY TRADE CENTER



รูปที่ 6.4 การสร้าง Mesh จำลองการไหลของอากาศจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ในกรณีของอาคารเดี่ยว (Not to scale)



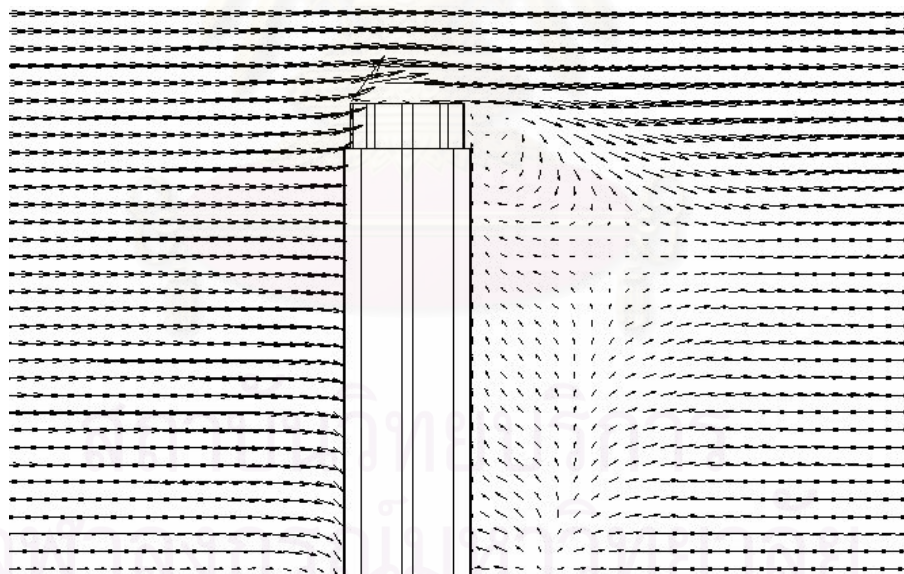
รูปที่ 6.5 รูปขยายของ Mesh ในบริเวณที่มีความละเอียด ของการจำลองการไหลผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ในกรณีของอาคารเดี่ยว (Not to scale)

### ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม

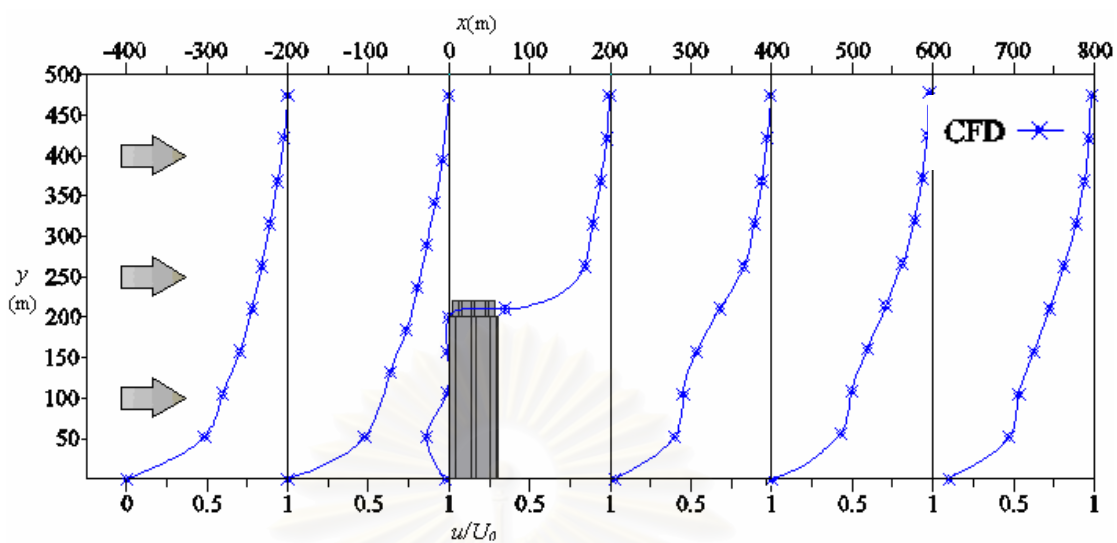
กรณีอาคารเดี่ยวไม่คิดผลของอาคารข้างเคียง กระแสลมมาจากทิศเหนือ และขนาดความกว้างของผิวด้านหน้าที่รับแรงลมปะทะน้อยกว่าความยาวของผิวด้านข้างที่ลมไหลผ่าน การกระจายความเร็วที่แสดงในลักษณะของเวกเตอร์ในรูปที่ 6.6 คือที่ด้านหน้าอาคารจะมีลักษณะของเวกเตอร์ความเร็วสามแบบคือ ที่มุมด้านล่างหรือต่ำกว่าประมาณ  $2/3$  ของความสูงอาคารจะเกิดการไหลย้อนกลับและไหลวนที่ด้านล่างสุด ลักษณะที่สองคือประมาณที่ช่วงความสูง  $2/3$  ของอาคารเวกเตอร์ความเร็วจะมีทิศทางตรงหรือความเร็วหยุดนิ่ง ลักษณะที่สาม คือที่ตำแหน่งสูงกว่า  $2/3$  ของความสูงอาคารเวกเตอร์ความเร็วจะมีทิศทางวนขึ้นด้านบน และมีขนาดของความเร็วมากขึ้นตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในบาวดรีเลเยอร์ ที่ขอบบนสุดจะเป็นลักษณะการไหลแบบแยก ส่วนบริเวณด้านบนหลังคาจะมีเวกเตอร์ความเร็วไหลย้อนกลับซึ่งทำให้ค่าความดันบริเวณนี้เป็นค่าลบ



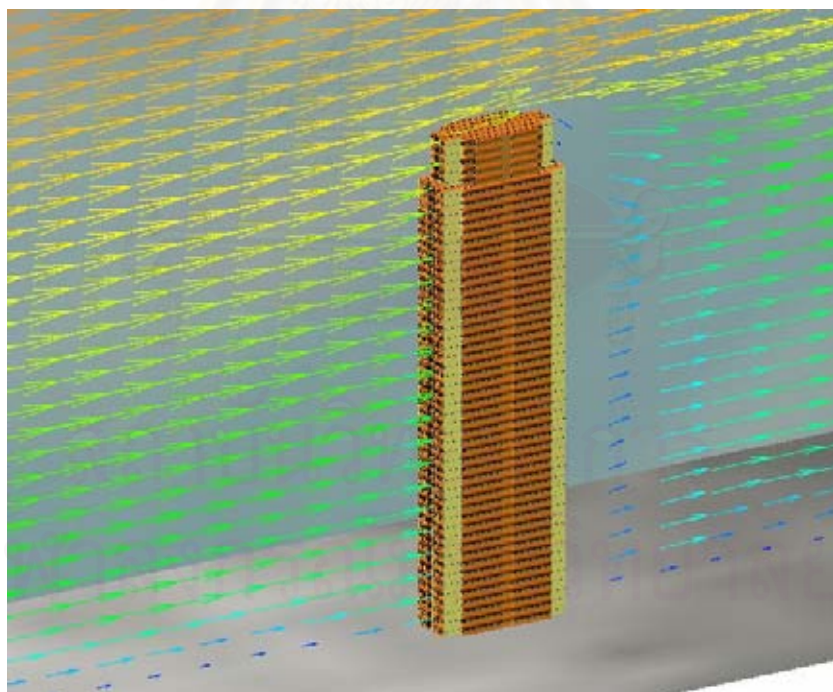
การไหลของลมที่ด้านหลังตัวอาคารเวกเตอร์ความเร็วมีรูปแบบการไหลวนและไหลแบบย้อนกลับเป็นบริเวณมาก ซึ่งค่าความดันที่บริเวณด้านหลังตัวอาคารเป็นค่าลบ รูปที่ 6.7 เป็นการพล็อตระหว่างความสูงกับสัดส่วนของความเร็วในแนวแกน  $x$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ ความยาวของการไหลวนมีค่าเท่ากับ 89 เมตร จากด้านหน้าของอาคาร รูปที่ 6.8 แสดงเวกเตอร์ความเร็วแบบสามมิติ รูปที่ 6.9 แสดงเวกเตอร์ความเร็วในระนาบที่สูงจากพื้น 100 เมตร ซึ่งบริเวณด้านหน้าของตัวอาคารจะเป็นการไหลแบบแยกกัน ทำให้มีการไหลย้อนกลับบริเวณติดกับผนังด้านข้างที่ลมไหลผ่าน ค่าความเร็วลมที่ผ่านบริเวณใกล้ผิวอาคารด้านข้างมีค่าเป็นศูนย์และเป็นลบ ทำให้ค่าความดันที่ผิวด้านข้างของอาคารเป็นค่าลบ เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณด้านหลังตัวอาคารมีการไหลแบบย้อนกลับและไหลวน ทำให้ค่าความดันบริเวณหลังตัวอาคารนี้จะมีค่าเป็นค่าลบดังรูปที่ 6.10 ซึ่งแสดงค่าความดันที่ผิวผนังตัวอาคารและที่ระนาบกลางตัวอาคาร ค่าของความดันจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคาร โดยมีค่ามากที่สุดคือ 690.92 Pa ที่ช่วงความสูง 210-220 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมสูงสุดคือ 0.6 และค่าความดันด้านดาดมีค่ามากที่สุดคือ -1314.4 Pa ค่าสัมประสิทธิ์ความดันด้านดาดสูงสุดมีค่าเท่ากับ -1.1



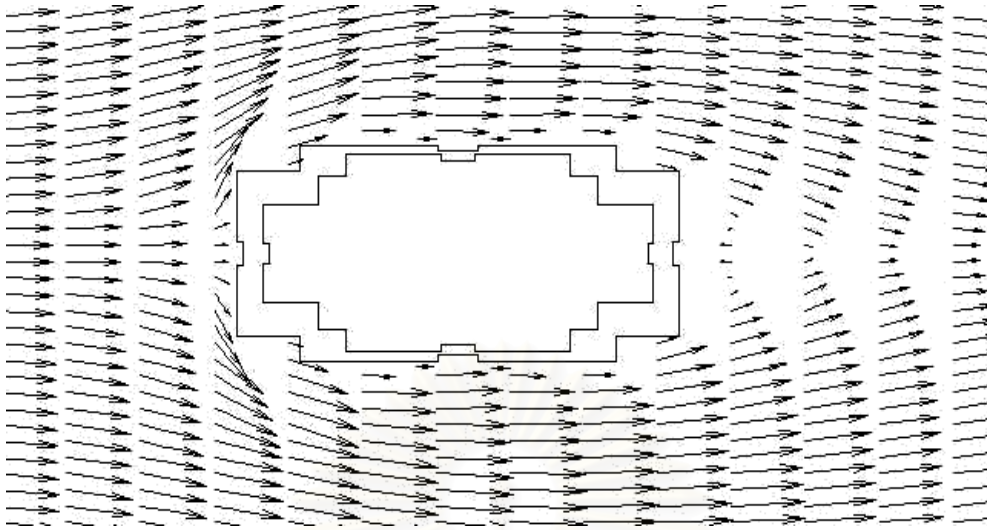
รูปที่ 6.6 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)



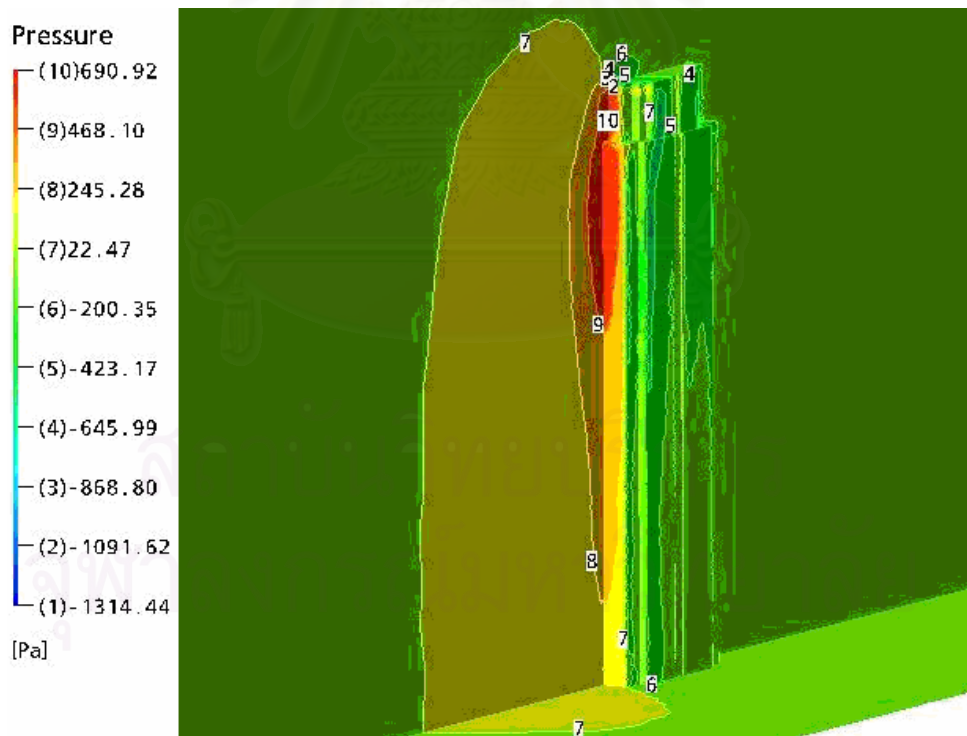
รูปที่ 6.7 สัดส่วนความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความกว้างรับแรงลมปะทะ ที่ตำแหน่งต่างๆในแนวแกน  $x$  กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)



รูปที่ 6.8 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้าง แบบ 3 มิติ กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)



รูปที่ 6.9 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระดับความสูงจากพื้นระนาบ 100 เมตร กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)

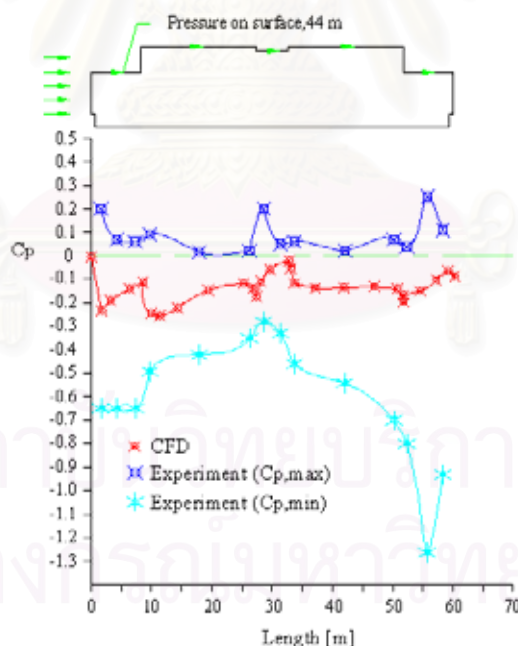


รูปที่ 6.10 Pressure contour บนผนังอาคารและระนาบกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะของการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)

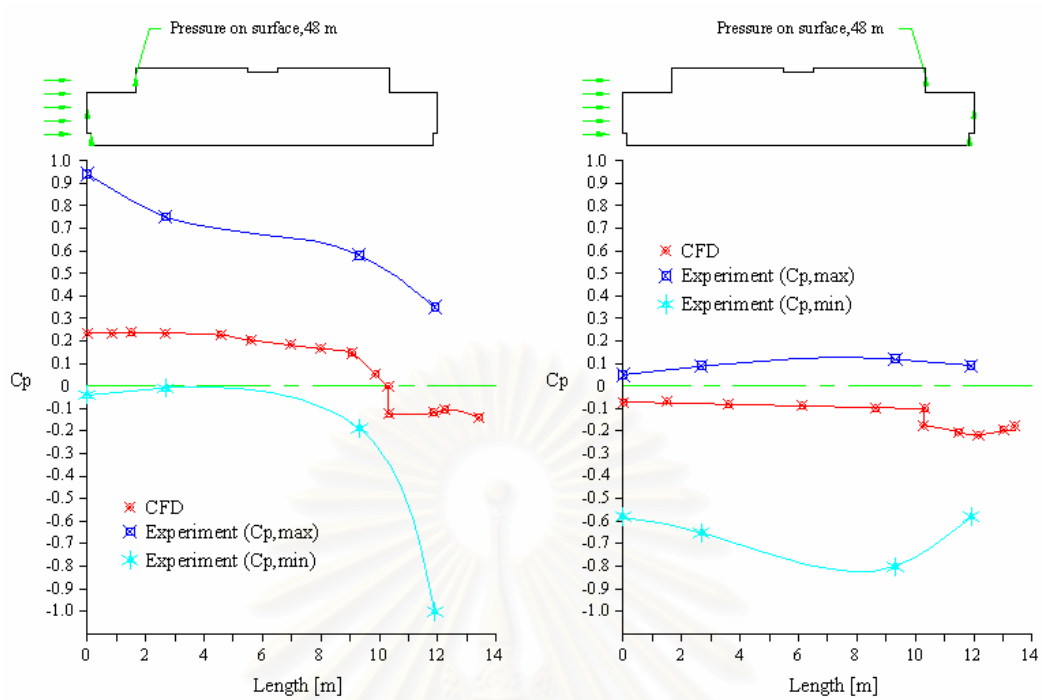


## ผลการเปรียบเทียบกับการทดลอง

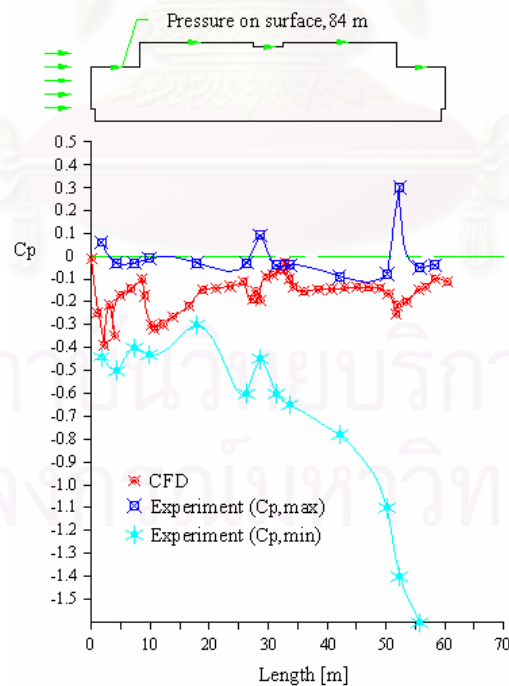
ผลจากการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบนี้ได้จากงานวิจัยของปฏิพัทธ์ แจ่มมังคั่ง (2538) โดยที่การทดลองนั้นมีอาคารข้างเคียงล้อมรอบอยู่ในรัศมี 300 เมตร และเก็บข้อมูลหลายๆครั้งในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้ทำงานวิจัยได้นำเอาเฉพาะค่ามากที่สุด และค่าต่ำสุดของค่าสัมประสิทธิ์ความดันในแต่ละตำแหน่งของผลการทดลองของลมผ่านกลุ่มอาคาร โดยทิศทางลมมาจากทิศเหนือมาเปรียบเทียบกัน ที่ค่าความสูงต่างๆดังแสดงในรูปที่ 6.11 - 6.24 ผลที่ได้คือค่าจากการใช้โปรแกรมจะอยู่ระหว่างค่ามากและน้อยสุดของผลการทดลอง โดยที่ผิวด้านหน้าและด้านหลังที่รับแรงปะทะของลมนั้น จะให้ค่าสอดคล้องกับการทดลองมาก ส่วนที่ผนังด้านข้างที่ลมพัดผ่าน ค่าที่ได้จะอยู่ระหว่างค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดของการทดลอง โดยที่ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าที่มากที่สุดของการทดลอง ซึ่งถือว่าผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ



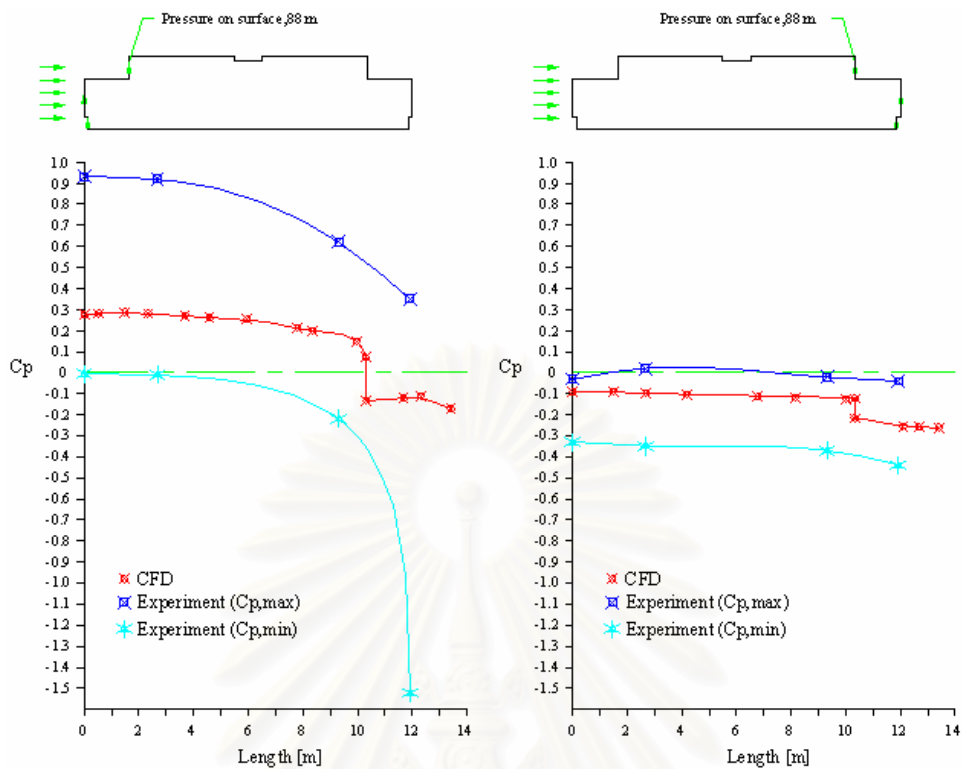
รูปที่ 6.11 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 44 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



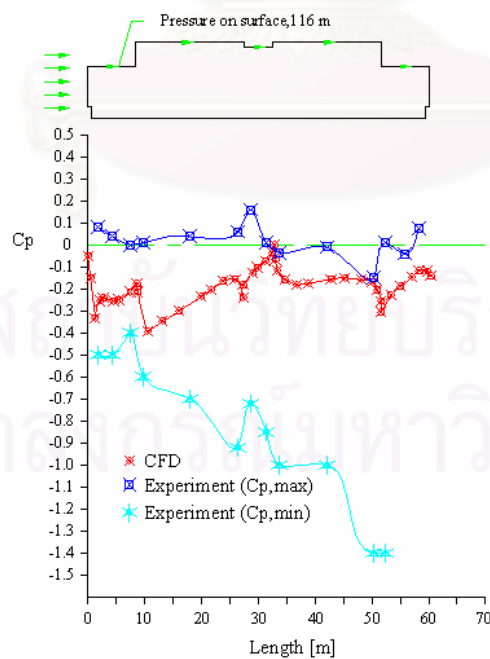
รูปที่ 6.12 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 48 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



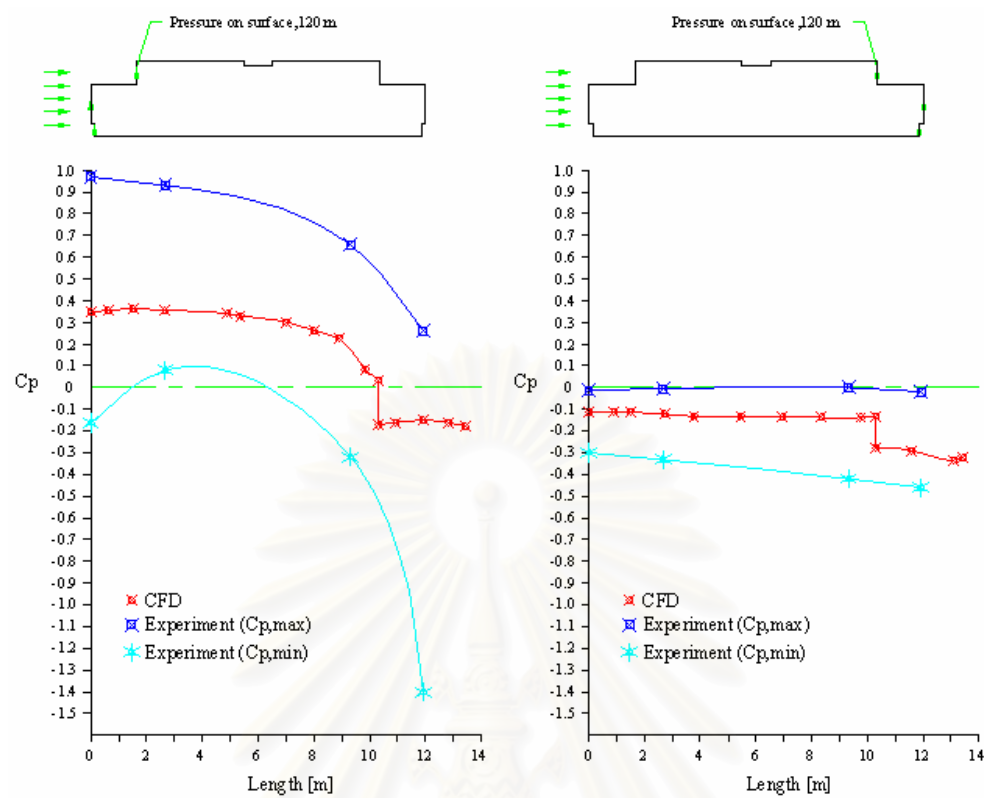
รูปที่ 6.13 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน บนผนังอาคารที่ระดับความสูง 84 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



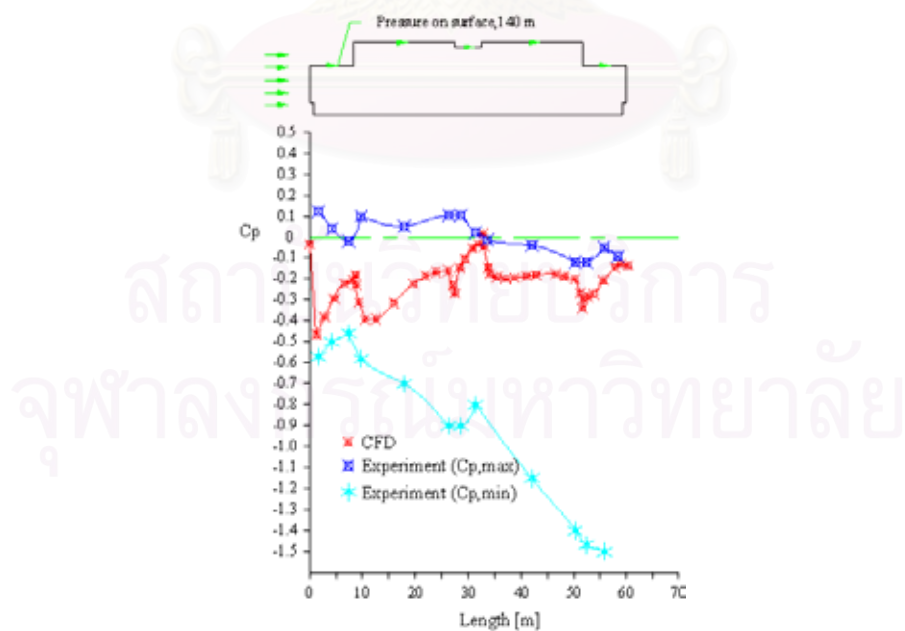
รูปที่ 6.14 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 88 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



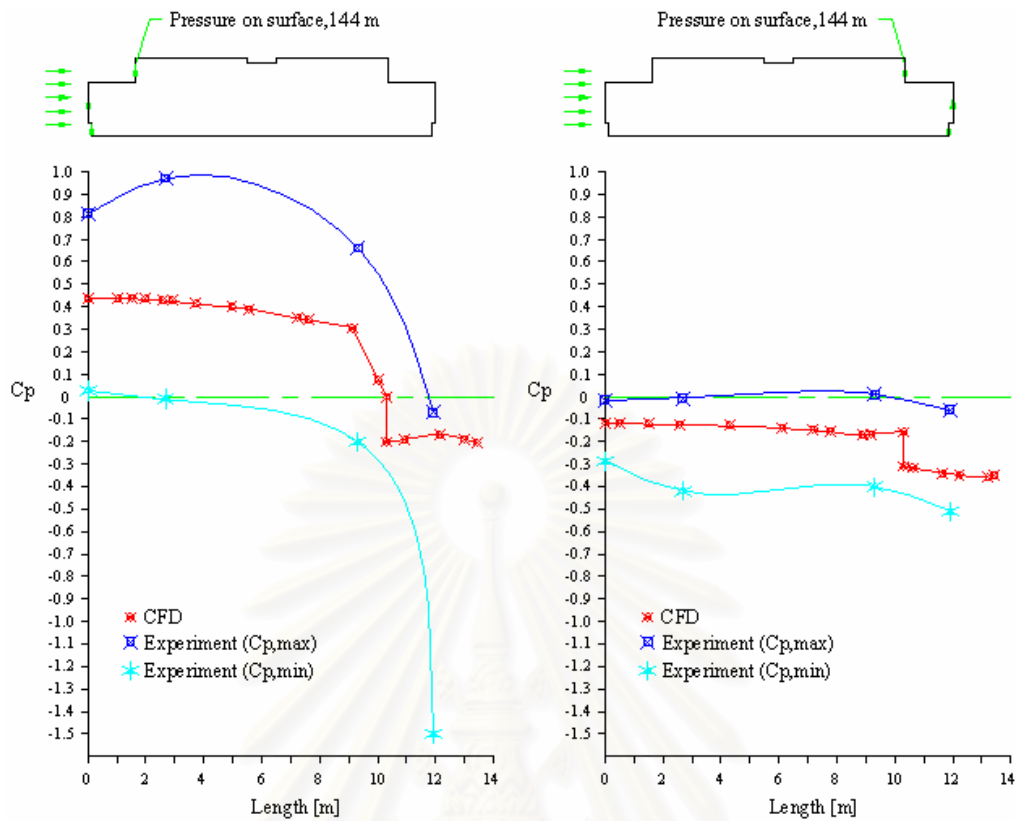
รูปที่ 6.15 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 116 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



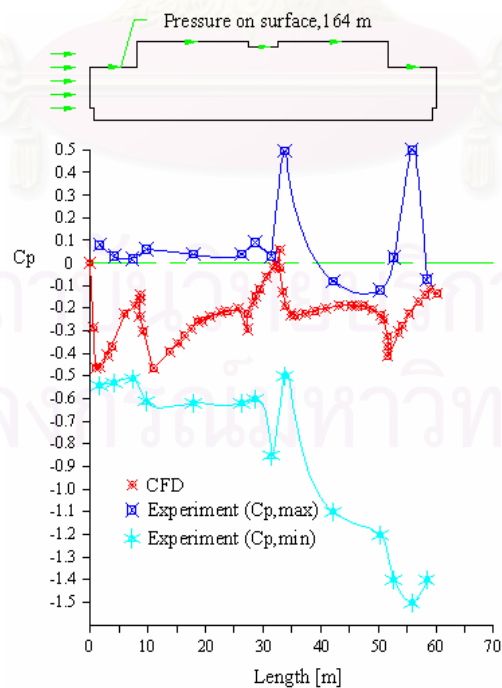
รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 120 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



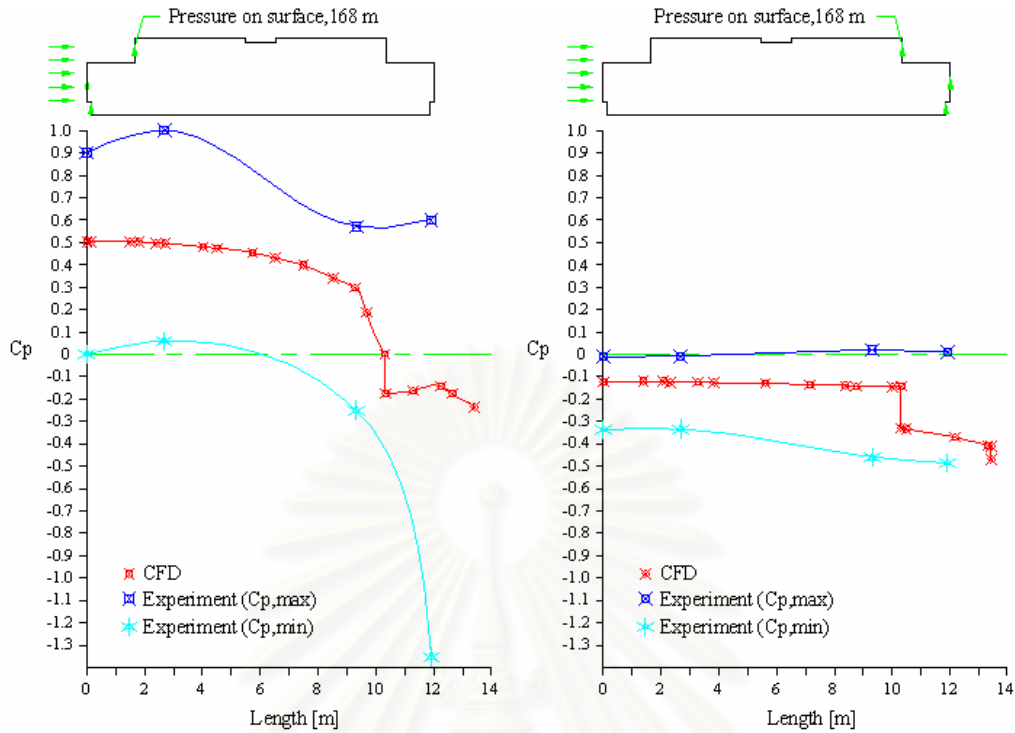
รูปที่ 6.17 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน บนผนังอาคารที่ระดับความสูง 140 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



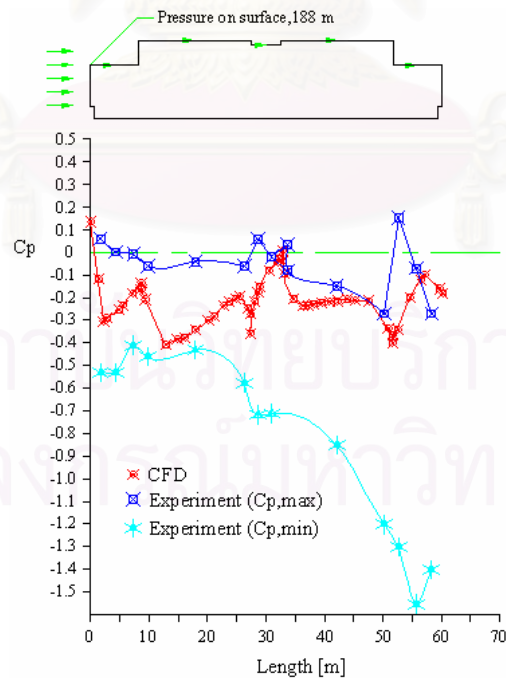
รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน บนผนังอาคารที่ระดับความสูง 144 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.19 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน บนผนังอาคารที่ระดับความสูง 164 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)

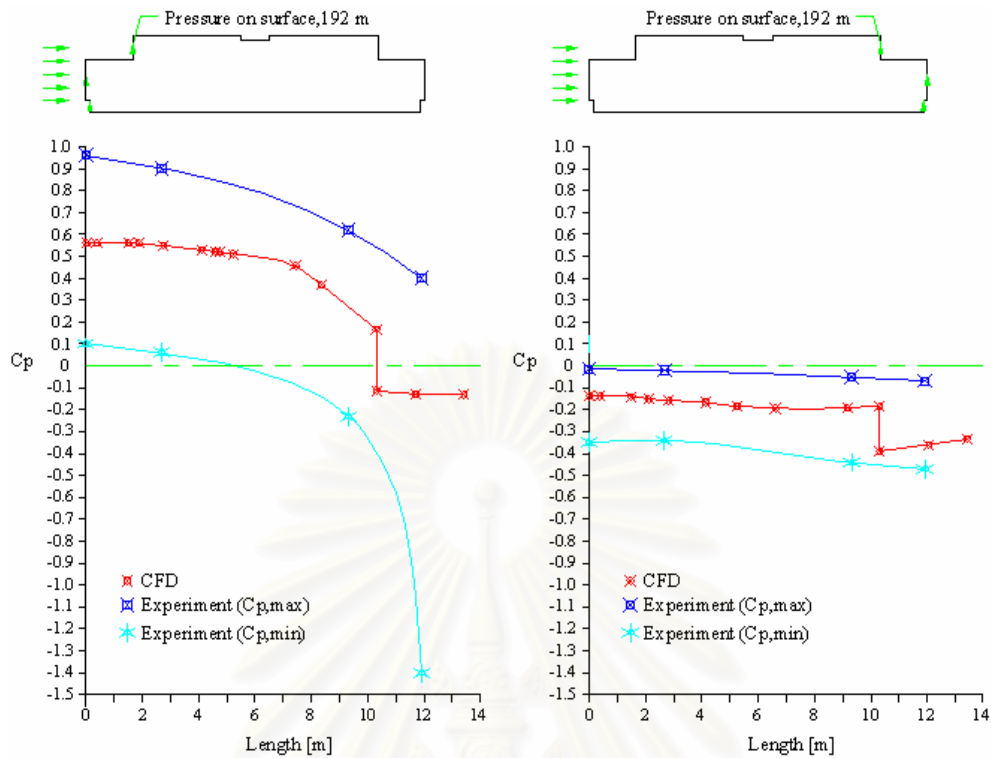


รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน บนผนังอาคารที่ระดับความสูง 168 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)

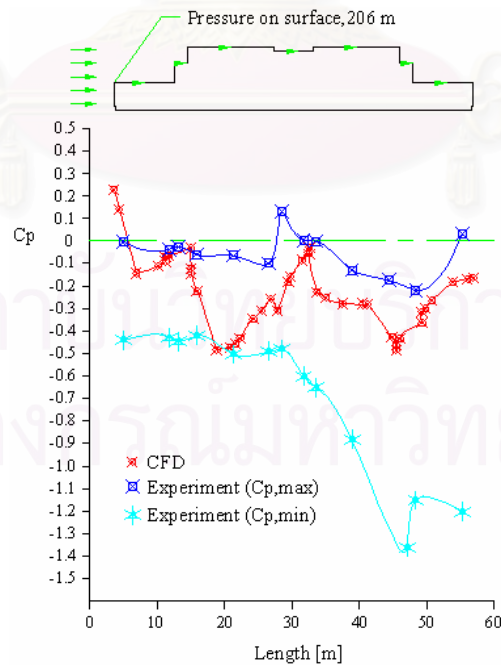


รูปที่ 6.21 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดัน บนผนังอาคารที่ระดับความสูง 188 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)

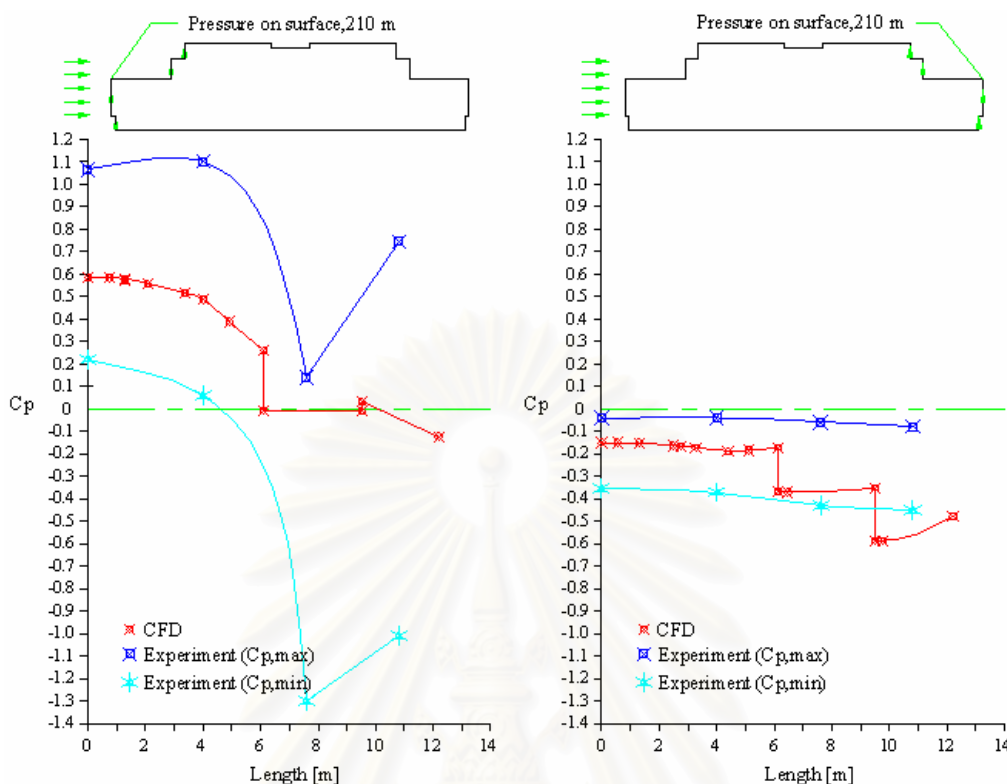




รูปที่ 6.22 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 192 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



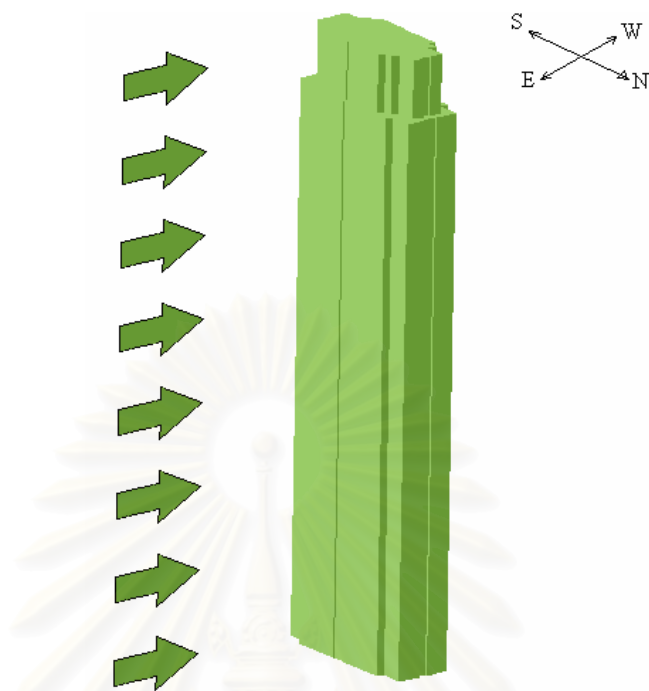
รูปที่ 6.23 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 206 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



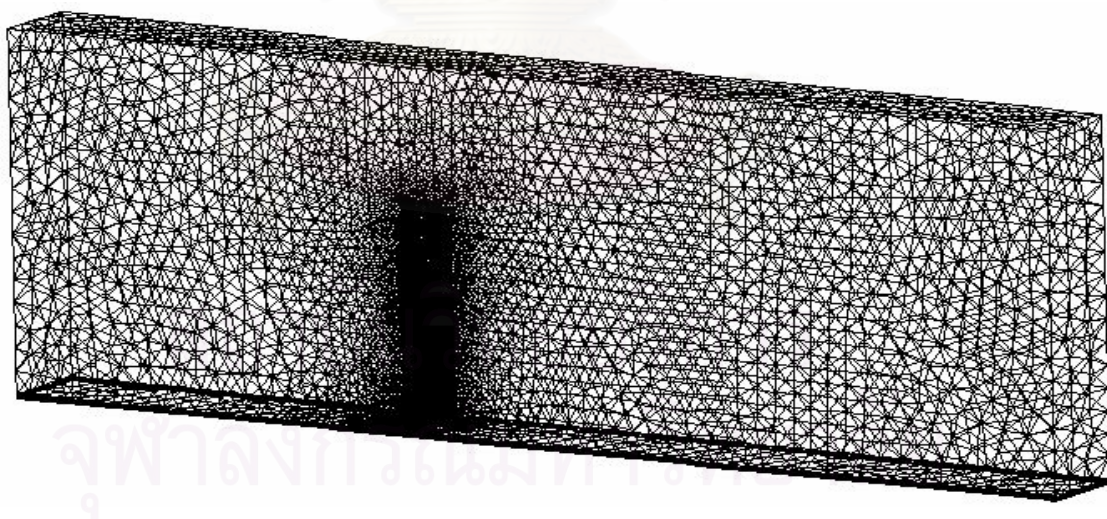
รูปที่ 6.24 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 210 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)

#### 6.4.2 กรณีการไหลของอากาศจากทิศตะวันออกผ่านอาคารเดี่ยว

โดเมนการไหลของปัญหานี้แสดงดังรูปที่ 6.25 และ Mesh ที่ใช้ในการคำนวณแสดงในรูปที่ 6.26 และ 6.27 โดยใช้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 477,495 เอลิเมนต์ เป็นเอลิเมนต์ชนิด Tetrahedron จำนวน 377,632 เอลิเมนต์ ชนิด Prism จำนวน 99,844 เอลิเมนต์ และชนิด Pyramid จำนวน 19 เอลิเมนต์ โดยความยาวเอลิเมนต์ที่เล็กสุดมีขนาดคือ 1 m และกำหนดให้ของไหลเป็นอากาศที่มีความหนาแน่น  $\rho = 1.46 \text{ kg/m}^3$  และความหนืดสัมบูรณ์  $\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$  สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ คือ การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

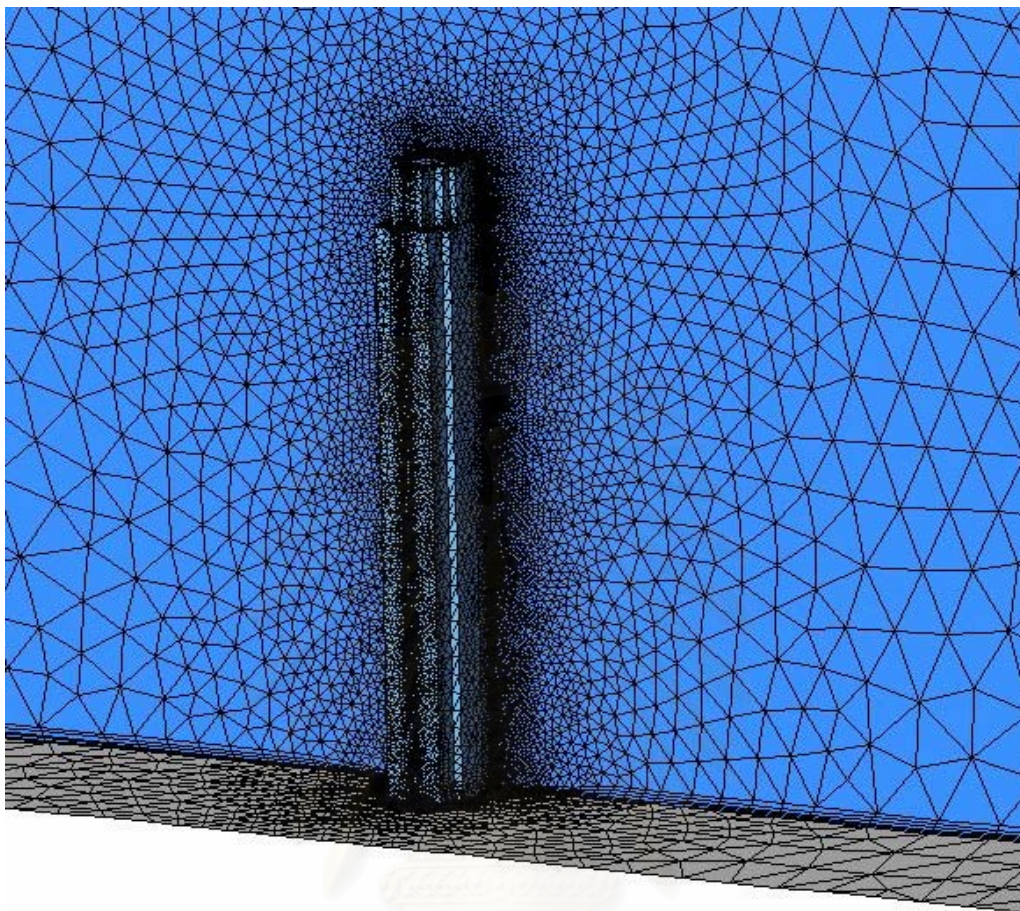


รูปที่ 6.25 ทิศทางลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือกระทบตัวอาคาร JEWELRY TRADE CENTER



รูปที่ 6.26 การสร้าง Mesh จำลองปัญหาการไหลของลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)



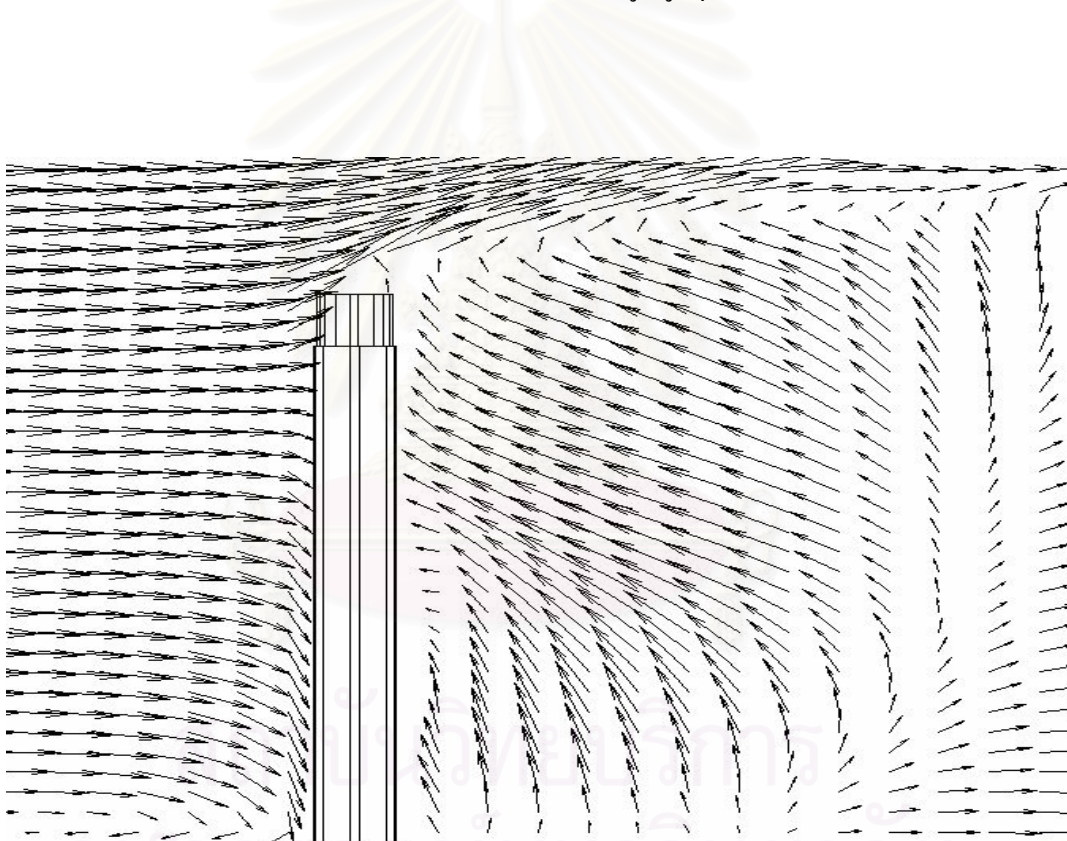


รูปที่ 6.27 รูปขยาย Mesh ที่มีความละเอียด การจำลองปัญหาการไหลของลมจากทิศตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)

#### ผลจากการใช้โปรแกรม กรณีของการไหลของอากาศมาจากทิศตะวันออกผ่านอาคารเดี่ยว

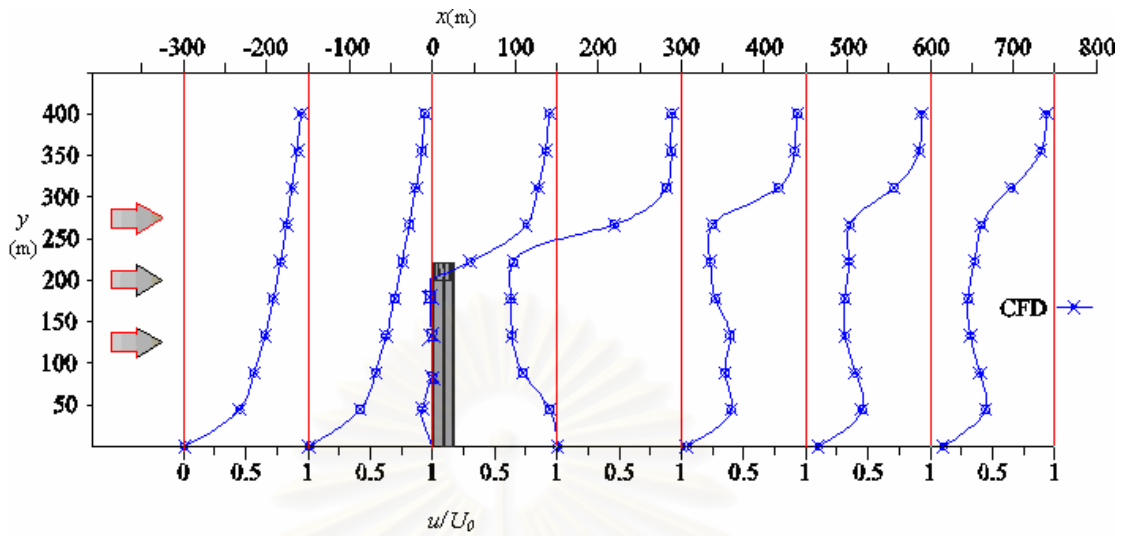
กรณีนี้กระแสลมมาจากทิศตะวันออก ทำให้ขนาดความกว้างของผิวด้านหน้าที่รับแรงลมปะทะมีค่ามากกว่าความยาวของผิวด้านข้างที่ลมไหลผ่าน ในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจากอาคารข้างเคียง การกระจายความเร็วที่แสดงในลักษณะของเวกเตอร์ในรูปที่ 6.28 นั้นเมื่อพิจารณาแล้วจะมีลักษณะเหมือนกรณีที่กระแสลมมาจากทิศเหนือไหลผ่านอาคารเดี่ยวในหัวข้อ 6.4.1 แต่จะเป็นลักษณะของการไหลที่มีความปั่นป่วนมากกว่า โดยที่ขอบบนสุดด้านหน้าจะมีลักษณะการไหลแบบแยกที่มากขึ้น ส่วนบริเวณด้านหลังคางจะมีเวกเตอร์ความเร็วไหลย้อนกลับเป็นบริเวณมากกว่าในกรณีหัวข้อ 6.4.1 การไหลวนและไหลแบบย้อนกลับจะเกิดมากที่บริเวณด้านหลังตัวอาคาร ทำให้ค่าความดันที่ผิวด้านหลังอาคารเป็นค่าลบที่มีช่วงยาวกว่ากรณีแรก ซึ่งสอดคล้องกับ

รูปที่ 6.29 ที่พล็อตระหว่างความสูงกับสัดส่วนของความเร็วในแนวแกน  $x$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ โดยมีความยาวของการไหลวนเท่ากับ 289 เมตร จากด้านหลังของอาคาร ส่วนรูปที่ 6.30 แสดงเวกเตอร์ความเร็วในระนาบที่สูงจากพื้น 100 เมตร เวกเตอร์ความเร็วที่ด้านหน้าอาคารจะไหลแยกออกทิศทางด้านข้างทั้งสองทิศทาง ทำให้ค่าความเร็วมุมที่บริเวณใกล้ผิวผนังอาคารด้านข้างมีค่าเป็นศูนย์และค่าเป็นลบเป็นบริเวณที่กว้างกว่ากรณีแรก การไหลย้อนกลับและการไหลวนของเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณด้านหลังตัวอาคารมีมากกว่าในกรณีหัวข้อ 6.4.1 ซึ่งทำให้ค่าความดันผิวผนังด้านข้างของอาคารเป็นค่าลบดังรูปที่ 6.31 ซึ่งแสดงค่าความดันที่บริเวณผิวอาคารและที่บริเวณข้างเคียงตัวอาคาร ค่าความดันจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคาร มีค่ามากที่สุดคือ 626.68 Pa ที่ช่วงความสูง 170-220 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมสูงสุดคือ 0.54 และค่าความดันด้านคูมามีค่ามากที่สุดคือ -832.31 Pa ค่าสัมประสิทธิ์ความดันด้านคูมสูงสุดมีค่าเท่ากับ -0.72

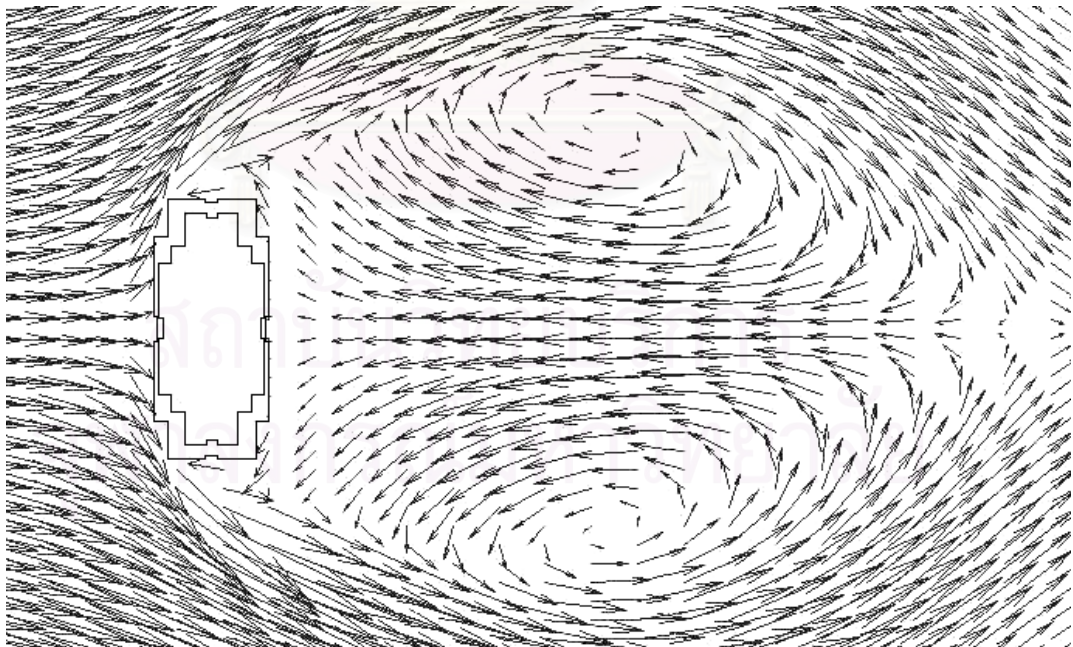


รูปที่ 6.28 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)



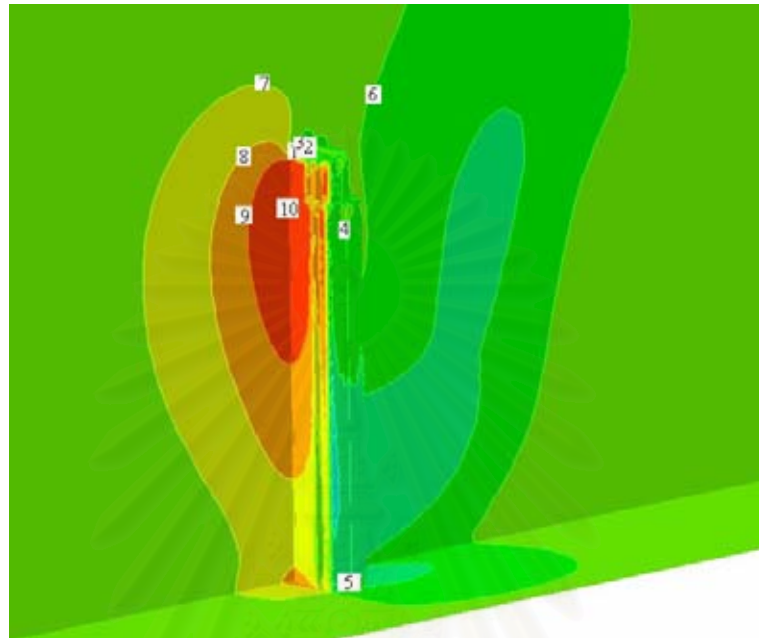
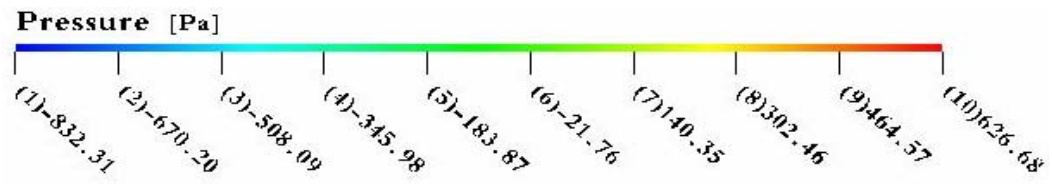


รูปที่ 6.29 สัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆในแนวแกน  $x$  ของระนาบกึ่งกลางความกว้างรับแรงลมปะทะ ของการไหลของลมจากทางทิศตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีอาคารเดี่ยว (Not to scale)

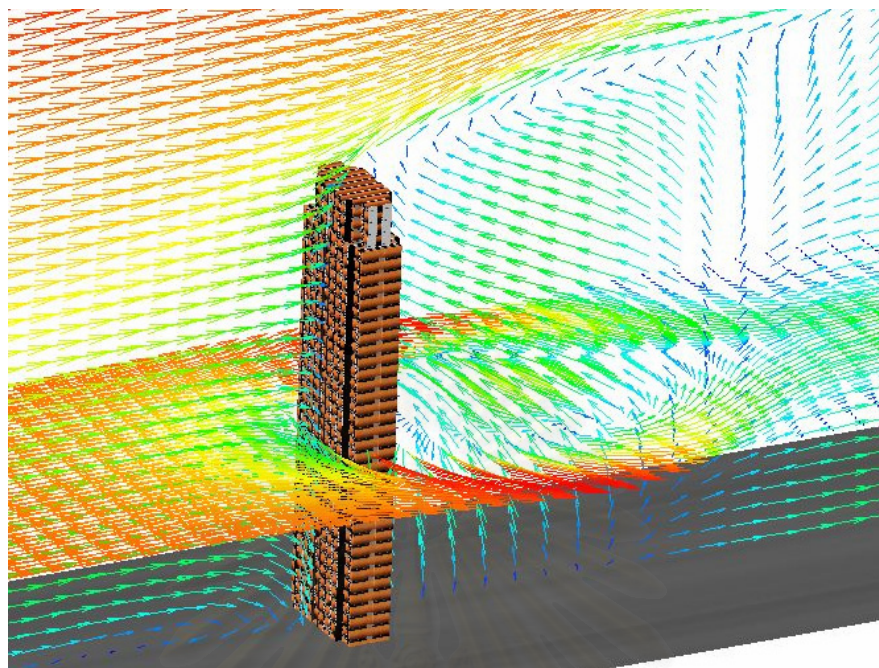


รูปที่ 6.30 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออก ผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระดับความสูงจากพื้นระนาบ 100 เมตร (Not to scale)





รูปที่ 6.31 Pressure contour บนผนังอาคารและที่ระนาบกึ่งกลาง ของการไหลของลมจากทางทิศ ตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER มุมมองด้านหน้าและด้านหลัง กรณี อาคารเดี่ยว (Not to scale)



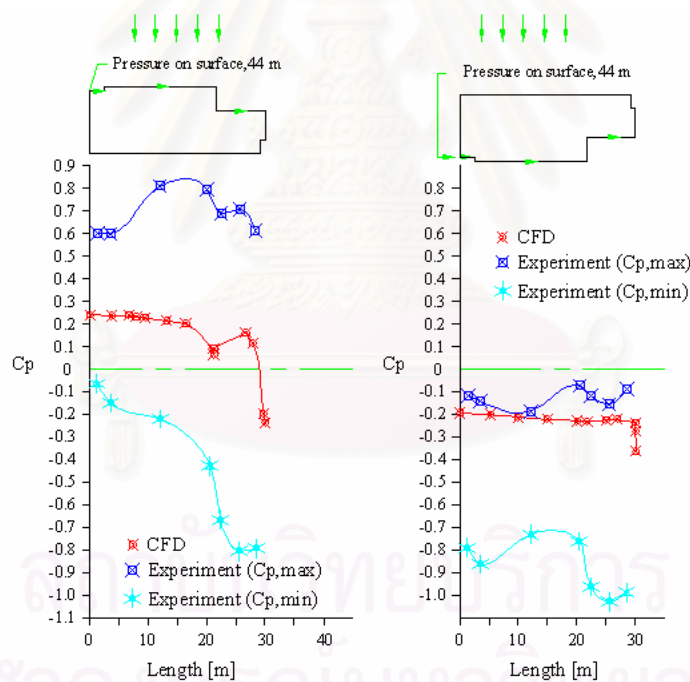
รูปที่ 6.32 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระนาบสูง 100 เมตร จากพื้นดินและระนาบกึ่งกลางโดเมนการไหล กรณีอาคารเดี่ยว แบบ 3 มิติ (Not to scale)

#### ผลการเปรียบเทียบกับการทดลอง

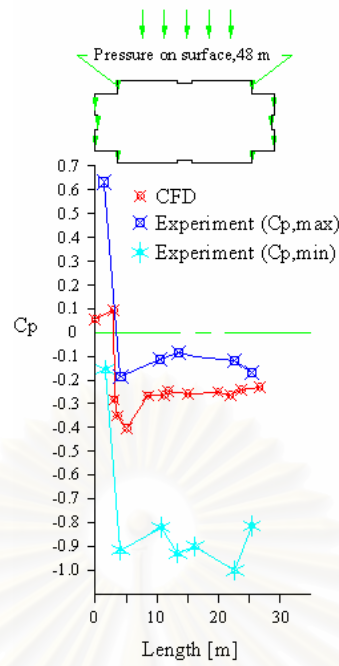
จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่ได้จากการใช้โปรแกรม กับค่าการทดลองในอุโมงค์ลมของ ปฏิพัทธ์ แจ่มมั่งคั่ง (2538) โดยที่การทดลองนั้นมีอาคารข้างเคียงล้อมรอบอยู่ในรัศมี 300 เมตร และเก็บข้อมูลหลายๆครั้งในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งค่าที่เปรียบเทียบกันที่ระดับความสูงต่างๆได้แสดงในรูปที่ 6.33 - 6.46 ผลที่ได้คือ ค่าจากการใช้โปรแกรมจะอยู่ระหว่างค่ามากและน้อยสุดของผลการทดลองในช่วงความสูง 120 เมตรลงมา โดยที่ผิวด้านหน้าที่รับแรงปะทะของลมนั้นจะให้ค่าสอดคล้องกับการทดลองมาก ส่วนด้านหลังที่รับแรงปะทะของลมและที่ผนังด้านข้างที่ลมพัดผ่าน จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่มากที่สุดของการทดลองมาก

ส่วนช่วงความสูงที่มากกว่า 120 เมตรขึ้นไป ค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่ผิวด้านหน้าที่รับแรงปะทะของลมยังอยู่ระหว่างค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดของการทดลอง แต่สำหรับด้านหลังที่รับแรงปะทะของลมและที่ผนังด้านข้างที่ลมพัดผ่าน ค่าสัมประสิทธิ์ความดันมีค่ามากกว่าค่าที่มากที่สุดของการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรม จะอยู่ข้างนอกของช่วงค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดที่

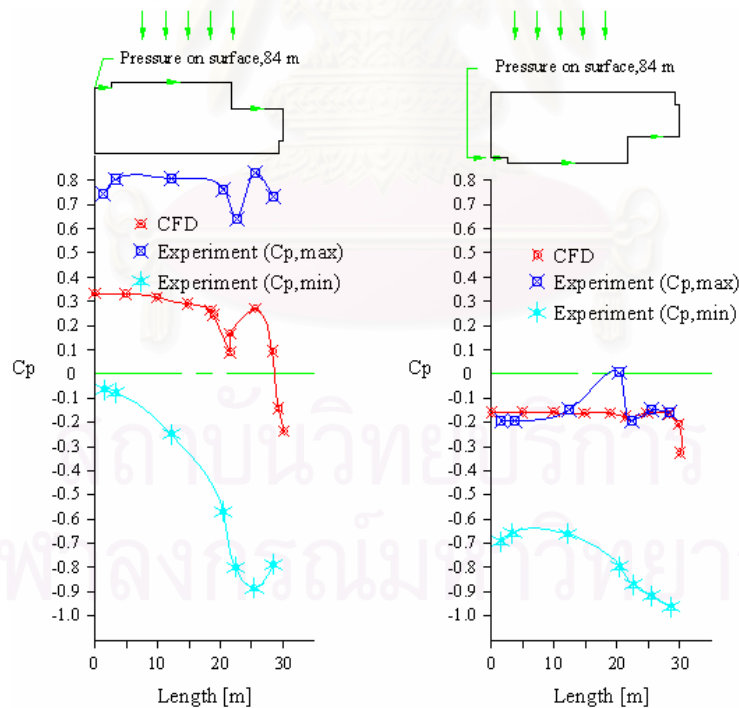
ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 6.39 - 6.46 เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการสร้างโมเดลของปัญหาแตกต่างจากการทดลอง โดยผลที่นำมาเปรียบเทียบเป็นผลของลมผ่านกลุ่มอาคาร ซึ่งทำให้รูปร่างของความเร็วด้านหน้าตัวอาคารหลักที่พิจารณาแตกต่างกันคือ กรณีของอาคารเดี่ยวรูปร่างความเร็วเป็นแบบ สมการยกกำลัง ส่วนกรณีกลุ่มอาคารมีรูปร่างความเร็วเป็นแบบการไหลหมุนวนซับซ้อน เนื่องจากมีอาคารไปวางขวางการไหลของลม และในกรณีนี้เป็นการไหลแบบแยกออกที่มีความแรงของการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลทันทีทันใดเนื่องจากความยาวที่ลมผ่านหลังคาและผนังอาคารขนาดสั้น ทำให้ไม่สามารถถ่ายเทโมเมนตัมในแนวทางการไหลของลมเพียงพอที่จะเอาชนะความดันที่สูงขึ้นเนื่องจากมีความแรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการไหลหมุนวนที่ด้านหลังและด้านข้างของอาคารมาก ซึ่งจากรูปที่ 6.28 เวกเตอร์การไหลวนของลมเป็นบริเวณมากและเกิดการไหลวนเพิ่มมากขึ้นและมีทิศทางเวกเตอร์ชี้ขึ้นที่ระดับความสูงตั้งแต่ 120 เมตรขึ้นไป ทำให้บริเวณช่วงนี้ปะทะลมน้อยเป็นผลให้ความดันที่ทำกับผนังอาคารด้านหลังและด้านข้างที่ระดับความสูงนี้ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่ได้เข้าใกล้ศูนย์ด้วย จึงทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีค่ามากกว่าผลจากการทดลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความดันเป็นค่าลบ



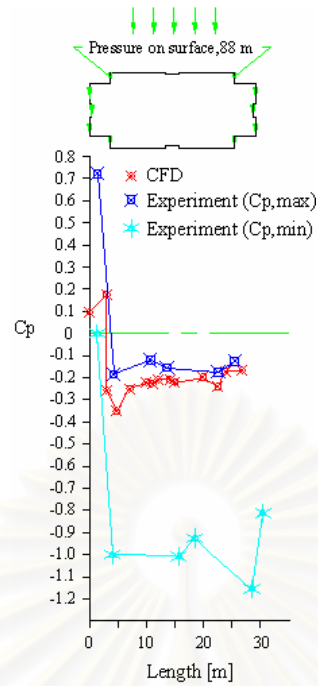
รูปที่ 6.33 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 44 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



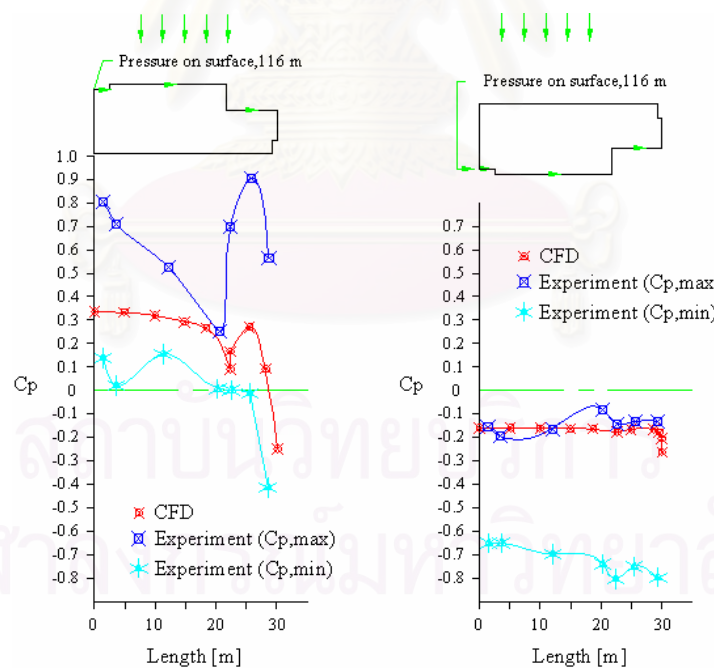
รูปที่ 6.34 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 48 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.35 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 84 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

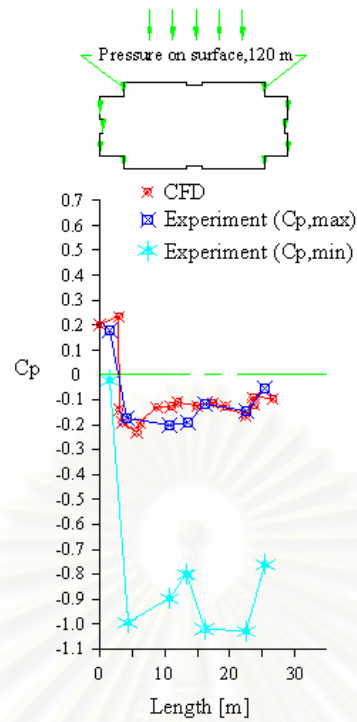


รูปที่ 6.36 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 88 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

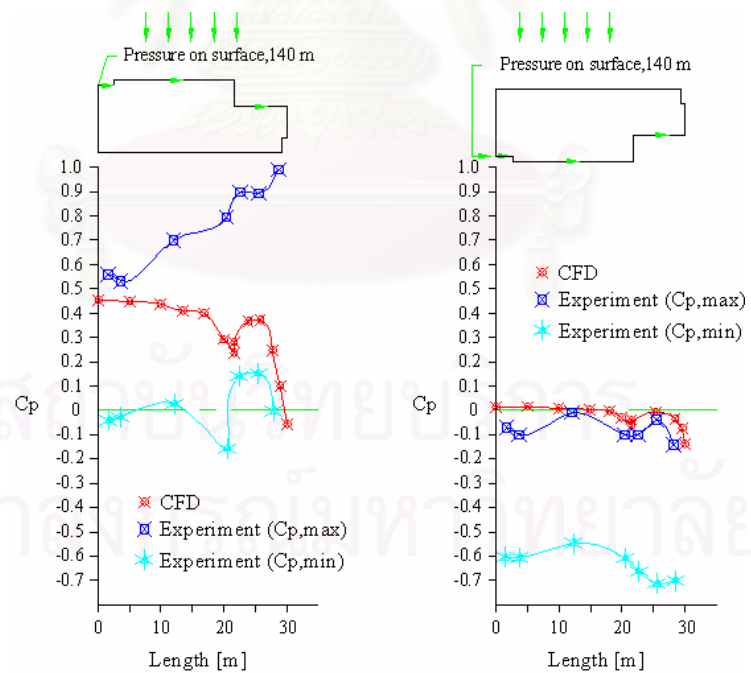


รูปที่ 6.37 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 116 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

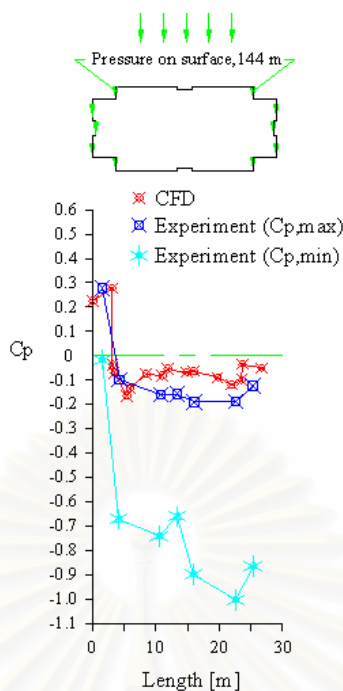




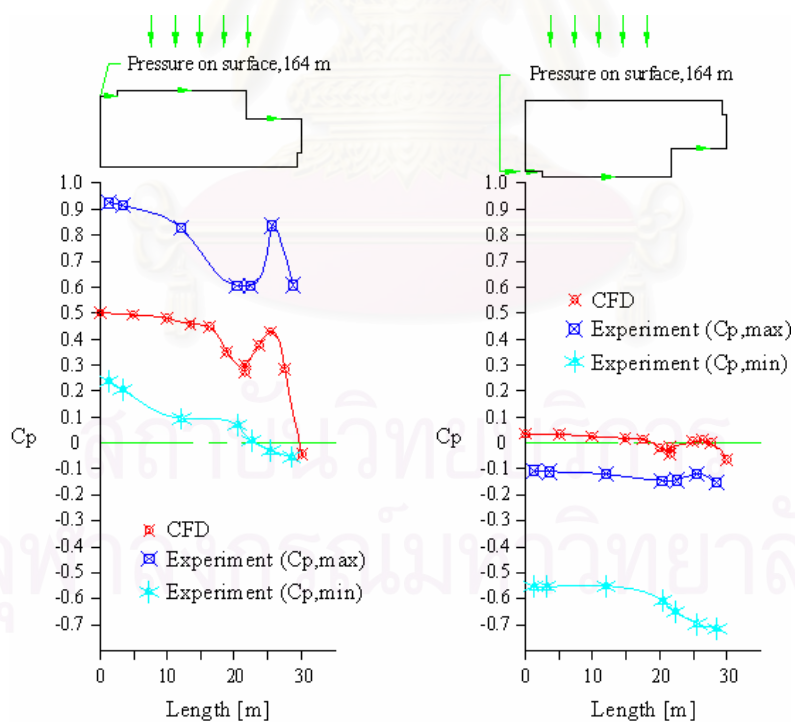
รูปที่ 6.38 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 120 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออกเฉียงตามแนวลูกศร (Not to scale)



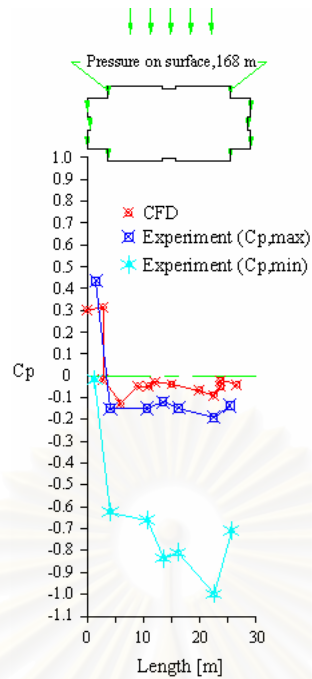
รูปที่ 6.39 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 140 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออกเฉียงตามแนวลูกศร (Not to scale)



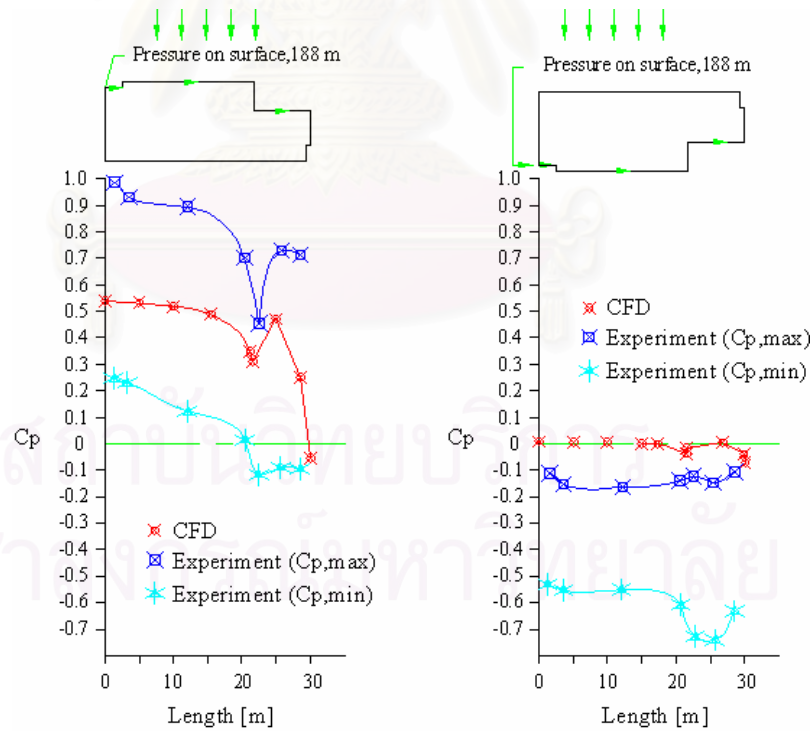
รูปที่ 6.40 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 144 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



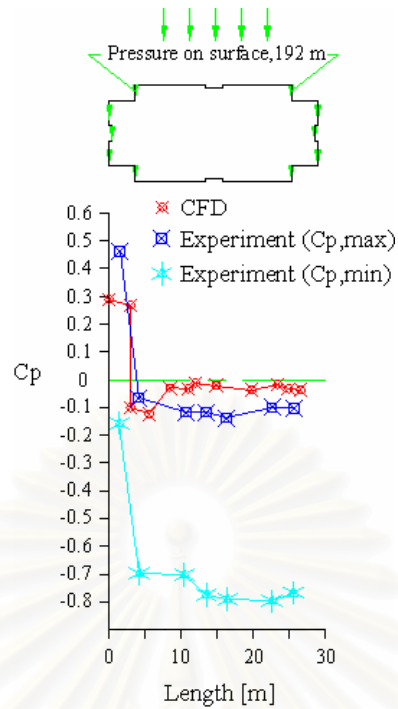
รูปที่ 6.41 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 164 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



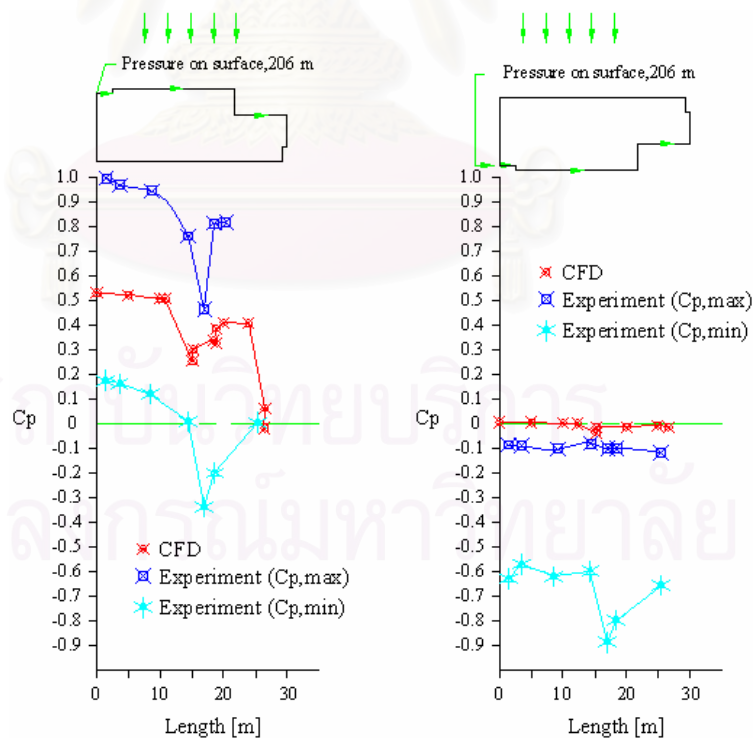
รูปที่ 6.42 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 168 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



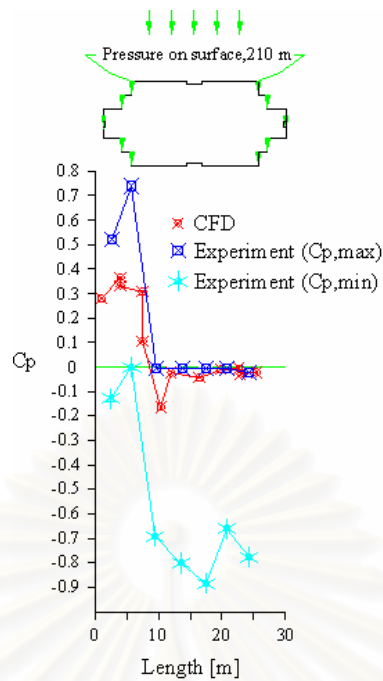
รูปที่ 6.43 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 188 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.44 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 192 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.45 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 206 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยว ทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

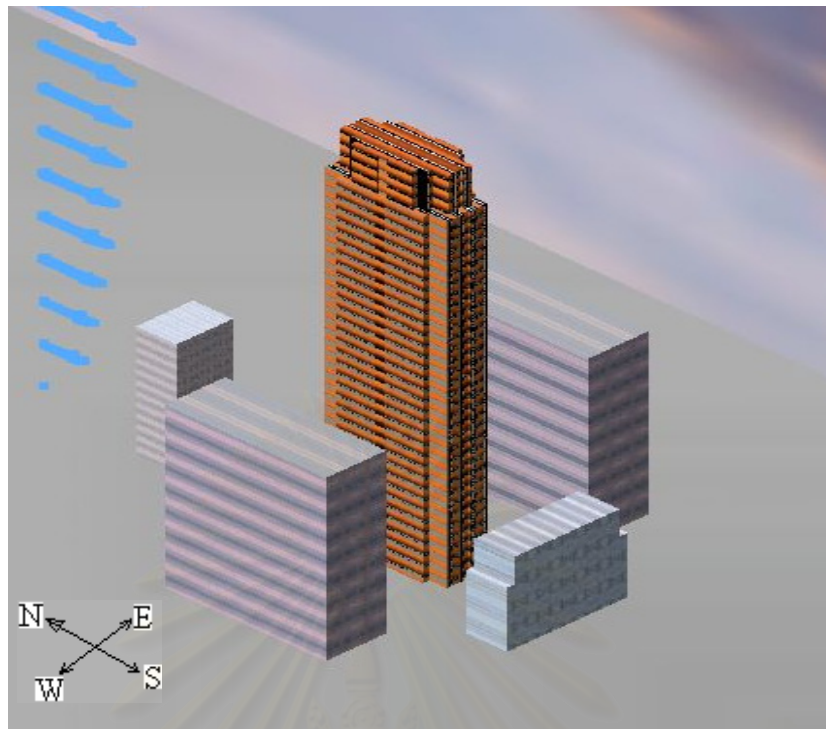


รูปที่ 6.46 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูง 210 เมตร กรณีแบบจำลองอาคารเดี่ยวทิศทางลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

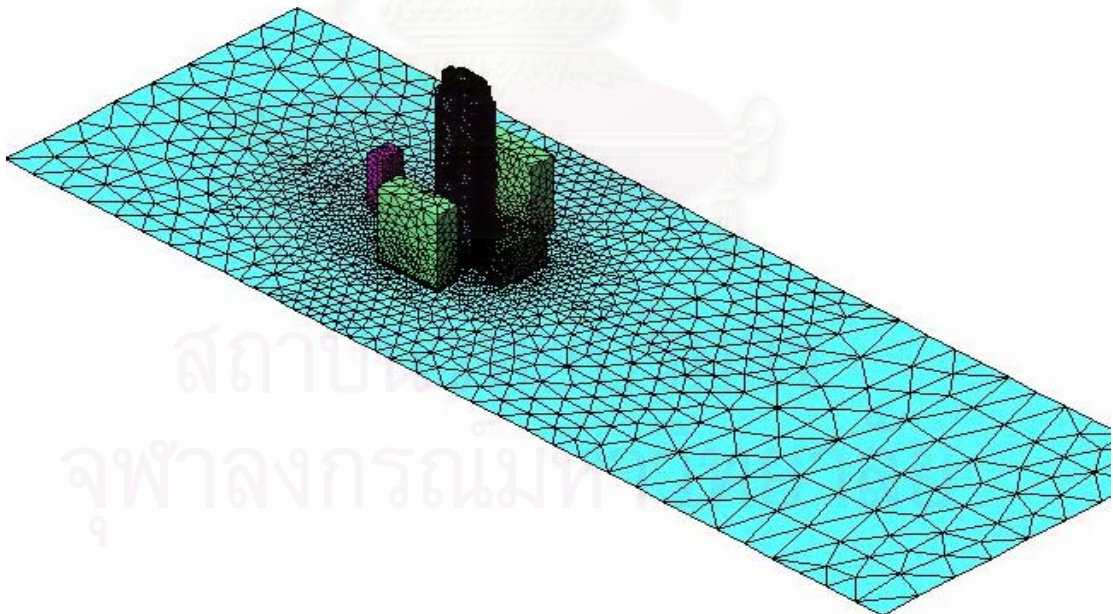
#### 6.4.3 กรณีการไหลของอากาศจากทิศเหนือผ่านกลุ่มอาคาร

รูปที่ 6.47 แสดงโดเมนปัญหาแบบกลุ่มอาคาร ซึ่งในการจำลองการไหลนี้มีการวางตำแหน่งอาคารขนาดต่างๆล้อมรอบอยู่ 4 อาคาร ทั้งสี่ทิศ โดยพยายามจำลองแบบให้มีความใกล้เคียงกับสถานที่จริง ในทิศเหนือเป็นอาคารสูง 70 เมตร มีระยะห่าง 70 เมตรจากอาคารหลักที่พิจารณา ทิศใต้เป็นอาคารสูง 55 เมตร มีระยะห่าง 30 เมตร ทิศตะวันออกและทิศตะวันตกเป็นอาคารสูง 100 เมตร มีระยะห่าง 90 เมตร ทำการสร้าง Mesh ในโดเมนของการไหลของอากาศผ่านกลุ่มอาคารดังรูปที่ 6.48 โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดคือ 687,409 เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ชนิด Tetrahedron จำนวน 567,024 เอลิเมนต์ และชนิด Prism จำนวน 120,385 เอลิเมนต์ โดยที่ขนาดความยาวเอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดคือ 1 m โดยกำหนดคุณสมบัติของของไหลเป็นอากาศที่มีความหนาแน่น  $\rho = 1.46 \text{ kg/m}^3$  และความหนืดสัมบูรณ์  $\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$

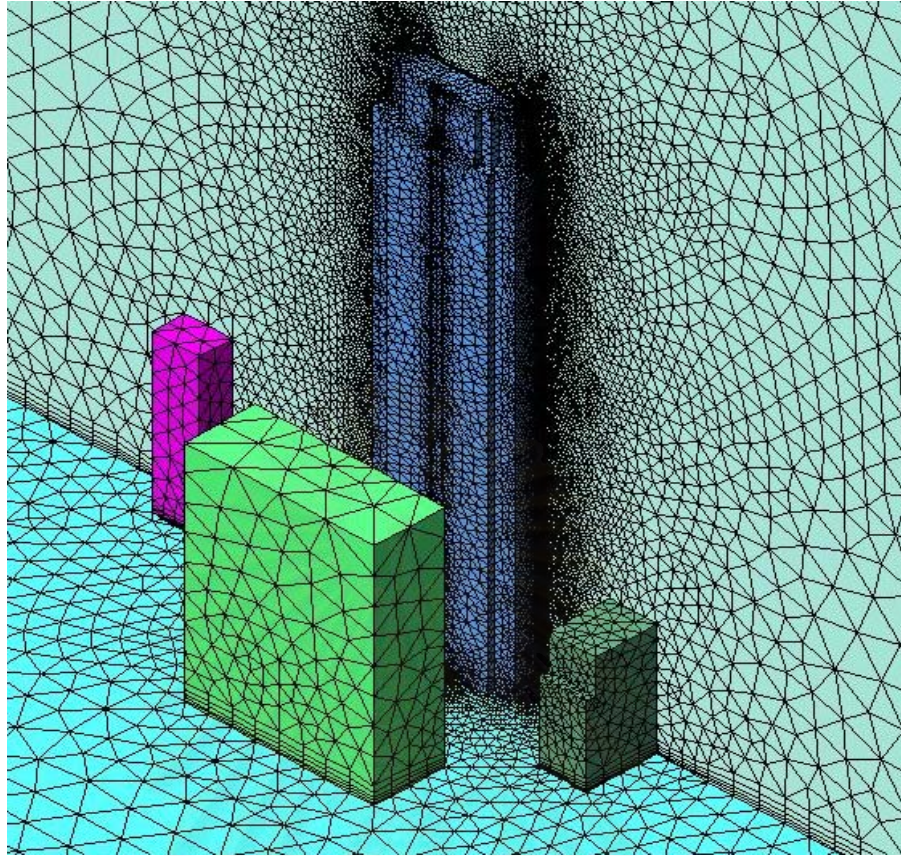




รูปที่ 6.47 ทิศทางลมจากทิศเหนือกระทบกลุ่มอาคาร JEWELRY TRADE CENTER



รูปที่ 6.48 Mesh ที่ผิวภายนอกอาคารของการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale)



รูปที่ 6.49 รูปขยาย Mesh ที่ผิวภายนอกอาคารของการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale)

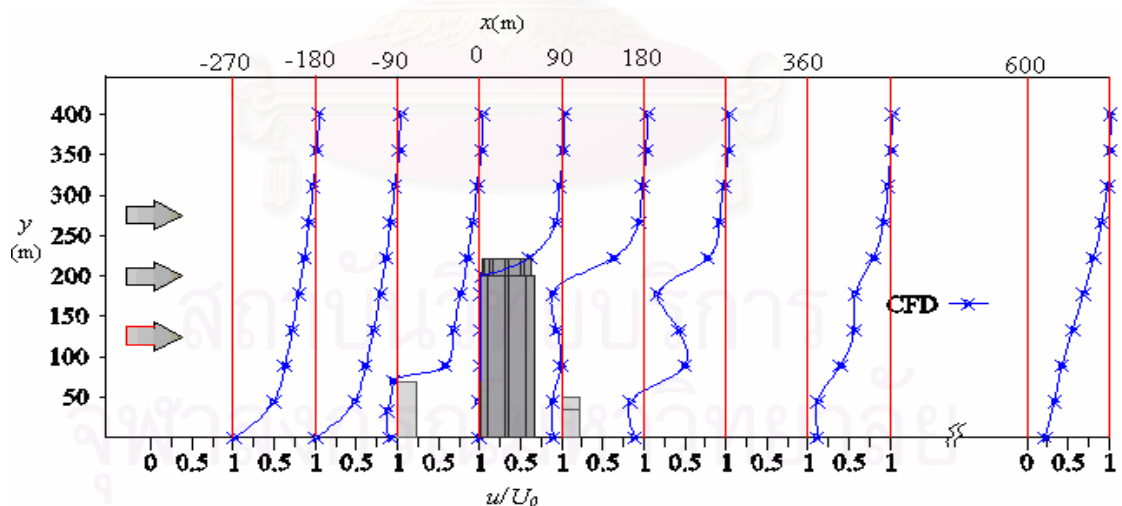
#### ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม กรณีการไหลของอากาศจากทางทิศเหนือผ่านกลุ่มอาคาร

กรณีนี้กระแสนลมมาจากทิศเหนือ และมีอาคารขนาดต่างๆล้อมรอบอยู่ 4 อาคาร วางตำแหน่งไว้ทั้งสี่ทิศ โดยให้มีความคล้ายกับสถานที่จริง ดังนั้นจึงทำให้มีผลกระทบจากอาคารข้างเคียงด้วย

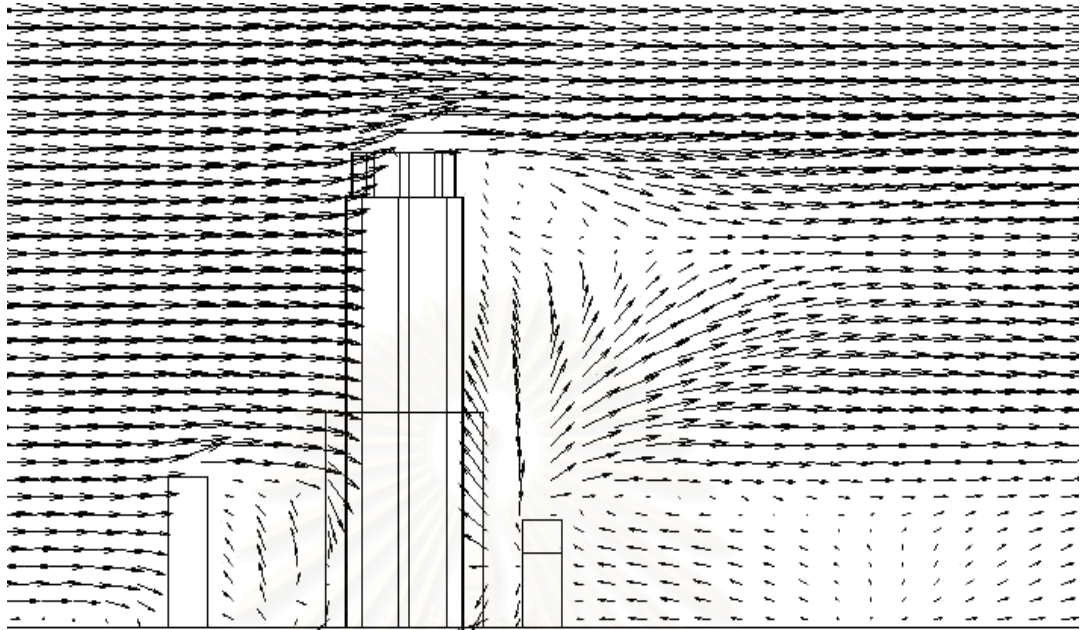
การกระจายความเร็วที่แสดงในลักษณะของเวกเตอร์ในรูปที่ 6.51 ซึ่งพิจารณาได้เป็นดังนี้คือ ที่ด้านหน้าอาคารจะมีลักษณะของเวกเตอร์ความเร็ว สามแบบคือ ที่มุมด้านล่างหรือต่ำกว่าประมาณ  $2/3$  ของความสูงอาคาร จะเกิดการไหลย้อนกลับและไหลวนเป็นบริเวณมากกว่าในกรณีที่ไม่ม้อาคารข้างเคียงล้อมรอบอยู่ก่อนหน้านี้ ลักษณะที่สองคือประมาณที่ช่วงความสูง  $2/3$  ของอาคาร เวกเตอร์ความเร็วจะมีทิศทางตรงหรือความเร็วหยุดนิ่ง ลักษณะที่สาม คือที่ตำแหน่งสูงกว่า  $2/3$  ของความสูงอาคารเวกเตอร์ความเร็วจะมีทิศทางวนขึ้นด้านบน และมีขนาดของความเร็วมาก



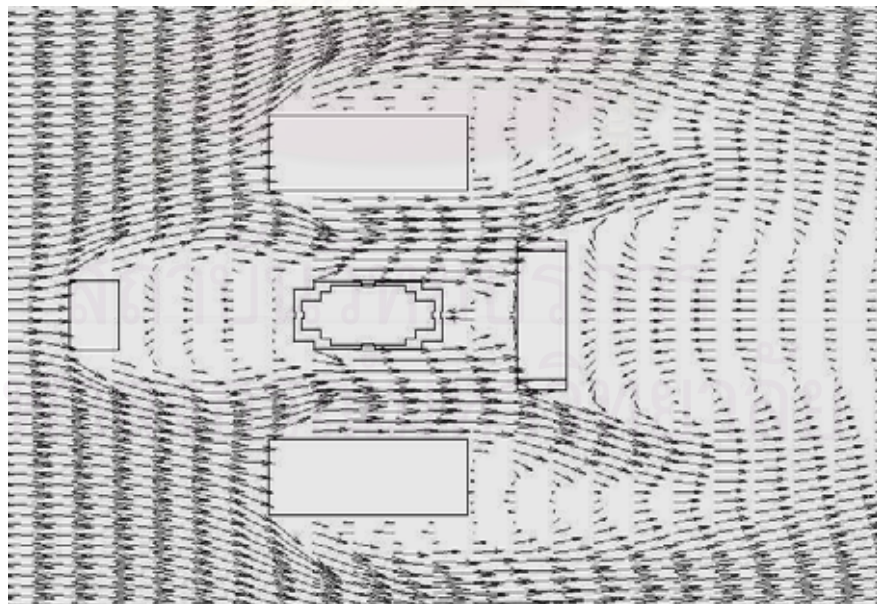
ขึ้นตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในบาวคาร์เลเยอร์ ส่วนที่ขอบบนสุดจะมีลักษณะเป็นการไหลแบบแยกที่มากขึ้น ส่วนบริเวณด้านบนหลังคาจะมีเวกเตอร์ความเร็วไหลย้อนกลับเป็นบริเวณที่มีขนาดใกล้เคียงกับกรณีหัวข้อ 6.4.1 การไหลวนและไหลแบบย้อนกลับจะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านหลังตัวอาคาร ซึ่งทำให้ค่าความดันที่ผิวด้านหลังอาคารเป็นค่าลบที่มีช่วงยาวกว่ากรณีแรก ส่งผลให้อาคารขนาดเล็กที่ตำแหน่งของอาคารวางอยู่ในบริเวณของการไหลวนของลมที่ผ่านกลุ่มอาคารนั้นมีค่าความดันบนผนังอาคารเป็นค่าลบหมด จะสอดคล้องกับรูปที่ 6.50 ที่พล็อตระหว่างความสูงกับสัดส่วนของความเร็วในแนวแกน  $x$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ ส่วนรูปที่ 6.52 แสดงเวกเตอร์ความเร็วในระนาบที่สูงจากพื้น 40 เมตร ซึ่งที่ระดับความสูงนี้การเคลื่อนที่ของลมก่อนถึงตัวอาคารหลักที่ทำการพิจารณานั้นเป็นแบบย้อนกลับและหมุนวน และเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณด้านหน้าของตัวอาคารจะเป็นการไหลแบบแยกกัน ทำให้ค่าความเร็วลมที่ผ่านบริเวณใกล้ผิวอาคารด้านข้างมีค่าเป็นศูนย์และค่าเป็นลบ ทำให้ที่ขอบด้านข้างมีค่าความดันเป็นลบ และมีการไหลวนที่บริเวณด้านหลังของตัวอาคารมากค่าความดันในบริเวณนี้เป็นค่าลบ ทั้งหมดจะสอดคล้องกับรูปที่ 6.53 ที่แสดงค่าความดันที่บริเวณผิวอาคารและที่บริเวณข้างเคียงตัวอาคาร โดยมีค่ามากที่สุดคือ 662.67 Pa ที่ช่วงความสูง 170-220 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมสูงสุดคือ 0.57 และให้ค่าความดันด้านคูมีค่ามากที่สุดคือ -1109.21 Pa ที่ตำแหน่งขอบบนด้านหน้าที่มีการไหลแบบแยก ค่าสัมประสิทธิ์ความดันด้านคูสูงสุดมีค่า -0.95 และที่ตำแหน่งมุมล่างของด้านหน้าอาคารมีค่าความดันเป็น 72.04 Pa



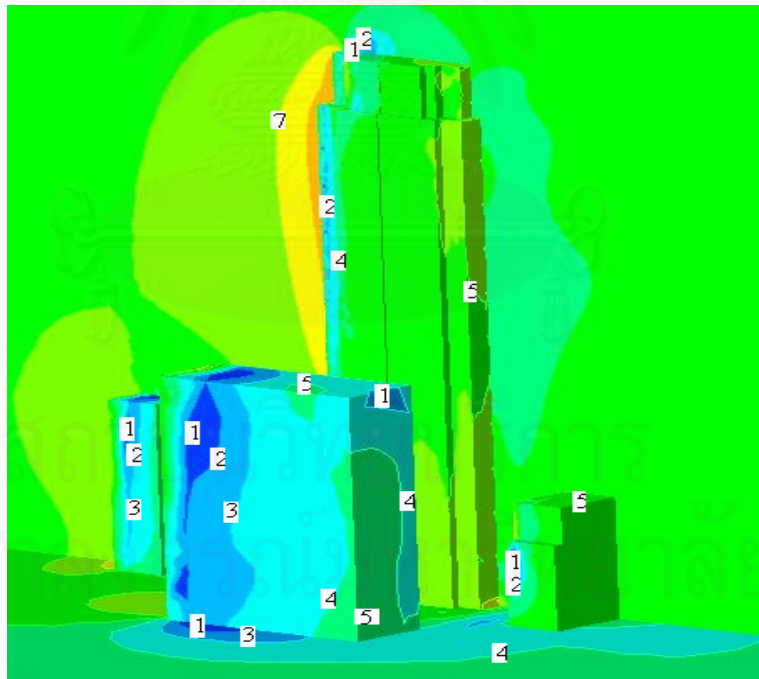
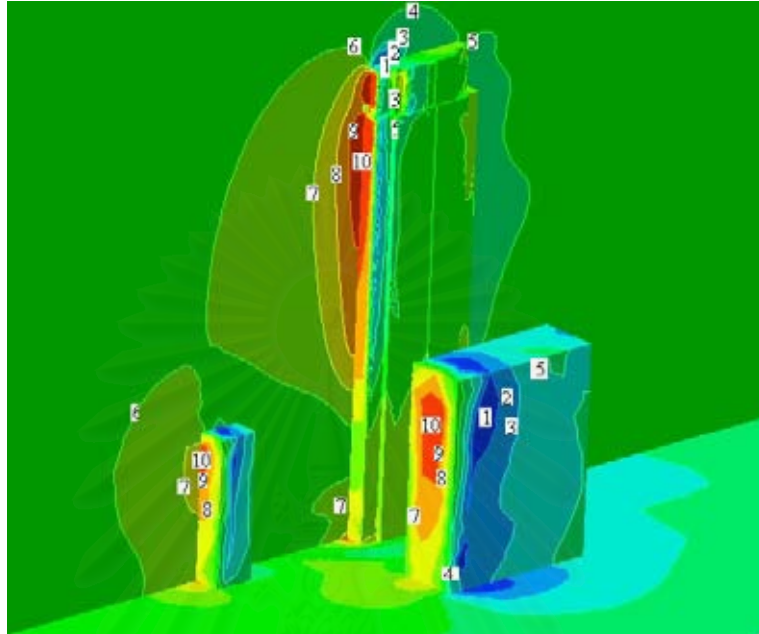
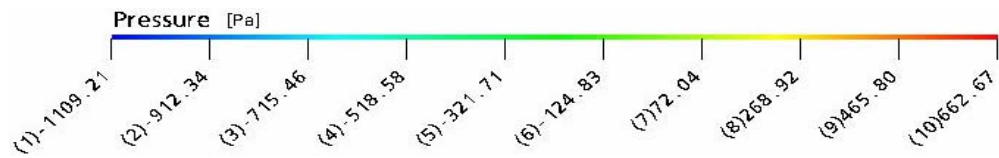
รูปที่ 6.50 สัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆในแนวแกน  $x$  ของการไหลของลมจากทางทิศเหนือผ่านกลุ่มอาคาร ที่ระนาบกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ (Not to scale)



รูปที่ 6.51 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างรับแรงลมปะทะ กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale)

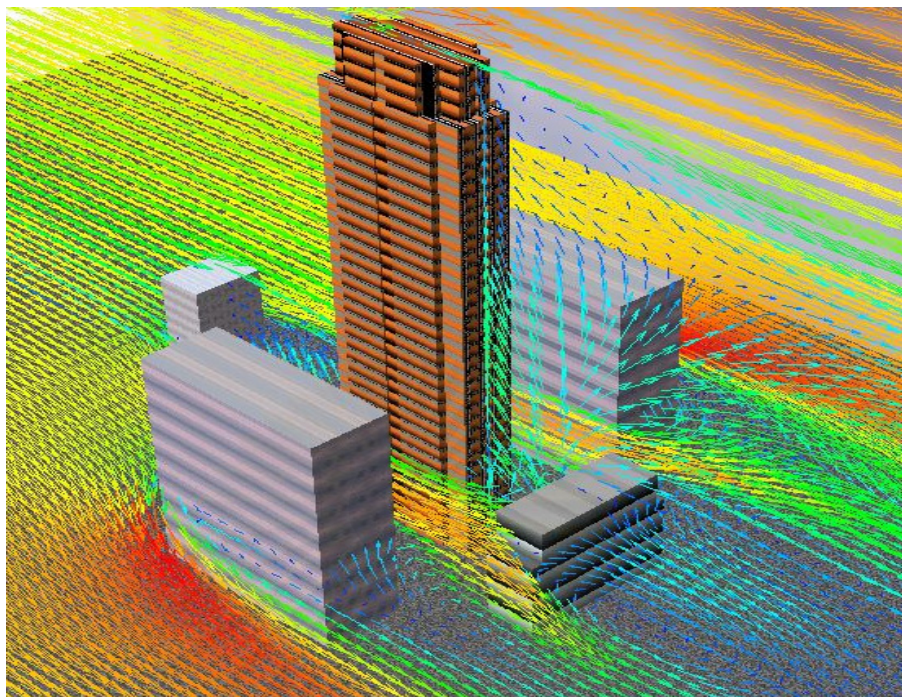


รูปที่ 6.52 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระนาบสูง 40 เมตร จากพื้นดิน กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale)



รูปที่ 6.53 Pressure contour บนผนังอาคารและที่พื้นระนาบกับระนาบตรงกลางการไหลของลม จากทางทิศเหนือผ่านกลุ่มอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ทั้งมุมมองด้านหน้า และ ด้านหลัง (Not to scale)

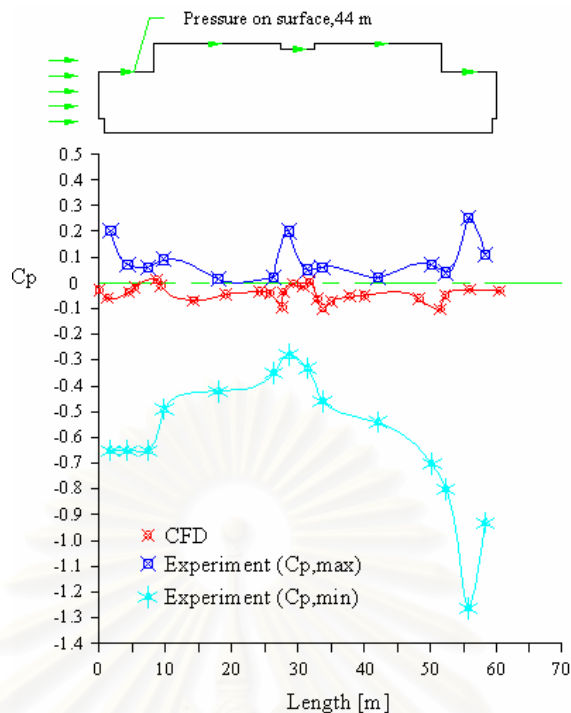




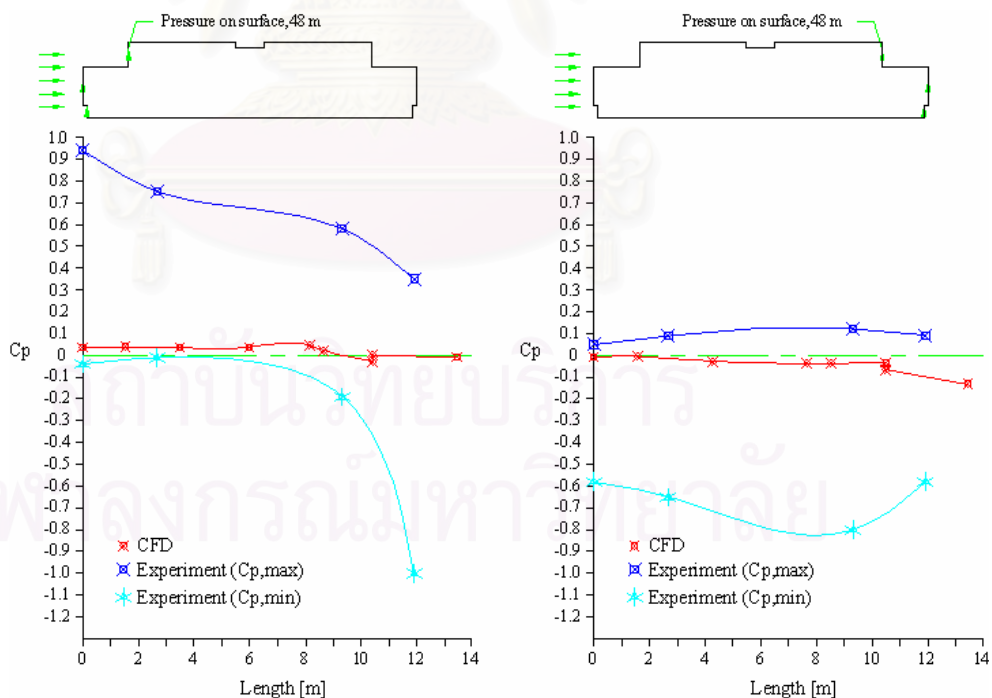
รูปที่ 6.54 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศเหนือผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระนาบสูง 40 เมตร จากพื้นดิน และระนาบกึ่งกลางของความกว้าง กรณีกลุ่มอาคารแบบสามมิติ (Not to scale)

#### ผลการเปรียบเทียบกับการทดลอง

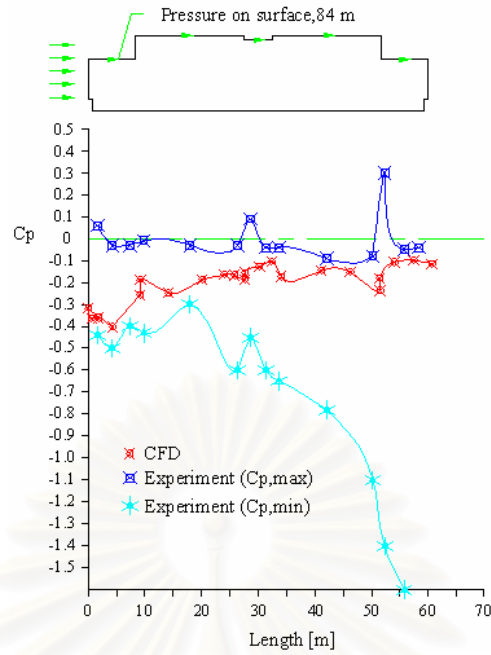
จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ของผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม กับค่าจากการทดลองในอุโมงค์ลมของ ปฏิพัทธ์ แจ่มมั่งคั่ง (2538) ในการทดลองนั้นจะมีอาคารข้างเคียงล้อมรอบอยู่ในรัศมี 300 เมตร และเก็บข้อมูลหลายๆครั้งในแต่ละตำแหน่ง แต่ในกรณีงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้มีการวางตำแหน่งอาคารขนาดต่างๆล้อมรอบ JEWELRY TRADE CENTER อยู่ 4 อาคาร ทั้งสี่ทิศ โดยให้มีความใกล้เคียงกับสถานที่จริงส่วนหนึ่ง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6.55 - 6.68 ซึ่งให้ผลที่ได้น่าพอใจกว่ากรณีที่เป็นอาคารเดี่ยว คือค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมจะอยู่ระหว่างค่ามากและน้อยสุดของผลการทดลองในทุกช่วงความสูง แม้ที่ผิวผนังด้านข้างอาคารที่ลมพัดผ่านซึ่งใกล้กับขอบด้านหลังของอาคารจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความดันสูงกว่าค่าการทดลองเล็กน้อย แต่โดยภาพรวมก็ถือว่าผลที่ได้เป็นที่น่าสนใจ



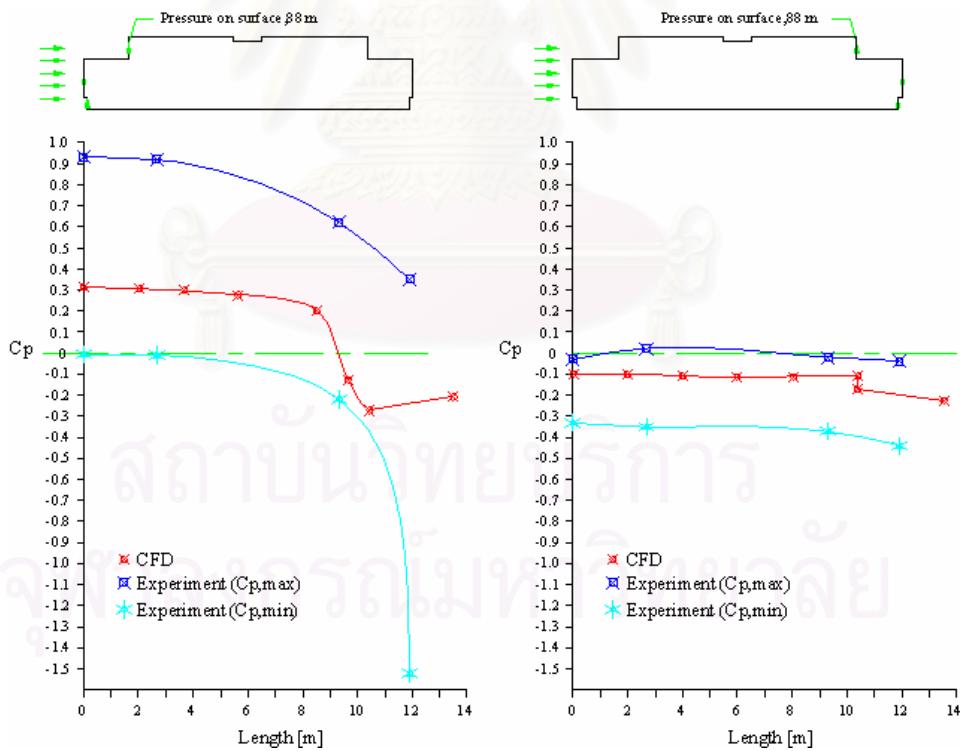
รูปที่ 6.55 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 44 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



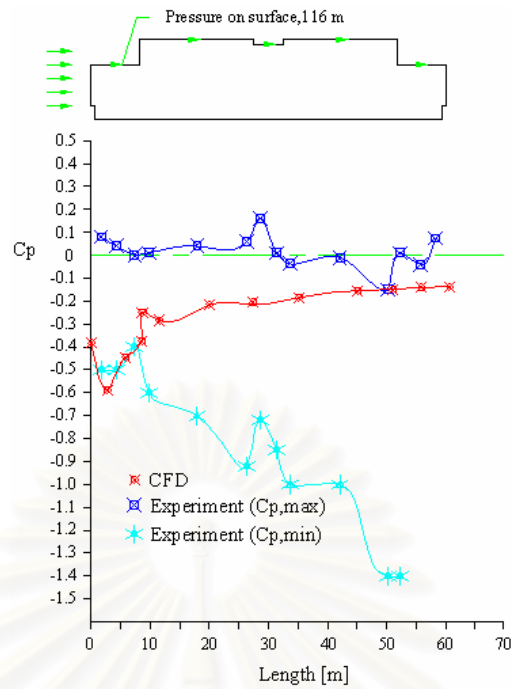
รูปที่ 6.56 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 48 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



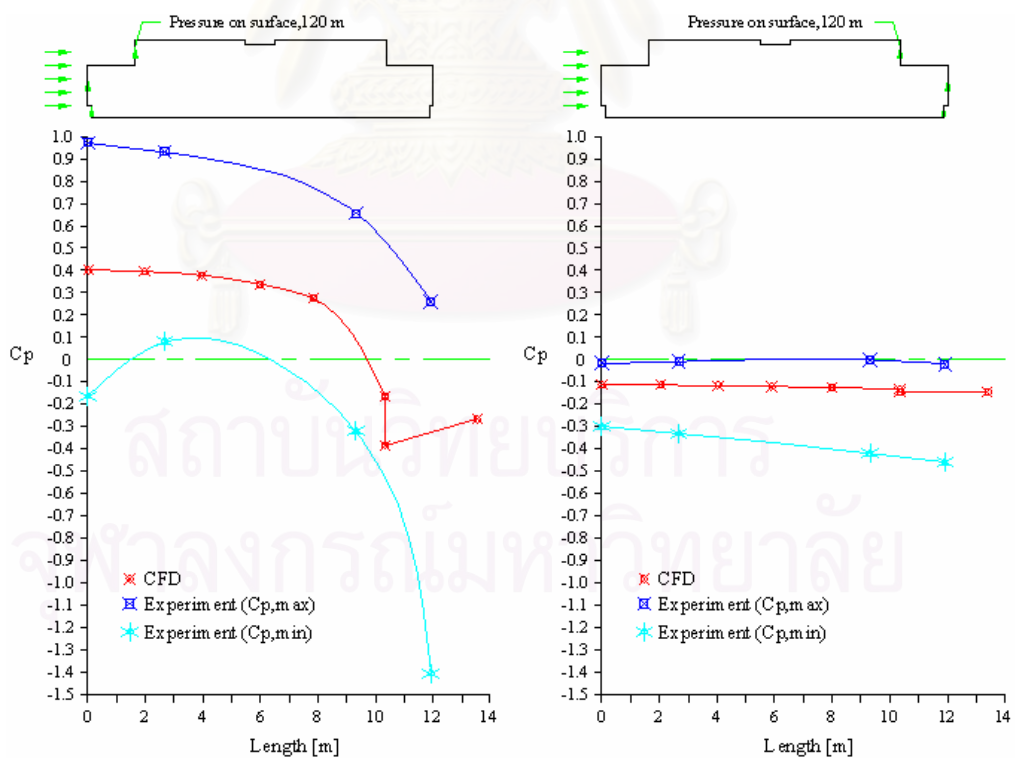
รูปที่ 6.57 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 84 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



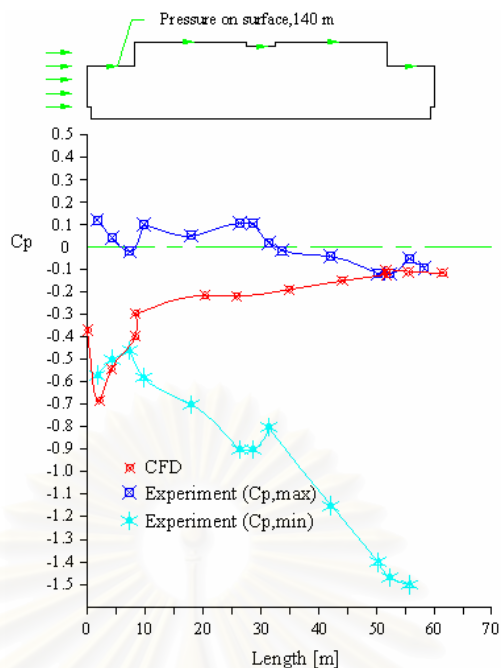
รูปที่ 6.58 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 88 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



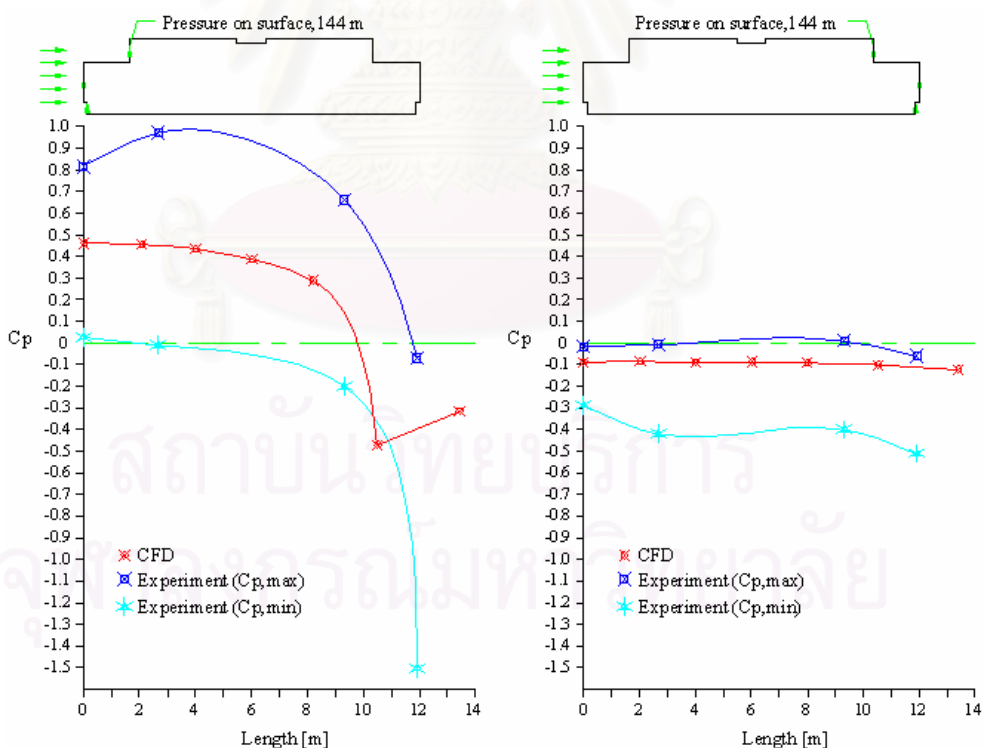
รูปที่ 6.59 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 116 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.60 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 120 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)

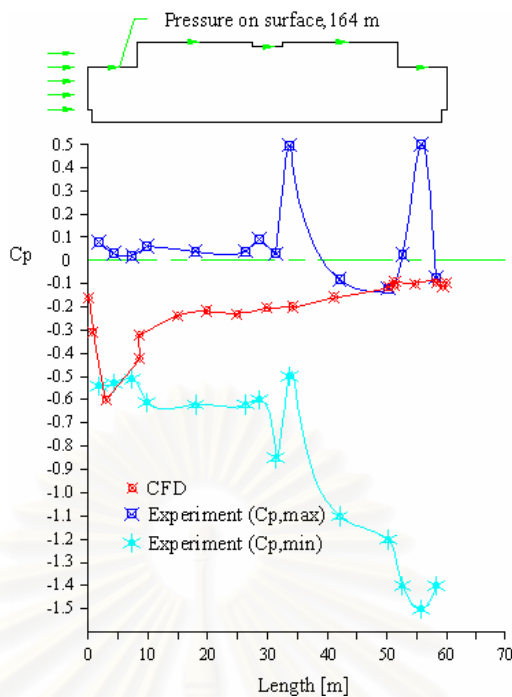


รูปที่ 6.61 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 140 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)

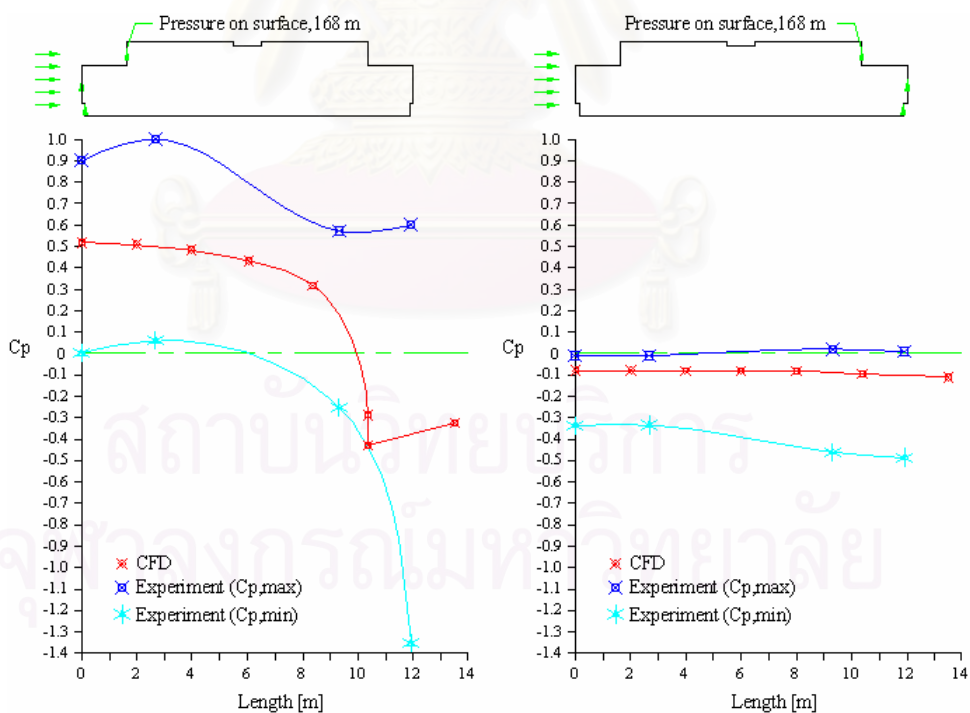


รูปที่ 6.62 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 144 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)

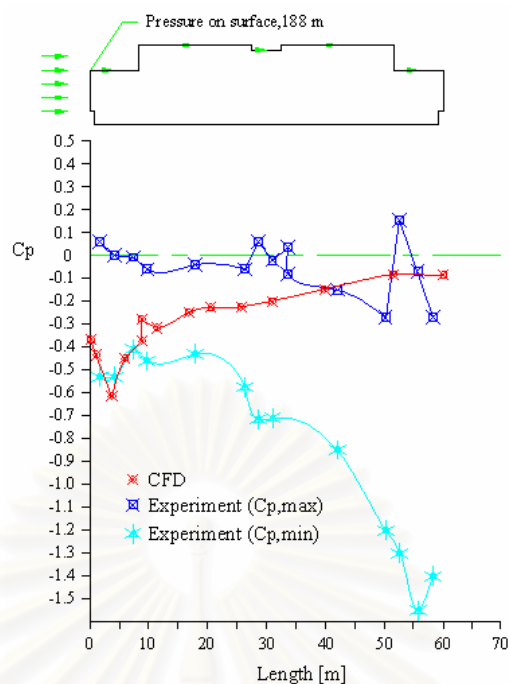




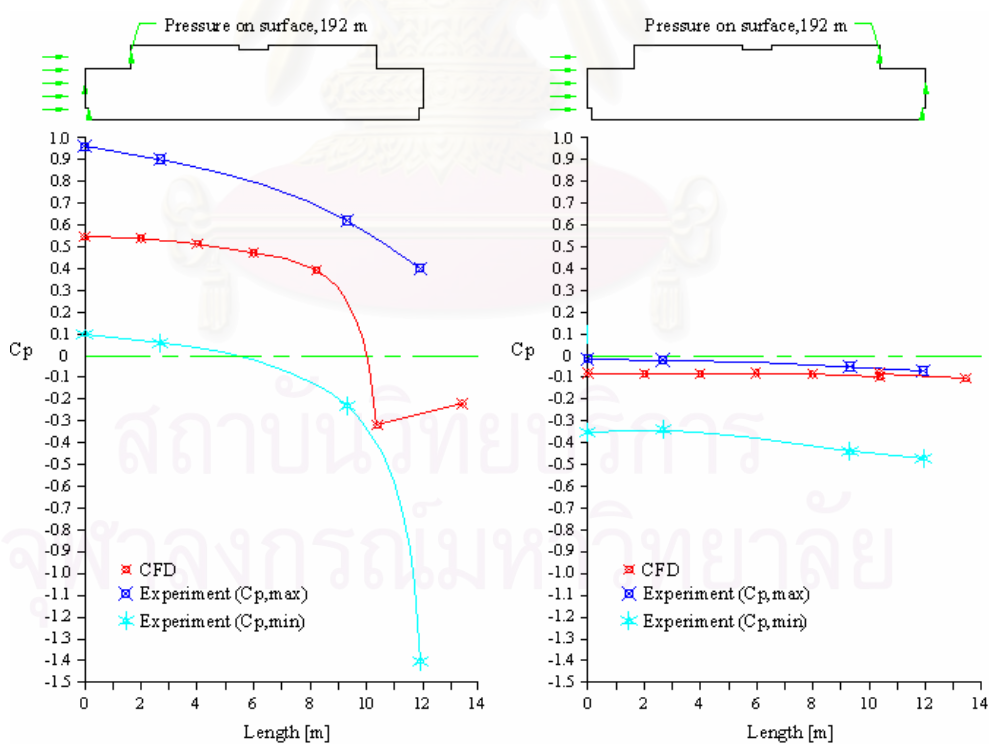
รูปที่ 6.63 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 164 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



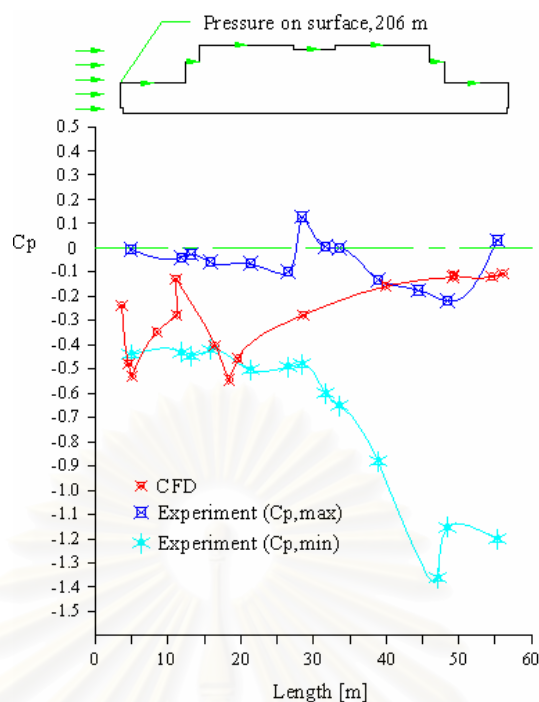
รูปที่ 6.64 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 168 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



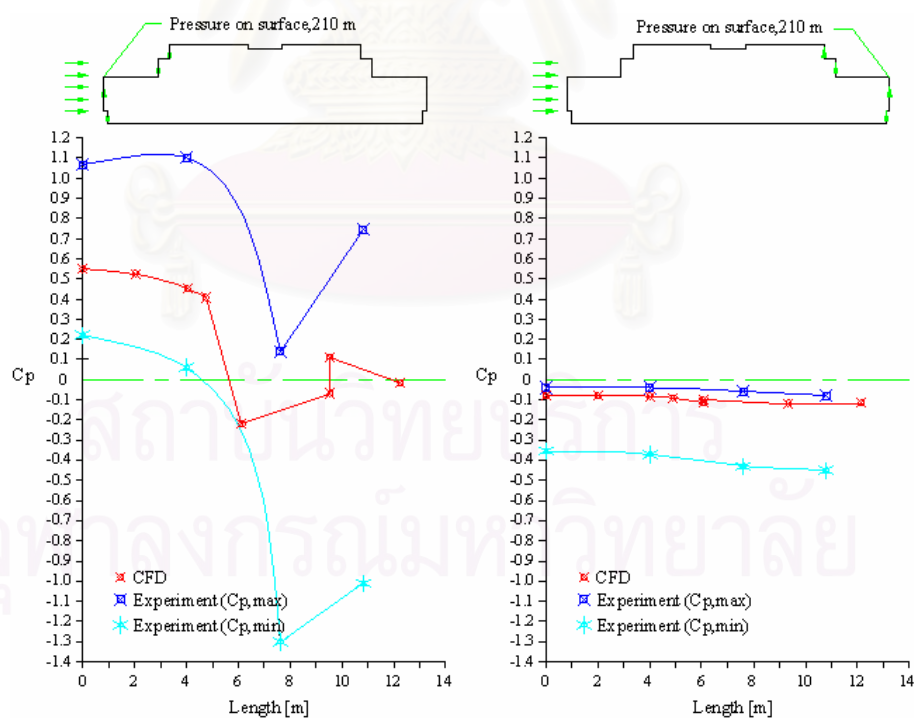
รูปที่ 6.65 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 188 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.66 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 192 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



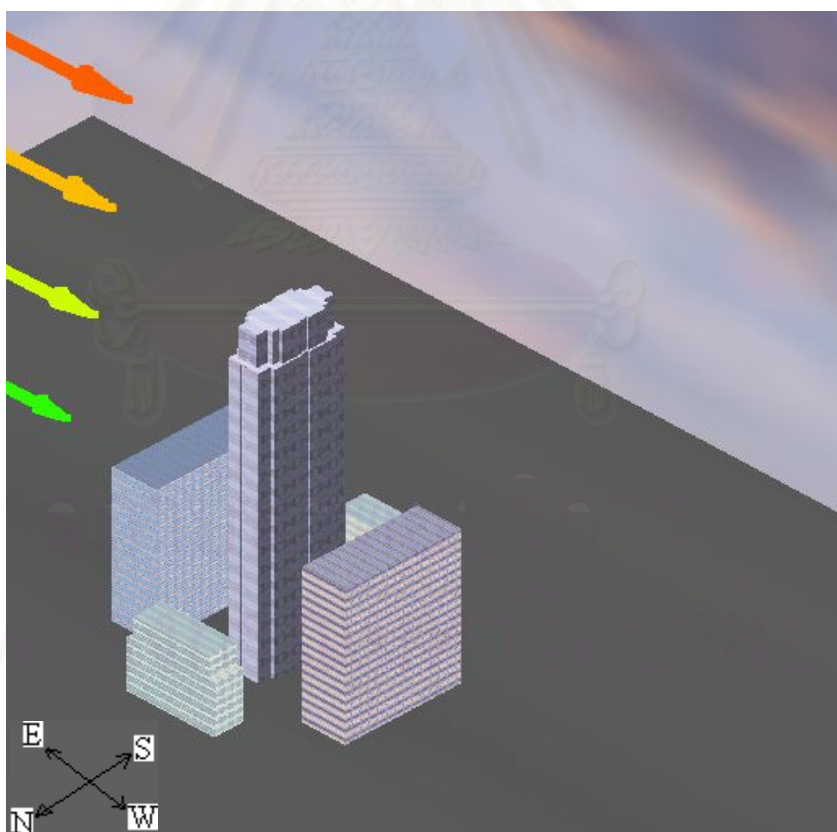
รูปที่ 6.67 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 206 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.68 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 210 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ทิศทางลมจากทิศเหนือ ตามแนวลูกศร (Not to scale)

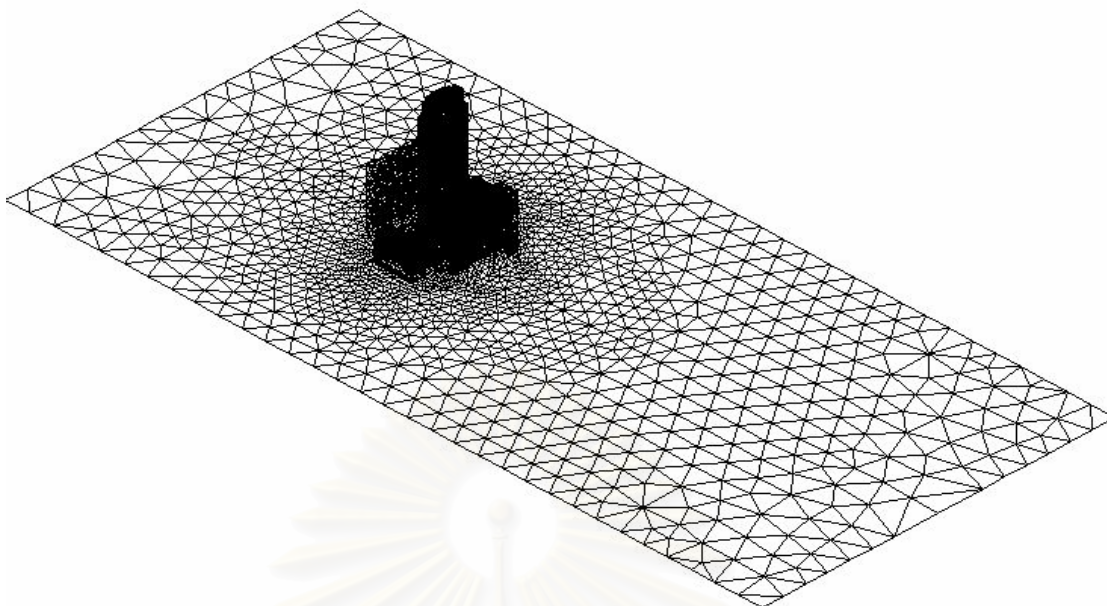
#### 6.4.4 กรณีการไหลของอากาศจากทิศตะวันออกผ่านกลุ่มอาคาร

การสร้างโดเมนจำลองการไหลสำหรับกรณีนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 6.69 โดยมีการวางตำแหน่งอาคารขนาดต่างๆล้อมรอบอยู่ 4 อาคาร ทั้งสี่ทิศ เหมือนกรณีในหัวข้อที่ 6.4.3 โดยให้ความใกล้เคียงกับสถานที่จริง แต่ในกรณีนี้ทิศเหนือและทิศใต้จะใช้อาคารที่มีขนาดเท่ากัน เพื่อที่จะสร้างโดเมนปัญหาแบบสมมาตรได้คือเป็นอาคารสูง 55 เมตร มีระยะห่างจากตัวอาคารหลักที่พิจารณา 30 เมตร ทิศตะวันออกและทิศตะวันตกเป็นอาคารสูง 100 เมตร มีระยะห่างจากตัวอาคารหลักที่พิจารณา 90 เมตร รูปที่ 6.70 แสดงการสร้าง Mesh ของโดเมนปัญหากรณีนี้ โดยใช้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดคือ 627,380 เอลิเมนต์ ชนิด Tetrahedron จำนวน 426,900 เอลิเมนต์ และชนิด Prism จำนวน 200,480 เอลิเมนต์ โดยมีขนาดความยาวเอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดคือ 1 m ซึ่งใช้อากาศเป็นของไหลมีความหนาแน่น  $\rho = 1.46 \text{ kg/m}^3$  และความหนืดสัมบูรณ์  $\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$  สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ คือ การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

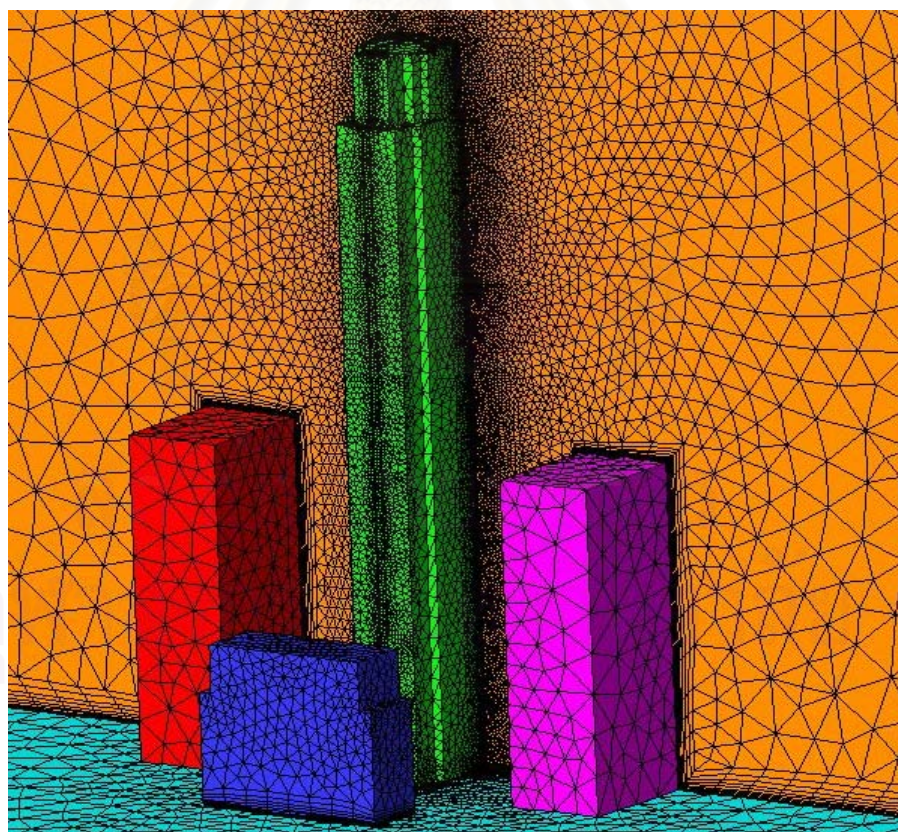


รูปที่ 6.69 ทิศทางลมจากทิศตะวันออกกระทบกลุ่มอาคาร JEWELRY TRADE CENTER





รูปที่ 6.70 Mesh ที่ผิวภายนอกอาคารของการไหลของลมจากทิศตะวันออกผ่านกลุ่มอาคาร JEWELRY TRADE CENTER (Not to scale)



รูปที่ 6.71 รูปขยาย Mesh ที่ผิวภายนอกอาคารของการไหลของลมจากทิศตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale)

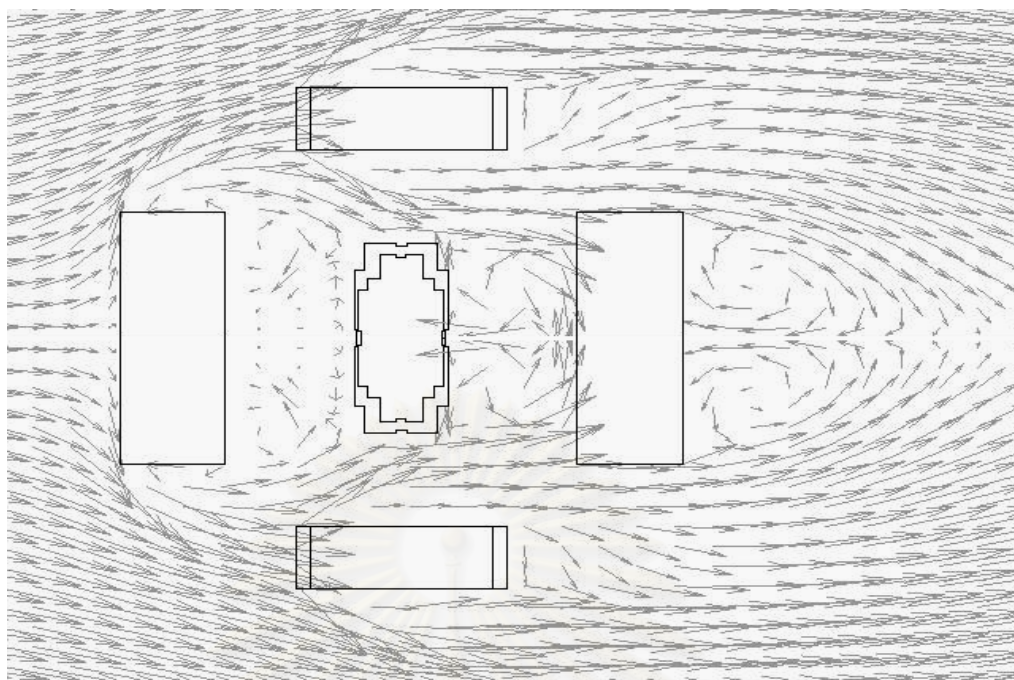


## ผลจากการใช้โปรแกรม กรณีการไหลของอากาศจากทางทิศตะวันออกผ่านกลุ่มอาคาร

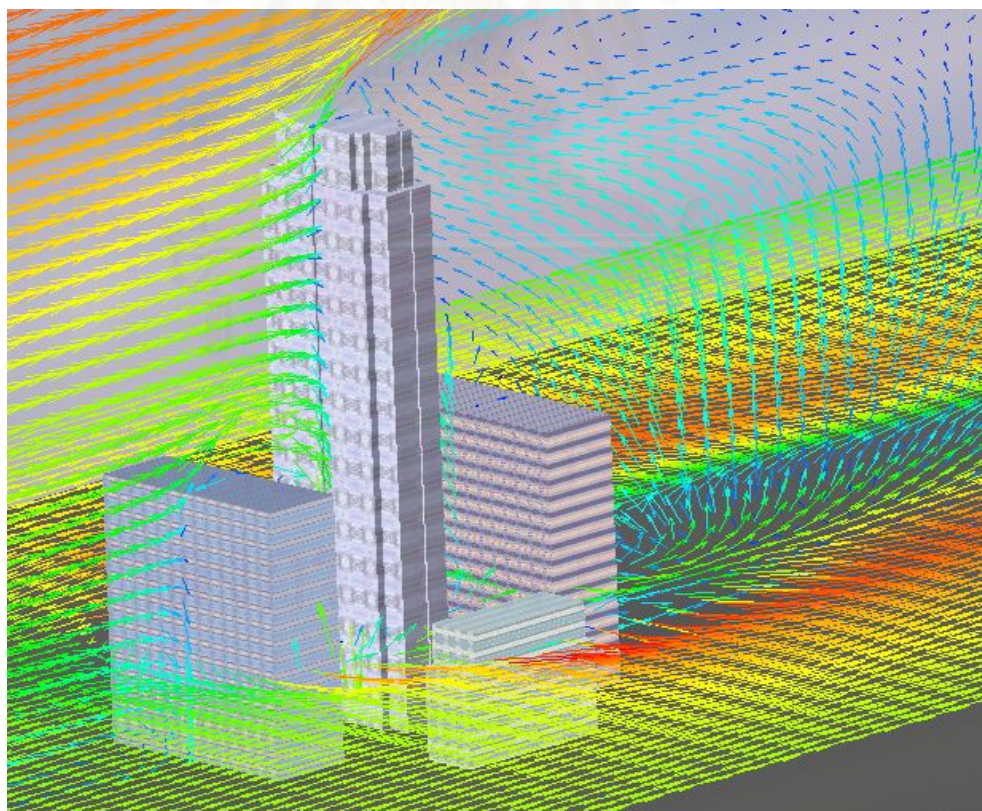
กรณีนี้กระแสลมมาจากทิศตะวันออก และมีอาคารขนาดต่างๆล้อมรอบอยู่ 4 อาคาร วางตำแหน่งไว้ทั้งสี่ทิศ โดยให้มีความคล้ายกับสถานที่จริง ดังนั้นจึงมีผลกระทบจากอาคารข้างเคียงด้วย การกระจายความเร็วลักษณะของเวกเตอร์ในรูปที่ 6.72 นั้นมีการไหลที่ซับซ้อนมากเนื่องจากมีสิ่งกีดขวางเป็นตัวที่ทำให้เกิดการไหลแบบแยกของการไหลผ่านแต่ละอาคาร ทำให้การไหลมีความเร่งเพิ่มในการไหลผ่านตัวอาคารด้านข้างและด้านบนหลังคา โดยที่มุมล่างด้านหน้าของอาคารหลักที่พิจารณาหรือต่ำกว่าประมาณ  $2/3$  ของความสูงอาคาร จะเกิดการไหลย้อนกลับและไหลวนเป็นบริเวณมากกว่าในกรณีก่อนหน้านี้ ที่ตำแหน่งสูงกว่า  $2/3$  ของความสูงอาคารเวกเตอร์ความเร็วจะมีทิศทางวนขึ้นด้านบน และมีขนาดของความเร็วมากขึ้นตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในบาวคาร์เลเยอร์ ส่วนขอบบนสุดจะเป็นลักษณะการไหลแบบแยกที่มากขึ้น บริเวณด้านบนหลังคาจะมีเวกเตอร์ความเร็วไหลย้อนกลับเป็นบริเวณมากกว่าทุกกรณีก่อนหน้านี้ และมีการไหลวนเกิดขึ้นมากที่บริเวณด้านหลังตัวอาคาร JEWELRY TRADE CENTER เนื่องจากมีอาคารอยู่ด้านหลังอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบแยกซ้ำซ้อนขึ้น เป็นผลให้ค่าความดันที่ผิวด้านหลังอาคาร JEWELRY TRADE CENTER และความดันบนผนังอาคารที่อยู่ข้างหลังเป็นค่าลบ จะสอดคล้องกับรูปที่ 6.73 ที่พล็อตระหว่างความสูงกับสัดส่วนของความเร็วในแนวแกน  $x$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ ซึ่งทำให้เห็นรูปร่างความเร็วของการไหลเปลี่ยนไปจากเดิมก่อนที่จะไหลชนอาคารหลักที่พิจารณา ส่วนรูปที่ 6.74 แสดงเวกเตอร์ความเร็วในระนาบที่สูงจากพื้น 40 เมตร ค่าความเร็วลมที่ผ่านบริเวณใกล้ผิวผนังอาคารโดยรอบมีค่าเป็นศูนย์และค่าลบ ทำให้ค่าความดันที่รอบผิวผนังของอาคารที่ช่วงความสูงนี้เป็นค่าลบตลอด และที่บริเวณด้านหน้าของตัวอาคารจะเป็นการไหลแบบแยกกันและการไหลวน ทั้งหมดสอดคล้องกับรูปที่ 6.76 ที่แสดงค่าความดันที่บริเวณผิวผนังอาคารและที่บริเวณข้างเคียงตัวอาคาร โดยที่ค่าของความดันจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคาร มีค่ามากที่สุดคือ 630.59 Pa ที่ช่วงความสูง 170-220 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมสูงสุดคือ 0.54 และให้ค่าความดันด้านคูคมีค่ามากที่สุด คือ -752.24 Pa ที่ตำแหน่งขอบบนด้านหน้า ซึ่งมีลักษณะการไหลเป็นแบบแยก โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความดันด้านคูคสูงสุดมีค่าเท่ากับ -0.64 และที่ตำแหน่งมุมล่างของด้านหน้าอาคารมีค่าความดันเป็น 16 Pa



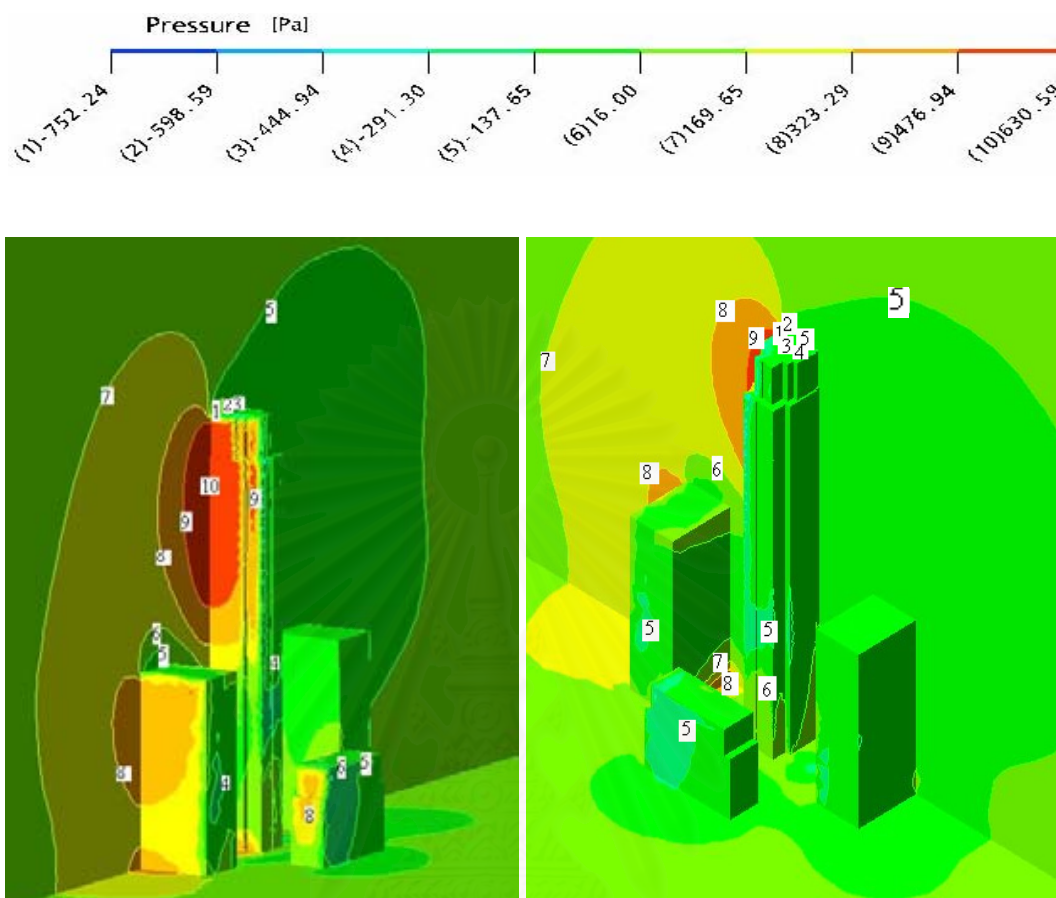




รูปที่ 6.74 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ระนาบสูง 40 เมตร จากพื้นดิน กรณีกลุ่มอาคาร (Not to scale)



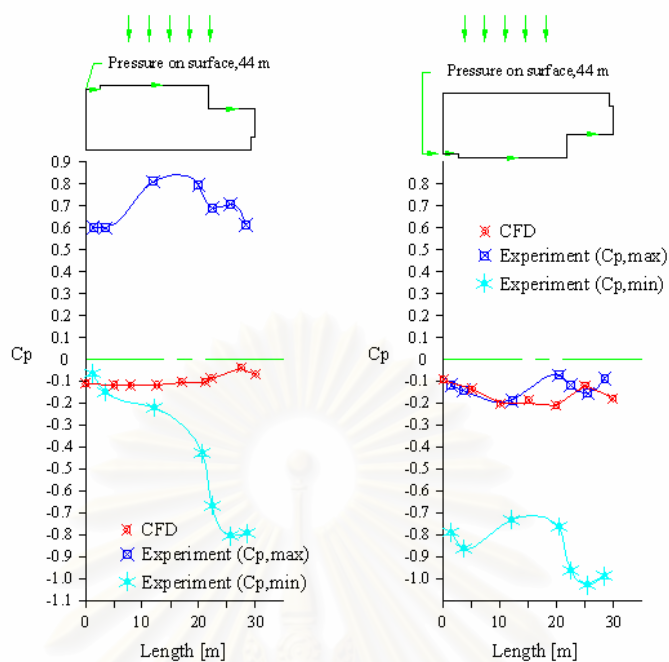
รูปที่ 6.75 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของลมจากทิศตะวันออกผ่านอาคาร JEWELRY TRADE CENTER ที่ตำแหน่งความสูง 40 เมตร จากพื้น กรณีเป็นกลุ่มอาคารแบบสามมิติ (Not to scale)



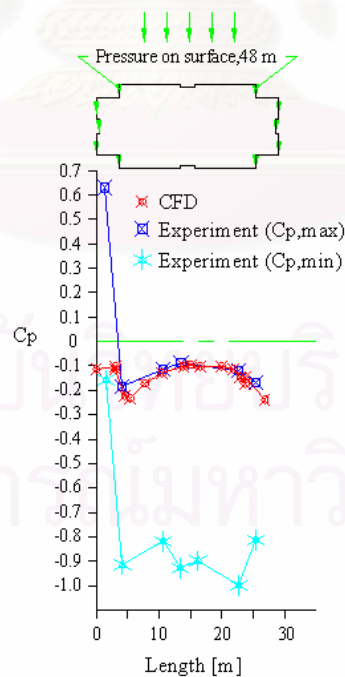
รูปที่ 6.76 Pressure contour การไหลของลมจากทางทิศตะวันออกผ่านกลุ่มอาคาร ที่ผิวนอกอาคารทั้งมุมมองด้านหน้า และด้านหลัง (Not to scale)

#### ผลการเปรียบเทียบกับการทดลอง

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันบนผนังอาคารที่ระดับความสูงต่างๆกัน ในกรณีทิศทางลมมาจากทิศตะวันออกไหลผ่านกลุ่มอาคารนั้น ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 6.77 - 6.90 เราจะพบว่าผลลัพธ์จากการคำนวณจะอยู่ระหว่างค่ามากและน้อยสุดของผลการทดลองในทุกช่วงความสูง และที่ผิวผนังด้านหลังของอาคารที่ลมพัดผ่านจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความดันเกือบซ้อนทับกับค่าสัมประสิทธิ์ความดันค่ามากที่สุดจากการทดลอง

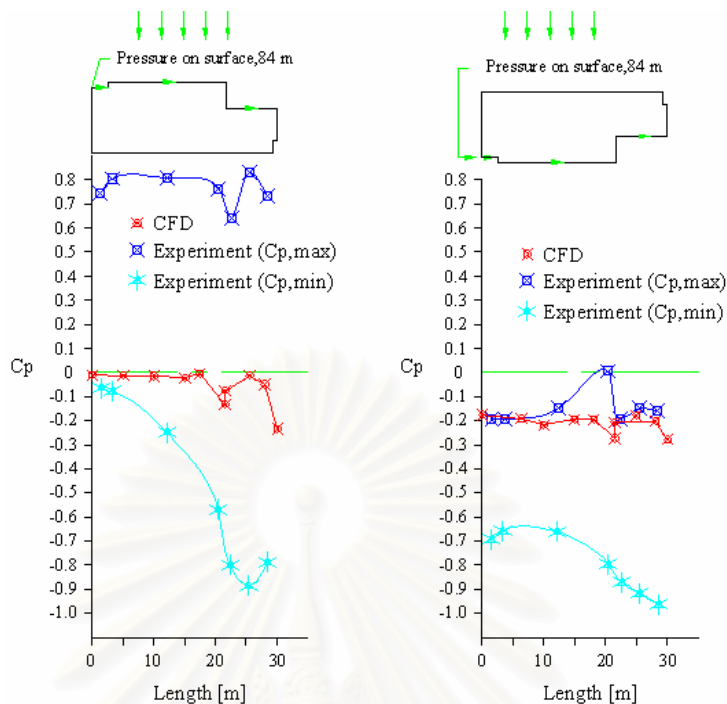


รูปที่ 6.77 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 44 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

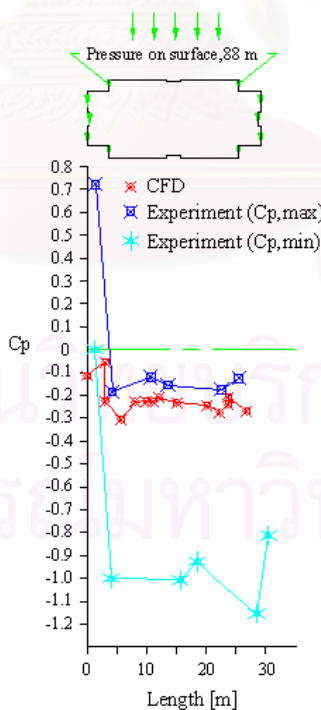


รูปที่ 6.78 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 48 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

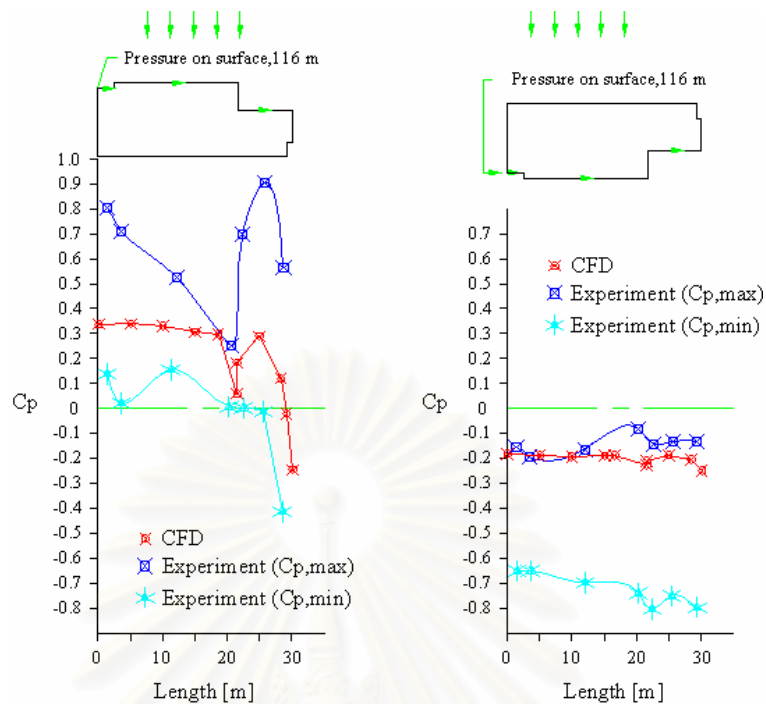




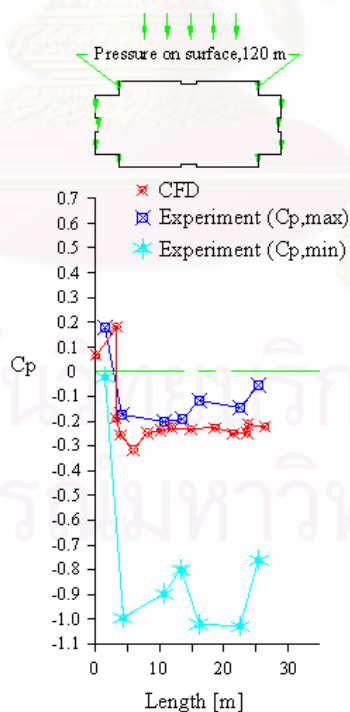
รูปที่ 6.79 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 84 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



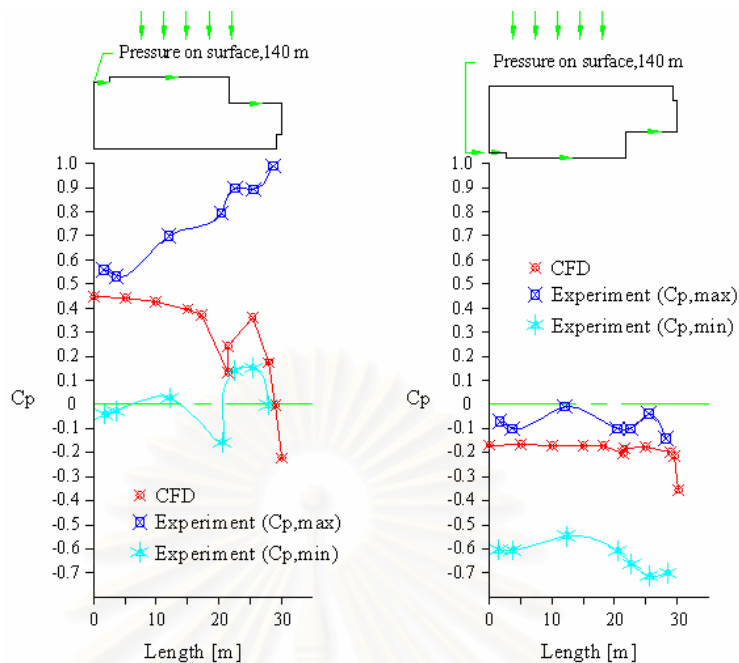
รูปที่ 6.80 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 88 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



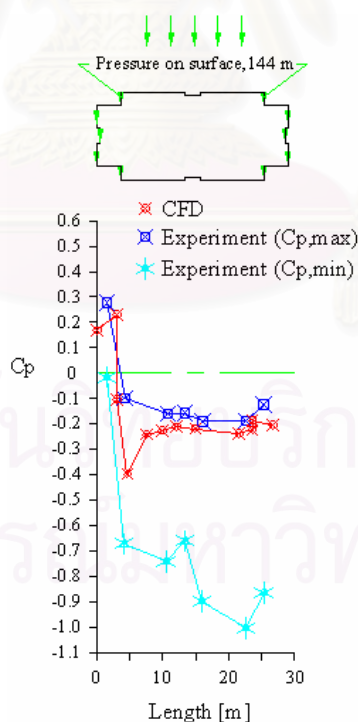
รูปที่ 6.81 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 116 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



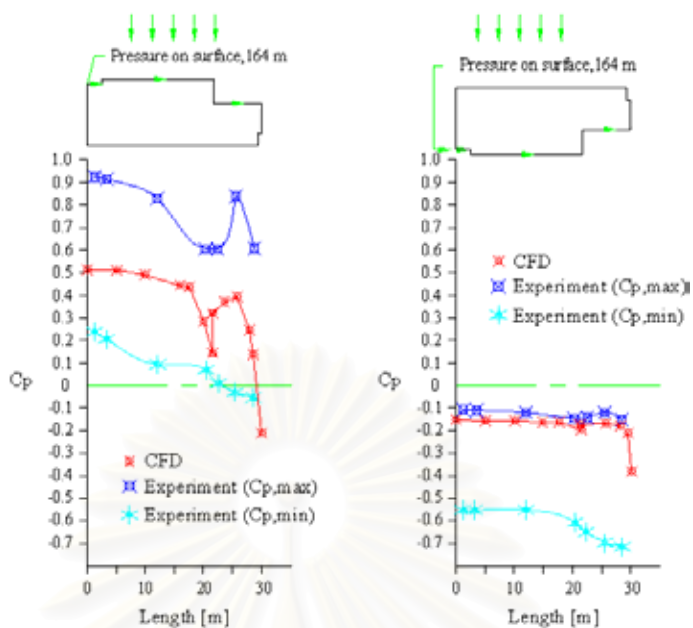
รูปที่ 6.82 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 120 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



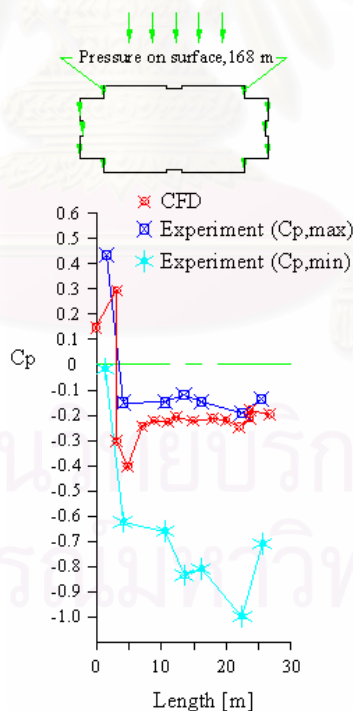
รูปที่ 6.83 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 140 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



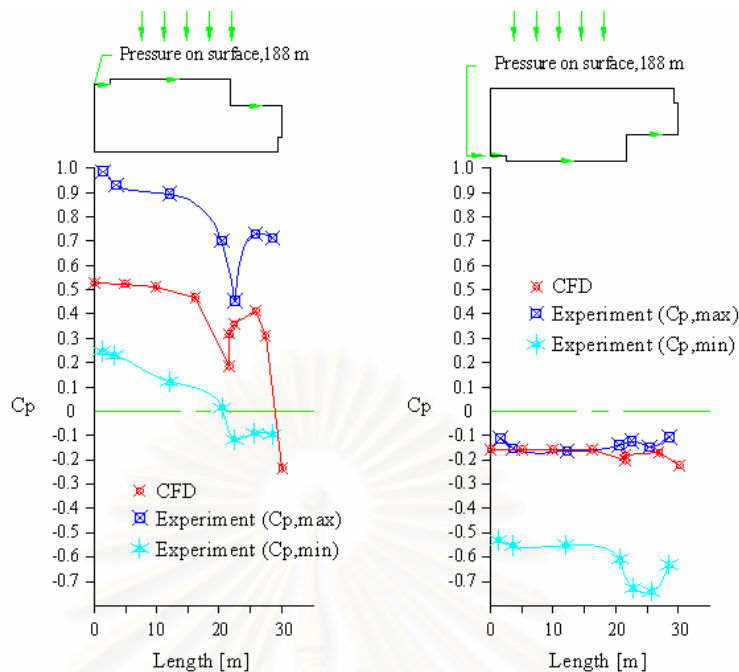
รูปที่ 6.84 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 144 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



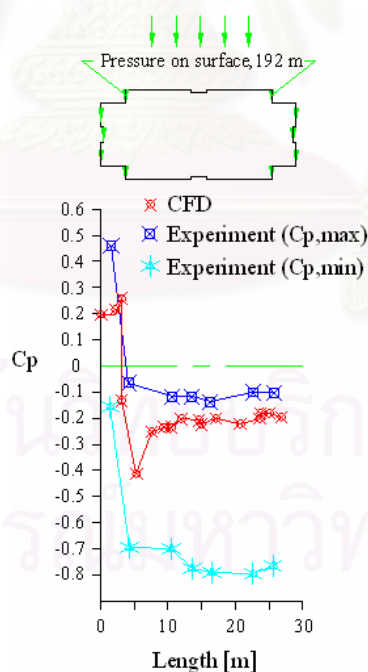
รูปที่ 6.85 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 164 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.86 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 168 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

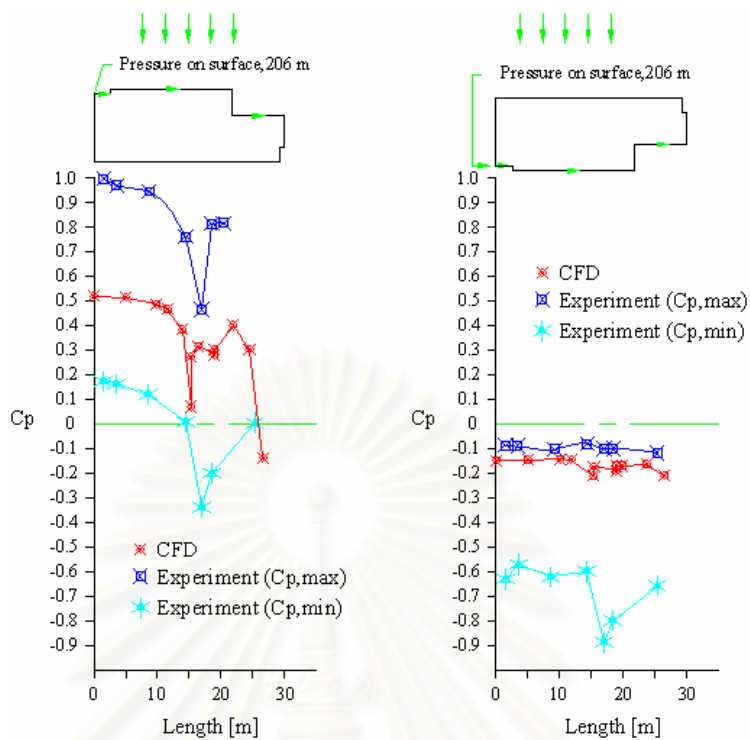


รูปที่ 6.87 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 188 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

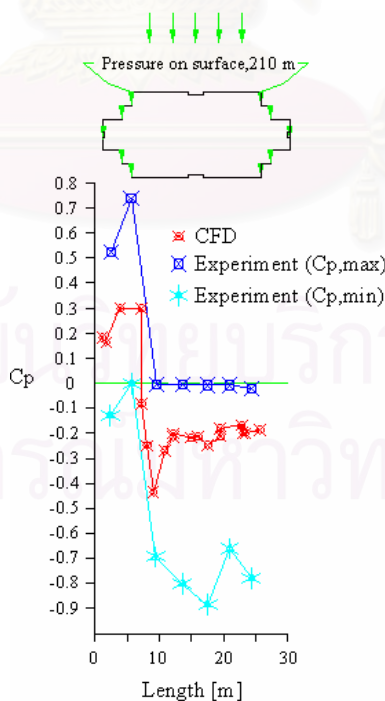


รูปที่ 6.88 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 192 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)





รูปที่ 6.89 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 206 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)



รูปที่ 6.90 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันของผนังอาคารที่ระดับความสูง 210 เมตร กรณีแบบจำลองกลุ่มอาคาร ลมจากทิศตะวันออก ตามแนวลูกศร (Not to scale)

## 6.5 สรุปและวิเคราะห์ผล

การประยุกต์ใช้โปรแกรมกับอาคารที่ใช้งานจริงคืออาคาร JEWELRY TRADE CENTER ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับทดลองเป็นส่วนใหญ่ โดยเริ่มที่การไหลของลมผ่านอาคารเดี่ยว ซึ่งผู้ทำวิจัยต้องการแสดงให้เห็นถึงผลของทิศทางลมที่มาปะทะตัวอาคารในกรณีที่อาคารมีขนาดความยาวและความกว้างไม่เท่ากัน จากผลการทดลองและผลการเปรียบเทียบที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ คือการวางตัวอาคารให้ด้านที่ตั้งฉากกับแนวการไหลของลมมีความยาวสั้นกว่าด้านที่วางในแนวเดียวกับแนวการเคลื่อนที่ของลม (หัวข้อ 6.4.1) จะให้การกระจายความเร็วของลมรอบตัวอาคารดีกว่ากรณีด้านที่รับแรงลมปะทะยาวกว่าด้านที่วางในแนวทางเดียวกับแนวทางไหลของลม(หัวข้อ 6.4.2) เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะในขณะที่ลมไหลชนขอบด้านบนและขอบด้านล่างของอาคารจะทำให้เกิดการไหลแบบแยกขึ้น ทำให้มีความเร่งเพิ่มเมื่อไหลผ่านหลังคาและด้านข้างตัวอาคาร ความยาวการไหลผ่านตัวอาคารกรณีแรกยาวกว่าทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวทางเดียวกับทิศทางการไหลของลมได้ก่อนที่จะถึงขอบด้านล่างของอาคาร ซึ่งดีกว่ากรณีที่สอง การถ่ายเทโมเมนตัมในแนวการเคลื่อนที่ของลมดีกว่าทำให้เวกเตอร์ความเร็วกลับมาสู่ทิศทางการไหลของลมดีกว่า ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนน้อยกว่า คือกรณีแรกมีความยาวการไหลหมุนวนเท่ากับ 89 เมตร ส่วนกรณีที่สองมีความยาวการไหลหมุนวนเท่ากับ 289 เมตร ดังนั้นกรณีแรกจะมีความสบายกว่าในแง่การถ่ายเทความร้อนและมลภาวะ และเมื่อพิจารณาเรื่องความแข็งแรงของผนังอาคารถึงแม้กรณีแรกจะให้ค่าความดันที่กระทำกับผนังอาคารมากกว่าแต่เป็นบริเวณพื้นที่น้อย ต่างจากกรณีที่สองที่รับความดันกระทำต่อผนังอาคารน้อยกว่ากรณีแรกไม่มาก แต่บริเวณที่เกิดความดันนี้มีพื้นที่มากกว่า ทำให้ต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงเพียงพอจำนวนมากกว่ากรณีแรก ดังนั้นผู้ทำวิจัยแนะนำให้เลือกวางตำแหน่งอาคารแบบกรณีแรก

กรณีโคมินปัญหาเป็นการไหลผ่านกลุ่มอาคาร จะให้ผลสอดคล้องกับการทดลองมากกว่าในกรณีที่เป็นการไหลผ่านอาคารเดี่ยว เนื่องจากการสร้างรูปแบบปัญหาให้ใกล้เคียงกับการทดลอง โดยรูปร่างความเร็วก่อนกระทบตัวอาคารหลักที่พิจารณามีลักษณะซับซ้อนเป็นการไหลแบบหมุนวนเนื่องจากมีอาคารวางขวางในทิศทางที่ลมเคลื่อนที่ ส่วนตัวอาคารด้านข้างและด้านหลังเป็นตัวที่เพิ่มให้เกิดความปั่นป่วนของการไหลของลมผ่านอาคาร ซึ่งทำให้มีผลคล้ายกับความเป็นจริง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความดันทั้งด้านดันและด้านดูดจึงอยู่ในขอบเขตของค่ามากที่สุดและต่ำสุดของการทดลอง

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทำนายลักษณะการไหลของอากาศที่ผ่านอาคารในรูปแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรม CFD คำนวณหาค่าความเร็วและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในโดเมนของแต่ละปัญหา โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นที่การใช้ประโยชน์ของโปรแกรม CFD ที่มีอยู่แล้วกับอาคารที่มีการใช้งานจริง และเพื่อต้องการให้เกิดความเชื่อมั่นในการใช้โปรแกรม CFD นี้ ในการแก้ปัญหาของการไหลแบบต่างๆ ผู้ทำวิจัยได้แสดงผลของการใช้โปรแกรมกับปัญหาที่ไม่ซับซ้อนและมีผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกัน (บทที่ 5)

ในบทที่ 6 ผู้ทำวิจัยต้องการแสดงให้เห็นการใช้โปรแกรม CFD นี้กับงานอาคารจริง โดยแบ่งหัวข้อในการทำงานเป็นสี่กรณี เพื่อที่จะเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอุโมงค์ลมที่มีผู้ทำมาก่อนแล้ว โดยแสดงผลในรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์ความดันลม และการกระจายของความเร็วรอบตัวอาคาร กรณีที่สามกับกรณีที่สี่เป็นกรณีที่มีผลจากอาคารข้างเคียง ทำให้ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองแล้ว มีค่าอยู่ในช่วงค่ามากที่สุดและค่าต่ำสุดของผลการทดลอง ซึ่งผลจะสอดคล้องกับการทดลองมากกว่ากรณีอาคารเดี่ยว

ผลจากการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบนี้ได้จากงานวิจัยของปฏิพัทธ์ แจ่มมังคัง (2538) โดยทำการทดลองโดยการย่อสัดส่วน 1 ต่อ 400 ในอุโมงค์ลม และเก็บค่าที่ตำแหน่งต่างๆ กันหลายๆ ครั้ง โดยมีการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงลมสูงสุดกับค่าที่ได้จากข้อกำหนดของ ANSI A58.1-1982 มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง 25 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความสูง 140 เมตรขึ้นไป และมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง 45 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความสูงต่ำกว่า 140 เมตรลงมา โดยที่ค่าจากการทดสอบภายในอุโมงค์ลมมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากข้อกำหนดของ ANSI A58.1-1982

จากการพิจารณาค่าความดันลมออกแบบที่ได้จากข้อกำหนดของ ANSI จะพบว่าความดันลมมีค่าแปรตามค่าตัวประกอบภูมิประเทศกับความดันพลวัต ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีความสูงจากพื้นดินมากขึ้น ดังนั้นค่าความดันและหน่วยแรงลมสูงสุดที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในบาวดาร์เรเลเยอร์

จากการเปรียบเทียบค่ากับการทดลอง พบว่าในกรณีที่จำลองปัญหาเป็นแบบอาคารเดี่ยว นั้น ค่าของสัมประสิทธิ์ความดันทั้งด้านคันและด้านคูด จะให้ค่าอยู่ในขอบเขตค่าสูงสุดและต่ำสุดของการทดลองในกรณีที่พิจารณาลมมาปะทะอาคารทางทิศเหนือ ในส่วนของลมที่มาปะทะอาคารทางทิศตะวันออกค่าสัมประสิทธิ์ความดันทั้งด้านคันและด้านคูด จะมีค่าออกนอกขอบเขตค่าสัมประสิทธิ์ความดันทั้งด้านคันและด้านคูดของการทดลองในช่วงระดับความสูงตั้งแต่ 120 เมตรขึ้นไป โดยค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมมีค่ามากกว่าค่ามากที่สุดของการทดลอง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบเป็นผลการทดลองของลมไหลผ่านกลุ่มอาคาร ซึ่งมีผลจากอาคารข้างเคียงที่ทำให้รูปร่างความเร็วด้านหน้าอาคารที่พิจารณาแตกต่างกัน คือกรณีอาคารเดี่ยว รูปร่างความเร็วก่อนปะทะตัวอาคารเป็นแบบคงที่ แต่รูปร่างความเร็วก่อนปะทะตัวอาคารที่พิจารณากรณีของการทดลองเป็นแบบซับซ้อนหมุนวน

เพราะฉะนั้นเมื่อผลจากการใช้โปรแกรมทาง CFD อยู่ในช่วงระหว่างค่าของผลที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลม จึงสรุปว่าการใช้การจำลองปัญหาอาคารใช้งานจริงโดยใช้โปรแกรมทาง CFD สามารถนำไปช่วยในการตัดสินใจในงานการออกแบบอาคารได้เร็วขึ้น

สาเหตุที่ทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างจากผลการทดลอง อาจเกิดจากค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของการใช้โปรแกรม CFD จากกระบวนการเหล่านี้

1. การสร้างโมเดลของโดเมนปัญหาที่แตกต่างความเป็นจริงบ้าง เนื่องจากต้องการให้จำนวนของ Mesh ไม่มากเกินไปที่สมรรถนะของเครื่องคอมพิวเตอร์ทำงานได้ ดังนั้นรูปร่างอาคารที่สร้างขึ้นเหมือนความเป็นจริงคืออาคาร JEWELRY TRADE CENTER ส่วนอาคารที่สร้างเพื่อศึกษาผลกระทบของอาคารข้างเคียงนั้นจะแตกต่างจากความจริง ทั้งตำแหน่งและจำนวนอาคารข้างเคียงไม่เหมือนกับสถานจริงทั้งหมด
2. Boundary conditions ที่ไม่ตรงกับความเป็นจริงทั้งหมด เช่นในความเป็นจริงปัญหา จะไม่เป็นแบบสมมาตร
3. แบบจำลองโมเดลที่ใช้เป็นแบบ Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  Based Model ซึ่งเป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 Equations ซึ่งให้ความแม่นยำของผลเพียงระดับหนึ่งเท่านั้น

### ข้อเสนอแนะ

ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณการไหลผ่านอาคารจริง เป็นข้อมูลของเงื่อนไขลมกรรโชกที่มีความเร็วเกินสภาวะปกติ ซึ่งจะสอดคล้องกับงานโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ดี ข้อมูลที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ที่ความเร็วเป็นปกติได้ ในลักษณะการประเมินแบบเพื่อ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ปฎิพัทธ์ แจ่มมั่งคั่ง. ผลกระทบของทิศทางลมต่อค่าแรงลมสูงสุดสำหรับการออกแบบผนังรอบอาคาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

### ภาษาอังกฤษ

Acharya, S., Dutta, S., Myrum, T.A., and Baker, R.S., Turbulent Flow Past a Surface-Mounted Two-Dimensional Rib. Journal of Fluids Engineering 116 (1994): 238-246.

Adams, E.W., and Eaton, J.K., An LDA Study of the Backward-Facing Step Flow, Including the Effects of Velocity Bias. Journal of Fluids Engineering 110 (1988): 275-282.

AEA Technology Engineering Software Limited, CFX User Documentation, Ontario, Canada, 1999.

American National Standard Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures. ANSI Standard, A58.1-1982, American National Standards Institute, 1982.

Armaly, B.F., Durst, J., Pereira, J.C.F., and Schonung, B., Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow, Journal of Fluids Engineering 127 (1983): 473-496.

ASHRAE Fundamentals Handbook (SI), Airflow Around Buildings. Chapter 16, 2001.

Baker, C.J., The Turbulent Horseshoe Vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 6 (1980): 9-23.

- Blair, M.F., Heat Transfer in the Vicinity of a Large-Scale Obstruction in a Turbulent Boundary Layer., AIAA-84-1723 (1984).
- Castro, I.P., and A.G. Robins., The Flow Around a Surface-mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams, Journal of Fluid Mechanics, 79,2 (1977): 307-355.
- Davenport, A.G., The Dependence of Wind Loads on Meteorological Parameters. Proceedings International Seminar on Winds Effect on Buildings and Structures Ottawa, 1967.
- Eckerle, W.A., and Langston, L.S., Horseshoe Vortex Formation Around a Cylinder. Journal of Turbomachinery 109(1987):278-284.
- Fox, R.W., and McDonald, A.T., Introduction to Fluid Mechanics. 4<sup>th</sup> ed. New York, John Wiley & sons, 1994.
- Launder, B.E., and Spalding, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computational Methods for Applied Mechanical Engineering 3 (1974): 269-289.
- Lai, K.Y.M., and Makomaski, A.H., Three-Dimensional Flow Pattern Upstream of a Surface-Mounted Rectangular Obstruction. Journal of Fluids Engineering 111(1989):449-456.
- Martinuzzi, R., and Havel, B., Turbulent Flow Around Two interfering Surface-Mounted Cubic Obstacles in Tandem Arrangement. Journal of Fluids Engineering 122 (2000): 24-31.
- Martinuzzi, R., and Tropea, C., The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow. Journal of Fluids Engineering 115 (1993): 85-91.
- Murakami, S., and Mochida, A., 3-D Numerical Simulation of Airflow Around a Cubic Model by Means of The  $k - \varepsilon$  Model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 31 (1988): 283-303.

- Petersen, R.L., Carter, J.J., and Cochran, B.C., Evaluating and Designing Exhaust Systems to Avoid Fume Reentry and Adverse Health Effects - Latest Developments. New York: Interphex Conference, 1999.
- Rodi, W.A., A New Algebraic Relations for Calculating the Reynolds stresses. Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik und Mechanik 56 (1976):219-221.
- Schofield, W.H., and Logan, E., Turbulent Shear Flow Over Surface-Mounted Obstacles. Journal of Fluids Engineering 112 (1990): 376-385.
- Simiu, E., and Scanlan, R.H., Wind Effects on Structures. 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, USA, 1986.
- Sloan, D.G., Smith, P.G., and Smoot, L.D., Modelling of Swirl in Turbulent Flow System. Progress in Energy Combustion Science 12 (1986): 163-250.
- Speziale, C.G., On Non-linear  $k - l$  and  $k - \varepsilon$  Models of Turbulence. Journal of Fluid Mechanics 178 (1987): 459-475.
- Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Taylor & Francis Group, 1980.
- Sun H. and Huang S., Simulation of Wind Flow Around a Building with a  $k - \varepsilon$  Model. Theoretical and Computational Fluid Dynamics. Springer-Verlag, 2001.
- Tropea, C.D., and Gackstatter, R., The Flow Over Two Dimensional Surface Mounted Obstacles at Low Reynolds Numbers. Journal of Fluids Engineering 107 (1985): 489 – 494.
- Versteeg, H.K., and Malalasekera, W., An Introduction to Computation Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Longman Scientific & Technical: London, 1995.
- Wilcox, C.D., Turbulence modeling for CFD. California: DCW Industries, 1993.
- Zhang, J., Nieh, S. and Zhou, L., A New Version of Algebraic Stress Model for Simulating Strongly swirling Turbulent Flows. Journal of Numerical Heat Transfer. 22 (1992): 49-62.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสืบศักดิ์ ประสารสุข เกิดเมื่อวันที่ 20 เมษายน พุทธศักราช 2515 จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย