


การศึกษาผลกระทบของรูปทรงของท่อต่อรูปแบบการไหล และการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลอยู่
ระหว่างครีปแผ่นและท่อด้วยเทคนิคซีเอฟดี



นาย ปัญญา รุ่งอรุณแสงชัย

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

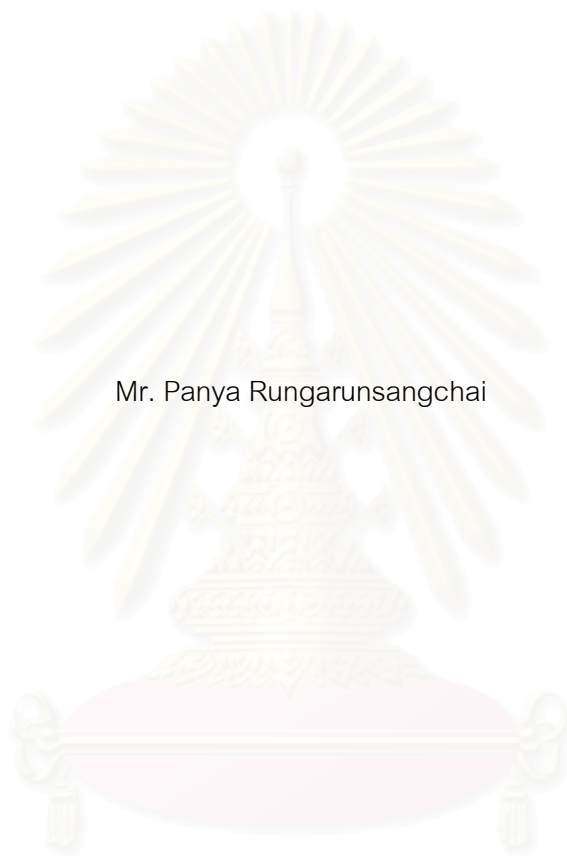
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0807-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF TUBE SHAPES AFFECTING FLOW PATTERN AND TEMPERATURE DISTRIBUTION OF
AIR FLOWING IN BETWEEN PLATE FIN AND TUBE USING CFD TECHNIQUE

Mr. Panya Rungarunsangchai



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0807-4

ปัญญา รุ่งอรุณแสงชัย : การศึกษาผลกระทบบของรูปทรงของท่อต่อรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลอยู่ระหว่างครีบบแผ่นและท่อด้วยเทคนิคซีเอฟดี (A STUDY OF TUBE SHAPES AFFECTING FLOW PATTERN AND TEMPERATURE DISTRIBUTION OF AIR FLOWING IN BETWEEN PLATE FIN AND TUBE USING CFD TECHNIQUE) อ. ที่ปรึกษา: ดร. สมประสงค์ ศรีชัย, 223 หน้า. ISBN 974-03-0807-4.

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ คือ การศึกษาลักษณะการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น และท่อ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การจำลองปรากฏการณ์จะคำนวณด้วยชุดของสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations) ซึ่งประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equations) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations) นอกจากนี้ยังต้องใช้ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Model) สำหรับการศึกษานี้ได้ใช้เทคนิค Computational Fluid Dynamics (CFD) ได้แก่โปรแกรม PHOENICS ส่วนความน่าเชื่อถือ และความเหมาะสมของโปรแกรม ได้ถูกตรวจสอบด้วยข้อมูลการทดลองของ G. P. Almeida และคณะ (1993) เพื่อคัดเลือกแบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วนที่น่าเชื่อถือมากที่สุด

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา 2 ปรากฏการณ์ คือ การศึกษาการนำความร้อน และการศึกษาการนำความร้อน และการพาความร้อนไปพร้อมกัน งานส่วนที่หนึ่ง คือ การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบที่ติดกับท่อที่มีอุณหภูมิคงที่ จำนวน 2 อันซึ่งมีการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน สำหรับงานในส่วนนี้เป็นการศึกษาปัจจัยทางด้านรูปทรงของท่อ และระยะห่างระหว่างท่อ ซึ่งรูปทรงของท่อประกอบด้วย ท่อรูปทรงแบน, ท่อรูปทรงวงรี และท่อรูปทรงหยดน้ำ ส่วนปัจจัยทางด้านระยะห่างระหว่างท่อ คือ 0.5 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตร ผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างท่อมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบแผ่นมากกว่ารูปทรงของท่อ และงานส่วนที่สอง คือ การศึกษาลักษณะการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลอยู่ระหว่างครีบบแผ่น และท่อที่มีอุณหภูมิคงที่ จำนวน 2 อันซึ่งมีการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน โดยปัจจัยที่ศึกษาในส่วนนี้จะเหมือนกับงานส่วนที่หนึ่ง และได้เพิ่มเติมปัจจัยทางด้านความเร็วขาเข้า คือ 15 เมตร/วินาที และ 20 เมตร/วินาที ผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของท่อ และระยะห่างระหว่างท่อ มีผลต่อลักษณะการไหล และการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศ นอกจากนี้ เมื่อความเร็วขาเข้าของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศมีลักษณะที่แคบกว่า แต่ความร้อนถูกกำจัดออกได้ดีขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4270417921: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: PLATE FIN AND TUBE / FLAT TUBE / ELLIPTIC TUBE / STREAMLINE TUBE / CFD.

PANYA RUNGARUNSANGCHAI: A STUDY OF TUBE SHAPES AFFECTING FLOW PATTERN AND TEMPERATURE DISTRIBUTION OF AIR FLOWING IN BETWEEN PLATE FIN AND TUBE USING CFD TECHNIQUE. THESIS ADVISOR: SOMPRASONG SRICHAJ, Ph.D., 223 pp, ISBN: 974-03-0807-4

The objective of this thesis is to study effects of tube shapes on flow pattern and temperature distribution of air flowing in between plate fin and tube using mathematical model. The Simulation were solving a set of conservation equations, consisting of continuity equations, momentum equations, energy equations and turbulent models. Computational Fluid Dynamics (CFD) Technique, i.e. PHOENICS program, was used in this study. The reliability and suitability of model and program is validated against detailed experiment data of **G. P. Almeida, et al. (1993)** for choosing the most reliable turbulent model.

The thesis was studied on two phenomena, namely, conduction and combination of conduction and convection. The first one was carried out to study temperature distribution in fins that contacted to two inlined tubes having constant temperature. This is for studying effect of tube shapes and the distances between tubes. The tube shapes included flat tube, elliptic tube, and streamline tube. The distances between tubes were 0.5 centimeter and 1.0 centimeter. Results of the simulation showed that distances between tubes had more influent on temperature distribution than tube shapes. The second was a study of flow pattern and temperature distribution of air flowing in between plate fin and two inlined tubes having constant temperature. The effect of this study was the same as the first study and also addition inlet velocities effect which are 15 m/s and 20 m/s. Results of the simulation showed that tube shapes and tube arrangement affected flow pattern and temperature distribution of air flowing in between plate fin and tube. Furthermore, when inlet velocity of air was increases, temperature distribution of air was narrower but heat was removed better.

Department ...Chemical Engineering..... Student's signature.....
 Field of study ...Chemical Engineering..... Advisor's signature.....
 Academic year.....2001..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาสละเวลาตรวจแก้ข้อบกพร่องตลอดจนให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ตลอดการวิจัย ขอกราบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ดร. วิทย์ สุนทรนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์และถูกต้องเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและญาติ ๆ ทุกท่านที่ได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมา ท้ายสุดนี้ ขอขอบคุณพี่ ๆ และ เพื่อนๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

ปัญญา รุ่งอรุณแสงชัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ว
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 มูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด.....	4
2.2 หลักการของการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	7
2.2.1 กลไกการถ่ายเทความร้อน.....	7
2.2.2 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน.....	9
2.3 ลักษณะการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของของไหล.....	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายกรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอากาศ ของ Plate-Fin-Tube Heat Exchanger	
3.1 รูปแบบทั่วไปของสมการอนุพันธ์.....	14
3.2 สมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	15
3.2.1 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว.....	16
3.2.2 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนไปพร้อมกัน.....	17

สารบัญ (ต่อ)

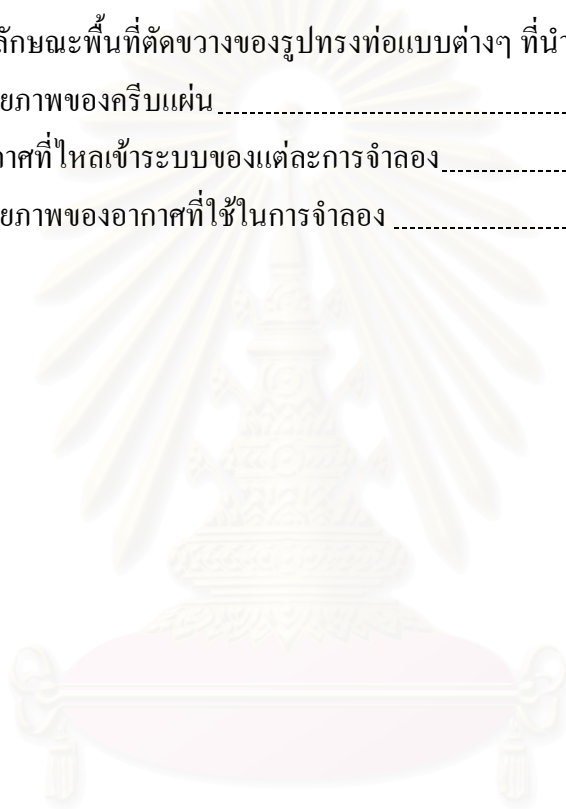
	หน้า
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วน.....	19
3.3.1 สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน.....	19
3.4 ประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลแบบปั่นป่วน.....	23
3.4.1 K – Epsilon Model.....	23
3.4.2 K – Epsilon + Yap ’s Correction Model.....	24
3.4.3 Low K – Epsilon Model.....	25
3.4.4 Low K- Epsilon + Yap’s Correction Model.....	26
3.4.5 Two Layer K –Epsilon Model.....	27
3.5 Wall Function.....	28
3.6 สมการอนุรักษ์พลังงานในระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน.....	30
บทที่ 4 เทคนิค Computational Fluid Dynamics	
4.1 ความหมายของเทคนิค Computational Fluid Dynamics.....	32
4.2 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค CFD.....	32
4.2.1 กริด (Grid).....	33
4.2.2 การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ในเป็นสมการพีชคณิต.....	35
4.3 การคำนวณความเร็วของระบบ.....	40
4.3.1 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	40
4.3.2 วิธีการ SIMPLE.....	42
4.4 การพิจารณาอุณหภูมิของระบบสถานะไม่คงตัว.....	46
4.5 วิธีการแก้สมการพีชคณิต.....	47
4.6 รีแล็กซ์ชัน (Relaxation).....	49
บทที่ 5 การเลือก Turbulence Model ที่เหมาะสมสำหรับอธิบายการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของของไหล	
5.1 รายละเอียดของการทดลองที่ใช้ในการเลือก Turbulence Model.....	50
5.1.1 ลักษณะของสิ่งกีดขวางรูปภูเขา.....	50
5.1.2 ลักษณะของชุดการทดลอง.....	51
5.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็ว.....	51
5.1.4 ข้อกำหนดของการทดลอง.....	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
5.2.1 การกำหนดกริด.....	53
5.2.2 สภาวะขอบเขต (Boundary Condition).....	55
5.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลของการจำลองโดยใช้เทคนิคซีเอฟดี.....	56
5.3.1 ผลที่ได้จากการทดลอง.....	56
5.3.2 ผลที่ได้จากการจำลอง ด้วยเทคนิคซีเอฟดี.....	63
5.3.3 สรุปผลการเลือก Turbulence Model.....	94
บทที่ 6 ผลงานวิจัยที่ทำการศึกษา	
6.1 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	98
6.1.1 รูปแบบของท่อที่ใช้ในงานวิจัย.....	98
6.1.2 การกำหนดกริด.....	99
6.1.3 สภาวะขอบเขต (Boundary Condition).....	106
6.2 ผลจากการจำลองปรากฏการณ์ที่ต้องการศึกษา.....	109
6.2.1 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว.....	109
6.2.1.1 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของแผ่นครีบริบ ที่เวลาต่างกัน.....	109
6.2.1.2 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ของแผ่นครีบริบ ที่เวลาเดียวกัน.....	125
6.2.2 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนพร้อมกัน.....	135
6.2.2.1 การเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ.....	135
6.2.2.2 การเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ.....	146
6.2.2.3 การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิกอากาศ ที่ไหลผ่านผิวท่อ.....	169
6.2.2.4 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ.....	184
บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	215
รายการอ้างอิง.....	218
ภาคผนวก ก. การแก้สมการพีชคณิตด้วยวิธี TDMA (Tri Diagonal-Matrix Algorithm).....	220
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	223

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ตารางเปรียบเทียบจุดเด่นและจุดด้อยในแต่ละแบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน.....	30
5.1 แสดงลักษณะเฉพาะทางทฤษฎีของ Laser-Doppler Velocimeter.....	51
5.2 ตารางการเปรียบเทียบตำแหน่งของจุด Separation และจุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ของแต่ละแบบจำลองที่ทำนายได้กับผลการทดลอง และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น.....	96
6.1 แสดงขนาดและลักษณะพื้นที่ตัดขวางของรูปทรงท่อแบบต่างๆ ที่นำมาศึกษา.....	98
6.2 คุณสมบัติทางกายภาพของครีปแผ่น.....	106
6.3 ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าระบบของแต่ละการจำลอง.....	107
6.4 คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศที่ใช้ในการจำลอง.....	108



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด.....	4
2.2 แสดงรูปท่อที่ใช้วิธีลดความหนาชั้นขอบ.....	5
2.3 แสดงรูปแบบของครีบทึ่มีใช้กันในปัจจุบัน.....	6
2.4 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน.....	8
2.5 แสดงรูปแบบในการไหลของอากาศเมื่อผ่าน Tube รูปทรงกลม.....	10
3.1 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็ว ของของไหลในระบบการไหลแบบปั่นป่วน ณ บริเวณใกล้ผนัง.....	28
4.1 ลำดับขั้นตอนของวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิค CFD.....	33
4.2 ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ.....	34
4.3 ลักษณะการแบ่งกริดและลักษณะของปริมาตรควบคุมที่แสดงในแบบ 2 มิติ.....	34
4.4 ลักษณะของปริมาตรควบคุมที่บริเวณสภาวะขอบเขต.....	34
4.5 ลักษณะของกริดที่ใช้ในสมการ (4.2).....	36
4.6 ลักษณะโพรไฟล์ของ ϕ ระหว่างโนดที่เป็นเส้นตรง.....	36
4.7a การกำหนดค่า ϕ_c เมื่อ F_c มีค่าเป็นบวก ด้วยวิธีอัพวินดิฟเฟอร์เรนท์.....	38
4.7b การกำหนดค่า ϕ_c เมื่อ F_c มีค่าเป็นลบ ด้วยวิธีอัพวินดิฟเฟอร์เรนท์.....	38
4.8 ตำแหน่งที่เก็บค่าองค์ประกอบของความเร็ว.....	41
4.9 ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการโมเมนตัม x-component.....	42
4.10 ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการโมเมนตัม y-component.....	42
4.11 ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการความต่อเนื่อง.....	44
4.12 ลักษณะการแก้สมการด้วยวิธีที่ละแถว.....	48
5.1 แสดงรูปภูเขาที่ใช้ในการทดลอง.....	50
5.2 ลักษณะของแบบจำลองที่ใช้ สำหรับกรณีของการเลือก Turbulence Model.....	53
5.3 ลักษณะของกริด ณ $Nx=21 - Nx=142$ สำหรับกรณี High Reynolds Mode.....	54
5.4 ลักษณะของกริด ณ $Nx=21 - Nx=142$ สำหรับกรณี Low Reynolds Model.....	54
5.5 ลักษณะของกริด ณ บริเวณ สิ่งกีดขวางรูปภูเขา.....	54
5.6 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์.....	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
5.7 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 0$ mm.....	57
5.8 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 30$ mm.....	58
5.9 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 50$ mm.....	59
5.10 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 90$ mm.....	60
5.11 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 134$ mm.....	61
5.12 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 300$ mm.....	62
5.13 แสดงลักษณะของ Separation Point และ Recirculation Zone.....	63
5.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 0$ mm	64
5.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 30$ mm.....	65
5.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 50$ mm	66
5.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 90$ mm	67
5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 134$ mm	68
5.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 300$ mm	69
5.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 0$ mm	70
5.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 30$ mm.....	71
5.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 50$ mm	72
5.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 90$ mm	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
5.38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 0$ mm	88
5.39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 30$ mm	89
5.40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 50$ mm	90
5.41 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 90$ mm	91
5.42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 134$ mm	92
5.43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 300$ mm	93
6.1 ลักษณะกริดตลอดทั้ง โดเมน ของท่อรูปทรงแบน ที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร สำหรับ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว	99
6.2 ลักษณะกริดตลอดทั้ง โดเมนของท่อรูปทรงแบน ที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร สำหรับ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว	100
6.3 ลักษณะกริดตลอดทั้ง โดเมนของท่อรูปทรงวงรี ที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร สำหรับ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว	100
6.4 ลักษณะกริดตลอดทั้ง โดเมนของท่อรูปทรงวงรี ที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร สำหรับ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว	101
6.5 ลักษณะกริดตลอดทั้ง โดเมนของท่อรูปทรงหยดน้ำที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว	101
6.6 ลักษณะกริดตลอดทั้ง โดเมนของท่อรูปทรงหยดน้ำที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว	102
6.7 ลักษณะกริดตลอดทั้ง โดเมนของท่อรูปทรงแบนที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร สำหรับ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนกับการพาความร้อนพร้อมกัน	103
6.8 ลักษณะกริดตลอดทั้ง โดเมนของท่อรูปทรงแบนที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร สำหรับ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนกับการพาความร้อนพร้อมกัน	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.37 แสดงผลการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่น ที่เวลา 9 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี เมื่อระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร.....	121
6.38 แสดงผลการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่น ที่เวลา 1 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร.....	122
6.39 แสดงผลการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่น ที่เวลา 3 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร.....	122
6.40 แสดงผลการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่น ที่เวลา 5 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร.....	123
6.41 แสดงผลการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่น ที่เวลา 7 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร.....	123
6.42 แสดงผลการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่น ที่เวลา 9 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร.....	124
6.43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่นที่แนวกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ ณ เวลาเท่ากับ 1 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S =Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร	126
6.44 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่นที่บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่หนึ่ง ณ เวลาเท่ากับ 1 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S=Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร.....	126
6.45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่นที่บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่สอง ณ เวลาเท่ากับ 1 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S=Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร	127
6.46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่นที่แนวกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ ณ เวลาเท่ากับ 3 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S =Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร.....	127
6.47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคมิกิริบแผ่นที่บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่หนึ่ง ณ เวลาเท่ากับ 3 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S=Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร.....	128

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.57 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคในครีบบนแผ่นที่บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่สอง ณ เวลาเท่ากับ 9 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S=Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร.....	133
6.58 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 1$	136
6.59 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนแผ่น ($IY = 5$).....	136
6.60 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 10$	137
6.61 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 1$	137
6.62 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนแผ่น ($IY = 5$).....	138
6.63 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 10$	138
6.64 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 1$	139
6.65 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนแผ่น ($IY = 5$).....	139
6.66 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 10$	140
6.67 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 1$	140
6.68 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนแผ่น ($IY = 5$).....	141
6.69 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับครีมีที่รูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 10$	141

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.70 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$	142
6.71 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน ($IY = 5$).....	142
6.72 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$	143
6.73 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$	143
6.74 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน ($IY = 5$).....	144
6.75 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$	144
6.76 แสดงตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน Z ที่นำมาพิจารณา สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสอง เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร	146
6.77 แสดงตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน Z ที่นำมาพิจารณา สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสอง เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร	146
6.78 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 1$	147
6.79 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบนด้าน $IY = 5$	147
6.80 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 10$	148
6.81 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 1$	148

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.100 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบนด้าน $IY = 5$	158
6.101 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 10$	158
6.102 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 1$	159
6.103 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบนด้าน $IY = 5$	159
6.104 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 10$	160
6.105 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 1$	160
6.106 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบนด้าน $IY = 5$	161
6.107 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 10$	161
6.108 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 1$	162

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.109 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบนด้าน $IY = 5$	162
6.110 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 10$	163
6.111 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 1$	163
6.112 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบนด้าน $IY = 5$	164
6.113 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 10$	164
6.114 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 1$	165
6.115 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบนด้าน $IY = 5$	165
6.116 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 10$	166
6.117 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 1$	166

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.118 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบนด้าน $IY = 5$	167
6.119 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน ด้าน $IY = 10$	167
6.120 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบน สำหรับ กรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนัง ของครีบบนด้าน $IY = 1$	171
6.121 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบน สำหรับ กรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลาง ของช่องว่างระหว่างครีบบน ($IY = 5$).....	171
6.122 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบน สำหรับ กรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนัง ของครีบบนด้าน $IY = 10$	172
6.123 การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบน สำหรับกรณีท่อ รูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ในระนาบ XY.....	172
6.124 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบน สำหรับ กรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนัง ของครีบบนด้าน $IY = 1$	173
6.125 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบน สำหรับ กรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลาง ของช่องว่างระหว่างครีบบน ($IY = 5$).....	173
6.126 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบน สำหรับ กรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนัง ของครีบบนด้าน $IY = 10$	174
6.127 การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบน สำหรับกรณีท่อ รูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ในระนาบ XY.....	174

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.138 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคมืดอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างคริสแบน สำหรับ กรณีต่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนัง ของคริสแบนด้าน $IY = 10$	180
6.139 การกระจายตัวของอนุภาคมืดอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างคริสแบน สำหรับกรณีต่อ รูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ในระนาบ XY	180
6.140 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคมืดอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างคริสแบน สำหรับ กรณีต่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนัง ของคริสแบนด้าน $IY = 1$	181
6.141 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคมืดอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างคริสแบน สำหรับ กรณีต่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลาง ของช่องว่างระหว่างคริสแบน ($IY = 5$)	181
6.142 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคมืดอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างคริสแบน สำหรับ กรณีต่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนัง ของคริสแบนด้าน $IY = 10$	182
6.143 การกระจายตัวของอนุภาคมืดอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างคริสแบน สำหรับกรณีต่อ รูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ในระนาบ XY	182
6.144 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกน Z ที่นำมาพิจารณา สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อ ทั้งสองเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร	184
6.145 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกน Z ที่นำมาพิจารณา สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อ ทั้งสองเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร	184
6.146 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอนุกรมของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของคริสแบน ด้าน $IY = 1$	185
6.147 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอนุกรมของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง คริสแบนด้าน $IY = 5$	185

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.148 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	186
6.149 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	186
6.150 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	187
6.151 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	187
6.152 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	188
6.153 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	188
6.154 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	189
6.155 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	189
6.156 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	190

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.157 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	190
6.158 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	191
6.159 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	191
6.160 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	192
6.161 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	192
6.162 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	193
6.163 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	193
6.164 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	194
6.165 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	194

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.166 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	195
6.167 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	195
6.168 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	196
6.169 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	196
6.170 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	197
6.171 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	197
6.172 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	198
6.173 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	198
6.174 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	199

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.175 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 10$	199
6.176 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 1$	200
6.177 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบแผ่นด้าน $IY = 5$	200
6.178 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 10$	201
6.179 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 1$	201
6.180 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบแผ่นด้าน $IY = 5$	202
6.181 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 10$	202
6.182 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 1$	203
6.183 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบแผ่นด้าน $IY = 5$	203

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.184 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	204
6.185 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	204
6.186 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	205
6.187 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	205
6.188 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	206
6.189 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	206
6.190 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	207
6.191 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	207
6.192 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	208

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
6.193 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	208
6.194 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	209
6.195 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	209
6.196 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	210
6.197 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 1$	210
6.198 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่าง ครีบบ่นด้าน $IY = 5$	211
6.199 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่น ด้าน $IY = 10$	211

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่ที่ตั้งฉากกับแรงดันที่กระทำ
a	สัมประสิทธิ์ของสมการพีชคณิต
\hat{c}_p	ความจุความร้อนจำเพาะเชิงความดันต่อมวล
C_{μ}, C_1, C_2	ค่าคงที่ของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน
E	ค่าบงบอกความขรุขระของผนัง
f_x, f_y, f_z	แรงที่กระทำบนทุกๆ จุดในระบบต่อหน่วยมวล
g	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (laminar Value) ค่าพลังงานจลน์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนต่อมวล
P	ความดัน
\bar{P}	ความดันเฉลี่ย
P'	ความดันปรับปรุ้ง
P^*	ความดันเดาเริ่มต้น (Initial guess pressure)
Pr	ตัวเลขพแลงเคิล (Prandtl number)
q_x, q_y, q_z	ฟลักซ์ของความร้อน
\bar{q}_t	Turbulent energy flux
S	แหล่งกำเนิด
t	เวลา
T	อุณหภูมิ
\bar{T}	อุณหภูมิเฉลี่ย
u^*	Friction velocity
U_0	ความเร็วที่แนวกึ่งกลาง Water Tunnel
u, v, w	องค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแกน x, y, z
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	ความเร็วเฉลี่ยตามแกน x, y, z
u', v', w'	ความเร็วที่เบี่ยงเบนไปจากความเร็วเฉลี่ยตามแกน x, y, z
X	ทิศทางตามความกว้างของ Plate Fin
Y	ทิศทางตามระยะห่างระหว่าง Plate Fin
Z	ทิศทางตามความยาวของ Plate Fin

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

X_{Sim}	ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
X_{Exp}	ค่าที่ได้จากการทดลอง
h	ค่าความสูงของสิ่งกีดขวาง
%Error	เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน

สัญลักษณ์กรีก

ε	อัตราการกระจายของพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วน
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืด
μ_t	ความหนืดของการหมุนวน (Eddy viscosity)
α	รีแล็กซ์ชัน
λ	สัมประสิทธิ์อันดับที่สองของความหนืด
τ	ความเค้นเฉือน
ϕ	ตัวแปรที่ต้องการศึกษา
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	ค่าความปั่นป่วนแฟลงเคิลของค่า k, ε ตามลำดับ
Γ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ ϕ
δ_x	ระยะห่างระหว่างโนดสองโนด
K	ค่าคงที่ของ Von Karman

ตัวห้อย

Sim	Simulation
Exp	Experiment

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มุลเหตุจูงใจ

ถ้ากล่าวถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อาจจะกล่าวได้ว่ามีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะงานด้านวิศวกรรมเคมี ที่จำเป็นต้องมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการต่าง ๆ โดยที่อุปกรณ์ที่เลือกใช้จะมีความแตกต่างกัน ตามเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ขนาดของพื้นที่ที่จะติดตั้งเครื่อง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ต้องการ เป็นต้น ในปัจจุบัน มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากมายหลายประเภทโดยแบ่งตามโครงสร้าง เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (Shell & Tube Exchanger), เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double-Pipe Exchanger), เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด (Compact Exchanger) ฯลฯ โดยเฉพาะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดที่มีการนำมาใช้มากในงานอุตสาหกรรมที่มีพื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ที่จำกัดได้มีการพัฒนารูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้ ให้เหมาะกับการใช้งานที่มากขึ้น โดยเริ่มตั้งแต่การใช้ครีบบนแผ่นเรียบ (Plate Fin) ที่พับเป็นช่องให้ของไหลไหลผ่านเพียงอย่างเดียว หรือการใช้ครีบบนแผ่นเรียบ (Plate Fin) ร่วมกับท่อแบบทรงกลม (Round Tube) หรือ ท่อแบน (Flat Tube) จนได้มีการพัฒนารูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่คำนึงถึงพื้นที่และระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสเพื่อประโยชน์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหล 2 ชนิด อย่างเช่น ครีบบนลอนคลื่น (Wavy Fin) ครีบบนช่องหน้าต่าง (Louver Fin) แทนครีบบนแผ่นเรียบ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการใช้ครีบบนแผ่นแบบนี้ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่สูงขึ้น แต่เมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพมาก ก็จะทำให้ราคาในการผลิตและการบำรุงรักษาอุปกรณ์มีค่าที่สูงขึ้น ในกรณีของการใช้งานที่ไม่ต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากอย่างเช่น เครื่องปรับอากาศ (Air Condition) และ อุปกรณ์ทำความร้อนกับทำความเย็นให้กับก๊าซ (Heater and Cooler) เป็นต้น ผู้ผลิตมีความสนใจที่จะออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้งาน Plate Fin และ ท่อ ที่มีสมรรถนะที่สูงขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าแบบที่ใช้ ครีบบนลอนคลื่น (Wavy Fin) และ ครีบบนช่องหน้าต่าง (Louver Fin) แต่ประสิทธิภาพเหมาะสมกับสภาพของการทำงานโดยมีค่าใช้จ่ายในการผลิตและการบำรุงรักษาที่ต่ำกว่า

จากที่กล่าวข้างต้น การที่จะเพิ่มสมรรถนะให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate Fin and Tube ได้ต้องทำให้เวลาในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จากข้อมูลที่ได้มีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้พบว่า การที่จะเพิ่มเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนนั้น นอกจากเปลี่ยนรูปแบบของแผ่นครีบบแล้ว ยังสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงรูปทรงของท่อได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยทางรูปทรงของท่อในรูปลักษณะที่แตกต่างกัน โดยจะพิจารณาผลกระทบต่ออัตราการไหลของของไหลด้านที่สัมผัสผิวด้านนอกท่อเป็นสำคัญ ด้วยเหตุผลที่ว่า ถ้าของไหลมีการสัมผัสกับผิวท่อมากเท่าไร จะเป็นการพาความร้อนออกจากระบบได้มากขึ้นและทำให้สมรรถนะของเครื่องเพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้เทคนิคซีเอฟดี (Computational Fluid Dynamics) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนที่ครีบบแผ่นเรียบ ร่วมกับท่อที่มีรูปทรง และการจัดวางที่แตกต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาผลกระทบทางรูปทรงของท่อต่อรูปแบบของการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศบนพื้นผิวของครีบบแผ่น โดยอาศัยเทคนิคซีเอฟดี (Computational Fluid Dynamic)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. การจำลองการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบแผ่นและท่อ จะศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศบนพื้นผิวของครีบบแผ่น ภายใต้สภาวะ ดังต่อไปนี้ดังนี้

- 1.1 การไหลของอากาศเป็นแบบ Turbulence
- 1.2 ความเร็วของอากาศเข้าเป็นแบบ Uniform
- 1.3 อุณหภูมิที่ผิวของ Tube ที่เป็นแหล่งของความร้อนมีค่าคงที่

2. ลักษณะรูปแบบของท่อศึกษาจะประกอบด้วย

- 2.1 ทรงแบน (Flat Tube)
- 2.2 ทรงวงรี (Elliptic Tube)
- 2.3 ทรงหยดน้ำ (Streamline Tube)

โดยกำหนดให้มีการจัดวางท่อแบบ 2 แถวในลักษณะแนวเดียวกัน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตร

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ Turbulence Model ที่ใช้จะพิจารณาความแตกต่างจากแบบจำลองดังต่อไปนี้

1. Standard k- ϵ Model
2. Standard k- ϵ Model + Yap's Correction
3. Low-Re ของ k- ϵ Model
4. Low-Re ของ k- ϵ Model + Yap's Correction
5. Two-Layer ของ k- ϵ Model

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate-fin-tube
2. ศึกษาเทคนิคซีเอฟดี และโปรแกรม PHOENICS ซึ่งใช้เทคนิคซีเอฟดี ในการคำนวณ
3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการงานวิจัยนี้
4. ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้
5. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกมาทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวของ Plate Fin ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate-fin-tube
6. วิเคราะห์และสรุปผล
7. จัดทำวิทยานิพนธ์เป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้ สามารถแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศบนพื้นผิวของครีบบริเวณ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate-fin-tube

2. สามารถนำเทคนิคซีเอฟดี มาช่วยในการพิจารณาปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate-fin-tube เพื่อลดงบประมาณในการสร้างชุดการทดลอง

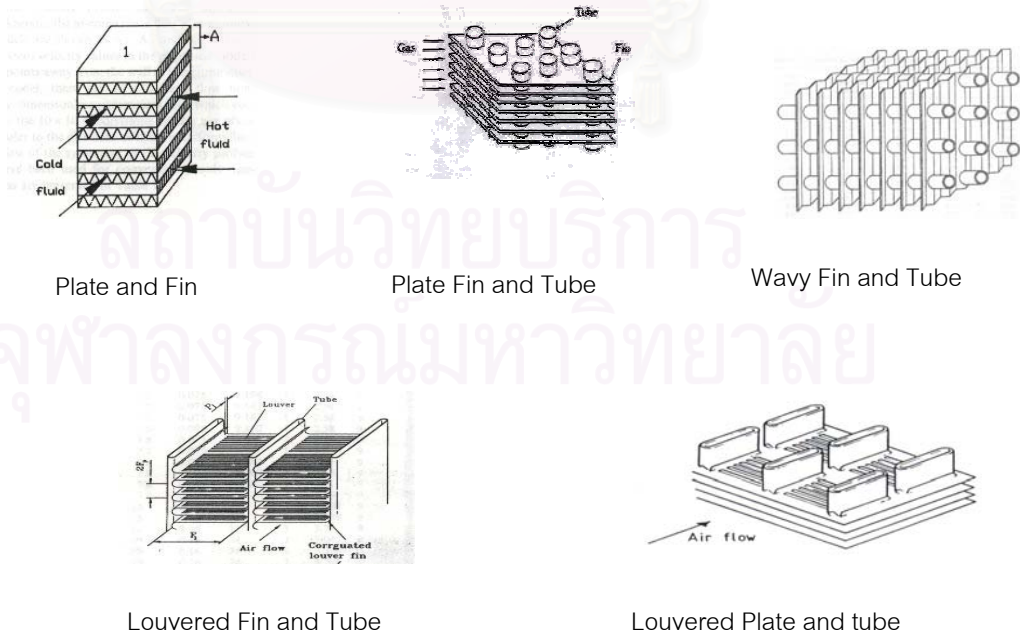
บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเริ่มจากกล่าวถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการ
ทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งประกอบด้วย กลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องในการ
คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันตกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และกลศาสตร์ของ
ไหลเมื่อมีสิ่งกีดขวาง และในตอนท้ายจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด (Compact Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้ ได้แนวคิดริเริ่มที่ต้องการลดขนาดของเครื่องให้เล็กที่สุด
แต่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนสูง ซึ่งหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลอุณหภูมิสูง (Hot Fluid) กับ
ของไหลอุณหภูมิต่ำ (Cold Fluid) ในลักษณะการไหลแบบ Cross Flow ซึ่งของไหลทั้งสองชนิดต้อง
สะอาดเพื่อป้องกันการอุดตันภายในเครื่อง เนื่องจากการซ่อมแซมและทำความสะอาดเครื่องทำได้ยาก
ส่วนอุณหภูมิหรือความดันที่ใช้ได้ก็มีจำกัด แต่ก็มีการพัฒนาในรูปแบบต่างๆ มากมายตั้งแต่ แบบ Plate and
Fin, Plate Fin and Tube, Wavy Fin and Tube, Louvered Fin and Tube, Louvered Plate fin and tube ฯลฯ
โดยรูปแบบที่กล่าวข้างต้นมีการนำมาใช้กับงานที่แตกต่างกัน เช่น หม้อน้ำรถยนต์ เครื่องปรับอากาศ
เครื่องให้ความร้อนก๊าซ และเครื่องให้ความเย็นก๊าซ เป็นต้น [1]



รูปที่ 2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้สำหรับของไหลอุณหภูมิสูงไหลผ่าน และ ส่วนที่ใช้สำหรับของไหลอุณหภูมิต่ำไหลผ่าน โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

2.1.1 ส่วนที่ใช้สำหรับของไหลอุณหภูมิสูง

อุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นท่อในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ท่อที่สร้างครีบบ้านที่พับให้เป็นช่อง ท่อรูปทรงกลม ท่อรูปทรงแบน เป็นต้น นอกจากนี้ ในปัจจุบันมีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยการลดความหนาของชั้นขอบ (Boundary Layer Thickness) (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2) ที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของท่อ เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราถ่ายเทความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงสู่ผนังของท่อให้มากขึ้น โดยรูปแบบที่ใช้ในการลดความหนาของชั้นขอบที่ใช้คือการทำให้พื้นผิวของท่อมีรอย เช่น รอยแบบ Dimple และ รอยแบบ Rim ดังรูปที่ 2.2 แต่มีข้อจำกัดด้านความดันลดของระบบ และ ปัญหาการอุดตันภายในท่อ เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดนั้นมีขนาดเล็ก ดังนั้นในการลดความหนาชั้นขอบ จะต้องคำนึงถึงปัญหาเหล่านี้ด้วย



ท่อแบบ Dimple



ท่อแบบ Rim

รูปที่ 2.2 แสดงรูปท่อที่ใช้วิธีลดความหนาชั้นขอบ

2.1.2 ส่วนที่ใช้สำหรับของไหลอุณหภูมิต่ำ

ส่วนประกอบนี้เป็นจุดเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสในการการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่ใช้จะเรียกว่า ครีบ (Fin) ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาไว้หลายรูปแบบต่างๆ เช่น แบบครีบแผ่น (Plate Fin), แบบลอนคลื่น (Wavy Fin), แบบช่องหน้าต่าง (Louvered Fin), Spine Fin, Perforated Fin เป็นต้น และรูปแบบที่มีการผสมผสานกันระหว่าง Plate Fin กับ Louvered Fin หรือที่เรียกสั้นๆว่า Louvered Plate Fin ดังรูปที่ 2.3 โดยแต่ละแบบจะให้ประสิทธิภาพที่มากน้อยแตกต่างกัน

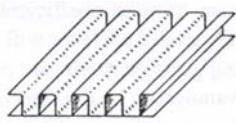
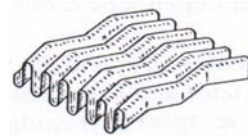
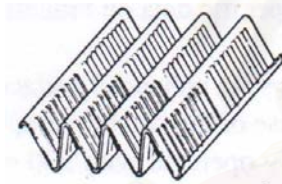


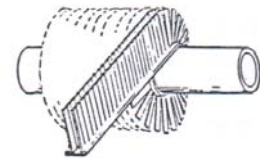
Plate Fin



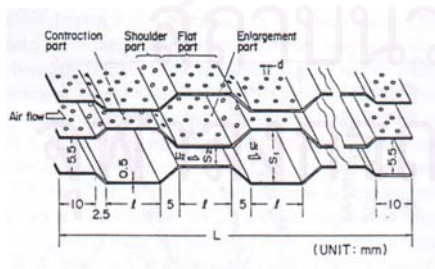
Wavy Fin



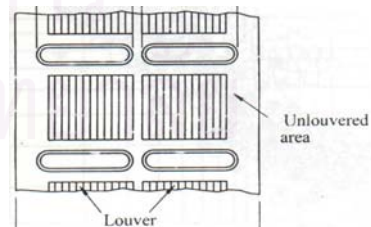
Louvered Fin



Spine Fin



Perforated Fin



Louvered Plate Fin

รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบของครีบที่มีใช้กันในปัจจุบัน

2.2 หลักการของการแลกเปลี่ยนความร้อน

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด และสมการเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อน

2.2.1 กลไกการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) โดยทั่วไปจะมีรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนอยู่ 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) แต่กลไกการถ่ายเทความร้อนหรือกลไกของการเคลื่อนที่ของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นประกอบด้วย การนำความร้อน และการพาความร้อน สำหรับการนำความร้อนนั้นจะเกิดภายในผนังท่อและแผ่นครีป ส่วนการพาความร้อนจะเกิดระหว่างน้ำกับพื้นผิวภายในท่อ และเกิดระหว่างผิวภายนอกท่อและพื้นผิวของครีปกับอากาศ โดยน้ำที่ไหลภายในท่อจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้กับผิวท่อด้านในและมีอากาศที่ไหลผ่านทางด้านนอกของท่อและแผ่นครีปจะเป็นตัวพาความร้อนออกจากท่อและครีป

1. การนำความร้อน

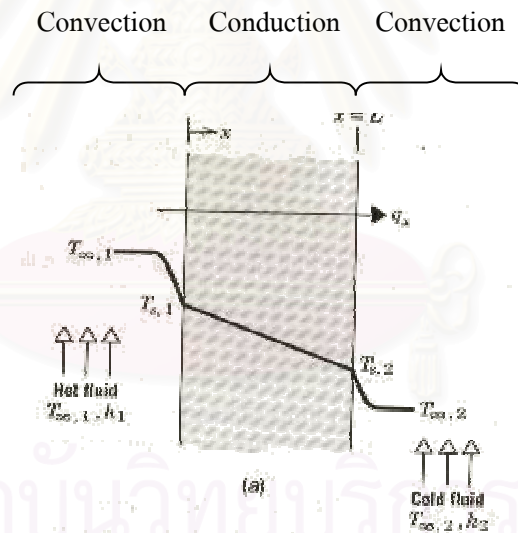
เป็นปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในวัตถุชิ้นหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันทุกๆจุด หรือ เมื่อนำวัตถุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาสัมผัสกัน ปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดอัตราการนำความร้อนคือ ผลต่างของอุณหภูมิ มิติและรูปแบบของวัตถุ และคุณสมบัติของวัตถุ

การนำความร้อนจะมีอยู่ 2 ลักษณะดังนี้ คือ การนำความร้อนในสภาวะคงที่ (Steady-state Heat Conduction) คือปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยของวัตถุในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าที่คงที่ และการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady-state Heat Conduction) คือ อัตราของการนำความร้อนจะแปรผันตามเวลา ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นแบบสภาวะไม่คงที่ เมื่อแหล่งความร้อนมีค่าของอุณหภูมิไม่คงที่ และเป็นแบบสภาวะคงที่ เมื่อแหล่งความร้อนมีค่าของอุณหภูมิคงที่

2. การพาความร้อน

เป็นปรากฏการณ์เฉพาะของของไหล เพราะจะเกิดขึ้นกับก๊าซและของเหลวเท่านั้น ในการพาความร้อน โมเลกุลของก๊าซหรือของเหลวจะเคลื่อนที่ไปยังผิวถ่ายเทความร้อนอย่างไม่ขาดสาย และทำการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวนั้น ด้วยเหตุนี้ ยิ่งการเคลื่อนที่ของโมเลกุลมีความกระฉับกระเฉงมากขึ้นเท่าใด อัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะสูงขึ้นเท่านั้น เพราะจำนวนของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวถ่ายเทความร้อนมีมากขึ้น

การพาความร้อนมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่อาศัยแรงภายนอกกระทำ เรียกว่า การพาโดยบังคับ (Forced Convection) และ แบบที่ไม่มีแรงใด ๆ จากภายนอกกระทำแต่เคลื่อนที่ด้วยแรงลอยตัว เรียกว่า การพาอย่างอิสระ (Free Convection) ดังนั้น ลักษณะการไหลของของไหลจึงมีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อพิจารณารูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate Fin Tube จะเห็นว่าของไหลมีการไหลผ่าน tube ด้วยเหตุนี้ในหัวข้อถัดไปจะเป็นความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของของไหล



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่า การถ่ายเทความร้อนในแต่ละครั้ง กลไกการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน 2 ครั้ง คือ ครั้งแรกจะเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลอุณหภูมิสูง กับ พื้นผิวของท่อ และครั้งที่สองจะเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของท่อกับของไหลอุณหภูมิต่ำ และการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน 1 ครั้ง คือ การถ่ายเทความร้อนภายในความหนาของผนังท่อ เสมอ ซึ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้งสองแบบที่สมการในการคำนวณ ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

2.2.2 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน

ในส่วนนี้จะแสดงสมการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการนำความร้อน และ การพาความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ

ในปี พ.ศ. 2365 โจเซฟ ฟูรีเยร์ (Joseph Fourier) ได้เสนอความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ดังสมการที่ 2.1 ด้วยเหตุผลที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จะแปรผันตามค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิตามแนวแกน และสัดส่วนของค่าทั้งสองเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

โดยที่

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง และอุณหภูมิ

A คือ พื้นที่ที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน

$\frac{dT}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา

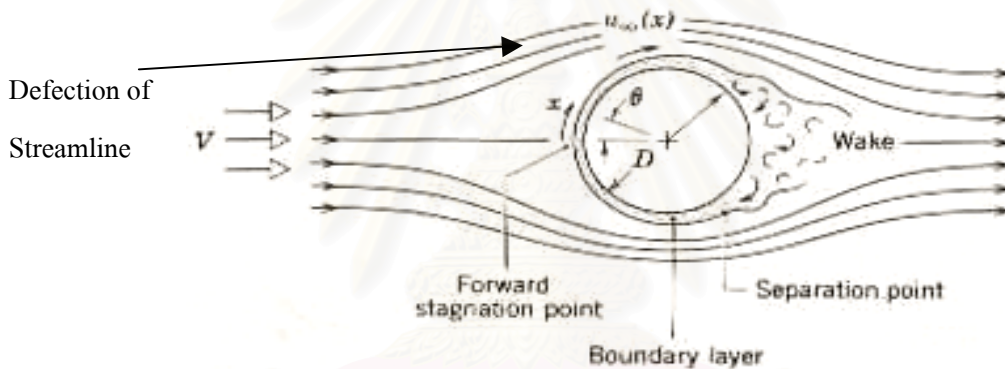
นิวตัน (Newton) ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ดังสมการที่ 2.2 ด้วยเหตุผลที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะแปรผันตามค่าผลต่างของอุณหภูมิสูงกับอุณหภูมิต่ำ (ΔT) และสัดส่วนของค่าทั้งสองจะเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวคือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$$\frac{Q}{A} = h (T_h - T_c) \quad (2.2)$$

- โดยที่ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน
 h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล คำนวณได้จากความสัมพัทธ์
 ซึ่งได้จากการทดลอง
 A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน
 T_h, T_c คือ อุณหภูมิของของไหลที่มีอุณหภูมิสูงและต่ำตามลำดับ

2.3 ลักษณะการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของของไหล

จากหลักการกลศาสตร์ของไหล เมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง ของไหลจะเปลี่ยนทิศทางและความเร็วของการไหล ดังนั้นอากาศเมื่อไหลผ่านพื้นที่ผิวภายนอกของสิ่งกีดขวางที่เป็นท่อ (External Flow) รูปแบบการเคลื่อนที่ของอากาศจะเปลี่ยนไปตามลักษณะของสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบในการไหลของอากาศเมื่อผ่าน Tube รูปทรงกลม

จากรูป แสดงถึงการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านท่อรูปทรงกลม จะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้

1. การเบี่ยงเบนของกระแสการไหล (Deflection of Streamline) อากาศเคลื่อนที่ในบริเวณที่เรียกว่า Region of Displacement ความเร็วปกติเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทาง แต่ไม่เปลี่ยนแปลงความดัน ความเร็วที่ผ่านด้านบนของ Tube จะสูง ซึ่งเป็นผลให้ความดันในช่วง Upstream มีค่าที่สูงขึ้น
2. Wake เป็นบริเวณที่มีความปั่นป่วน โดยเริ่มเกิดที่บริเวณขอบของผิวด้านบนของ Tube หรือที่เรียกว่า Separation Point และเพิ่มขึ้นที่หลังจากผ่านด้านหลังของ Tube ไปแล้ว ซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศมีทิศทางการไหลที่ไม่แน่นอน โดยที่อากาศมีไหลหมุนเข้าไปในบริเวณด้านหลังของ Tube จนเป็น Eddies Form ซึ่งผลกระทบในช่วงนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมีทั้งที่เพิ่มขึ้นหรือลดน้อยลง นั้นจะขึ้นกับว่า ณ บริเวณที่มีการเกิด Wake ขึ้นนั้น ไปขัดขวางหรือเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน แต่ค่าของความดันจะมีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าความดันในช่วง Upstream

3. **Boundary Layer** จะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของวัตถุที่มีของไหลไหลผ่าน โดยจะมีความหนา มากหรือน้อยนั้น จะขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพของของไหลและลักษณะพื้นผิวของวัตถุ โดยที่ภายใน Boundary Layer นั้นจะมีความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นจากศูนย์ที่ผิวของวัตถุที่ไม่มีการเคลื่อนที่จนมีความเร็วเต็มที่ที่ระดับความหนาสูงสุดของ Boundary Layer ซึ่งเป็นบริเวณที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากชั้น Boundary Layer จะเป็นเสมือนตัวต้านการแลกเปลี่ยนความร้อน (Thermal Resistance)

ดังนั้นในการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการไหลของของไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นแหล่งความร้อนจะต้องคำนึงถึงรูปทรง และขนาดของสิ่งกีดขวาง เพราะจะมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน และ ความดันลดยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้ ยังต้องคำนึงถึงความเร็วในการไหลของของไหลด้วย เพราะถ้าของไหลไหลช้าจะทำให้การพาความร้อนออกจากแหล่งความร้อนเป็นไปได้ช้า แม้จะมีการถ่ายเทแบบนำความร้อนดีแค่ไหนก็ตาม

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

E.C.Rosman, P.Carajilescor และ F.E.M. Saboya [1984][2] ทำการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวของครีป โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิบนบนพื้นผิวของครีป ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีปแผ่นและท่อที่มีลักษณะของชุดการจำลอง ดังนี้ คือ ประกอบด้วยท่อรูปทรงกลม จำนวน 1 แถว และ 2 แถว โดยแบบที่มี tube 2 แถว และมีลักษณะการเรียงตัวของ Tube เป็นแบบเรียงเหลื่อมกัน โดยทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่า Reynolds Number ต่างกัน และ วัสดุของครีปที่ต่างกัน ของทั้งสองกรณีการจัดเรียง ซึ่งผลที่ได้ของกรณีท่อเรียงกันหนึ่งแถว คือ การกระจายตัวของอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วจากศูนย์กลางของท่อ และประสิทธิภาพลดลงจาก 92.4 เป็น 82.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่า Reynolds Number เพิ่มขึ้น และผลการเปรียบเทียบวัสดุของครีปที่แตกต่างกัน ก็ได้ผลคล้ายกันคือ การกระจายตัวของอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วจากศูนย์กลางของท่อ เมื่อค่า การนำความร้อนเพิ่มขึ้น, กรณีท่อเรียงกันสองแถว ก็ได้ผลที่คล้ายกับกรณีท่อเรียงกันหนึ่งแถวเช่นเดียวกัน และ กรณีของค่าประสิทธิภาพของครีป ผลที่ได้ คือ ประสิทธิภาพของครีปมีค่าลดลง เมื่อค่า Reynolds Number มีค่าสูง หรือ ค่าการนำความร้อน มีค่าลดลง และ ประสิทธิภาพของครีปมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนแถวเพิ่มขึ้นเป็น 2 แถว เมื่อค่าการนำความร้อน และ ค่า Reynolds Number เท่ากัน

Jiin-Yun Jang, Mu-Cheng Wu และ Wen-Jeng Chang [1996][3] ทำการทดลองเป็น 2 รูปแบบ คือ การทดลอง (Experimental) เป็นการศึกษาโดยมี รูปแบบของท่อเป็นรูปทรงกลม และใช้รูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใน 3 รูปแบบ โดยมีความแตกต่างกันที่ค่าของจำนวนครีป ซึ่งมีค่าดังนี้ คือ 8, 10, 12 (ครีปต่อความยาว 1 นิ้ว) เป็นต้น และ ด้าน Numerical ใช้ชุดจำลองจำนวน 2 รูปแบบที่ ประกอบด้วย จำนวนของท่อรูปทรงกลมจำนวน 4 อัน โดยเรียงกันเป็น 4 แถว และค่าของจำนวนครีปที่ 8 ครีป ต่อนิ้ว ทั้ง 2 รูปแบบจะต่างกันที่รูปแบบการเรียงตัวของ tube คือ แบบแนวเดียวกัน และแบบเรียงเหลื่อมกัน ผลงานวิจัยที่ได้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันลดของระบบที่มีการจัดเรียงตัวท่อแบบเหลื่อมกันจะมีค่าที่สูงกว่าของระบบที่มีการจัดเรียงตัวท่อแบบแนวเดียวกัน ประมาณ 15-27% และ 20-25% ตามลำดับ ส่วนค่า Nusselt Number จะมีค่าที่ลดลงเมื่อจำนวนแถวของท่อเพิ่มขึ้น และ จำนวนแถวจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยลงเมื่อจำนวนแถวของท่อมีมากกว่า 4 แถว โดยผลจากทั้งสองวิธีจะมีความใกล้เคียงกัน

Rocha L.A.O., Saboya F.E.M. และ Vargas J.V.C. [1997][4] ทำการศึกษาปัจจัยทางด้านรูปแบบท่อ และ จำนวนแถวของท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีปแผ่นและท่อ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับระหว่างค่าประสิทธิภาพของ ครีป กับค่า Reynolds Number โดยที่จะพิจารณาในรูปแบบ 2 มิติ ด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และรูปแบบท่อที่ใช้จะเป็นท่อรูปทรงกลม (Eccentricity = 1) กับท่อรูปทรงวงรี โดยมีค่า Eccentricity เท่ากับ 0.5 กับ 0.65 และ จำนวนแถวของท่อเป็นแบบ 1 แถว และ แบบ 2 แถว ผลที่ได้คือ ท่อรูปทรงวงรีให้ประสิทธิภาพของครีปแผ่นที่ดีกว่าท่อรูปทรงกลม โดยเฉพาะเมื่อท่อรูปทรงวงรี มีค่า Eccentricity เท่ากับ 0.5 และจำนวนแถวเท่ากับสองแถวจะให้ประสิทธิภาพของครีปแผ่นที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับค่า Reynolds Number และค่าการนำความร้อนเดียวกัน

S. F. Tsai และ Tony W.H. Sheu [1998][5] ทำการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีปแผ่นและท่อโดยใช้หลักการทาง 3 มิติ ของ Numerical มาช่วยในการทำนาย เพื่อแสดงลักษณะ การไหลของของไหล และ หาค่าของ Span-Average Pressure Drop และ Span-Averaged Heat Transfer Rate โดยจะเปรียบเทียบกับด้วยความเร็วของของไหลที่ต่าง ๆ กัน ซึ่งรูปแบบที่ใช้ประกอบด้วย Tube จำนวน 2 Tube เรียงกันแบบเหลื่อมกัน ผลที่ได้คือค่า Span-Average Pressure Drop ในแนวตั้งของท่อมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อค่า Reynolds Number เพิ่มขึ้น แต่มีค่าลดลง ณ บริเวณที่อากาศไหลผ่านท่อ โดย ณ บริเวณที่อากาศไหลผ่านท่อที่สองจะมีอัตราการลดลงที่มากกว่าผ่านท่อแรก สำหรับค่า Span-Averaged Heat Transfer Rate จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า Reynolds Number เพิ่มขึ้น โดย ณ บริเวณท่อแรกจะมีอัตราการเพิ่มค่า Span-Averaged Heat Transfer Rate สูงกว่า ณ บริเวณ ท่อที่สอง และจะคงที่ค่าหนึ่งเมื่ออากาศไหลออกจากระบบแล้ว

Ricardo Romero-Méndez, Mihir Sen, K.T. Yang และ Rodney McClain [2000][6] ทำการศึกษาผลกระทบทางด้านนอกของท่อ ด้วยการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างครีบบนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบนและท่อ โดยใช้ชุดการจำลอง ที่ประกอบด้วยท่อรูปทรงกลม 1 อันที่อยู่ระหว่างแผ่นครีบบน 2 แผ่น โดยการทดลองจะศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศเมื่อไหลผ่านผิวท่อรูปทรงกลม และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย ค่า Local Nusselt Number (Nu) และ ลักษณะการไหลเช่นเดียวกับการทดลอง ผลงานวิจัยที่ได้ คือ ที่ระยะห่างระหว่างครีบบนเล็ก ๆ ผลของการไหลผ่านท่อที่มีรูปแบบเป็น Hele-Shaw ในลักษณะสมมาตรทั้งด้านหน้าและด้านหลังท่อ แต่เมื่อระยะห่างระหว่างครีบบนมีค่าเพิ่มขึ้นจะเริ่มเกิด Separation ซึ่งนำไปสู่การเกิด Recirculation ที่บริเวณด้านหลังของท่อ เมื่อพิจารณาค่า Local Nusselt Number (Nu) จะได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างครีบบนเล็ก ๆ ค่า Local Nusselt Number (Nu) ต่ำ แต่เมื่อระยะห่างระหว่างครีบบนมีค่าเพิ่มขึ้นค่า Local Nusselt Number (Nu) จะสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ด้านหน้าของท่อจะมีค่าสูงที่สุด ส่วนบริเวณด้านหลังของท่อ ค่า Local Nusselt Number (Nu) จะมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างครีบบน จากผลได้พบว่า การเกิด Recirculation จะมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าไม่เกิด Recirculation

จากงานศึกษาการสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ ครีบบนและท่อทางด้านนอกของท่อ (Air Side) ซึ่งมีทั้งการทดลอง และ การจำลองการทำงานของเครื่องเพียงบางส่วน แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีการไหลของอากาศจะเป็นแบบไหลเป็นชั้น (Laminar Flow) แต่ถ้าอากาศไหลผ่านเครื่องมีการไหลแบบปั่นป่วน อาจทำให้ผลที่ได้ศึกษามีความคลาดเคลื่อนได้ ด้วยเหตุผลนี้งานวิจัยนี้เป็นศึกษาในกรณีที่อากาศที่การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในลักษณะ 3 มิติ ดังจะมีรายละเอียดของการศึกษาต่อไป

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบาย กรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนด้านอากาศของ Plate-Fin-Tube Heat Exchanger

ในการอธิบายปรากฏการณ์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิ ด้านอากาศของ Plate – Fin - Tube Heat Exchanger จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations) ซึ่งประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equations) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations) นอกจากนี้ยังต้องใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Model) อธิบายสภาวะการไหลของของไหลในระบบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งรายละเอียดของส่วนต่างๆ มีดังต่อไปนี้

3.1 รูปแบบทั่วไปของสมการอนุรักษ์

สมการอนุรักษ์ในระบบพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate) ในรูปแบบ 3 มิติ

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

เมื่อ x, y, z แทนแกนต่างๆ ในพิกัดฉาก

u, v, w แทนความเร็วตามแนวแกนพิกัดฉาก x, y, z ตามลำดับ

ρ แทนความหนาแน่นของระบบ

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equation)

X-component

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho v u}{\partial y} + \frac{\partial \rho w u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.2)$$

Y-component

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.3)$$

Z-component

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho wu}{\partial x} + \frac{\partial \rho vw}{\partial y} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.4)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

τ คือ ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

f_x, f_y, f_z คือ แรงภายนอกที่กระทำบนทุกๆ จุดในระบบต่อหน่วยมวล (Body force)

ในทิศทางตามแนวพิกัดฉาก

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations)

$$\frac{\partial(\rho \hat{C}_p T)}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho \hat{C}_p u T}{\partial x} + \frac{\partial \rho \hat{C}_p v T}{\partial y} + \frac{\partial \rho \hat{C}_p w T}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ

\hat{C}_p คือ ค่าความจุความร้อนเชิงความดันต่อหน่วยมวล

q_x, q_y, q_z คือ อัตราการนำความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตั้งฉากในทิศทางตามแนวพิกัดฉาก

3.2 สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษาปรากฏการณ์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิความร้อนด้านอากาศของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate Fin and Tube สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะแบ่งงานออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนพร้อมกัน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณทั้ง 2 กรณีจะตั้งอยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

3.2.1 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

กรณีนี้เป็นการศึกษาการนำความร้อนภายในครีบบแผ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate Fin and Tube โดยมีท่อเป็นแหล่งความร้อน ซึ่งในกรณีนี้จะมีสมมติฐานดังนี้

1. ระบบที่ทำการศึกษาอยู่ในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady State)
2. ไม่มีอากาศเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง ($u = 0, v = 0, w = 0$)
3. การนำความร้อนภายในครีบบแผ่นเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ที่ซึ่งการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ดังนั้นจะได้ว่า

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.6a)$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.6b)$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.6a)$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำครีบบแผ่น สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้วัสดุที่ใช้ทำ ครีบบแผ่นคือ อะลูมิเนียม

4. เนื่องจากเป็นการพิจารณาการนำความร้อนภายในของแข็ง โดยที่กำหนดให้ค่าความหนาแน่น (ρ), ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) และ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (\hat{C}_p) ของครีบบแผ่นมีค่าคงที่ โดยค่าที่ใช้จะพิจารณาที่อุณหภูมิเท่ากับ 55°C

5. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังครีบบแผ่นให้กับอากาศรอบๆ ครีบบแผ่นที่หยุดนิ่ง (No Heat Loss)

จากสมมติฐานข้างต้นจะเห็นได้ว่าจะเหลือสมการอนุรักษ์พลังงานของชุดสมการอนุรักษ์เพียงสมการเดียวที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์กรณีพิจารณาการพาความร้อนเพียงอย่างเดียวดังนี้

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations)

$$\rho \hat{C}_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.7)$$

3.2.2 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนไปพร้อมกัน

กรณีนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างครีบบนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate Fin and Tube ซึ่งในกรณีนี้จะมีสมมติฐานดังนี้

1. ระบบที่ทำการศึกษายู่ในสภาวะคงตัว (Steady State)
2. ของไหลในระบบเป็นแบบนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) ที่ซึ่งแรงเฉือน (Shear Force) ต่อพื้นที่หรือความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนกับเกรเดียนท์ (gradient) ของความเร็ว ดังนั้นจึงสามารถอธิบายค่าของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในทิศทางต่างๆ ได้ในรูปแบบของความแตกต่างของความเร็วและคุณสมบัติของของไหล ดังสมการนี้

$$\tau_{xx} = \lambda (\nabla \cdot v) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$\tau_{yy} = \lambda (\nabla \cdot v) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.9)$$

$$\tau_{zz} = \lambda (\nabla \cdot v) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.10)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.11)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.12)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.13)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดของของไหลในระบบ

λ คือ สัมประสิทธิ์อันดับที่สองของความหนืด (Second Viscosity Coefficient) [7]
กำหนดให้

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (3.14)$$

3. ไม่มีแรงใดๆที่กระทำในระบบต่อหน่วยมวล (body forces)

$$f_x = 0 \quad (3.15a)$$

$$f_y = 0 \quad (3.15b)$$

$$f_z = 0 \quad (3.15c)$$

4. การนำความร้อนของของไหลในระบบเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ที่ซึ่งการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ดังนั้นจะได้ว่า

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.16a)$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.16b)$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.16c)$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

5. ค่าความร้อนที่ผนังครีบบ้านได้ถ่ายเทออกมากับค่าความร้อนที่อากาศซึ่งไหลอยู่ภายในช่องว่างระหว่างครีบบ้าน ได้รับนั้นมีค่าเท่ากัน

6. กำหนดให้ค่าความหนาแน่น (ρ), ค่าความหนืด (μ), ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) และค่าความจุความร้อน (\hat{C}_p) ของของไหลในระบบ มีค่าคงที่ โดยค่าที่ใช้จะพิจารณาที่อุณหภูมิเท่ากับ 55°C ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของของไหลกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน

7. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังครีบบ้านให้กับอากาศด้านนอกที่อยู่รอบ ๆ ครีบบ้าน (No Heat Loss) ยกเว้นอากาศที่ไหลอยู่ภายในช่องว่างระหว่างครีบบ้านเพียงบริเวณเดียวเท่านั้นที่ได้รับความร้อนจากผนังครีบบ้าน

ด้วยสมมติฐานข้างต้น รูปแบบของสมการอนุรักษ์ในหัวข้อ 3.1 จะสามารถแสดงในรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.17)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equation)

X-component

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.18)$$

Y-component

$$\rho \left(\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.19)$$

Z-component

$$\rho \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.20)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน(Energy Equations)

$$\rho \hat{C}_p \left(\frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.21)$$

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การไหลแบบปั่นป่วน

เนื่องจากส่วนที่สองของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของกรณีที่มีรูปแบบการไหลของอากาศเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งแบบจำลองข้างต้นไม่เหมาะสมที่จะอธิบายระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อใช้อธิบายระบบการไหลปั่นป่วน โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน

3.3.1 สถานะการไหลแบบปั่นป่วน

สถานะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) จะทำให้เกิดการผสมกันหรือการเคลื่อนที่คล้ายวังน้ำวน (Eddy motion) ในสายหลักของการไหล การเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในระบบจะมีการเคลื่อนที่ไปมาเมื่อเทียบกับเวลา สมการอนุรักษ์ที่ใช้จึงจะต้องขึ้นอยู่กับเวลา (time-dependent form) ดังนั้นเมื่อจะทำการพิจารณาการไหลของอากาศผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจึงต้องทำการเปลี่ยนสมการ (3.17) - (3.21) ให้อยู่ในรูปของความเร็วเฉลี่ย (time-average) โดยทำการกำหนดให้ค่าความเร็วที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ (instantaneous-velocity), (u, v, w) มีค่าเท่ากับผลรวมของความเร็วเฉลี่ย (time-smoothed velocity), $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ กับค่าของความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ย (fluctuation velocity), (u', v', w') ดังนี้

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.22a)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (3.22b)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (3.22c)$$

เช่นเดียวกันกับความดันและอุณหภูมิ

$$P = \bar{P} + P' \quad (3.22d)$$

$$T = \bar{T} + T' \quad (3.22e)$$

เมื่อ \bar{u} คำนวณได้จาก

$$\bar{u} = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} u \, dt \quad (3.23)$$

$\bar{v}, \bar{w}, \bar{P}$ และ \bar{T} ก็สามารถคำนวณได้จากสมการในรูปแบบเดียวกับสมการ 3.23

เมื่อแทนค่าต่างๆเหล่านี้ลงในสมการ (3.17) - (3.21) ประกอบกับความสัมพันธ์เนื่องจากค่าความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ยมีได้ทั้งค่าที่เป็นบวกและค่าที่เป็นลบจึงทำให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วที่แปรผันไปจากความเร็วเฉลี่ยมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการ

$$\bar{u}' = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} u' \, dt = 0 \quad (3.24)$$

เช่นเดียวกันกับ $\bar{v}', \bar{w}', \bar{P}'$ และ \bar{T}' ดังนั้นจะได้สมการอนุรักษ์ที่อยู่ในรูปของเวลาเฉลี่ย ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.25)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equation)

X-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v} \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w} \bar{u}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \rho \bar{u}' u'}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}' u'}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}' u'}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} \quad (3.26)$$

Y-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u} \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w} \bar{v}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \rho \bar{u}' v'}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}' v'}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}' v'}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \quad (3.27)$$

Z-component

$$\left(\frac{\partial \rho \bar{u} \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v} \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}^2}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \rho \bar{u}' w'}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}' w'}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}' w'}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} \quad (3.28)$$

พบว่าสมการ(3.25) - (3.28) จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ในดั่งสมการ (3.17) ถึง (3.21) ตามลำดับ เพียงแต่มีเทอม $\rho \bar{u}' u'$, $\rho \bar{u}' v'$, ฯลฯ เพิ่มขึ้นมา โดยปกติจะเรียกเทอมเหล่านี้ว่า ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress) (Bird, Stewart and Lightfoot, 1960)[8] ซึ่งเมื่อพิจารณาจากหน่วยของเทอมดังกล่าวจะสามารถให้นิยามได้ใหม่ดังนี้

$$\bar{\tau}_{xx}^{(t)} = \rho \bar{u}' u' \quad (3.29a)$$

$$\bar{\tau}_{xy}^{(t)} = \rho \bar{u}' v' \quad (3.29b)$$

:
 ฯลฯ

เพื่อที่จะทำให้สมการ(3.25) - (3.28) สามารถที่จะใช้ในการคำนวณค่าในรูปแบบของความเร็ว จำเป็นต้องทราบค่า $\bar{\tau}_{xx}^{(t)}$, $\bar{\tau}_{xy}^{(t)}$, ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้สมการ Boussinesq's Eddy Viscosity (1977) ในการประมาณค่าแรงเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress), $\bar{\tau}^{(t)}$ ให้อยู่ในรูปแบบของความเร็วได้ดังนี้

$$\bar{\tau}_{xy}^{(t)} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (3.30)$$

เมื่อ μ_t คือ ความหนืดในสถานะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วน (eddy viscosity) ซึ่งไม่ใช่สมบัติทางกายภาพของของไหลแต่เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งทิศทางและลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน

ดังนั้นเมื่อแทนค่า $\bar{\tau}^{(t)}$ ต่างๆ ในลักษณะเดียวกับสมการ 3.29 จะได้สมการอนุกรมโมเมนต์ของระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วนอยู่ในรูปแบบดังนี้

X-component

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \mu_t \nabla^2 \bar{u} \quad (3.31)$$

Y-component

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \mu_t \nabla^2 \bar{v} \quad (3.32)$$

Z-component

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \mu_t \nabla^2 \bar{w} \quad (3.33)$$

ในการแก้สมการโมเมนต์ของระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นที่จะต้องอาศัยแบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อใช้ประมาณค่าความหนืดในสถานะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วนหรือค่า μ_t ที่เพิ่มขึ้นมาในสมการ สำหรับงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน กับ ผลของการทดลองที่เกี่ยวกับการไหลของของไหลผ่านสิ่งกีดขวาง เพื่อเลือกแบบจำลองที่สามารถอธิบายการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลเมื่อของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้แม่นยำและน่าเชื่อถือที่สุด แล้วนำแบบจำลองที่เลือกนั้นไปใช้ในการอธิบายการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น โดยมีท่อที่เปรียบเป็นสิ่งกีดขวางการไหล ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate Fin and Tube โดยแบบจำลองที่เลือกมาเปรียบเทียบกัน จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

3.4 ประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และ ϵ เพื่ออธิบายการไหลแบบปั่นป่วนของของไหล และใช้ในการประมาณค่าความหนืดในสถานะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วนหรือค่า μ_t โดยได้เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และ ϵ ดังต่อไปนี้

3.4.1. Standard k - ϵ Model

แบบจำลองมาตรฐาน k - ϵ เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการประมาณค่าความหนืดในสถานะที่ของไหลมีการไหลแบบปั่นป่วนหรือค่า μ_t ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องการเพื่อนำไปแทนค่าในการอนุรักษ์โมเมนตัมข้างต้น ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการประมาณค่าจะมีตัวแปรเพิ่มขึ้นสองตัวคือ ค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (kinetic energy), k และค่าอัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (kinetic energy dissipation), ϵ โดยที่ตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_t = FMU * CMUCD * \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (3.34)$$

k - Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \frac{G}{\rho} - \epsilon \quad (3.35)$$

ϵ - Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + F_1 C_1 \frac{\epsilon}{\rho k} G - F_2 C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.36)$$

เมื่อ

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (A)$$

ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย

CMUCD	σ_k	σ_ϵ	C_1	C_2	FMU	F_1	F_2
0.09	1.0	1.314	1.44	1.92	1.0	1.0	1.0

** ที่มา [Encyclopedia ของ PHOENICS]

3.4.2. Standard k - ε Model + Yap's Correction

เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการประมาณค่า μ_t และอธิบายการไหลที่ ณ บริเวณ Separated Point ให้กับสมการ Standard k - ε ซึ่งรูปแบบของแบบจำลองนี้จะแตกต่างจากเดิมเพียงบวกเทอมที่เรียกว่า Yap's Correction เพิ่มเข้าไปในสมการ ε - Equation เท่านั้น ส่วนความสัมพันธ์ของค่า μ_t ยังเหมือนสมการที่ 3.34 โดยที่ชุดสมการมีรูปแบบดังนี้

k - Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \frac{G}{\rho} - \varepsilon \quad (3.37)$$

ε - Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + F_1 C_1 \frac{\varepsilon}{\rho k} G - (F_2 C_2 + YAP) \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.38)$$

$$\text{เมื่อ } YAP = -0.83 * \rho * \left(\frac{k^{3/2} / \varepsilon}{2.495 * YN} - 1 \right) * \left(\frac{k^{3/2} / \varepsilon}{2.495 * YN} \right)^2 \quad (3.39)$$

YN = ระยะทางที่ใกล้ผนังมากที่สุด

ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย

CMUCD	σ_k	σ_ε	C_1	C_2	FMU	F_1	F_2	G
0.09	1.0	1.314	1.44	1.92	1.0	1.0	1.0	สมการที่ A

** ที่มา [Encyclopedia ของ PHOENICS]

แบบจำลองที่ใช้อธิบายสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนทั้งสองแบบข้างต้น จำเป็นที่ต้องมีชุดสมการอีกหนึ่งชุด เพื่อใช้ในการอธิบายการไหล ณ บริเวณใกล้ผนัง ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.5 ต่อไป

3.4.3. Low – Re ของ k - ε Model

แบบจำลอง Low –Re ของ k- ε เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มความสามารถในการคำนวณค่าต่างๆ บริเวณใกล้ผนังให้กับแบบจำลองมาตรฐานของ k- ε โดยไม่ใช่ชุดสมการฟังก์ชันผนัง ซึ่งแบบจำลองนี้จะปรับเปลี่ยนแปลงสมการของแบบจำลองมาตรฐานของ k- ε ที่สมการ ε - Equation ด้วยการเปลี่ยนแปลงตัวคูณ F_1 , F_2 , และ ค่า FMU แต่ความสัมพันธ์ของค่า μ_t ยังคงเหมือนสมการที่ 3.34 โดยที่ชุดสมการมีรูปแบบดังนี้

k – Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \frac{G}{\rho} - \varepsilon \quad (3.40)$$

ε - Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + F_1 C_1 \frac{\varepsilon}{\rho k} G - F_2 C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.41)$$

เมื่อ $FMU = [1 - \text{Exp}(-0.0165 * REYN)]^{2*(1+20.5/REYT)}$ (3.41a)

$$F_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{FMU} \right)^3 \quad (3.41b)$$

$$F_2 = 1 - \text{Exp}(-REYT)^2 \quad (3.41c)$$

$$REYN = \frac{\sqrt{k} * YN}{\nu} \quad (3.41d)$$

$$REYT = \frac{k^2}{\varepsilon * \nu} \quad (3.41e)$$

YN = ระยะทางที่ใกล้ผนังมากที่สุด

ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย

CMUCD	σ_k	σ_ε	C_1	C_2	G
0.09	1.0	1.314	1.44	1.92	สมการที่ A

** ที่มา [Encyclopedia ของ PHOENICS]

3.4.4. Low – Re ของ k - ϵ Model + Yap's Correction

เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้การประมาณค่า μ_t และอธิบายการไหลที่ ณ บริเวณ Separated Point ให้กับสมการ Low - Re k - ϵ ซึ่งรูปแบบของแบบจำลองนี้จะแตกต่างจากแบบเดิมเพียงบวกเทอมที่ Yap's Correction เพิ่มเข้าไปในสมการ ϵ - Equation เท่านั้น ส่วนความสัมพันธ์ของค่า μ_t ยังเหมือนสมการที่ 3.34 โดยที่ชุดสมการมีรูปแบบดังนี้

k - Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \frac{G}{\rho} - \epsilon \quad (3.42)$$

ϵ - Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + F_1 C_1 \frac{\epsilon}{\rho k} G - (F_2 C_2 + YAP) \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.43)$$

$$\text{เมื่อ } YAP = -0.83 * \rho * \left(\frac{k^{3/2} / \epsilon}{2.495 * YN} - 1 \right) * \left(\frac{k^{3/2} / \epsilon}{2.495 * YN} \right)^2 \quad (3.43a)$$

$$FMU = [1 - \text{Exp}(-0.0165 * REYN)]^{2 * (1 + 20.5 / REYT)} \quad (3.43b)$$

$$F_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{FMU} \right)^3 \quad (3.43c)$$

$$F_2 = 1 - \text{Exp}(-REYT)^2 \quad (3.43d)$$

$$REYN = \frac{\sqrt{k} * YN}{\nu} \quad (3.43e)$$

$$REYT = \frac{k^2}{\epsilon * \nu} \quad (3.43f)$$

YN = ระยะทางที่ใกล้ผนังมากที่สุด

ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย

CMUCD	σ_k	σ_ϵ	C_1	C_2	G
0.09	1.0	1.314	1.44	1.92	สมการที่ A

** ที่มา [Encyclopedia ของ PHOENICS]

3.4.5. Two – Layer k - ϵ Model

เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเนื่องจากแบบจำลอง Low – Re ของ k - ϵ ไม่เหมาะสมกับการคำนวณที่มีความต้องการผลหลายๆ ที่บริเวณใกล้ผนังเพราะค่าเกรเดียนท์ของค่าการกระจายตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ϵ) ค่าที่สูงเมื่อใช้สมการข้างต้นมาคำนวณ รวมทั้งให้ผลในการอธิบายเรื่องชั้นขอบแบบ Adverse-Pressure-Gradient ได้ไม่สมบูรณ์มากนัก ซึ่งแบบจำลองนี้จะประกอบไปด้วยแบบจำลอง 2 ชุด คือ แบบจำลองมาตรฐานของ k - ϵ เพื่อใช้คำนวณบริเวณ Fully Turbulence กับ แบบจำลองที่ใช้หลักการของ Length – Scale เพื่อใช้คำนวณบริเวณใกล้ผนัง ด้วยรูปแบบดังนี้

ที่บริเวณ Fully Turbulence: ใช้แบบจำลอง Standard k - ϵ ในการคำนวณ (สมการที่ 3.34 - 3.36)

ที่บริเวณใกล้ผนัง:

1. ค่า ϵ จะถูกกำหนดค่าที่แน่นอนให้กับสมการ k – Equation ในการคำนวณแต่ละครั้ง

$$\epsilon = 0.1643 * \frac{k^{3/2} * FTWO}{LM} \quad (3.44)$$

$$\text{เมื่อ } FTWO = 1 + \frac{5.3}{REYN} \quad (3.44a)$$

$$LM = 0.41 * YN \quad (3.44b)$$

$$REYN = \frac{k^{3/2} * YN}{\nu} \quad (3.44c)$$

2. ค่า μ_t ที่บริเวณใกล้ผนัง

$$\mu_t = 0.5478 * k^{3/2} * FMU * LM \quad (3.45)$$

$$\text{เมื่อ } FMU = 1 - \text{Exp}(-0.0198 * REYN) \quad (3.45a)$$

$$LM = 0.41 * YN \quad (3.45b)$$

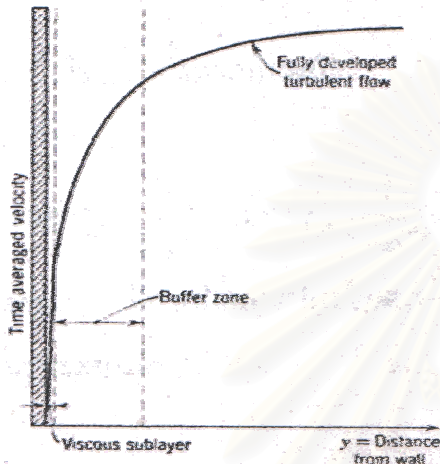
$$REYN = \frac{k^{3/2} * YN}{\nu} \quad (3.45c)$$

$$YN = \text{ระยะทางที่ใกล้ผนังมากที่สุด}$$

** หมายเหตุ แบบจำลองทั้ง 2 ชุดจะเชื่อมต่อกัน เมื่อ มีค่า $Re = 350$

3.5 Wall Function

จากรูปแบบการกระจายตัวของความเร็ว (Velocity distribution) ของการไหลของของไหลที่สัมผัสผนังไม่ว่าจะอยู่ในท่อหรืออยู่นอกท่อ ของระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน ดังแสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วของของไหลในระบบการไหลแบบปั่นป่วน ณ บริเวณใกล้ผนัง

พบว่ารูปการไหลของของไหลจะมีอยู่ด้วยกัน 3 บริเวณ คือ ณ บริเวณที่ของไหลไหลติดอยู่กับผนัง เรียกว่า “Viscous Sublayer” ที่บริเวณนี้การไหลจะมีลักษณะเป็นการไหลเป็นชั้น ๆ (Laminar Flow) บริเวณถัดไปจะเป็นบริเวณที่มีการไหลกึ่งเป็นชั้นและกึ่งปั่นป่วน เรียกบริเวณนี้ว่า “Buffer Zone” และจากบริเวณบัฟเฟอร์ห่างออกไปจากผนังเป็นบริเวณที่มีการไหลอย่างปั่นป่วน และเกิดอย่างสมบูรณ์ เรียกว่า Fully Developed Turbulent Zone” ณ บริเวณสามารถตัดอิทธิพลของการไหลเป็นชั้นออกได้ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอิทธิพลของการไหลแบบปั่นป่วนมีมากกว่ามาก

เนื่องจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และ Standard $k-\epsilon + Yap's$ Correction เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายการไหลในบริเวณ Fully Developed Turbulent Zone ได้เป็นอย่างดีแต่สำหรับบริเวณ Viscous Sublayer และบริเวณ Buffer Zone หรือที่เรียกว่า บริเวณใกล้ผนัง (near-wall Region) พบว่าแบบจำลองทั้งสองแบบไม่สามารถอธิบายได้ดีนัก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีชุดสมการเพื่อใช้ในการอธิบายรูปแบบการไหลของของไหล ณ บริเวณดังกล่าว โดยจะเรียกชุดสมการนี้ว่า “ฟังก์ชันผนัง” ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (3.46)$$

โดยที่
$$u^+ = \frac{u}{u^*} \quad (3.47)$$

และ
$$y^+ = \frac{yu^* \rho}{\mu} \quad (3.48)$$

เมื่อ y คือ ระยะทางที่ห่างจากผนังในแนวตั้งกับผนัง

u คือ ความเร็วที่ขนานกับผนัง

u^* คือ Friction Velocity เท่ากับ $\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ เมื่อ $\tau = \frac{1}{2} f \rho u^2$; f คือ Friction Factor

κ คือ ค่าคงที่ของ Von Karman ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความขรุขระของผนัง

E คือ ค่าบงบอกถึงความขรุขระของผนัง

ในกรณีของผนังเรียบค่า κ จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.41 และ E มีค่าเท่ากับ 8.6

สมการ (3.46) เป็นสมการที่รู้จักในนาม “Logarithmic law of wall” ซึ่งจะใช้ได้ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

$$30 < Y^+ < 130$$

สำหรับพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน บริเวณใกล้ๆ ผนัง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$k_w = C_\mu^{-1/2} u^2 \quad (3.49)$$

เมื่อ k_w คือ พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน บริเวณใกล้ๆ ผนัง

อัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนที่บริเวณใกล้ๆ ผนัง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k_w^{3/2}}{\kappa y} \quad (3.50)$$

โดยแบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วนในแต่ละอันจะมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางเปรียบเทียบจุดเด่น และจุดด้อยในแต่ละแบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน

แบบจำลอง	จุดเด่น	จุดด้อย
Standard k - ϵ Model	สามารถทำนายผลบริเวณ Fully Developed Turbulent ได้ดี และเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้มาก	การทำนายผลบริเวณใกล้ผนัง ต้องใช้สมการ Wall Function ซึ่งอาจทำให้ผลการทำนายเกิดคลาดเคลื่อนได้ ถ้าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นบริเวณผนัง
Standard k - ϵ Model + Yap's Correction	เพิ่มเติมเทอมที่ใช้ในการทำนายผลบริเวณจุด Separation	เช่นเดียวกับ Standard k - ϵ Model
Low RE ของ k - ϵ Model	เพิ่มเติมเทอมที่ใช้ในการทำนายผลบริเวณผนัง เพื่อที่จะทำนายผลได้ใกล้ผนังมากขึ้น	ต้องใช้เวลาในการคำนวณที่มากขึ้น และเมื่อต้องการผลการทำนายที่บริเวณใกล้ผนังจำนวนมากจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากค่าเกรเดียนท์ของ ϵ ที่คำนวณได้จะมีค่าสูงมาก
Low RE ของ k - ϵ Model + Yap's Correction	เพิ่มเติมเทอมที่ใช้ในการทำนายผลบริเวณจุด Separation	เช่นเดียวกับ Low Re ของ k - ϵ Model
Two - Layer k - ϵ Model	มีการเปลี่ยนแปลงสมการ เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากการคำนวณค่าเกรเดียนท์ของ ϵ ในกรณีของ Low Re ของ k - ϵ Model	จำนวนกริดที่สร้าง ณ บริเวณใกล้ผนัง จำเป็นที่ต้องมีความละเอียดที่สูง จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณที่มากกว่ากรณี Standard k- ϵ Model ที่ใช้ Wall Function

3.6 สมการอนุรักษ์พลังงานในระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อสภาวะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ทำให้ระบบการถ่ายเทความร้อนไม่สามารถใช้สมการอนุรักษ์พลังงานของกรณีสภาวะการไหลแบบเป็นชั้น ๆ มาอธิบายได้ ดังนั้นหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงสมการอนุรักษ์พลังงานที่ใช้อธิบายระบบการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน จากสมการที่ 3.21 เมื่อแทนค่า u, v, w, T ด้วยสมการที่ 3.22a 3.22b 3.22c 3.22e ตามลำดับ จะได้ดังรูปสมการที่ 3.51

$$\left(\frac{\partial \rho \hat{C}_p \bar{u} T}{\partial x} + \frac{\partial \rho \hat{C}_p \bar{v} T}{\partial y} + \frac{\partial \rho \hat{C}_p \bar{w} T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \rho \hat{C}_p u' T'}{\partial x} + \frac{\partial \rho \hat{C}_p v' T'}{\partial y} + \frac{\partial \rho \hat{C}_p w' T'}{\partial z} \right) = k(\nabla^2 T) \quad (3.51)$$

พบว่ารูปแบบของสมการ (3.51) จะมีรูปแบบสมการเหมือนกับกรณีของสมการอนุพันธ์พลังงานในระบบการไหลแบบชั้น ดังสมการ (3.21) แต่มีเทอม $\overline{\rho u T'}$, $\overline{\rho v T'}$, $\overline{\rho w T'}$ เพิ่มขึ้นมา โดยปกติจะเรียกเทอมเหล่านี้ว่า “ Turbulent energy flux ” (Bird, Stewart, Lightfoot ; 1960)[8] ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\overline{\rho u T'} = - \frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} \quad (3.52a)$$

$$\overline{\rho v T'} = - \frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial \overline{T}}{\partial y} \quad (3.52b)$$

$$\overline{\rho w T'} = - \frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \quad (3.52c)$$

ดังนั้นสมการอนุพันธ์พลังงานในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนจะมีรูปแบบดังนี้

$$\rho \hat{C}_p \left(\frac{\partial \overline{uT}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vT}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{wT}}{\partial z} \right) = \left(k + \frac{\mu_t \hat{c}_p}{Pr} \right) \left(\frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial z^2} \right) \quad (3.53)$$

จากสมการที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ในการจำลองปรากฏการณ์ของกรณีพิจารณาการนำความร้อนภายในครีบบนแบบไม่มีการไหลของอากาศ นั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จะมีเพียงสมการอนุพันธ์พลังงานดังสมการที่ (3.7) และกรณีที่พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศและรูปแบบการไหลของอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างครีบบนโดยมีท่อรูปทรงต่างๆ เป็นแหล่งความร้อนและเปรียบเป็นสิ่งกีดขวาง ซึ่งมีทั้งการนำความร้อนและการพาความร้อน นั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จะเป็นดังสมการความต่อเนื่องที่ (3.25) สมการอนุพันธ์โมเมนตัมดังสมการที่ (3.31)-(3.33) และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่นำมาพิจารณาเพื่อเลือกแบบจำลองที่แม่นยำและน่าเชื่อถือที่สุด ดังสมการที่ (3.34)-(3.50) สำหรับ Standard k- ϵ model, Standard k- ϵ model +Yap's Correction, Low k- ϵ model, Low k- ϵ model +Yap's Correction, Two Layer k- ϵ model และ Wall Function ส่วนสมการอนุพันธ์พลังงานดังสมการที่ (3.53) ซึ่งสมการทั้งหมดจะอยู่ในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ในการแก้สมการในลักษณะดังกล่าวจะใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical) ซึ่งจะมีรายละเอียดของวิธีการคำนวณและเทคนิคที่ใช้ในบทถัดไป

บทที่ 4

เทคนิค Computational Fluid Dynamics

เนื่องจกงานวิจัยฉบับนี้เป็นการจำลองปรากฏการณ์การไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงสมการต่างที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ข้างต้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสมการอนุพันธ์ ดังนั้น การแก้สมการอนุพันธ์สามารถทำได้หลายวิธี สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรม PHOENICS ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิธีการแก้สมการอนุพันธ์ที่เรียกว่า Computational Fluid Dynamics เพื่อหาคำตอบ ซึ่งรายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทนี้

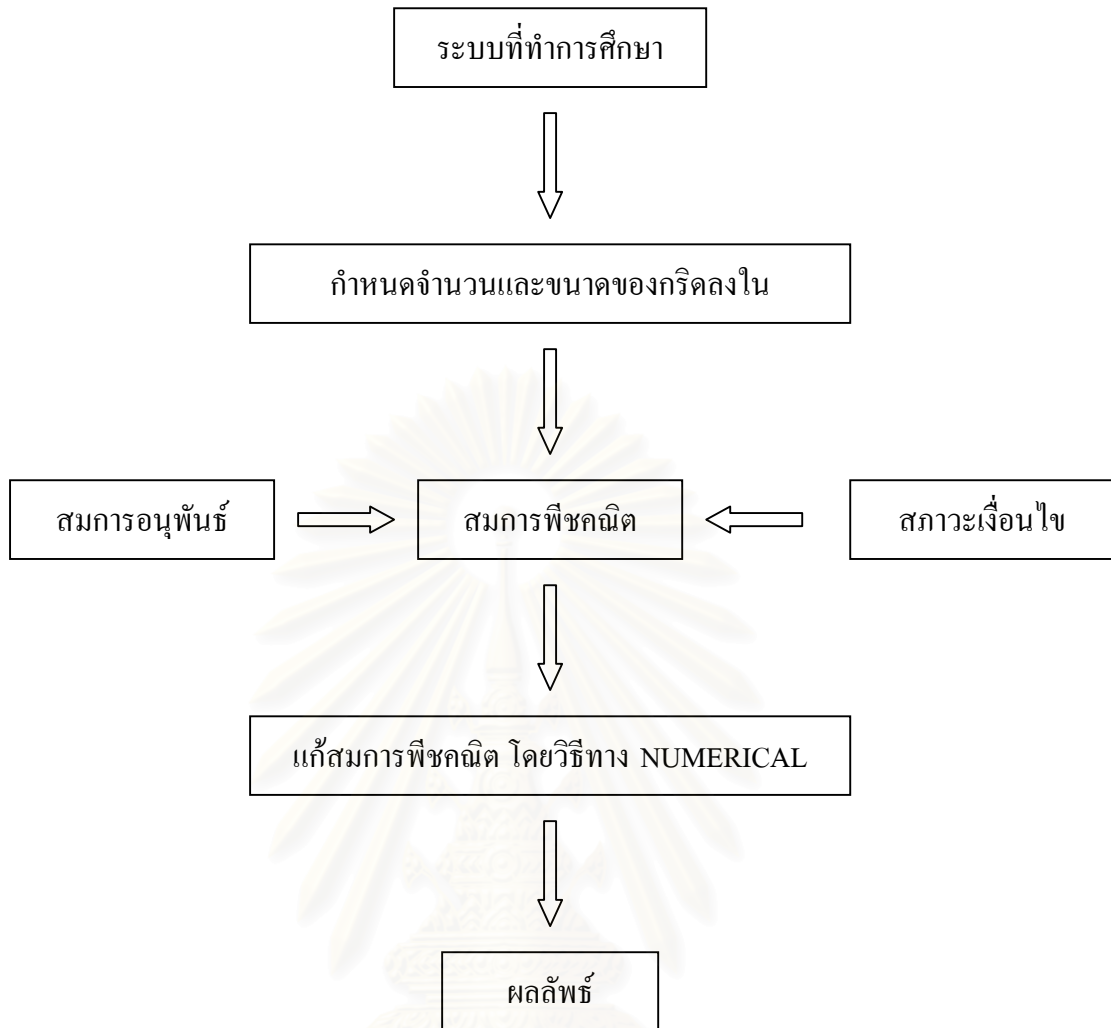
4.1 ความหมายของเทคนิค Computational Fluid Dynamics

เทคนิค Computational Fluid Dynamics (CFD) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของของไหลในระบบที่ต้องการศึกษา โดยมีชุดสมการที่เป็นตัวแทนของระบบที่ทำการศึกษา เช่น สมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน ฯลฯ ในการแก้สมการจะต้องมีการกำหนดสภาวะเงื่อนไข (Condition) อย่างถูกต้องและเหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะสามารถแสดงให้เห็นถึงรายละเอียดของการกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของความเร็ว และการกระจายตัวของอุณหภูมิ เป็นต้น ภายในระบบที่ทำการศึกษานั้นๆ

4.2 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค CFD

สำหรับขั้นตอนของการจำลองปรากฏการณ์ต่าง ๆ นั้นจะต้องเริ่มจากการสร้างลักษณะทางกายภาพของระบบที่สนใจศึกษา และ กำหนดสภาวะเงื่อนไขต่างๆ ที่จำเป็นและเหมาะสมของแต่ละการจำลองเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนแก้สมการ ขั้นตอนต่อไป คือ การเลือกชุดสมการที่เหมาะสมสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆของระบบ และ สุดท้าย คือ การแก้ชุดสมการต่างๆ ซึ่งการแก้สมการเป็นลำดับขั้นตอนของเทคนิค CFD ที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยสรุปได้เป็นลำดับดังนี้

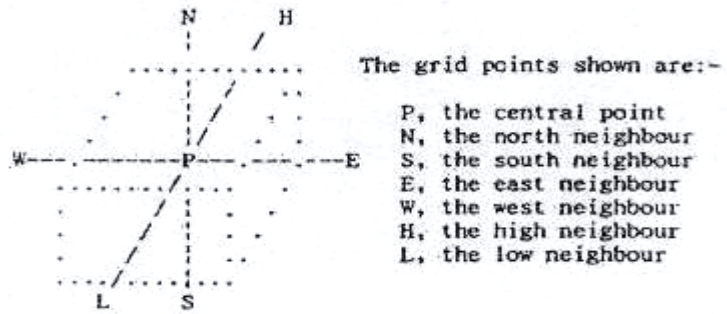
1. กำหนดกริด (Grid) ลงในระบบที่ต้องการทำการศึกษา
2. ทำการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต (Algebraic equation) ด้วยหลักการของไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume)
3. กำหนดสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม
4. แก้สมการพีชคณิตโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical)
5. ผลลัพธ์



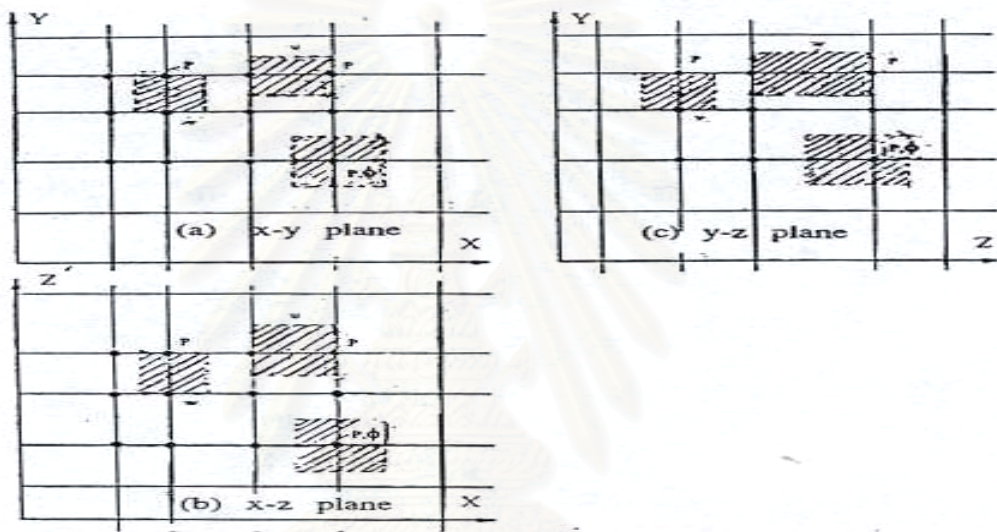
รูปที่ 4.1 ลำดับขั้นตอนของวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิค CFD

4.2.1 กริด (Grid)

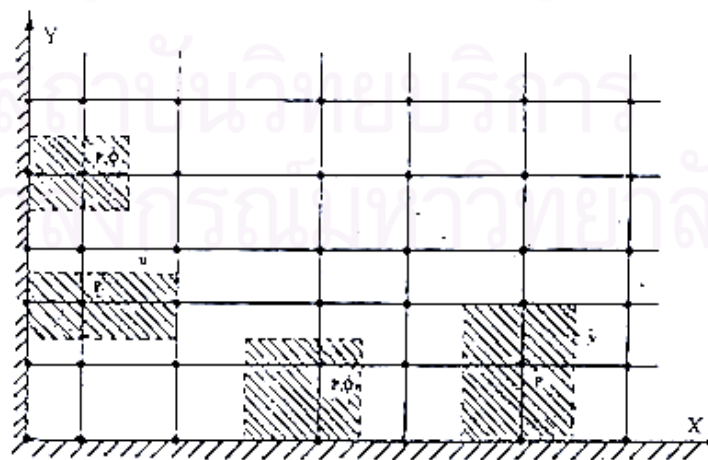
ขั้นตอนแรกของเทคนิค CFD คือการแบ่งโดเมน (domain) ออกเป็นส่วนย่อยๆ ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยการกำหนดจำนวนและระยะห่างระหว่างเส้นกริดลงในระบบที่เราต้องการศึกษา ตำแหน่งที่ตัดกันของเส้นกริดจะเรียกว่าโนด (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของตัวแปรที่เราต้องการศึกษาของปริมาตรควบคุม (Control Volume) ที่กำหนดขึ้น ดังรูปที่ 4.2 แสดงถึงปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณโดยเส้นประจะแสดงถึงขอบเขตของปริมาตรควบคุมที่กำหนดขึ้น



รูปที่ 4.2 ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4.3 ลักษณะการแบ่งกริดและลักษณะของปริมาตรควบคุมที่แสดงในแบบ 2 มิติ



รูปที่ 4.4 ลักษณะของปริมาตรควบคุมที่บริเวณสภาวะขอบเขต

อักษร P แทนตำแหน่งของโนดที่ใช้ในการเก็บค่าตัวแปรหรือคือตัวแทนของปริมาตรควบคุมนี้ โดยอักษร N, S, E, W, H, L จะแทนตำแหน่งของโนดที่อยู่ในบริเวณรอบข้างของโนด P สำหรับรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 จะแสดงลักษณะของการแบ่งกริด ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นโนดขึ้นรวมทั้งแสดงลักษณะของปริมาตรควบคุมที่แสดงในแบบ 2 มิติ และ ปริมาตรควบคุมที่บริเวณสภาวะขอบเขต ซึ่งโนด ณ บริเวณสภาวะขอบเขตจะทราบค่าที่แน่นอนและไม่เปลี่ยนแปลงในแต่ละการคำนวณ

4.2.2 การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต

โดยทั่วไปสมการอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์จะประกอบด้วยเทอม 4 เทอม คือ เทอมที่เปลี่ยนไปตามเวลา (Transient term), เทอมการพา (Convection term), เทอมการแพร่ (Diffusion term) และ เทอมแหล่งกำเนิด (Source term) ตามลำดับ ดังแสดงได้ดังสมการที่ 4.1

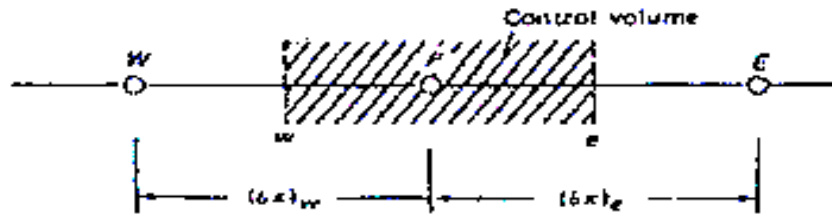
$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right] + S \quad (4.1)$$

- เมื่อ ϕ แทนตัวแปรที่ต้องการศึกษาเช่น ความเร็ว อุณหภูมิ
 Γ แทนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ เช่นความหนืด ค่าการนำความร้อน
 u_i แทนความเร็วในทิศทางต่างๆ
 X_i แทนทิศทางในแนวแกนต่างๆ
 i แทนแกน x, y และ z
 S แทนแหล่งกำเนิด

เพื่อให้ง่ายในการนำเสนอถึงวิธีการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิตซึ่งจะยังคงความหมายเช่นเดียวกับสมการเชิงอนุพันธ์เดิม จะทำการพิจารณาจากสมการในรูปแบบ 1 มิติ (แกน x) ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาและพิจารณาเฉพาะเทอมการพาและการนำเท่านั้น ดังนี้

$$\frac{d(\rho u \phi)}{dx_i} = \frac{d}{dx_i} \left[\Gamma \frac{d\phi}{dx_i} \right] \quad (4.2)$$

ลักษณะของกริดที่ใช้ในการแปลงสมการจะแสดงได้ในรูปที่ 4.5



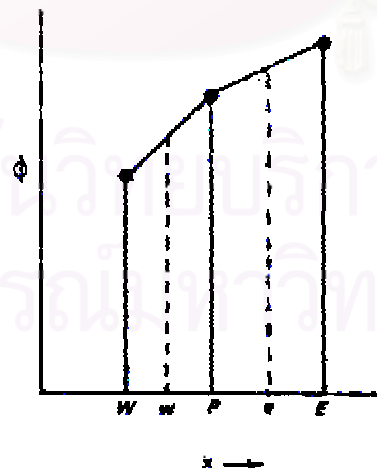
รูปที่ 4.5 ลักษณะของกริดที่ใช้ในสมการ (4.2)

กำหนดให้จุด e อยู่กึ่งกลางระหว่าง P และ E และจุด w อยู่กึ่งกลางระหว่าง P และ W

ทำการอินทิเกรตสมการ (4.2) รอบปริมาตรควบคุมในรูปที่ 4.5 จะได้

$$(\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w = \left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right]_e - \left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right]_w \quad (4.3)$$

จากสมการจะพบว่าในเทอมของการแพร่จะมีพจน์ $\left[\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right]$ ที่ยังไม่ทราบค่า เช่นเดียวกับพจน์ $(\rho u \phi)$ ในเทอมของการพา การประมาณค่าของพจน์ทั้งสองทำได้โดยสมมติให้โพรไฟล์ ϕ ระหว่างโนด มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะโพล์ของ ϕ ระหว่างโนดที่เป็นเส้นตรง

จากรูปที่ 4.6 จะได้

$$\frac{d\phi_e}{dx} = \frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} \quad ; \quad \frac{d\phi_w}{dx} = \frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w} \quad (4.4)$$

และ

$$\phi_e = \frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P) \quad ; \quad \phi_w = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_W) \quad (4.5)$$

เมื่อแทนสมการ (4.4)-(4.5) ลงในสมการ (4.3) จะได้สมการออกมาในรูป

$$\frac{1}{2}(\rho u)_e(\phi_E + \phi_P) - \frac{1}{2}(\rho u)_w(\phi_P + \phi_W) = \frac{\Gamma_e(\phi_E - \phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w(\phi_P - \phi_W)}{(\delta x)_w} \quad (4.6)$$

เพื่อให้สมการ (4.6) อยู่ในรูปแบบที่กะทัดรัดขึ้น จึงได้นิยามตัวแปรขึ้นมาสองตัวนั่นคือ F และ D

$$\text{โดยที่} \quad F = \rho u \quad ; \quad D = \frac{\Gamma}{\delta x} \quad (4.7)$$

ซึ่ง D จะมีค่าเป็นบวกเสมอ ในขณะที่ F จะมีได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของของไหล ดังนั้นสมการ (4.6) สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W \quad (4.8)$$

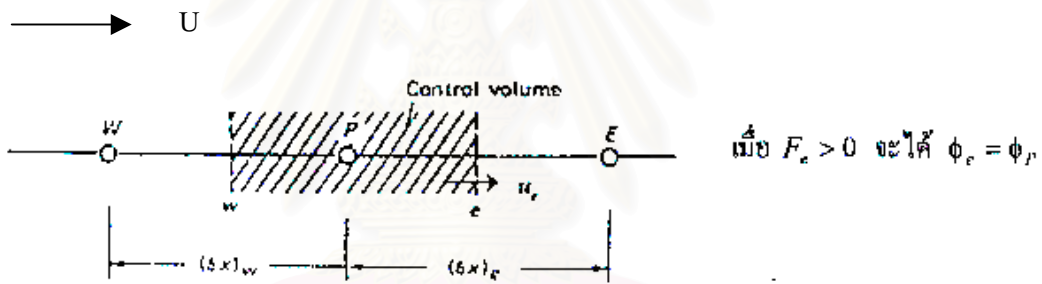
$$\text{โดยที่} \quad a_E = D_e - \frac{F_e}{2} \quad (4.9a)$$

$$a_W = D_w + \frac{F_w}{2} \quad (4.9b)$$

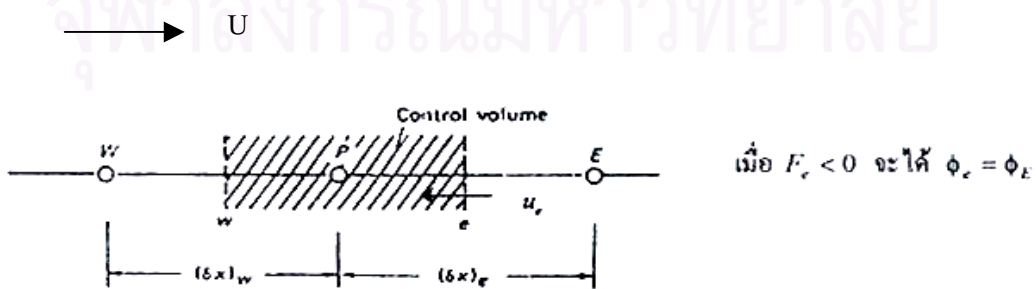
$$a_P = a_E + a_W + (F_e - F_w) \quad (4.9c)$$

สมการ (4.8) เป็นสมการพีชคณิตที่ทำการแปลงมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (4.2) ซึ่งได้มาจากการตั้งสมมติฐานว่าโพรไฟล์ของ ϕ ระหว่างโนดที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือที่รู้จักกันในชื่อของเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ (Central-Difference Scheme) ซึ่งพบว่าวิธีนี้ข้อจำกัดอยู่เฉพาะในกรณีของระบบที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำๆ เท่านั้น ทั้งนี้เพราะเมื่อใดที่ระบบมีค่า $|F|$ มากกว่า $2D$ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นลบซึ่งจะทำให้การแก้สมการไม่สามารถทำได้ [9]

ด้วยเหตุนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหานี้เกิดขึ้นจึงมีการคิดวิธีขึ้นมาใหม่เรียกว่า อัปวินดิฟเฟอเรนซ์ (Upwind -Difference Scheme) ซึ่งจะทำการเปลี่ยนวิธีการประมาณค่าของ ϕ_c จากเดิมที่มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของ ϕ_E และ ϕ_P ในวิธีเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ มาเป็นการกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่า ϕ ของโนดที่อยู่ด้านหลังตามทิศทางการไหล ดังรูปที่ 4.7a และ 4.7b ซึ่งในกรณีที่ F_c มีค่าเป็นบวก ϕ_c จะมีค่าเท่ากับ ϕ_P และในกรณีที่ F_c มีค่าเป็นลบ ϕ_c จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ϕ_E ตามลำดับ



รูปที่ 4.7a การกำหนดค่า ϕ_c เมื่อ F_c มีค่าเป็นบวก ด้วยวิธีอัปวินดิฟเฟอเรนซ์



รูปที่ 4.7 b การกำหนดค่า ϕ_c เมื่อ F_c มีค่าเป็นลบ ด้วยวิธีอัปวินดิฟเฟอเรนซ์

ค่า ϕ_w ก็สามารถหาได้จากหลักการเดียวกันข้างต้น

ถ้าห้บเทอม $\frac{d\phi}{dx}$ ก็ยังคงใช้วิธีการคำนวณเหมือนกับวิธีเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ (สมการ 4.4) ซึ่งตรงจุดนี้ก็จะทำให้เกิดปัญหาขึ้นในการใช้วิธีอัปวินดิฟเฟอเรนซ์ เนื่องจากในกรณีของระบบที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงๆ ตามปกติแล้วเทอมของการแพร่จะมีค่าน้อยหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเทอม $\frac{d\phi}{dx}$ จะมีค่าประมาณศูนย์ แต่ด้วยวิธีอัปวินดิฟเฟอเรนซ์ จะยังมีการคำนวณเทอม $\frac{d\phi}{dx}$ ด้วยสมมติฐานของวิธีการเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ ทำให้ผลลัพธ์ของเทอมการแพร่มีค่าสูงไปจากความเป็นจริง (Overestimates) ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการรวมคุณสมบัติของวิธีเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ และอัปวินดิฟเฟอเรนซ์ เข้าด้วยกัน โดยมีชื่อเรียกว่า ไฮบริดดิฟเฟอเรนซ์ (Hybrid-Difference Scheme) (ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้) เกิดเป็นเงื่อนไขใหม่ดังนี้

$$F_e < -2D_e \quad \text{จะได้} \quad \phi_e = \phi_E \quad (4.10a)$$

$$-2D_e \leq F_e \leq 2D_e \quad \text{จะได้} \quad \phi_e = \frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} \quad (4.10b)$$

$$F_e > 2D_e \quad \text{จะได้} \quad \phi_e = \phi_P \quad (4.10c)$$

หรืออีกนัยหนึ่งคือในการคำนวณจะใช้เงื่อนไขของวิธีเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์ เมื่อ $|F_e| \leq 2D_e$ และเมื่อค่า F_e ไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวจะเปลี่ยนไปใช้เงื่อนไขของวิธีอัปวินดิฟเฟอเรนซ์ โดยกำหนดให้เทอมการแพร่มีค่าเป็นศูนย์

ดังนั้น ในการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ (4.2) จึงสามารถกระทำได้ 3 วิธีคือ วิธีเซ็นทรัลดิฟเฟอเรนซ์, วิธีอัปวินดิฟเฟอเรนซ์, และวิธีไฮบริดดิฟเฟอเรนซ์ ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา สำหรับในกรณีของสมการเชิงอนุพันธ์ 2 มิติ และ 3 มิติ ก็ใช้หลักการเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้นในการแปลงเป็นสมการพีชคณิต

4.3 การพิจารณาความเร็วของระบบ

จากที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.2.2 ถึงวิธีการเปลี่ยนสมการอนุพันธ์เป็นสมการพีชคณิต สำหรับกรณีพิจารณาอิทธิพลด้านความเร็วของอากาศด้วยนั้น จำเป็นที่จะต้องทราบถึงขนาดและทิศทางของความเร็วในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งขนาดและทิศทางของความเร็วนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการอนุพันธ์โมเมนตัมดังที่จะกล่าวต่อไป

4.3.1 สมการอนุพันธ์โมเมนตัม

สมการอนุพันธ์โมเมนตัมเป็นสมการที่แสดงผลรวมของโมเมนตัมที่ผ่านเข้าออกในทุกทิศทางของปริมาตรควบคุม ซึ่งสมการ (4.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์โมเมนตัมได้เมื่อ $\phi = u$ หรือ \bar{u} , $\Gamma = \mu$ หรือ $\bar{\mu}$ เป็นต้น

ในการแปลงสมการอนุพันธ์โมเมนตัม ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต ปริมาตรควบคุมที่ใช้จะมีรูปแบบที่แตกต่างจากกรณีของสมการต่างๆไป ดังนี้

- ตำแหน่งที่เก็บค่าองค์ประกอบของความเร็วในแต่ละทิศทาง จะอยู่บริเวณเส้นกริดที่เชื่อมกันระหว่าง โหนดสองโหนด ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงได้ด้วยลูกศรเล็กๆ
- ตำแหน่งที่เก็บค่าองค์ประกอบของความเร็วในแต่ละทิศทาง จะอยู่คนละตำแหน่งกับตำแหน่งที่เก็บค่าความดัน

ดังนั้นรูปแบบของกริดที่ใช้ในการแปลงสมการจึงมีลักษณะดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นลักษณะของกริดที่ใช้ในการแปลงสมการอนุพันธ์โมเมนตัมของ X-component จากรูปจะเห็นว่าลักษณะของปริมาตรควบคุมจะมีความแตกต่างจากปริมาตรควบคุมที่ใช้ในหัวข้อ 4.2.2 คือ ผิวหน้าของปริมาตรควบคุมในแนวแกน x จะอยู่ที่บริเวณ โหนดทั้งสองข้างพอดี ซึ่งเป็นเช่นนี้เฉพาะในแนวแกน x เท่านั้น เช่นเดียวกันลักษณะของกริดที่ใช้ในการแปลงสมการอนุพันธ์โมเมนตัมของ Y-component ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 ผิวหน้าของปริมาตรควบคุมในแนวแกน y ก็ จะอยู่ที่บริเวณ โหนดทั้งสองข้างพอดีและจะเป็นเฉพาะในแนวแกน y เท่านั้น

ด้วยรูปแบบของปริมาตรควบคุมที่กล่าวมาข้างต้น Patankar [9] ได้ทำการแปลงสมการอนุพันธ์ โมเมนต์ x, y, z ให้อยู่ในรูปแบบสมการพีชคณิต ได้ดังสมการ (4.11a) – (4.11c) ตามลำดับ

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (P_P - P_E) A_e \quad (4.11a)$$

$$a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + (P_P - P_N) A_n \quad (4.11b)$$

$$a_l w_l = \sum a_{nb} w_{nb} + b + (P_P - P_L) A_l \quad (4.11c)$$

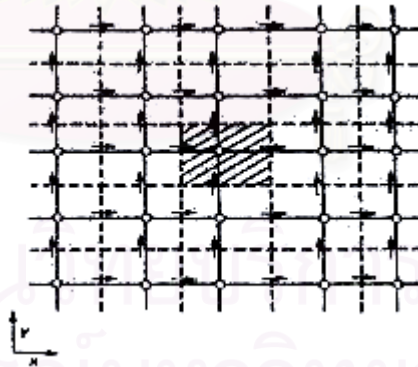
เมื่อ nb แทนค่า ณ ตำแหน่งในบริเวณใกล้เคียง (neighbor)

A แทนค่าพื้นที่ที่ตั้งฉากกับแรงดันที่กระทำ

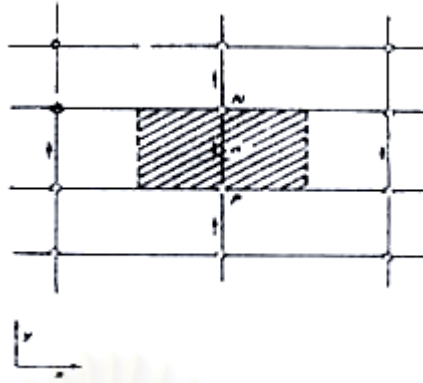
P แทนค่า ความดันที่เก็บไว้ในโนดต่างๆ

a แทนค่า สัมประสิทธิ์

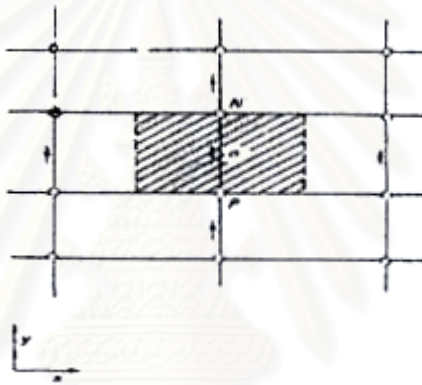
b แทนพจน์ที่ไม่สามารถจัดกลุ่มได้



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งที่เก็บค่าองค์ประกอบของความเร็ว



รูปที่ 4.9 ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการโมเมนตัม X-component



รูปที่ 4.10 ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการ โมเมนตัม Y-component

4.3.2 วิธีการ SIMPLE

ในการแก้สมการโมเมนตัม เพื่อที่จะหาคำตอบขององค์ประกอบของความเร็วในแต่ละทิศทางจะทำได้ก็ต่อเมื่อทราบค่าการกระจายตัวของความดัน ในขณะที่เดียวกันค่าของความเร็วที่ได้จากการคำนวณก็ต้องทำให้สมการความต่อเนื่องเป็นจริงด้วย ซึ่งถ้าไม่ทำให้สมการความต่อเนื่องเป็นจริง ก็แสดงว่าค่าความดันที่ใช้ในนั้นไม่ถูกต้องต้องทำการหาค่ามาใหม่หรือทำการปรับปรุงค่าในนั้นให้ถูกต้องยิ่งขึ้น ด้วยเหตุผลนี้ Patanka and Spalding [10] จึงได้คิดค้นลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหาขึ้นมาโดยมีชื่อว่า **SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Algorithm)** ลักษณะของขั้นตอนการแก้ปัญหาจะเริ่มจากการเดาค่าความดันเริ่มต้น ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ P^* แทนลงในสมการโมเมนตัม (4.11a) - (4.11c) เพื่อทำการหาค่าความเร็ว u^*, v^*, w^* ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (P_P^* - P_E^*) A_e \quad (4.12a)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (P_P^* - P_N^*) A_n \quad (4.12b)$$

$$a_l w_l^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (P_P^* - P_L^*) A_l \quad (4.12c)$$

ขั้นตอนต่อไปคือทำการปรับปรุงค่าความดัน P^* ที่สมมติขึ้น เพื่อให้ได้ค่าความดันที่ใกล้เคียงกับค่าจริงยิ่งขึ้น ด้วยค่าปรับปรุงความดัน P' ดังสมการ

$$P = P^* + P' \quad (4.13)$$

เช่นเดียวกันกับค่าความเร็ว u^*, v^*, w^* ที่ทำการปรับปรุงดังสมการ

$$u = u^* + u' \quad (4.14)$$

$$v = v^* + v' \quad (4.15)$$

$$w = w^* + w' \quad (4.16)$$

เมื่อนำสมการ (4.11a) ลบด้วยสมการ (4.12a) จะได้

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + b + (P_P' - P_E') A_e \quad (4.17)$$

จากสมการ (4.17) จะกำหนดให้เทอม $\sum a_{nb} u_{nb}'$ มีค่าเท่ากับศูนย์ (Patankar, 1980) ดังนั้นจะได้

$$a_e u_e' = (P_P' - P_E') A_e \quad (4.18)$$

หรือ

$$u_e' = d_e (P_P' - P_E') \quad (4.19)$$

เมื่อ

$$d_e = \frac{A_e}{a_e} \quad (4.19a)$$

จากสมการ (4.19) ทำให้สามารถเขียนสมการที่แสดงความเร็ว ณ ตำแหน่ง e ได้ดังนี้

$$u_e = u_e^* + d_e (P_P' - P_E') \quad (4.20)$$

ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า u_e^* กับค่าปรับปรุงความดัน P' เช่นเดียวกันกับความเร็วในตำแหน่งอื่นๆ

$$v_n = v_n^* + d_n (P_P' - P_N') \quad (4.21)$$

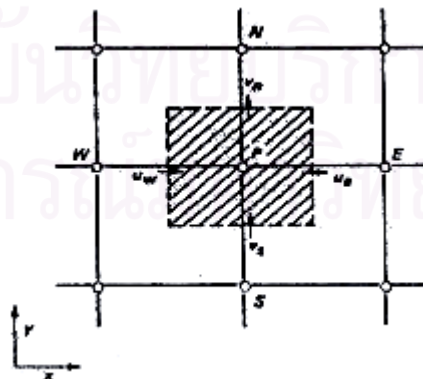
$$w_l = w_l^* + d_l (P_P' - P_L') \quad (4.22)$$

พิจารณาสมการความต่อเนื่องที่ไม่ขึ้นกับเวลาในรูปแบบเดียวกับสมการ (3.13) ในบทที่ 3

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.13)$$

เมื่อทำการแปลงสมการ (3.18) ให้อยู่เป็นสมการพีชคณิตด้วยวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.2 โดยอาศัยปริมาตรควบคุมในรูป 4.11 (แสดงไว้ในลักษณะ 2 มิติ เพื่อความสะดวก) จะได้สมการความต่อเนื่องในรูปแบบสมการพีชคณิตดังนี้

$$[u_e - u_w] \Delta y \Delta z + [v_n - v_s] \Delta z \Delta x + [w_l - w_b] \Delta x \Delta y = 0 \quad (4.23)$$



รูปที่ 4.11 ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการความต่อเนื่อง

จากนั้นแทนค่าความเร็วต่างๆ ด้วยสมการที่อยู่ในรูปแบบเดียวกับสมการ (4.20) - (4.22) แล้วทำการจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการพีชคณิตของ P' ดังนี้

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + a_T P'_T + a_B P'_B + b \quad (4.24)$$

เมื่อ $a_E = d_e \Delta y \Delta z \quad (4.25a)$

$$a_W = d_w \Delta y \Delta z \quad (4.25b)$$

$$a_N = d_n \Delta z \Delta x \quad (4.25c)$$

$$a_S = d_s \Delta z \Delta x \quad (4.25d)$$

$$a_T = d_t \Delta x \Delta y \quad (4.25e)$$

$$a_B = d_b \Delta x \Delta y \quad (4.25f)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B \quad (4.25g)$$

$$b = [\mu_w^* - u_e^*] \Delta y \Delta z + [\nu_s^* - v_n^*] \Delta z \Delta x + [w_b^* - w_t^*] \Delta x \Delta y \quad (4.25h)$$

จากสมการข้างต้นพบว่า สมการ (4.25h) มีรูปแบบเหมือนกับสมการ (4.23) ซึ่งเป็นสมการพีชคณิตของสมการความต่อเนื่อง เพียงแต่เปลี่ยนจากความเร็ว u, v, w เป็น u^*, v^*, w^* ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เมื่อใดที่สมการ (4.25h) มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่า ความดัน P^* ที่ใช้เป็นค่าความดันที่เมื่อใช้ในการคำนวณค่าความเร็วจากสมการโมเมนตัมแล้ว ความเร็วที่คำนวณได้จะทำให้สมการความต่อเนื่องเป็นจริง

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเป็นลำดับขั้นตอนในการคำนวณหาคำตอบของวิธี SIMPLE ซึ่งเป็นลำดับขั้นตอนที่ใช้ในการคำนวณของงานวิจัยนี้ ได้ดังนี้

- 1) เติค่าความดันเริ่มต้น P^*
- 2) แก้สมการโมเมนตัม (4.12a) - (4.12c) เพื่อให้ได้ค่าความเร็ว u^*, v^*, w^*
- 3) แก้สมการ (4.24) เพื่อหาค่า P'
- 4) คำนวณ P จากสมการ (4.13)
- 5) คำนวณค่าความเร็ว u, v, w จากค่า u^*, v^*, w^* ที่ได้จากข้อ 2 ด้วยสมการ (4.20) - (4.22) ตามลำดับ
- 6) นำค่าความเร็ว u, v, w ที่ได้ไปทำการคำนวณสมการพีชคณิตอื่นๆ เช่น สมการอนุรักษ์พลังงาน
- 7) นำค่า P ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ไปเป็นค่าความดันเริ่มต้น P^* ในขั้นตอนที่ 1 จากนั้นทำการคำนวณตามขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง
- 8) ทำตามขั้นตอนเหล่านี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าที่คำนวณได้จากการคำนวณในรอบการคำนวณถัดกันมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย

4.4 การพิจารณาอุณหภูมิของระบบสถานะไม่คงตัว

จากที่กล่าวข้างต้นเป็นการอธิบายการแปรสมการอนุพันธ์ของระบบที่มีสถานะคงตัว สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการแปรสมการอนุพันธ์ของระบบที่มีสถานะไม่คงตัวของสมการอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์กระจายตัวของอุณหภูมิสำหรับกรณี que การนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และสมมติฐานต่างๆ ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 จะได้ดังสมการที่ 3.7

$$\rho \hat{C}_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.7)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.7) รอบปริมาตรควบคุมทั้งแนวแกน X, Y, Z และ รอบช่วงของเวลา แล้วทำการจัดรูปใหม่ โดยกำหนดให้ E, W, N, S, T, B เป็นโนดของแนวแกน X, Y, Z ตามลำดับ และ e, w, n, s, t, b เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างโนด E, W, N, S, T, B กับ โหนด P ตามลำดับ ส่วนกรณีของเวลา จะให้ค่า อุณหภูมิ ที่เวลา t เพื่อคำนวณหาค่า อุณหภูมิ ที่เวลา t + Δt และ $T_P^0, T_E^0, T_W^0, T_N^0, T_S^0, T_T^0, T_B^0$ เป็นค่าอุณหภูมิที่เวลา t และ $T_P, T_E, T_W, T_N, T_S, T_T, T_B$ เป็นค่าอุณหภูมิที่เวลา t + Δt ดังจะได้สมการดังนี้

$$a_p T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + a_T T_T + a_B T_B + b \quad (4.26)$$

เมื่อ

$$a_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad (4.27a)$$

$$a_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad (4.27b)$$

$$a_N = \frac{k_n}{(\delta x)_n} \quad (4.27c)$$

$$a_S = \frac{k_s}{(\delta x)_s} \quad (4.27d)$$

$$a_T = \frac{k_t}{(\delta x)_t} \quad (4.27e)$$

$$a_B = \frac{k_b}{(\delta x)_b} \quad (4.27f)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho \hat{C}_p \Delta X}{\Delta t} \quad (4.27g)$$

$$b = a_P^0 T_P^0 \quad (4.27h)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B + a_P^0 \quad (4.27i)$$

สำหรับวิธีการที่ใช้ในการแก้สมการพีชคณิตจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.5 วิธีการแก้สมการพีชคณิต

สมการอนุกรมต่างๆ เมื่อทำการแปลงให้เป็นสมการพีชคณิตแล้ว จะมีรูปแบบทั่ว ๆ ไป ดังต่อไปนี้

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4.28)$$

เมื่อ

P คือ โหนดที่ทำการคำนวณ

nb คือ โหนดในบริเวณใกล้เคียงกับ โหนด P

ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้วิธีเดียวกันในการแก้สมการเหล่านี้ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการแก้สมการพีชคณิตที่มีความซับซ้อนและอยู่ในรูปแบบหลายมิติ การแก้สมการจะนิยมใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative method) ซึ่งจะเริ่มต้นจากการเดาค่าเริ่มต้นของ ϕ บนทุกๆ โหนดของระบบ แล้วทำการคำนวณเพื่อปรับปรุงค่า ϕ ในลักษณะเป็นรอบของการคำนวณ เมื่อใดที่ค่า ϕ ที่ได้จากการคำนวณในรอบการคำนวณถัดกันมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย แสดงว่าค่า ϕ ที่ได้จากการคำนวณในรอบนั้นคือ คำตอบของสมการพีชคณิต

วิธีการคำนวณซ้ำที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ วิธีเกาส์-ไซเดล แบบทีละจุด (Gauss-Seidel Point-by-Point Method) ซึ่งจะเริ่มต้นจากการเดาค่าเริ่มต้นของ ϕ บนทุกๆ โหนดของระบบ จากนั้นจึงเริ่มทำการคำนวณจากโหนดใดโหนดหนึ่ง โดยที่อาศัยความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกับสมการ (4.28) ทำให้สามารถคำนวณค่า ϕ ณ โหนดนั้นๆ ได้จาก

$$\phi_p = \frac{\sum a_{nb} \phi_{nb}^* + b}{a_p} \quad (4.29)$$

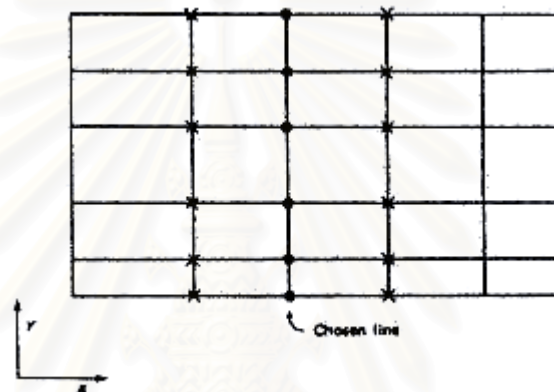
เมื่อ ϕ_p แทนค่า ϕ ของโหนดที่ทำการคำนวณ

ϕ_{nb}^* แทนค่าที่มีอยู่ในปัจจุบันของโหนดบริเวณรอบๆ โหนด P

เมื่อทุกๆ โหนดในระบบได้รับการคำนวณตามสมการข้างต้น จะถือว่าเสร็จสิ้นรอบของการคำนวณหนึ่งรอบ

เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีทีละจุดนี้ พบว่าใช้เวลาในการหาคำตอบของสมการมาก โดยเฉพาะในกรณีของระบบที่มีจำนวนของกริดมากๆ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีการเกาส์-ไซเดลแบบทีละแถว (Gauss-Seidel Line-by-Line Method) ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ขึ้นมา วิธีนี้เป็นการผสมกันระหว่างวิธีทีละจุดที่กล่าวมาข้างต้น กับ วิธี TDMA (TriDiagonal-Matrix Algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการแก้สมการพีชคณิตวิธีหนึ่ง (รายละเอียดของวิธีการ TDMA จะอยู่ในภาคผนวก ก)

การคำนวณด้วยวิธีทีละแถว จะเริ่มต้นจากการเดาค่าเริ่มต้นของ ϕ บนทุกๆ โหนดของระบบเช่นเดียวกันกับวิธีทีละจุด แต่เปลี่ยนจากการคำนวณทีละจุดไปเป็นการคำนวณทีละแถว ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะการแก้สมการด้วยวิธีทีละแถว

จากรูป ถ้าทำการเลือกแถวขึ้นมาหนึ่งแถวตามแนวแกน y (แถวที่มีเครื่องหมายจุดสีดำ) โดยสมมติว่าทราบค่า ϕ ของโหนดที่อยู่บริเวณแถวข้างเคียง (แถวที่มีเครื่องหมายกากบาท) ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาสมการพีชคณิตของโหนดตามแนวของแถวที่เลือก (โหนดที่มีเครื่องหมายจุดสีดำ) จะพบว่าสมการจะประกอบขึ้นจากความสัมพันธ์ของค่า ϕ ในโหนดของแถวข้างเคียงซึ่งทราบค่าในปัจจุบัน (โหนดที่มีเครื่องหมายกากบาท) ทำให้เมื่อได้สมการพีชคณิตของโหนดตามแนวแกนของแถวที่เลือกครบทุกโหนด จะกลายเป็นกลุ่มของสมการที่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเฉพาะค่า ϕ ในตำแหน่งของโหนดตามแนวของแถวเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถแก้กลุ่มของสมการดังกล่าวได้ด้วยวิธี TDMA

เมื่อทำการคำนวณครบทุกแถวในระบบด้วยวิธีการข้างต้น จะถือว่าเสร็จสิ้นรอบของการคำนวณหนึ่งรอบ ซึ่งจะพบว่าด้วยวิธีทีละแถวนี้ จะใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าวิธีทีละจุด และไม่จำเป็นต้องกังวลกับจำนวนของกริดที่มาก

4.6 รีแลกซ์ชัน (Relaxation)

ในการแก้สมการพีชคณิตด้วยวิธีการคำนวณซ้ำนั้น บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเพิ่มหรือลดการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่คำนวณได้ระหว่างรอบของการคำนวณที่อยู่ติดกัน ซึ่งจะเรียกวิธีการดังกล่าวว่า โอเวอร์รีแลกซ์ชัน (Overrelaxation) สำหรับในกรณีที่ต้องการเพิ่ม และอันเดอร์รีแลกซ์ชัน (Underrelaxation) ในกรณีที่ต้องการลดการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่คำนวณระหว่างรอบของการคำนวณที่อยู่ติดกัน ดังมีวิธีการดังนี้

พิจารณาสมการ (4.28) จะสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่คือ

$$\phi_p = \frac{\sum a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_p} \quad (4.30)$$

ทำการบวกและลบทางด้านขวามือของสมการ (4.30) ด้วย ϕ_p^* จะได้

$$\phi_p = \phi_p^* + \left(\frac{\sum a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_p} - \phi_p^* \right) \quad (4.31)$$

จากสมการ (4.31) จะพบว่าค่าที่อยู่ภายในวงเล็บก็คือค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าที่คำนวณได้ในรอบที่อยู่ติดกัน โดยสามารถทำการปรับปรุงค่าดังกล่าวได้จากค่า รีแลกซ์ชันแฟกเตอร์ (Relaxation Factor) α ดังสมการ

$$\phi_p = \phi_p^* + \alpha \left(\frac{\sum a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_p} - \phi_p^* \right) \quad (4.32)$$

นั่นคือ ถ้าค่าของ α อยู่ในช่วง 0-1 ก็จะใช้วิธีการนี้ว่า อันเดอร์รีแลกซ์ชัน และถ้า α มีค่ามากกว่า 1 ก็จะใช้วิธีการนี้ว่า โอเวอร์รีแลกซ์ชัน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการอันเดอร์รีแลกซ์ชัน ร่วมกันกับวิธีการเกาส์-ไซเดลแบบที่ละแถว ในการแก้สมการพีชคณิตทั้งสองกรณี

บทที่ 5

การเลือก Turbulence Model ที่ใช้อธิบายการไหล ผ่านสิ่งกีดขวางของของไหล

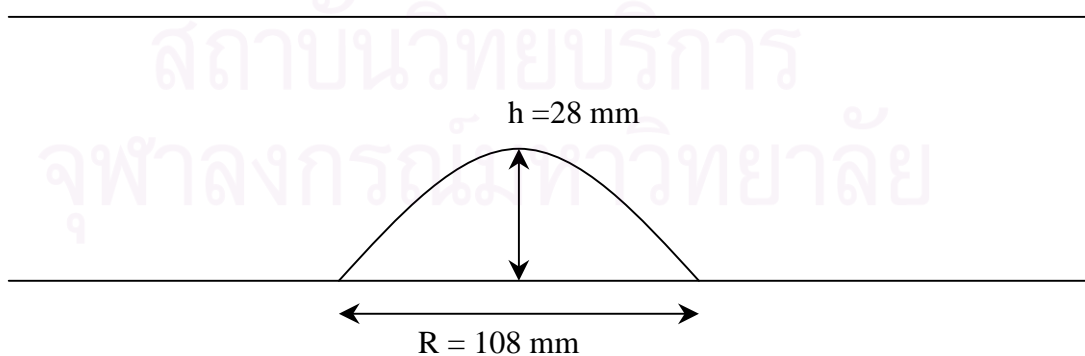
การเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Turbulence Model เพื่อนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ของงานวิจัยนี้ จำเป็นที่ต้องทำการตรวจสอบความถูกต้อง (Verification) และ ความสามารถในการทำนายของแต่ละแบบจำลองที่นำมาพิจารณาเพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้มากที่สุด ดังนั้น วิธีที่ใช้ในการเลือกแบบจำลองจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 รายละเอียดของการทดลองที่ใช้ในการเลือก Turbulence Model

การตรวจสอบจะใช้ผลการทดลองการของ Almeida และคณะ [11] ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของไหล ณ บริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวาง โดยสิ่งกีดขวางที่ใช้จะเป็นแบบจำลอง 2D Polynomial-Shaped ซึ่งมีลักษณะคล้ายภูเขา โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย

5.1.1 ลักษณะของสิ่งกีดขวางรูปภูเขา

สิ่งกีดขวางที่ใช้ในการทดลองเป็นรูปภูเขาซึ่งมีลักษณะของ 2D Polynomial-Shaped ด้วยความสูงของภูเขาเท่ากับ 28 มิลลิเมตร และ ความยาวของฐานเท่ากับ 108 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.1 โดยจะวางบนแผ่นบางในตำแหน่ง 6 เมตร นับจากปากทางเข้า



รูปที่ 5.1 แสดงรูปภูเขาที่ใช้ในการทดลอง

5.1.2 ลักษณะของชุดการทดลอง

ชุดการทดลองมีลักษณะเป็น Water tunnel ที่สร้างจากพลาสติก Perspex ด้วยขนาดความสูง 170 มิลลิเมตร ความยาว 7 เมตร และความกว้าง 200 มิลลิเมตร โดยชุดการทดลองนี้จะเป็นระบบแบบ Recirculating System ระบบนี้จะนำน้ำที่ไหลแล้ว ให้ไหลลงในถังพัก และใช้เครื่องสูบน้ำให้ไหลกลับเข้าระบบ ส่วนทางเข้าจะมีการใช้อุปกรณ์ที่ทำให้น้ำที่ไหลเข้ามาเป็นแบบ Uniform Flow

5.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็ว

ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยการทดลอง จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับวัดและเก็บภาพเคลื่อนไหวของของไหลที่แม่นยำ สำหรับการทดลองของ Almeida อุปกรณ์สำหรับแสดงภาพการไหล คือใช้ฟองอากาศเป็นอนุภาค Tracer กับ ใช้แผ่นสะท้อนแสงหนาประมาณ 2 mm ในการทำให้ของไหลสว่างด้วยการยิงแสง Laser (Argon – ion, 5W) ด้วยเลนส์ทรงกระบอก ส่วนการวัดความเร็วของของไหล คือ Laser-Doppler Velocimeter โดยลักษณะของอุปกรณ์นั้นได้สรุปดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงลักษณะเฉพาะทางทฤษฎีของ Laser-Doppler Velocimeter

ความยาวคลื่นของ He-Ne Laser ขนาด 15 mW	632.8 mm
ระยะโฟกัสของเลนส์	300 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางลำแสง laser ที่ความเข้ม e^{-2}	1.1 mm
ค่า half-angle ที่วัดได้ที่จุดตัดในอากาศของลำแสง	5.43°
ค่า half-angle ที่คำนวณได้ที่จุดตัดในน้ำของลำแสง	4.07°
Fringe separation (Line-Pair Spacing)	3.34 μm
ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่คำนวณได้ของอุปกรณ์วัดปริมาตร ที่ความเข้ม e^{-2} (แกนหลักและแกนรองของวัตถุทรงวงรี ในน้ำ)	3.010 และ 0.220 mm
ค่าคงที่ Velocimeter Transfer	0.299 MHz/m/s ⁻¹

5.1.4 ข้อกำหนดของการทดลอง

การทดลองของ Almeida และ คณะ มีข้อกำหนดต่าง ๆ มีดังนี้

1. ข้อกำหนดของสิ่งที่ไหลเข้า Tunnel

- ของไหลที่ใช้ คือ น้ำ โดยพิจารณาว่ามีค่า Kinematic Viscosity (ν) เท่ากับ $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- ความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่แนวกึ่งกลางการไหล (U_0) เท่ากับ 2.147 m/s
- ค่า Reynolds number ใช้ความสูงของสิ่งกีดขวางในการคำนวณ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60,000
- ค่าที่ Turbulence intensity จะเท่ากับ 3%
- ค่า Friction Factor C_f จะเท่ากับ 0.0026
- ค่า Wall Friction Velocity U_τ เท่ากับ 0.0689 m/s

2. ตำแหน่งของ Tunnel ที่ใช้ในการพิจารณาการไหล

Almeida และ คณะ ได้กำหนดตำแหน่งในการพิจารณารูปแบบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางของของไหลด้วยการวัดค่าความเร็วตามแนวความสูงของ tunnel โดยที่แสดงในรูปสัดส่วนระหว่างค่าความเร็วที่วัดได้ (U) กับ ค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่แนวกึ่งกลางการไหล (U_0) ทั้งหมด 14 ตำแหน่ง ตามความยาว Tunnel โดยเริ่มพิจารณาจากตำแหน่งด้านหน้าของสิ่งกีดขวางจำนวน 2 ตำแหน่ง และ ตำแหน่งที่เหลือนั้นจะเริ่มนับจากจุดยอดของสิ่งกีดขวางไปอีก 12 ตำแหน่ง โดยค่าที่แสดงอยู่ในรูปสัดส่วนระหว่างระยะทาง (x) กับ ค่าความสูงของสิ่งกีดขวาง และ ที่จุดยอดของสิ่งกีดขวางจะกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ ($x = 0$)

- ตำแหน่งด้านหน้าของสิ่งกีดขวาง: $x/h = -1.964$ และ -0.724

- ตำแหน่งด้านหลังของสิ่งกีดขวาง: $x/h = 0.0, 1.071, 1.786, 2.500, 3.214, 4.286, 4.786, 5.357, 6.607, 8.036, 10.714, \text{ และ } 17.850$

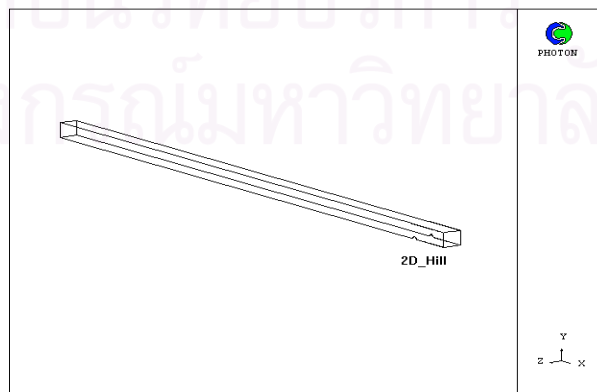
นอกจากนี้ยังพิจารณา จุดที่เกิด Separation หรือ จุดที่เริ่มเกิดการไหลวน (Recirculation) และ ระยะของการเกิดการไหลวน (Recirculation Zone) โดยเริ่มนับจุด Separation จนถึงจุดเริ่มที่การไหลกลับไปเป็นแบบ Fully Development

5.2 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

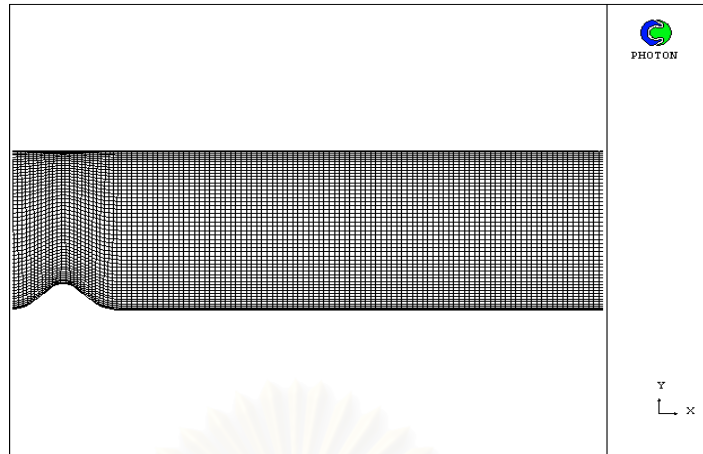
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาพิจารณาเพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณี High Reynolds Model โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คือ K-Epsilon Model และ K-Epsilon + Yap's Correction Model และ กรณี Low Reynolds Model โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คือ Low K-Epsilon Model, Low K-Epsilon + Yap's Correction Model และ 2-Layer K-Epsilon Model โดยทั้ง 2 กรณี จะเป็นการจำลองแบบ 2 มิติเท่านั้น ดังมีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 การกำหนดกริด

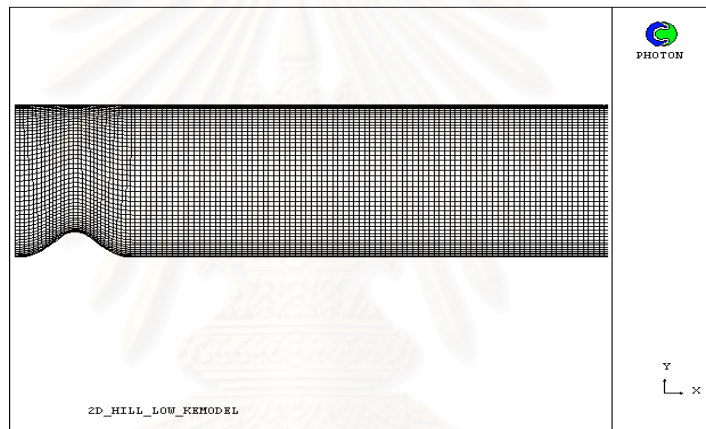
การจำลองในกรณีนี้ แบ่งรูปแบบของกริดที่ใช้เป็น 2 แบบ ตามรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 กรณี โดยกำหนดให้โดเมนที่ใช้ในการจำลองมีขนาด กว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 6.6 เมตร และ สูง 170 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งการกำหนดกริดที่ใช้ในการคำนวณจะแบ่งการกำหนดให้จำนวนและระยะห่างของเส้นกริดเป็นสองส่วน คือ ส่วนของโดเมนที่ระยะ 6 เมตรแรก จะกำหนดให้จำนวนกริดตามความยาวของโดเมน (NX), จำนวนกริดตามความสูงของโดเมน (NY) และจำนวนกริดตามความกว้างของโดเมน (NZ) มีค่าเท่ากับ 20, 50, 1 ตามลำดับ และ ส่วนของโดเมนที่ระยะ 600 มิลลิเมตรถัดไป จะกำหนดให้จำนวนกริดตามความยาวของโดเมน (NX), จำนวนกริดตามความสูงของโดเมน (NY) และจำนวนกริดตามความกว้างของโดเมน (NZ) มีค่าเท่ากับ 122, 50, 1 ตามลำดับ และระยะห่างของเส้นกริดจะเท่ากันทั้งสองส่วน โดยกำหนดให้ระยะห่างของเส้นกริดตามความสูง จะมีขนาดที่เล็กในบริเวณใกล้ผนัง และมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนมีขนาดใหญ่สุดที่บริเวณกลางท่อ โดยที่กรณี High Reynolds Model จะมีสัดส่วน 1:1.4 ดังรูปที่ 5.3 และกรณี Low Reynolds Model จะมีสัดส่วน 1:1.8 ดังรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 แสดงลักษณะของกริดบริเวณสี่กึ่งขวาง



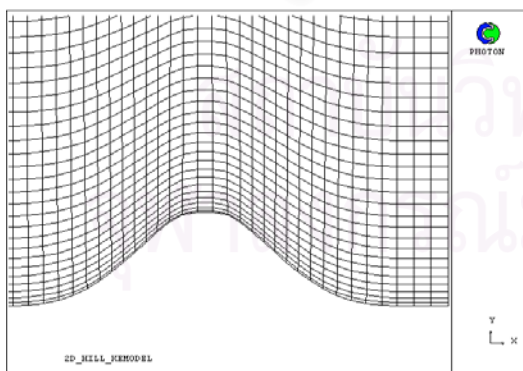
รูปที่ 5.2 ลักษณะของแบบจำลองที่ใช้ สำหรับกรณีของการเลือก Turbulence Model



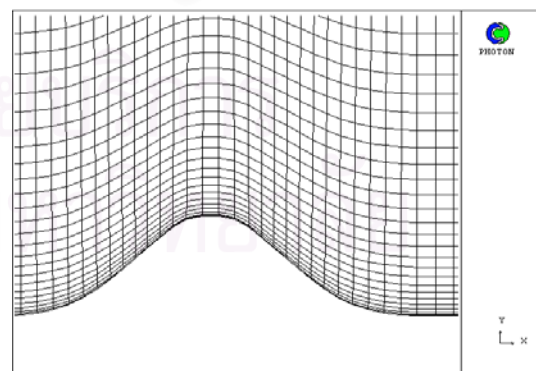
รูปที่ 5.3 ลักษณะของกริด ณ $NX=21 - NX=142$ สำหรับกรณี High Reynolds Mode



รูปที่ 5.4 ลักษณะของกริด ณ $NX=21 - NX=142$ สำหรับกรณี Low Reynolds Model



สำหรับกรณี High Reynolds Model



สำหรับกรณี Low Reynolds Model

รูปที่ 5.5 ลักษณะของกริด ณ บริเวณ สังกัดขวางรูปภูเขา

5.2.2 สภาวะขอบเขต (Boundary Condition)

5.2.2.1 บริเวณทางเข้าของ Water Tunnel

ความเร็วของน้ำที่ไหลเข้ามาใน Water Tunnel จะมีลักษณะเป็นแบบ Uniform Flow โดยที่ความเร็วจะมีเฉพาะในแนวแกน X เท่านั้น (\bar{U}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.0 เมตร/วินาที และมีค่า Intensity (I) เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนของค่าพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน (k) และ ค่าอัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน (ϵ) สามารถประมาณค่าได้จากค่า Intensity ด้วยสมการต่อไปนี้ ตามลำดับ

$$k = (I * \bar{U})^2 \quad (5.1)$$

และ

$$\epsilon = \frac{0.09^{0.75} k^{1.5}}{L} \quad (5.2)$$

โดยที่

$$L = 0.1H \quad (5.3)$$

เมื่อ H คือ Hydraulic Radius ของ ช่องทางเข้า มีค่าเท่ากับ 0.0115 เมตร

5.2.2.2 บริเวณผนัง

ที่บริเวณทางด้านระนาบ XZ ของ Water Tunnel จะกำหนดให้มีแผ่น Plate แบบเรียบไม่มี ความหนายู่ที่ด้าน $IY = 1$ กับ ด้าน $IY = 51$ และ องค์กรประกอบของความเร็วทุกทิศทางที่ผนังมีค่าเท่ากับ ศูนย์ (no-Slip Condition) รวมทั้งกำหนดให้บริเวณใกล้เคียง ผนังเป็นไปตามฟังก์ชันผนังในหัวข้อที่ 3.5 สำหรับกรณี High Reynolds Model

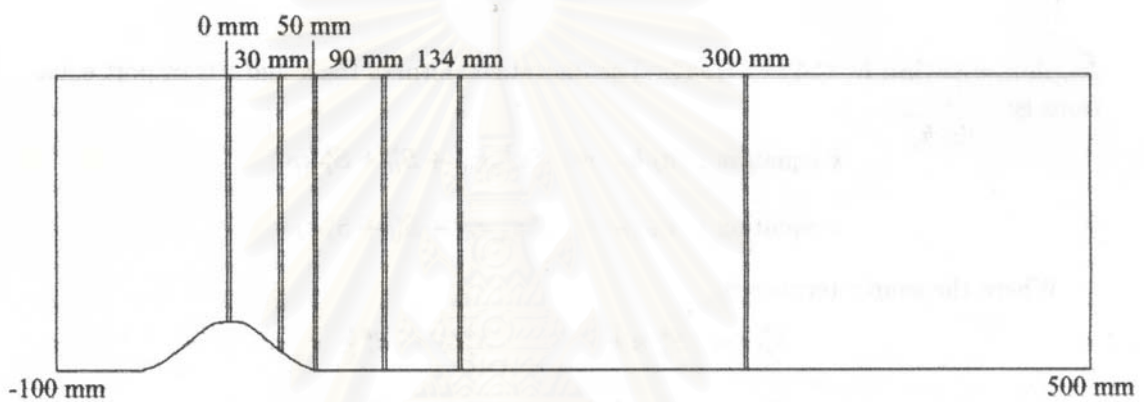
5.2.2.3 บริเวณด้านสมมาตร (Symmetry boundary)

บริเวณที่กำหนดให้เป็นด้านสมมาตร คือ บริเวณระนาบ XY ณ ด้าน $IZ = 1$ กับ ด้าน $IZ = 2$ โดยกำหนดให้ ความเร็วในแนวแกน Z (\bar{W}) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และ เกรเดียนต์ของ \bar{U}, \bar{V} ตามแนว แกน X และ Y ตามลำดับมีค่าเท่ากับ ศูนย์

5.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลของการจำลองโดยใช้เทคนิคซีเอฟดี

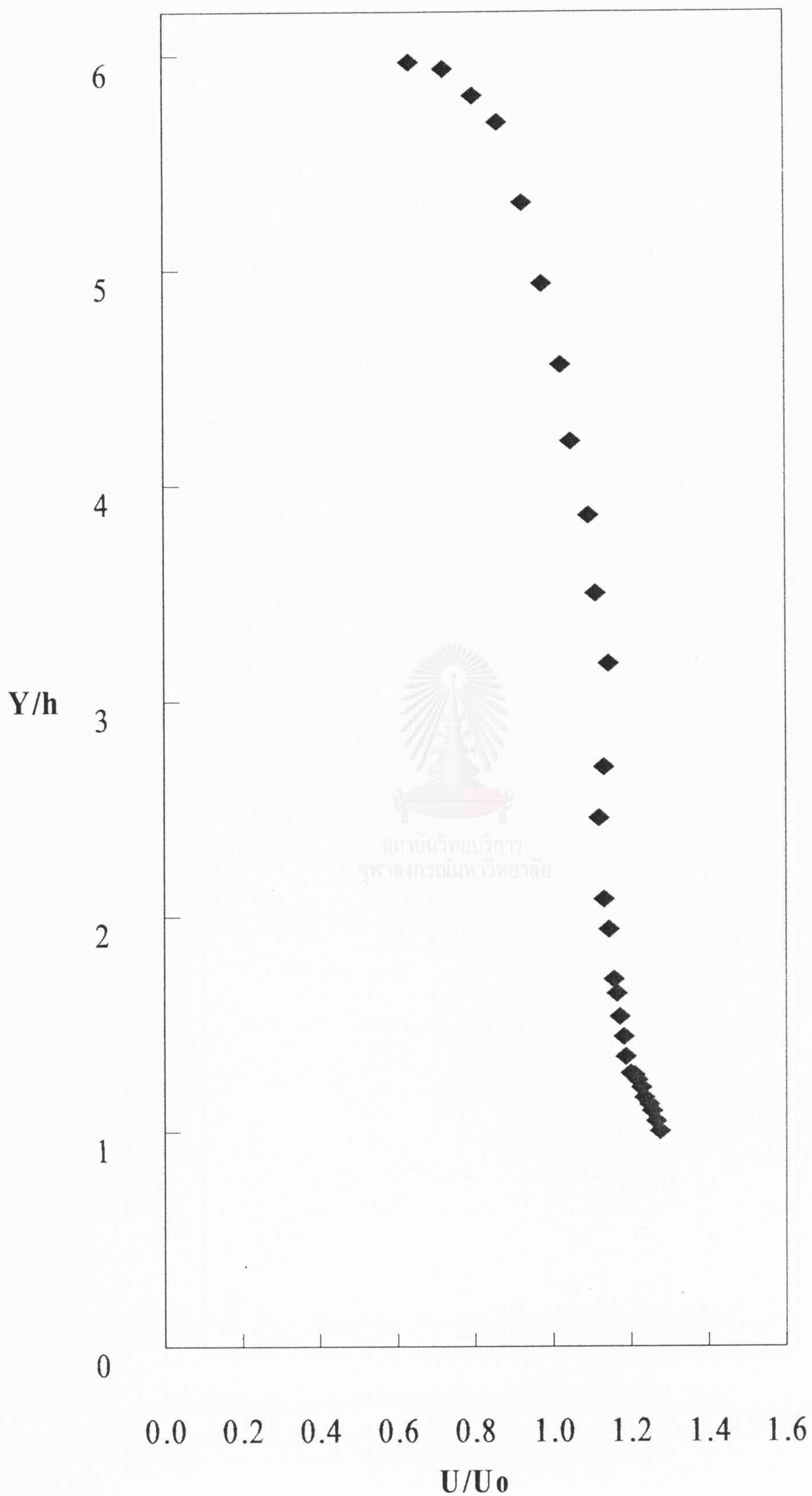
5.3.1 ผลที่ได้จากการทดลอง

Almeida และ คณะ เสนอผลที่ได้จากการทดลองในรูปของ Velocity Profile ในแนวตั้ง ของน้ำที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปภูเขาในสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ($Re = 6 \times 10^5$) โดยตำแหน่งของระยะที่นำมาพิจารณานั้นมีดังนี้ คือเริ่มจากจุดสูงสุดของสิ่งกีดขวาง ($X = 0.0$ มิลลิเมตร) และตำแหน่งที่ห่างจากจุดสูงสุดของสิ่งกีดขวางเป็นระยะ 30, 50, 90, 134 ซึ่งในช่วงที่เห็น Recirculation Zone และตำแหน่งที่ 300 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ลักษณะการไหลเป็นแบบ fully developed ดังรูปที่ 5.6

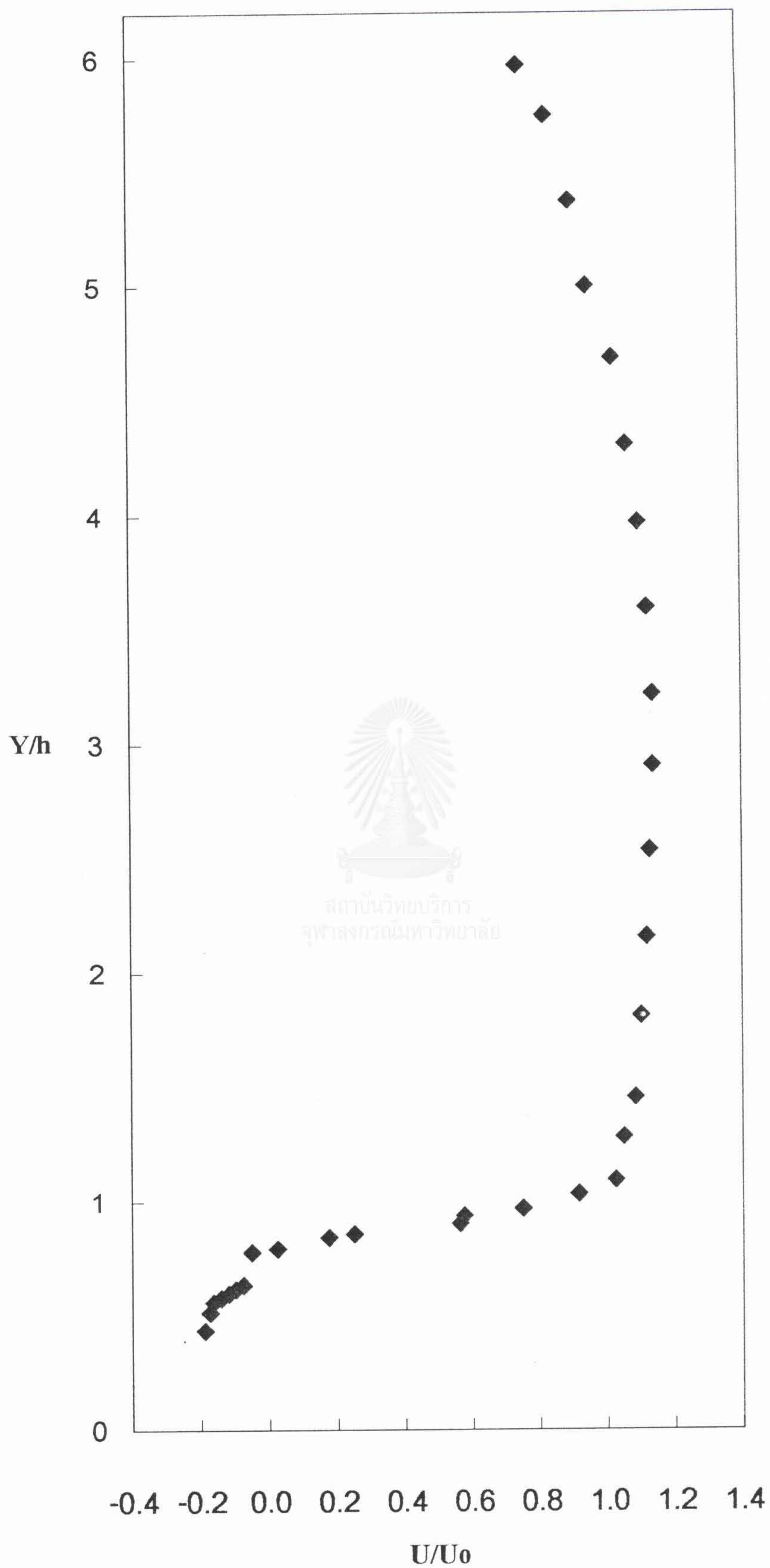


รูปที่ 5.6 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์

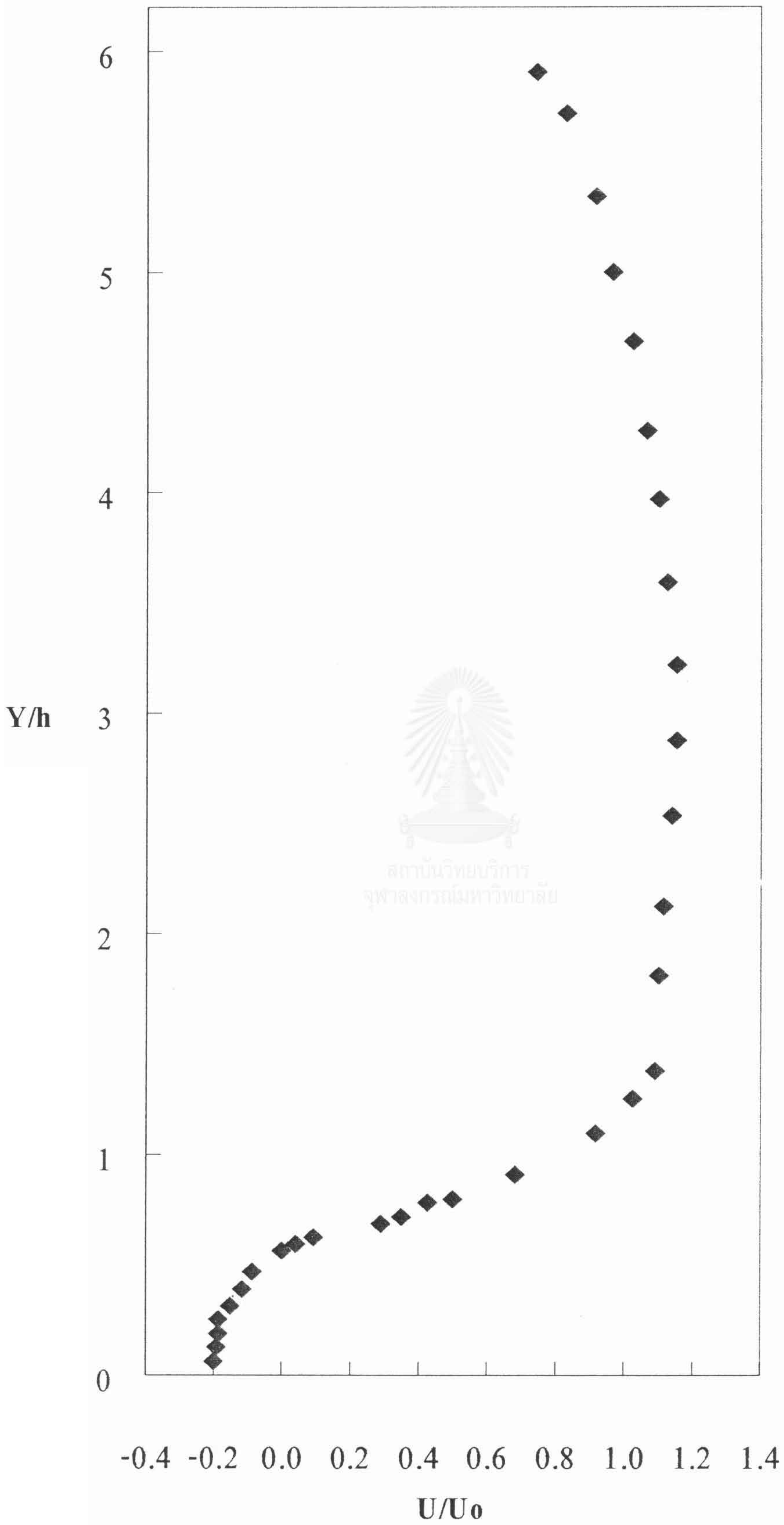
จะพบว่าความเร็วมีค่ามากที่สุดที่บริเวณศูนย์กลาง Water Tunnel และลดต่ำลงทั้งสองข้างที่เข้าหาผนังหรือที่เรียกว่าการไหลแบบ Fully Developed ที่ระยะเท่ากับ 6 เมตรนับจากทางเข้า แต่เมื่อน้ำไหลผ่านมาถึงบริเวณที่มีสิ่งกีดขวาง เป็นผลให้ความเร็วของน้ำที่ผนังด้านที่มีสิ่งกีดขวางจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่บริเวณจุดยอดของสิ่งกีดขวาง ($X = 0.0$ มิลลิเมตร) และเมื่อน้ำไหลผ่านจุดยอดไปได้สักระยะหนึ่ง น้ำมีการเคลื่อนตัวหลุดจากผิวสัมผัสของสิ่งกีดขวาง ซึ่งเรียกจุดดังกล่าวว่าจุด Separation ซึ่งความเร็วหลังจากจุดนี้จะเริ่ม มีค่าลดต่ำลงจนมีค่าติดลบ และจะมีค่าความเร็วติดลบมากขึ้น ที่บริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวาง โดยมีลักษณะการไหลแบบไหลวน หรือที่เรียกบริเวณนี้ว่า Recirculation Zone แต่เมื่อผ่านไปสักระยะลักษณะการไหลจะกลับสู่สภาพของ Fully Developed อีกครั้ง ดังรูปที่ 5.7 - 5.12 ที่แสดงกราฟระหว่างค่า U/U_0 กับ Y/h ตามตำแหน่งต่างๆ ข้างต้น สำหรับจุดที่เกิด Separation ของการทดลองเกิดที่ระยะ $X = 12$ มิลลิเมตร นับจากจุดสูงสุดของสิ่งกีดขวาง และ ระยะของ Recirculation Zone ของการทดลอง เริ่มเกิด ณ จุด Separation และสิ้นสุดที่ระยะ $X = 135$ มิลลิเมตร นับจากจุดสูงสุดของสิ่งกีดขวาง โดยที่ลักษณะของ Separation Point และ Recirculation Zone ดังแสดงในรูปที่ 5.13



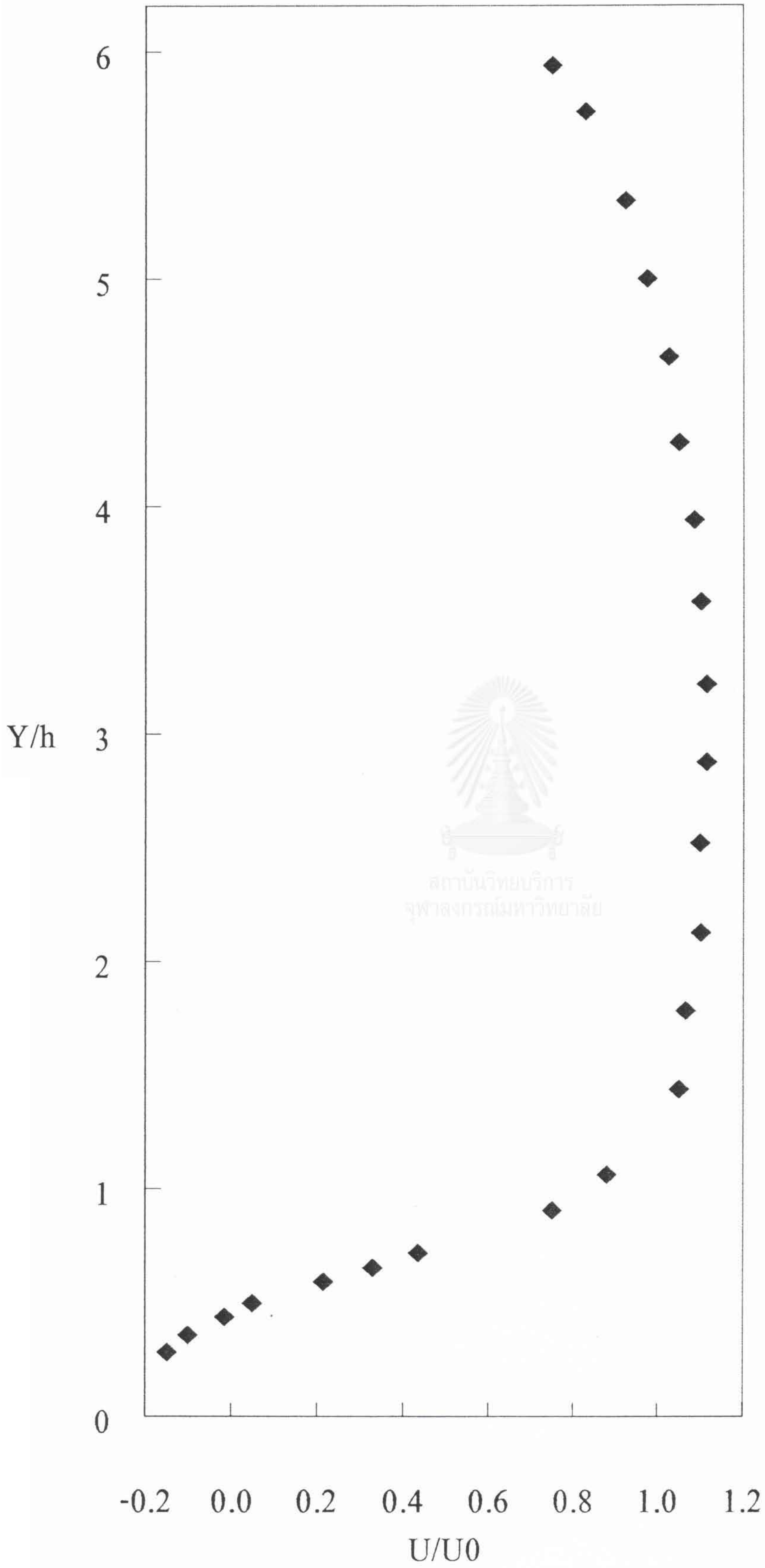
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 0$ mm



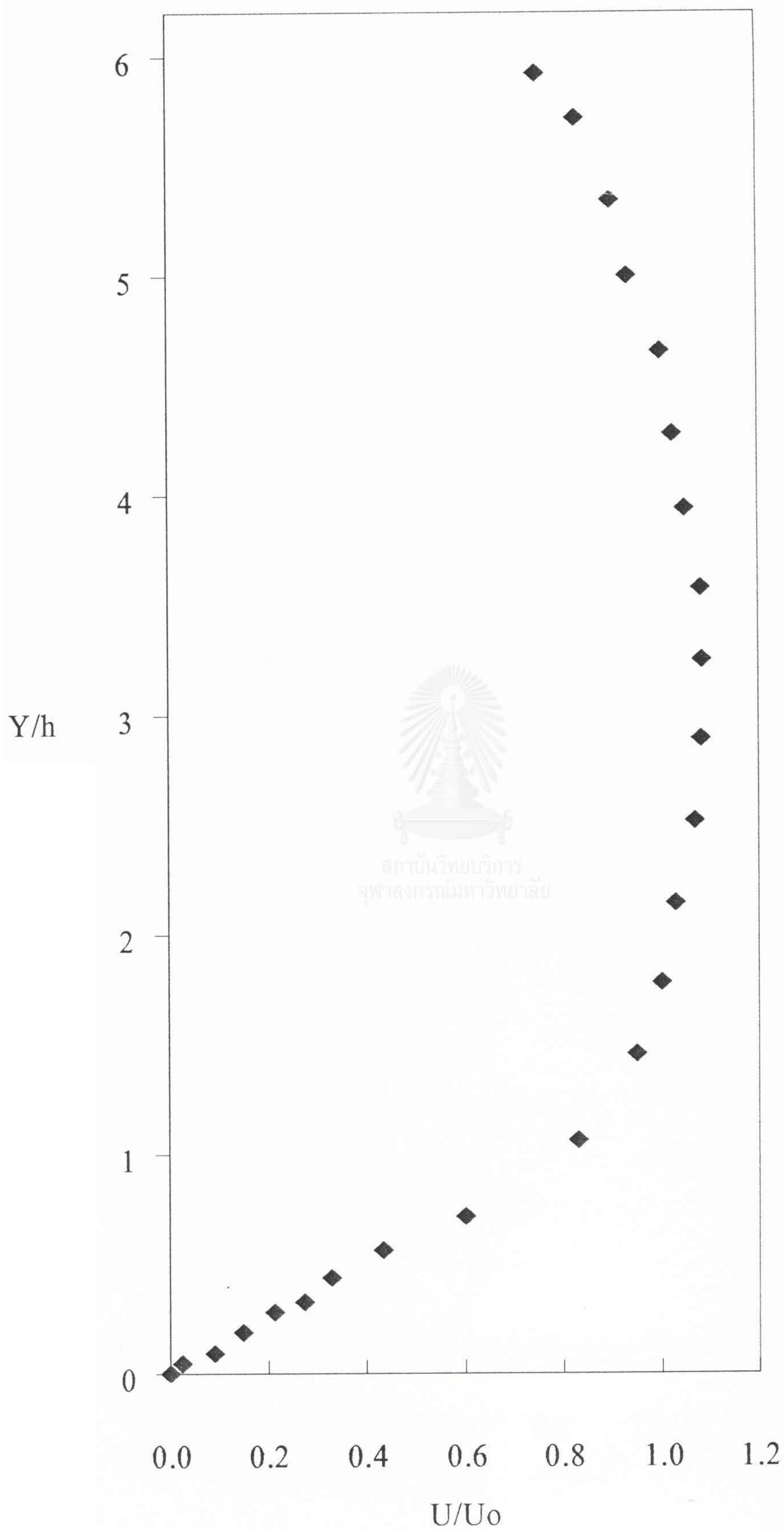
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 30 \text{ mm}$



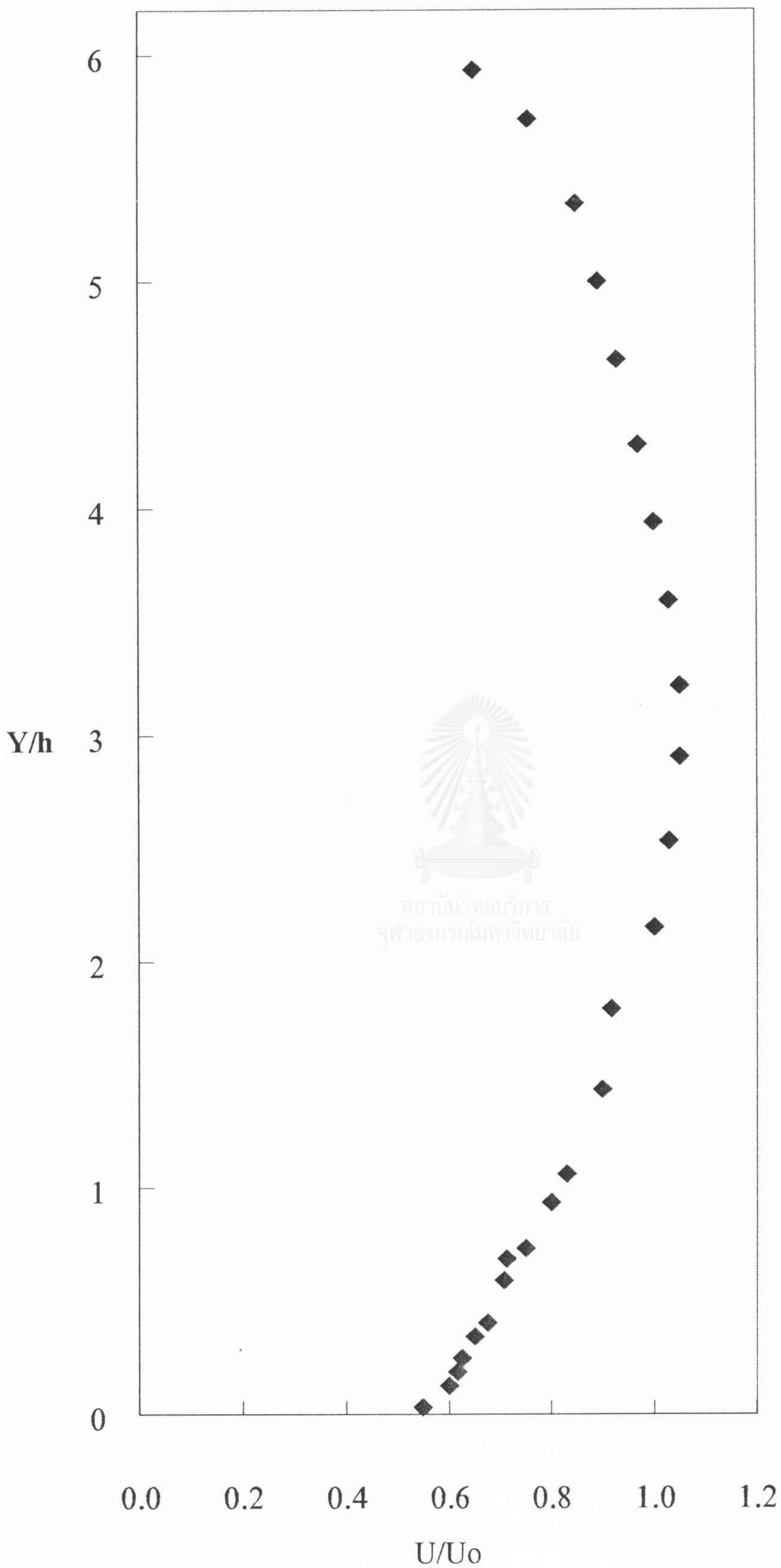
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 50 \text{ mm}$



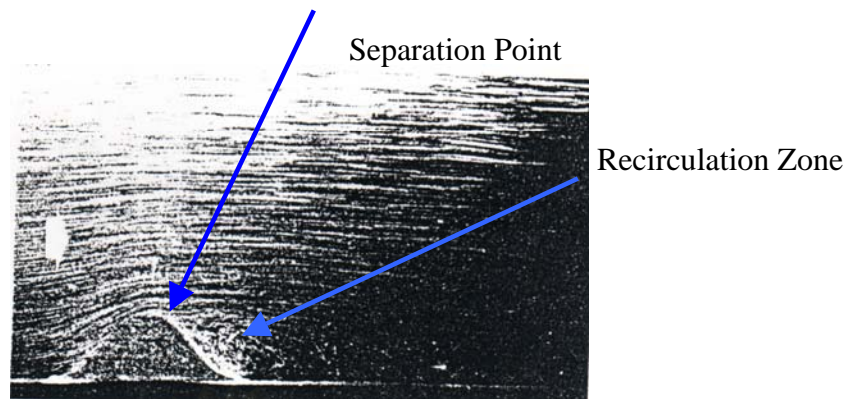
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 90$ mm



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 134 \text{ mm}$



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่า U/U_0 ที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ $X = 300$ mm



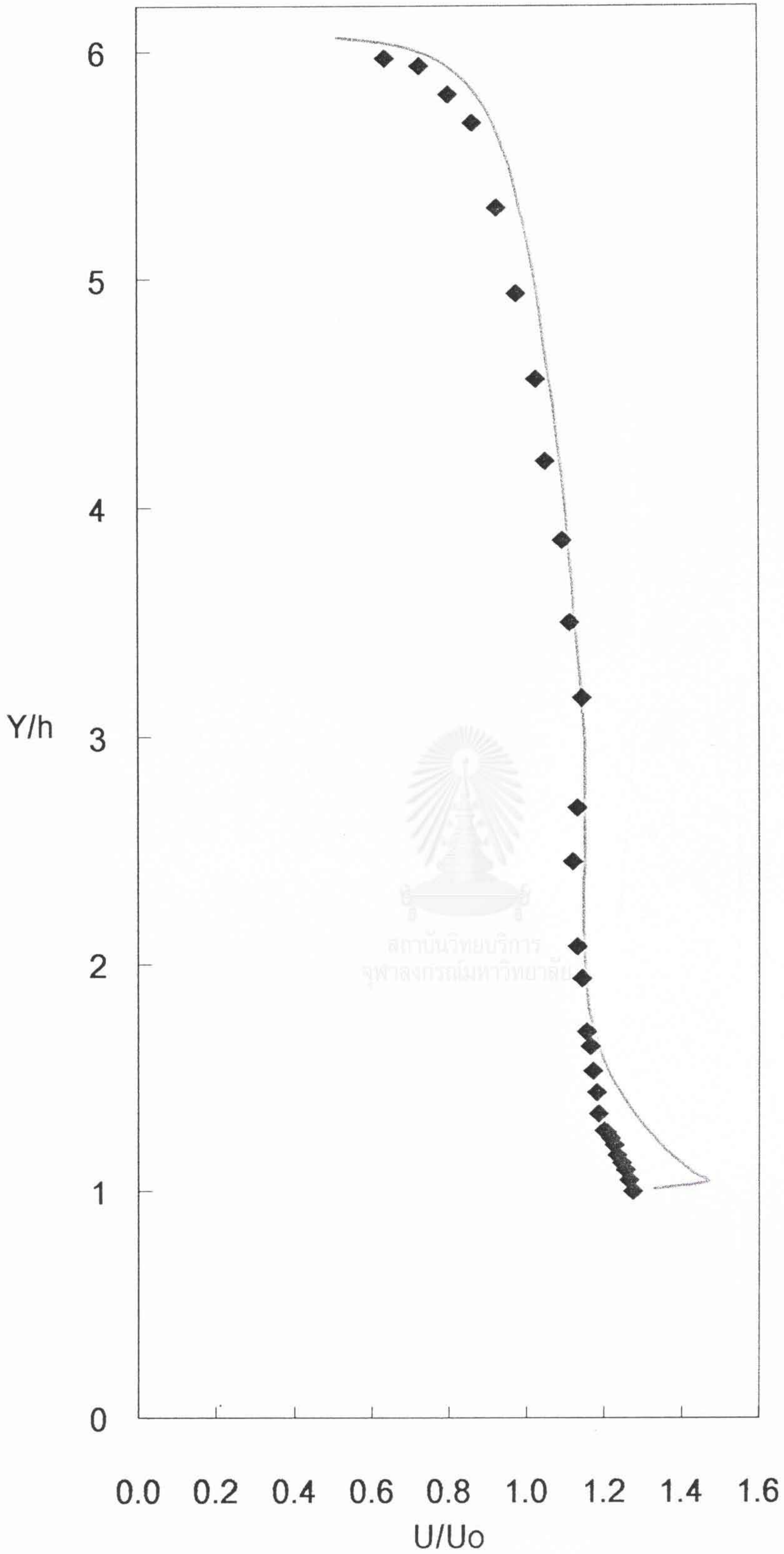
รูปที่ 5.13 แสดงลักษณะของ Separation Point และ Recirculation Zone

5.3.2 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยเทคนิค CFD

จากสถานะเงื่อนไขต่างๆ ข้างต้น เมื่อทำการจำลองปรากฏการณ์การไหลของน้ำที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปภูเขาในสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ($Re = 6 \times 10^5$) ด้วยเทคนิค CFD โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Turbulence Model ที่เลือกมาพิจารณาความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในงานวิจัยที่จะทำการศึกษาต่อไป โดยผลการจำลองที่ได้จะแสดงด้วยกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่า U/U_0 กับ Y/h และ ตำแหน่งที่ใช้คือ $X = 0, 30, 50, 90, 134, 300$ mm เช่นเดียวกับการทดลอง กราฟที่แสดงจะมีลักษณะการเปรียบเทียบผลแบบหนึ่งกราฟต่อหนึ่งแบบจำลองที่ใช้ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา ดังนั้นกราฟจะแสดงการเปรียบเทียบความเร็วของการไหลที่ได้จากผลการจำลอง กับ ที่ได้จากการทดลองมีดังนี้ คือ

1. รูปที่ 5.14 – 5.19 สำหรับ K-Epsilon Model
2. รูปที่ 5.20 – 5.25 สำหรับ Low K-Epsilon Model
3. รูปที่ 5.26 – 5.31 สำหรับ K-Epsilon + Yap's Correction Model
4. รูปที่ 5.32 – 5.37 สำหรับ Low K-Epsilon + Yap's Correction Model
5. รูปที่ 5.38 – 5.43 สำหรับ 2-Layer K-Epsilon Model

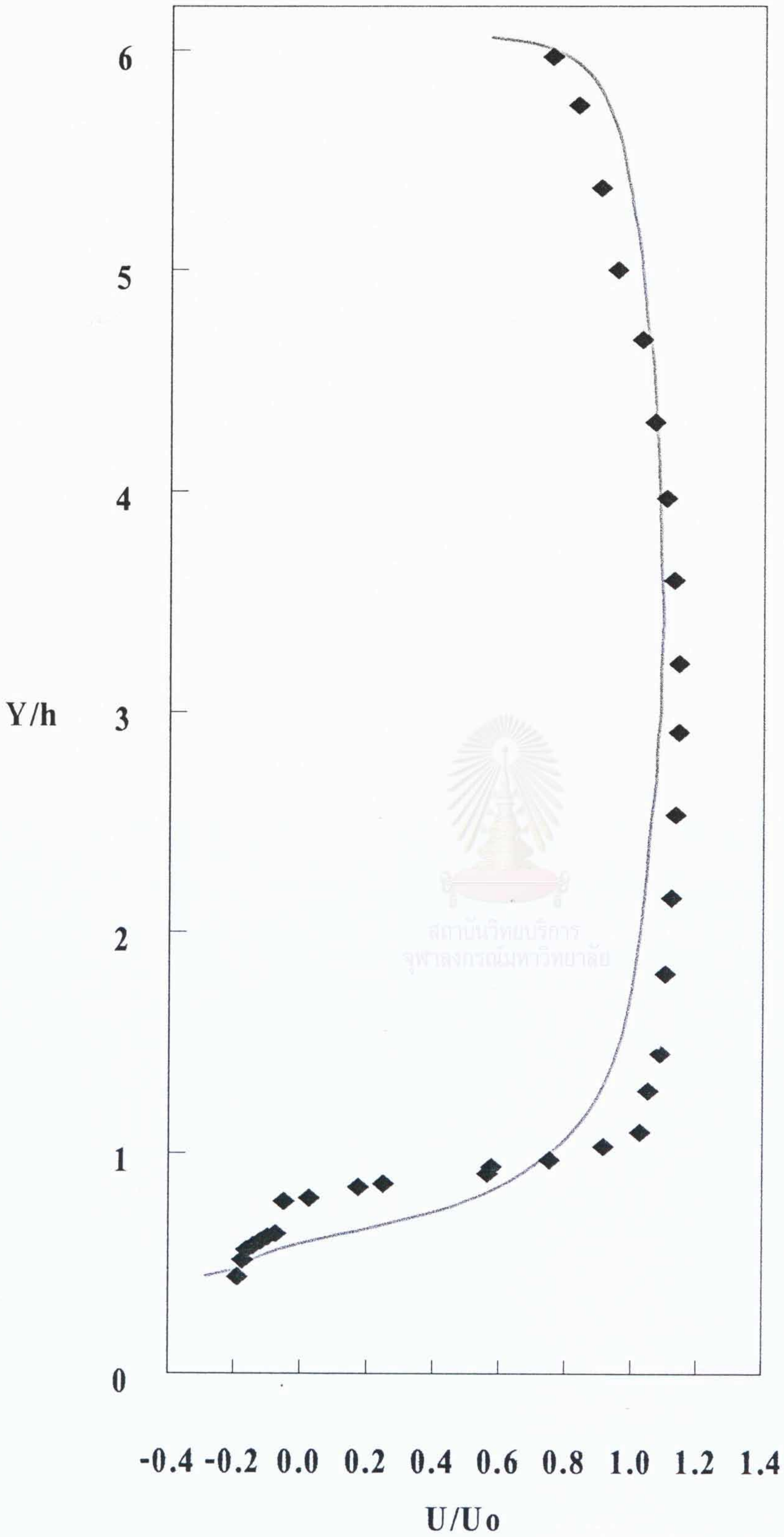
สำหรับจุดที่เกิด Separation และ จุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Turbulence Model แบบต่างๆ ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายทั้งระยะทางจริง และ สัดส่วนของระยะทางจริงกับความสูงของสิ่งกีดขวางพร้อมทั้งพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังตารางที่ 5.2



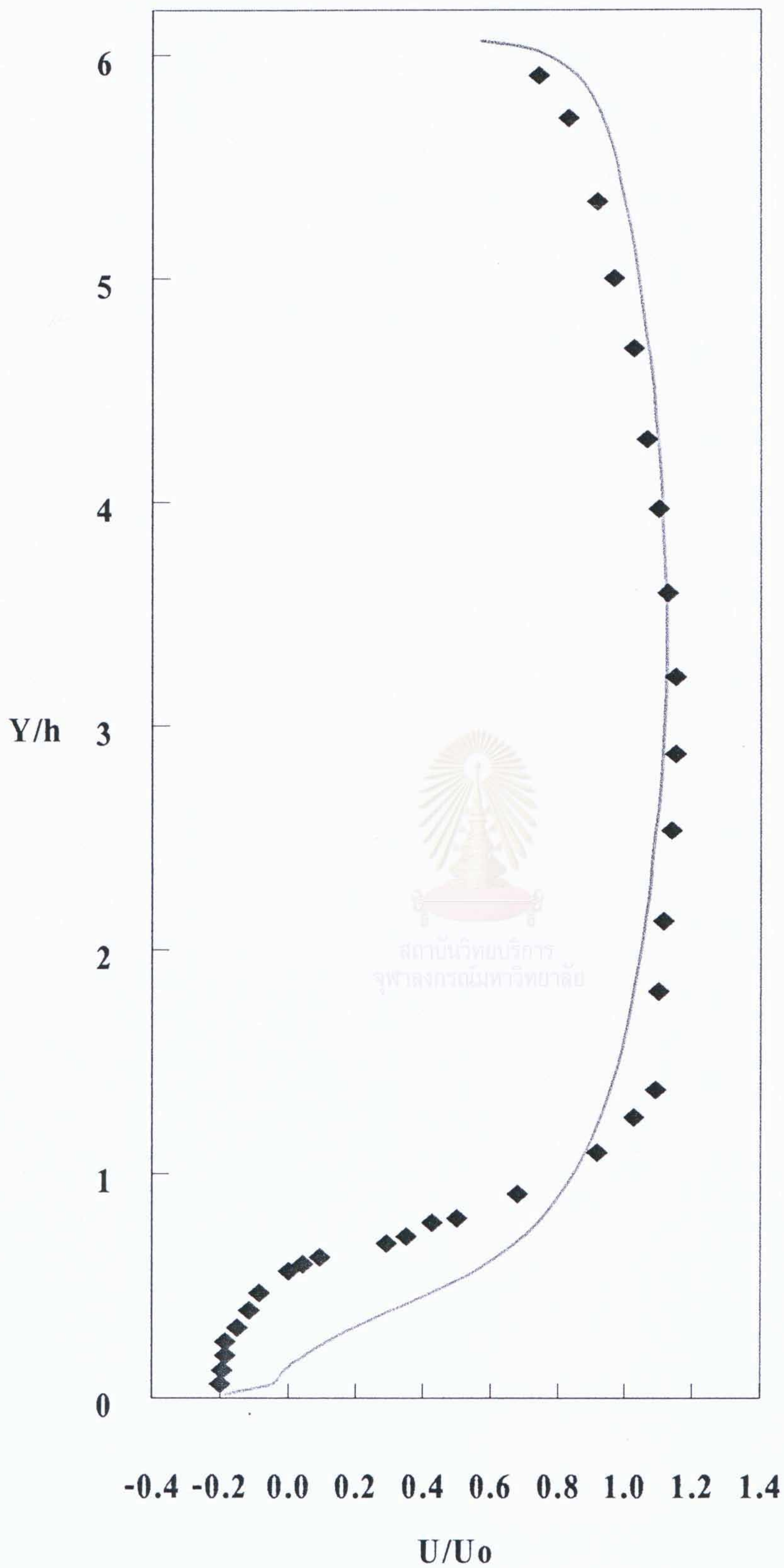
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 0$ mm

โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



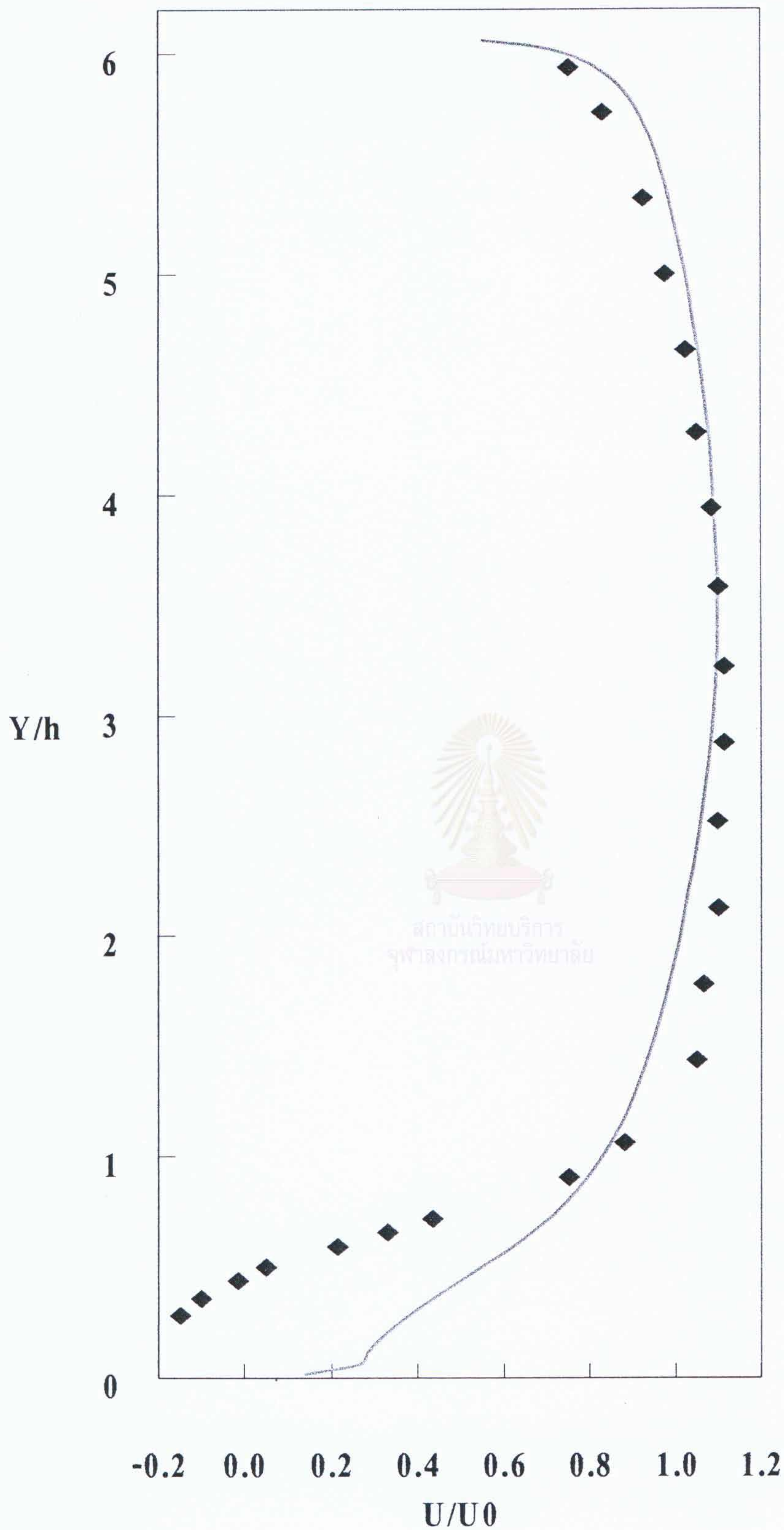
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 30 \text{ mm}$
 โดยที่ ♦ สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 50 \text{ mm}$

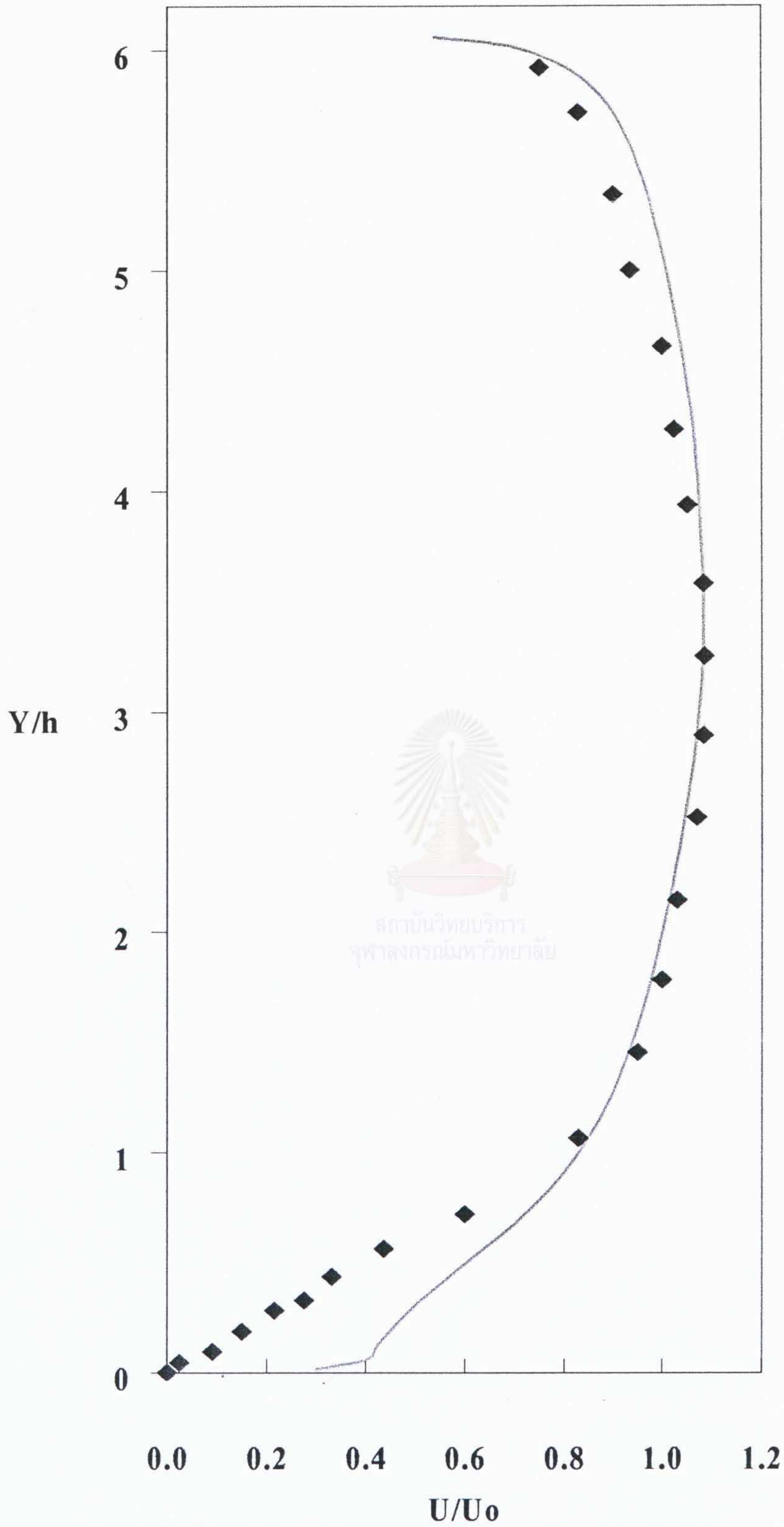
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 90 \text{ mm}$

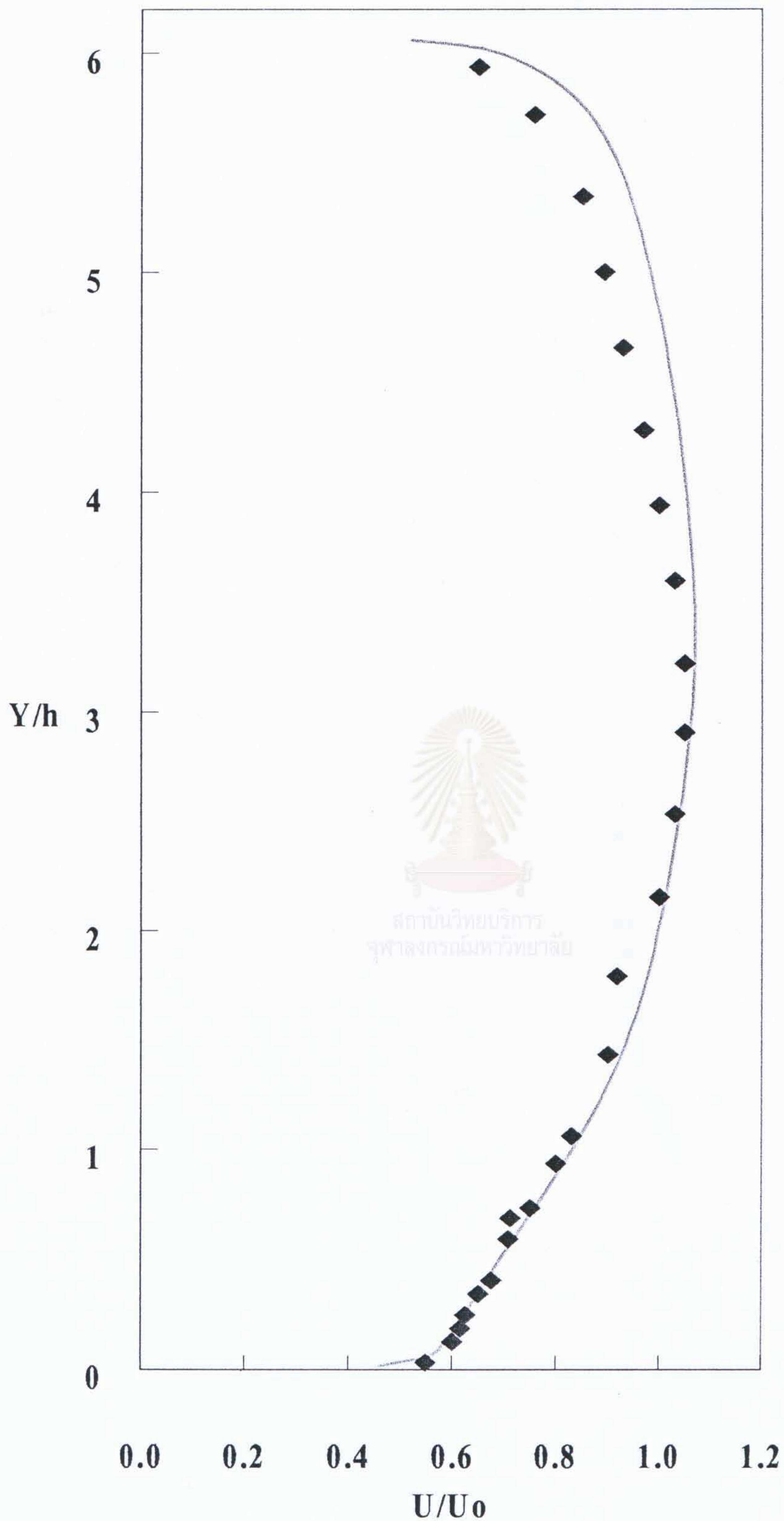
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 134$ mm

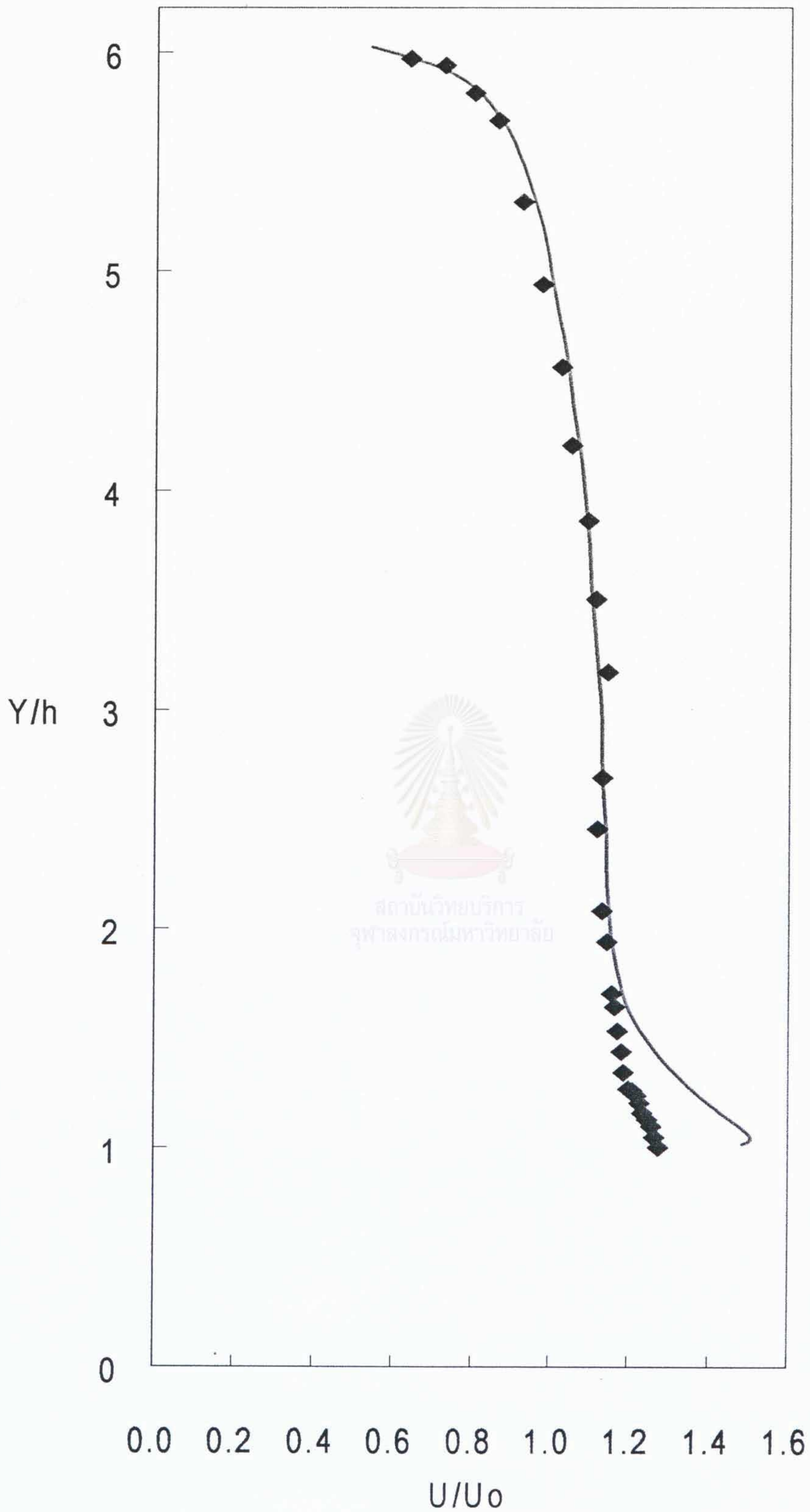
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 300$ mm

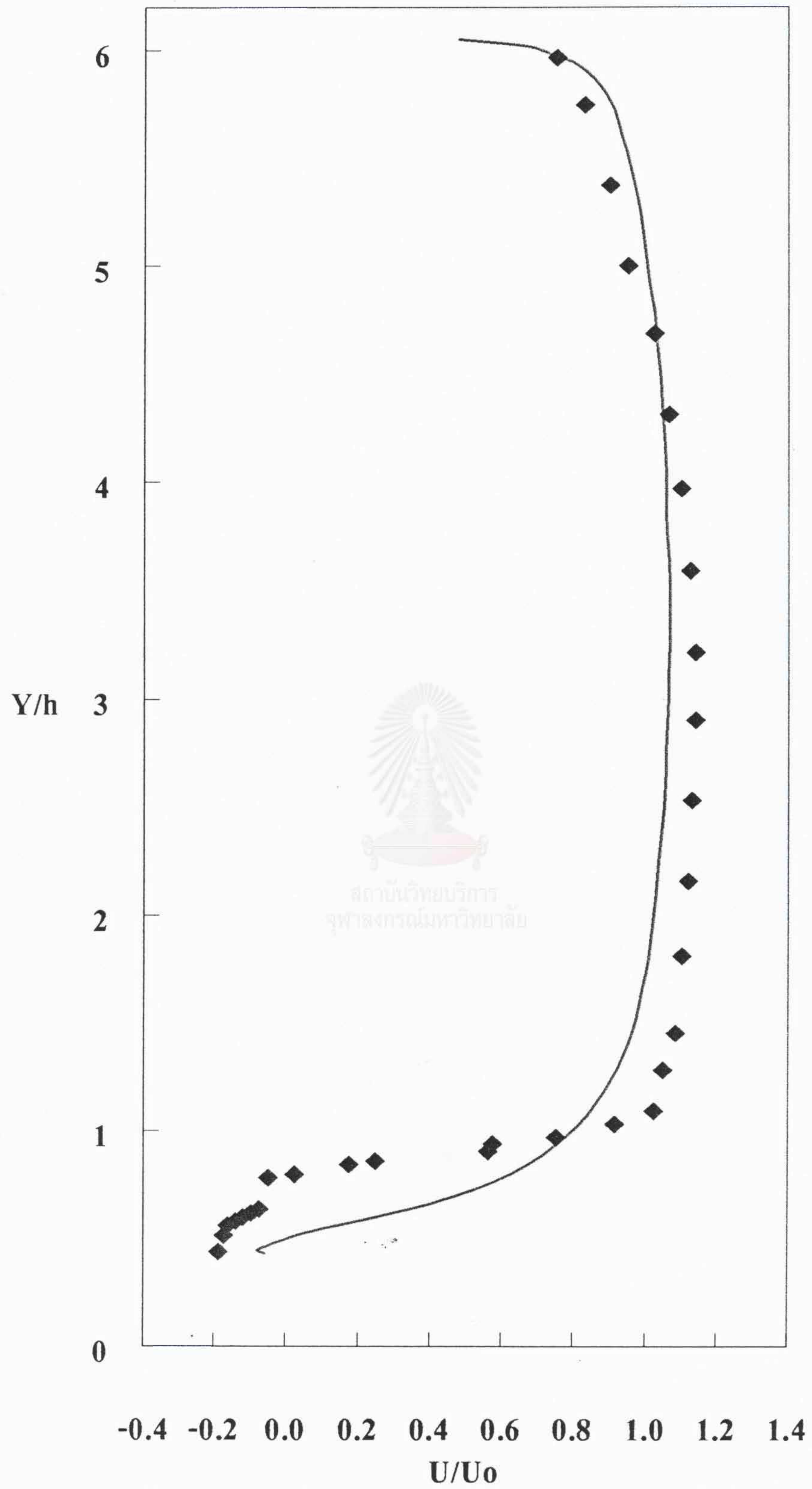
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



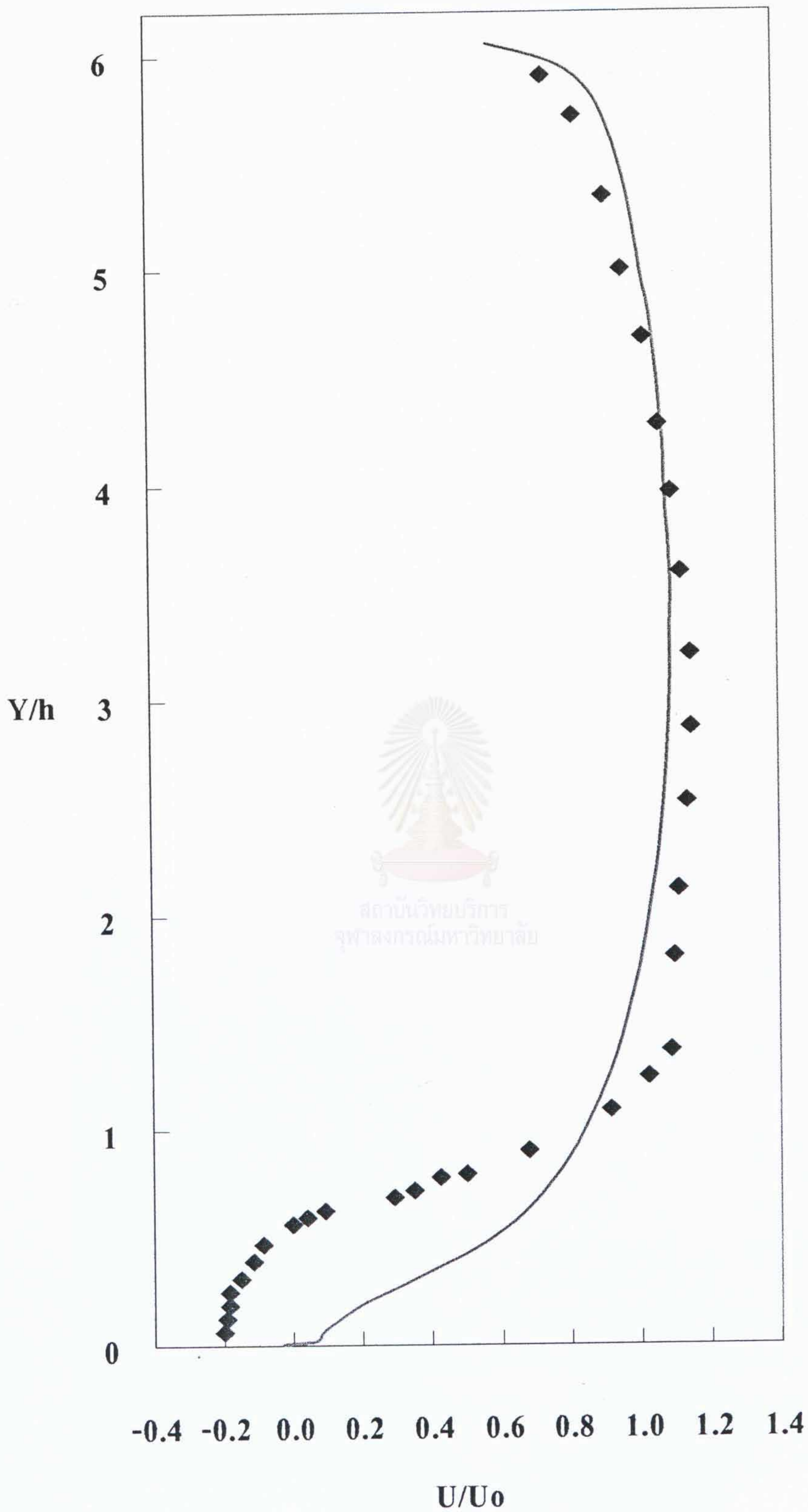
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 0$ mm

โดยที่ ♦ สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



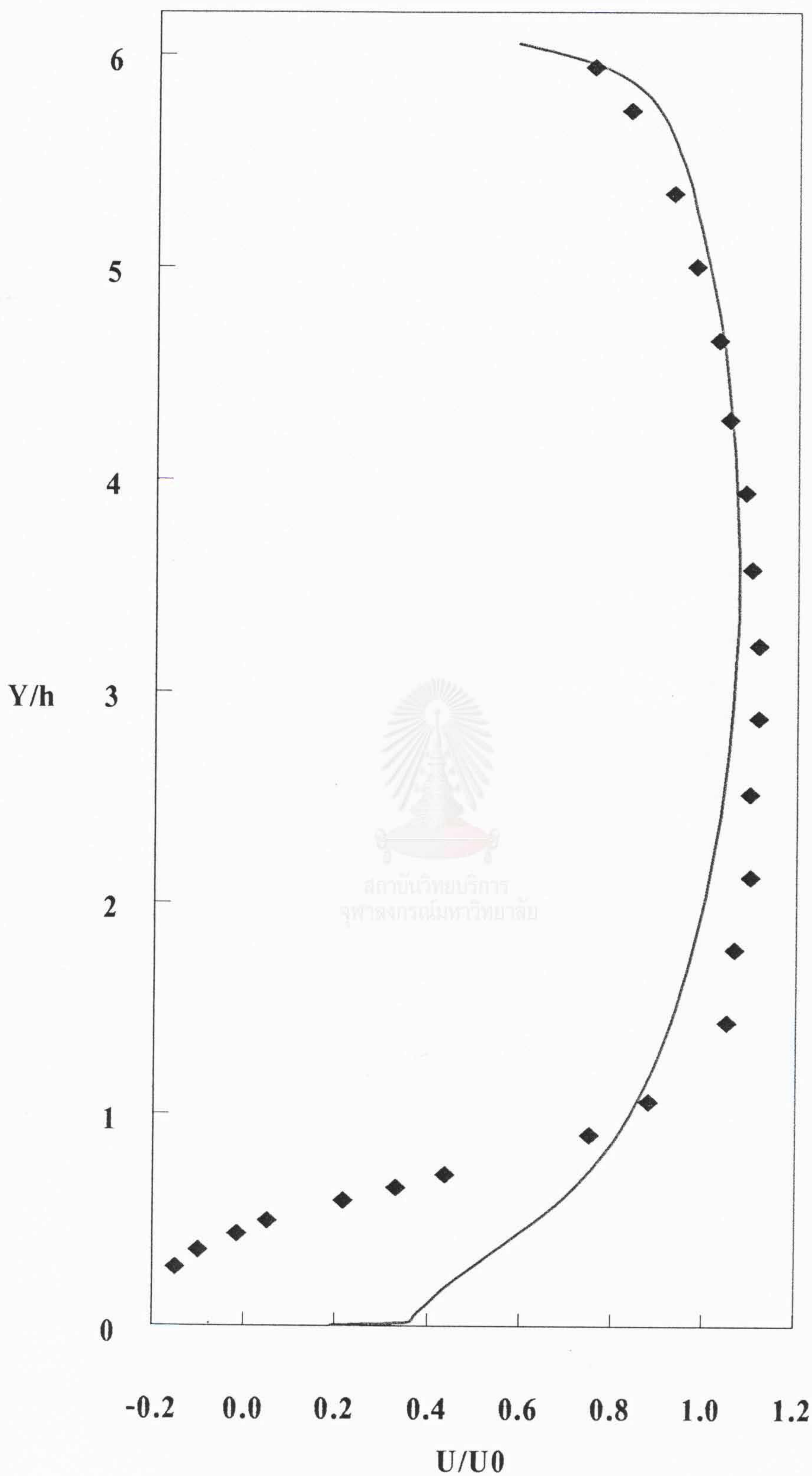
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 30 \text{ mm}$
โดยที่ ◆ สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



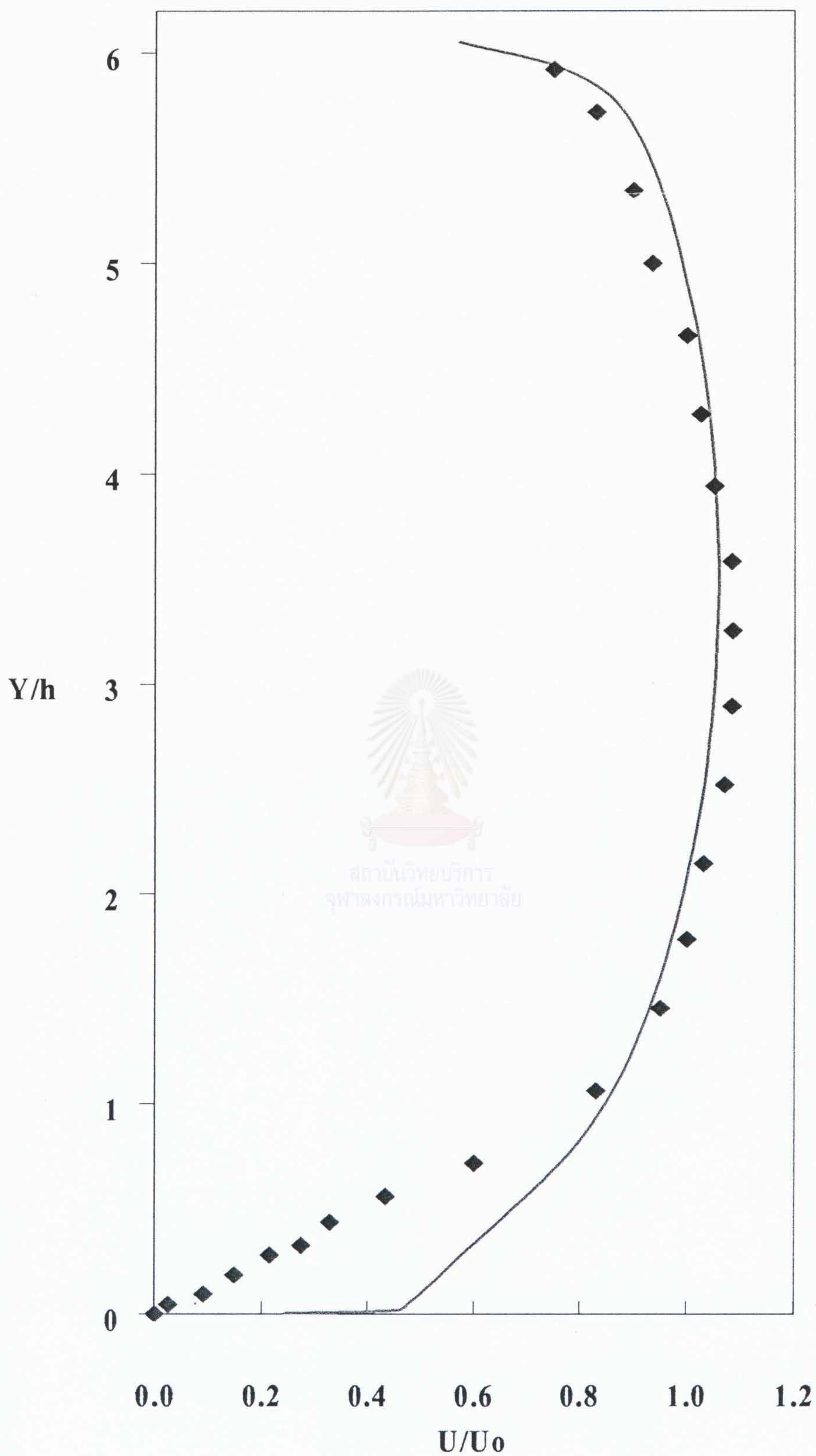
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 50$ mm

โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



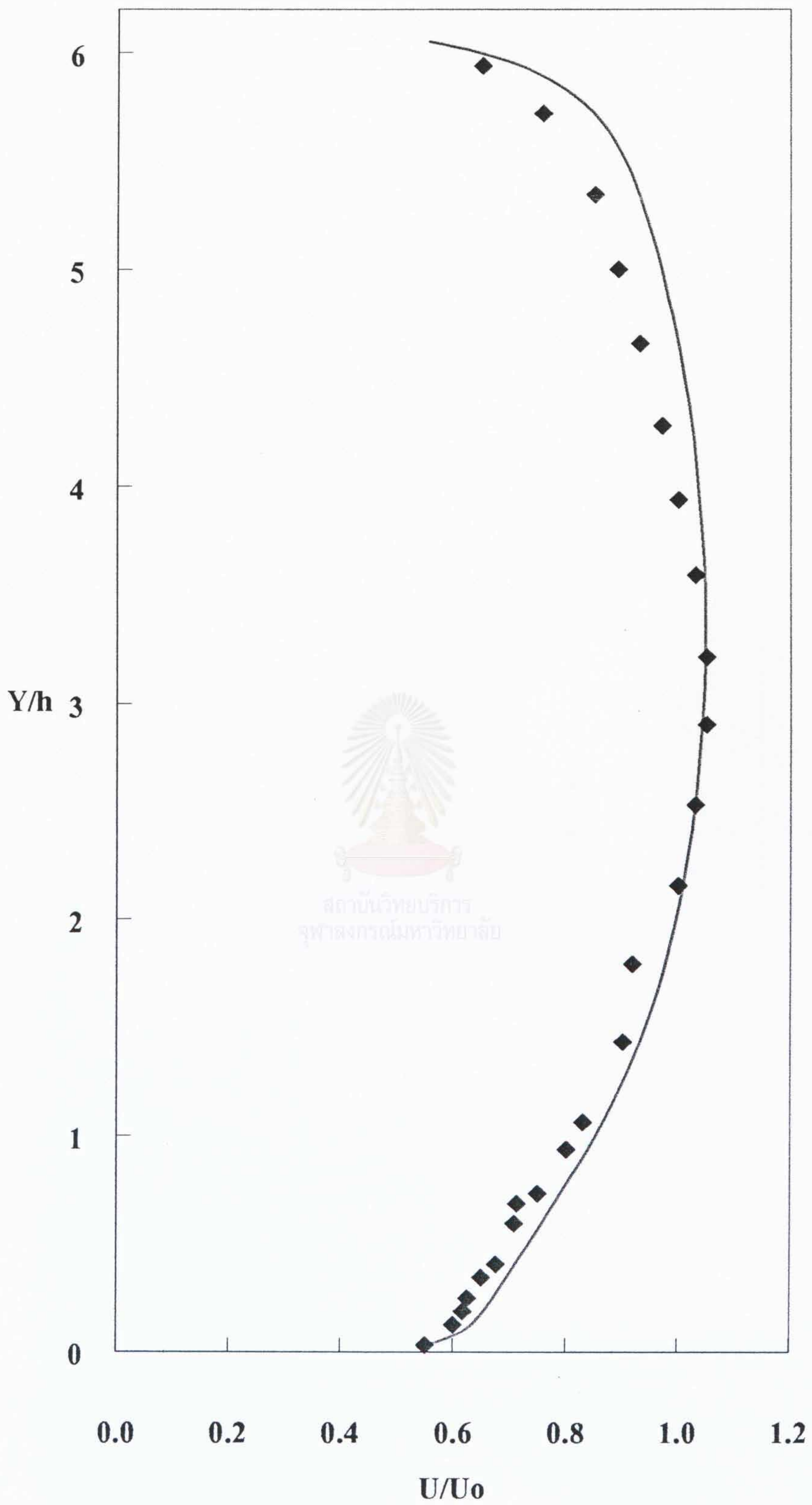
รูปที่ 5.23 กรำฟแสดงกำรเปรียบเทียบค่ำ U/U_0 ระหว่างค่ำกำรทดลอง กับ ค่ำกำรคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 90$ mm
โดยที่ ♦ สำหรัผลกำรทดลอง — สำหรัผลกำรคำนวณ



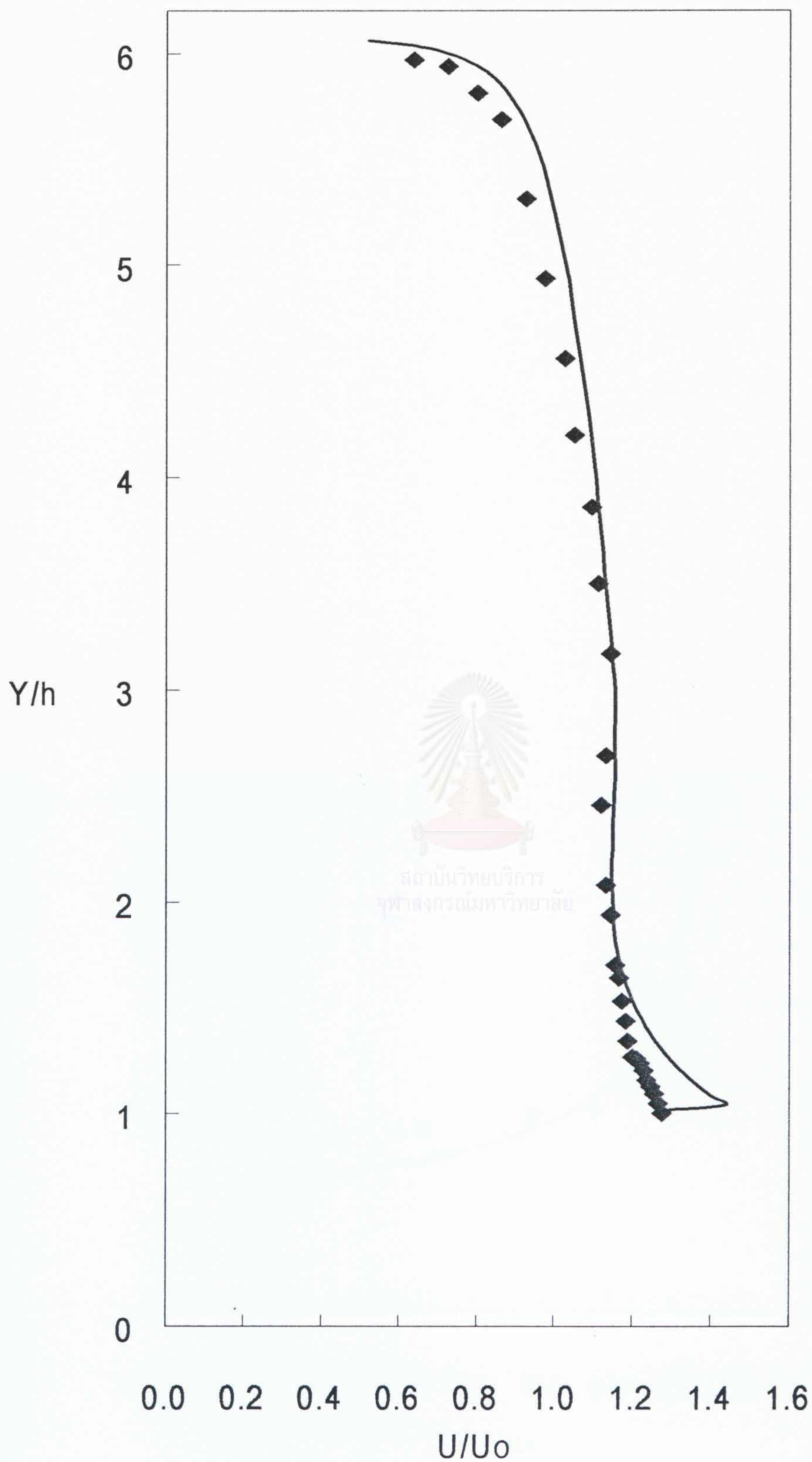
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 134 \text{ mm}$

โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



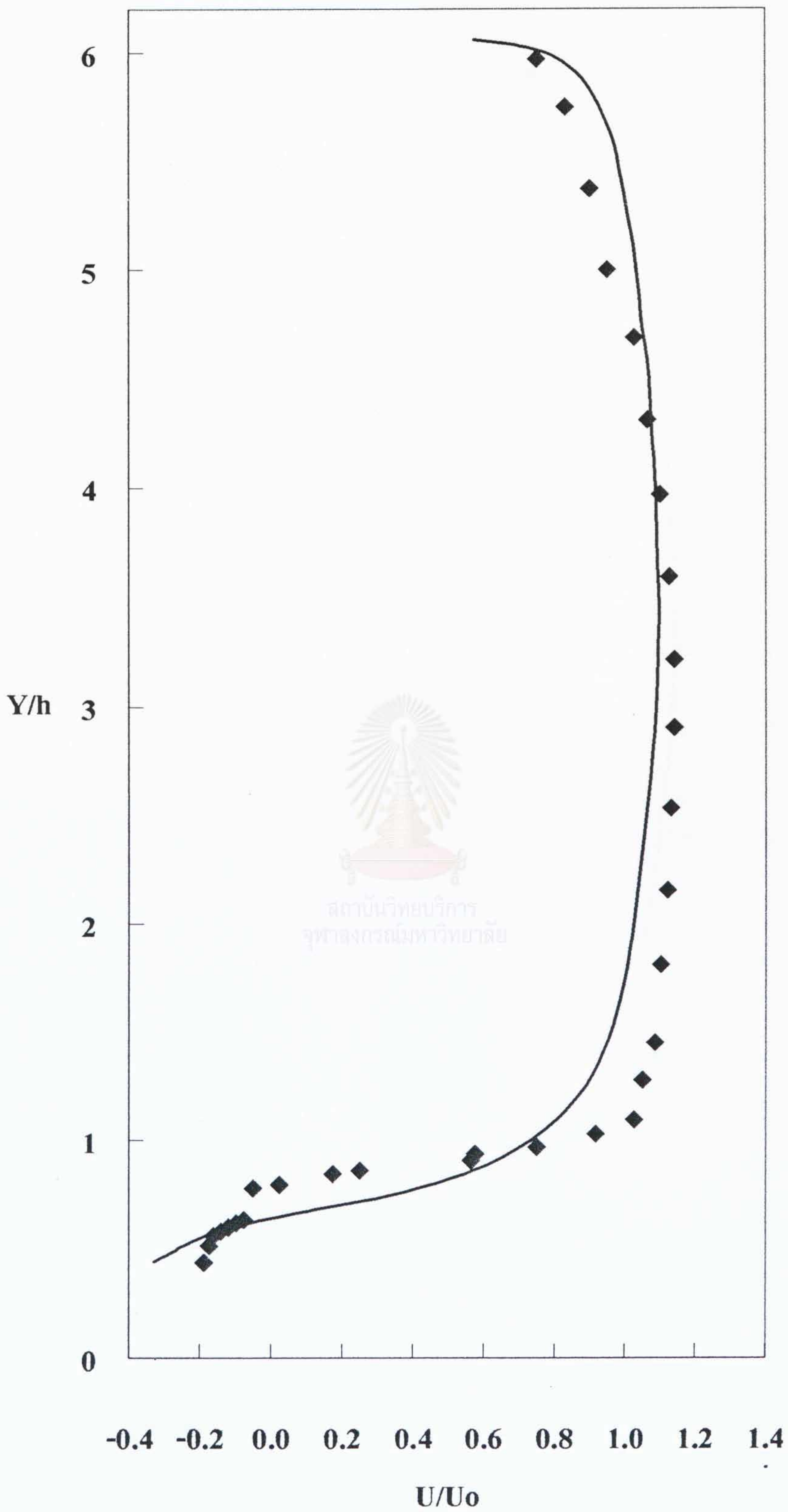
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 300$ mm โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



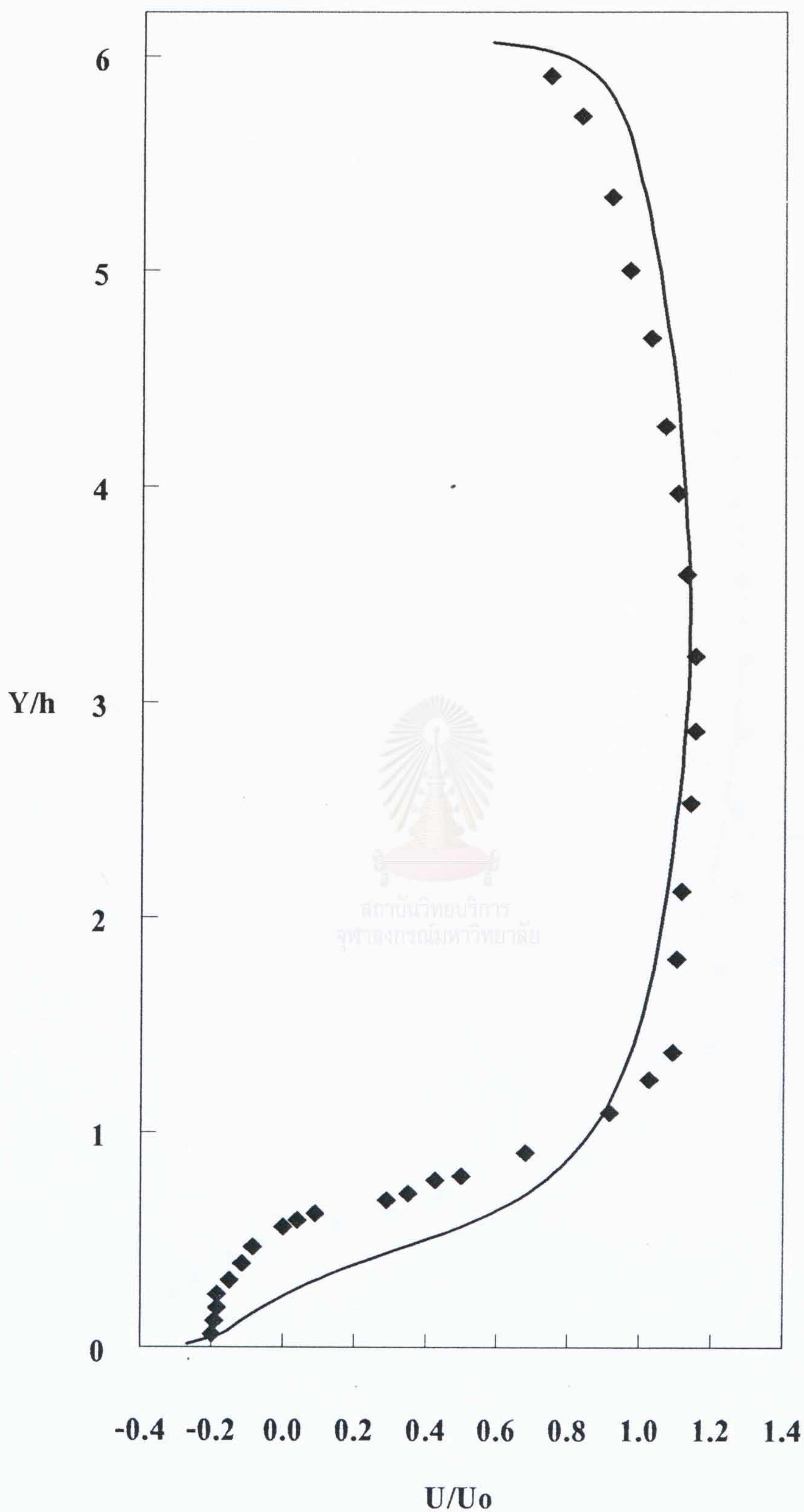
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 0$ mm

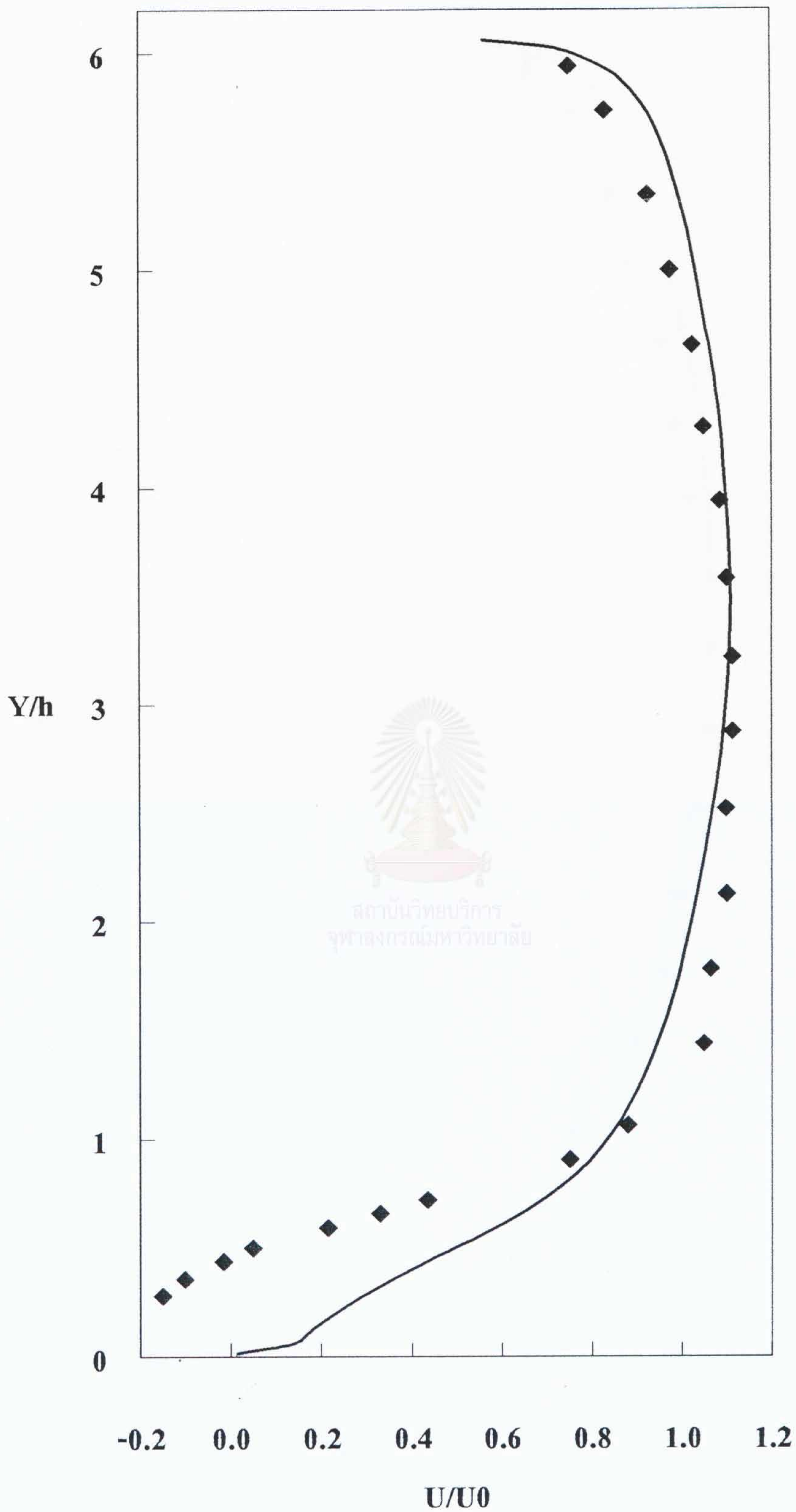
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 30 \text{ mm}$
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



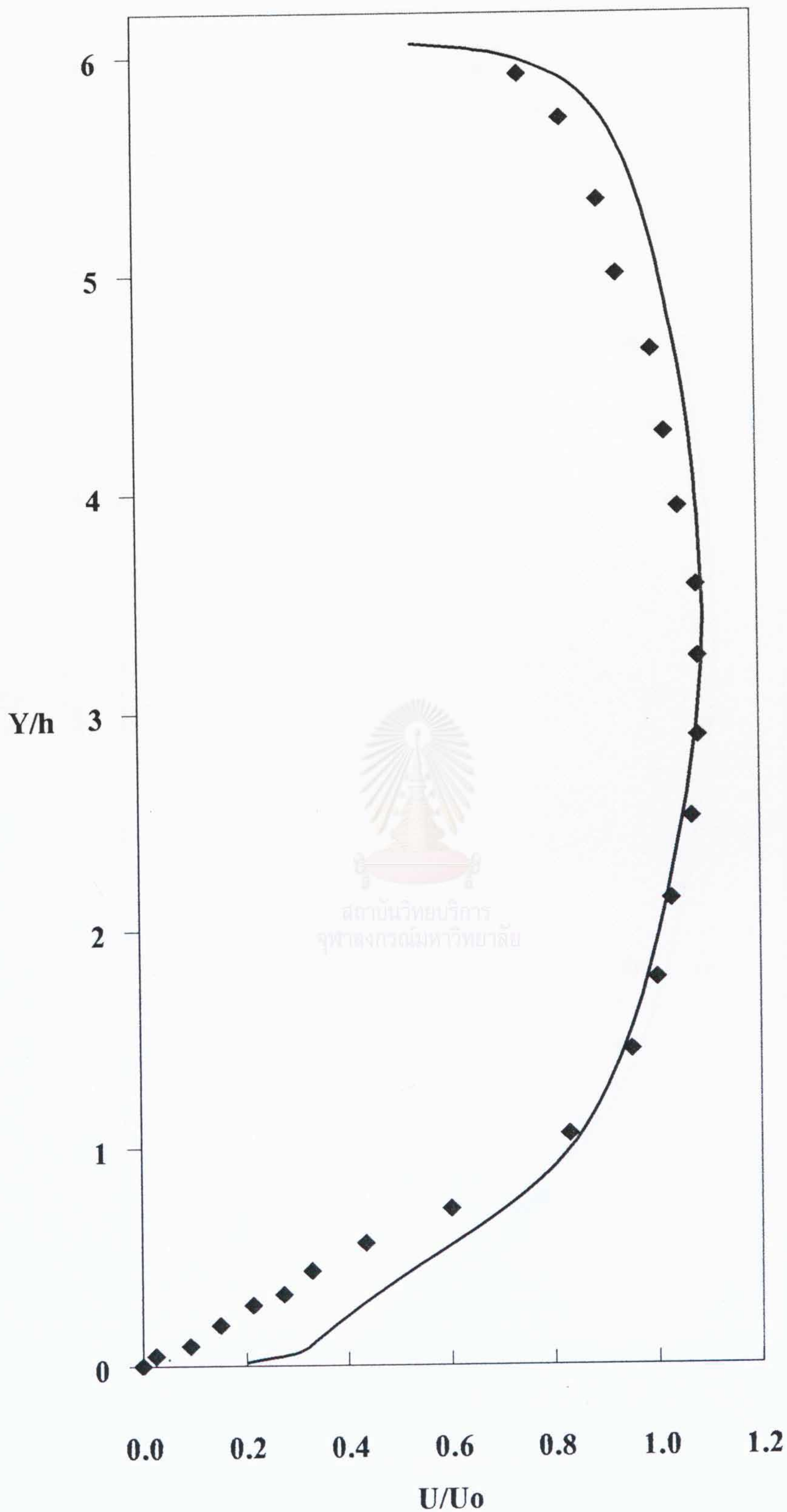
รูปที่ 5.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 50$ mm โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 90$ mm

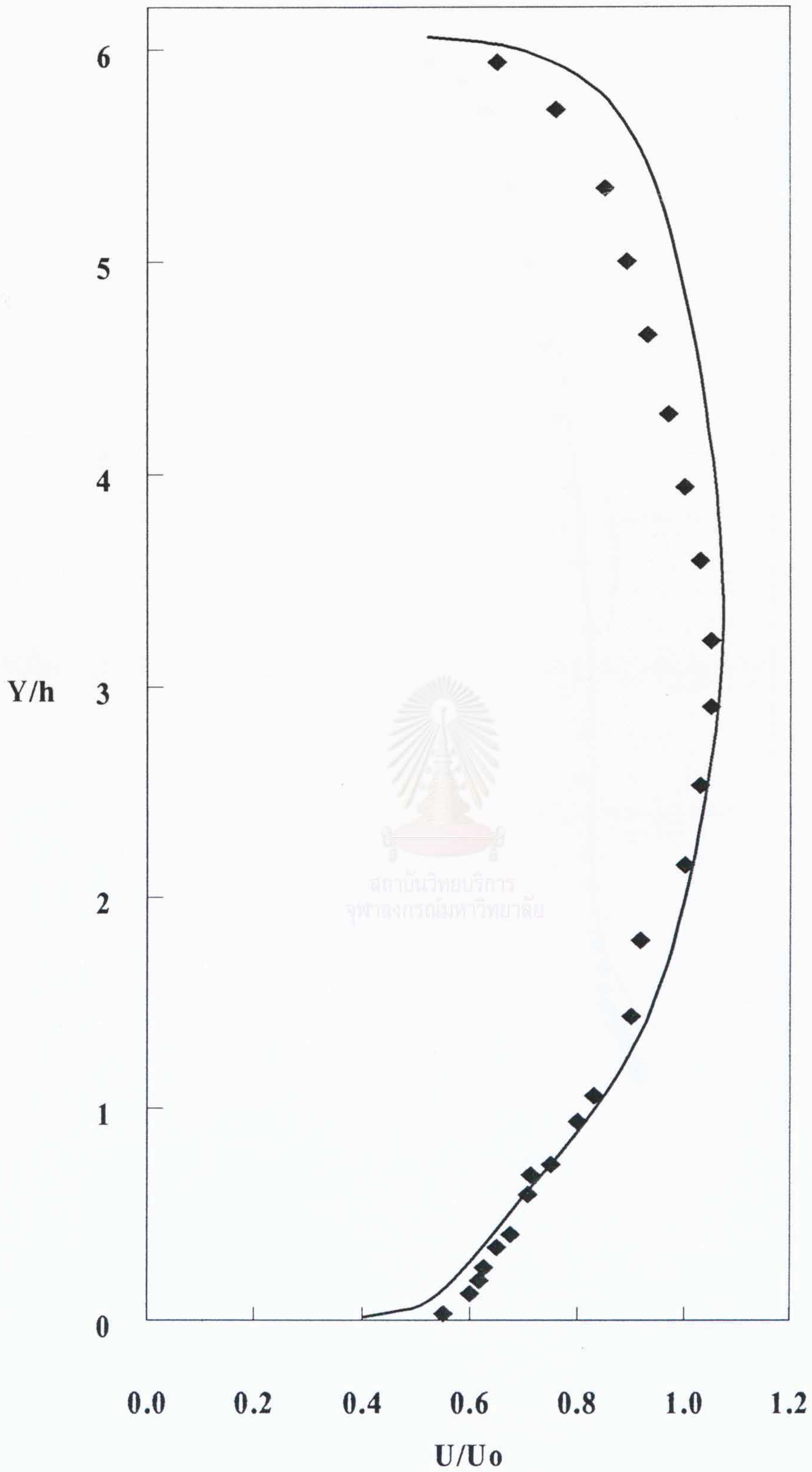
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 134 \text{ mm}$

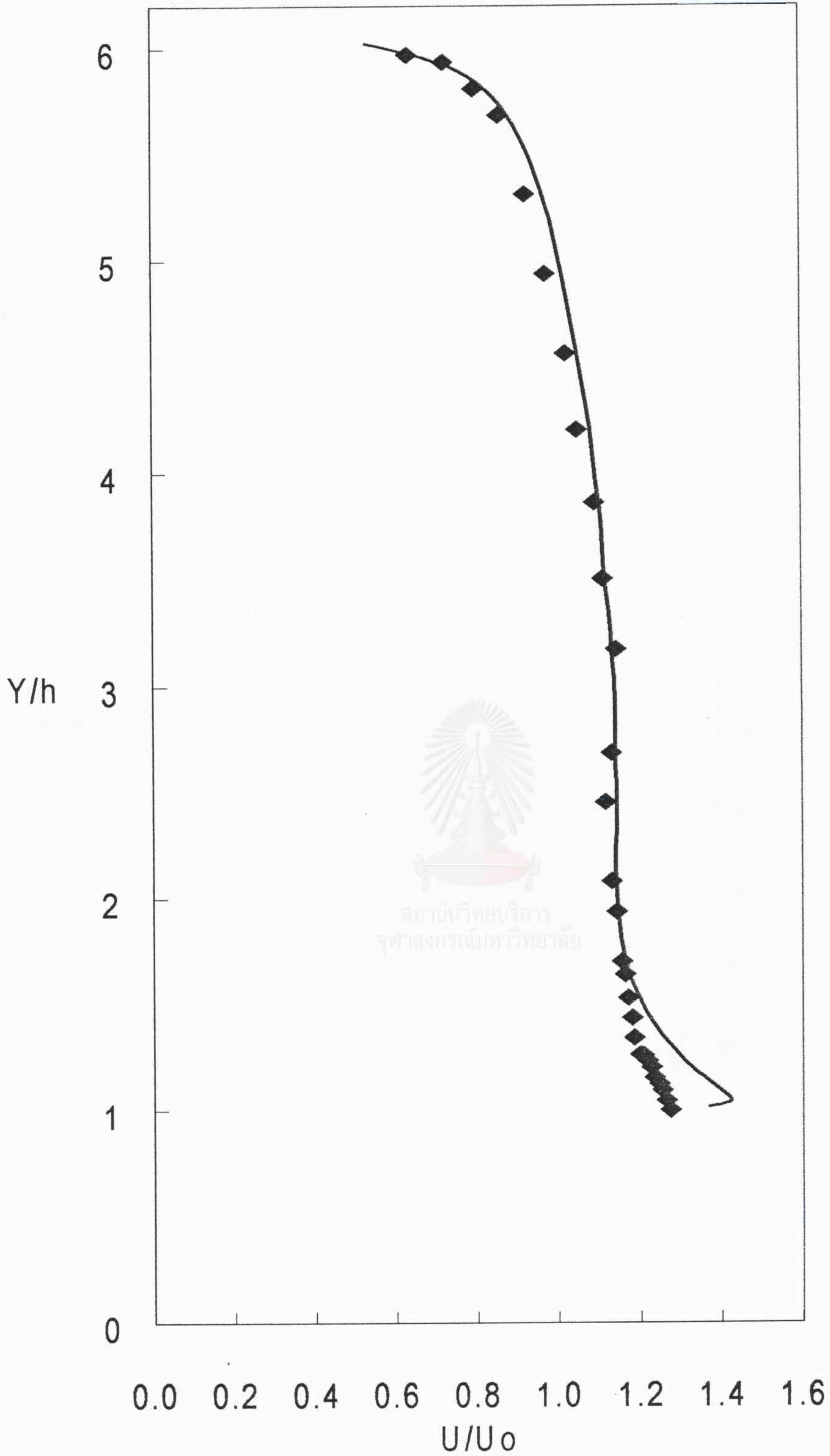
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 300$ mm

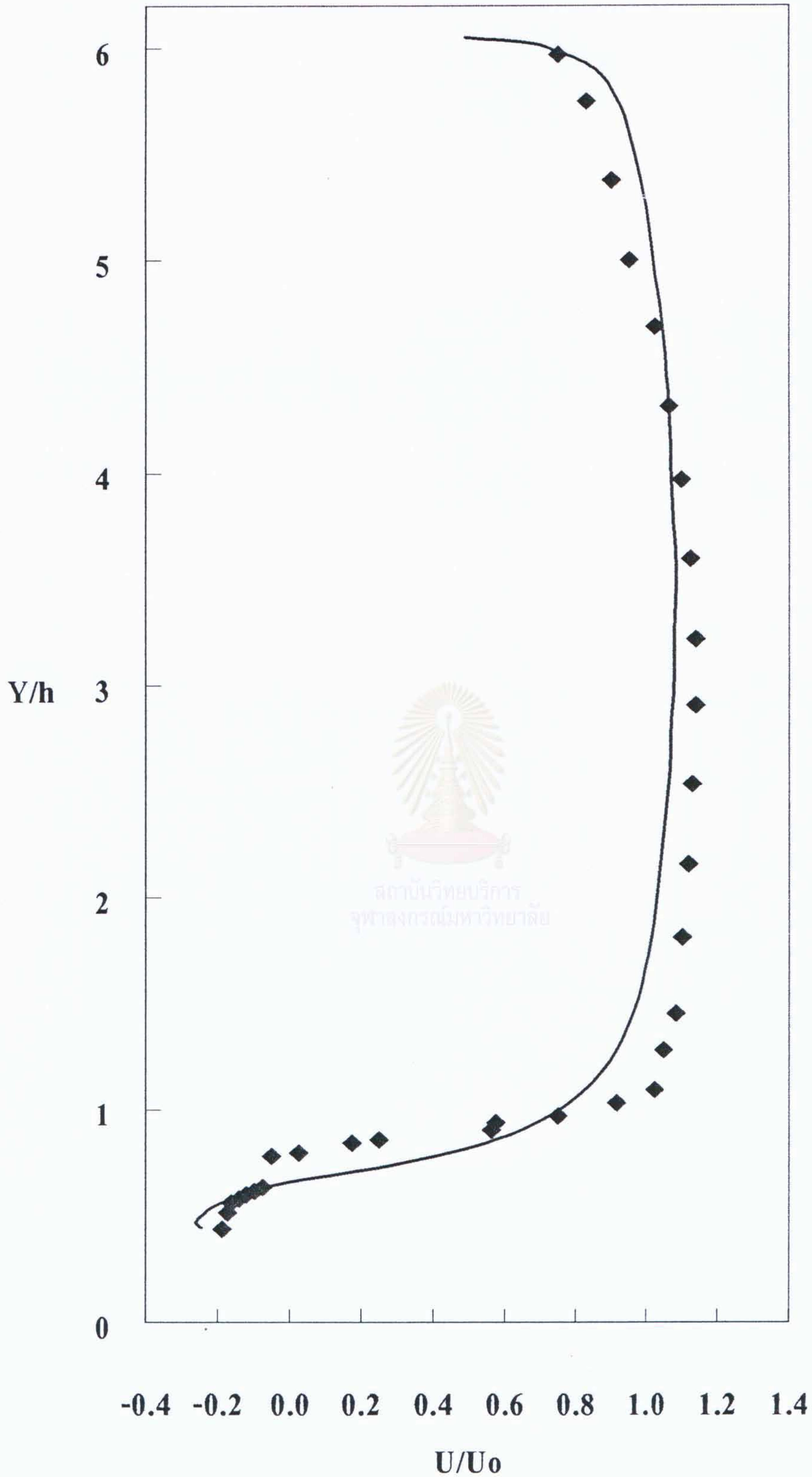
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

Low K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 0$ mm

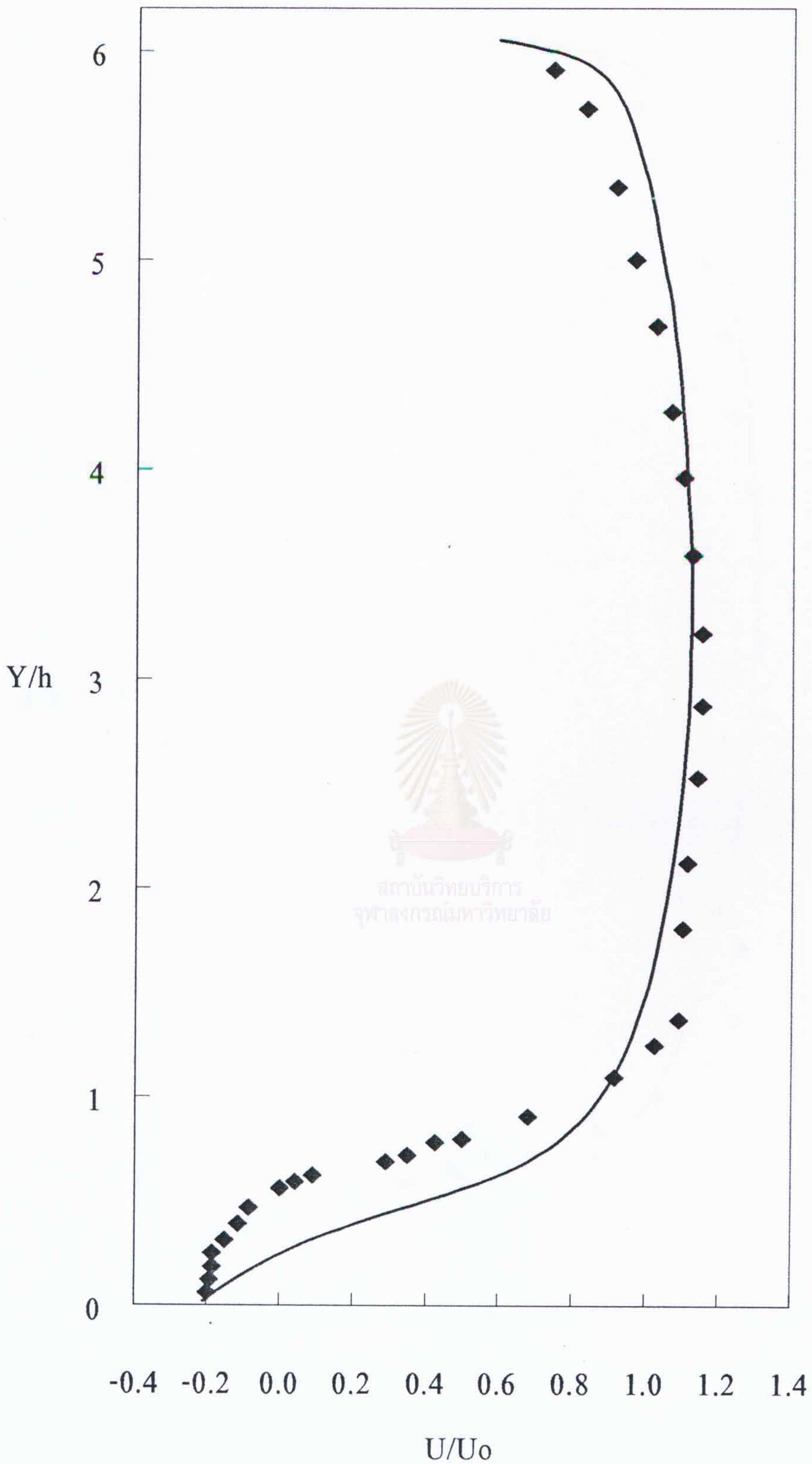
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

Low K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 30 \text{ mm}$

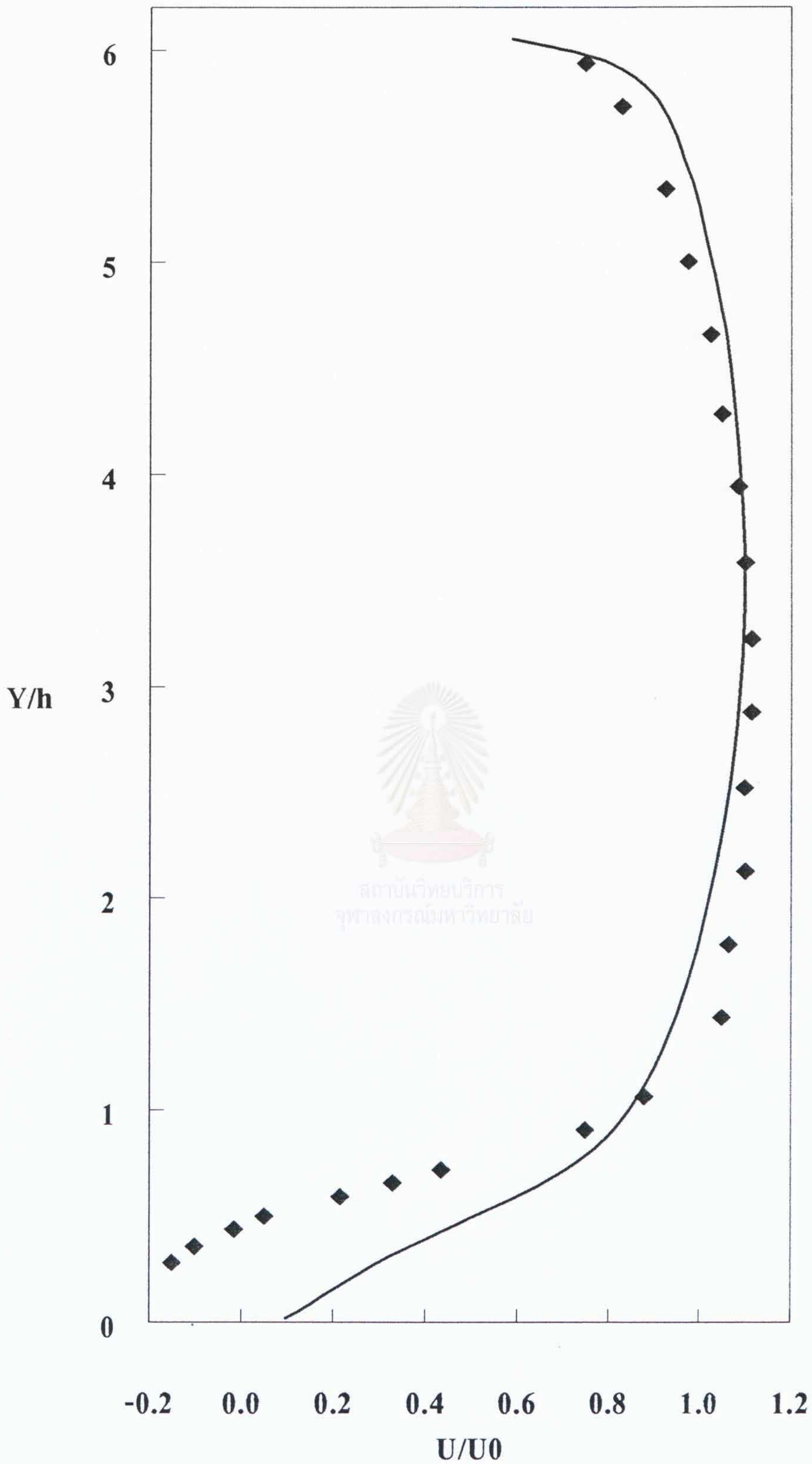
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



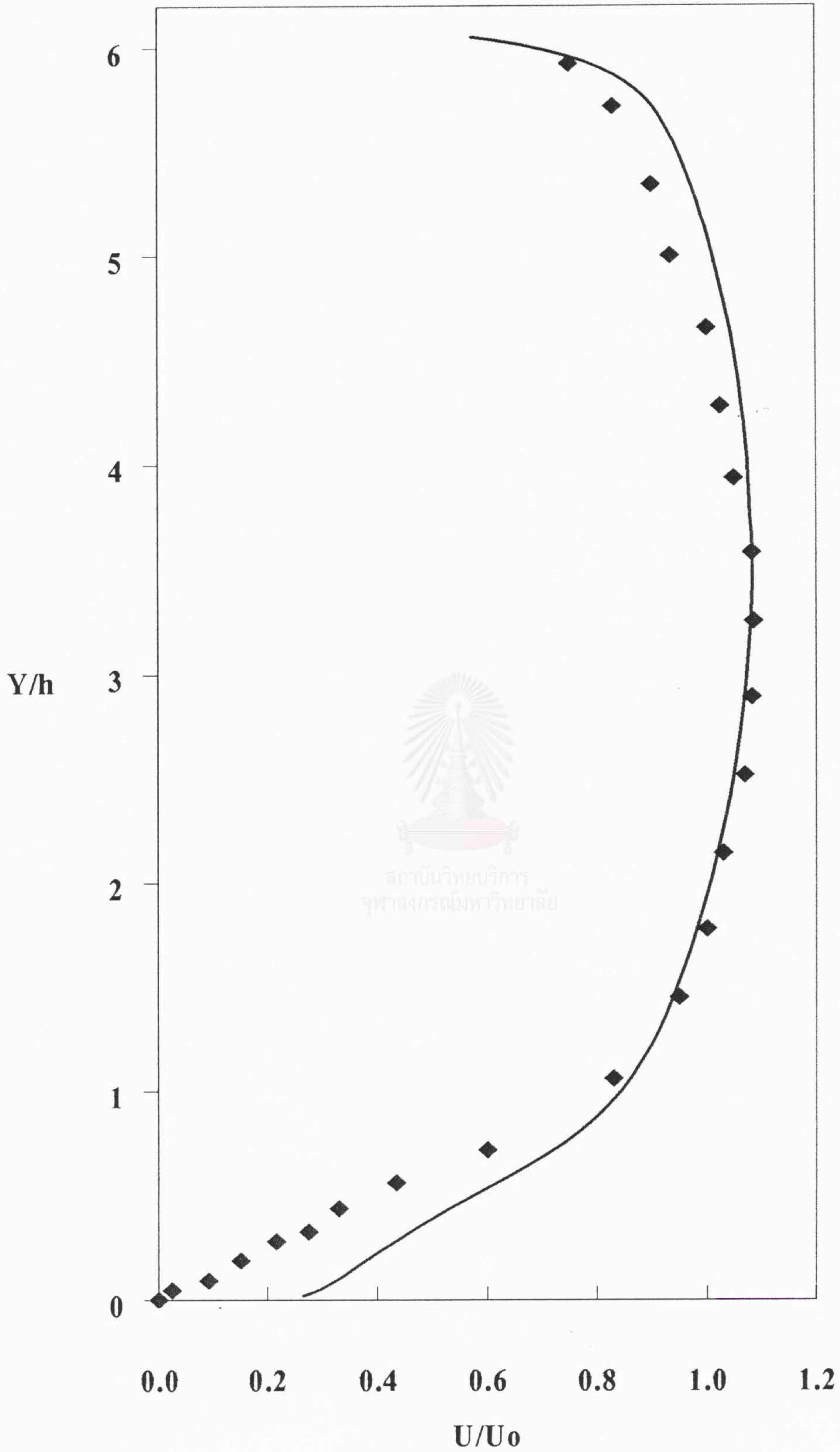
รูปที่ 5.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

Low K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 50 \text{ mm}$

โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



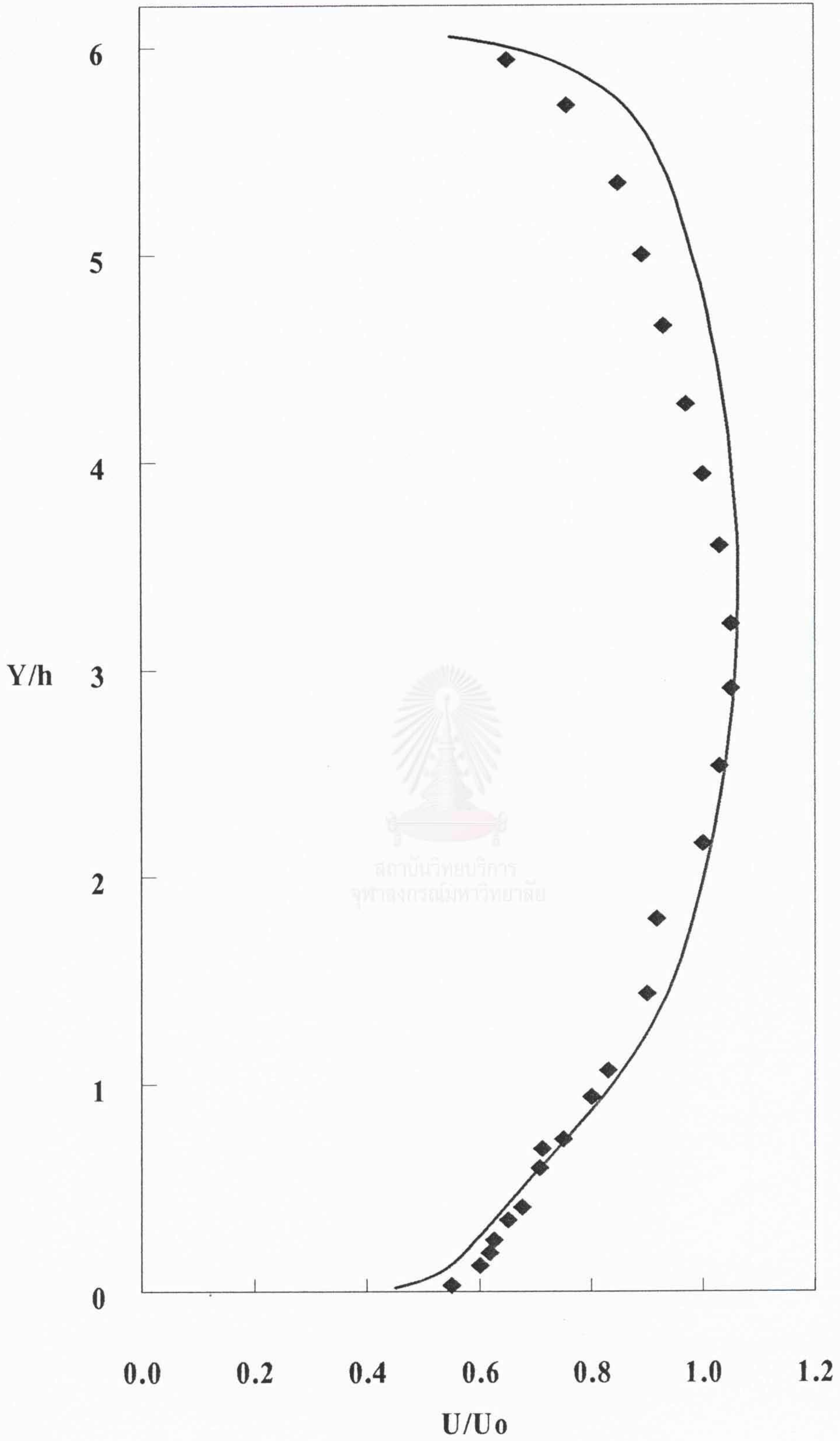
รูปที่ 5.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 90$ mm โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



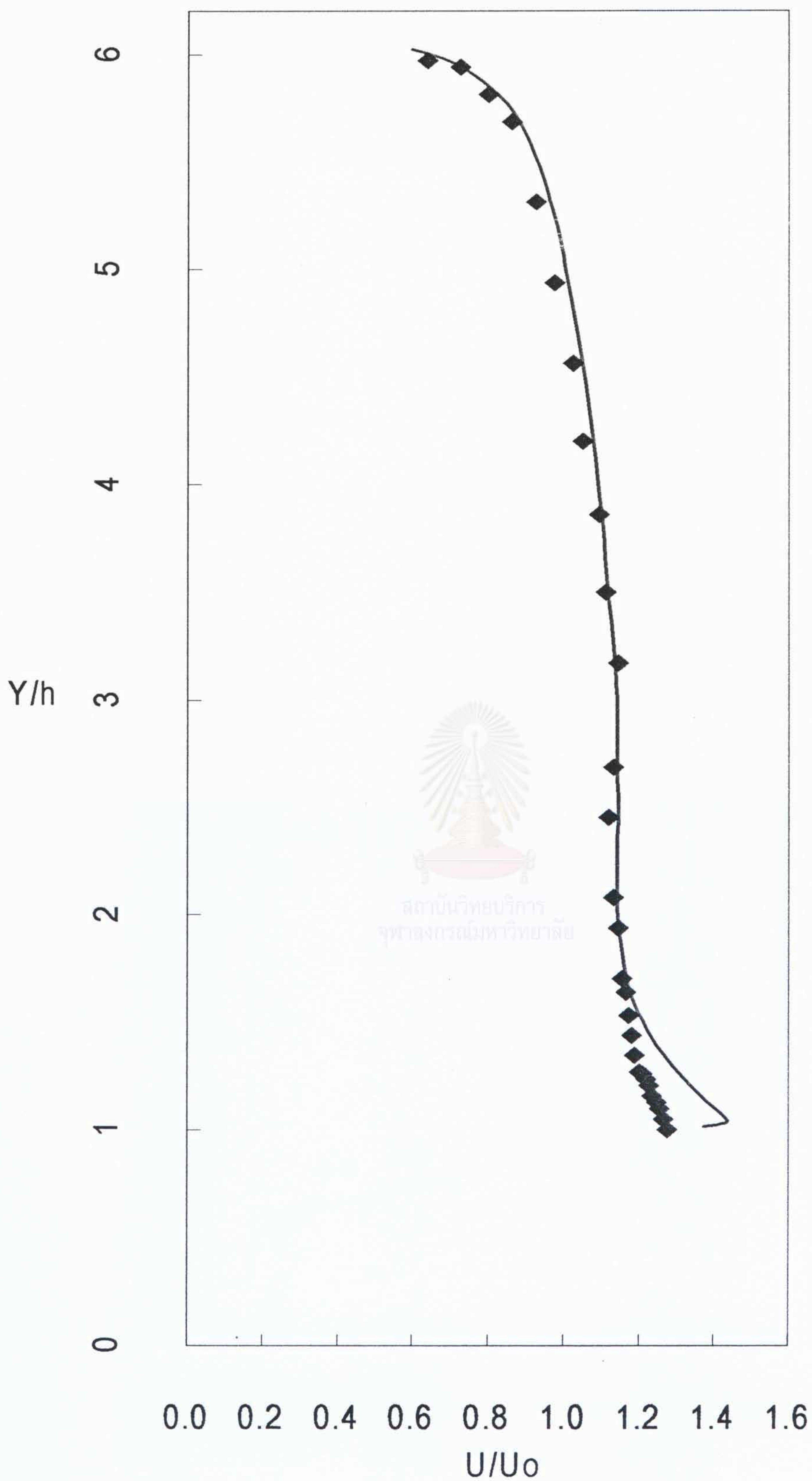
รูปที่ 5.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย

Low K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 134$ mm

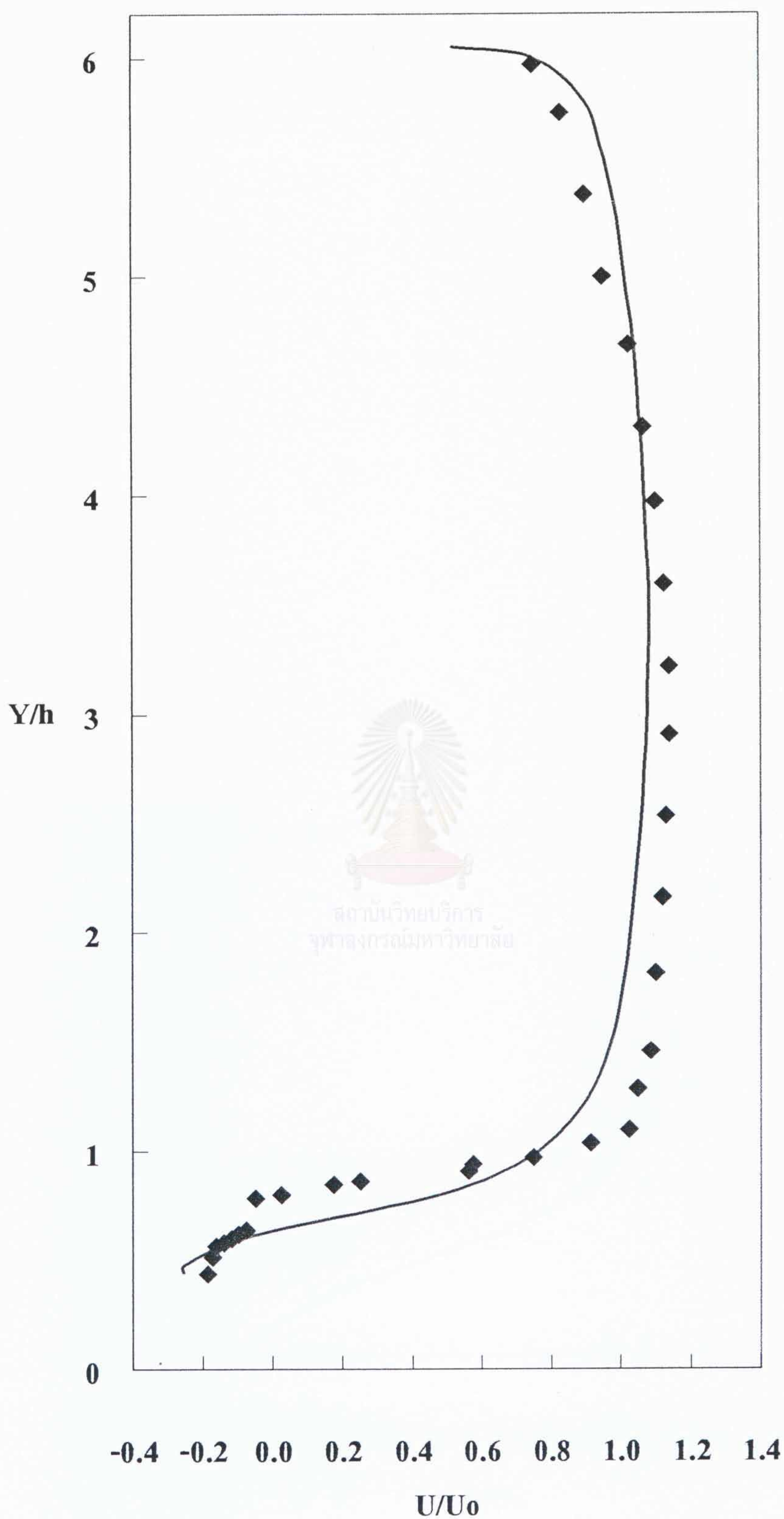
โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



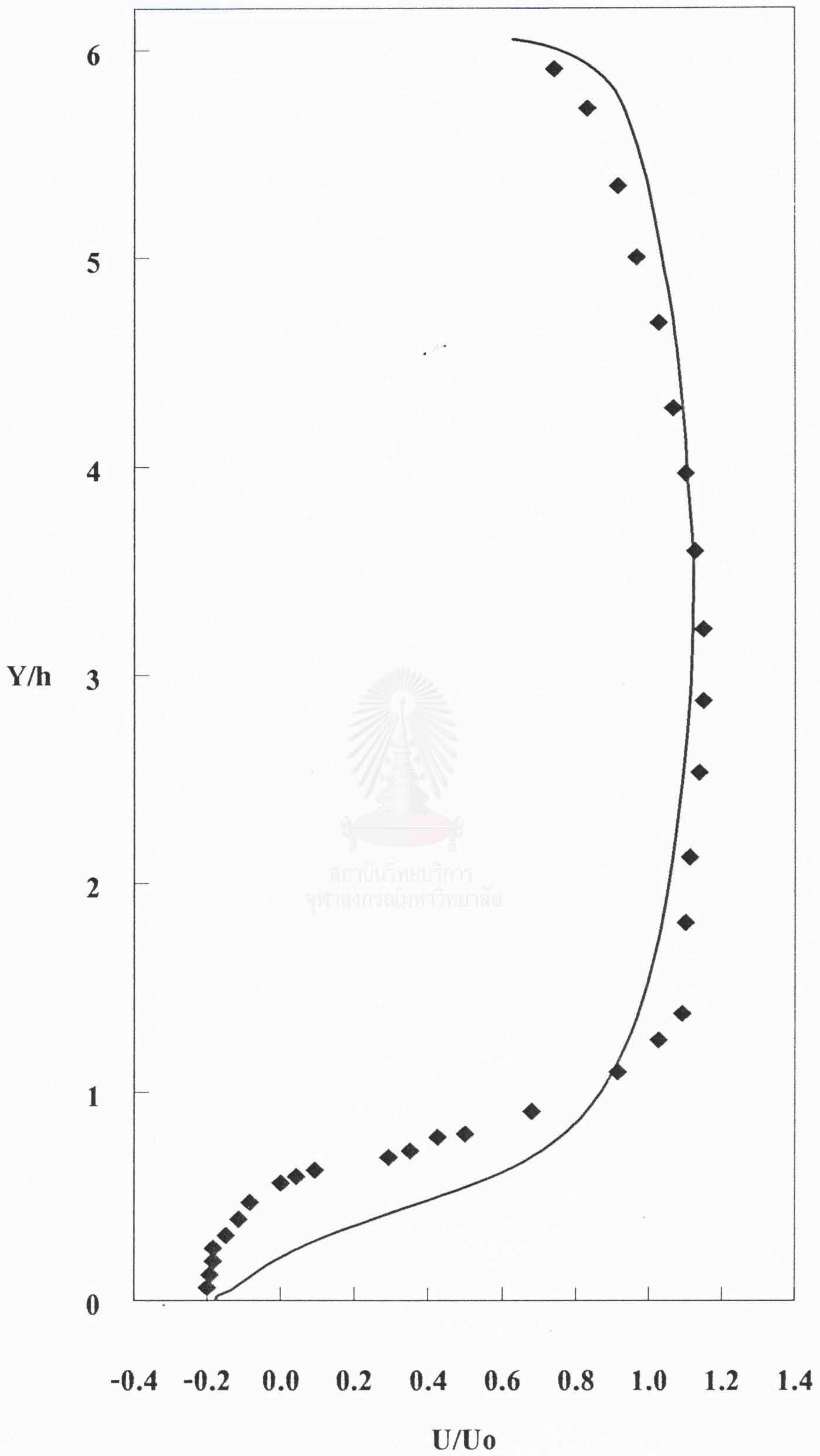
รูปที่ 5.37 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย Low K-Epsilon Model + Yap's Correction ณ จุดที่ $X = 300$ mm โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



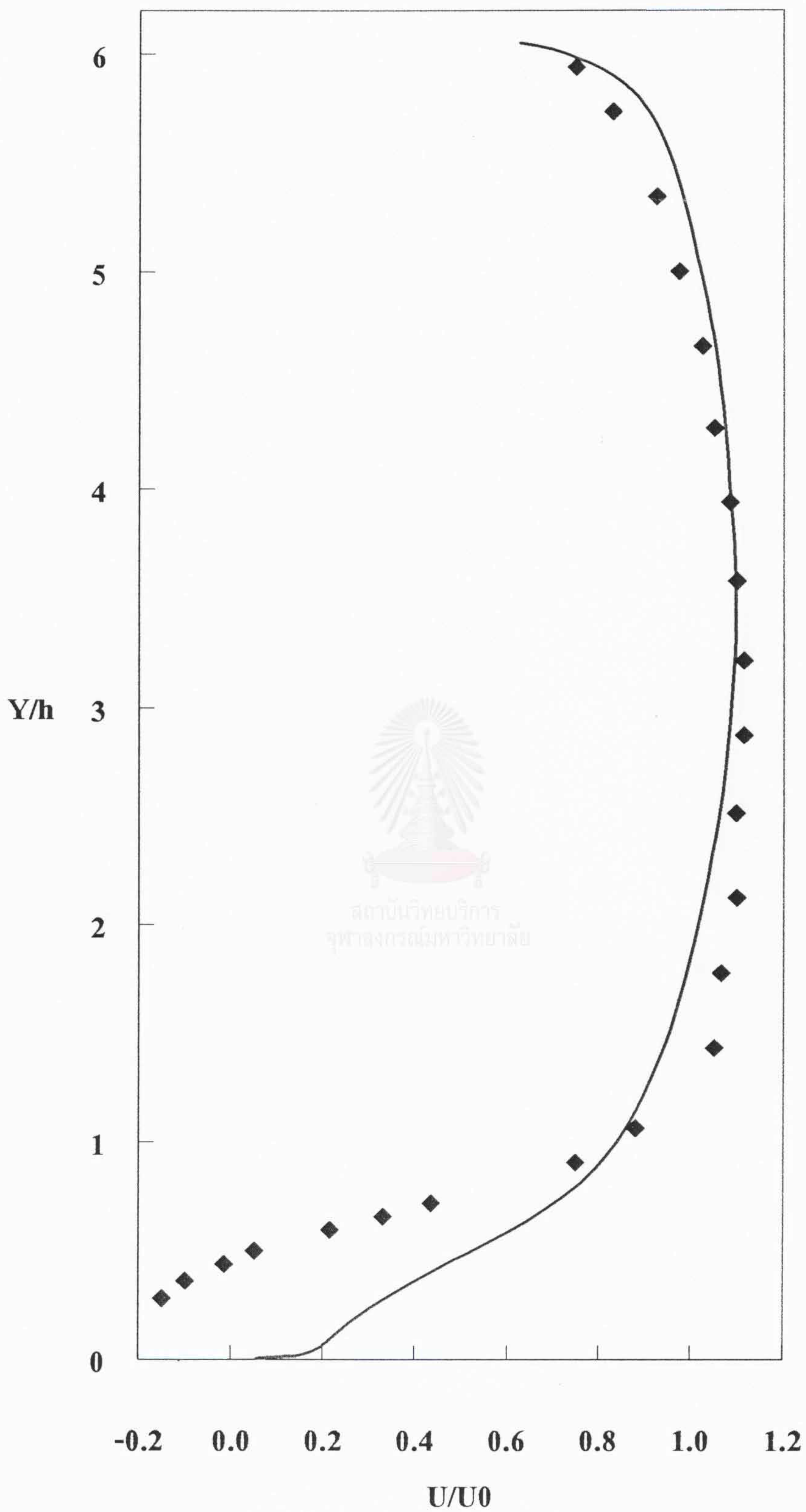
รูปที่ 5.38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 0$ mm โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



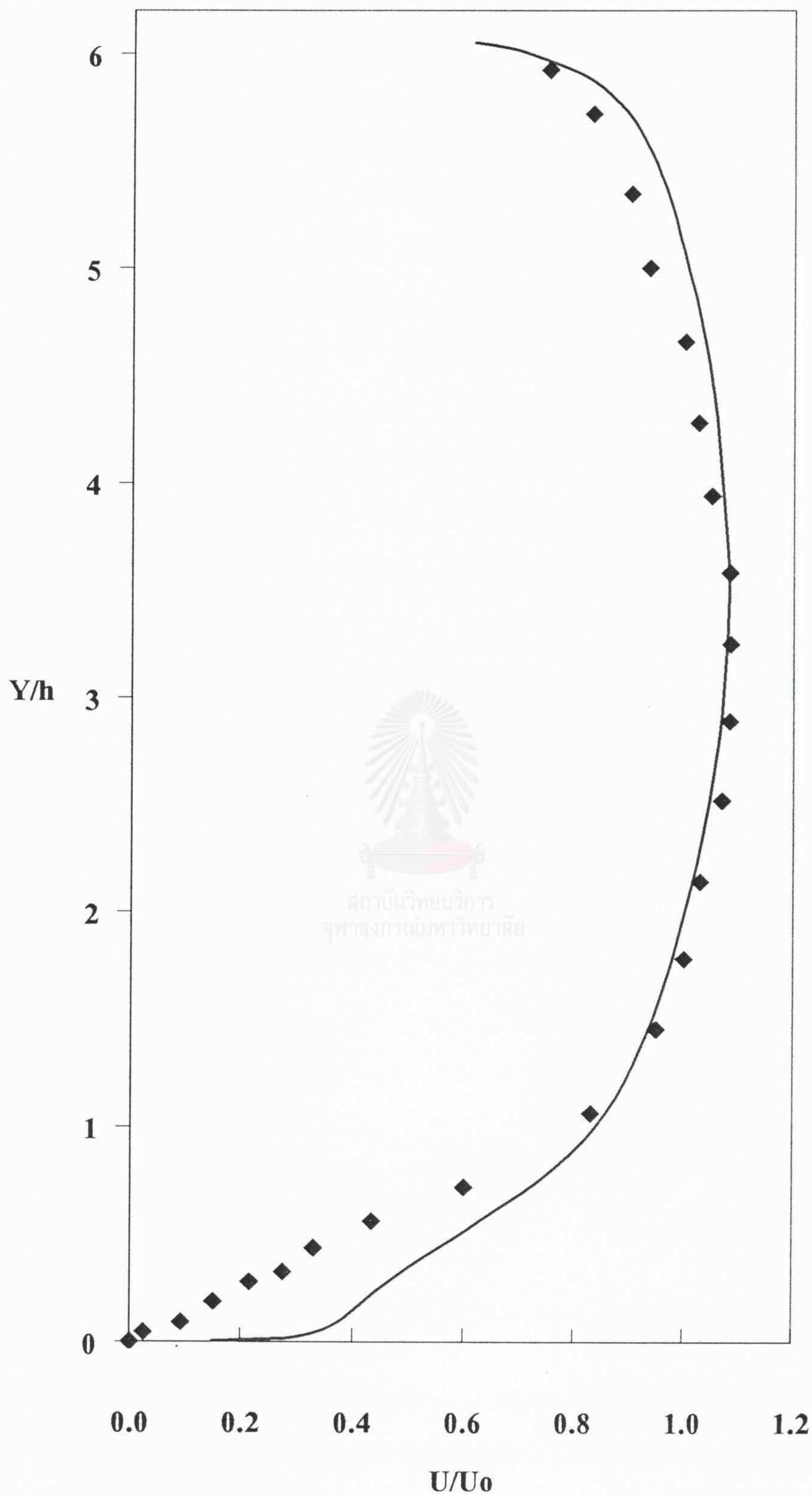
รูปที่ 5.39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย
2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 30$ mm
โดยที่ ♦ สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



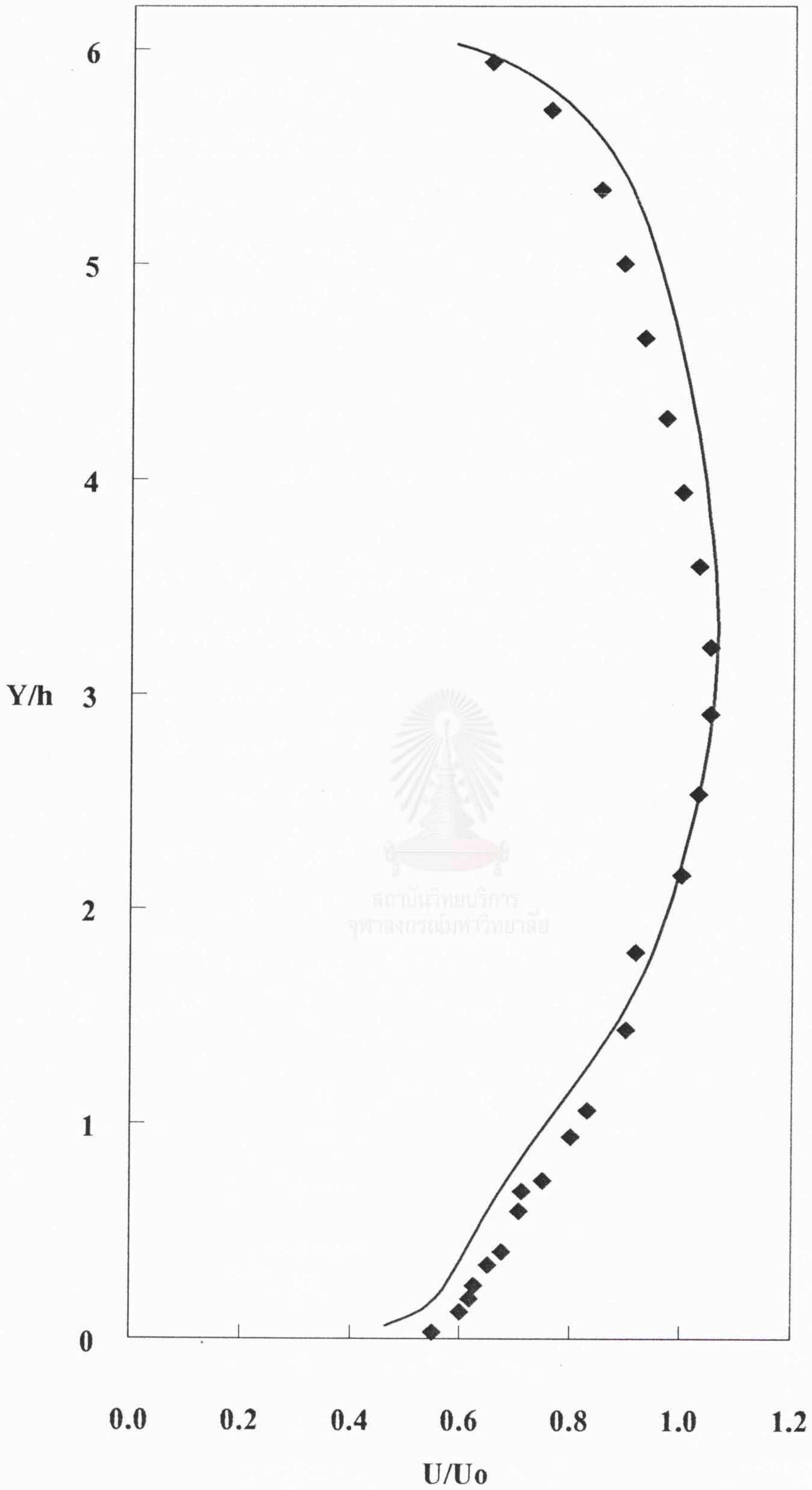
รูปที่ 5.40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 50$ mm โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.41 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 90$ mm โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Model ณ จุดที่ $X = 134$ mm โดยที่ \blacklozenge สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ



รูปที่ 5.43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า U/U_0 ระหว่างค่าจากการทดลอง กับ ค่าจากการคำนวณด้วย 2-Layer K-Epsilon Mode ณ จุดที่ $X = 300$ mm โดยที่ ♦ สำหรับผลการทดลอง — สำหรับผลการคำนวณ

5.3.3 สรุปผลการเลือก Turbulence Model

จากกราฟที่แสดงโปรไฟล์ของความเร็ว ในแนวตั้งของน้ำที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปภูเขา มีทั้งหมด 5 ชุด ซึ่งแบ่งตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Turbulence Model ที่ใช้ K-Epsilon Model, Low K-Epsilon Model, K-Epsilon + Yap's Correction Model, Low K-Epsilon + Yap's Correction Model, 2-Layer K-Epsilon Model ตามลำดับ โดยแต่ละชุดกราฟจะแสดงโปรไฟล์ตามตำแหน่งต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ผลของการเปรียบเทียบความถูกต้องและความแม่นยำของ Turbulence Model ในการทำนายมีดังนี้

1. กรณีที่ใช้ K-Epsilon Model ในการทำนาย

ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วที่ทำนายได้กับผลการทดลอง ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.13 – รูปที่ 5.18 พบว่าผลการทำนายที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่บริเวณกลาง Water Tunnel ของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณา ส่วนความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังที่อยู่ด้านบนของสิ่งกีดขวาง พบว่ามีค่าสูงกว่าผลการทดลอง ในทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณา และความเร็วที่ผนังด้านที่มีสิ่งกีดขวางนั้นพบว่าผลที่ทำนายได้ ณ บริเวณใกล้จุดยอด ($X = 0$ มิลลิเมตร) ของสิ่งกีดขวางมีค่าที่สูงกว่าผลการทดลอง โดยมีค่าที่คลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 16 % ของข้อมูลในช่วง 11 ค่าถัดจากบริเวณจุดยอด ซึ่งมีค่ามากเป็นอันดับที่สอง เมื่อเทียบกับผลการทำนายของแบบจำลองที่ใช้ทั้งหมด ส่วนระยะที่เหลือมีผลดังนี้ คือ ระยะ $X = 30, 50$ และ 300 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่ที่ระยะ $X = 90$ และ 134 มิลลิเมตร ค่าทำนายที่ได้มากกว่าผลการทดลอง เมื่อพิจารณาจุด Separation กับ จุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ที่ประมาณได้จากการใช้แบบจำลองนี้ทำนาย ซึ่งสามารถสรุปการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พร้อมทั้งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 5.2

2. กรณีที่ใช้ Low K-Epsilon Model ในการทำนาย

ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วที่ทำนายได้กับผลการทดลองดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.19 – รูปที่ 5.24 พบว่า ผลการทำนายที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่บริเวณกลาง Water Tunnel ของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณา ส่วนความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังที่อยู่ด้านบนของสิ่งกีดขวาง พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ทำนายได้ด้วย K-Epsilon Model ของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณาโดยเฉพาะผลการทำนายที่ผนังที่อยู่ด้านบนของสิ่งกีดขวางที่ระยะ $X = 0$ มิลลิเมตร มีความแม่นยำที่สุด และความเร็วที่ผนังด้านที่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าผลที่ทำนายได้ ณ บริเวณใกล้จุดยอด ($X = 0$ มิลลิเมตร) ของสิ่งกีดขวางมีค่าสูงกว่าผลการทดลอง โดยมีค่าที่คลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 20 %

ของข้อมูลในช่วง 11 ค่าถัดจากบริเวณจุดยอด ซึ่งมีค่ามากเป็นอันดับที่หนึ่งเมื่อเทียบกับผลการทำนายของแบบจำลองที่ใช้ทั้งหมด ส่วนระยะที่เหลือนั้น ผลที่ทำนายได้มีค่าที่สูงกว่าผลการทดลองมาก แต่ยกเว้นที่ระยะ $X = 300$ มิลลิเมตร ผลที่ทำนายได้มีค่าที่ใกล้เคียงผลการทดลอง เมื่อพิจารณาจุด Separation กับ จุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ที่ประมาณได้จากการใช้แบบจำลองนี้ทำนาย ซึ่งสามารถสรุปการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง พร้อมทั้งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 5.2

3. กรณีที่ใช้ K-Epsilon + Yap's Correction Model ในการทำนาย

ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วที่ทำนายได้กับผลการทดลองดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.25 – รูปที่ 5.30 พบว่าผลการทำนายที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่บริเวณกลางท่อของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณา ส่วนความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังที่อยู่ด้านบนของสิ่งกีดขวาง พบว่าผลที่ทำนายได้มีค่าสูงกว่าผลการทดลองของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณาเช่นเดียวกับผลการทำนายของ K-Epsilon Model และความเร็วที่ผนังด้านที่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าผลที่ทำนายได้ ณ บริเวณใกล้จุดยอด ($X = 0$ มิลลิเมตร) ของสิ่งกีดขวางมีค่าที่สูงกว่าผลการทดลอง โดยมีค่าที่คลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 13.4 % ของข้อมูลในช่วง 11 ค่าถัดจากบริเวณจุดยอด ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับผลการทำนายของแบบจำลองที่ใช้ทั้งหมด ส่วนระยะที่เหลือนั้น ผลที่ทำนายได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทำนายของ K-Epsilon Model แต่มีความแม่นยำมากกว่าเมื่อเทียบแบบจุดต่อจุด เมื่อพิจารณาจุด Separation กับ จุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ที่ประมาณได้จากการใช้แบบจำลองนี้ทำนาย ซึ่งสามารถสรุปการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง พร้อมทั้งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 5.2

4. กรณีที่ใช้ Low K-Epsilon + Yap's Correction Model ในการทำนาย

ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วที่ทำนายได้กับผลการทดลองดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.31 – รูปที่ 5.36 พบว่าผลการทำนายที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่บริเวณกลางท่อของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณา ส่วนความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังที่อยู่ด้านบนของสิ่งกีดขวาง พบว่าผลที่ทำนายได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณาเช่นเดียวกับผลการทำนายของ Low K-Epsilon Model และความเร็วที่ผนังด้านที่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าผลที่ทำนายได้ ณ บริเวณใกล้จุดยอด ($X = 0$ มิลลิเมตร) ของสิ่งกีดขวางมีค่าที่สูงกว่าผลการทดลอง โดยมีค่าที่คลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 13.9 % ของข้อมูลในช่วง 11 ค่าถัดจากบริเวณจุดยอด ซึ่งมีค่ามากเป็นอันดับที่สี่เมื่อเทียบกับผลการทำนายของแบบจำลองที่ใช้ทั้งหมด ส่วนระยะที่เหลือนั้น ผลที่ทำนายได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าผลการทำนายของ Low K-Epsilon Model แต่มีความแม่นยำมากกว่าเมื่อเทียบแบบจุดต่อจุด เมื่อพิจารณาจุด Separation กับ จุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ที่ประมาณได้จากการใช้แบบจำลองนี้ทำนาย ซึ่ง

สามารถสรุปการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พร้อมทั้งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 5.2

5. กรณีที่ใช้ 2-Layer K-Epsilon Model ในการทำนาย

ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วที่ทำนายได้กับผลการทดลองดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.37 – รูปที่ 5.42 พบว่าผลการทำนายที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่บริเวณกลางท่อของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณา ส่วนความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังที่อยู่ด้านบนของสิ่งกีดขวาง พบว่าผลที่ทำนายได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของทุกๆ ระยะที่นำมาพิจารณาเช่นเดียวกับผลการทำนายของ Low K-Epsilon + Yap's Correction Model และความเร็วที่ผนังด้านที่มีสิ่งกีดขวาง พบว่าผลที่ทำนายได้ ณ บริเวณใกล้จุดยอด ($X = 0$ มิลลิเมตร) ของสิ่งกีดขวางมีค่าที่สูงกว่าผลการทดลองโดยมีค่าที่คลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 14.4 % ของข้อมูลในช่วง 11 ค่าบริเวณจุดยอด ซึ่งมีค่ามากเป็นอันดับที่สามเมื่อเทียบกับผลการทำนายของแบบจำลองที่ใช้ทั้งหมด ส่วนระยะที่เหลือนั้น ผลที่ทำนายได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ทำนายได้จาก Low K-Epsilon + Yap's Correction Model แต่มีความแม่นยำน้อยกว่าเมื่อเทียบแบบจุดต่อจุด เมื่อพิจารณาจุด Separation กับ จุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ที่ประมาณได้จากการใช้แบบจำลองนี้ทำนาย ซึ่งสามารถสรุปการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พร้อมทั้งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางการเปรียบเทียบตำแหน่งของจุด Separation และจุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ของแต่ละแบบจำลองที่ทำนายได้กับผลการทดลอง และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

Model	Separation point			Recirculation point		
	X (mm)	X/h	% Error	X (mm)	X/h	% Error
Experiment	12	0.4280	-	135	4.821	-
K-Epsilon	13.034	0.4655	8.6167	103.470	3.695	-23.356
Low K-Epsilon	9.310	0.3325	-22.4167	108.760	3.8843	-19.437
K-Epsilon + Yap's	11.172	0.3990	-6.9000	105.870	3.781	-21.578
Low K-Epsilon +Yap's	11.172	0.3990	-6.9000	116.450	4.1589	-13.741
2Layer K-Epsilon	9.310	0.3325	-22.4167	114.050	4.0732	-15.519

หมายเหตุ เครื่องหมาย (-) หมายถึง ค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง

$$\% \text{ Error} = \left[\frac{X_{(Sim)} - X_{(Exp)}}{X_{(Sim)}} \right] * 100$$

จากตารางที่ 5.2 พบว่าตำแหน่งของจุด Separation ได้จาก Turbulence Model ที่เพิ่มทอม Yap's Correction เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณบริเวณจุด Separation ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยมีค่าที่ต่ำกว่าการทดลองประมาณ 6.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนจุดสิ้นสุดของ Recirculation Zone ที่ได้จาก Turbulence Model แบบต่างๆ มีค่าที่ต่ำกว่าผลการทดลองทั้งหมด แต่ Turbulence Model ที่ทำนายดีที่สุด คือ Low K-Epsilon + Yap's Correction Model โดยมีค่าประมาณ 13.741 เปอร์เซ็นต์

แม้ว่าลักษณะของสิ่งกีดขวางรูปภูเขาที่สร้างขึ้นสำหรับใช้จำลองเมื่อเทียบกับที่ใช้ในการทดลอง อาจมีความแตกต่างกัน เนื่องจากข้อมูลทางด้านรูปทรงของสิ่งกีดขวางมีน้อยและไม่ชัดเจน เป็นการยากที่จะสร้างให้ได้เหมือนต้นแบบ แต่จากผลการจำลองที่ได้กล่าวข้างต้น พบว่าผลการทำนายค่าความเร็วที่บริเวณกึ่งกลาง Water Tunnel มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองเหมือนกันทุกแบบจำลอง Turbulence Model ที่นำมาใช้ทำนายผล แต่เมื่อพิจารณาผลการทำนายที่บริเวณใกล้ผนังทั้งสองด้านของ Turbulence Model ของกรณี High Reynolds Number และกรณี Low Reynolds Number ให้ค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากผลของการทดลองทั้งสองกรณี แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจุดต่อจุดแล้ว พบว่าแบบจำลองของกรณี High Reynolds Number ให้ผลที่คลาดเคลื่อนมากกว่าแบบจำลองของกรณี Low Reynolds Number ซึ่งสาเหตุของความคลาดเคลื่อนดังกล่าวที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือ กรณีที่แบบจำลองสำหรับแบบจำลองประเภท High Reynolds Number การทำนายค่าความเร็วที่บริเวณใกล้ผนัง (Near Wall Region) จำเป็นต้องมีสมการที่เรียกว่า Wall Function ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับคำนวณค่าความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังโดยมีข้อกำหนดว่า Cell แรกที่ใกล้ผนังต้องมีค่า Y^+ อยู่ในช่วง 30 -130 แต่ Turbulence Model กรณี Low Reynolds Number ได้มีการเปลี่ยนแปลงสมการเพื่อให้สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้โดยไม่ต้องใช้ Wall Function จึงซึ่งสามารถคำนวณค่าต่างๆ บริเวณผนังได้โดยไม่มีข้อกำหนดของค่า Y^+ ดังนั้น Turbulence Model กรณี Low Reynolds Number จึงสามารถคำนวณค่าต่างๆ บริเวณผนังได้ใกล้เคียงผนังมากกว่าการใช้ Wall Function จำนวน เป็นผลให้การทำนายค่าบริเวณผนังได้ดีกว่า ดังนั้น ถ้าการคำนวณใดที่ต้องการทราบถึงการเปลี่ยนแปลง ณ บริเวณผนัง เช่น กรณีของการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อผนังเป็นแหล่งความร้อน และกรณีที่มีการแพร่ของมวลผ่านผนัง ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ การใช้ Turbulence Model กรณี Low Reynolds Number จึงน่าจะเหมาะสมที่จะใช้กับงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศเมื่อที่รูรูปแบบต่างๆ เป็นแหล่งความร้อน ซึ่งจำเป็นต้องทราบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณใกล้ผนัง และด้วยผลการเปรียบเทียบที่กล่าวข้างต้น จึงทำการเลือกที่ใช้ Low K-Epsilon + Yap's Correction Model ซึ่งอยู่ในกรณี Low Reynolds Number ของ Turbulence Model ในการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศเมื่อที่รูรูปแบบต่างๆ เป็นแหล่งความร้อน ดังที่จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 6

ผลงานวิจัยที่ทำการศึกษา

การพิจารณาจากบทที่ผ่านมาซึ่งเป็นการคัดเลือก Turbulence Model ที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการอธิบายผลกระทบทางรูปทรงของท่อต่อรูปแบบการไหล และการกระจายตัวของอนุภาคของอากาศที่ไหลอยู่ระหว่างครีบอกและท่อแล้วนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา โดยอาศัย Turbulence Model ที่ได้รับการคัดเลือกจากบทที่ผ่านมา และ ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

6.1 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

6.1.1 รูปแบบของท่อที่ใช้ในงานวิจัย

รูปแบบท่อที่นำมาศึกษาหาผลกระทบที่มีต่อรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของอนุภาคของอากาศ จะประกอบด้วยท่อรูปทรงแบน (Flat Tube), ท่อรูปวงรี (Elliptic Tube), และท่อรูปหยดน้ำ (Streamline Tube) โดยขนาดท่อที่นำมาศึกษาจะกำหนดให้มีขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัส และขนาดตามความยาวของท่อที่เท่ากัน แต่ขนาดตามความกว้างจะตามความเหมาะสมเพื่อให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีขนาดที่เท่ากันได้ตามข้อกำหนด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 แต่ในการศึกษาจะพิจารณาเพียงครั้งรูปสมมาตรตามแนวแกนหลักเท่านั้น และใช้ท่อจำนวน 2 ท่อที่จัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน โดยลักษณะของรูปแบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาจะอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป โดยที่จะแบบเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และ กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนไปพร้อมกัน

ตารางที่ 6.1 แสดงขนาดและลักษณะพื้นที่ตัดขวางของรูปทรงท่อแบบต่างๆ ที่นำมาศึกษา

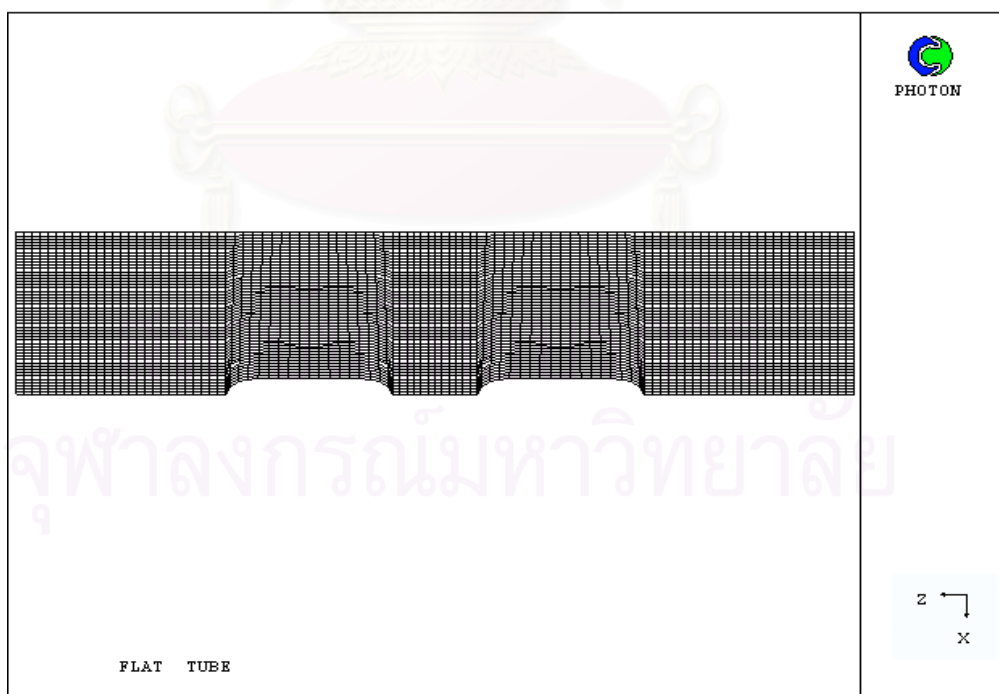
รูปแบบท่อ	ขนาดในแนวแกนหลัก	ขนาดในแนวแกนรอง	ลักษณะรูปทรงที่ใช้
รูปทรงแบน	10.0 มิลลิเมตร	2.199 มิลลิเมตร	
รูปทรงวงรี	10.0 มิลลิเมตร	3.000 มิลลิเมตร	
รูปทรงหยดน้ำ	10.0 มิลลิเมตร	3.000 มิลลิเมตร	

6.1.2 การกำหนดกริด

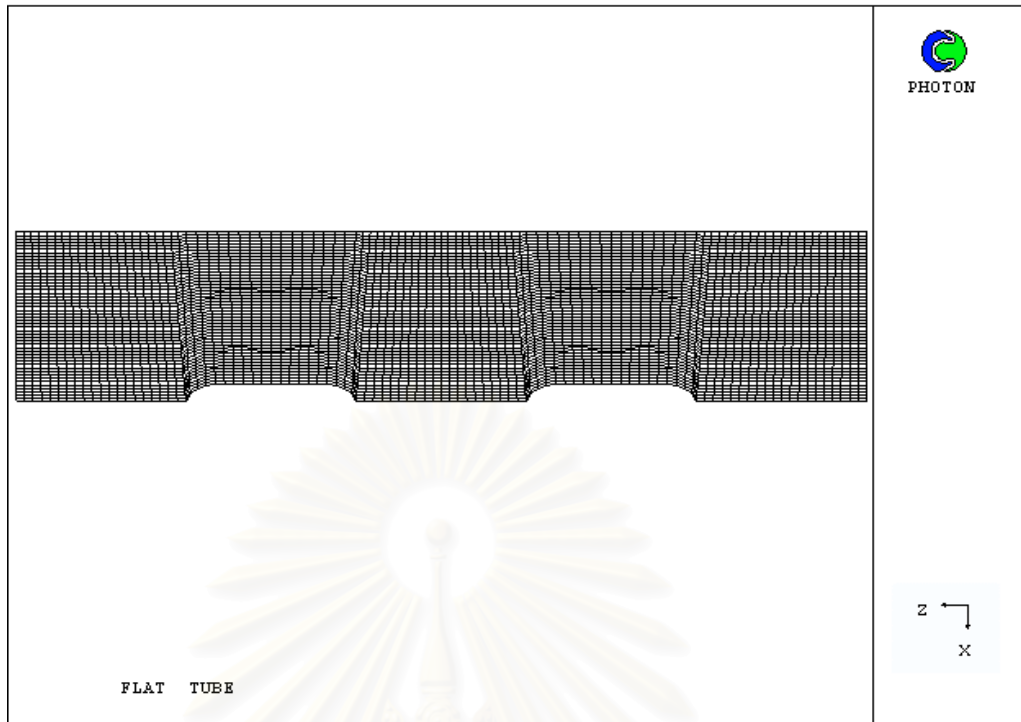
จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วที่ว่าลักษณะของโดเมนที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาจะประกอบด้วยท่อจำนวน 2 ท่อที่จัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงลักษณะทั้งหมด รวมทั้งจำนวนและขนาดของกริดที่ใช้กับโดเมน ซึ่งสามารถอธิบายแยกตามกรณีได้ดังนี้

6.1.2.1 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

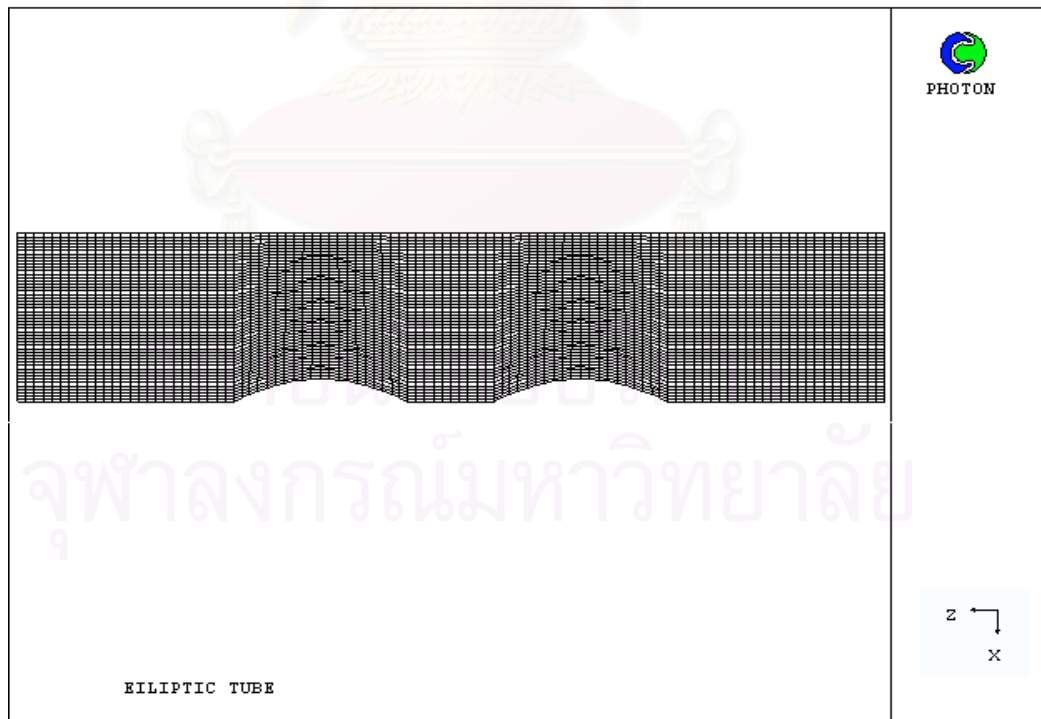
สำหรับกรณีนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบน ดังนั้นโดเมนที่สร้างจะประกอบด้วยครีบบน 1 แผ่น ซึ่งมีขนาดตามความกว้างเท่ากับ 10.5 มิลลิเมตร และขนาดตามความยาวเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ส่วนขนาดความหนาของครีบบนเท่ากับ 0.3015 มิลลิเมตร โดยมีท่อรูปแบบต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา จำนวน 2 ท่อ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบแนวเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร ส่วนจำนวนและขนาดของกริดของแต่ละโดเมนที่สร้างเหมือนกันทั้งหมด โดยกำหนดให้จำนวนกริดตามความกว้างของโดเมน (NX) และจำนวนกริดตามความหนาของโดเมน (NY), จำนวนกริดตามความยาวของโดเมน (NZ) มีค่าเท่ากับ 50, 1, 100 ตามลำดับ และขนาดของกริดจะมีขนาดเท่ากันตลอดทั้งโดเมน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 – 6.6



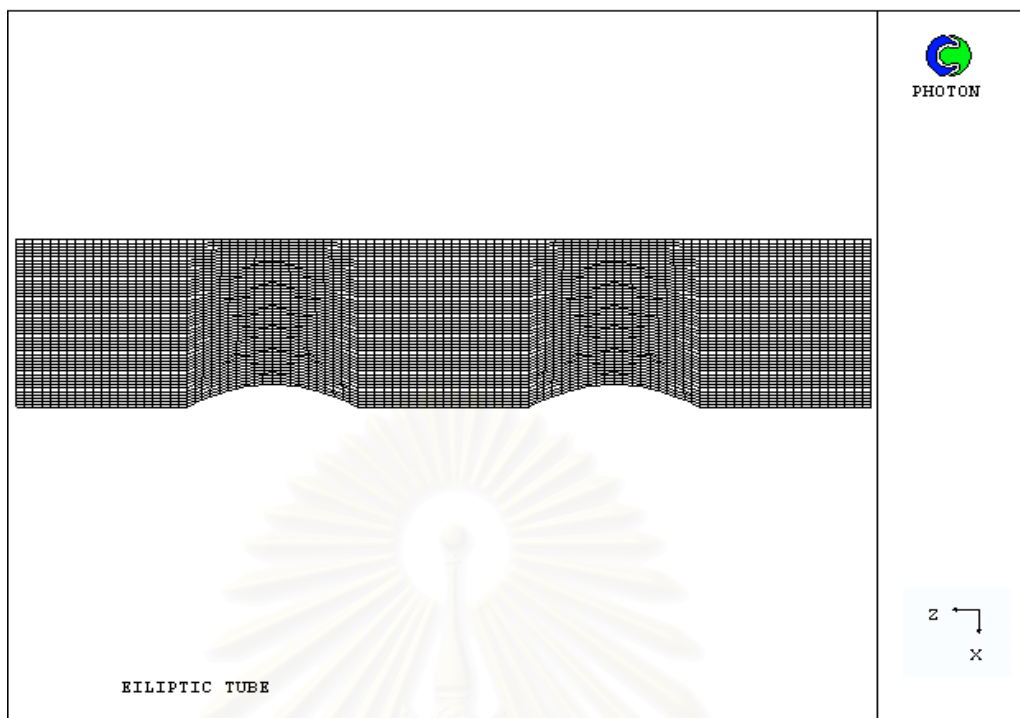
รูปที่ 6.1 ลักษณะกริด ตลอดทั้งโดเมนของท่อรูปทรงแบนที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร
สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว



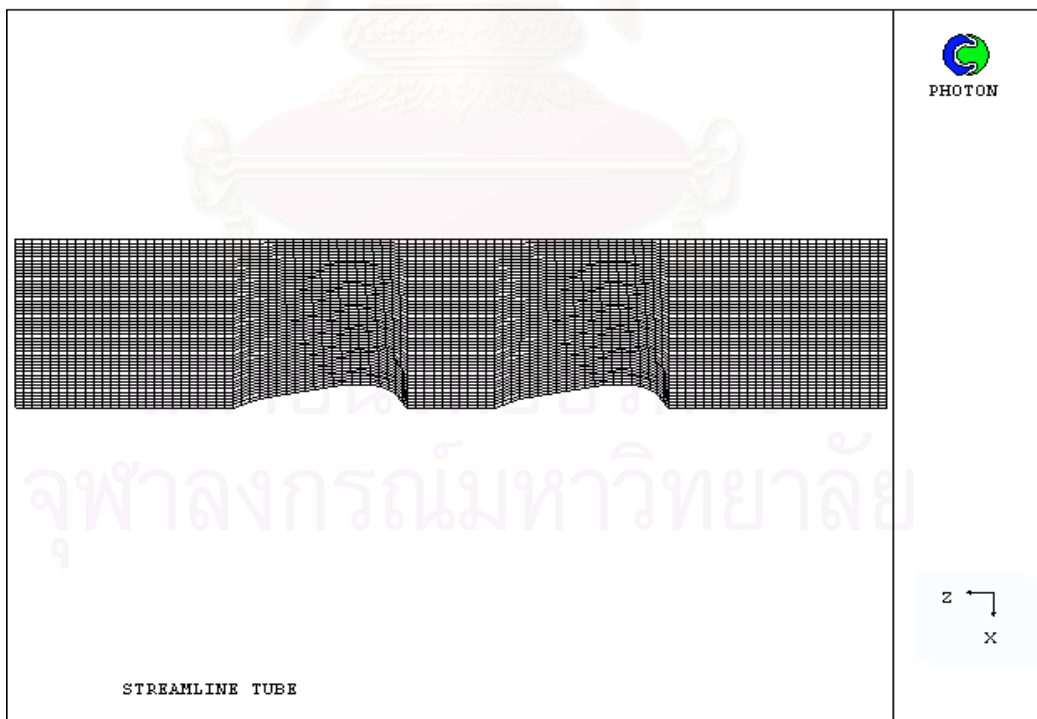
รูปที่ 6.2 ลักษณะกริด ตลอดทั้งโดเมนของท่อรูปทรงแบนที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร
สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว



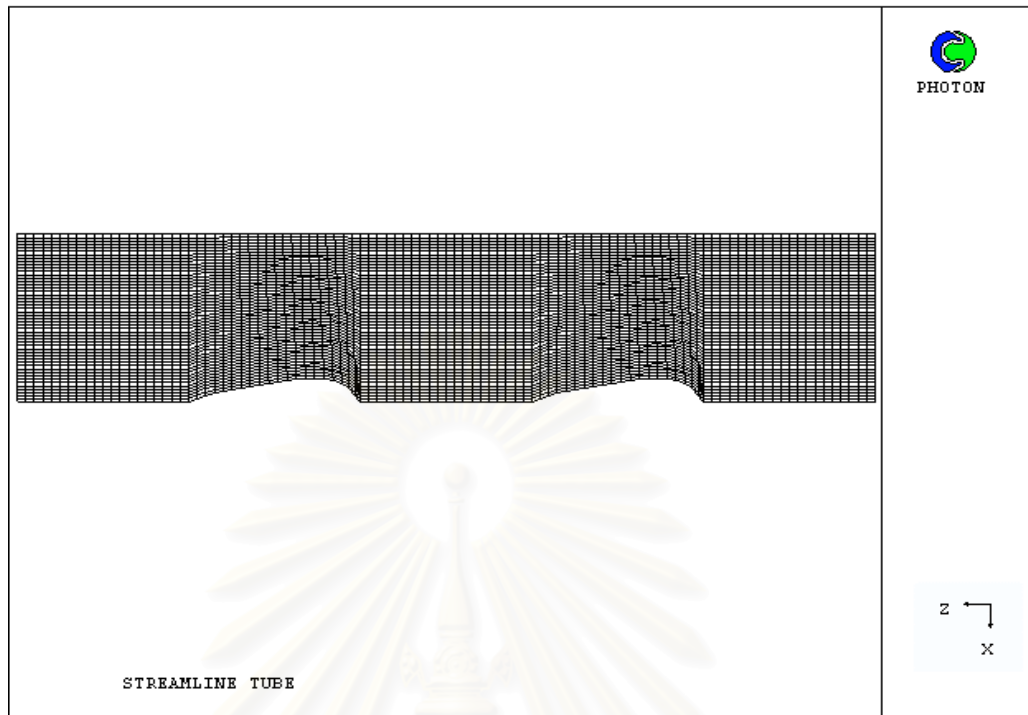
รูปที่ 6.3 ลักษณะกริด ตลอดทั้งโดเมนสำหรับท่อรูปทรงวงรีที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร
สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 6.4 ลักษณะกริด ตลอดทั้งโดเมนสำหรับท่อรูปทรงวงรีที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร
สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว



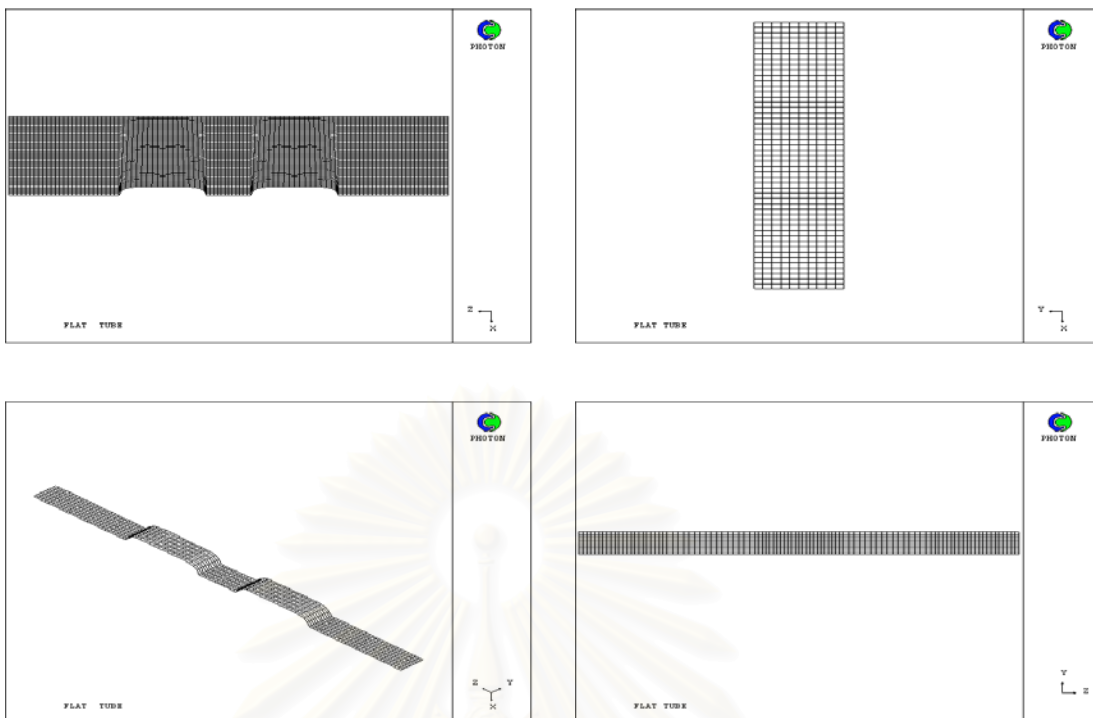
รูปที่ 6.5 ลักษณะกริด ตลอดทั้งโดเมนสำหรับท่อรูปทรงหยดน้ำที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร
สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว



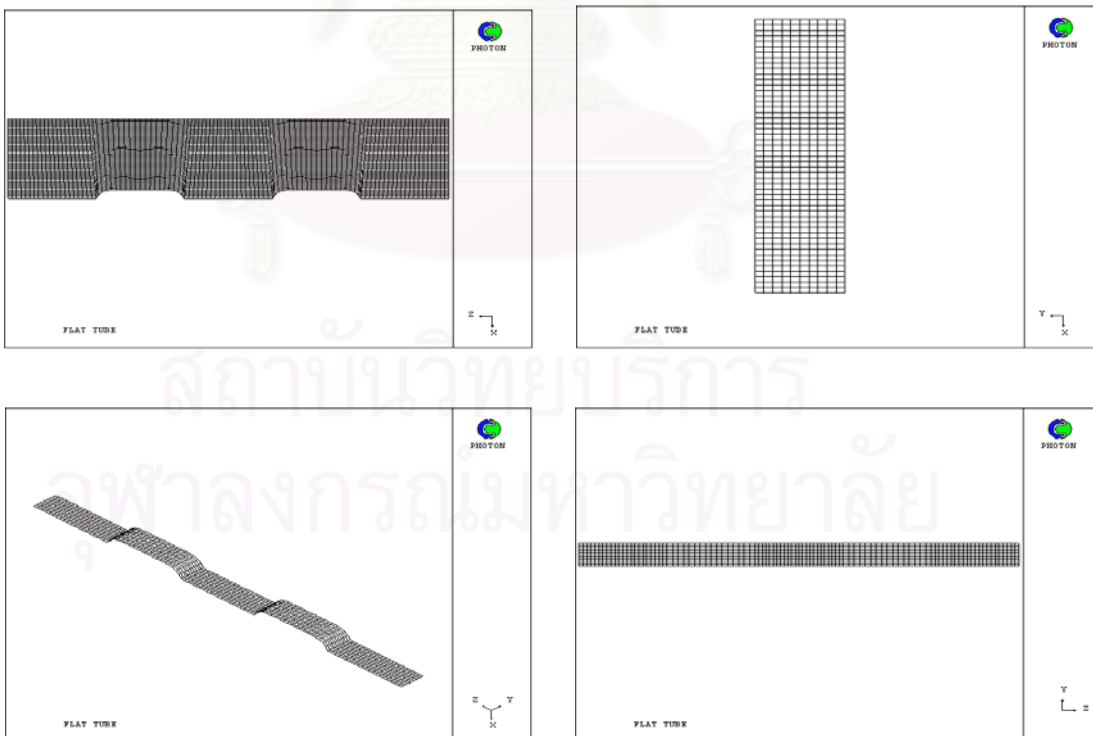
รูปที่ 6.6 ลักษณะกริด ตลอดทั้งโดเมนสำหรับท่อรูปทรงหยดน้ำที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

6.1.2.2 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนไปพร้อมกัน

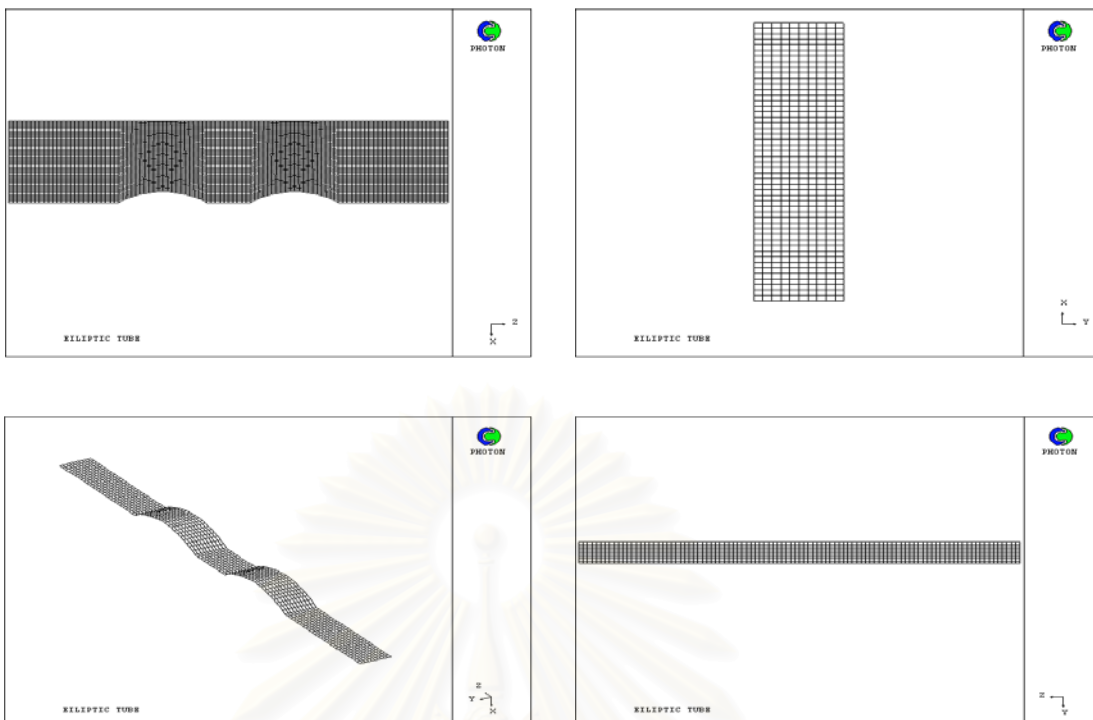
สำหรับกรณีนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ระหว่างครีบบัณฑ์ 2 แผ่น ดังนั้นโดเมนที่สร้างจะประกอบด้วย ครีบบัณฑ์ 2 แผ่นขนาดตามความกว้างเท่ากับ 10.5 มิลลิเมตร และขนาดตามความยาวเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ส่วนขนาดความหนาของครีบบัณฑ์เท่ากับ 0.3015 มิลลิเมตร และวางห่างกันเป็นระยะเท่ากับ 2.412 มิลลิเมตร โดยมีท่อรูปแบบต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา จำนวน 2 ท่อ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบแนวเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร เป็นแหล่งความร้อน เช่นเดียวกับกรณีที่ศึกษาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วนจำนวนและขนาดของกริดของแต่ละโดเมนที่สร้างจะเหมือนกันทั้งหมด สำหรับกรณีนี้ กำหนดให้จำนวนกริดตามความกว้างของโดเมน (NX) และ จำนวนกริดตามความหนาของโดเมน (NY), จำนวนกริดตามความยาวของโดเมน (NZ) มีค่าเท่ากับ 50, 10, 100 ตามลำดับ และขนาดของกริดจะมีขนาดเท่ากันตลอดทั้งโดเมน ดังแสดงในรูปที่ 6.7 – 6.12



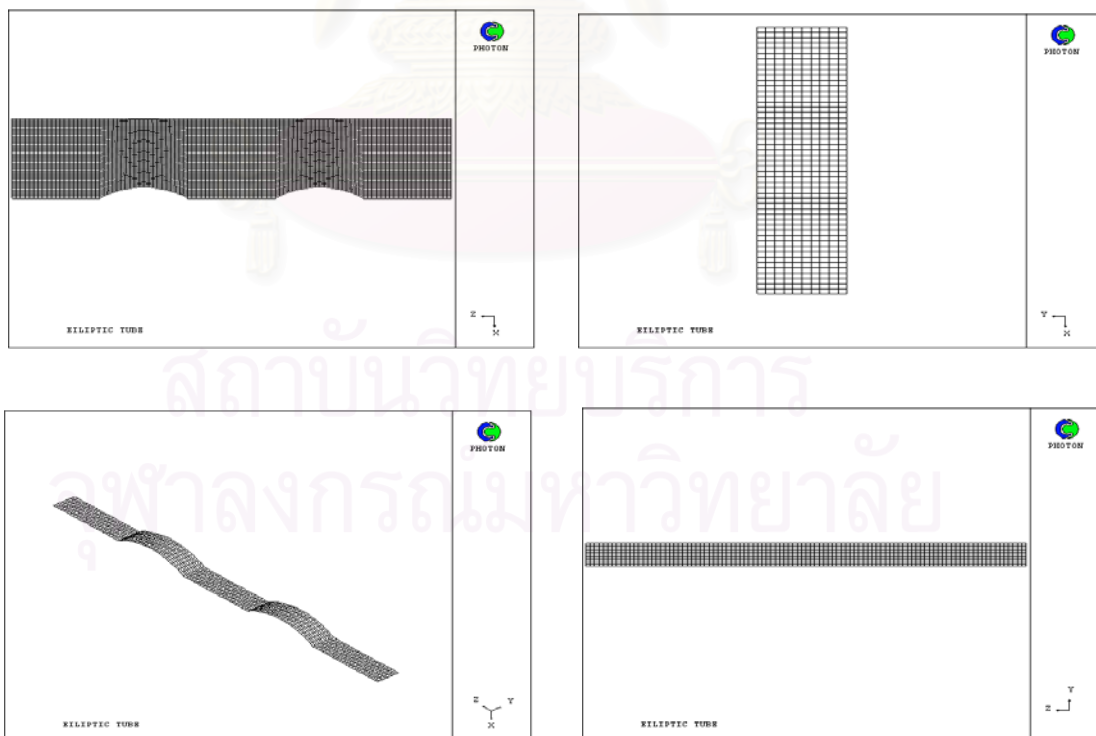
รูปที่ 6.7 ลักษณะกริด ตลอดทั้งโดเมนสำหรับท่อทรงแบนที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนกับการพาความร้อนพร้อมกัน



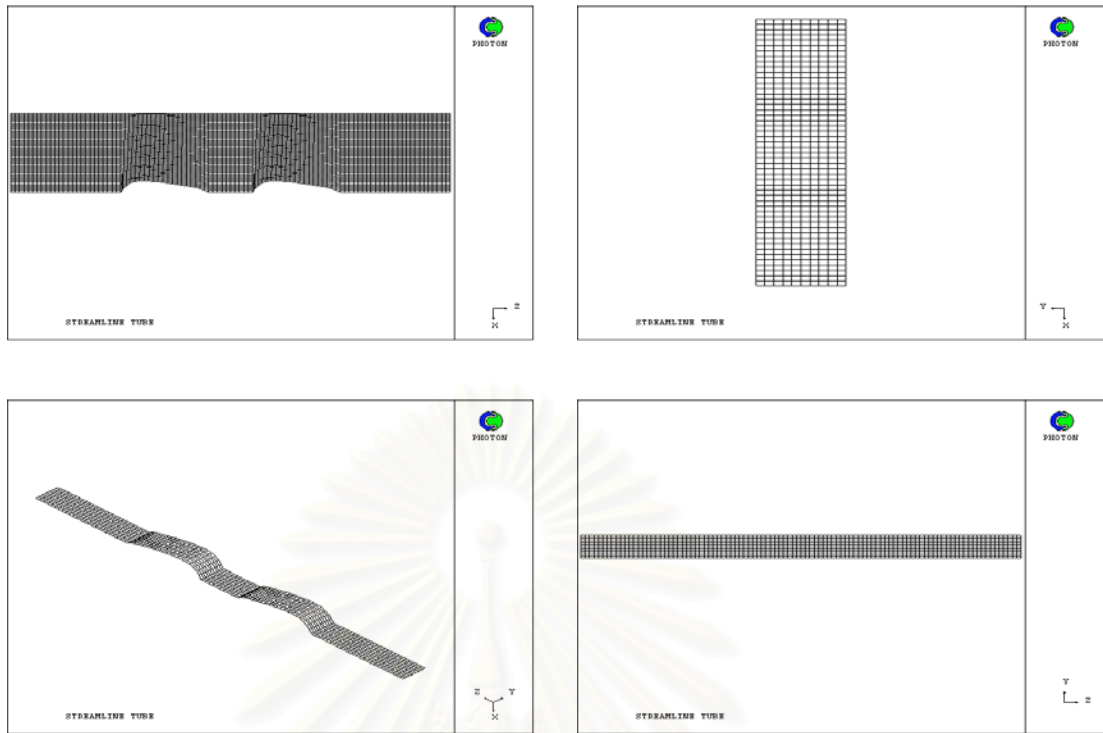
รูปที่ 6.8 ลักษณะกริด ตลอดทั้งโดเมนสำหรับท่อทรงแบนที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนกับการพาความร้อนพร้อมกัน



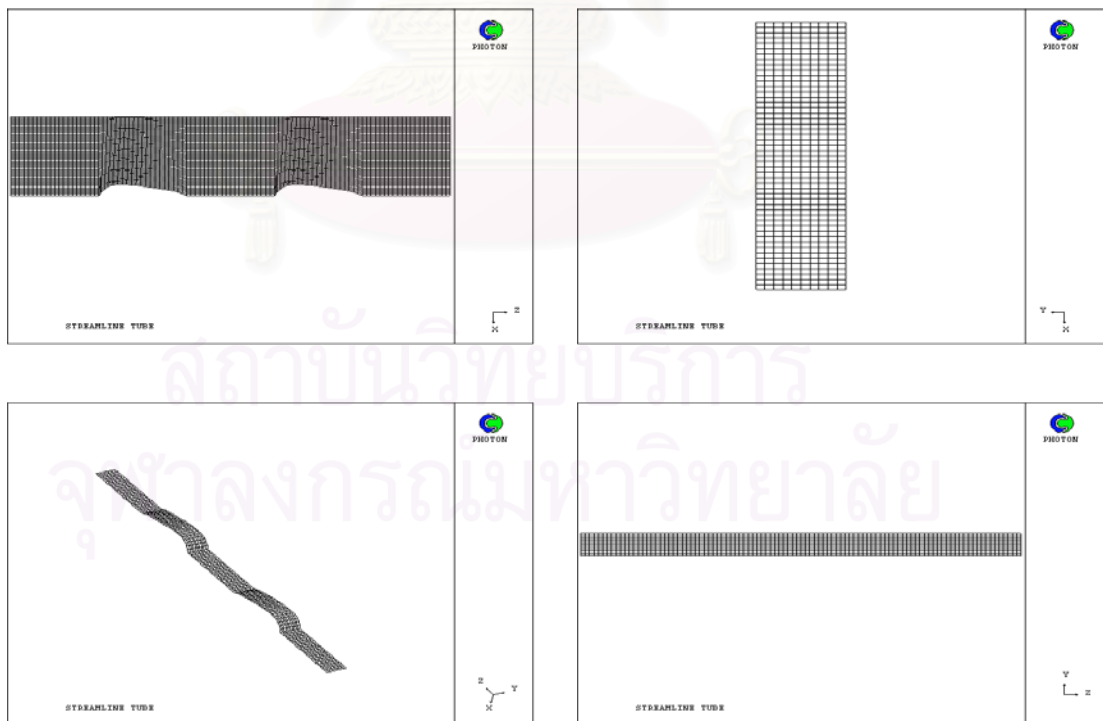
รูปที่ 6.9 ลักษณะกริด ตลอดทั้ง โดเมนสำหรับท่อรูปทรงวงรีที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนกับการพาความร้อนพร้อมกัน



รูปที่ 6.10 ลักษณะกริด ตลอดทั้ง โดเมนสำหรับท่อรูปทรงวงรีที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนกับการพาความร้อนพร้อมกัน



รูปที่ 6.11 ลักษณะกริด ตลอดทั้ง โดเมนสำหรับท่อรูปทรงหยดน้ำที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 0.5 เซนติเมตร
สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนกับการพาความร้อนพร้อมกัน



รูปที่ 6.12 ลักษณะกริด ตลอดทั้ง โดเมนสำหรับท่อรูปทรงหยดน้ำที่มีระยะห่างระหว่างท่อ 1.0 เซนติเมตร
สำหรับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนกับการพาความร้อนพร้อมกัน

6.1.3 สภาวะขอบเขต (Boundary Condition)

6.1.3.1 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

6.1.3.1.1 บริเวณผนังของครีบบัฟเฟอร์

สำหรับกรณีนี้ จะมีแผ่นครีบบัฟเฟอร์เพียงหนึ่งแผ่นอยู่ในโดเมน ดังนั้นแผ่น Plate ที่กำหนดมีความหนาเท่ากับ 0.3015 มิลลิเมตร และชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ ดังตารางที่ 6.2 โดยคิดค่าที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของอากาศกับอุณหภูมิของผิวท่อ และผนังทุกด้าน (ยกเว้นด้านที่มีท่อ) ไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม โดยค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางตั้งฉากกับผนังที่บริเวณใกล้ผนัง ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (Adiabatic Wall) ดังสมการ

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{near\ wall} = 0 \quad (6.1)$$

เมื่อ n คือทิศทางที่ตั้งฉากกับผนัง

ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติทางกายภาพของครีบบัฟเฟอร์

อุณหภูมิ T_{avg} ($^{\circ}C$)	ความหนาแน่น ρ (kg/m^3)	ค่าการนำความร้อน k (W/m K)	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ C_p (kJ/kg K)
55	2700	237.8952	0.8963

6.1.3.1.2 บริเวณผนังของท่อ

บริเวณผนังของท่อที่เป็นแหล่งความร้อนของระบบ จะกำหนดให้ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมเช่นเดียวกับแผ่นครีบบัฟเฟอร์ และกำหนดให้มีอุณหภูมิของผนังท่อเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ตลอดทั้งพื้นผิวท่อ

6.1.3.2 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนไปพร้อมกัน

6.1.3.2.1 บริเวณทางเข้าของช่องว่างระหว่างครีบนแผ่น

1. ความเร็วของอากาศมีลักษณะเป็นแบบ Uniform Flow ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าระบบของแต่ละการจำลอง

การจำลองที่	แนวแกน X (\bar{u}) เมตร/วินาที	แนวแกน Y (\bar{v}) เมตร/วินาที	แนวแกน X (\bar{w}) เมตร/วินาที
1	0.0	0.0	15
2	0.0	0.0	20

2. ส่วนของค่าพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน (k) และ ค่าอัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน (ε) สามารถประมาณค่าได้จากค่า Intensity ด้วยสมการต่อไปนี้ ตามลำดับ

$$k = (I * \bar{U})^2 \quad (6.2)$$

และ

$$\varepsilon = \frac{0.09^{0.75} k^{1.5}}{L} \quad (6.3)$$

โดยที่

$$L = 0.1H \quad (6.4)$$

เมื่อ H คือ Hydraulic Radius ของช่องทางเข้ามีค่าเท่ากับ 2.412 มิลลิเมตร

3. อุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาในระบบเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

6.1.3.2.2 บริเวณผนังของครีบบแผ่น

ณ บริเวณระนาบ XZ ที่ $NY = 1$ และ $NY = 10$ ของโดเมน กำหนดให้มีแผ่น Plate ที่มีความหนาเท่ากับ 0.3015 มิลลิเมตร และชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับกรณีของการพิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และกำหนดให้องค์ประกอบของความเร็วทุกทิศทางของผนังด้านที่อยู่ติดกับอากาศมีค่าเท่ากับศูนย์ (no-Slip Condition) และผนังด้านที่เหลือ (ยกเว้นด้านที่มีท่อ) กำหนดให้ไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดให้ค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางตั้งฉากกับผนังที่บริเวณใกล้ผนังมีค่าเป็นศูนย์ (Adiabatic Wall) ดังสมการที่ 6.1

6.1.3.2.3 บริเวณผนังของท่อ

บริเวณผนังของท่อ ที่เป็นแหล่งความร้อนของระบบ จะกำหนดให้ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมเช่นเดียวกับแผ่นครีบบ และกำหนดให้มีอุณหภูมิของผนังท่อเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ตลอดทั้งพื้นผิวท่อ

6.1.3.2.4 บริเวณด้านสมมาตร (Symmetry boundary)

บริเวณที่กำหนดให้เป็นด้านสมมาตร คือ บริเวณระนาบ ZY ที่ด้าน $IX = 1$ (เว้นบริเวณที่มีท่อ) และ ด้าน $IX = 51$ โดยกำหนดให้ ความเร็วในแนวแกน X (\bar{u}) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และ ค่าเกรเดียนต์ของ \bar{w}, \bar{v} ตามแนวแกน Z และ Y ตามลำดับมีค่าเท่ากับศูนย์

6.1.3.2.5 คุณสมบัติทางกายภาพเฉลี่ยของอากาศในระบบ ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศที่ใช้ในการจำลอง

อุณหภูมิ (°C)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m s)	k (W/m K)	C_p (kJ/kg K)
30	1.1678	1.8661E-05	0.0264	1.0048

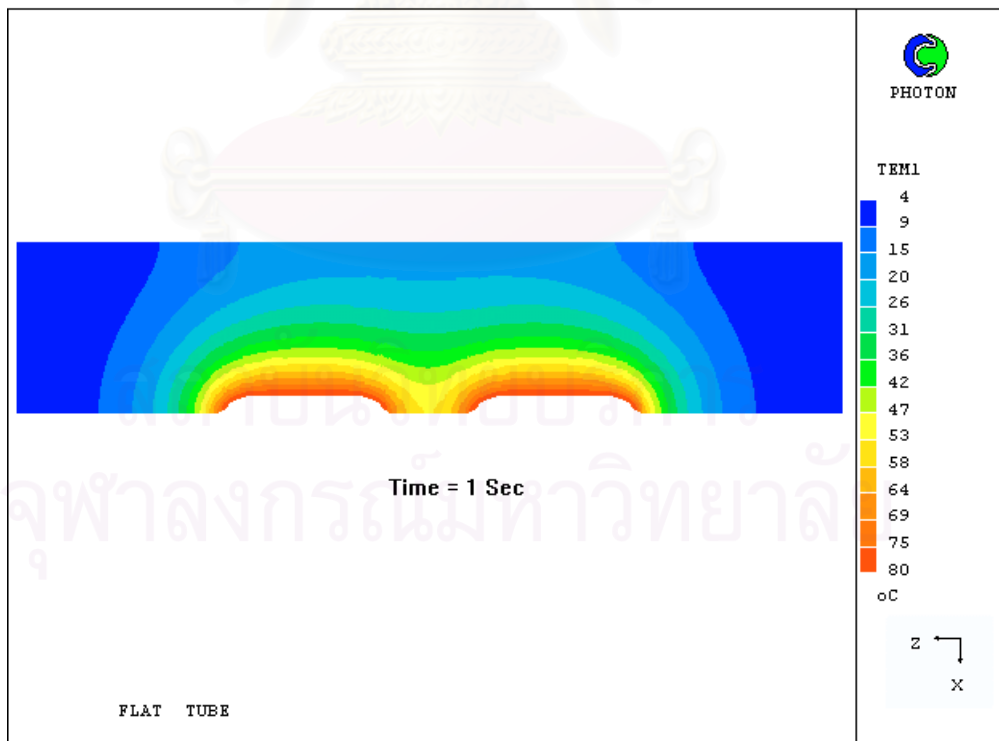
6.2 ผลจากการจำลองปรากฏการณ์ที่ต้องการศึกษา

6.2.1 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

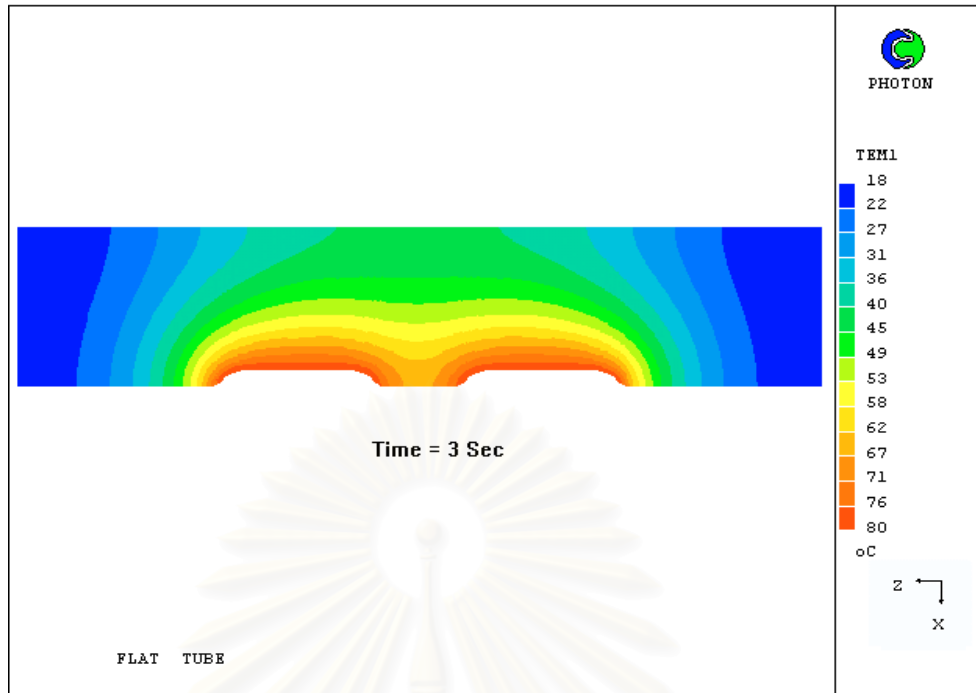
สำหรับกรณีนี้จะเป็นการจำลองปรากฏการณ์การนำความร้อนภายในครีบบแผ่นเพียงอย่างเดียว โดยจะแบ่งการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบบแผ่นออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีเปรียบเทียบที่เวลาต่าง ๆ ของท่อแต่ละรูปแบบ และ กรณีเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันของท่อทั้งสามรูปแบบ โดยทั้ง 2 กรณีจะแยกการพิจารณาตามระยะห่างระหว่างท่อ และเวลาที่นำมาใช้เปรียบเทียบ คือ 1, 3, 5, 7, 9 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เห็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 6.13 - 6.27 สำหรับกรณีที่มีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ รูปที่ 6.28 - 6.42 สำหรับกรณีที่มีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

6.2.1.1 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของแผ่นครีบบที่เวลาต่างกัน

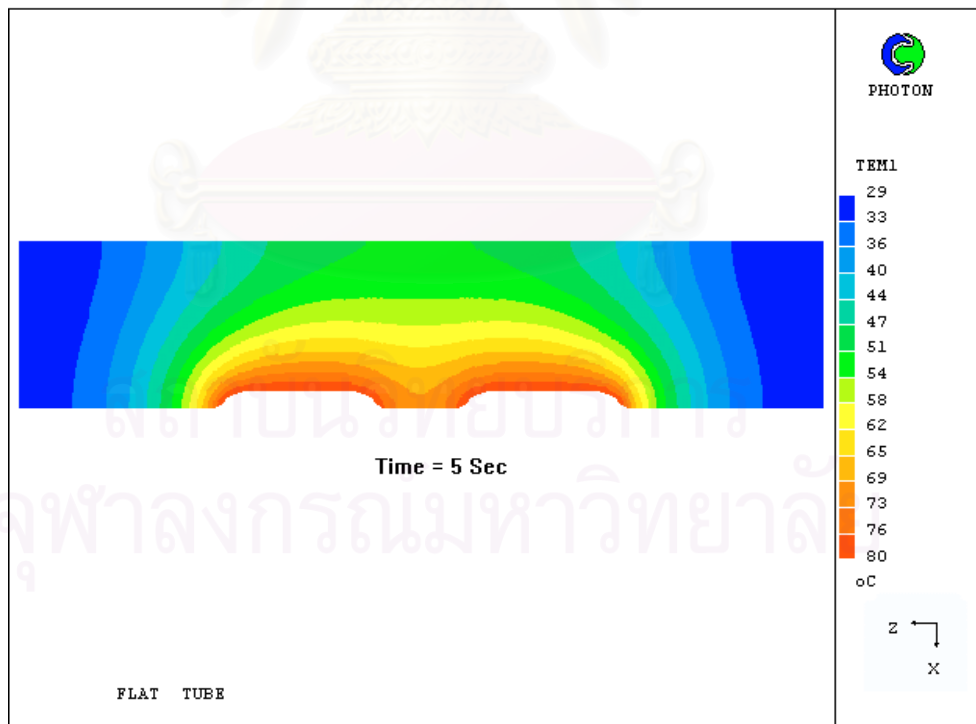
6.2.1.1.1 ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



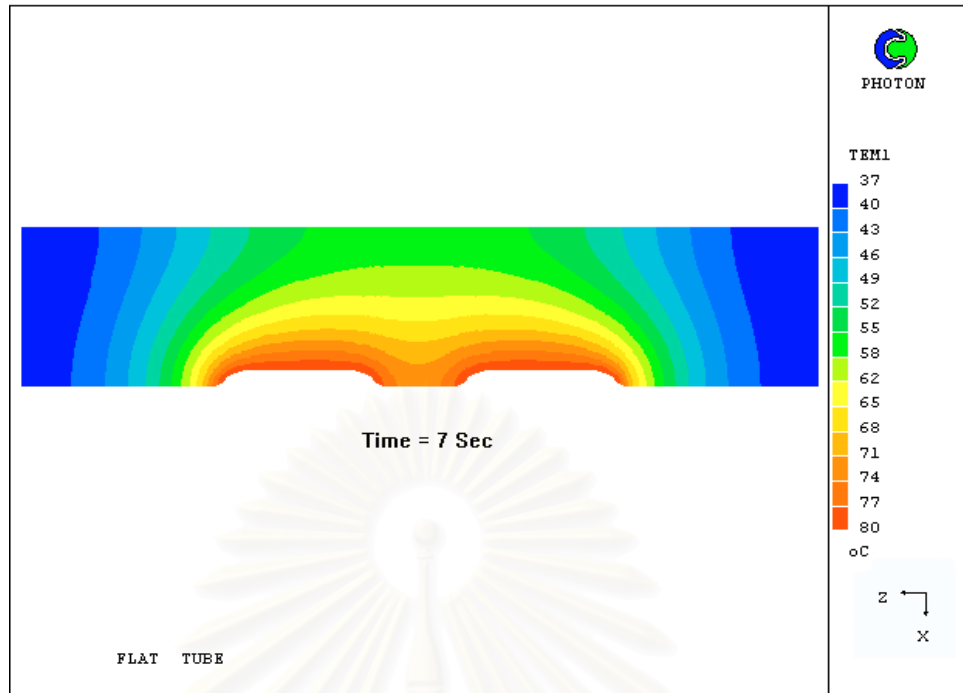
รูปที่ 6.13 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบบแผ่น ที่เวลา 1 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



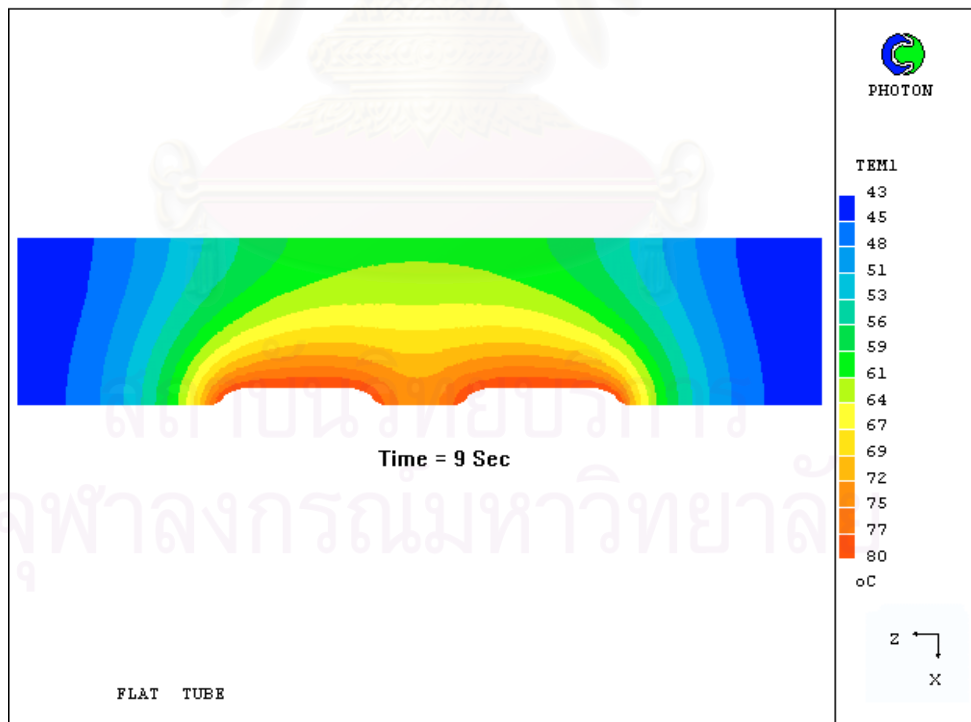
รูปที่ 6.14 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 3 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



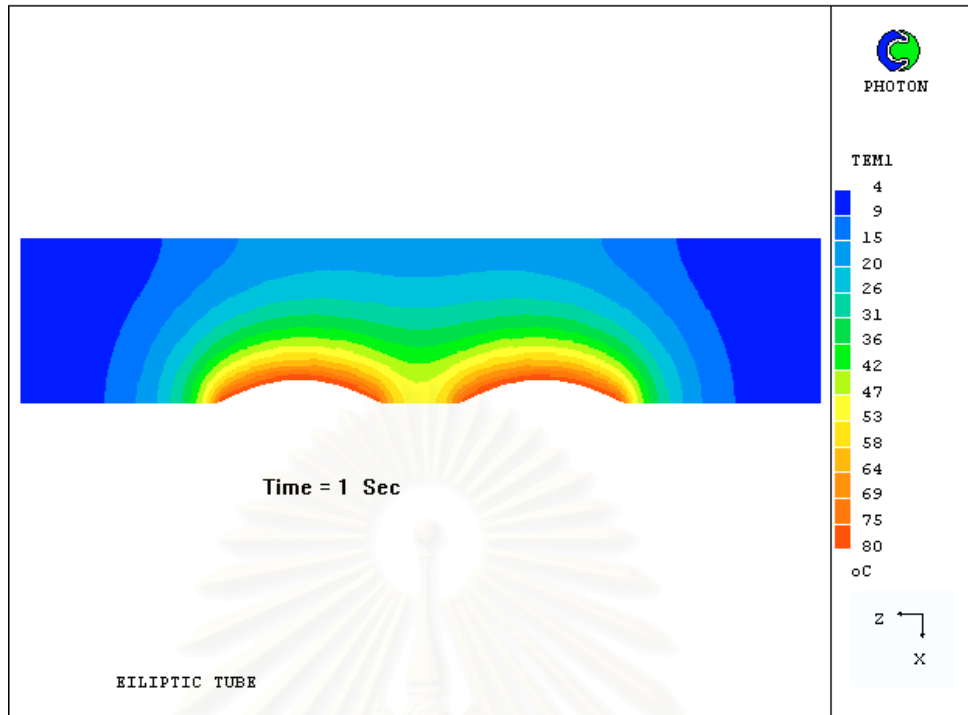
รูปที่ 6.15 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 5 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



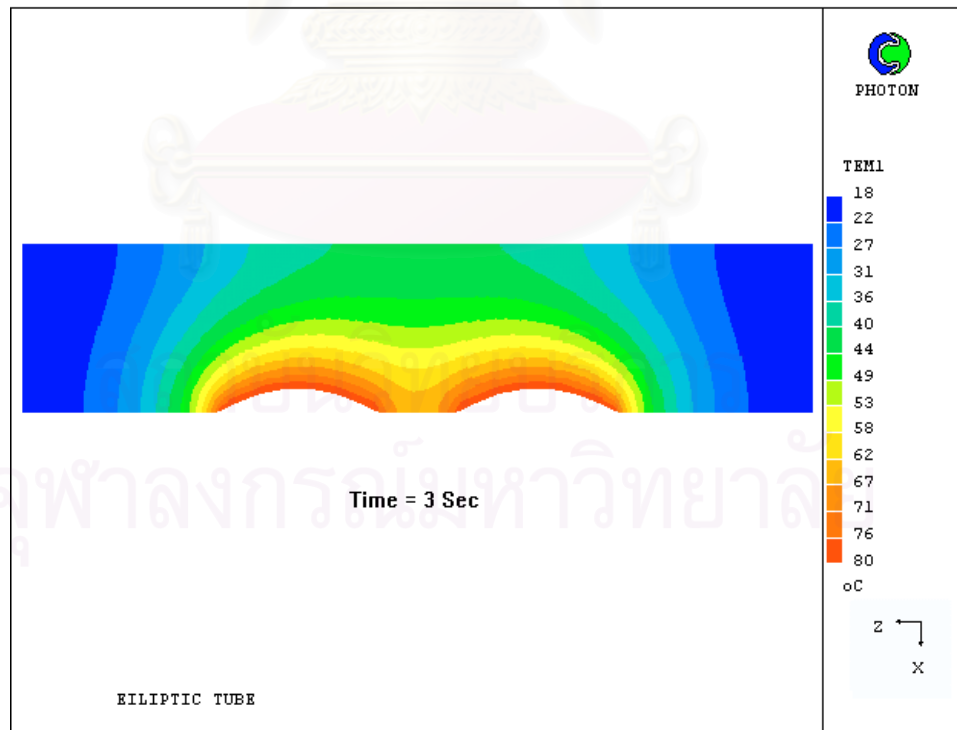
รูปที่ 6.16 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 7 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



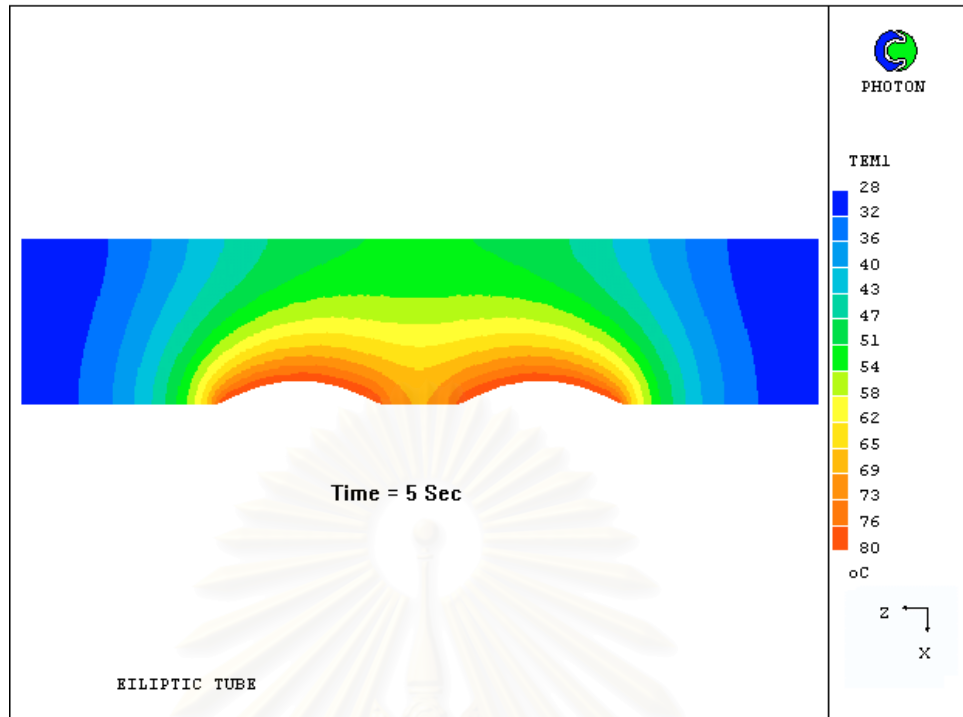
รูปที่ 6.17 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 9 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



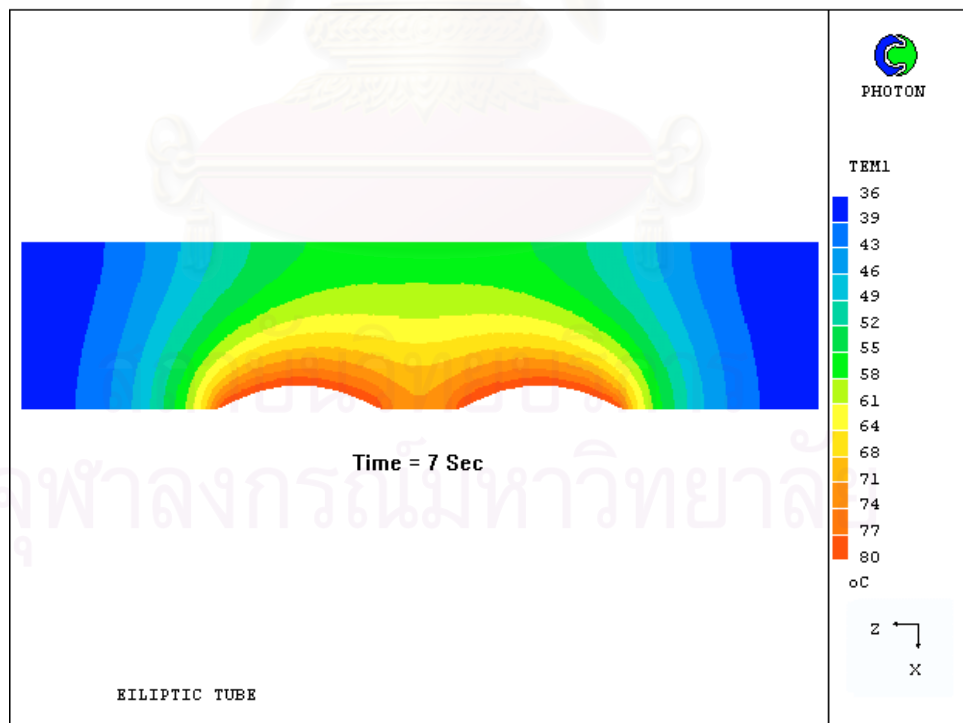
รูปที่ 6.18 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครีปแผ่น ที่เวลา 1 วินาที ของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



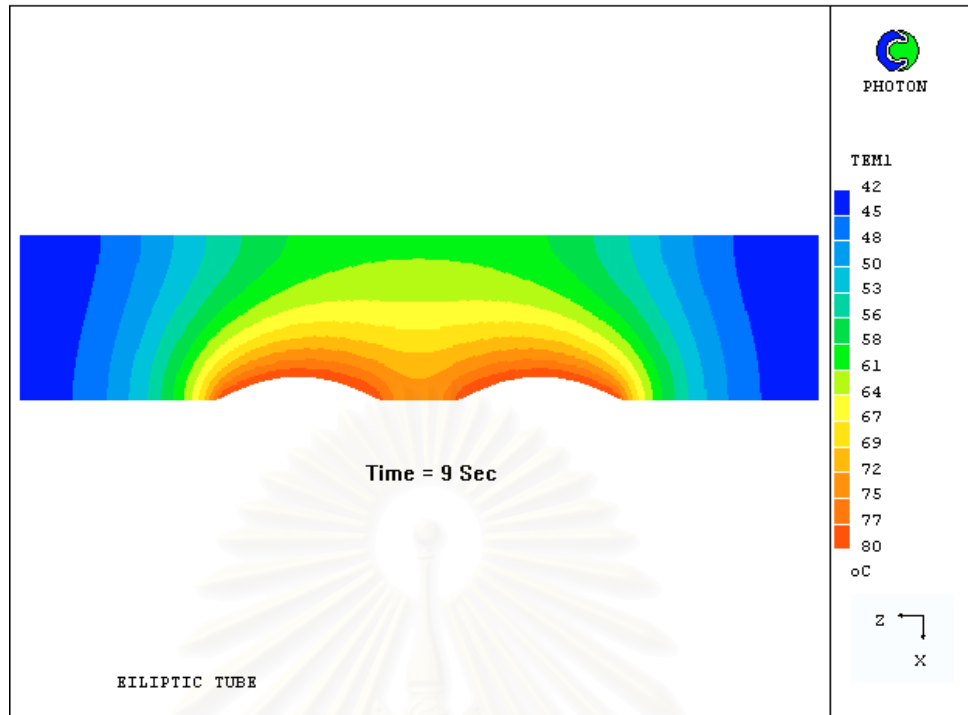
รูปที่ 6.19 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครีปแผ่น ที่เวลา 3 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



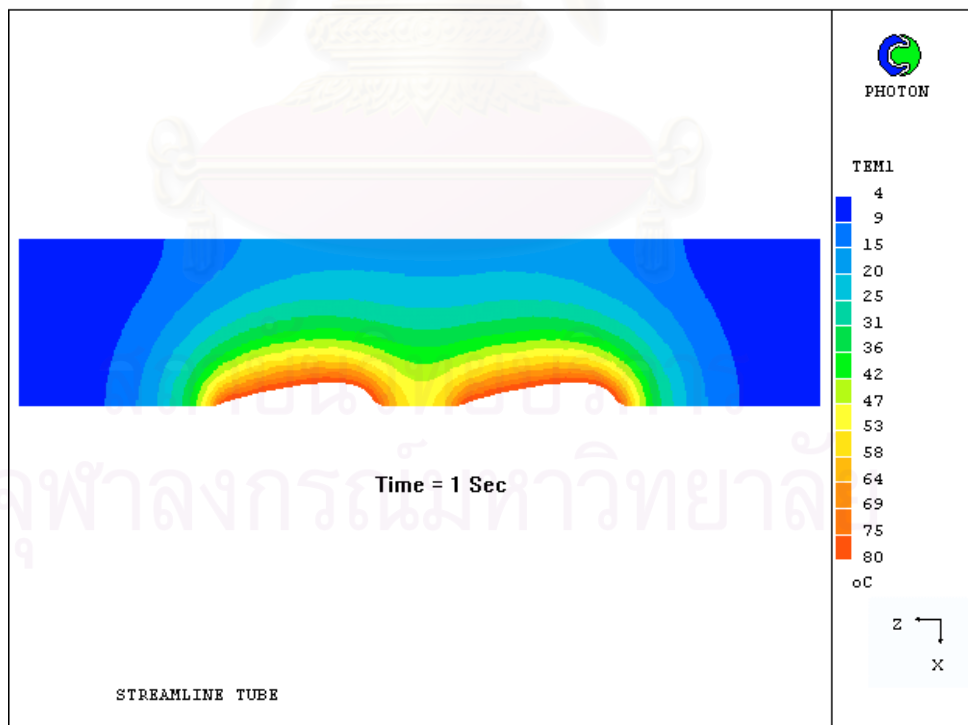
รูปที่ 6.20 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครึ่งแผ่น ที่เวลา 5 วินาทีของท่อทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



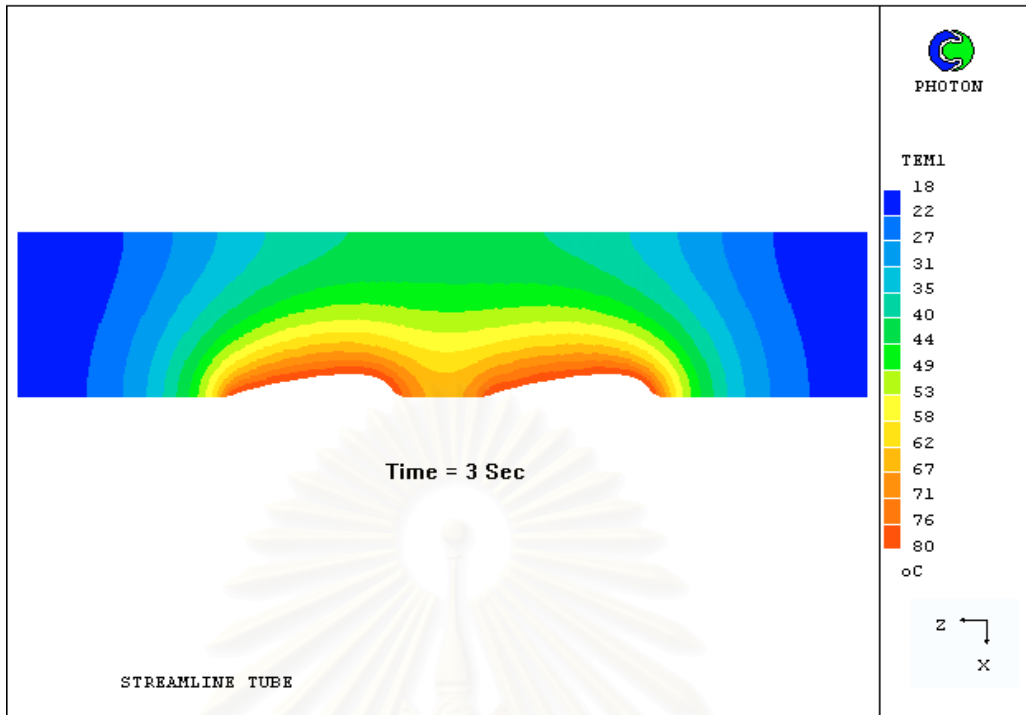
รูปที่ 6.21 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครึ่งแผ่น ที่เวลา 7 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



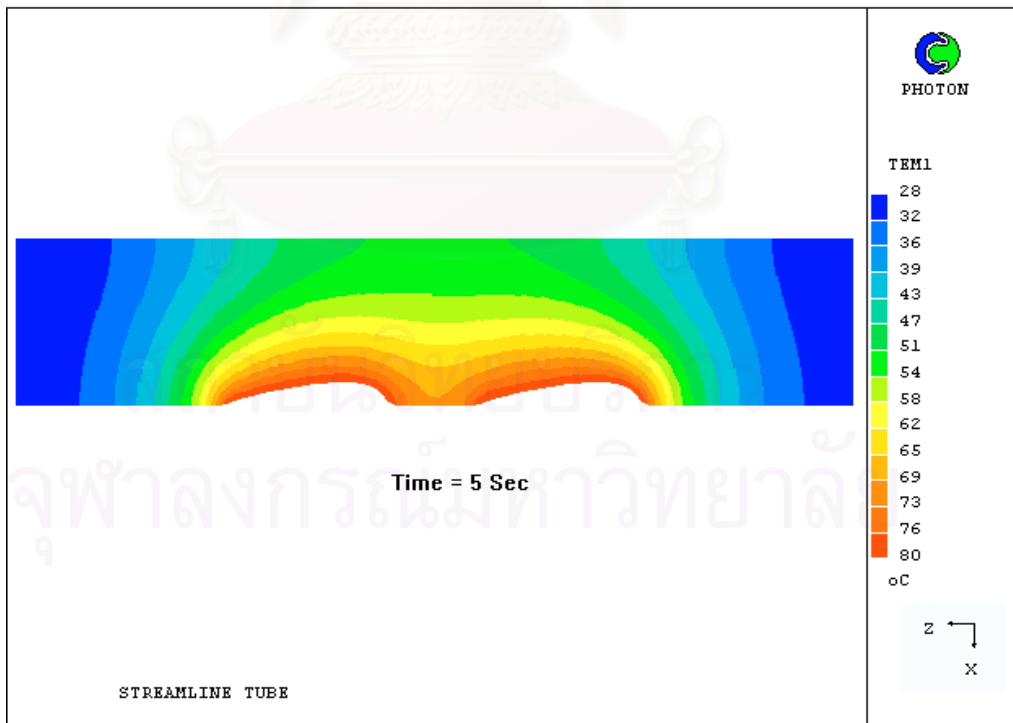
รูปที่ 6.22 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ ที่เวลา 9 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



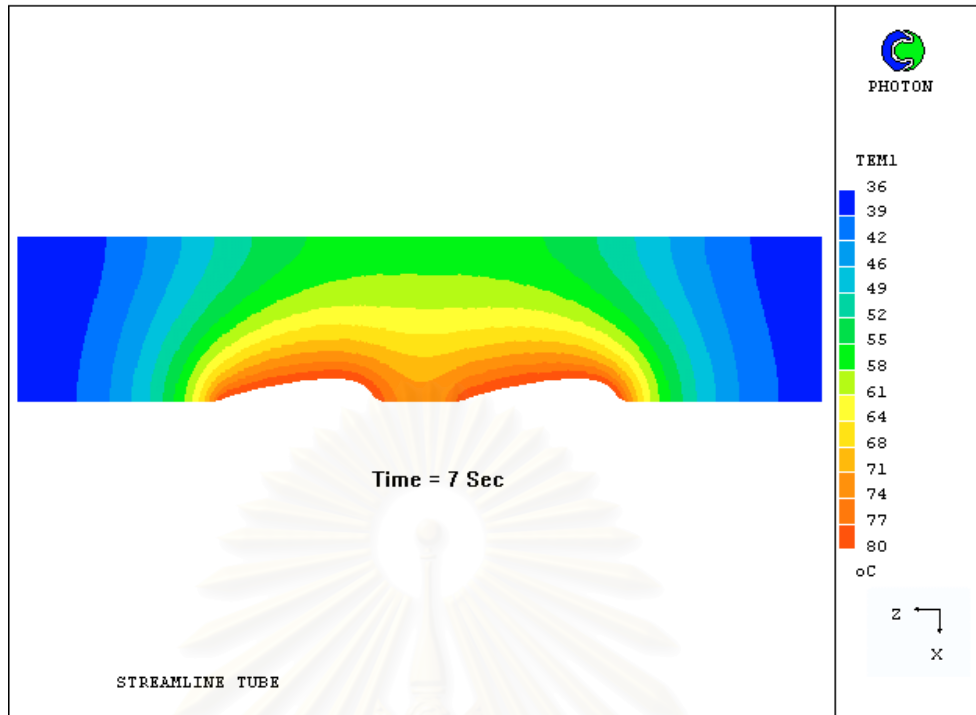
รูปที่ 6.23 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ ที่เวลา 1 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



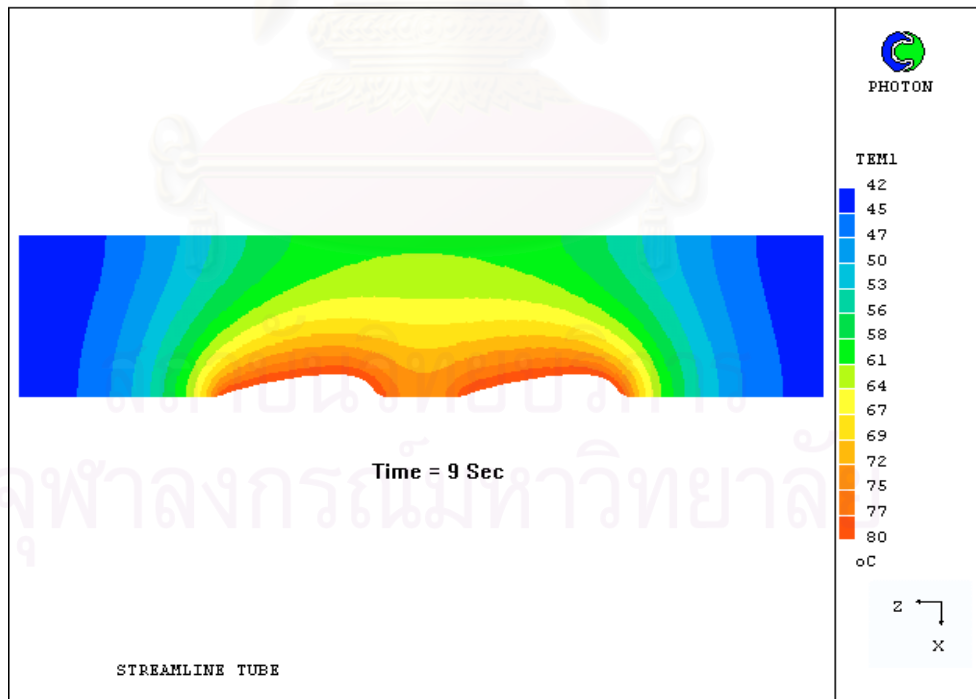
รูปที่ 6.24 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ ที่เวลา 3 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



รูปที่ 6.25 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ ที่เวลา 5 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร

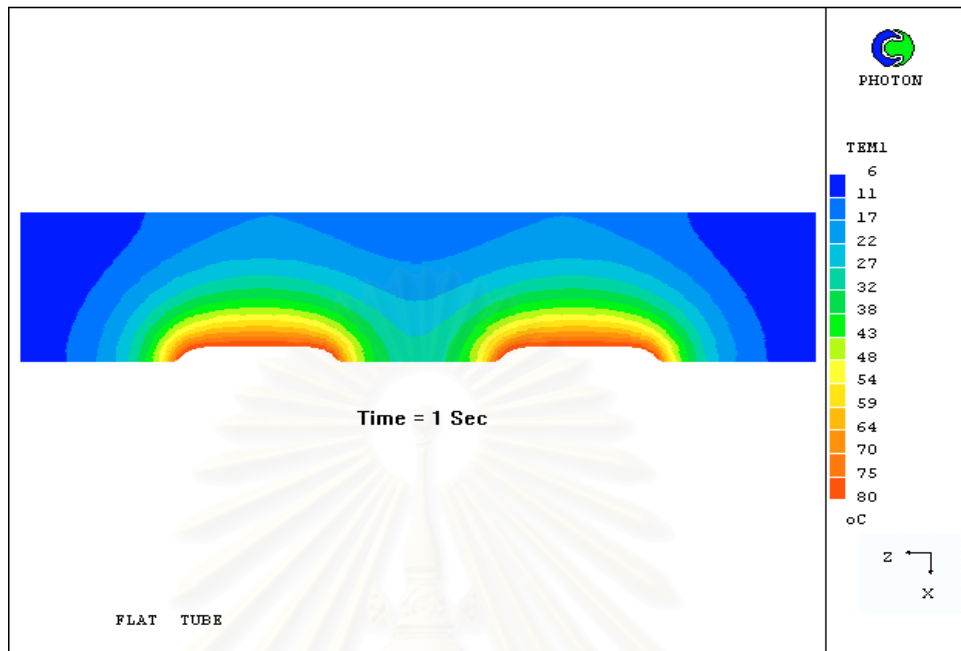


รูปที่ 6.26 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ ที่เวลา 7 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร

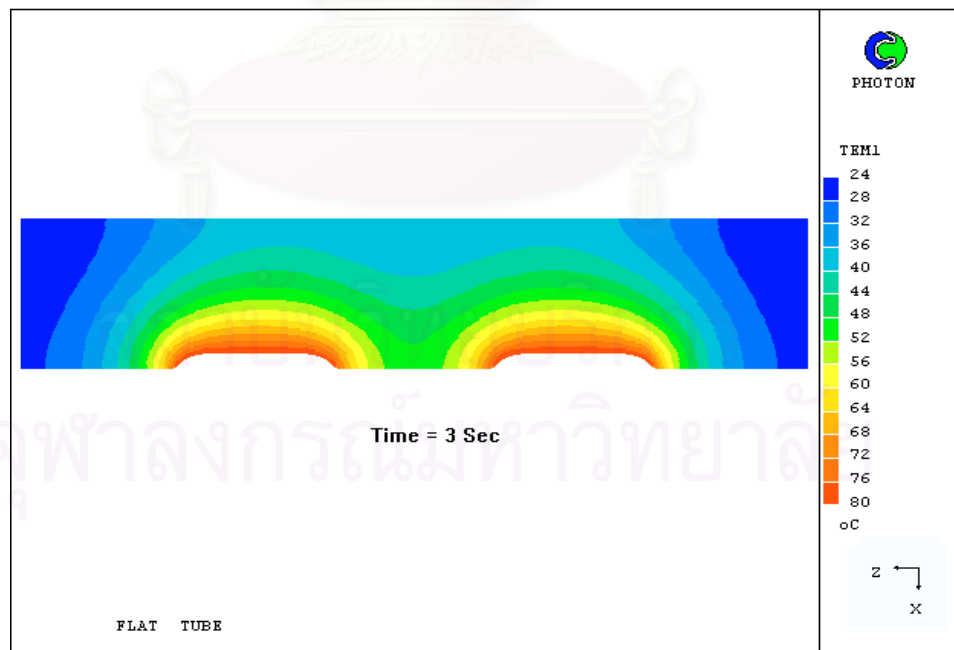


รูปที่ 6.27 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ ที่เวลา 9 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร

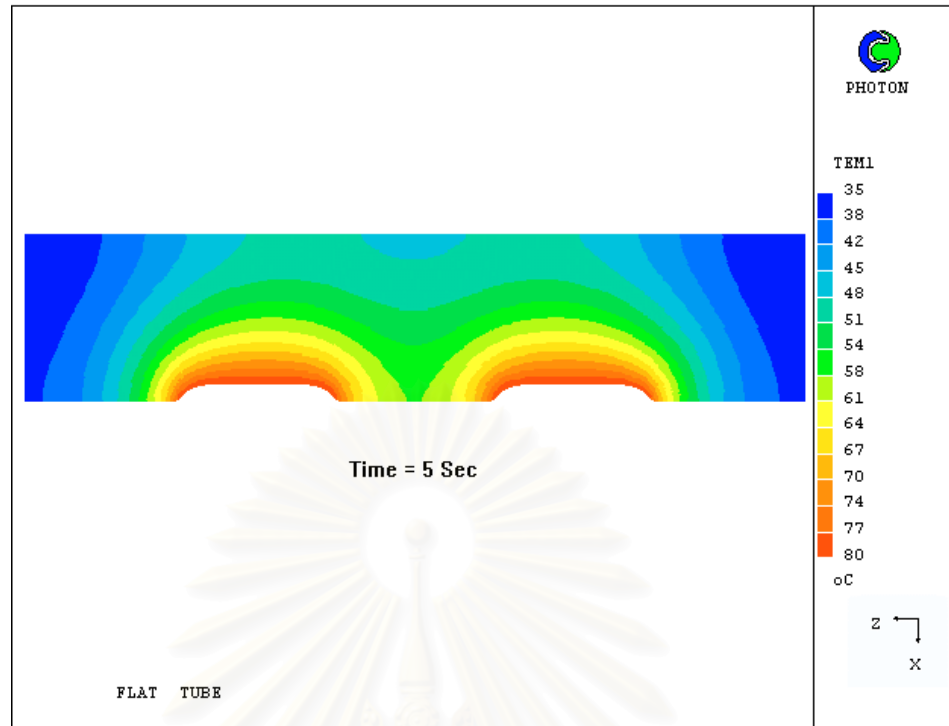
6.2.1.1.2 ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



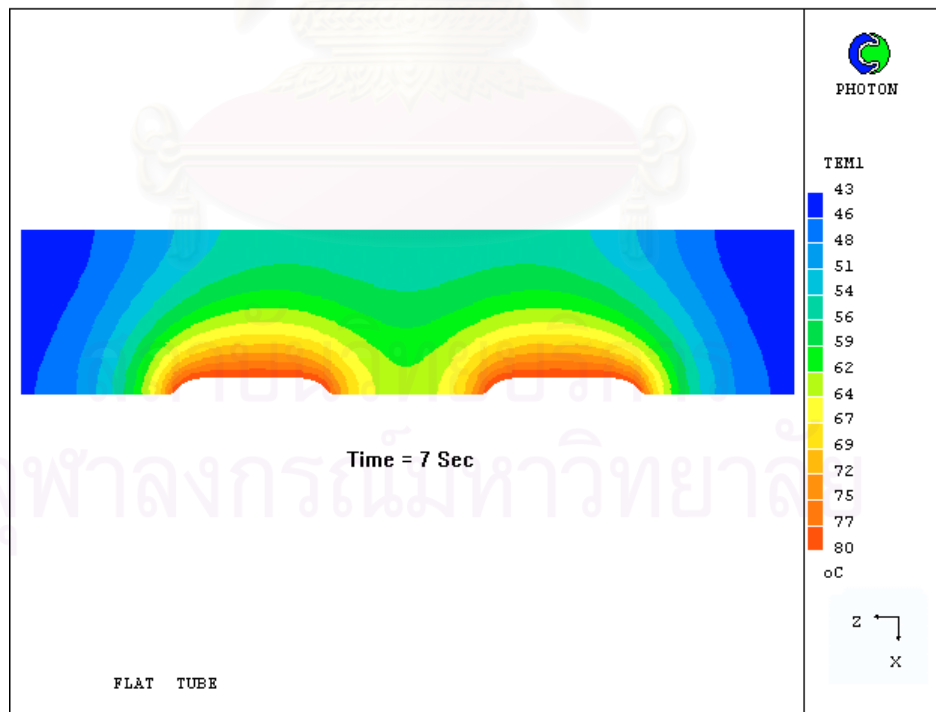
รูปที่ 6.28 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 1 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



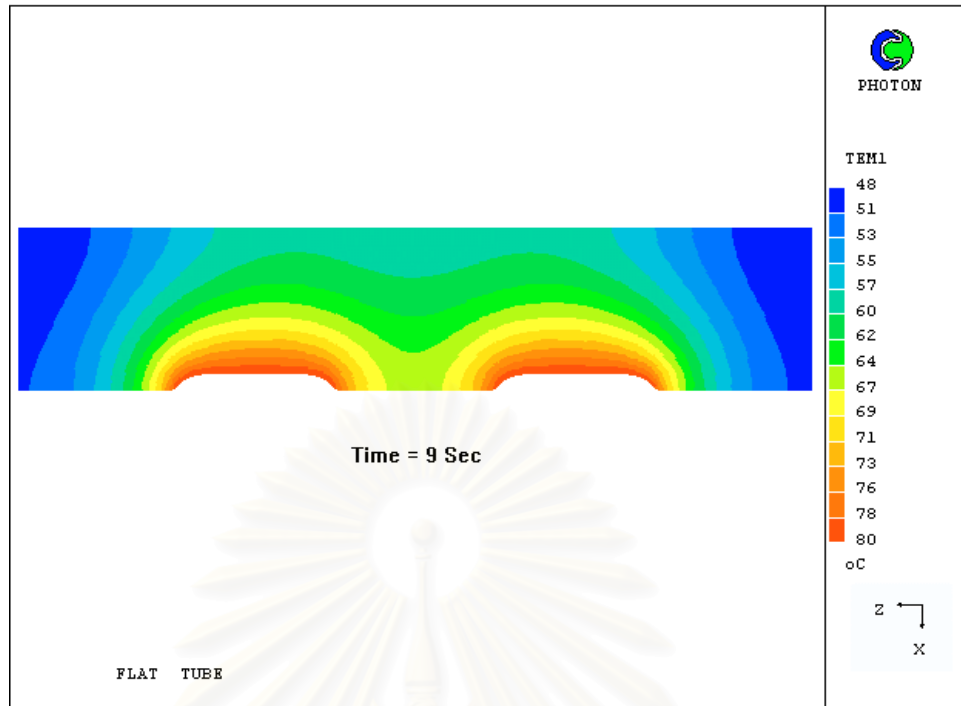
รูปที่ 6.29 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 3 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



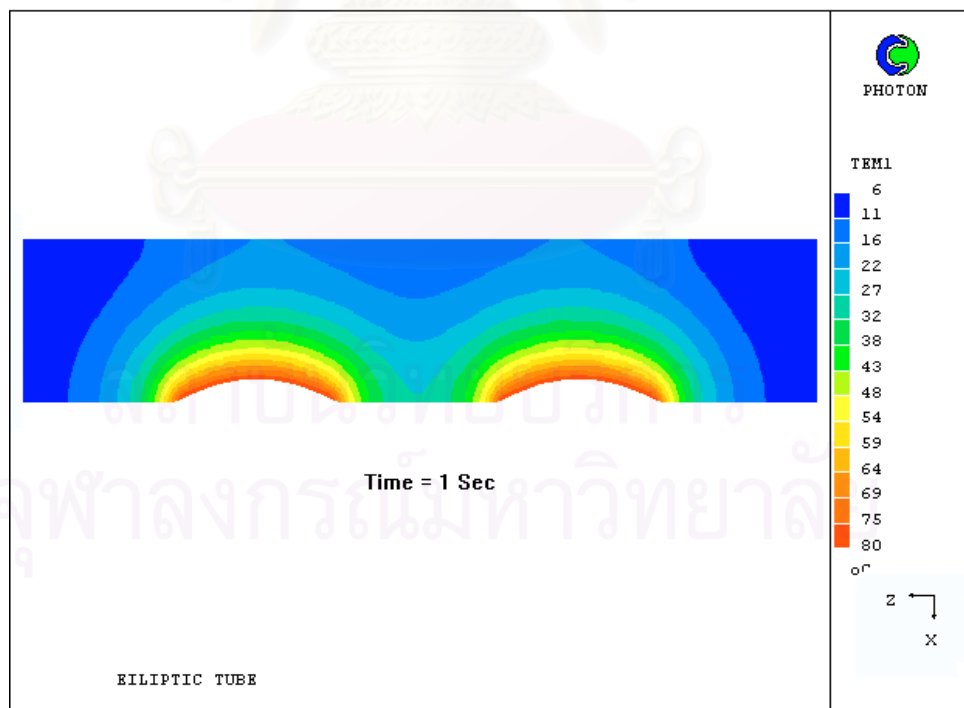
รูปที่ 6.30 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ ที่เวลา 5 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



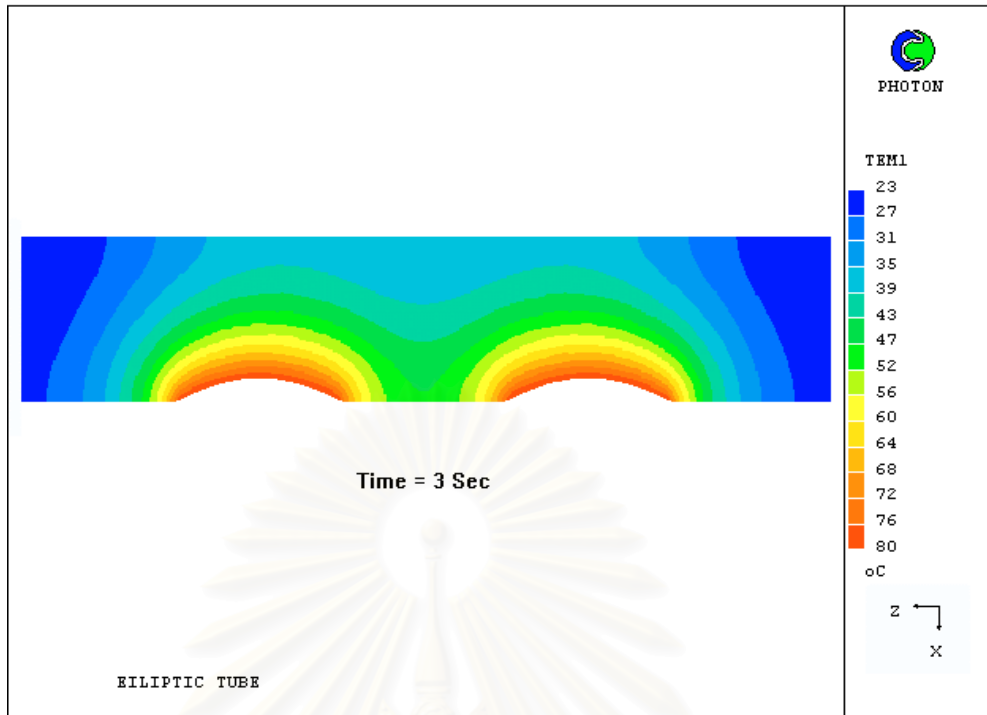
รูปที่ 6.31 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ ที่เวลา 7 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



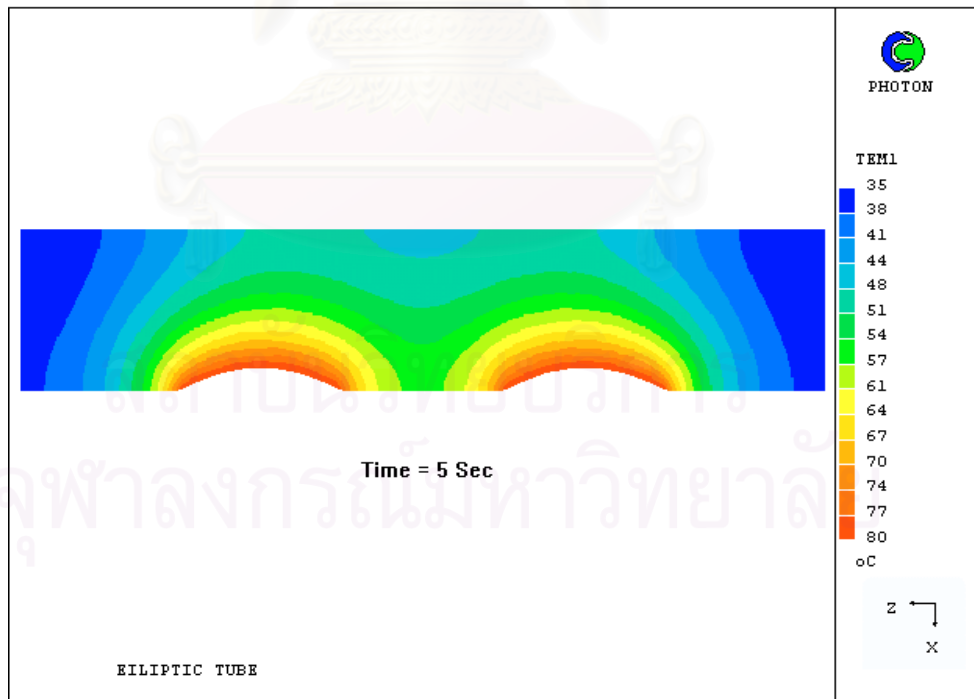
รูปที่ 6.32 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 9 วินาทีของท่อรูปทรงแบน ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



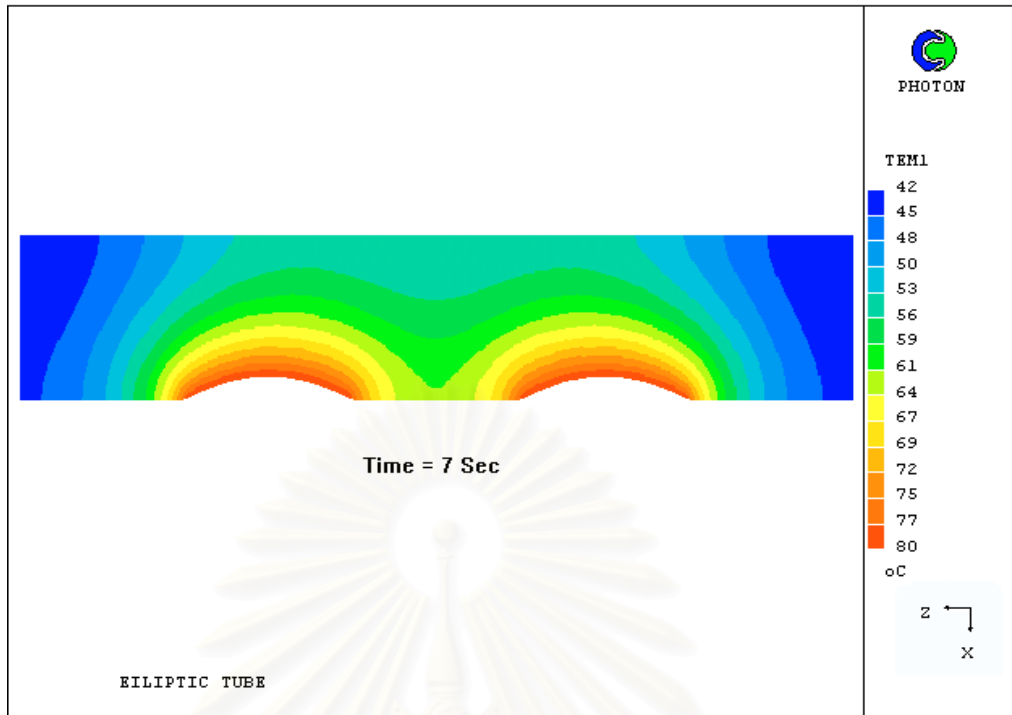
รูปที่ 6.33 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 1 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



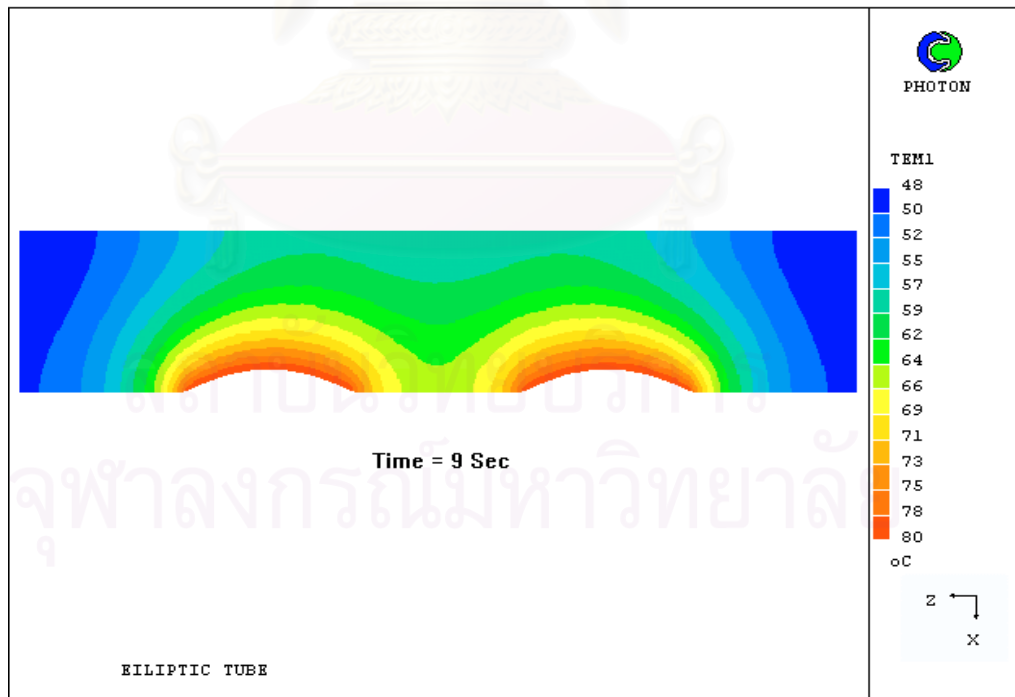
รูปที่ 6.34 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 3 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



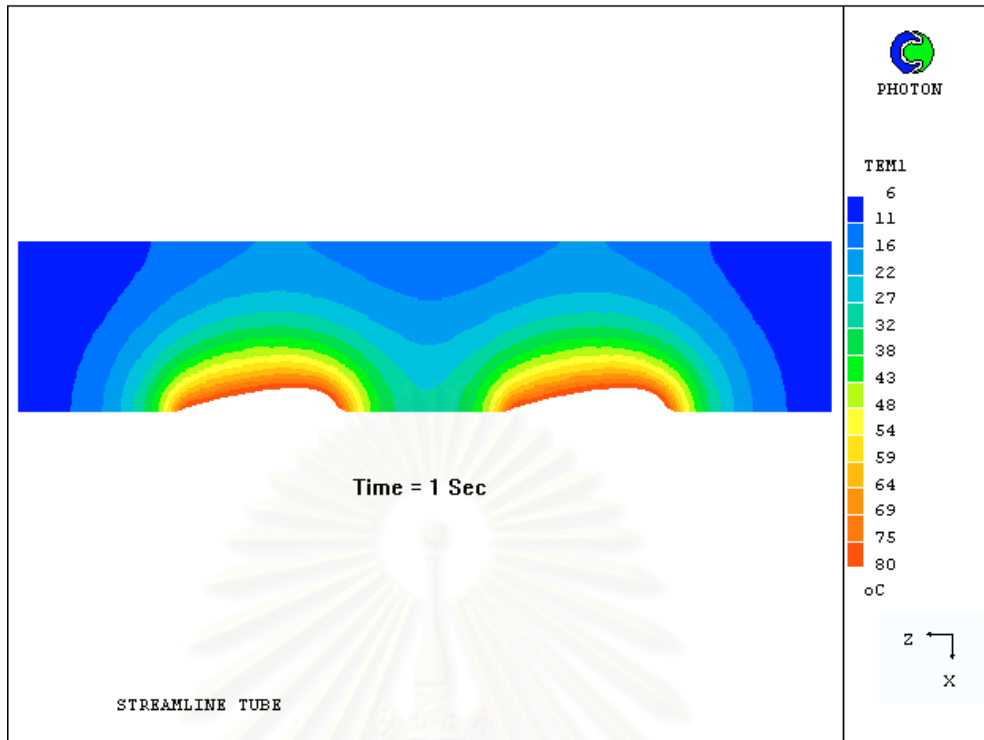
รูปที่ 6.35 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 5 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



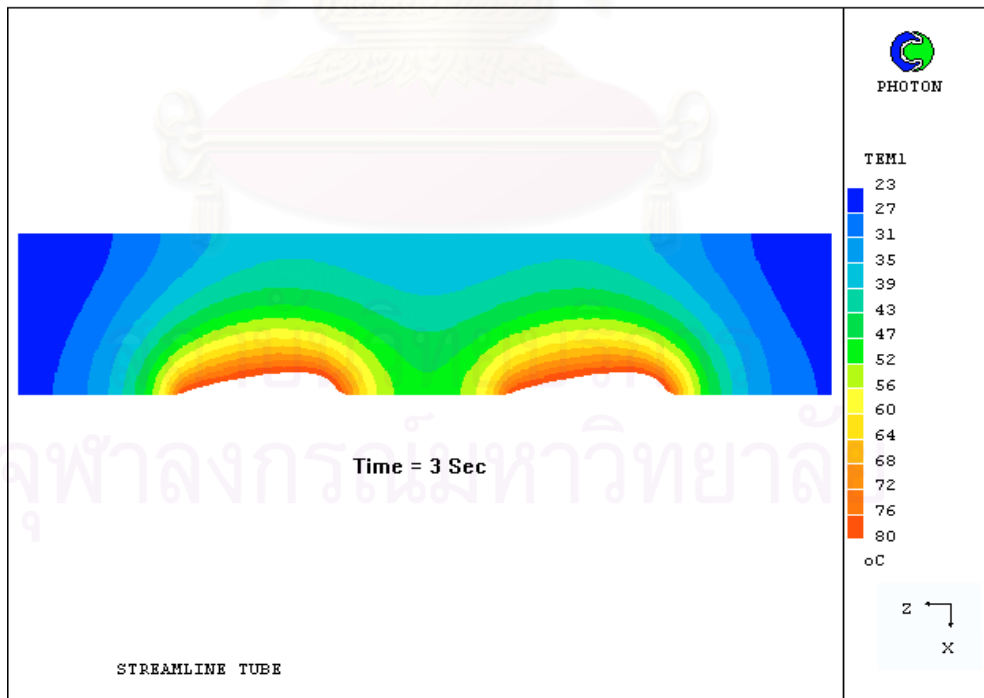
รูปที่ 6.36 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 7 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



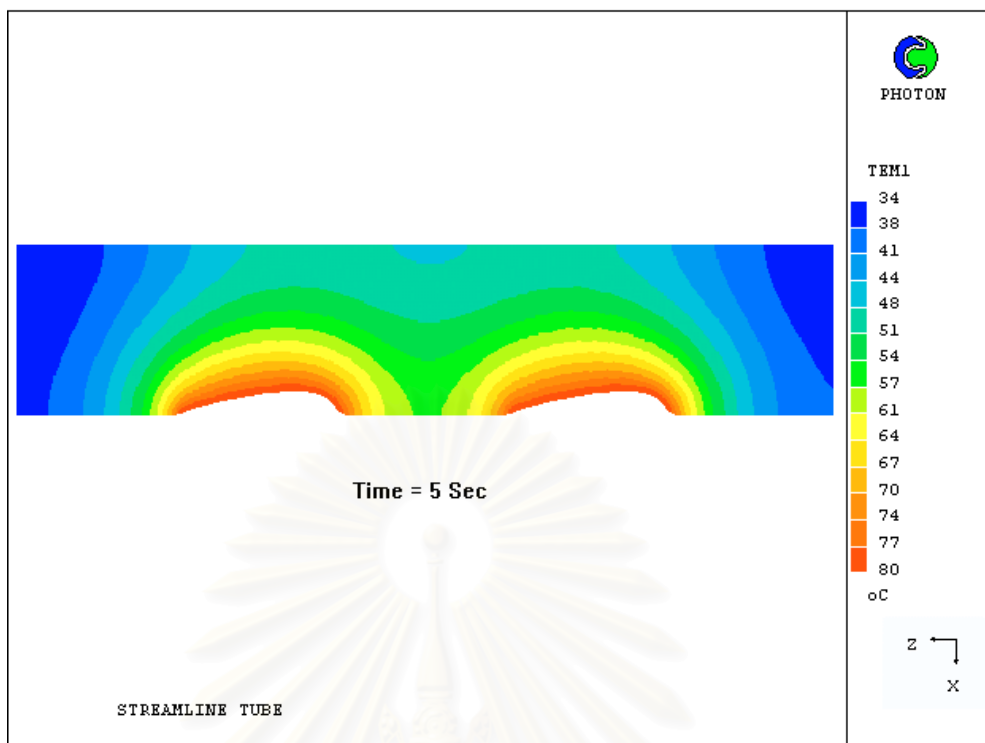
รูปที่ 6.37 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกริบแผ่น ที่เวลา 9 วินาทีของท่อรูปทรงวงรี ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



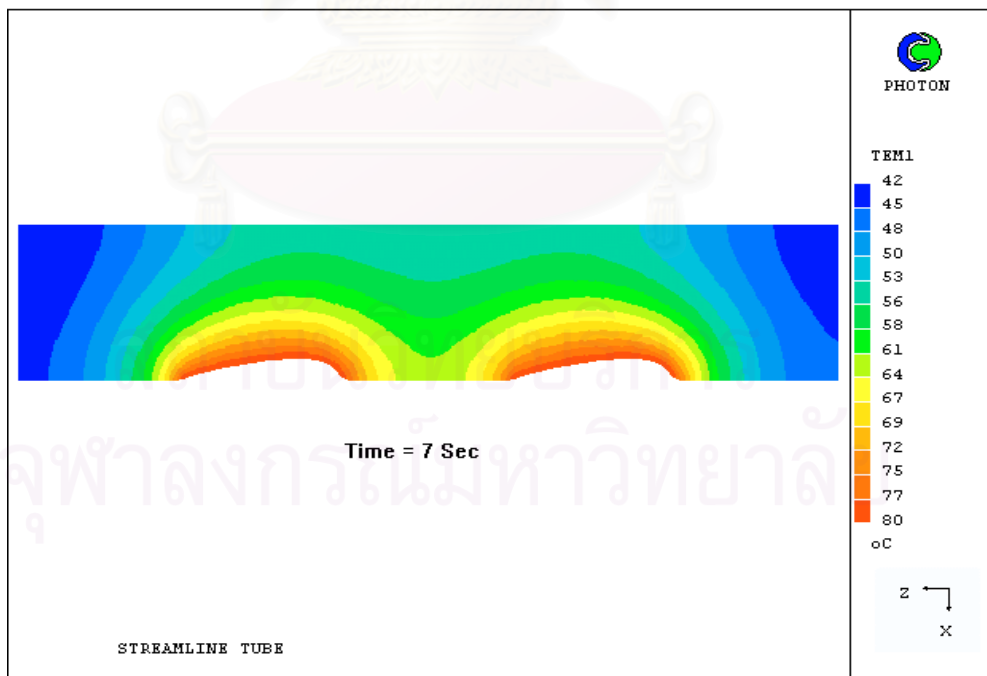
รูปที่ 6.38 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนั่น ที่เวลา 1 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



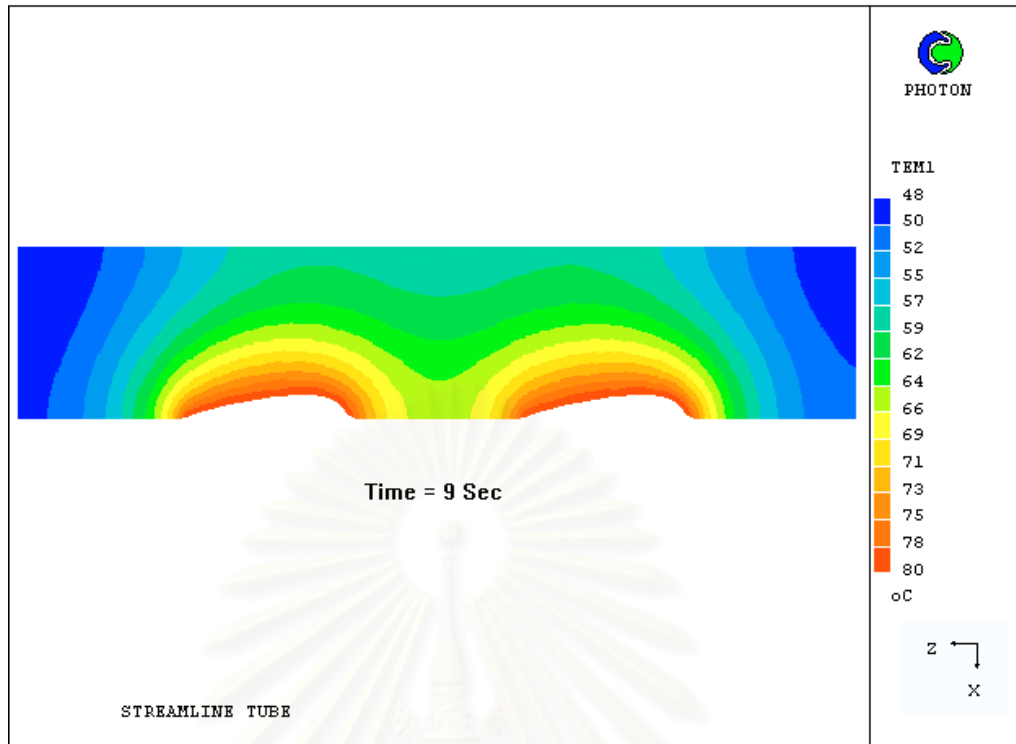
รูปที่ 6.39 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนั่น ที่เวลา 3 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



รูปที่ 6.40 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนแผ่น ที่เวลา 5 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



รูปที่ 6.41 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนแผ่น ที่เวลา 7 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



รูปที่ 6.42 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนแผ่น ที่เวลา 9 วินาทีของท่อรูปทรงหยดน้ำ ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

จากรูปที่ 6.13-6.42 ข้างต้นได้แสดงลักษณะของการกระจายอุณหภูมิของครีบนแผ่นที่เวลาต่างกัน โดยที่ได้แบ่งการแสดงผลตามลักษณะท่อแต่ละรูปแบบ และ ตามระยะห่างระหว่างท่อ ซึ่งพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบนแผ่นจะขยายตัวออกทั้งทางด้านบน และทางด้านข้างของผนังท่อ ในลักษณะเป็นเส้นโค้งตามแนวผนังของท่อ และเมื่อเวลามากขึ้นอุณหภูมิจะขยายตัวออกไปเรื่อย ๆ จนทำให้แผ่นครีบนอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น จนมีค่าเท่ากับแหล่งความร้อนซึ่งเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส หรือเรียกว่าอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นเหมือนกันทั้ง 3 รูปแบบของท่อที่นำมาศึกษา เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในครีบนแผ่น ซึ่งมีท่อรูปแบบต่างๆ เป็นแหล่งความร้อนและที่ระยะห่างระหว่างท่อที่เท่ากันนั้นพบว่ามีค่าของอุณหภูมิที่แตกต่างกันเล็กน้อยเพียง 0.5 ถึง 1 องศาเซลเซียส แต่เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในครีบนแผ่น ซึ่งมีท่อเป็นแหล่งความร้อน โดยที่รูปแบบของท่อที่แตกต่างกัน กับระยะห่างระหว่างท่อที่แตกต่างกัน พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบนแผ่นเมื่อระยะห่างระหว่างท่อที่แตกต่างกัน จะทำให้ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบนแผ่นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดมากขึ้น กล่าวคือ กรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ทำให้พื้นที่ของครีบนแผ่นของบริเวณระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองมีน้อย เป็นสาเหตุทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบนแผ่น ณ บริเวณนี้ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนมากนัก ซึ่งจะพบว่าแค่เวลาผ่านไปเพียง 9 วินาที

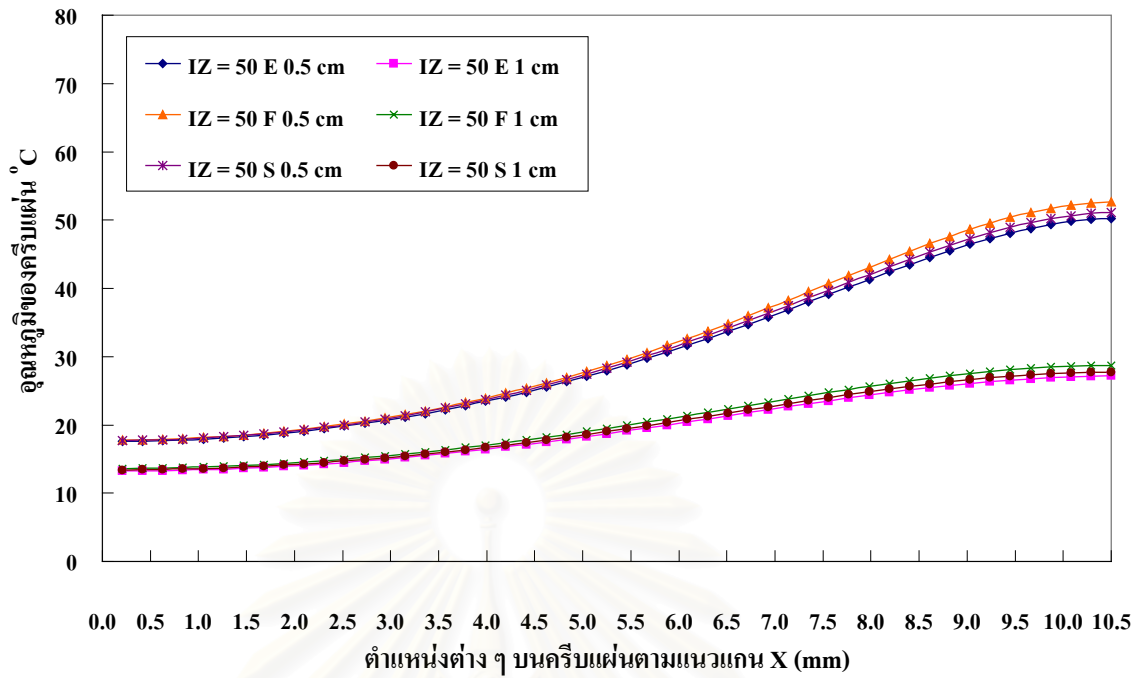
ค่าของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ ณ บริเวณกึ่งกลางระหว่างท่อทั้งสอง จะมีค่าเท่ากับ 75-77 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นว่าค่าของอุณหภูมิที่ปรากฏมีความใกล้เคียงกับแหล่งความร้อน แต่จะต่างกับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ทำให้พื้นที่ของครีบบัฟเฟอร์ของบริเวณระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองมีเพิ่มมากขึ้นกว่ากรณีแรก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบบัฟเฟอร์ ณ บริเวณนี้ สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนมากขึ้นยิ่งขึ้นกว่ากรณีแรก กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไป 9 วินาที พบว่าค่าของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ ณ บริเวณกึ่งกลางของท่อทั้งสองนั้นมีค่าประมาณ 64-66 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าของอุณหภูมิที่ปรากฏนั้นมีค่าที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับกรณีของระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ส่วนเวลาที่ทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิที่เท่ากับกรณีของระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร คือต้องใช้เวลาราว 30 วินาที

เมื่อพิจารณาถึงอัตราการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ จะพบว่าค่าของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์จากวินาทีที่ 1 ถึง วินาทีที่ 9 จะมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในครีบบัฟเฟอร์ ที่แตกต่างกันดังนี้ คือ ช่วงวินาทีที่ 1 ถึง วินาทีที่ 3 ค่าของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์จะเพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียส, ช่วงวินาทีที่ 3 ถึง วินาทีที่ 5 ค่าของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์จะเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส, ช่วงวินาทีที่ 5 ถึง วินาทีที่ 7 ค่าของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์จะเพิ่มขึ้น 6 องศาเซลเซียส และ ช่วงวินาทีที่ 7 ถึง วินาทีที่ 9 ค่าของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์จะเพิ่มขึ้น 4 องศาเซลเซียส จากอัตราของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กล่าวข้างต้น จะเห็นว่าอัตราการกระจายตัวของอุณหภูมิมียุทธศาสตร์ในช่วงแรกของการกระจายตัวเท่านั้น และจะมีค่าที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

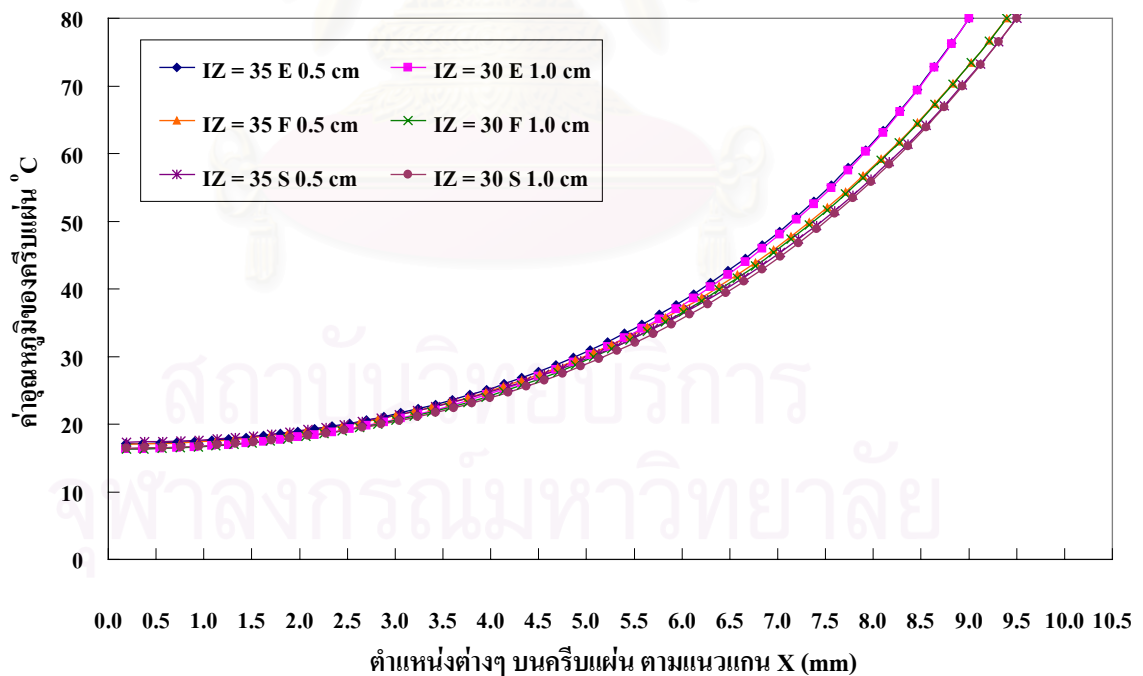
6.2.1.2 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ของแผ่นครีบบัฟเฟอร์ที่เวลาเดียวกัน

การพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบบัฟเฟอร์ที่เวลาเดียวกันของโมเดลที่มีต่อรูปแบบต่างๆที่เป็นแหล่งความร้อน ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน รวมทั้งพิจารณาในส่วนของระยะห่างระหว่างท่อด้วย โดยตำแหน่งที่นำมาพิจารณามีดังนี้คือ บริเวณกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ และ บริเวณกึ่งกลางท่อโดยพิจารณาตามแนวความกว้างของครีบบัฟเฟอร์

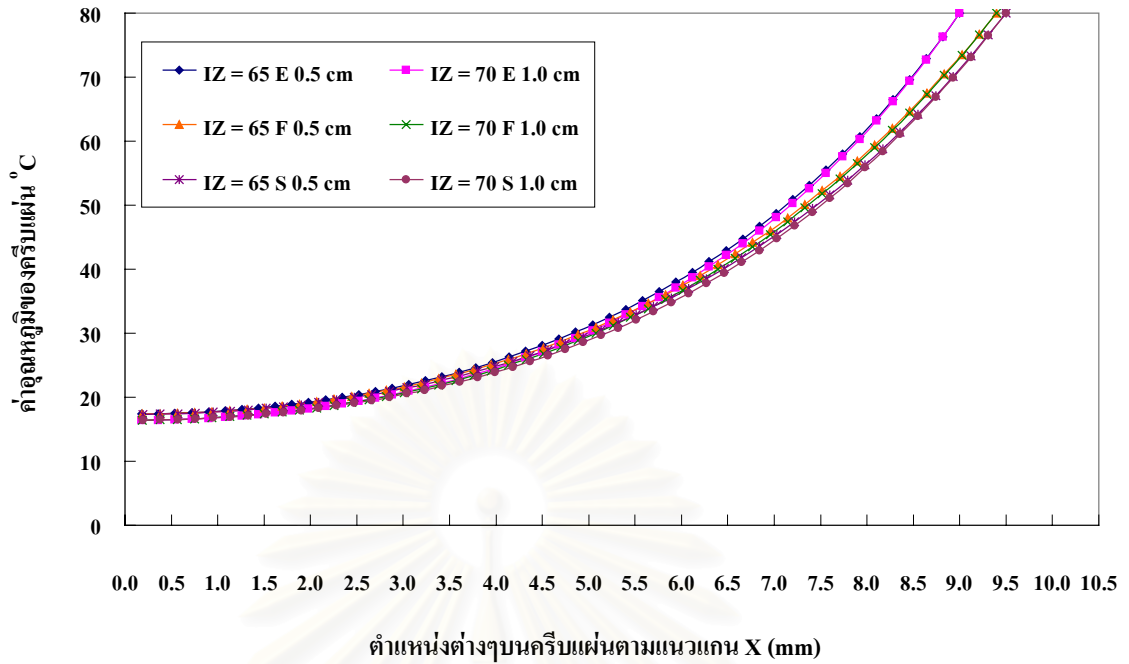
1. รูปที่ 6.43 – 6.45 สำหรับที่เวลาเท่ากับ 1 วินาที
2. รูปที่ 6.46 – 6.48 สำหรับที่เวลาเท่ากับ 3 วินาที
3. รูปที่ 6.49 – 6.51 สำหรับที่เวลาเท่ากับ 5 วินาที
4. รูปที่ 6.52 – 6.54 สำหรับที่เวลาเท่ากับ 7 วินาที
5. รูปที่ 6.55 – 6.57 สำหรับที่เวลาเท่ากับ 9 วินาที



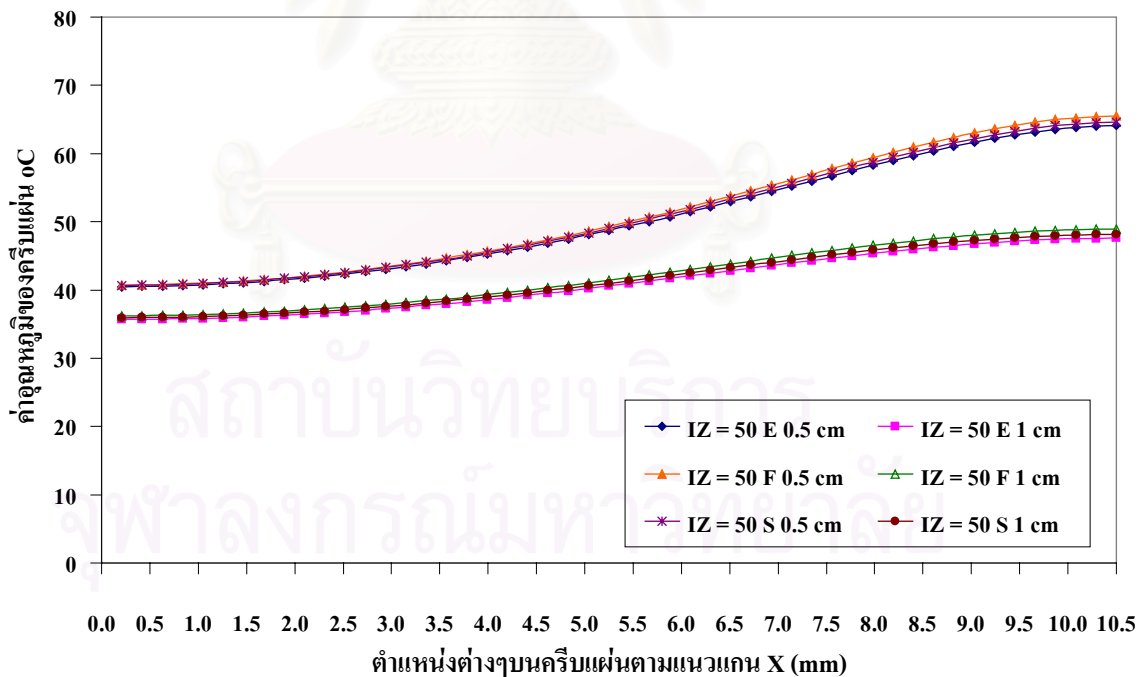
รูปที่ 6.43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนั่นที่แนวกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ ณ เวลาเท่ากับ 1 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



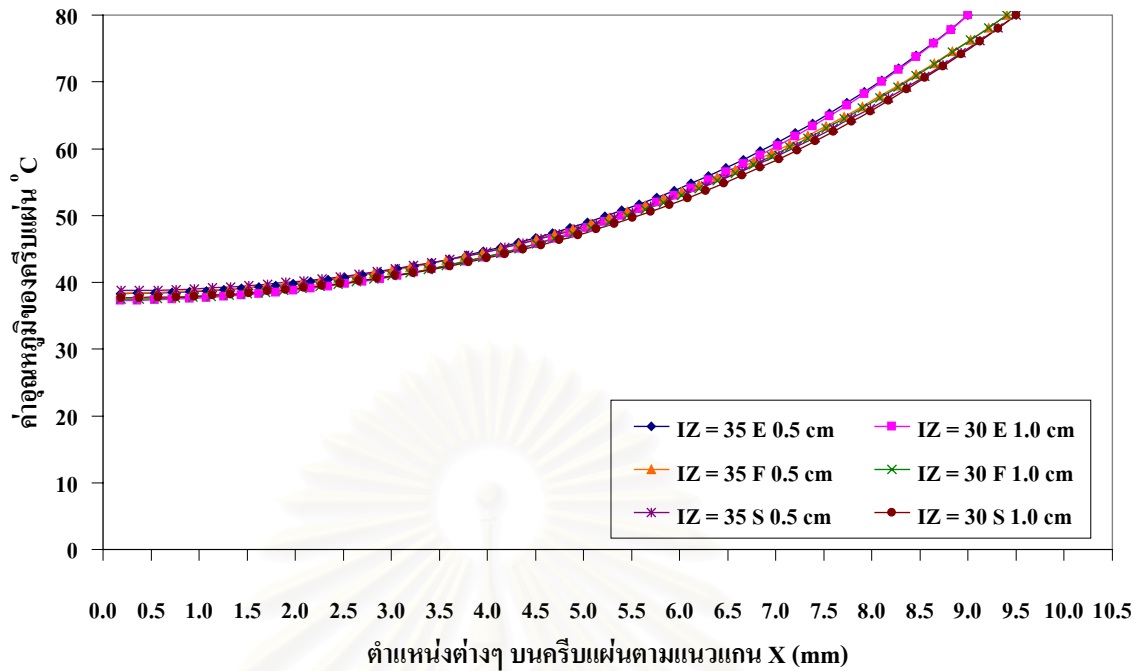
รูปที่ 6.44 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนั่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่หนึ่ง ณ เวลาเท่ากับ 1 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



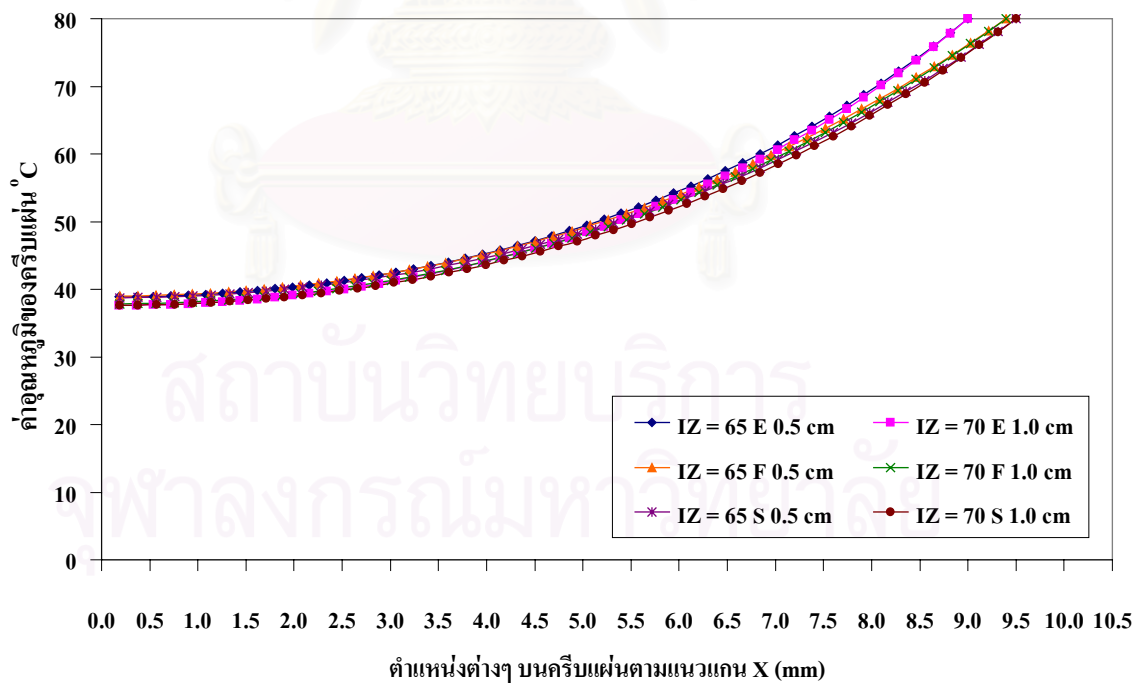
รูปที่ 6.45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่สอง ณ เวลาเท่ากับ 1 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



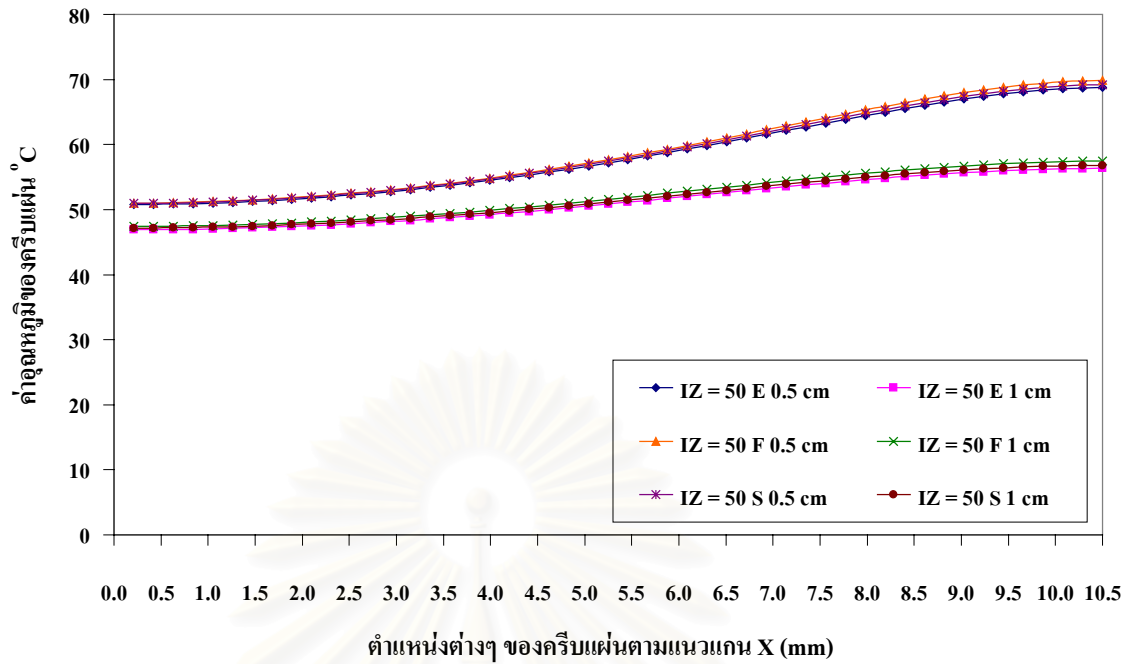
รูปที่ 6.46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนที่ แนวกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ ณ เวลาเท่ากับ 3 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



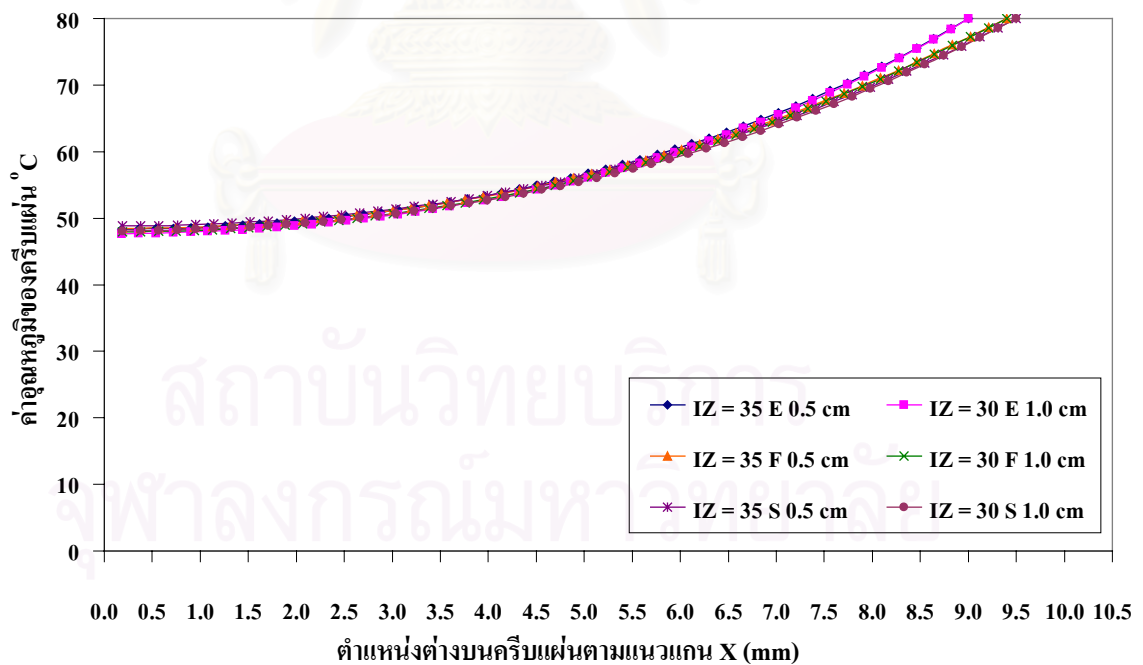
รูปที่ 6.47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนั่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่หนึ่ง ณ เวลาเท่ากับ 3 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



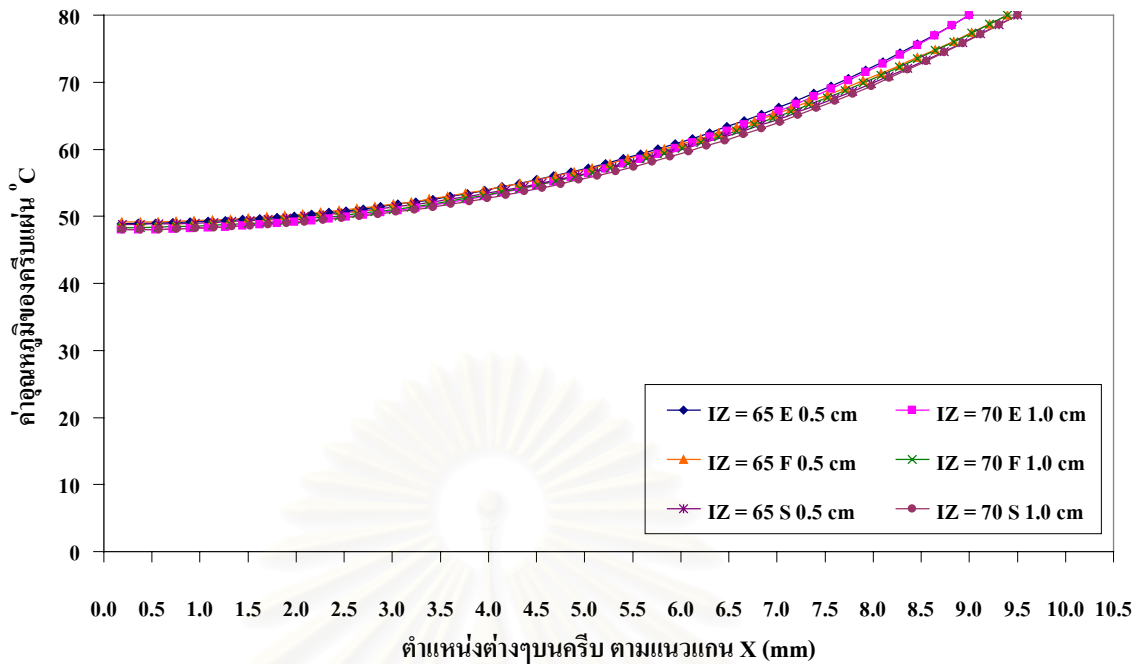
รูปที่ 6.48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนั่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่สอง ณ เวลาเท่ากับ 3 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



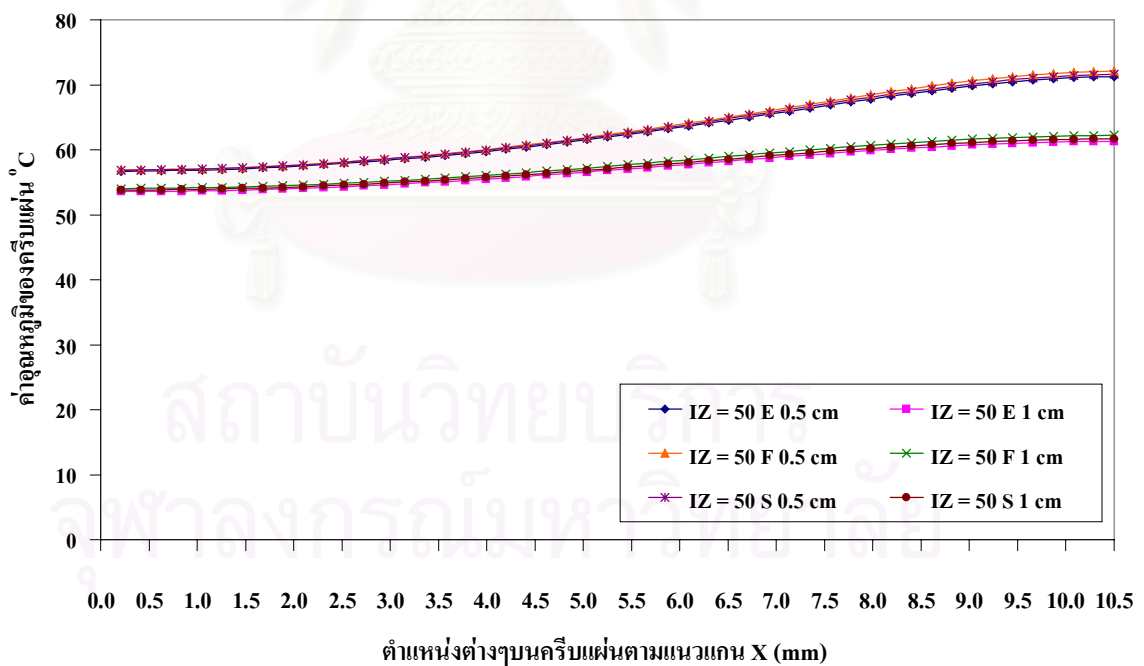
รูปที่ 6.49 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนแผ่นที่ แนวกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ ณ เวลาเท่ากับ 5 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



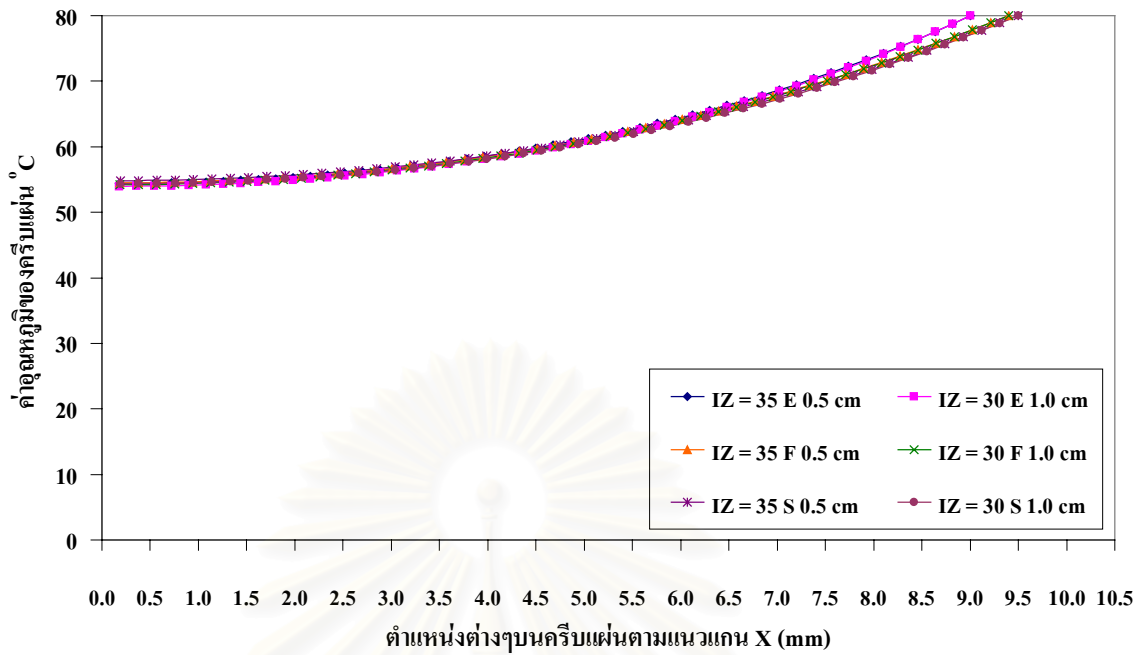
รูปที่ 6.50 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนแผ่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่หนึ่ง ณ เวลาเท่ากับ 5 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



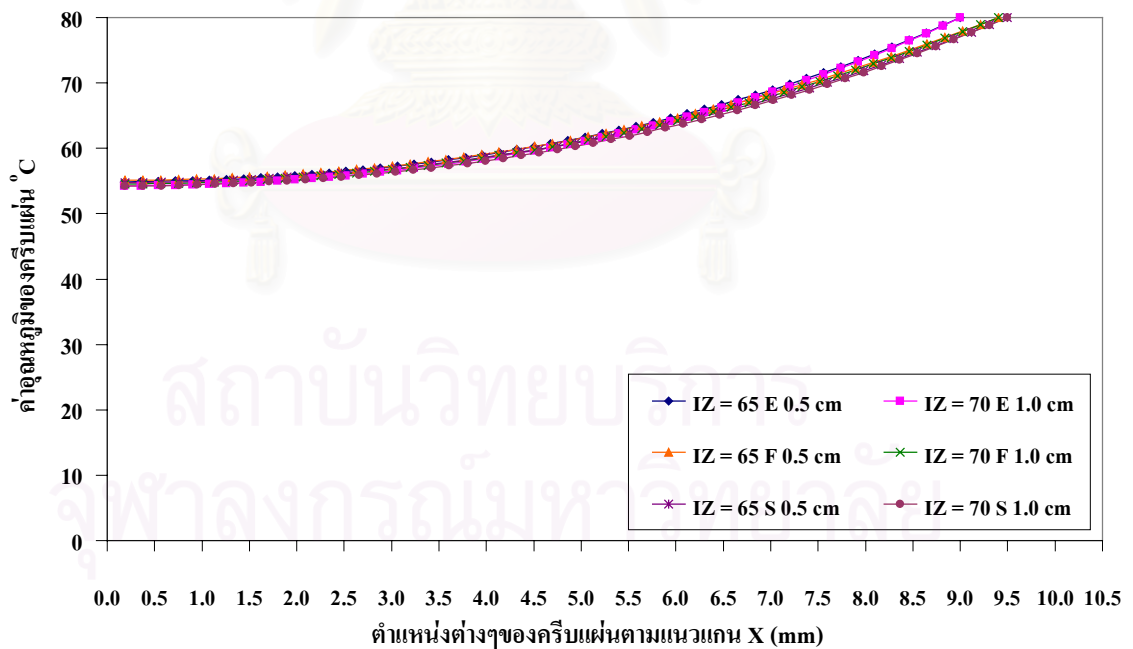
รูปที่ 6.51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนแผ่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่สอง ณ เวลาเท่ากับ 5 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



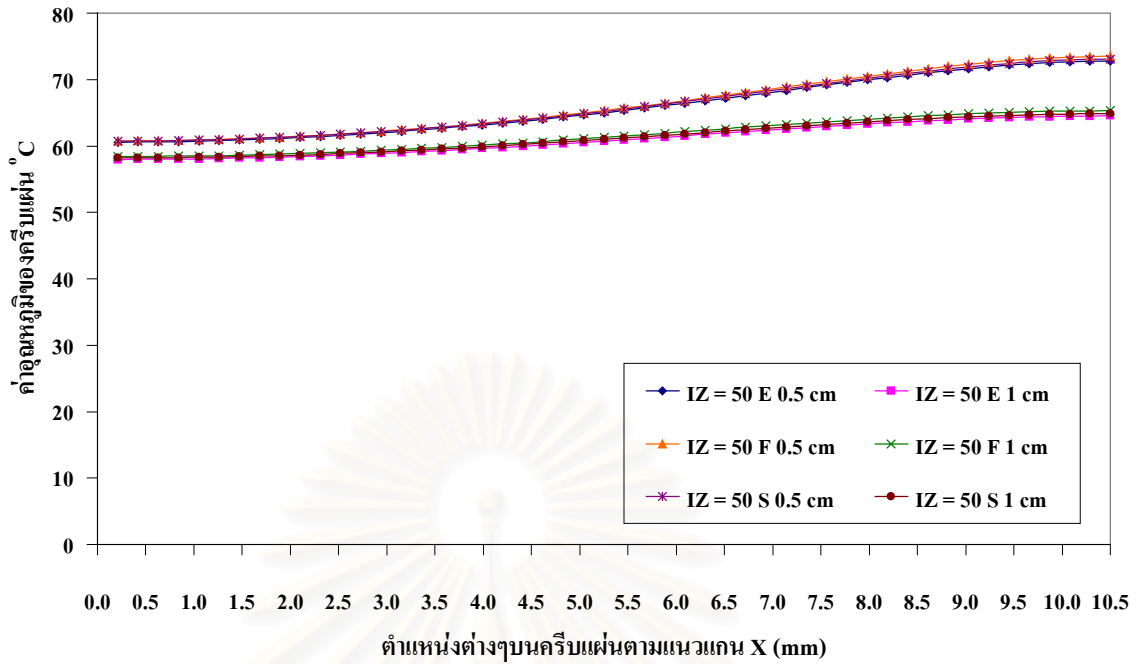
รูปที่ 6.52 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนแผ่นที่ แนวกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ ณ เวลาเท่ากับ 7 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



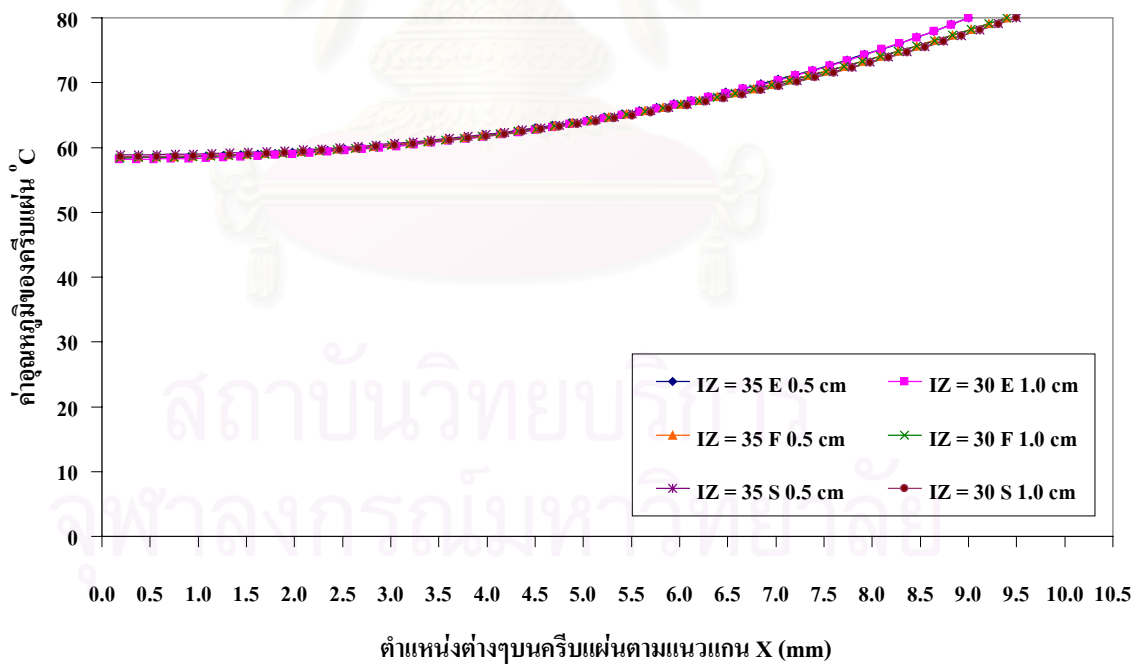
รูปที่ 6.53 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบบั่แผ่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่หนึ่ง ณ เวลาเท่ากับ 7 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



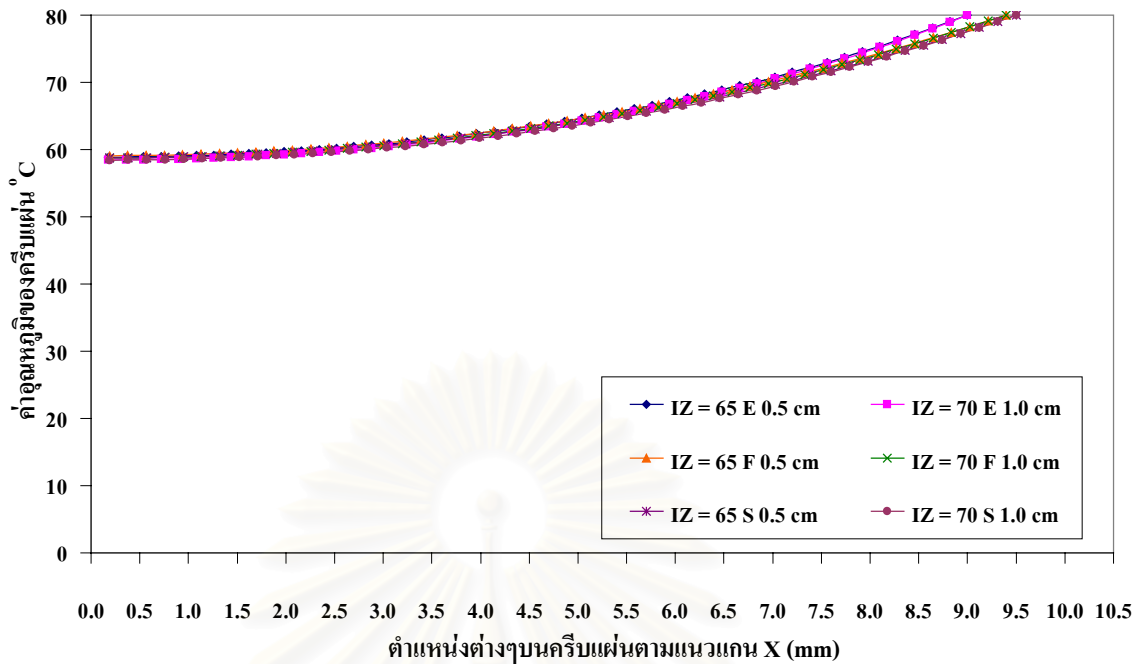
รูปที่ 6.54 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบบั่แผ่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่สอง ณ เวลาเท่ากับ 7 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



รูปที่ 6.55 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนั่นที่แนวกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ ณ เวลาเท่ากับ 9 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



รูปที่ 6.56 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนั่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่หนึ่ง ณ เวลาเท่ากับ 9 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร



รูปที่ 6.57 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิครีบนแผ่นที่ บริเวณกึ่งกลางแนวท่อที่สอง ณ เวลาเท่ากับ 9 วินาทีของท่อสามรูปแบบ E = Elliptic Tube, F = Flat Tube, S = Streamline Tube ที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร

จากรูปที่ 6.43 -6.57 ได้แสดงค่าของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งตามแนวความกว้างของครีบนแผ่นด้วยตำแหน่งตามแนวความยาวของครีบนแผ่น 3 ตำแหน่ง คือบริเวณกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ (IZ = 50), บริเวณกึ่งกลางท่ออันที่หนึ่ง (IZ = 25 และ IZ = 30 สำหรับ 0.5 cm และ 1.0 cm ตามลำดับ) และท่ออันที่สอง (IZ = 65 และ IZ = 70 สำหรับ 0.5 cm และ 1.0 cm ตามลำดับ) โดยจะเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันของทุกกรณี que ศึกษา จะพบว่าค่าของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวความกว้างของครีบนแผ่น มีค่าที่แตกต่างกันเมื่อรูปแบบของท่อที่เป็นแหล่งความร้อนและระยะห่างระหว่างท่อที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบที่ได้มีดังนี้ ค่าอุณหภูมิภายในครีบนแผ่น ณ บริเวณกึ่งกลางระหว่างท่อทั้งสองของโมเดลที่มีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร จะมีค่าที่สูงกว่าของโมเดลที่มีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ทุก ๆ ตำแหน่งของครีบนแผ่น กล่าวคือ ณ เวลาที่ 1 วินาที ค่าของอุณหภูมิจะแตกต่างกันประมาณ 4 - 23 องศาเซลเซียส และผลต่างของอุณหภูมิจะมีค่าน้อยลงเมื่อเวลามากขึ้น ดังกราฟ ณ เวลาที่ 9 วินาที ผลต่างของอุณหภูมิจะลดลงเหลือเพียง 2 - 8 องศาเซลเซียสเท่านั้น

ผลการเปรียบเทียบเมื่อรูปทรงของท่อแตกต่างกัน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อพบว่าค่าของอุณหภูมิภายในครีบนแผ่น ณ เวลาผ่านไป 1 วินาที มีค่าที่แตกต่างกันโดยเฉลี่ยประมาณ 0.595 ถึง 1.043 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีที่มีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และมีค่าที่แตกต่างกัน

โดยเฉลี่ยประมาณ 0.352 ถึง 0.882 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร และมีค่าลดลงเมื่อเวลามากขึ้น ดังกราฟ ณ เวลาผ่านไป 9 วินาที ผลต่างของอุณหภูมิมีค่าลดลงจนเหลือค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 0.139 ถึง 0.384 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และมีค่าลดลงจนเหลือค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 0.268 ถึง 0.582 สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร โดยโมเดลที่มีท่อรูปทรงแบนเป็นแหล่งความร้อน มีผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ ณ บริเวณกึ่งกลางระหว่างท่อทั้งสองที่ดีที่สุด และโมเดลที่มีท่อรูปทรงวงรีเป็นแหล่งความร้อน มีผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ ณ บริเวณกึ่งกลางระหว่างท่อทั้งสองได้น้อยที่สุด ทั้งสองกรณีของระยะห่างระหว่างท่อที่ศึกษา

ส่วนผลการเปรียบเทียบ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางท่อของท่อทั้งสองพบว่า ณ เวลาเดียวกัน ค่าของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน X ของแต่ละกรณีศึกษา จะมีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ของกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตรจะมีค่าที่สูงกว่ากรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร เช่นเดียวกับผลการเปรียบเทียบ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันทั้ง 3 รูปทรงของท่อ โดยมีค่าที่แตกต่างกันประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส แต่เมื่อระยะตามแนวแกน X มีค่ามากกว่า 7.0 มิลลิเมตรจะเริ่มเห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ โดยโมเดลที่มีท่อรูปทรงวงรีเป็นแหล่งความร้อนจะให้ค่าอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์สูงที่สุด และโมเดลที่มีท่อรูปทรงหยดน้ำเป็นแหล่งความร้อนจะให้ค่าอุณหภูมิภายในครีบบัฟเฟอร์ต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อพบว่าค่าอุณหภูมิที่บริเวณท่อทั้งสองมีความแตกต่างกันน้อยกว่า เนื่องจากความแตกต่างกันของระยะห่างระหว่างท่อทั้งสอง มีผลกระทบต่อบริเวณกึ่งกลางท่อน้อยกว่าบริเวณกึ่งกลางระยะห่างระหว่างท่อทั้งสอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2.2 กรณีที่พิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อนพร้อมกัน

สำหรับกรณีนี้เป็นการจำลองปรากฏการณ์การนำความร้อน และการพาความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบแผ่นและท่อไปพร้อมกัน โดยจะแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของลักษณะการไหลของอากาศภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น กับ ส่วนของการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ซึ่งทั้งสองกรณีได้แบ่งการเปรียบเทียบผลที่ได้ตามความเร็วขาเข้าของอากาศ โดยที่ความเร็วที่ใช้เปรียบเทียบกันแต่ละค่านั้น จะแบ่งการเปรียบเทียบออกอีกสองกรณี คือ กรณีระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ กรณีระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

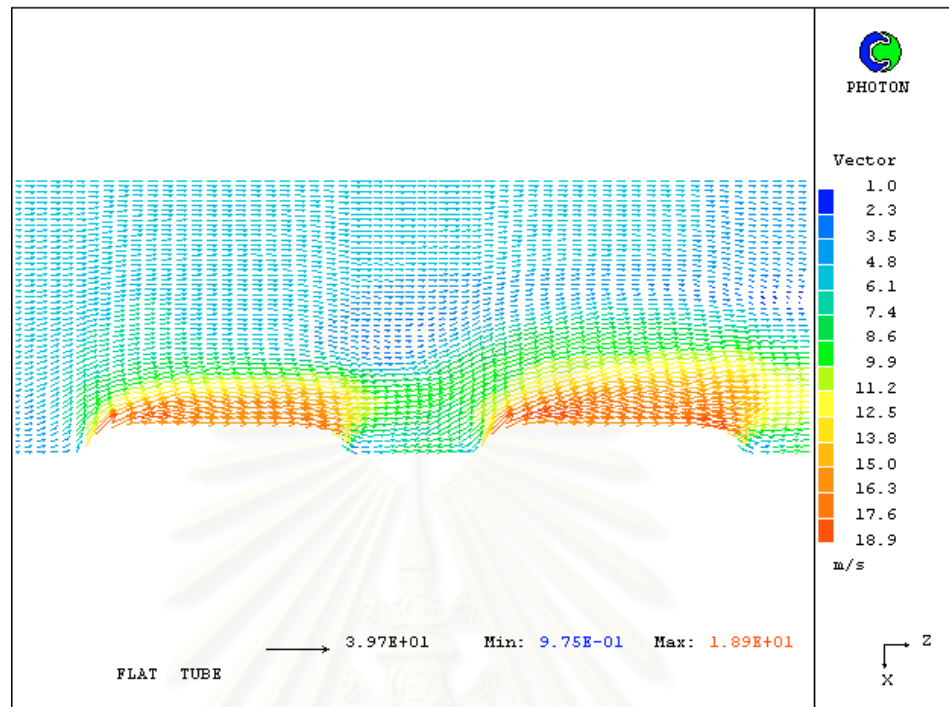
6.2.2.1 การเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ

การเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศ สำหรับการวิจัยนี้จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการแสดงลักษณะการไหลของอากาศเมื่อไหลผ่านผิวท่อที่มีรูปทรงต่าง ๆ กัน เมื่ออากาศมีความเร็วขาเข้าเท่ากับ 15 เมตร/วินาที ดังรูปที่ 6.58 ถึง 6.75 ซึ่งจะแสดงโพรไฟล์ของความเร็วอากาศที่บริเวณใกล้ครีบบแผ่นทั้งสองแผ่น ($IY = 1$ และ $IY = 10$) และโพรไฟล์ของความเร็วอากาศที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ($IY = 5$) โดยรูปที่แสดงนั้น จะแสดงเพียงบริเวณท่อทั้งสองอัน ซึ่งอยู่บริเวณ $IZ = 20$ ถึง $IZ = 80$ สำหรับกรณีระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ $IZ = 15$ ถึง $IZ = 85$ สำหรับกรณี ระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร และส่วนที่สองเป็นแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองแตกต่างกัน โดยที่การเปรียบเทียบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 15 เมตร/วินาที และกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 20 เมตร/วินาที ซึ่งการพิจารณาทั้งหมดจะเหมือนกันทั้งสามรูปทรงของท่อ โดยจุดที่นำมาพิจารณาดังนี้ คือ $IZ = 30, 35, 40, 50, 60, 65, 70$ สำหรับกรณีระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6.76 และ $IZ = 25, 30, 35, 50, 65, 70, 75$ สำหรับกรณีระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6.77 การเปรียบเทียบจะแสดงอยู่ในรูปกราฟระหว่างความเร็วตามทิศการเคลื่อนที่ของอากาศ(แกน Z) กับ ระยะตามแนวแกน X โดยมีบริเวณที่พิจารณาดังนี้ คือ

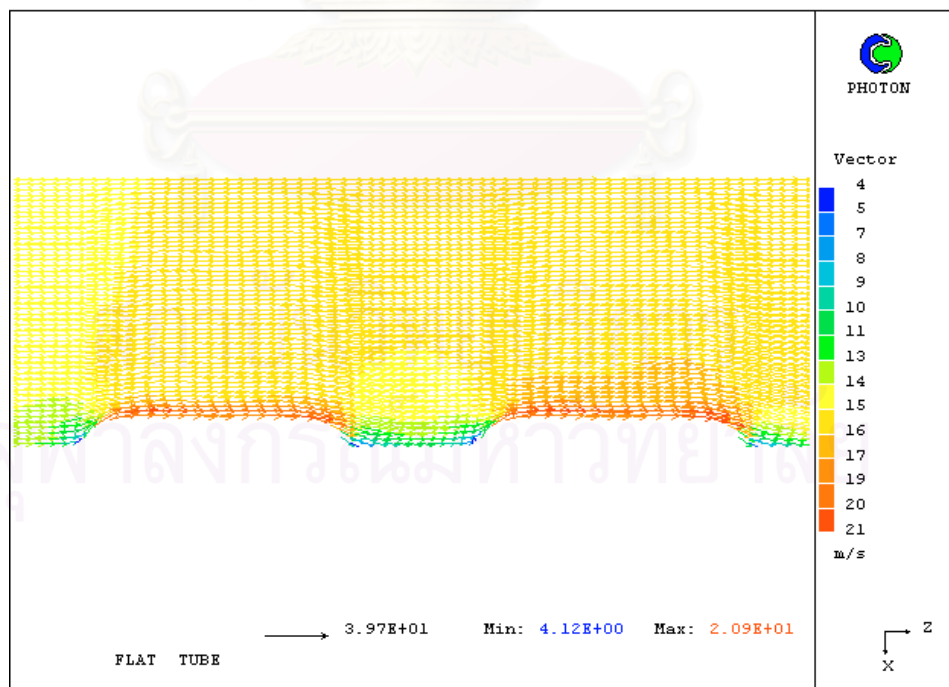
1. บริเวณใกล้ครีบบแผ่นด้าน $IY = 1$
2. บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ($IY = 5$)
3. บริเวณใกล้ครีบบแผ่นด้าน $IY = 10$

โดยที่ทั้ง 3 บริเวณจะแสดงดังรูปที่ 6.78 ถึง 6.98 สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 15 เมตร/วินาทีและรูปที่ 6.99 ถึง 6.119 กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 20 เมตร/วินาที

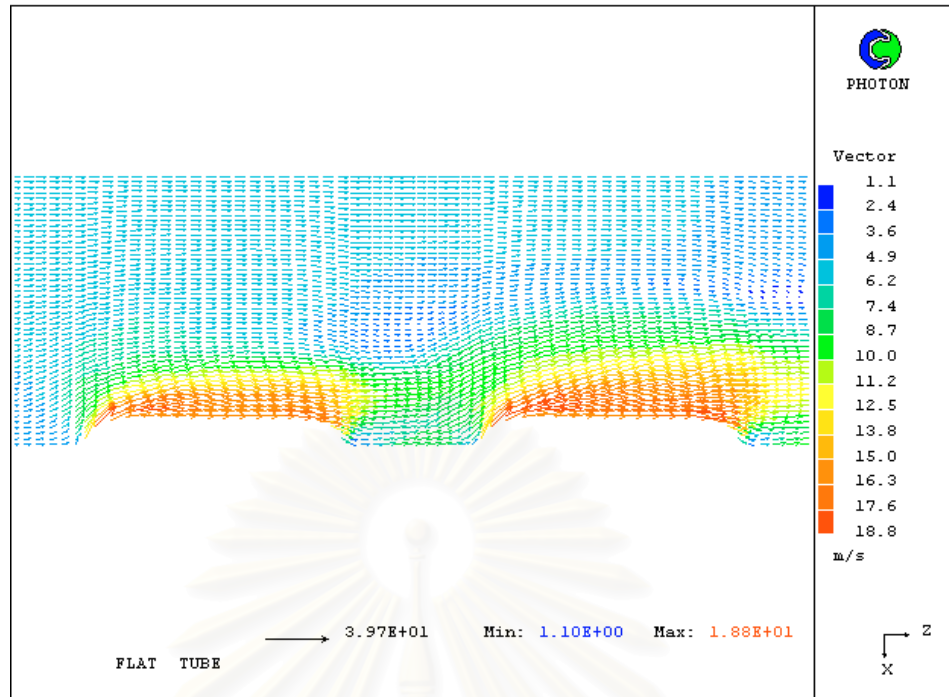
6.2.2.1.1 กรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



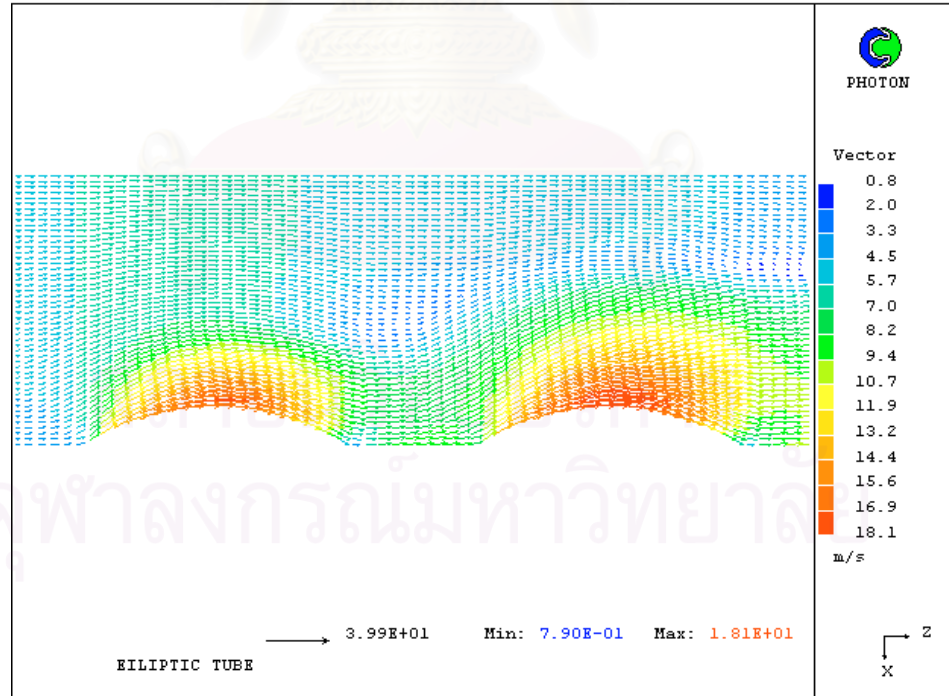
รูปที่ 6.58 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$



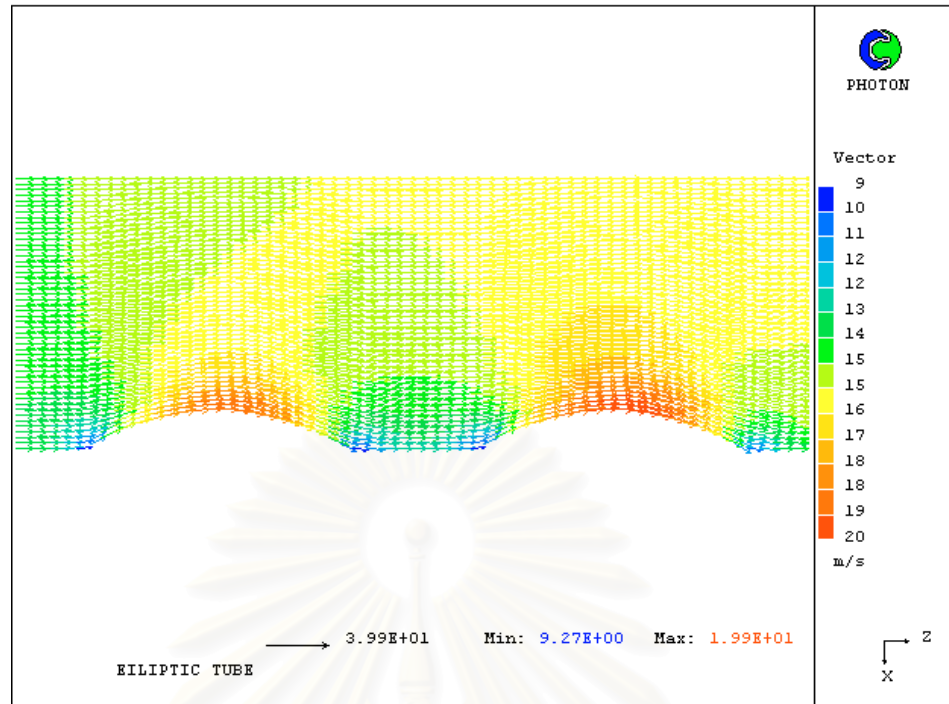
รูปที่ 6.59 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ($IY = 5$)



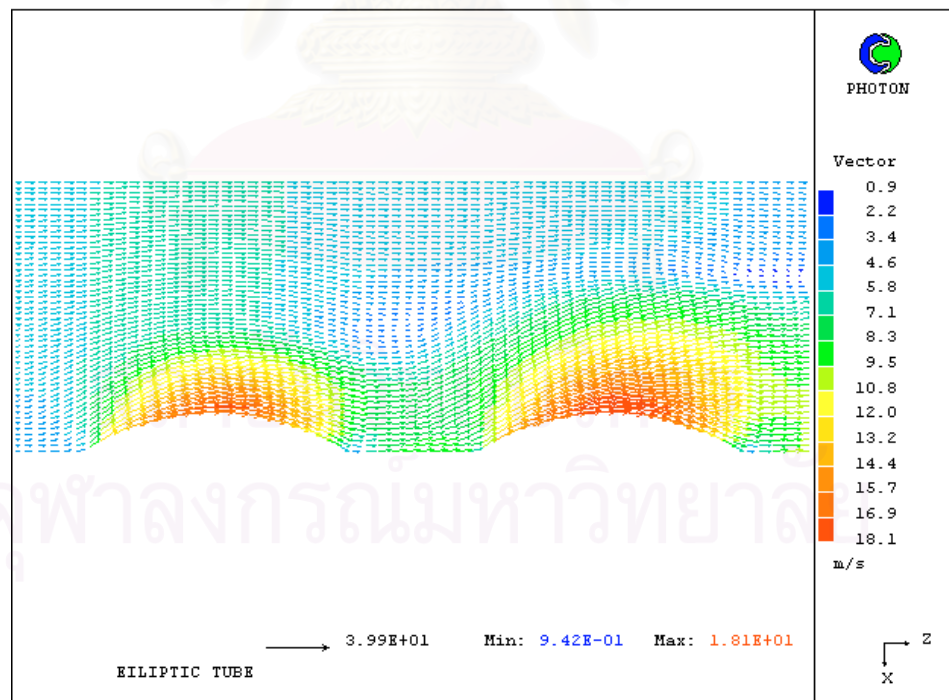
รูปที่ 6.60 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบนัด้าน $IY = 10$



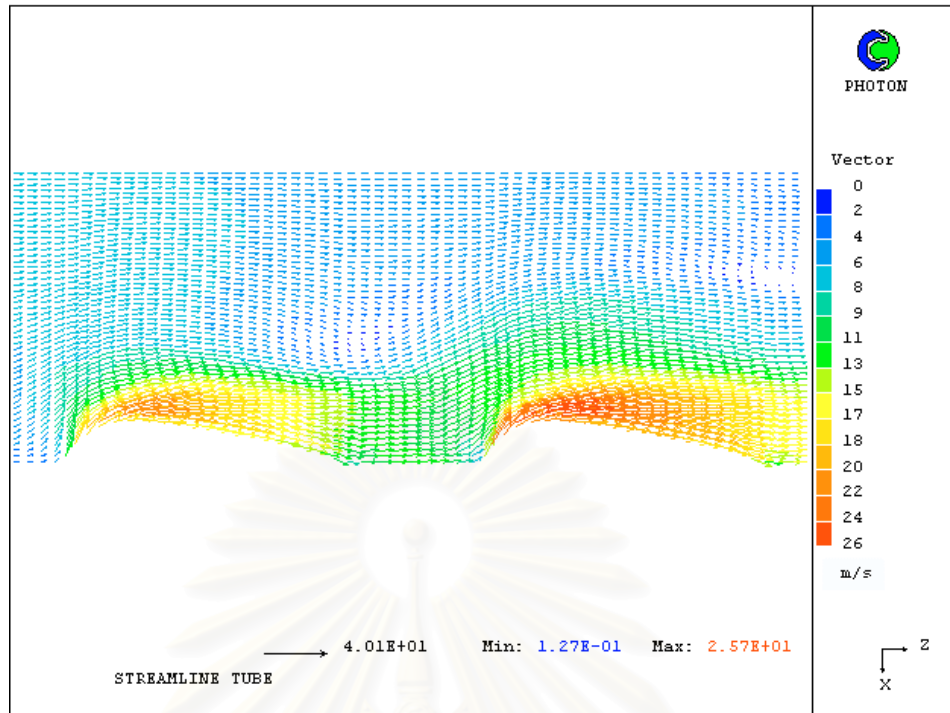
รูปที่ 6.61 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบนัด้าน $IY = 1$



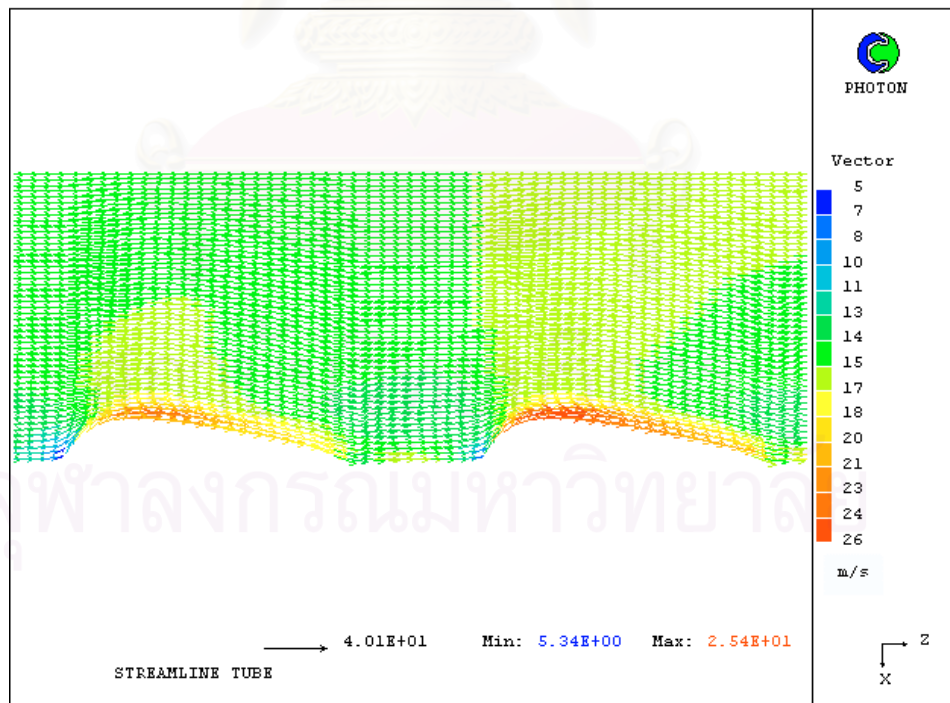
รูปที่ 6.62 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ($IY = 5$)



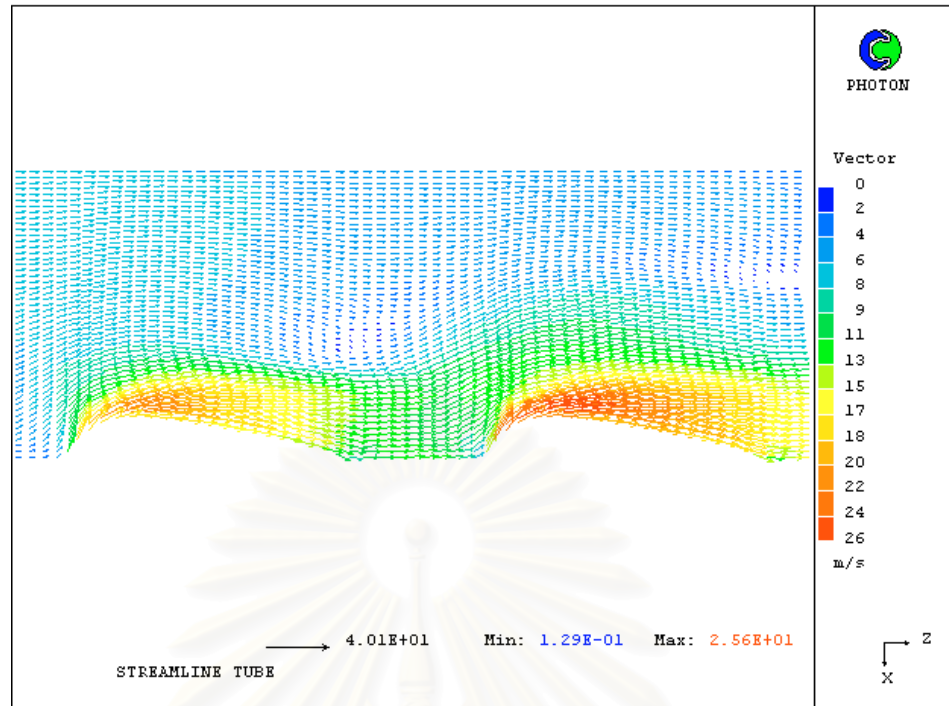
รูปที่ 6.63 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 10$



รูปที่ 6.64 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ้านด้าน $IY = 1$

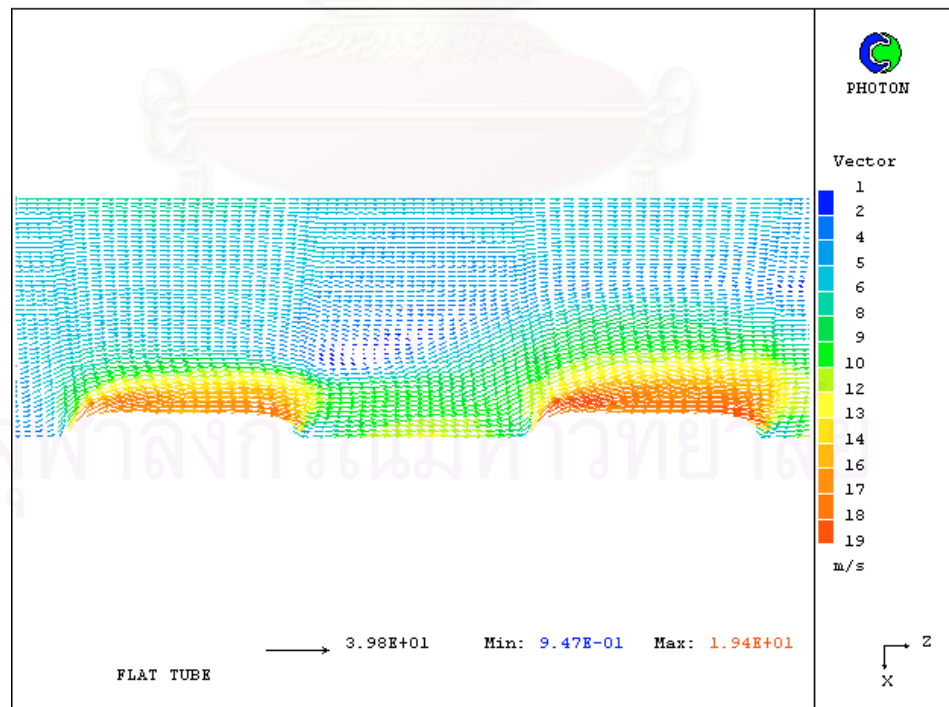


รูปที่ 6.65 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบ้าน ($IY = 5$)

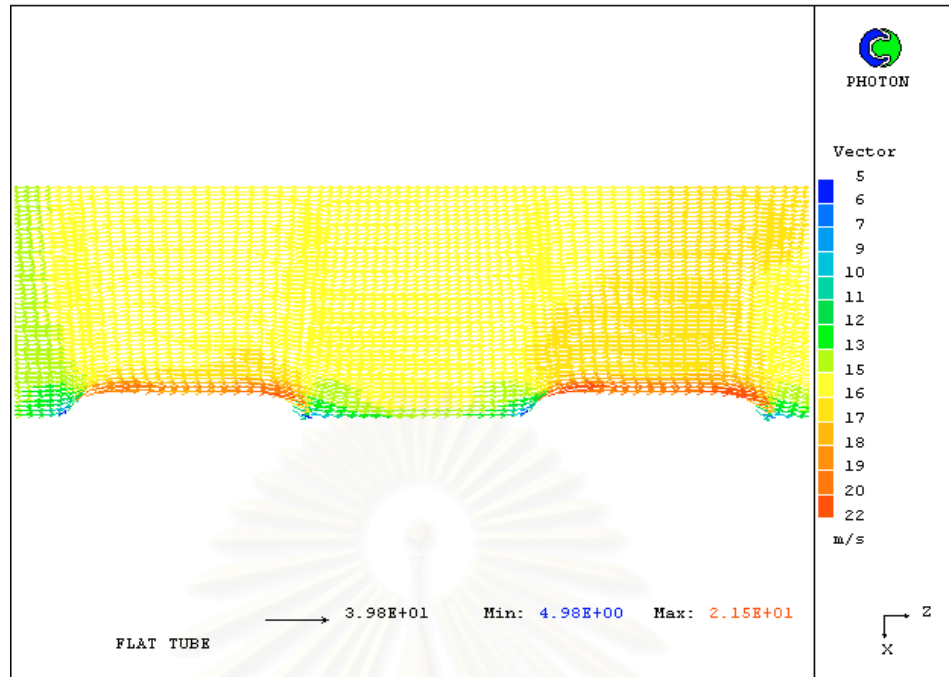


รูปที่ 6.66 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของกริบแผ่นด้าน $IY = 10$

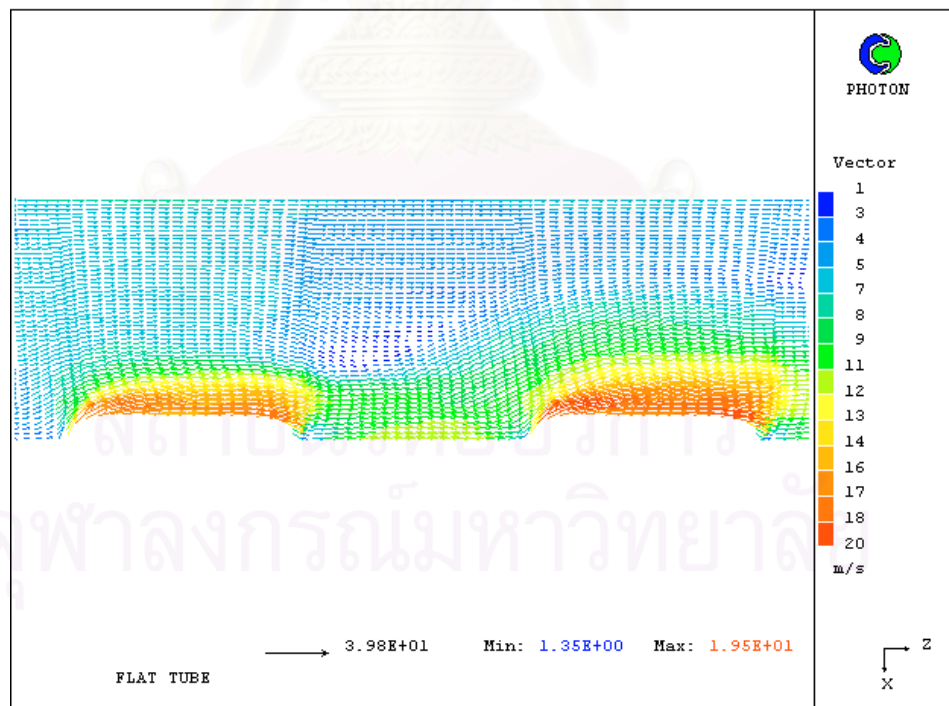
6.2.2.1.1.1 กรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



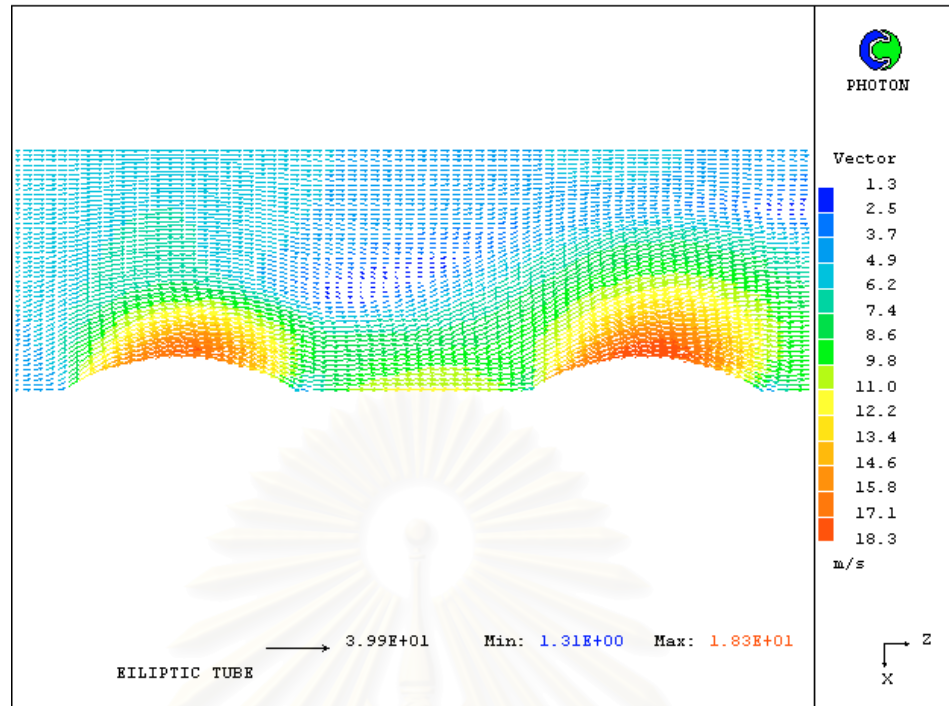
รูปที่ 6.67 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของกริบแผ่นด้าน $IY = 1$



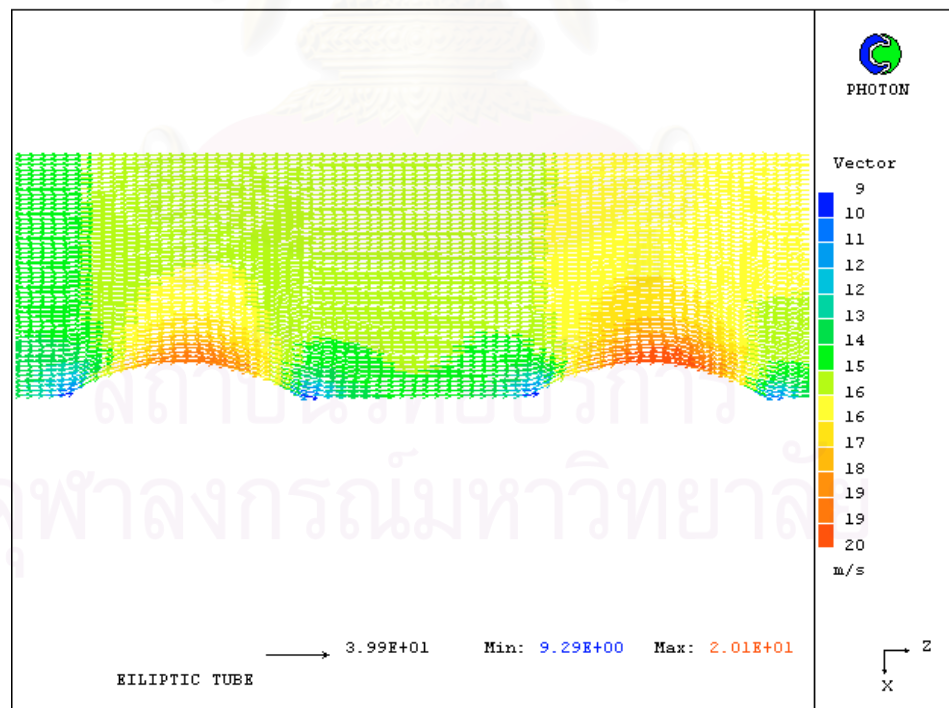
รูปที่ 6.68 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบอก (IY = 5)



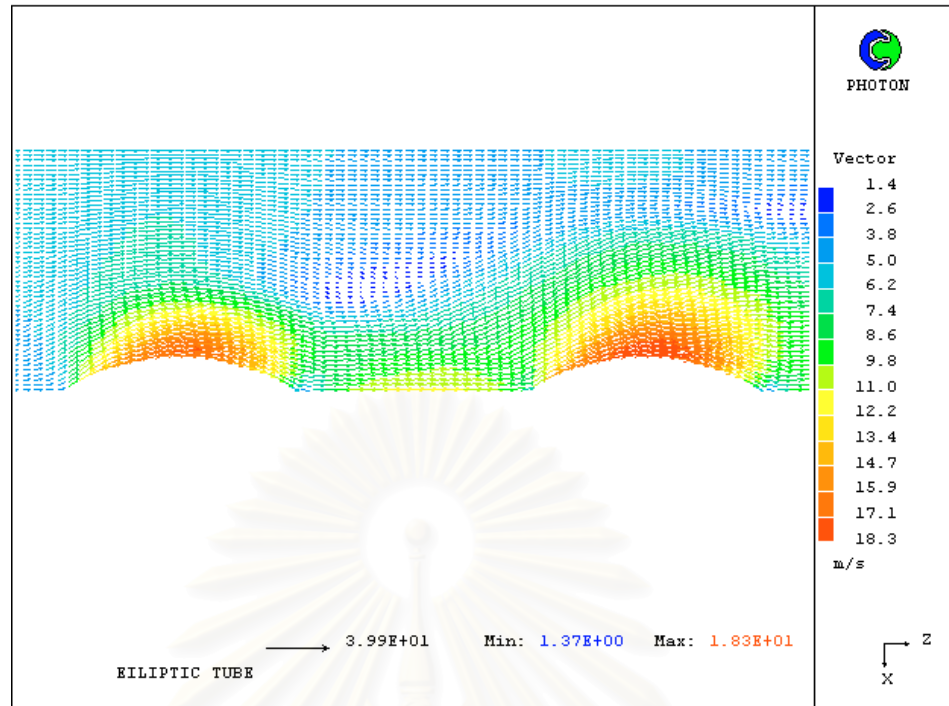
รูปที่ 6.69 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบอกด้าน IY = 10



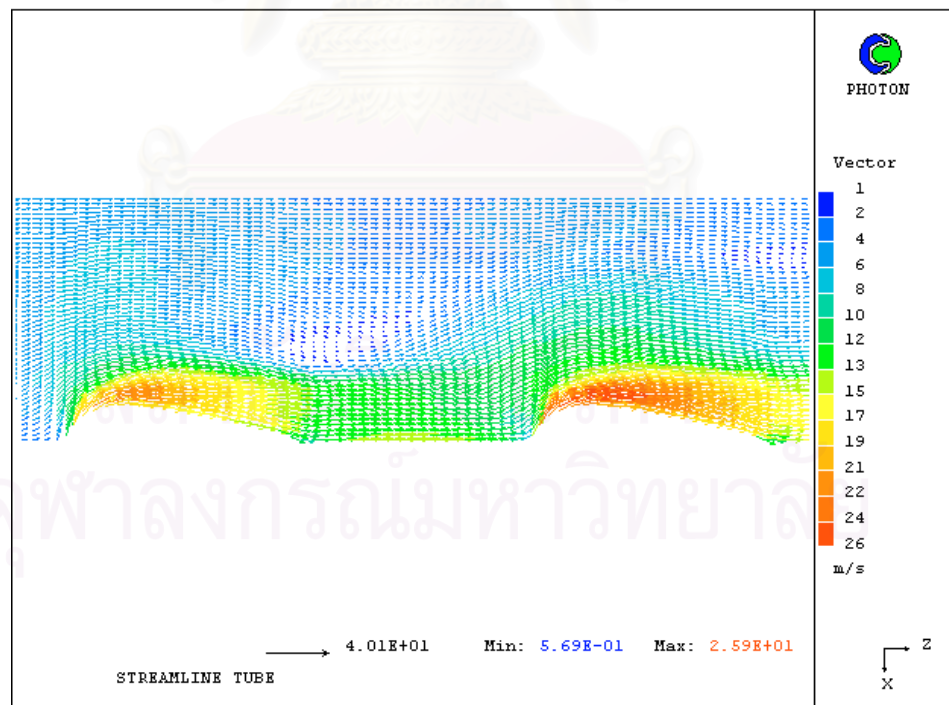
รูปที่ 6.70 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 1$



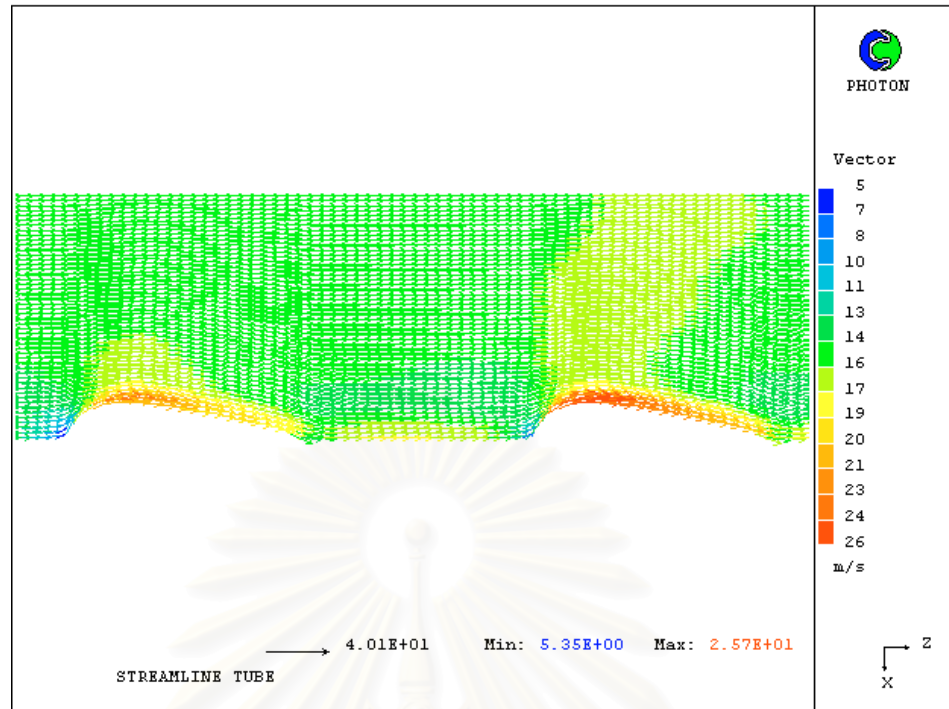
รูปที่ 6.71 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น($IY = 5$)



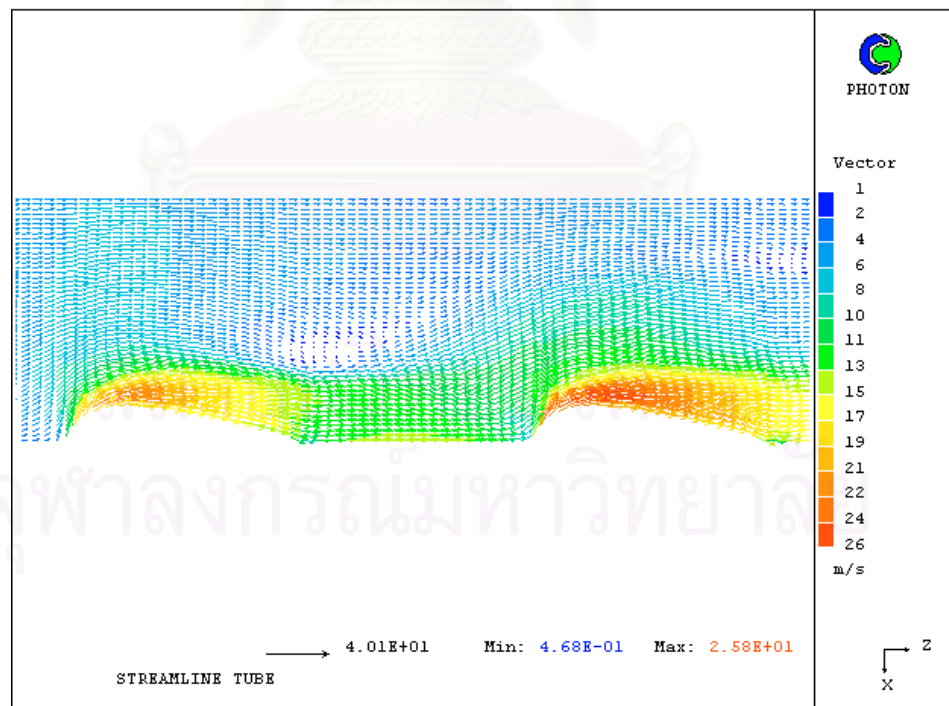
รูปที่ 6.72 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน IY = 10



รูปที่ 6.73 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน IY = 1



รูปที่ 6.74 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างคาน้ำ (IY = 5)



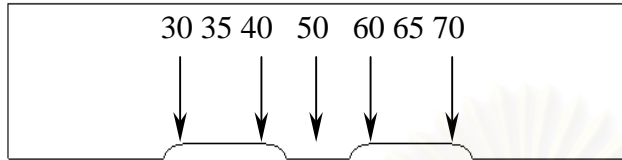
รูปที่ 6.75 แสดงลักษณะการไหลผ่านของอากาศ สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของคาน้ำด้าน IY = 10

จากรูป 6.58 ถึง 6.75 เป็นการแสดงลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อที่มีรูปทรงต่างกัน 3 รูปแบบ ดังนี้ คือท่อรูปทรงแบน ท่อรูปทรงวงรี และ ท่อรูปทรงหยดน้ำ จำนวน 2 ท่อ ด้วยการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน โดยมีระยะห่างระหว่างท่อทั้ง 2 เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตร โดยรูปที่นำมาแสดงจะเป็นบริเวณใกล้ผนังของครีบบนทั้ง 2 ด้าน ($IY = 1$ และ $IY = 10$) และบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ($IY = 5$) เมื่อทำการพิจารณากรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร พบว่าลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่ออันที่หนึ่ง อากาศจะไหลสัมผัสไปกับผิวท่อตลอดการเคลื่อนที่ และจะถูกเร่งให้มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย และเมื่ออากาศไหลผ่านมาถึงท่ออันที่สองจะพบว่าลักษณะการไหลของอากาศยังคงไหลสัมผัสไปกับผิวท่อตลอดการเคลื่อนที่ และยังคงถูกเร่งให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าความเร็วของอากาศที่ถูกเร่งโดยท่ออันที่หนึ่ง ซึ่งผลที่ได้จะเหมือนกันทั้งสามรูปทรงของท่อ แต่จะแตกต่างกันตรงตำแหน่งที่ความเร็วของอากาศที่ถูกเร่งให้มีค่าสูงสุด โดยที่ท่อรูปทรงแบนนั้นจะอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของท่อ ส่วนท่อรูปทรงวงรีจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของท่อ และท่อรูปทรงหยดน้ำจะอยู่บริเวณด้านหน้าของท่อเช่นเดียวกับท่อรูปทรงแบน และ เมื่อพิจารณา ระยะห่างระหว่างท่อที่เพิ่มขึ้นพบว่าลักษณะการไหลของอากาศยังคงเหมือนเดิม แต่จะแตกต่างกันที่ค่าความเร็วของอากาศที่ถูกเร่งให้เพิ่มขึ้นจะมีค่าสูงกว่าประมาณ 1 ถึง 2 เมตร/วินาที และเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้น พบว่ามีสาเหตุมาจากขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหลของอากาศมีค่าที่ลดลงเมื่ออากาศไหลเข้าใกล้ท่อ เป็นผลให้ค่าความเร็วของอากาศมีค่าสูงขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุดเมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหลของอากาศมีค่าต่ำสุด หรืออาจกล่าวได้อีกทางว่าอากาศได้ไหลผ่านผิวท่อมาถึงบริเวณจุดสูงสุดของท่อ โดยบริเวณที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น คือ จุดสูงสุดของท่อรูปทรงต่างๆ ที่ทำให้ความเร็วมีค่าสูงสุดในแต่ละรูปทรงของท่อ ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดนี้เป็นไปตาม “กฎทรงมวล” ส่วนสาเหตุที่ค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่ออันที่สองมีค่าสูงกว่าค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่ออันที่หนึ่ง คือ ค่าความเร็วของอากาศก่อนที่จะถูกเร่งให้เพิ่มสูงขึ้นโดยท่ออันแรก (บริเวณด้านหน้าของท่ออันที่หนึ่ง) มีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วของอากาศก่อนที่จะถูกเร่งให้เพิ่มสูงขึ้นโดยท่ออันที่สอง (บริเวณด้านหน้าของท่ออันที่สอง) เพราะความเร็วของอากาศที่บริเวณนี้ได้ถูกเร่งให้เพิ่มสูงขึ้นจากการไหลผ่านท่ออันที่หนึ่งมาแล้ว แม้จะมีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองขึ้นกลางแต่ก็ไม่เพียงพอที่จะทำให้ความเร็วของอากาศกลับมาอยู่ที่ค่าเดียวกับบริเวณด้านหน้าท่ออันแรกได้ ส่วนการพิจารณาการเกิด Separation Point และ Recirculation Zone พบว่าไม่มีปรากฏการณ์ดังกล่าว เกิดขึ้นในทุกกรณีที่น่ามาพิจารณา ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก ความสูงของท่อที่เป็นสิ่งกีดขวางมีค่าน้อย และลักษณะรูปทรงของท่อที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในทันทีทันใด จึงเป็นผลให้อากาศไหลผ่านบริเวณท่อได้สะดวกและสัมผัสกับผิวของท่อตลอดการเคลื่อนที่

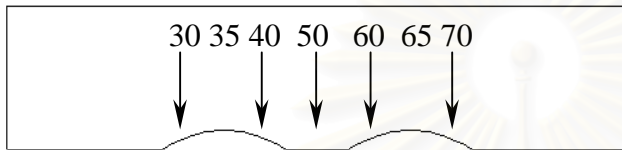
ส่วนต่อไปจะเป็นการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ แกน Z โดยจะทำการเปรียบเทียบในกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองแตกต่างกัน เช่นเดียวกับกรณีที่พิจารณาการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

6.2.2.2 การเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ

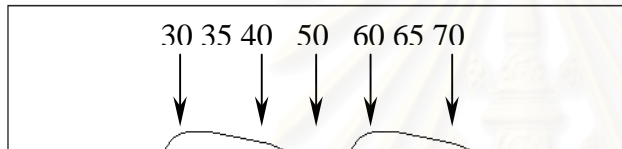
กรณีนี้จะใช้จุดตั้งรูปข้างล่างในการทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วอากาศไหลผ่านผิวท่อรูปทรงต่าง ๆ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อแตกต่างกัน



ก. ท่อรูปทรงแบน

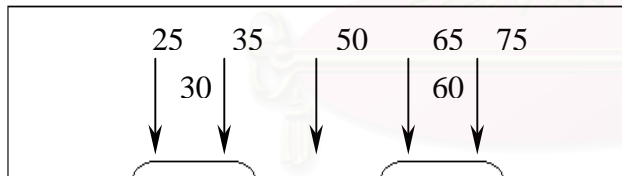


ข. ท่อรูปทรงวงรี

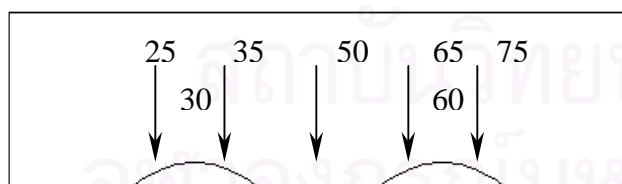


ค. ท่อรูปทรงหยดน้ำ

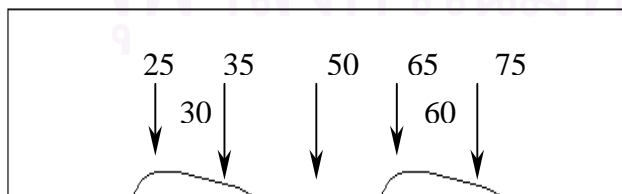
รูปที่ 6.76 แสดงตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน Z ที่นำมาพิจารณา สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



ก. ท่อรูปทรงแบน



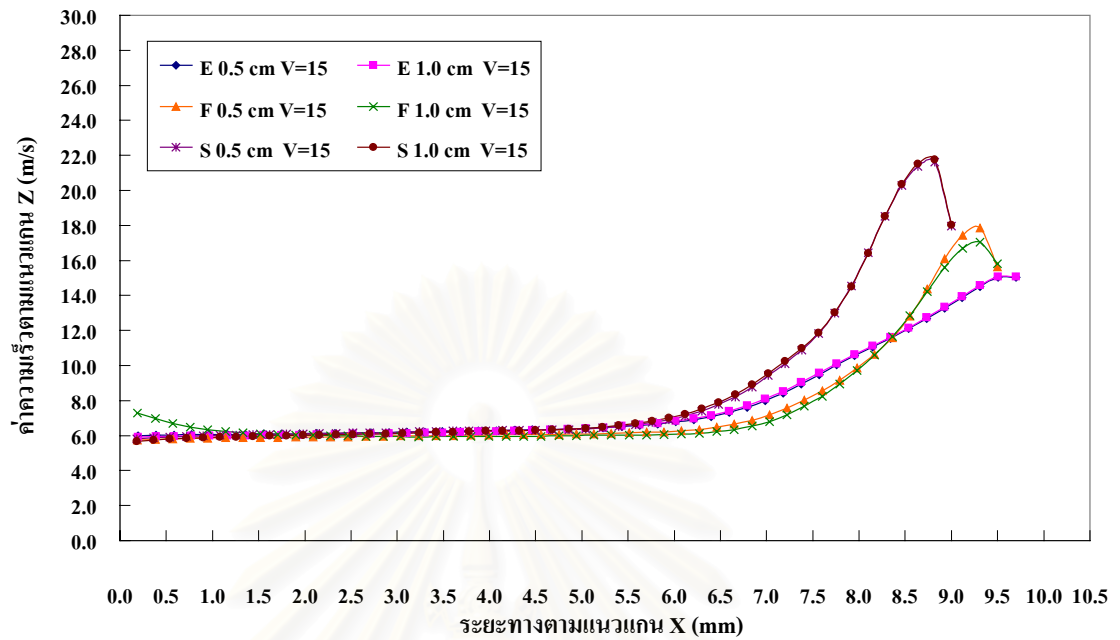
ข. ท่อรูปทรงวงรี



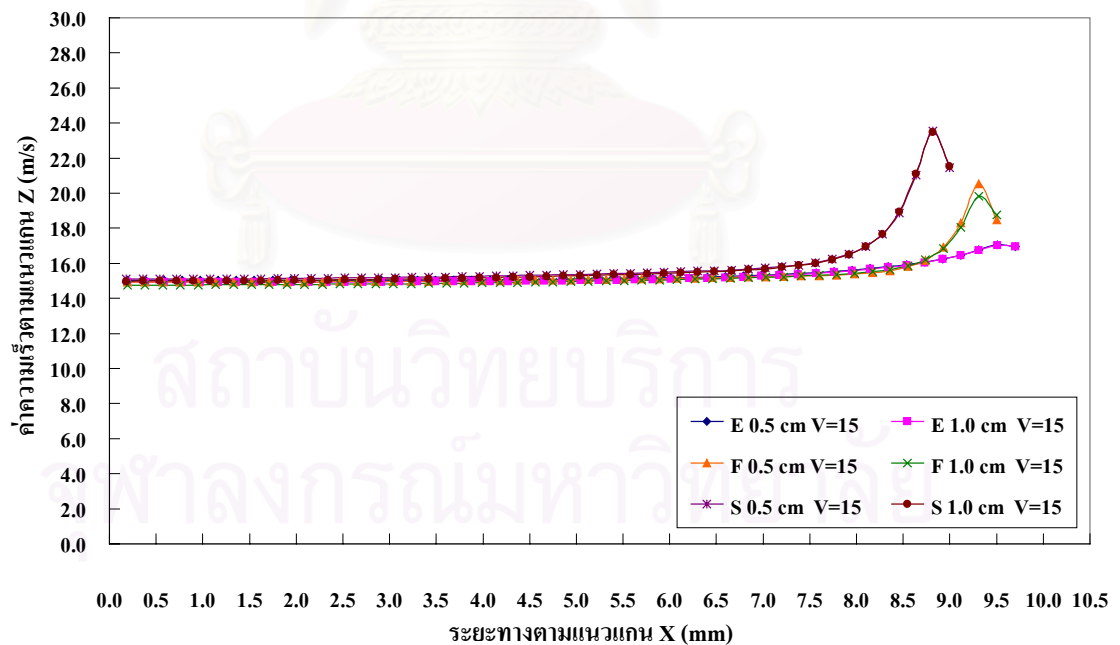
ค. ท่อรูปทรงหยดน้ำ

รูปที่ 6.77 แสดงตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน Z ที่นำมาพิจารณา สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

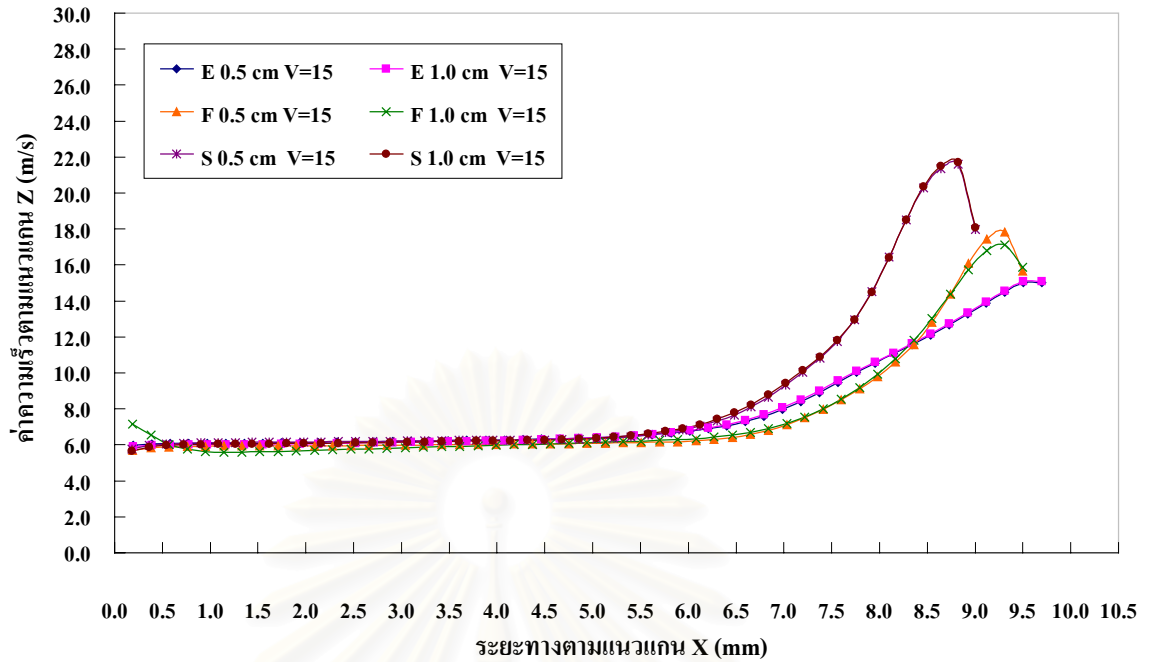
6.2.2.2.1 กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที



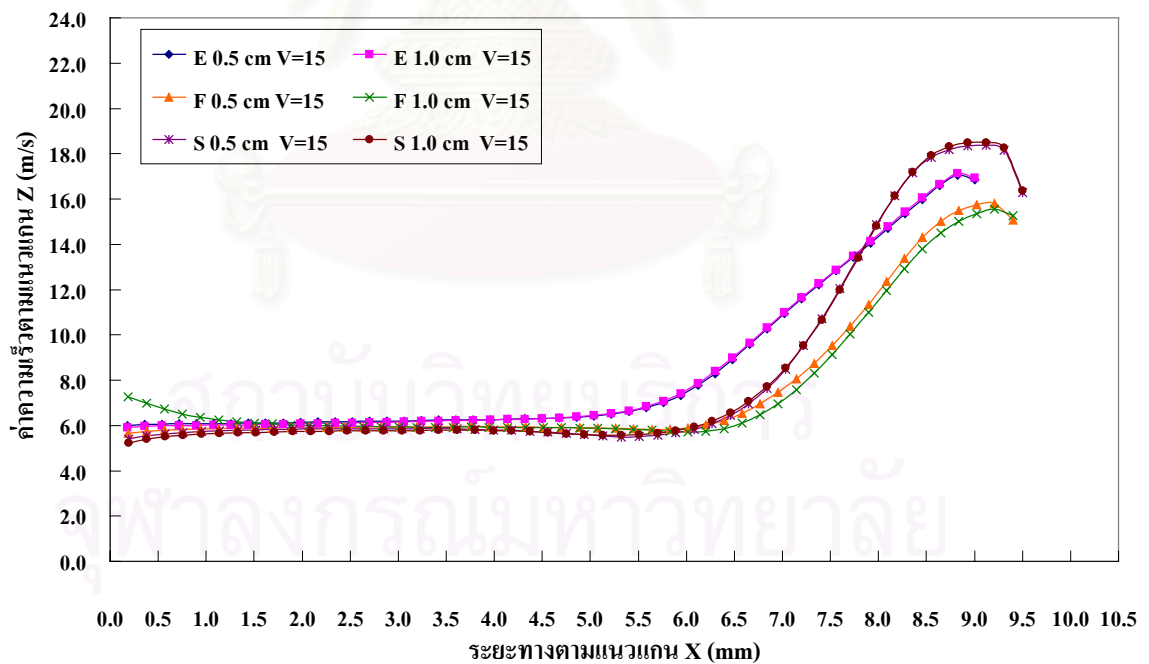
รูปที่ 6.78 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $IY = 1$



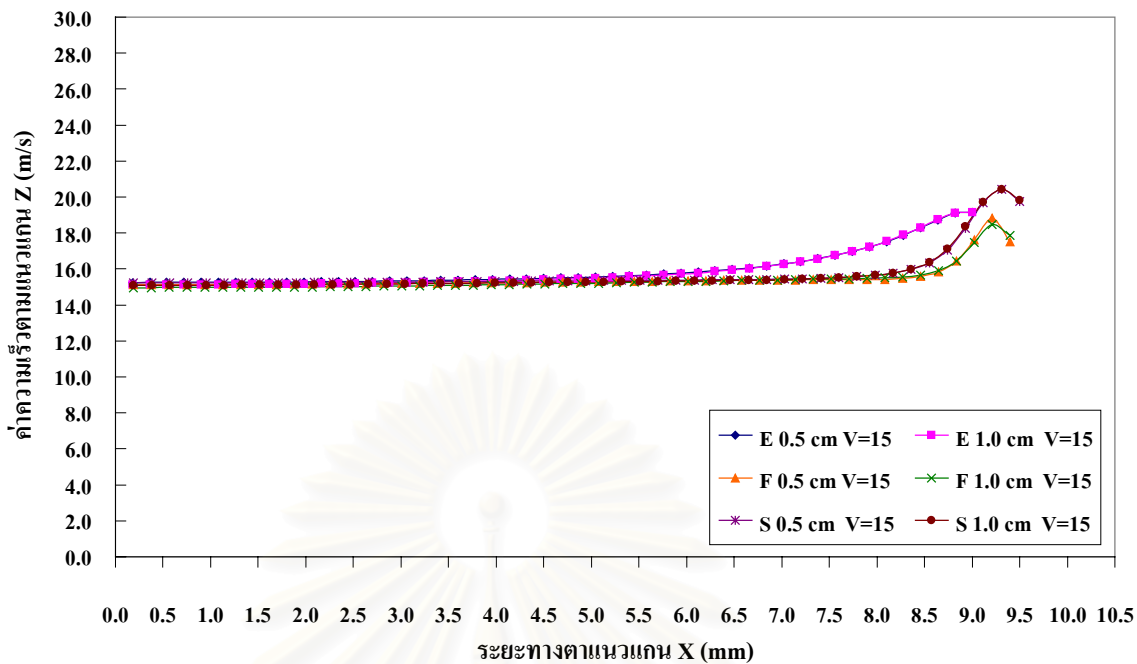
รูปที่ 6.79 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบแผ่นด้าน $IY = 5$



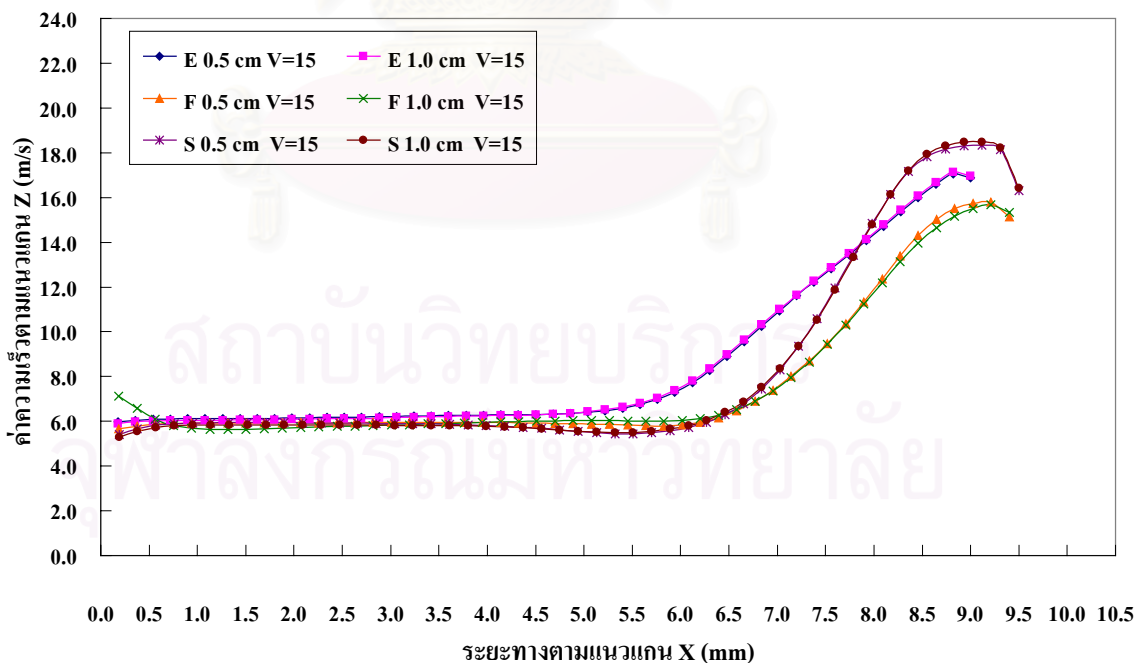
รูปที่ 6.80 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



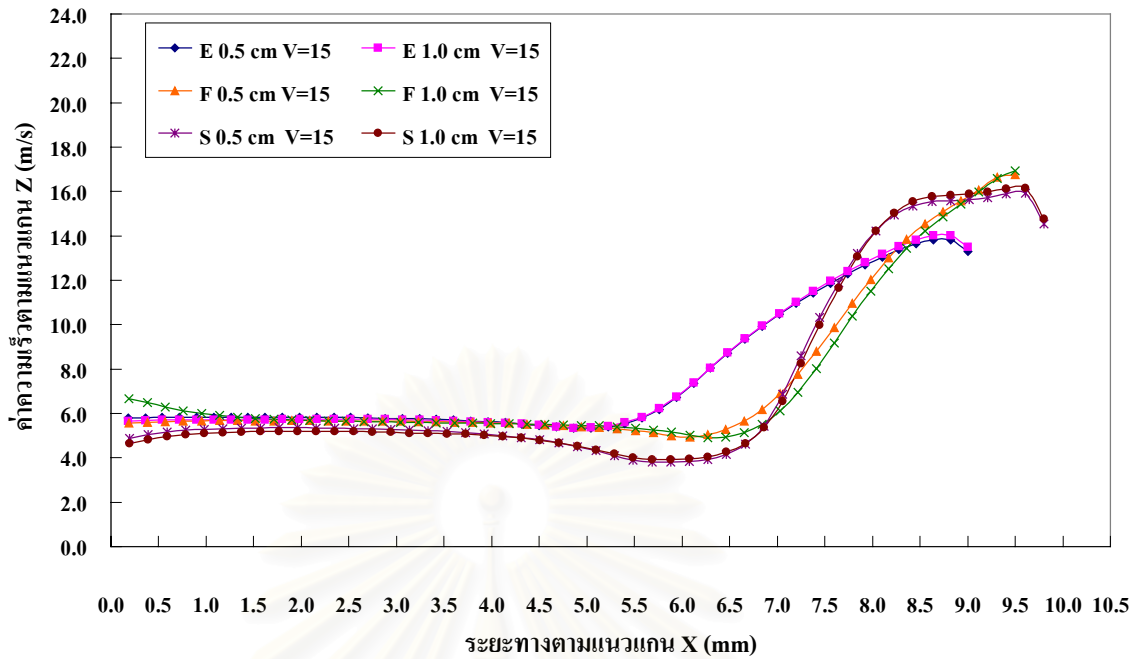
รูปที่ 6.81 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$



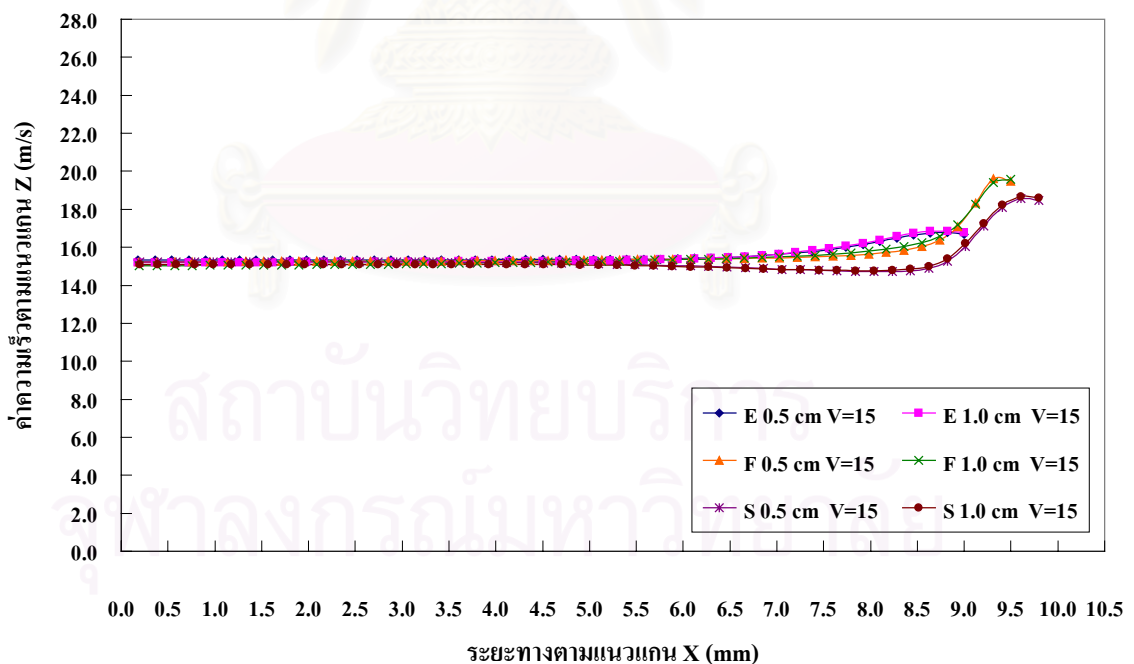
รูปที่ 6.82 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน แผ่น ด้าน $IY = 5$



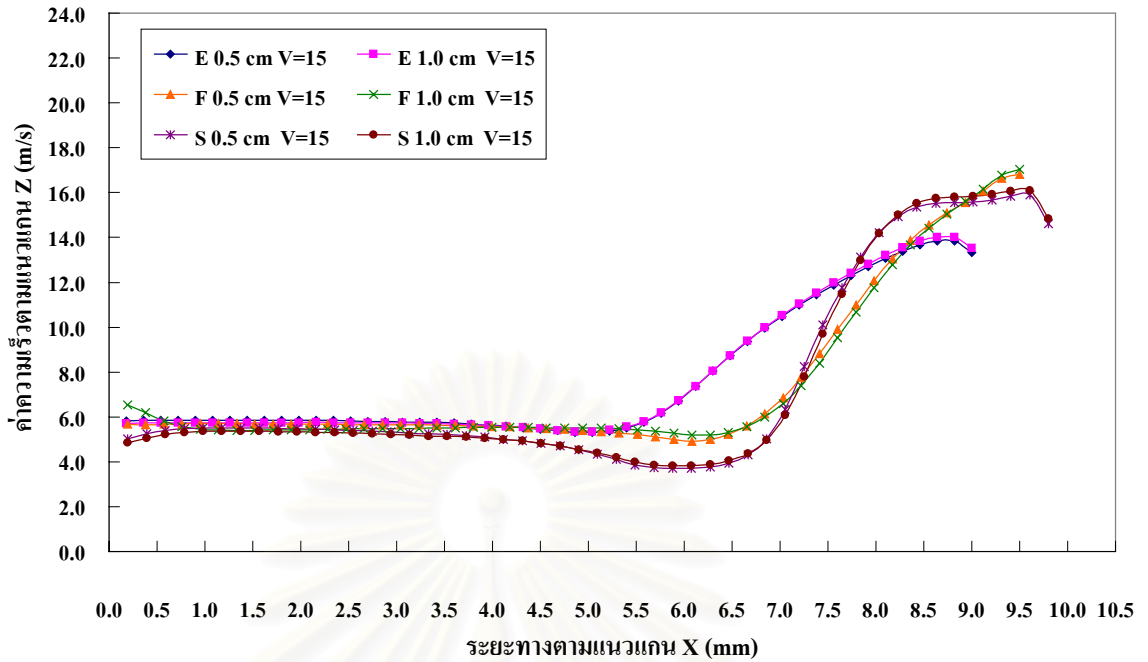
รูปที่ 6.83 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน แผ่น ด้าน $IY = 10$



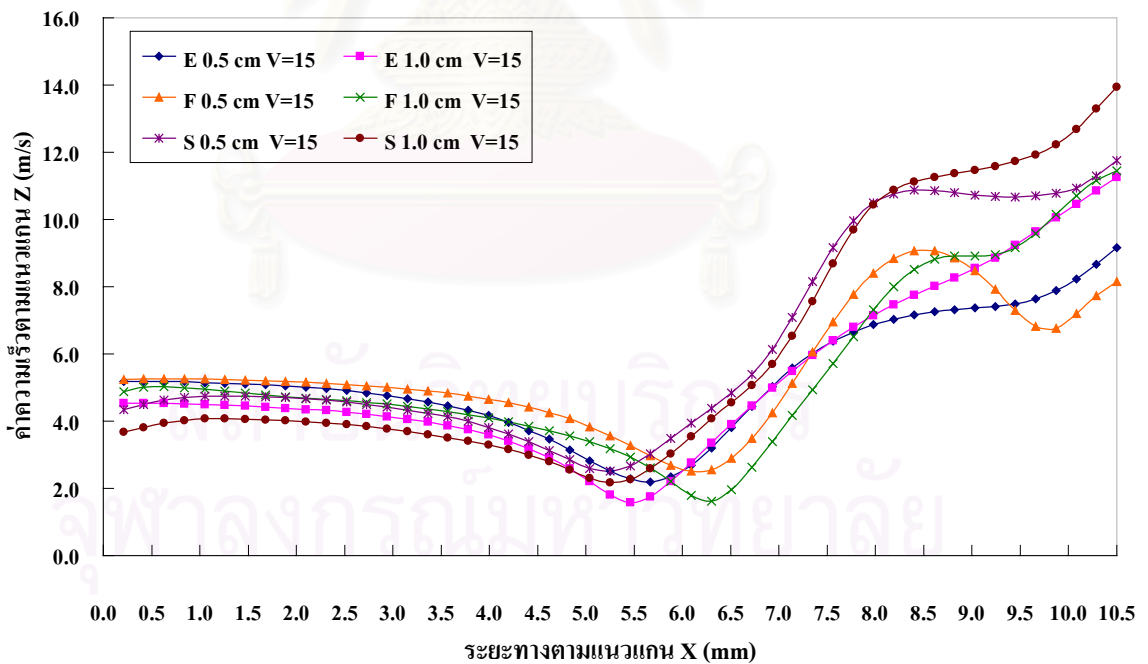
รูปที่ 6.84 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 1$



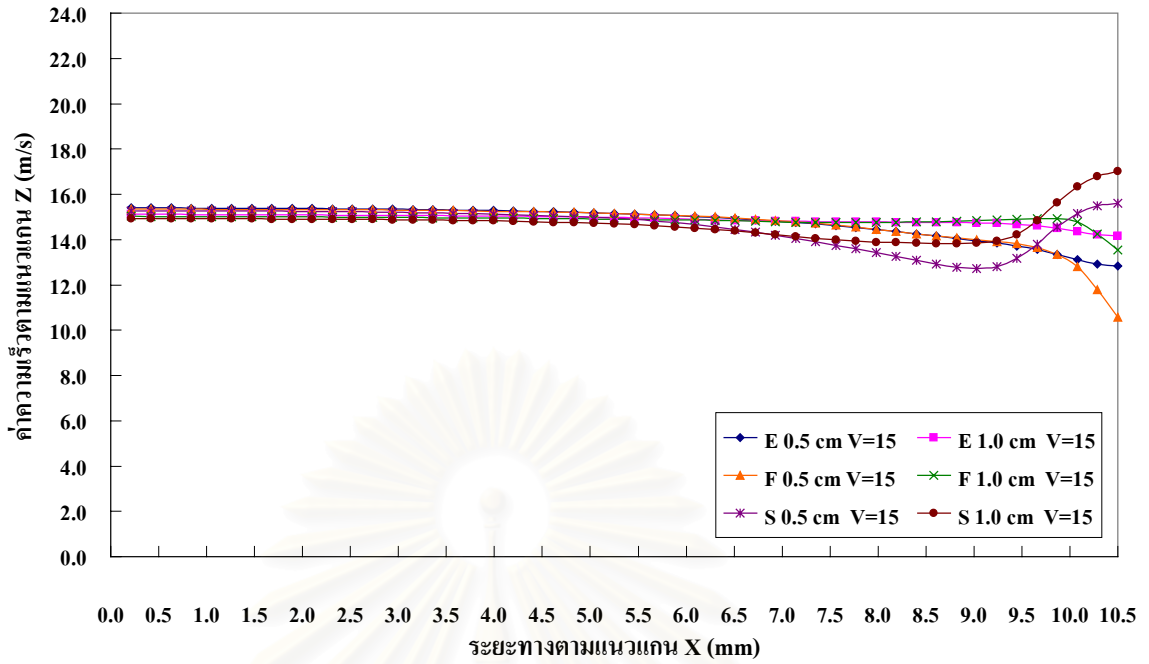
รูปที่ 6.85 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่นด้าน $IY = 5$



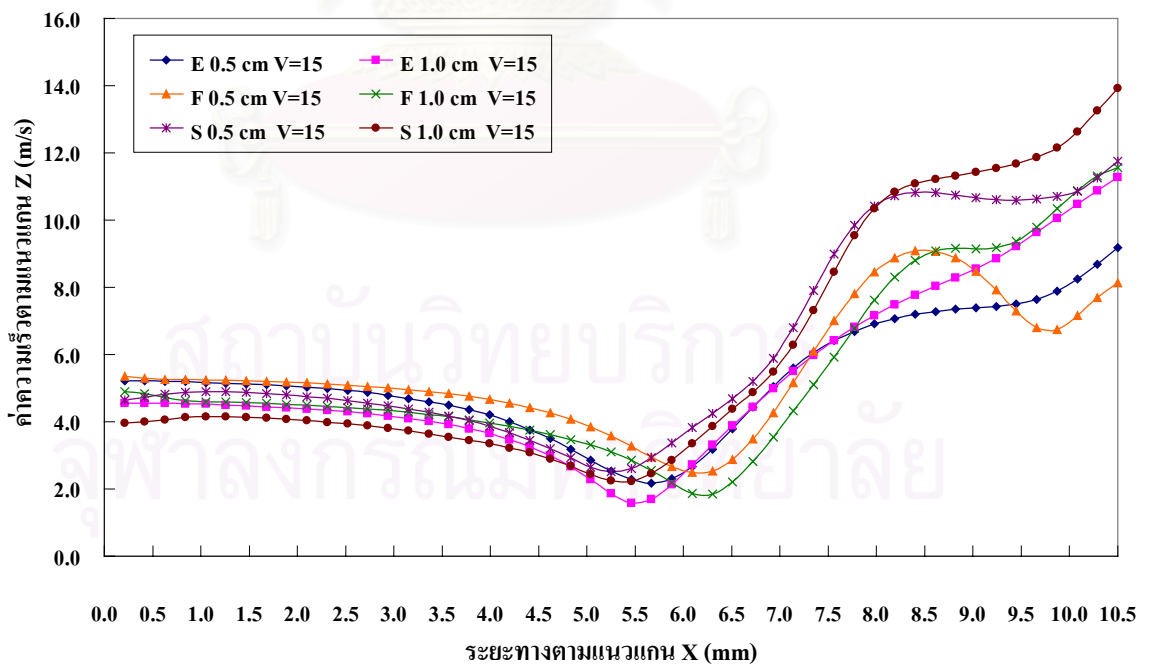
รูปที่ 6.86 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 40 และ IZ = 35 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบัฟเฟอร์ด้าน IY = 10



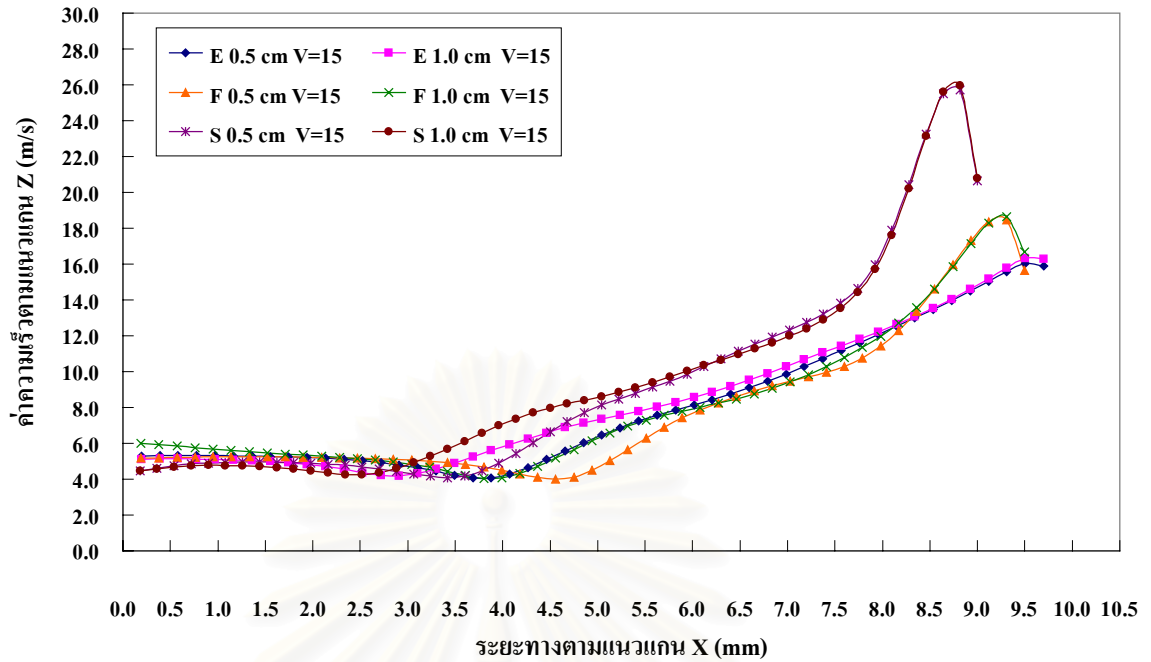
รูปที่ 6.87 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 50 และ IZ = 50 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบัฟเฟอร์ด้าน IY = 1



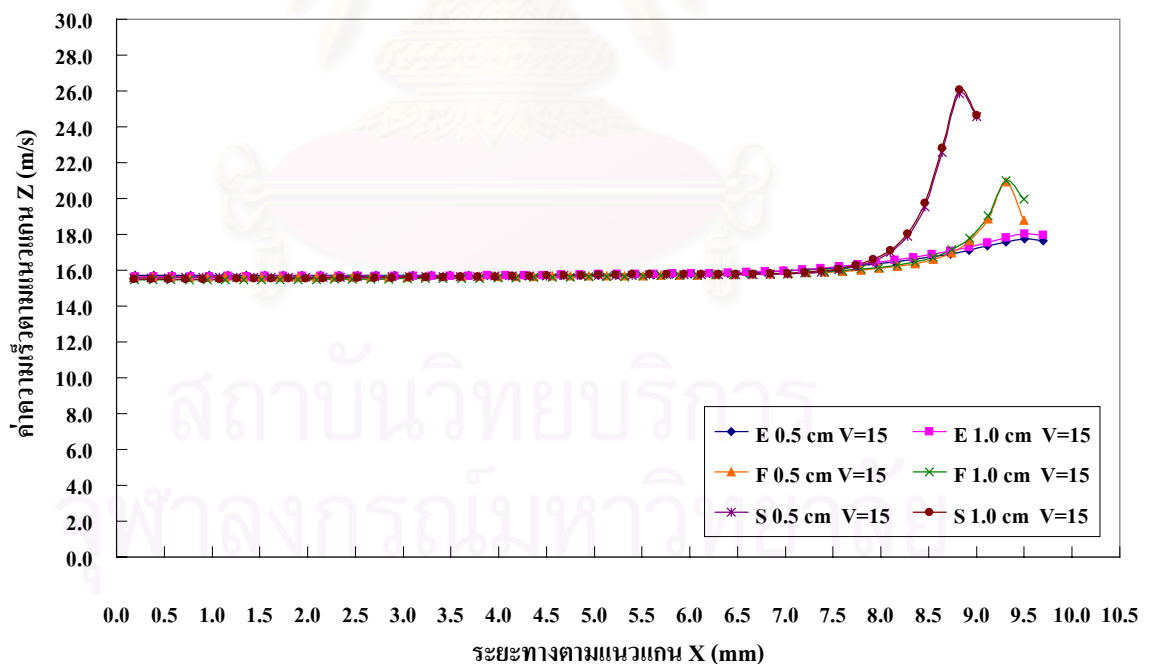
รูปที่ 6.88 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $I_Z = 50$ และ $I_Z = 50$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน แผ่น ด้าน $I_Y = 5$



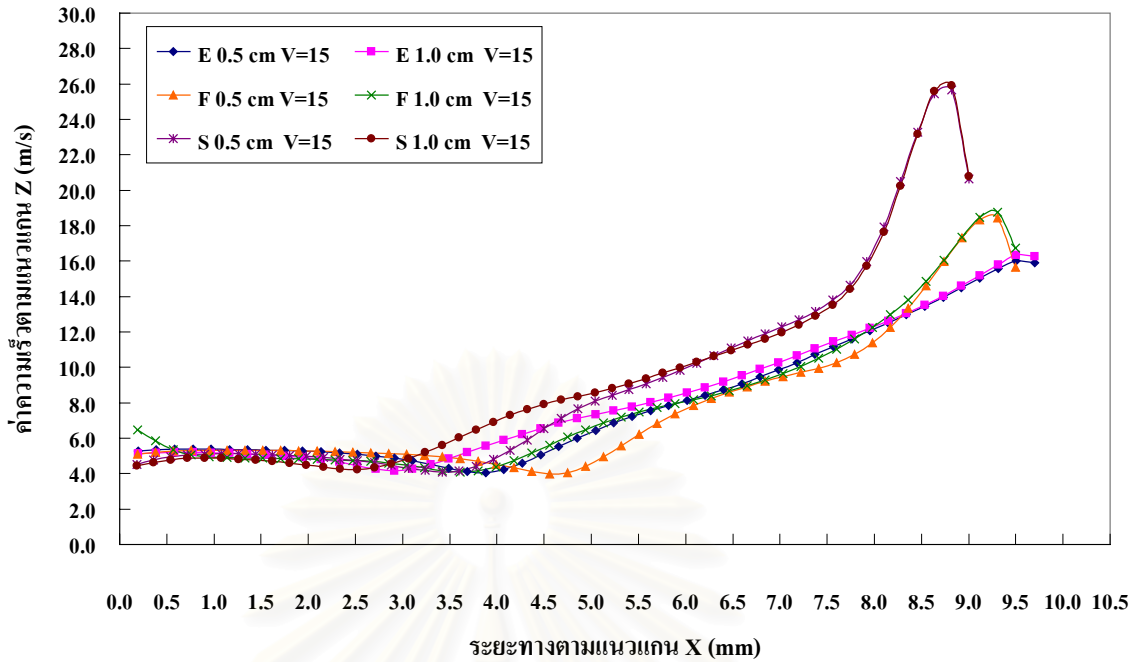
รูปที่ 6.89 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $I_Z = 50$ และ $I_Z = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน แผ่น ด้าน $I_Y = 10$



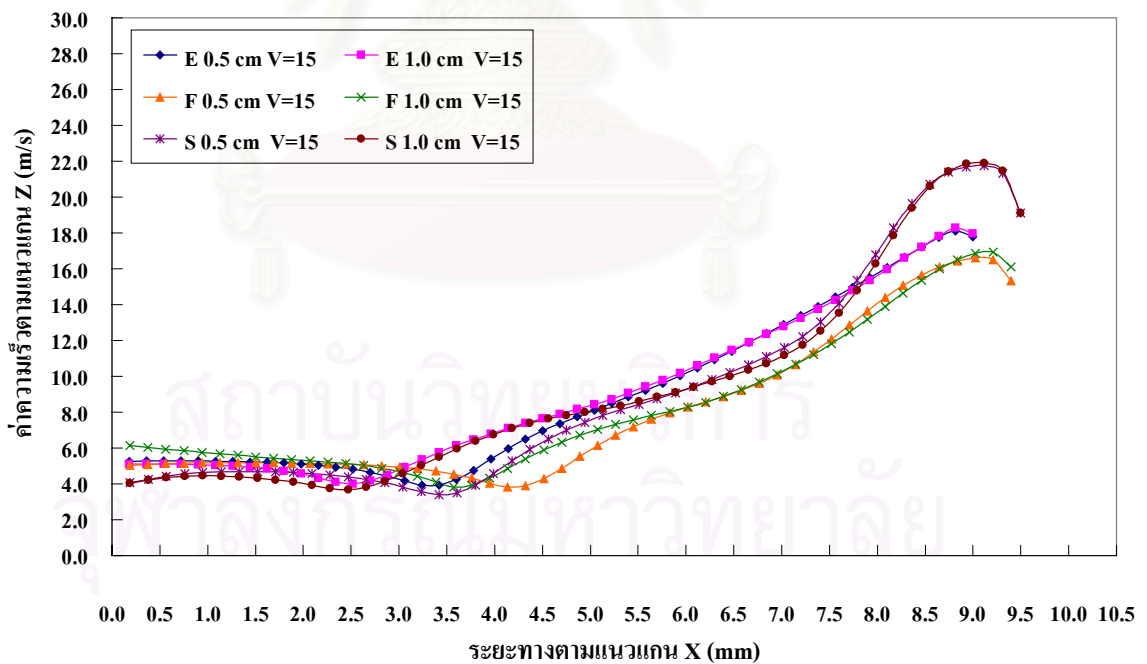
รูปที่ 6.90 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$



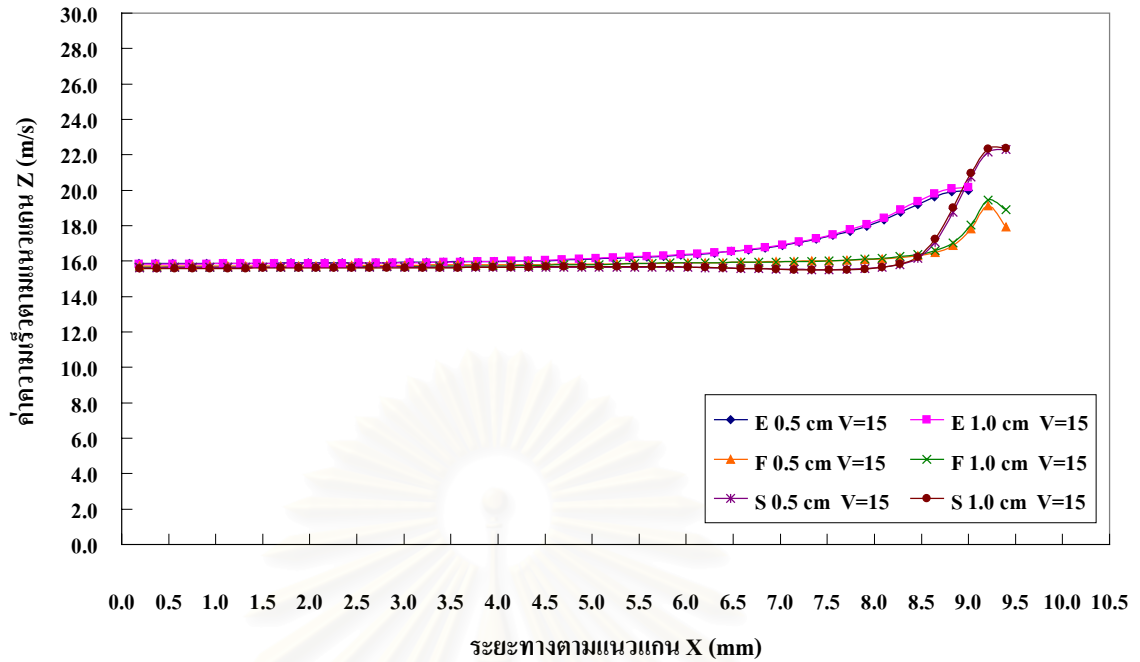
รูปที่ 6.91 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน $IY = 5$



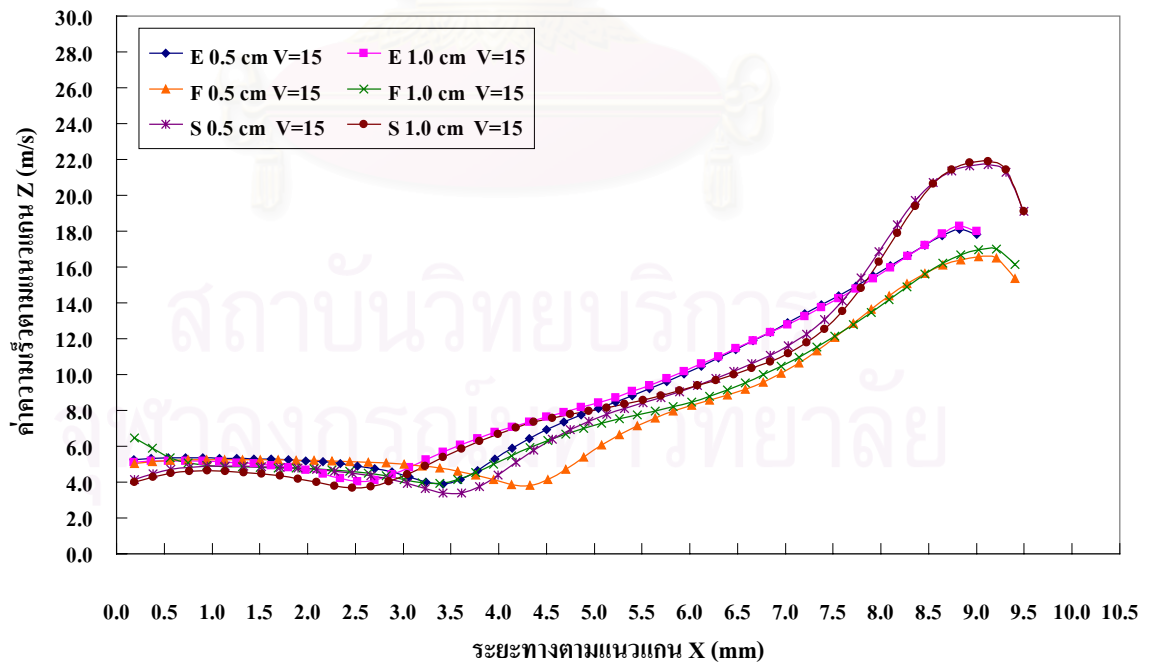
รูปที่ 6.92 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนพื้นด้าน $IY = 10$



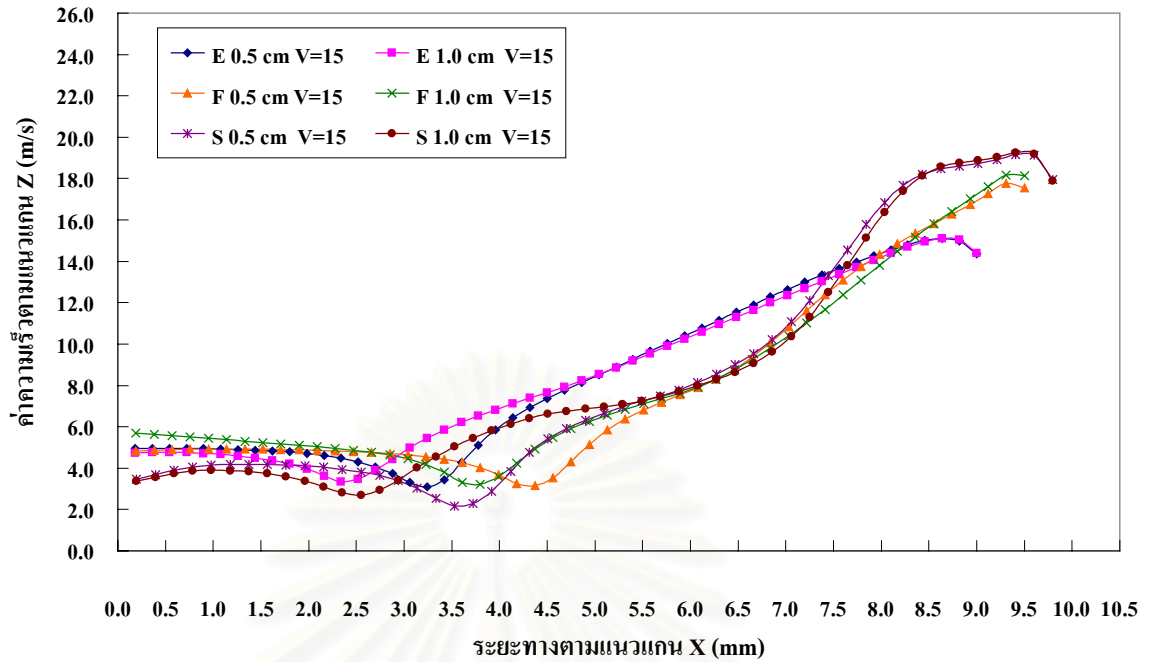
รูปที่ 6.93 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนพื้นด้าน $IY = 1$



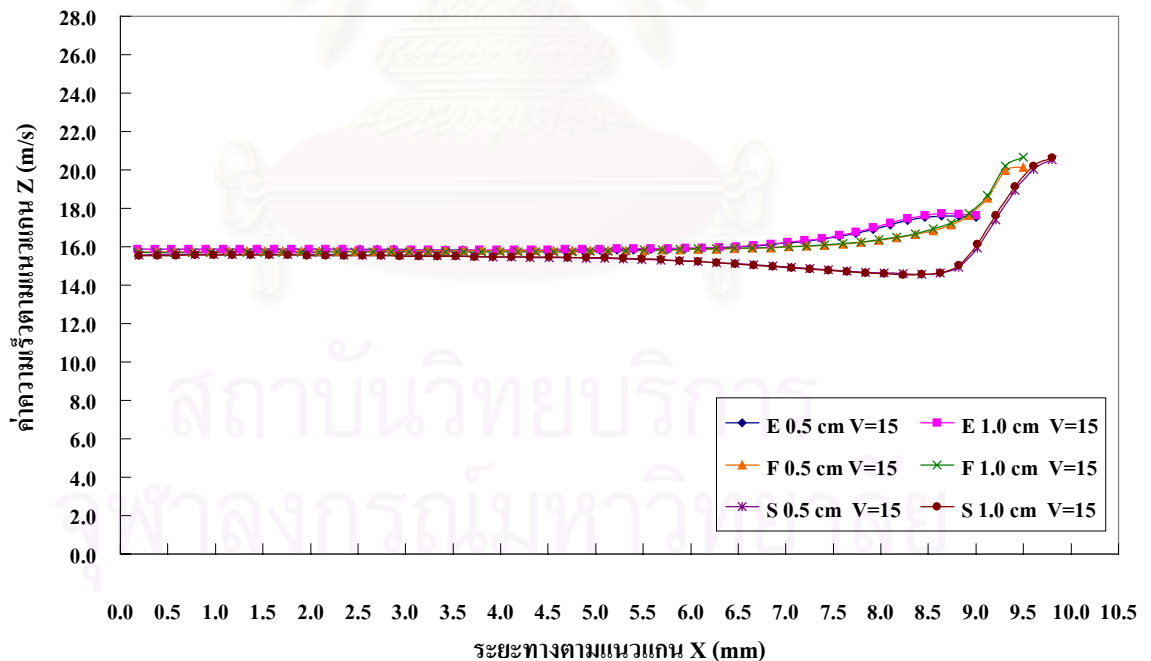
รูปที่ 6.94 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ด้าน $IY = 5$



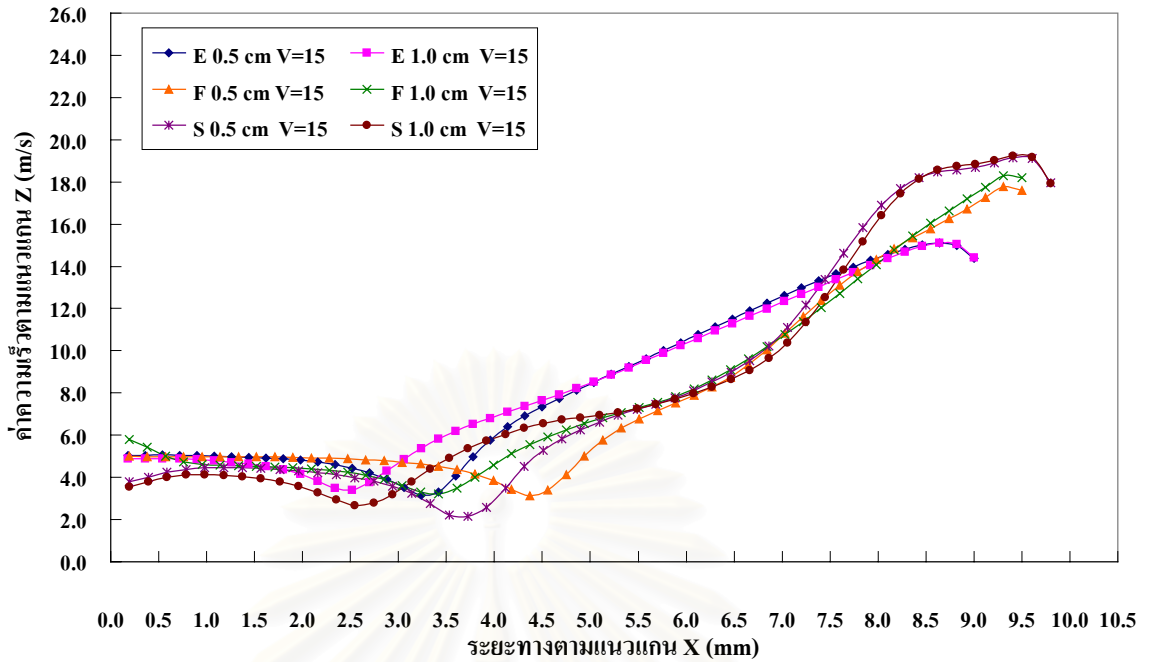
รูปที่ 6.95 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 10$



รูปที่ 6.96 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$

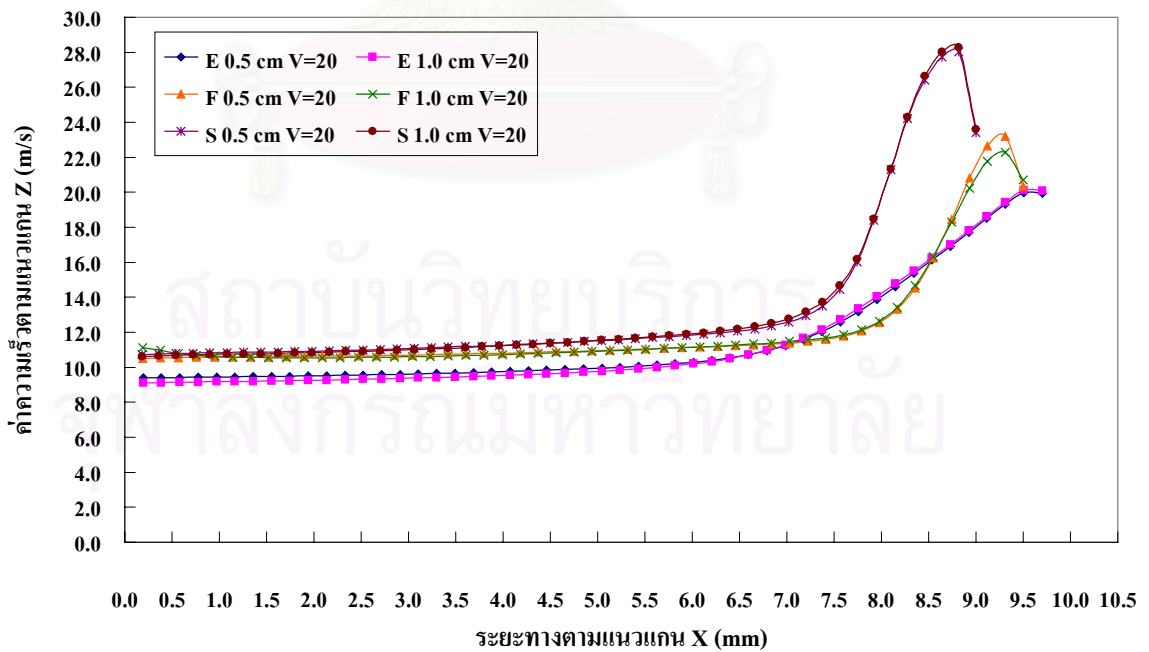


รูปที่ 6.97 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน $IY = 5$

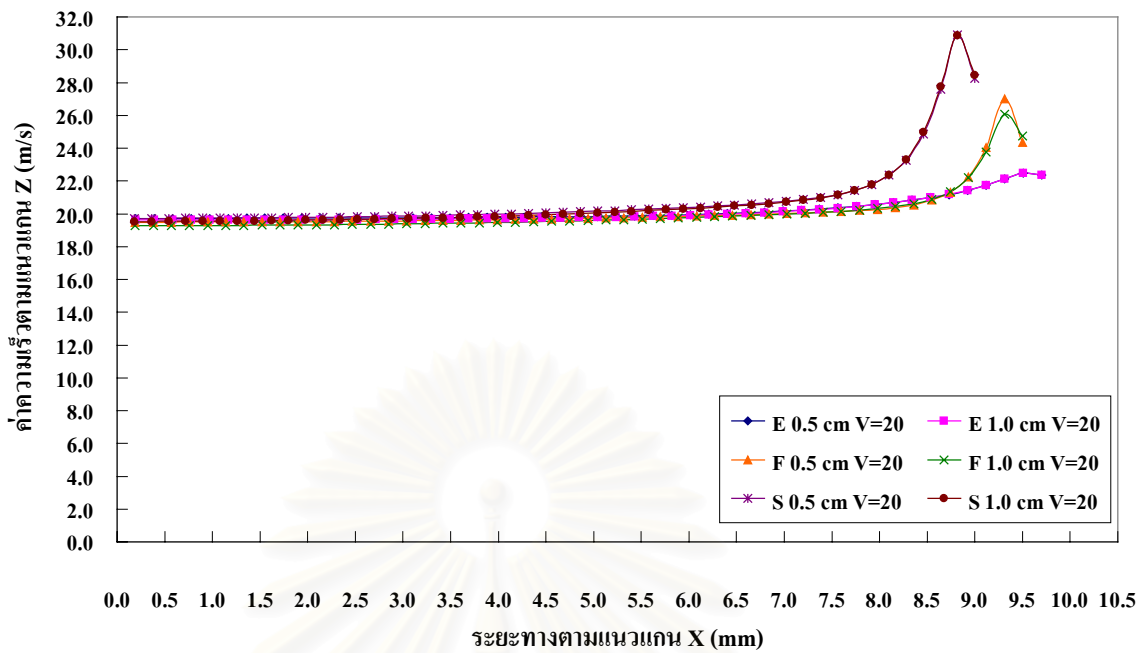


รูปที่ 6.98 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $IY = 10$

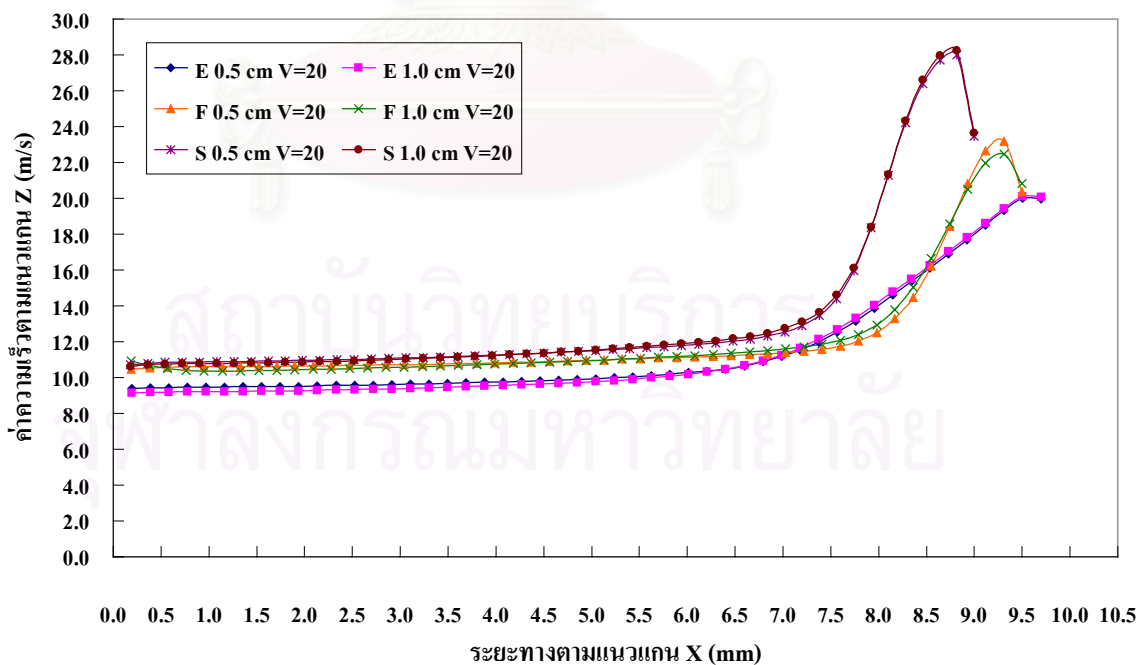
6.2.2.2.2 กรณีความเร็วของอากาศขาเข้าเท่ากับ 20 เมตร/วินาที



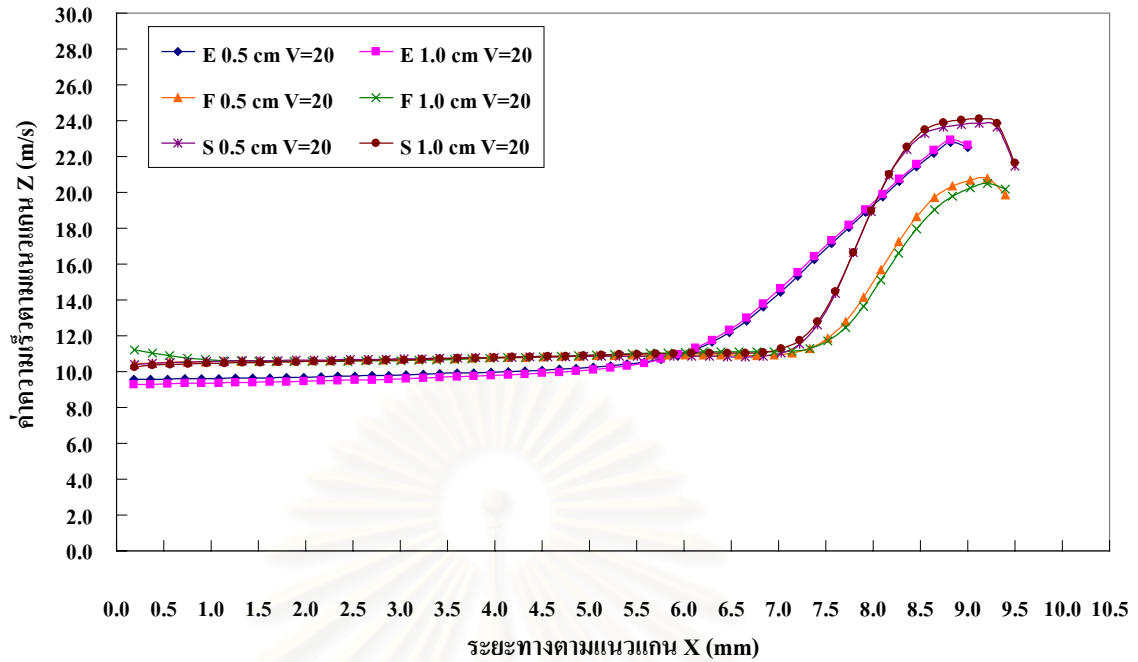
รูปที่ 6.99 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $IY = 1$



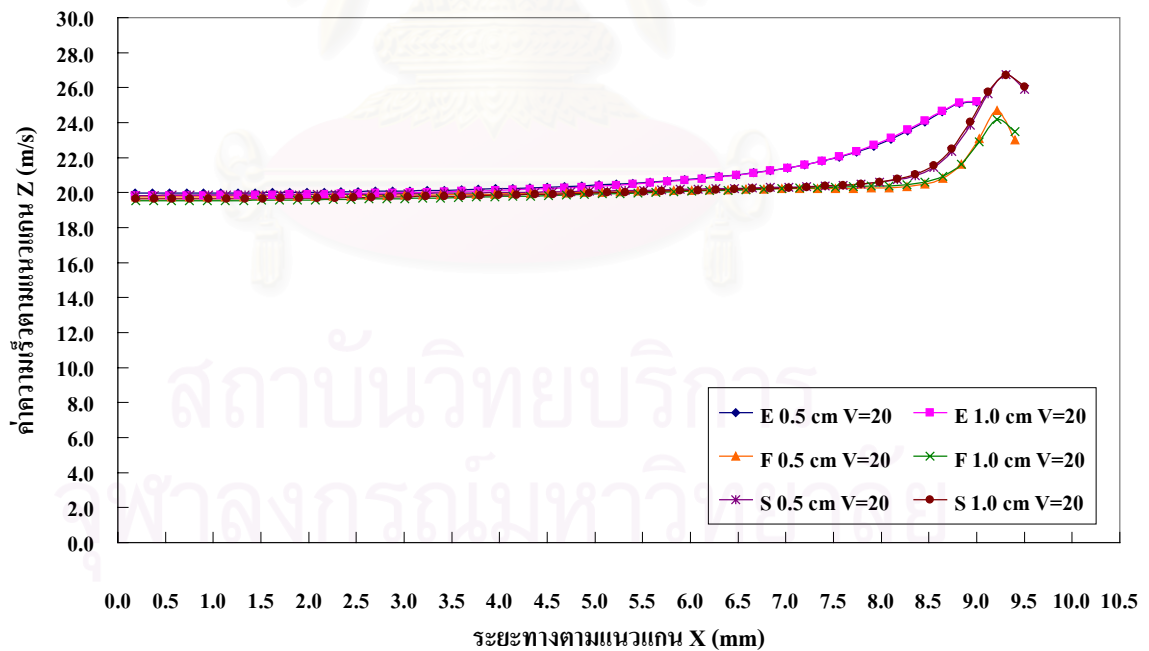
รูปที่ 6.100 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบ่น ด้าน $IY = 5$



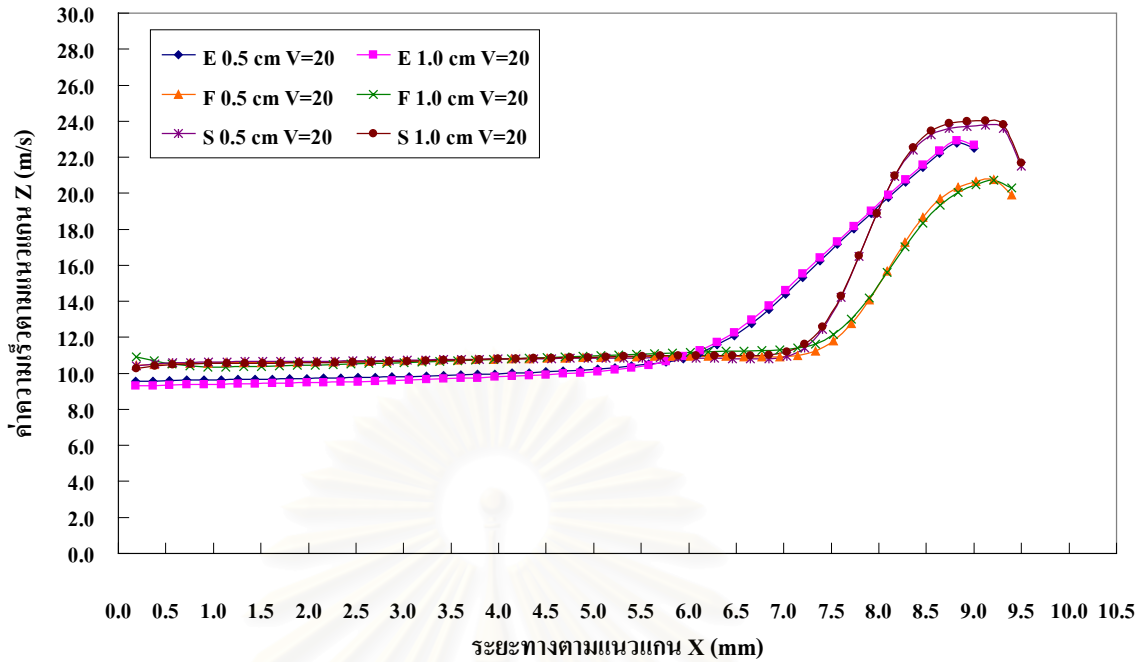
รูปที่ 6.101 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบ่นด้าน $IY = 10$



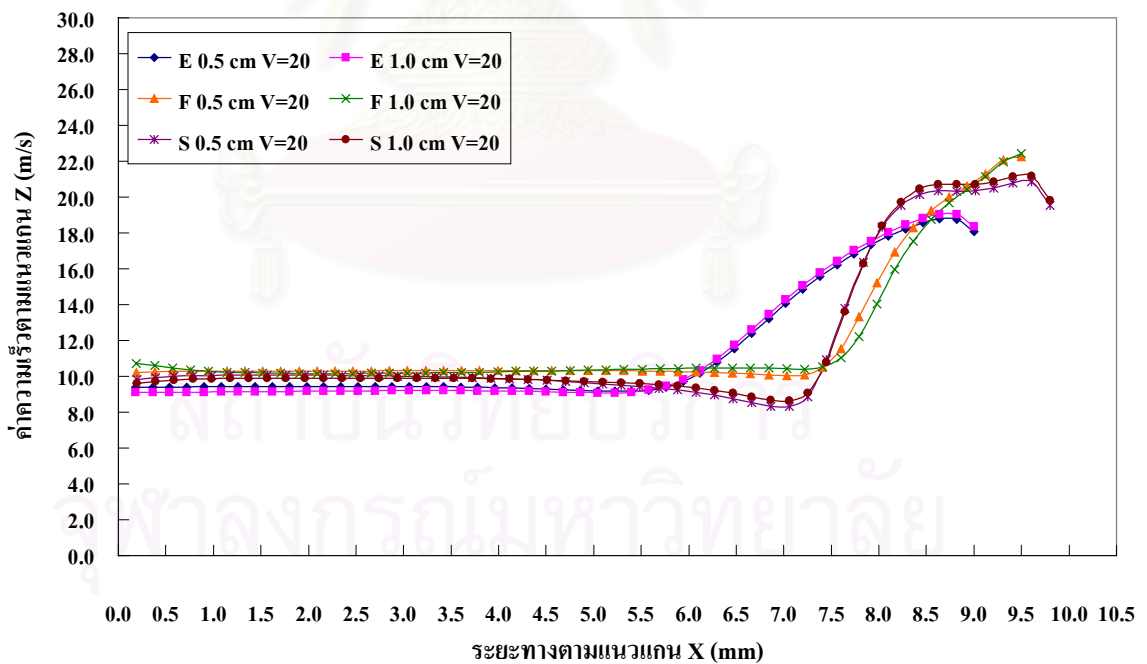
รูปที่ 6.102 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 1$



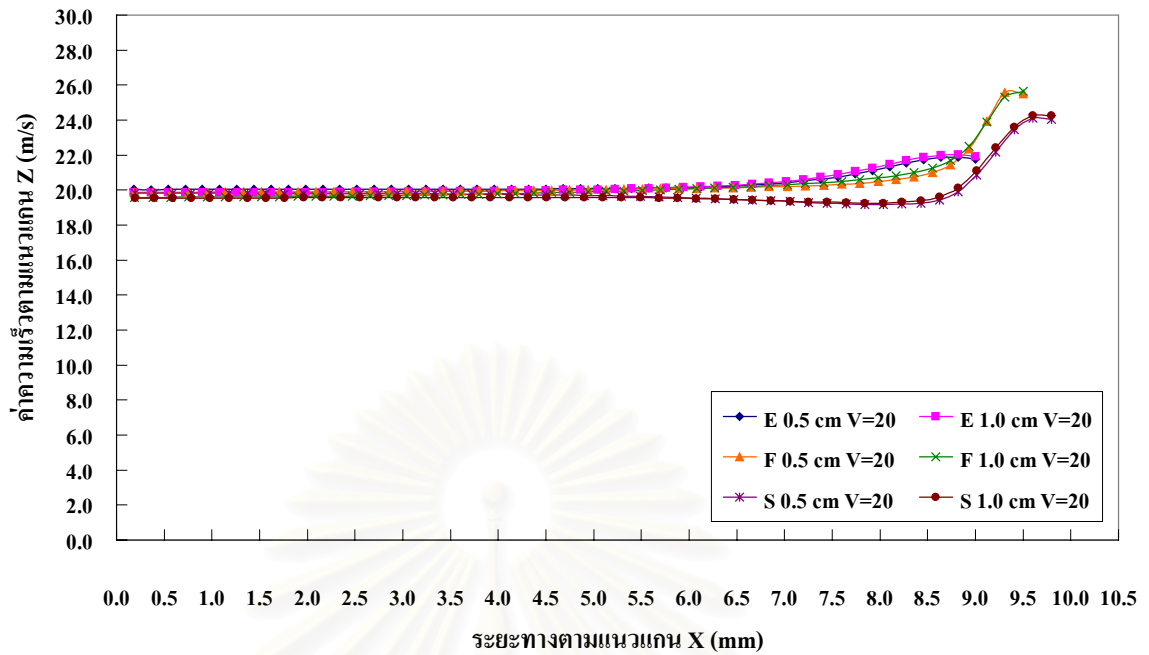
รูปที่ 6.103 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ด้าน $IY = 5$



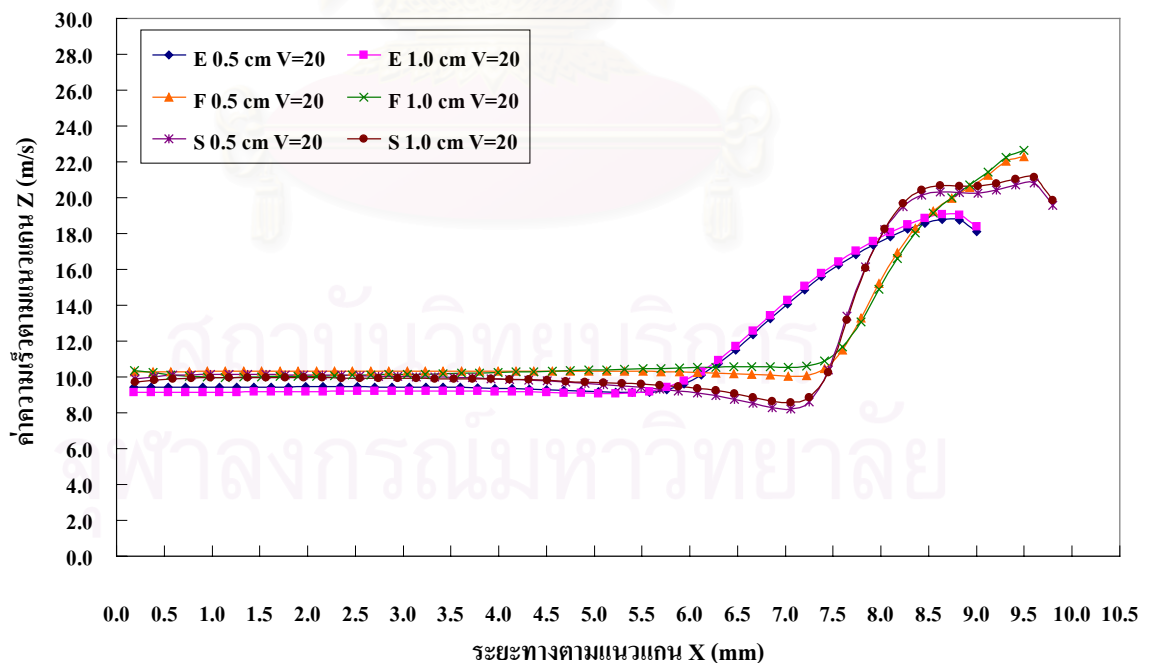
รูปที่ 6.104 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 35 และ IZ = 30 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน IY = 10



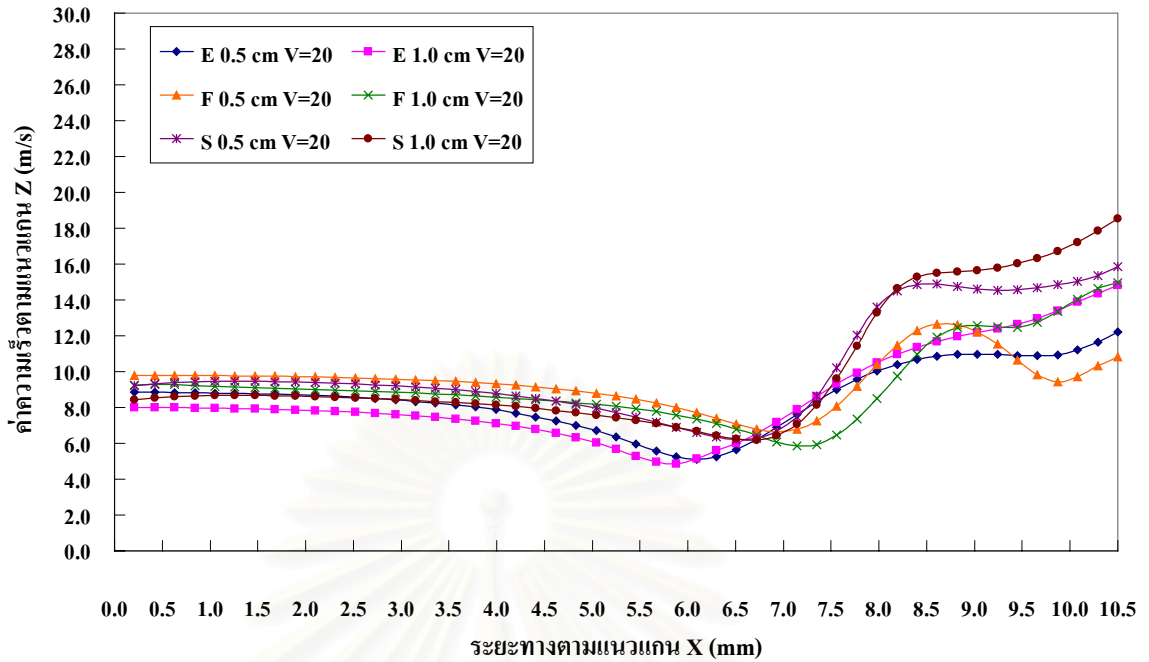
รูปที่ 6.105 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 40 และ IZ = 35 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน IY = 1



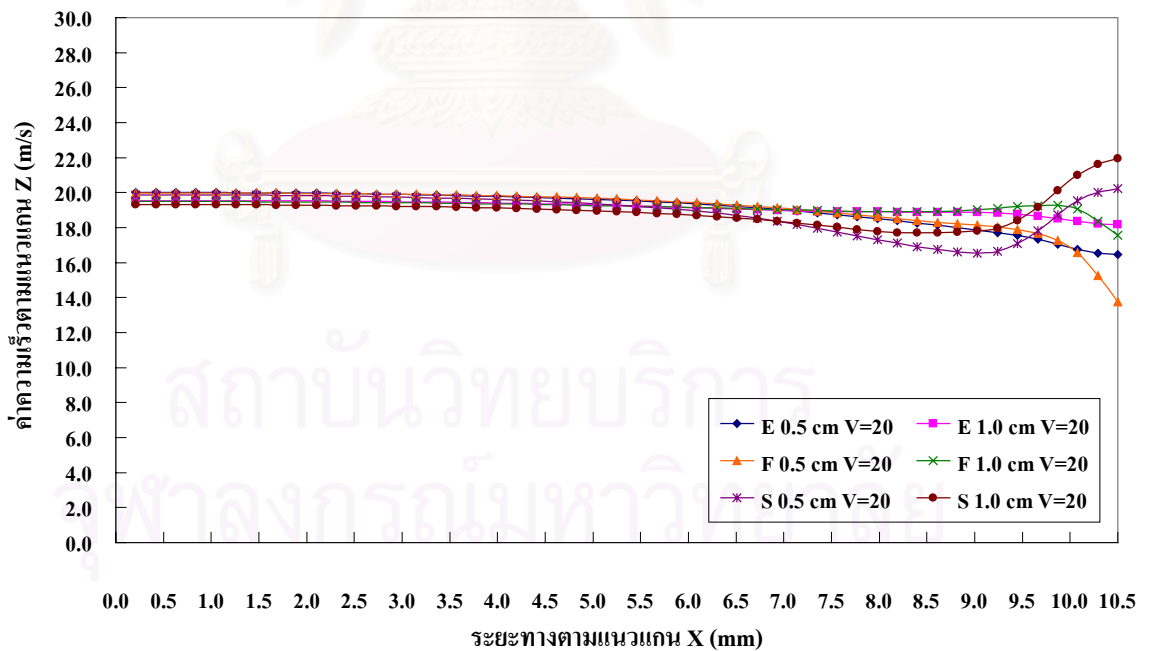
รูปที่ 6.106 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $I_Z = 40$ และ $I_Z = 35$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน แผ่น ด้าน $I_Y = 5$



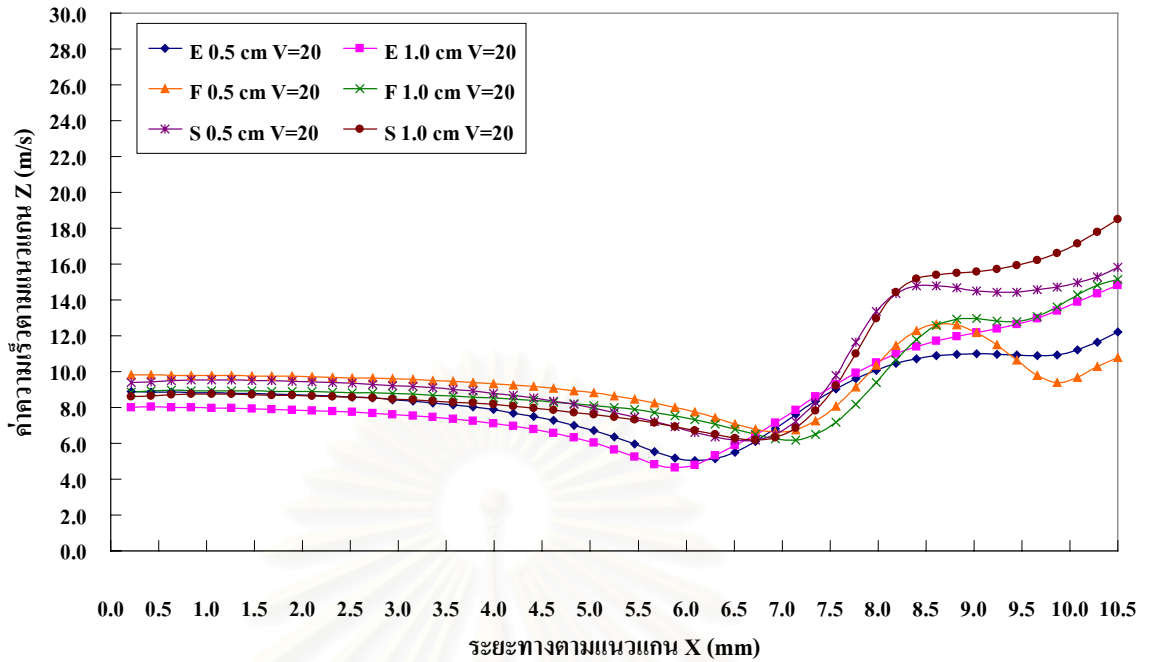
รูปที่ 6.107 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $I_Z = 40$ และ $I_Z = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบน แผ่น ด้าน $I_Y = 10$



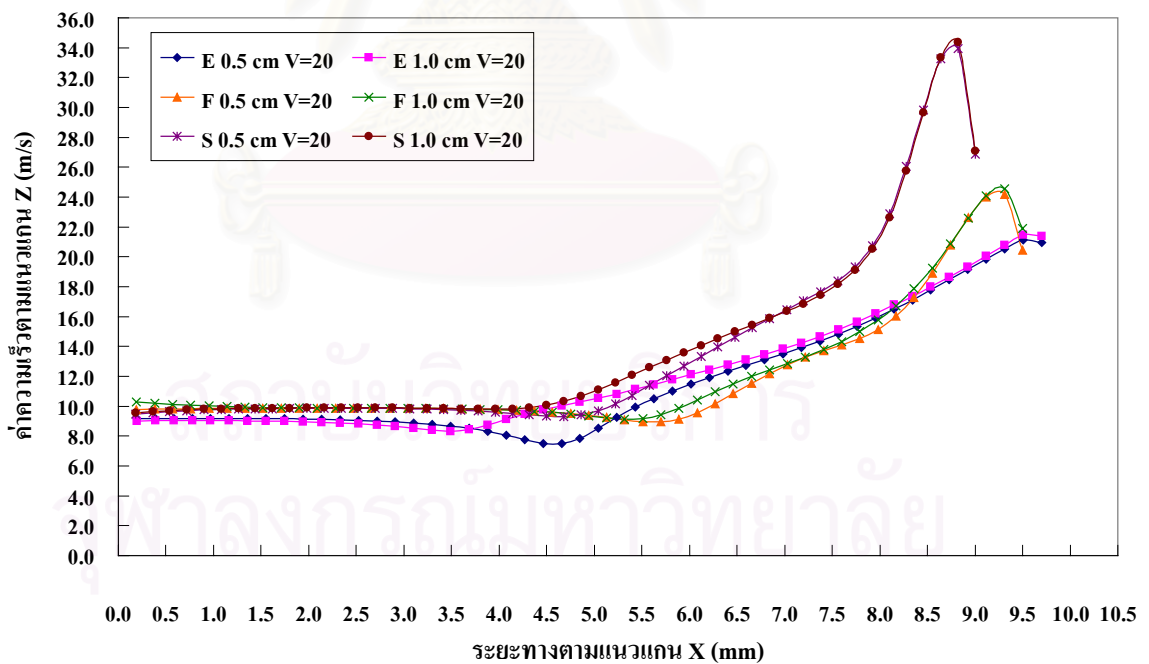
รูปที่ 6.108 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนแผ่นด้าน $IY = 1$



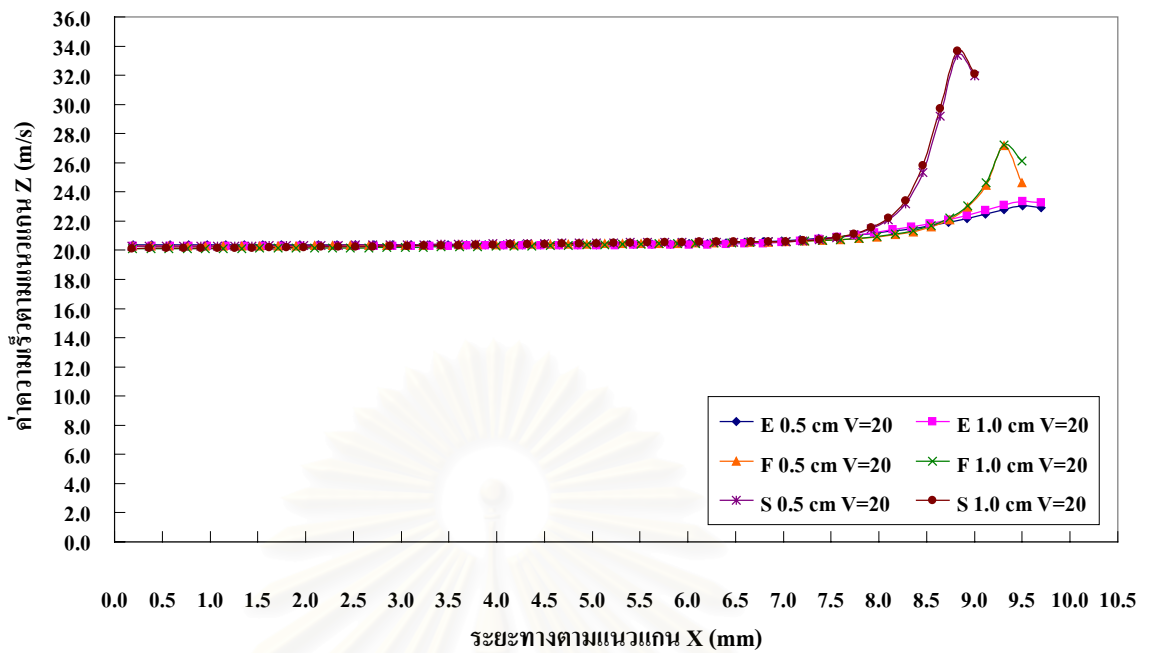
รูปที่ 6.109 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนแผ่นด้าน $IY = 5$



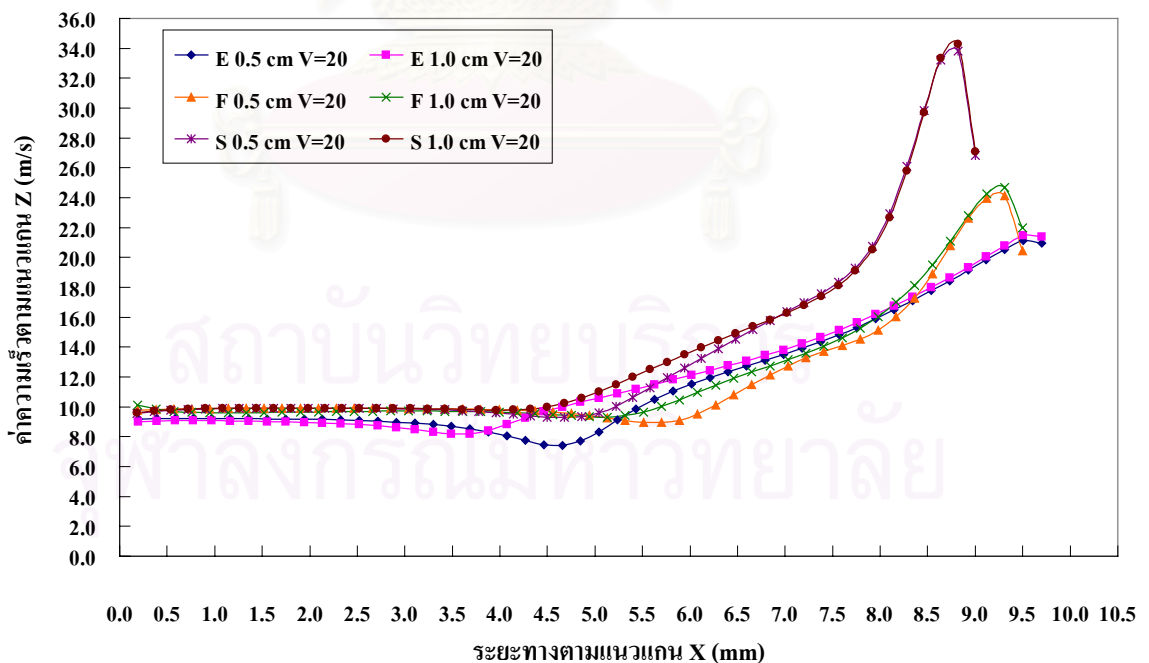
รูปที่ 6.110 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนพื้นด้าน $IY = 10$



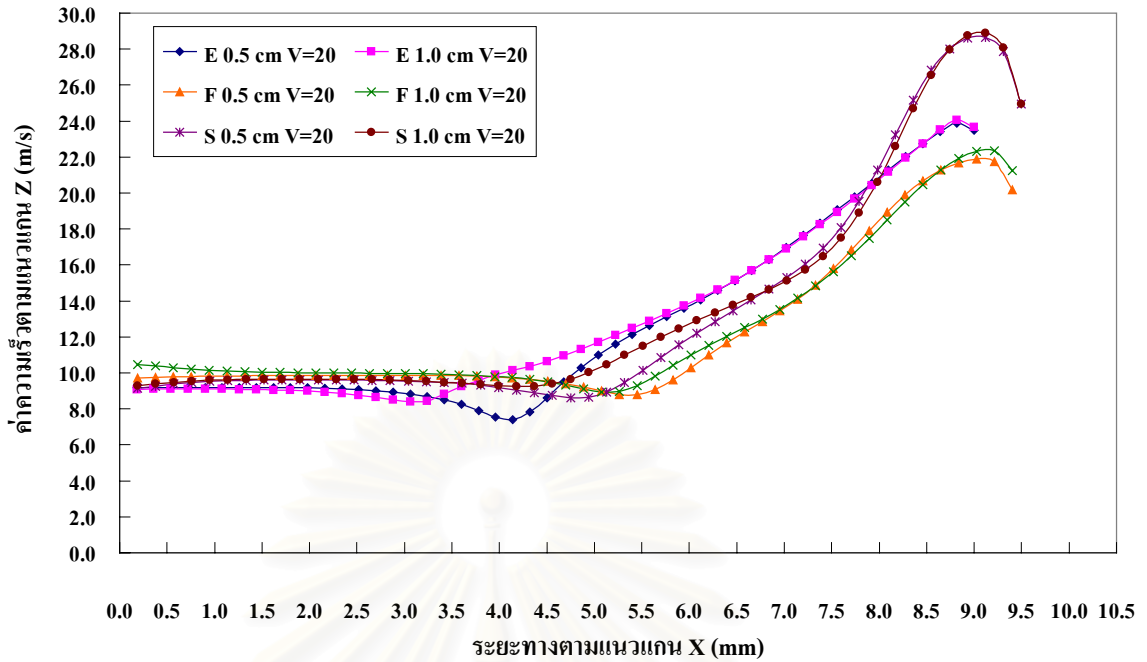
รูปที่ 6.111 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนพื้นด้าน $IY = 1$



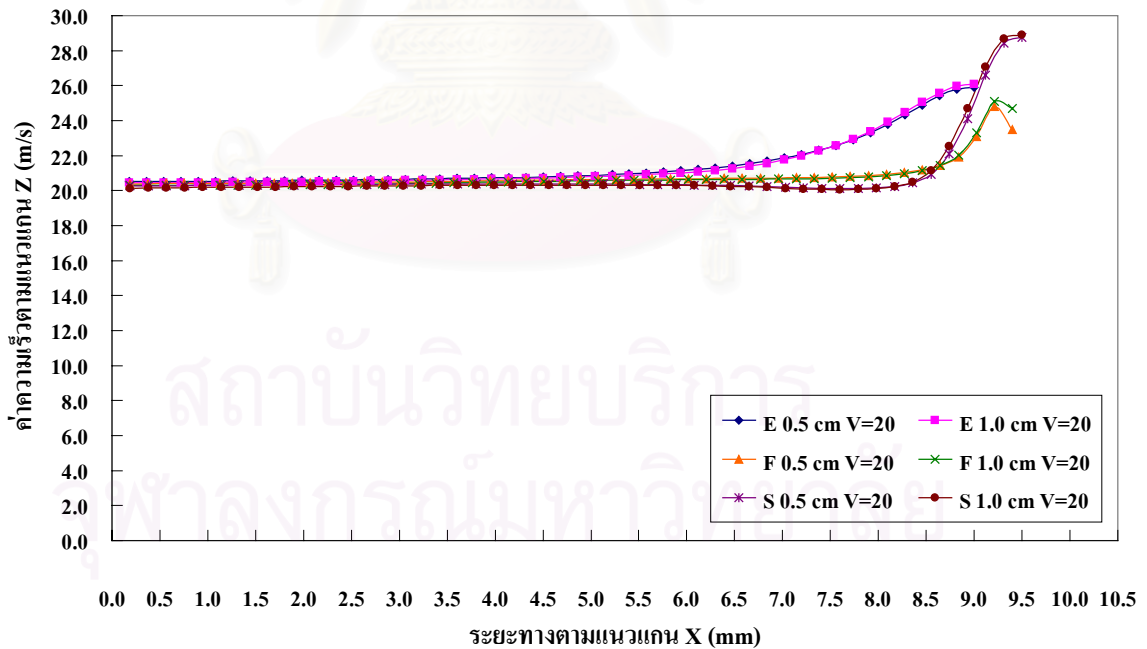
รูปที่ 6.112 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $I_Z = 60$ และ $I_Z = 65$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบแผ่น ด้าน $I_Y = 5$



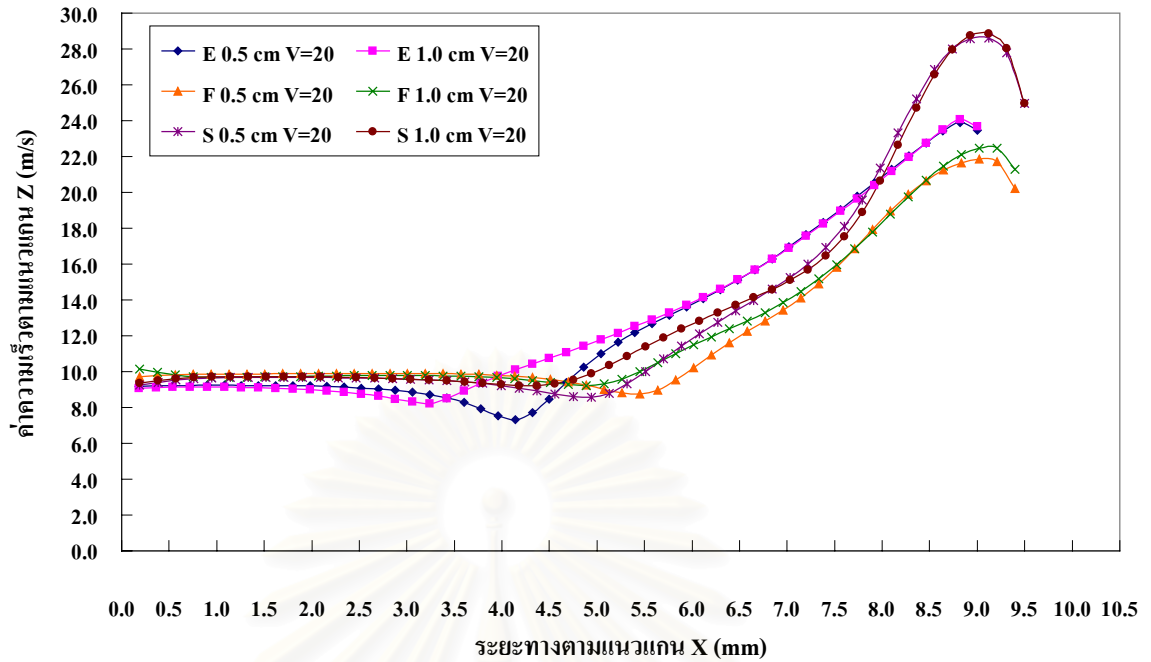
รูปที่ 6.113 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $I_Z = 60$ และ $I_Z = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $I_Y = 10$



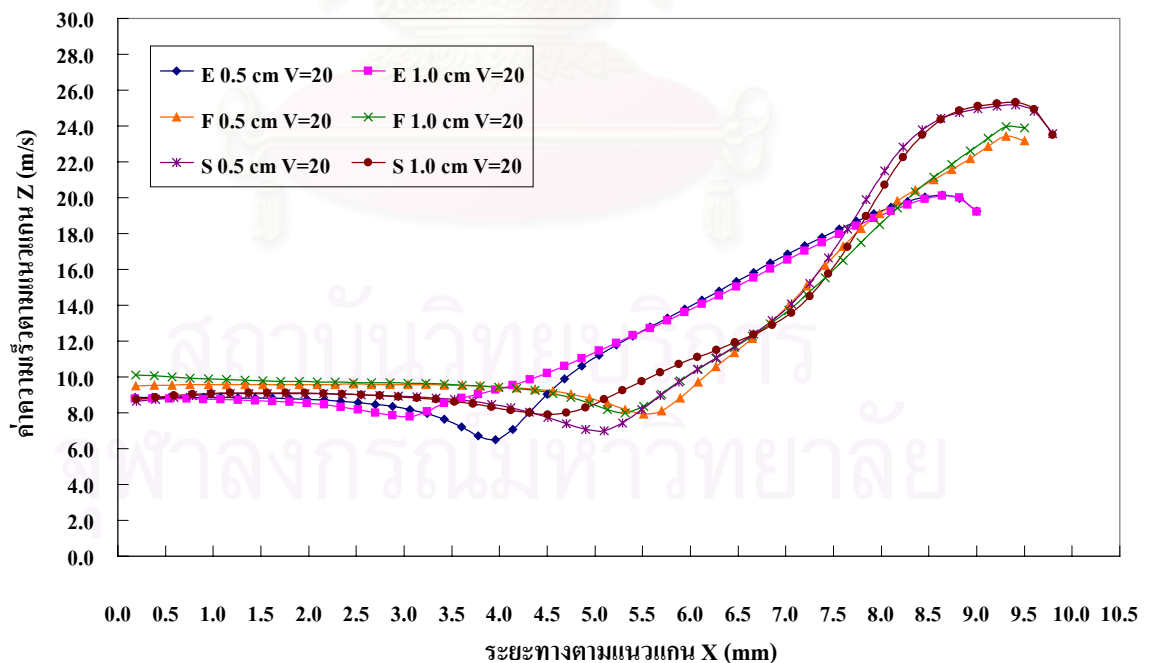
รูปที่ 6.114 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$



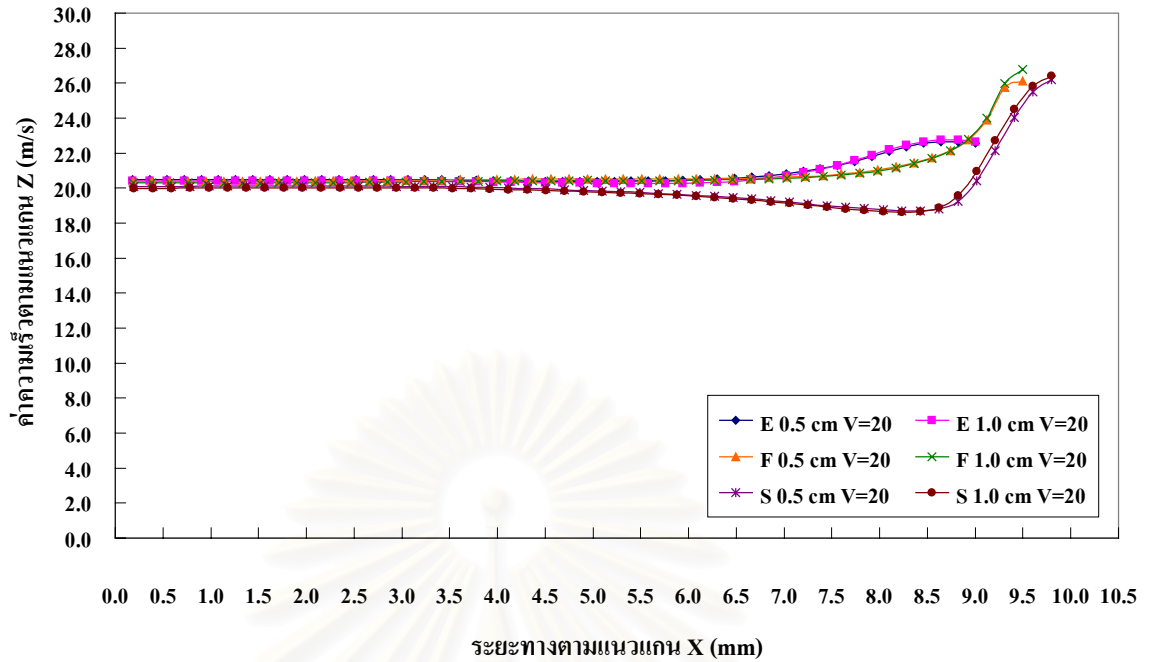
รูปที่ 6.115 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน $IY = 5$



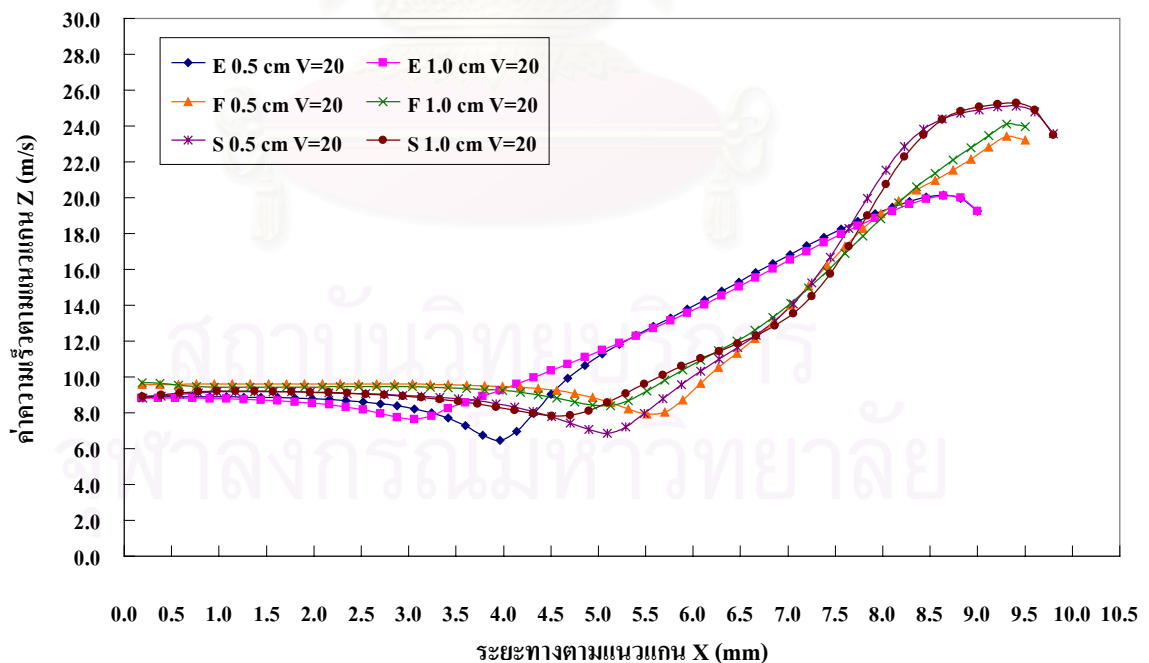
รูปที่ 6.116 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบนแผ่น ด้าน $IY = 10$



รูปที่ 6.117 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบนแผ่นด้าน $IY = 1$



รูปที่ 6.118 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $I_Z = 70$ และ $I_Z = 75$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $I_Y = 5$



รูปที่ 6.119 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศ สำหรับ กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $I_Z = 70$ และ $I_Z = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $I_Y = 10$

จากรูปที่ 6.78 ถึง 6.119 ได้แสดงค่าความเร็วของอากาศตามตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน Z ที่กำหนดไว้ข้างต้น โดยพิจารณาค่าตำแหน่งตามแนวแกน Y จำนวน 3 ตำแหน่ง ดังนี้ คือ บริเวณใกล้ผนังครึ่งปีนแผ่นทั้งสองด้าน ($IY = 1$ และ $IY = 10$) และ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครึ่งปีนแผ่น ($IZ = 5$) โดยจะทำการเปรียบเทียบกันในแต่ละระยะห่างระหว่างท่อกับรูปทรงของท่อที่แตกต่างกัน

เมื่อทำการพิจารณากราฟที่แสดงค่าความเร็วของอากาศที่ตำแหน่ง $IZ = 30, 35, 40$ สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และที่ตำแหน่ง $IZ = 25, 30, 35$ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณท่อแรก สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศมีค่าเท่ากับ 15 เมตร/วินาที และที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครึ่งปีนแผ่น พบว่าค่าความเร็วของอากาศ ที่ตำแหน่งทั้ง 3 ข้างต้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากเมื่ออากาศไหลผ่านผิวท่อรูปทรงวงรี และไหลผ่านผิวท่อรูปทรงหยดน้ำ ตลอดระยะทางตามแนวแกน X แต่เมื่อทำการพิจารณาที่รูปทรงแบน พบว่าที่บริเวณใกล้ผนังครึ่งปีนแผ่นทั้งสองด้าน ($IY = 1$ และ $IY = 10$) ค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบนของระยะห่างระหว่างท่อทั้ง 2 กรณี มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย และเมื่อทำการพิจารณาค่าความเร็วของอากาศที่ถูกเร่งให้มีเพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่านผิวท่อ ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ พบว่า ค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงหยดน้ำ > ท่อรูปทรงแบน > ท่อรูปทรงวงรี ตามลำดับ ส่วนที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ พบว่าค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงหยดน้ำ > ท่อรูปทรงวงรี > ท่อรูปทรงแบน ตามลำดับ และที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ พบว่าค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบน > ท่อรูปทรงหยดน้ำ > ท่อรูปทรงวงรี ตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณาที่ตำแหน่งกึ่งกลางระยะห่างระหว่างท่อ ($IZ = 50$) พบว่าค่าความเร็วของอากาศมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้อย่างชัดเจน โดยที่ค่าความเร็วของอากาศ ณ บริเวณใกล้ผนังครึ่งปีนแผ่นทั้งสองด้านของกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร จะมีค่าสูงกว่ากรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร แต่เมื่อระยะทางตามแนวแกน X มากกว่า 7.5, 8.0, และ 8.75 มิลลิเมตร สำหรับท่อรูปทรงวงรี, ท่อรูปทรงหยดน้ำ, และท่อรูปทรงแบน ตามลำดับ ค่าความเร็วของอากาศ ณ บริเวณใกล้ผนังครึ่งปีนแผ่นทั้งสองด้านของกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร จะกลับมีค่าสูงกว่ากรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และเมื่อพิจารณาค่าความเร็วของอากาศที่บริเวณด้านหลังท่อ ($9.0 < X < 10.5$) ของบริเวณใกล้ผนังครึ่งปีนแผ่นทั้งสองด้าน พบว่า ค่าความเร็วบริเวณด้านหลังท่อรูปทรงหยดน้ำ (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (1.0 เซนติเมตร) ~ ท่อรูปทรงแบน (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (0.5 เซนติเมตร) ตามลำดับ ส่วนค่าความเร็วของอากาศ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครึ่งปีนแผ่นของทั้งสองกรณี จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะทางตามแนวแกน X มากกว่า 7.0 มิลลิเมตร สำหรับท่อรูปทรงหยดน้ำ และ 7.5 มิลลิเมตร สำหรับท่อรูปทรงวงรี และท่อรูปทรงแบน ค่าความเร็วของอากาศกรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร จะกลับมีค่าสูงกว่ากรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร

เมื่อทำการพิจารณาค่าความเร็วของอากาศบริเวณท่ออันที่สอง ที่ตำแหน่ง $IZ = 60, 65, 70$ สำหรับกรณีทีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และที่ตำแหน่ง $IZ = 65, 70, 75$ สำหรับกรณีทีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร พบว่าลักษณะการไหลของอากาศบริเวณใกล้ผนังครีบนั่นทั้งสองด้าน ($IY = 1$ และ $IY = 10$) จะแตกต่างกับการไหลของอากาศบริเวณท่ออันที่หนึ่งอย่างชัดเจน โดยเฉพาะความเร็วของอากาศทีระยะทางตามแนวแกน X ตั้งแต่ 3.0 ถึง 7.0 เซนติเมตร ของท่อทั้งสามรูปทรง จะมีค่าแตกต่างกันเมื่อระยะห่างระหว่างท่อเปลี่ยนแปลง โดยทีค่าความเร็วของอากาศกรณีทีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร มีค่าทีต่ำกว่าค่าความเร็วของอากาศกรณีทีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร และมีค่าทีสูงกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วของอากาศทีไหลผ่านผิวท่ออันที่หนึ่ง ส่วนลักษณะการไหลของอากาศบริเวณกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างครีบนั่น จะมีความคล้ายคลึงกับการไหลของอากาศบริเวณท่ออันที่หนึ่งแต่มีค่าทีสูงกว่า และเมื่อทำการพิจารณาค่าความเร็วของอากาศทีถูกร่งให้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่านผิวท่อในแต่ละรูปทรง พบว่าทีตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ จะได้ผลเหมือนกับทีตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 35$ ตามลำดับ สำหรับกรณีทีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ จะได้ผลเหมือนกับ $IZ = 25$ และ $IZ = 30$ ตามลำดับ สำหรับกรณีทีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ส่วนทีตำแหน่ง $IZ = 70(0.5$ เซนติเมตร) และ $IZ = 75(1.0$ เซนติเมตร) พบว่าค่าความเร็วของอากาศทีไหลผ่านผิวท่อรูปทรงหยดน้ำ > ท่อรูปทรงแบน > ท่อรูปทรงวงรี ตามลำดับ ซึ่งผลทีได้จะแตกต่างกับทีตำแหน่ง $IZ = 40(0.5$ เซนติเมตร) และ $IZ = 35(1.0$ เซนติเมตร) ตามลำดับ

เมื่อความเร็วขาเข้าของอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 20 เมตร/วินาที พบว่าลักษณะการไหลผ่านผิวท่อแต่ละรูปทรงของอากาศ ยังคงคล้ายคลึงกับกรณีทีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 15 เมตร/วินาที แต่จะมีค่าทีสูงกว่า และจะให้เห็นความแตกต่างกันของค่าความเร็วของอากาศทีไหลผ่านผิวท่อในแต่ละรูปทรงได้ชัดเจนมากกว่ากรณีแรก โดยเฉพาะทีบริเวณท่อทั้งสองอัน พบว่าค่าความเร็วของอากาศทีไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบน ทีระยะทางตามแนวแกน X ตั้งแต่ 0 ถึง 5.5 มิลลิเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังครีบนั่นทั้งสองด้าน ($IY = 1$ และ $IY = 10$) จะมีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วของอากาศทีไหลผ่านผิวท่อรูปทรงวงรี และท่อรูปทรงหยดน้ำ ซึ่งผิดกับกรณีแรกทีมีค่าทีสูงกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนทีบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบนั่น ลักษณะการไหลทีเกิดขึ้นไม่แตกต่างไปจากกรณีแรกเลย เมื่อทำการพิจารณาค่าความเร็วของอากาศทีถูกร่งให้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่านผิวท่อทั้งสามรูปทรง พบว่ายังคงได้ผลเหมือนกับกรณีแรก ในทุกตำแหน่งตามแนวแกน Z ทีทำการพิจารณา

6.2.2.3 การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ

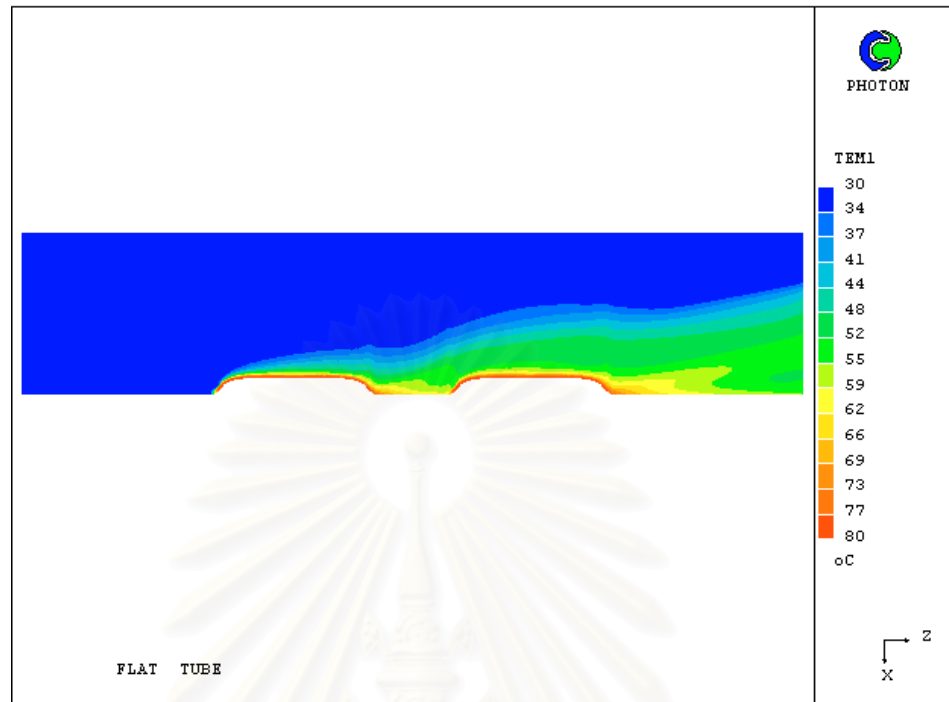
การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศ สำหรับงานวิจัยนี้จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อที่เป็นแหล่งความร้อน และมีรูปทรงต่างๆ กัน เมื่ออากาศมีความเร็วขาเข้าเท่ากับ 15 เมตร/วินาที ดังรูปที่ 6.120 ถึง 6.131 สำหรับระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ ดังรูปที่ 6.132 ถึง 6.143 สำหรับระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งจะแสดง Contour ของการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่บริเวณใกล้ครีปแผ่นทั้งสองแผ่น ($IY = 1$ และ $IY = 10$) และการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีปแผ่น ($IY = 5$) พร้อมทั้งได้แสดง Contour ของการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศในระนาบ XY ของแบบจำลอง โดยตำแหน่งที่นำมาแสดงนั้นมีดังนี้ $IZ = 25, 35, 45, 50, 55, 65, 75, 90$ สำหรับ กรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ $IZ = 20, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90$ สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร และส่วนที่สองเป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองแตกต่างกัน โดยการเปรียบเทียบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 15 เมตร/วินาที และกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 20 เมตร/วินาที ซึ่งการพิจารณาทั้งหมดจะเหมือนกันทั้งสามรูปทรงของท่อ โดยจุดที่นำมาพิจารณามีดังนี้ คือ $IZ = 30, 35, 40, 50, 60, 65, 70, 80, 90$ สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6.144 และ $IZ = 25, 30, 35, 50, 65, 70, 75, 85, 95$ สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6.145

การเปรียบเทียบจะแสดงอยู่ในรูปกราฟระหว่างค่าอุณหภูมิของอากาศกับระยะทางตามแนวแกน X โดยบริเวณที่นำมาพิจารณามีดังนี้ คือ

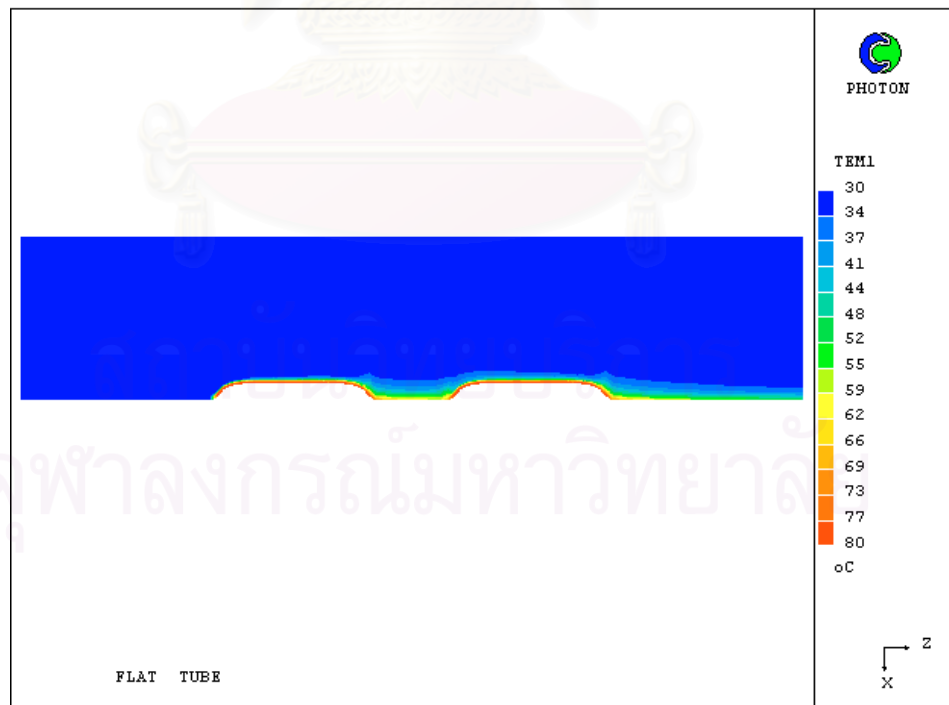
4. บริเวณใกล้ครีปแผ่นด้าน $IY = 1$
5. บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีปแผ่น ($IY = 5$)
6. บริเวณใกล้ครีปแผ่นด้าน $IY = 10$

โดยที่ทั้ง 3 บริเวณจะแสดงดังรูปที่ 6.146 ถึง 6.172 สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 15 เมตร/วินาทีและรูปที่ 6.173 ถึง 6.199 กรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 20 เมตร/วินาที

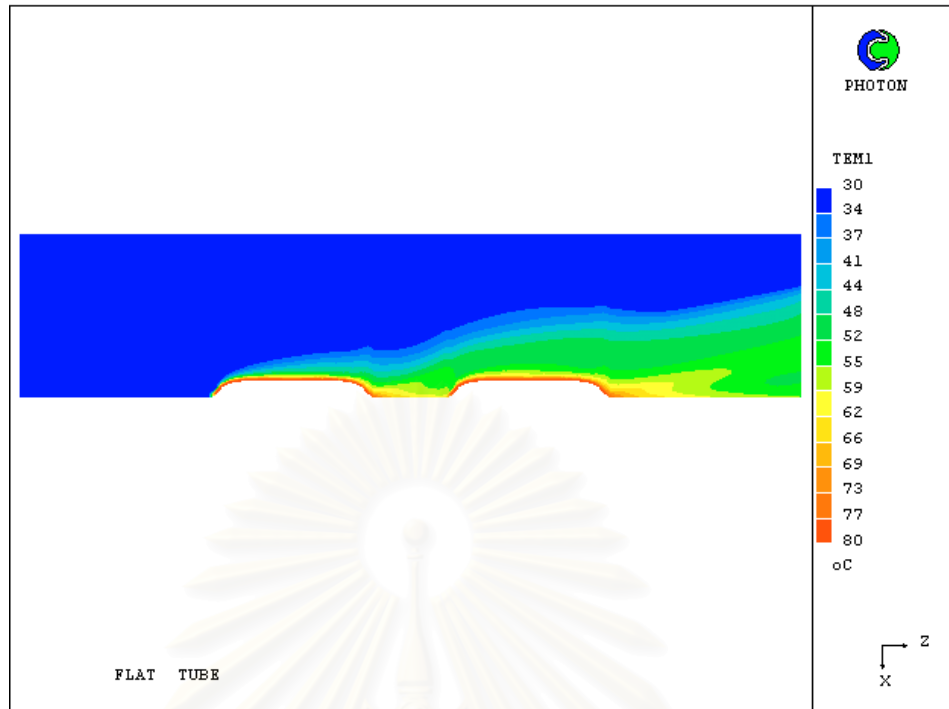
6.2.2.3.1 กรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



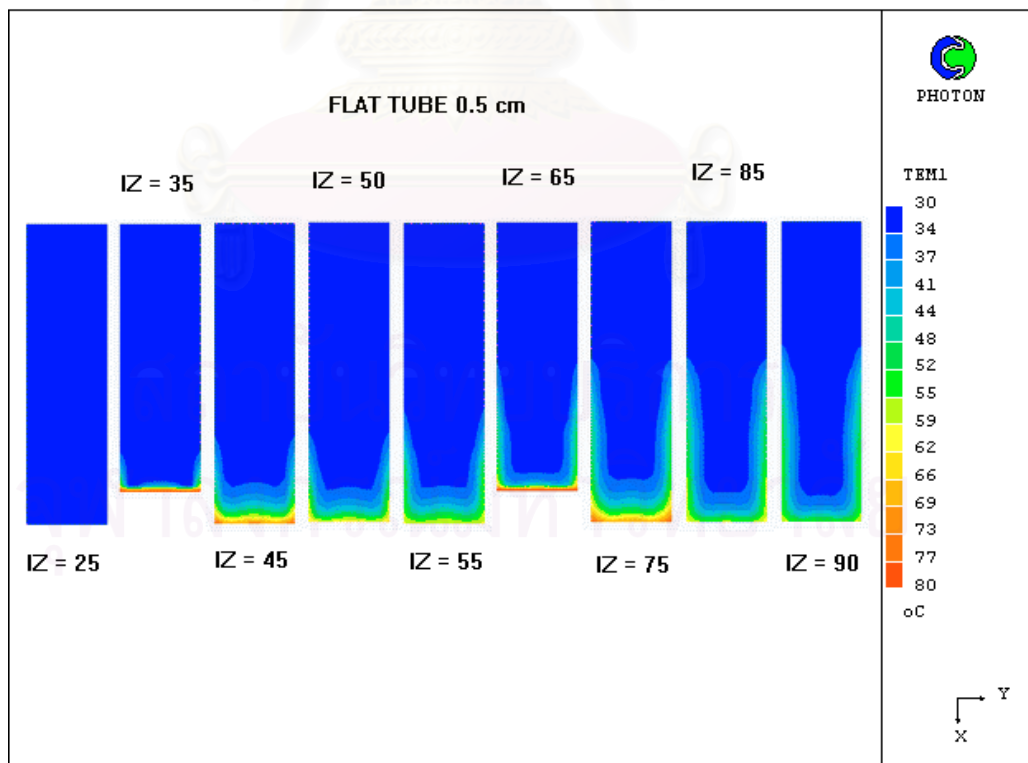
รูปที่ 6.120 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบบ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 1$



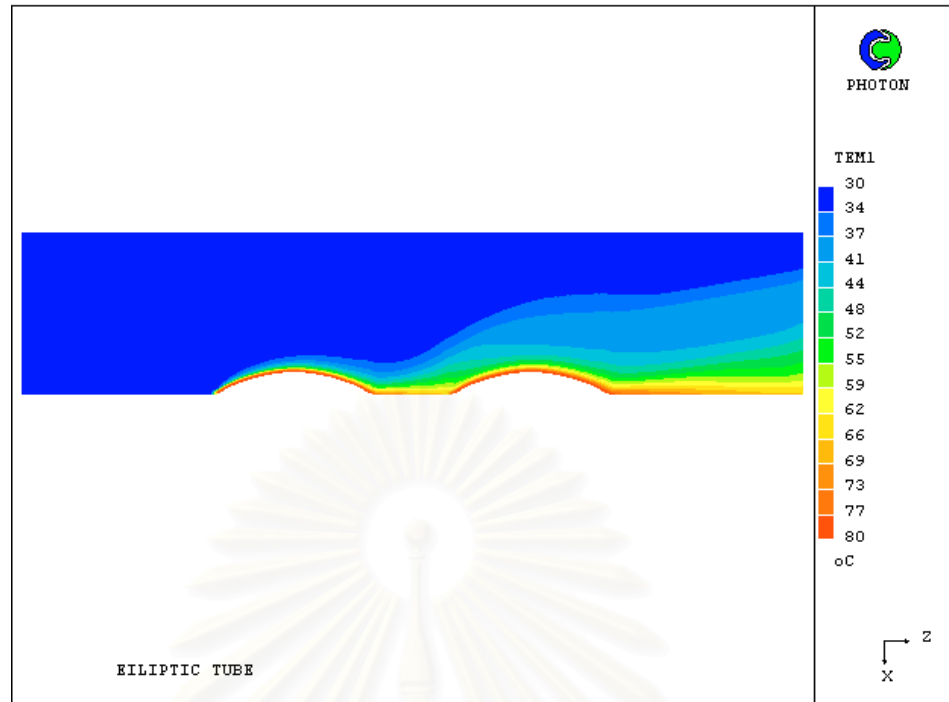
รูปที่ 6.121 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบบ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ($IY = 5$)



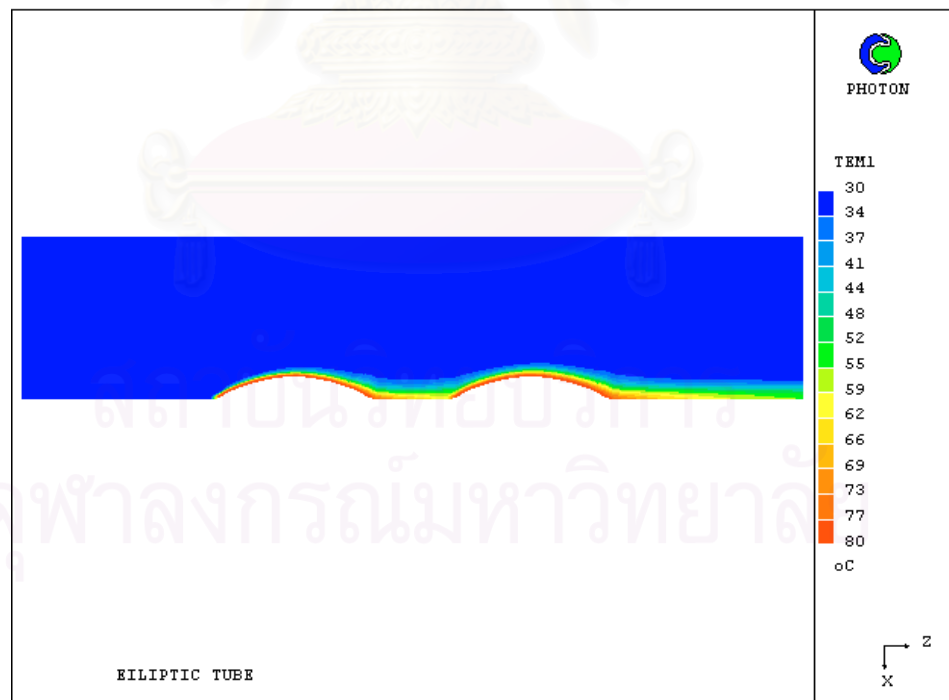
รูปที่ 6.122 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 10$



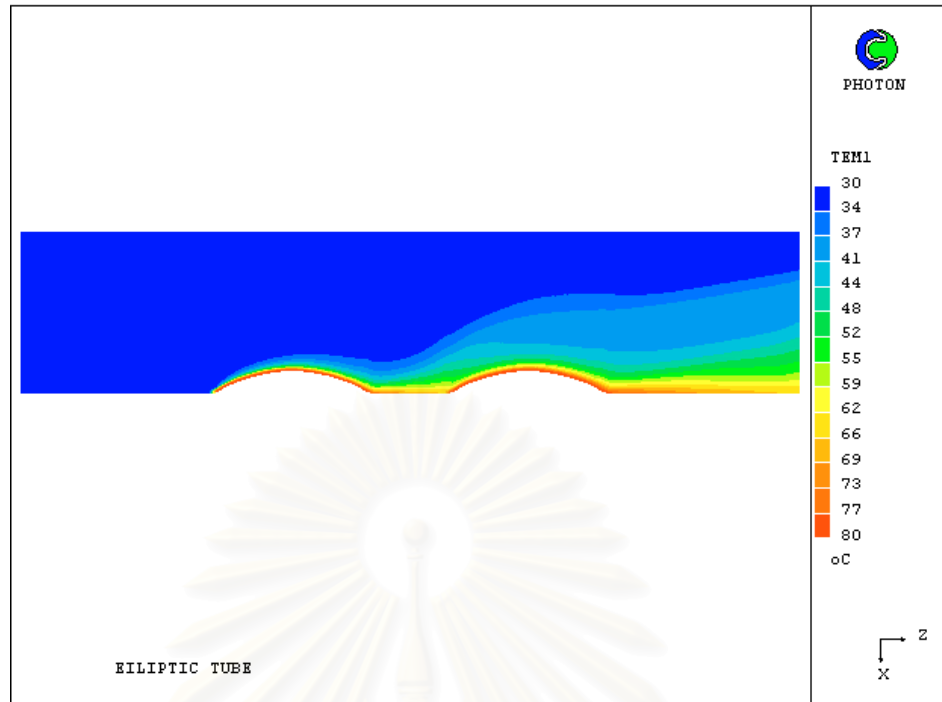
รูปที่ 6.123 การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ในระนาบ XY



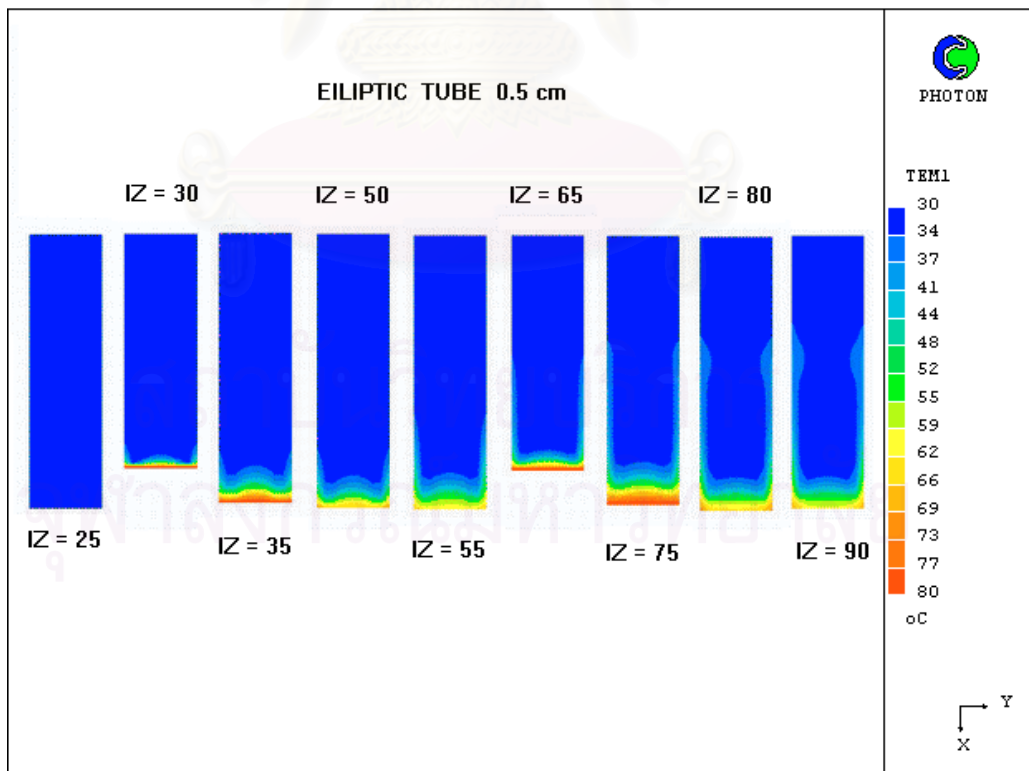
รูปที่ 6.124 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 1$



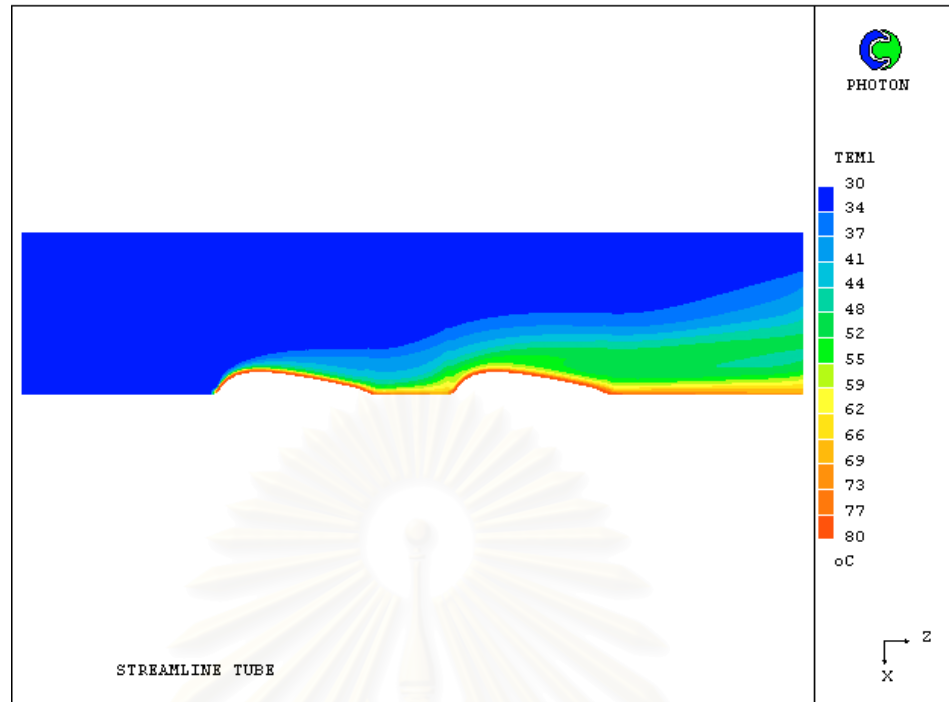
รูปที่ 6.125 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ($IY = 5$)



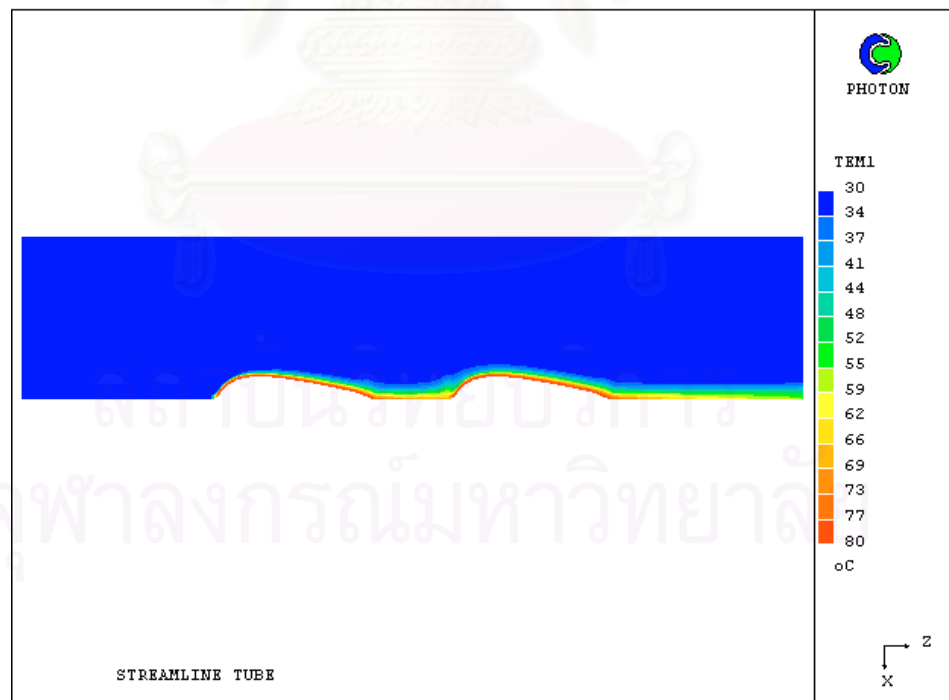
รูปที่ 6.126 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 10$



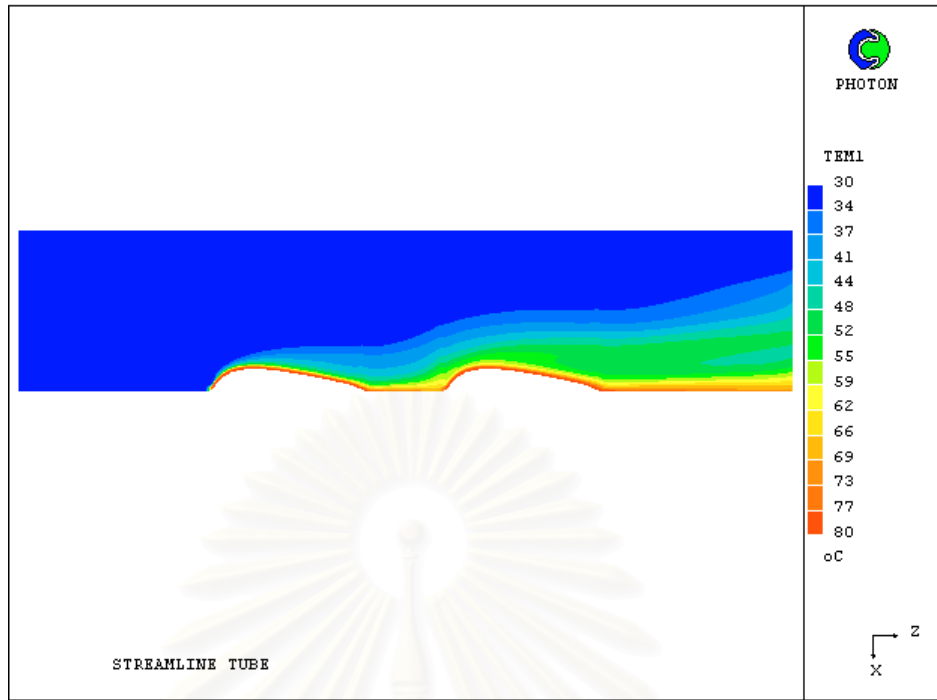
รูปที่ 6.127 การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ในระนาบ XY



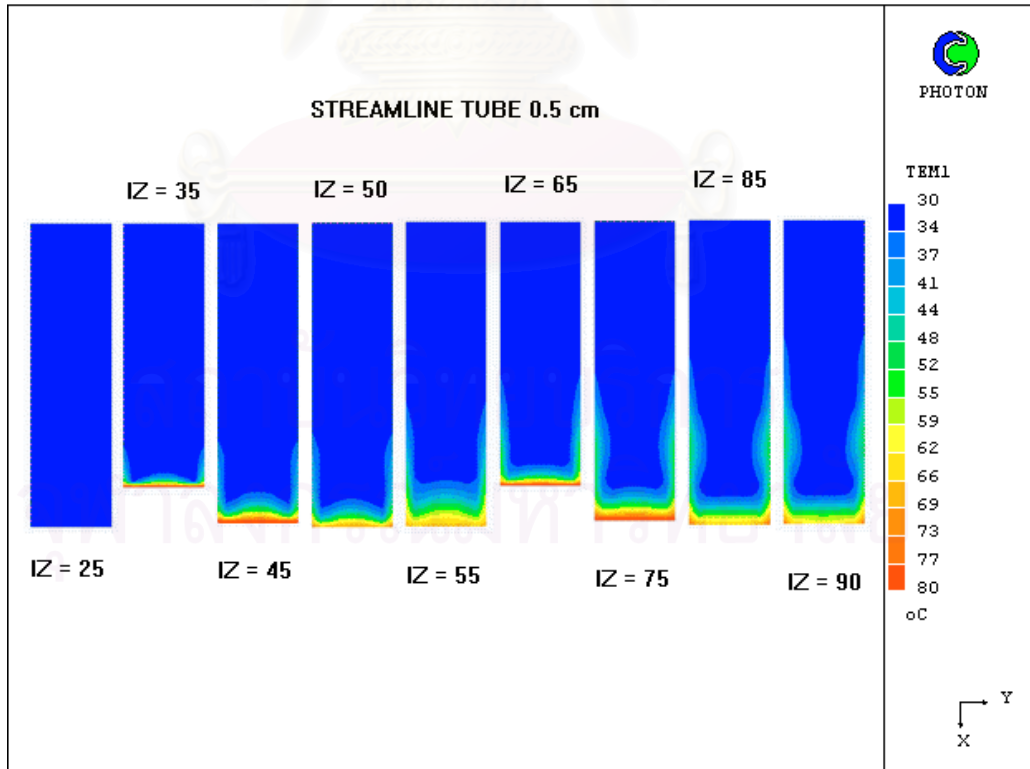
รูปที่ 6.128 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำและระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 1$



รูปที่ 6.129 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ($IY = 5$)

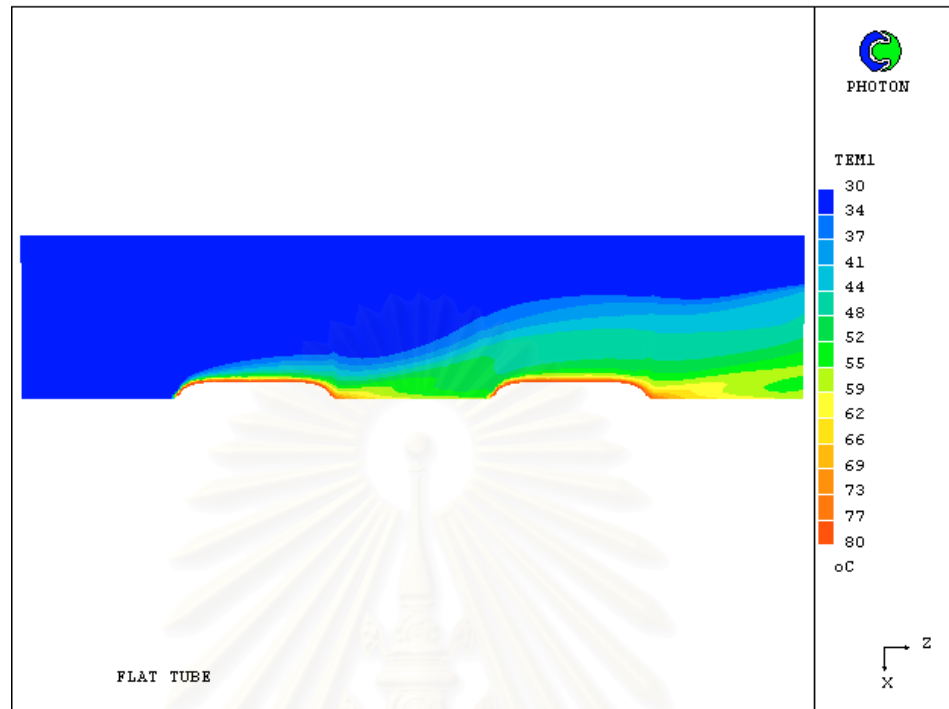


รูปที่ 6.130 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบนั่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำและระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบนั่น ด้าน $IY = 10$

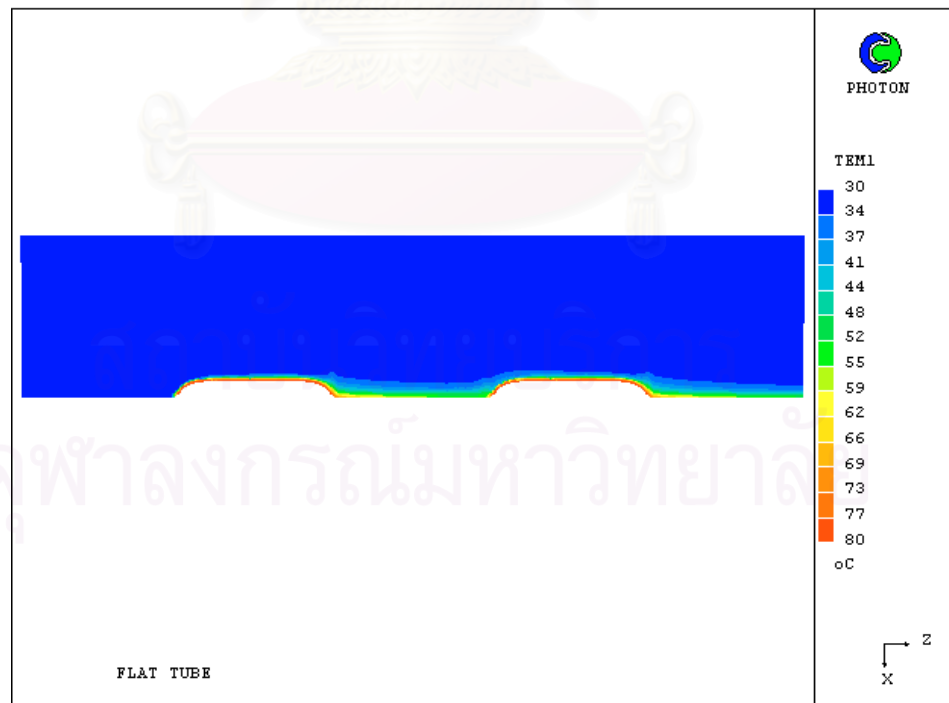


รูปที่ 6.131 การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบนั่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ในระนาบ XY

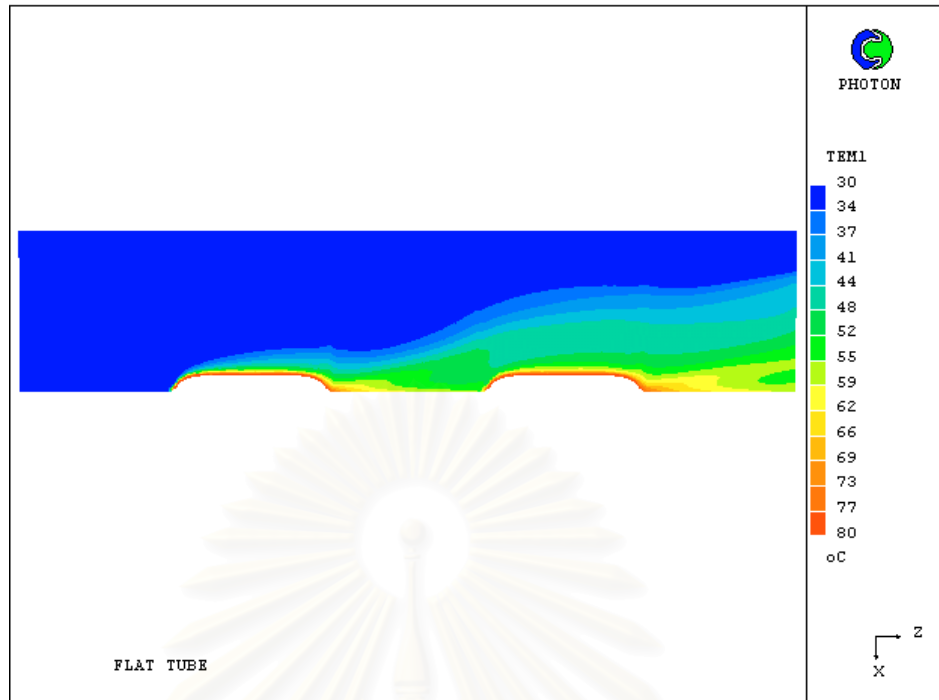
6.2.2.3.2 กรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร



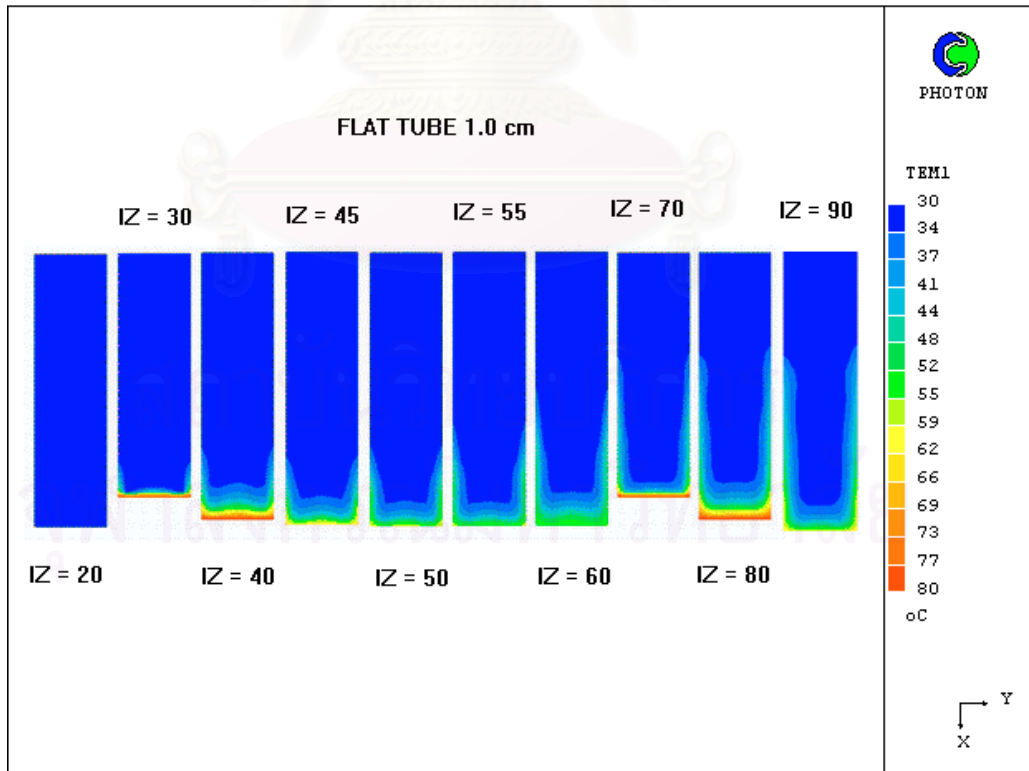
รูปที่ 6.132 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบบ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่น ด้าน $IY = 1$



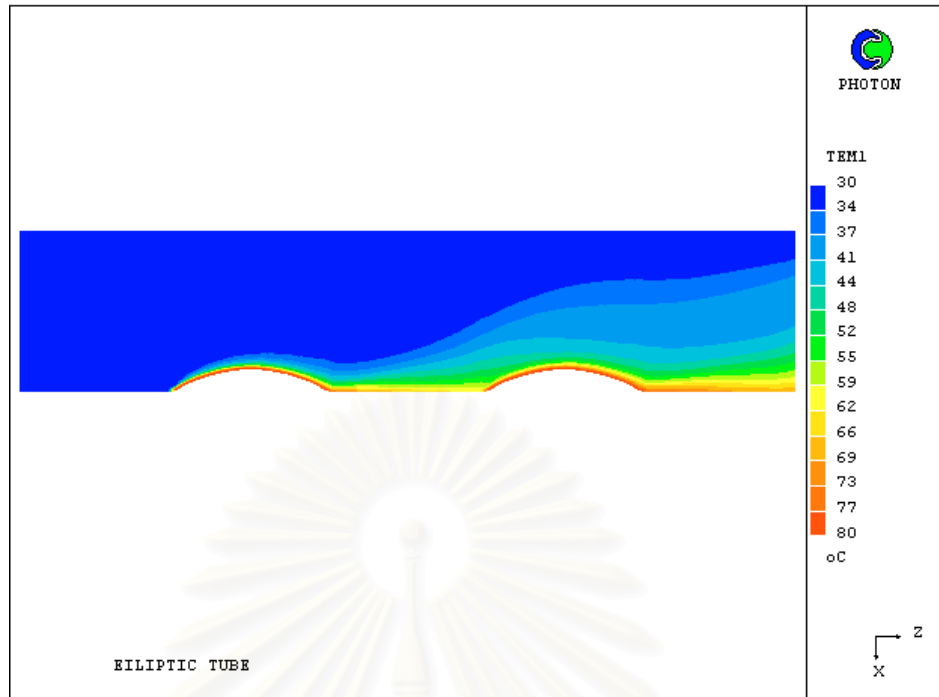
รูปที่ 6.133 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบบ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบแผ่น ($IY = 5$)



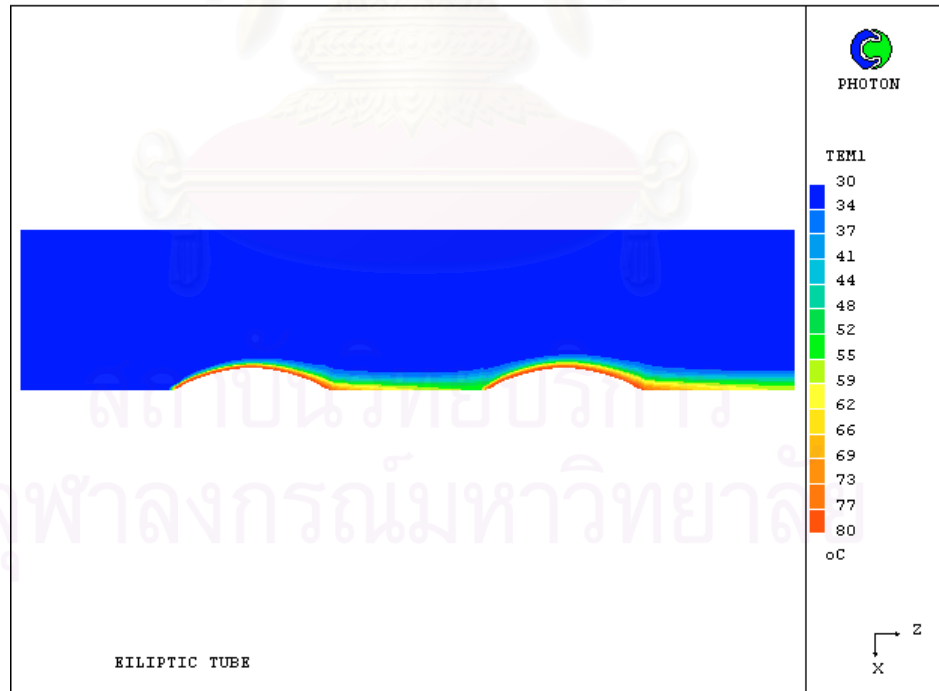
รูปที่ 6.134 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบนแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบนแผ่น ด้าน $IY = 10$



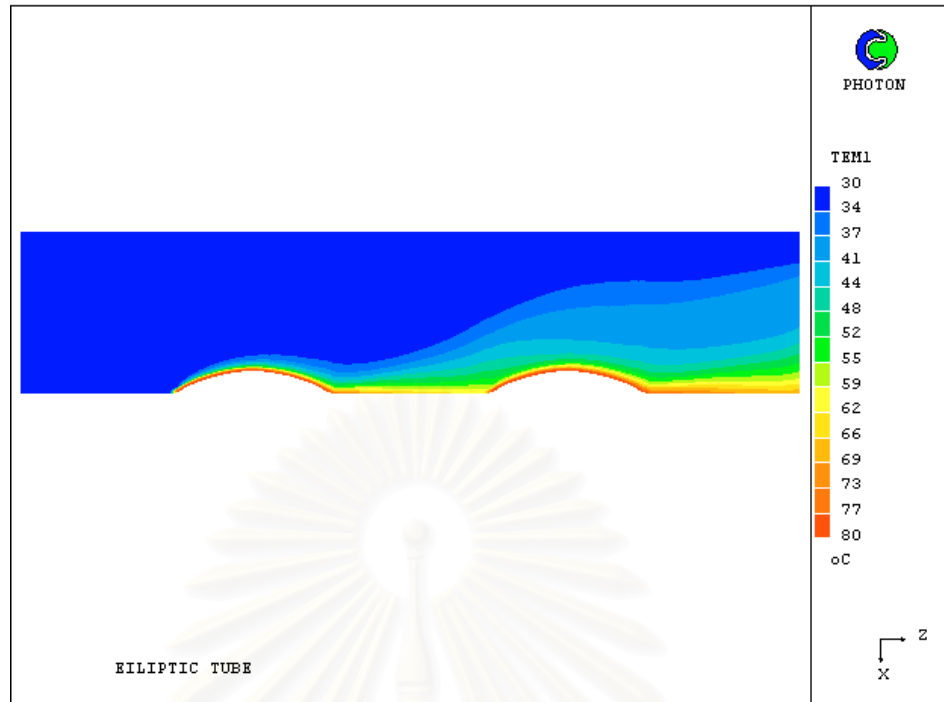
รูปที่ 6.135 การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบนแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงแบน และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ในระนาบ XY



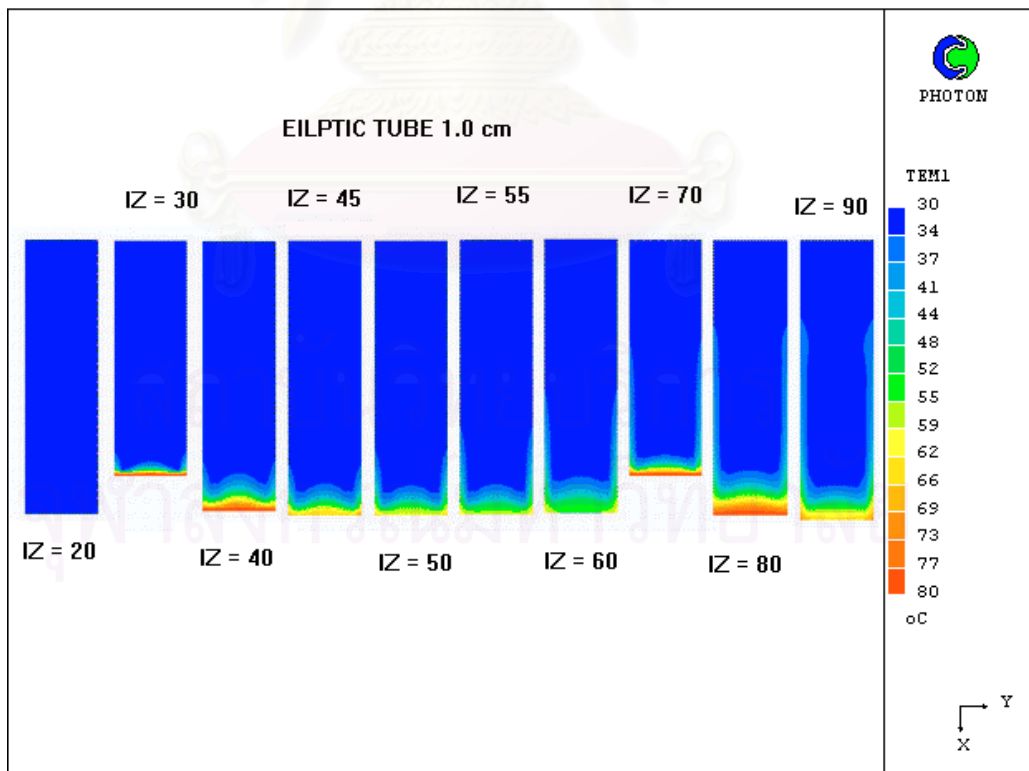
รูปที่ 6.136 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 1$



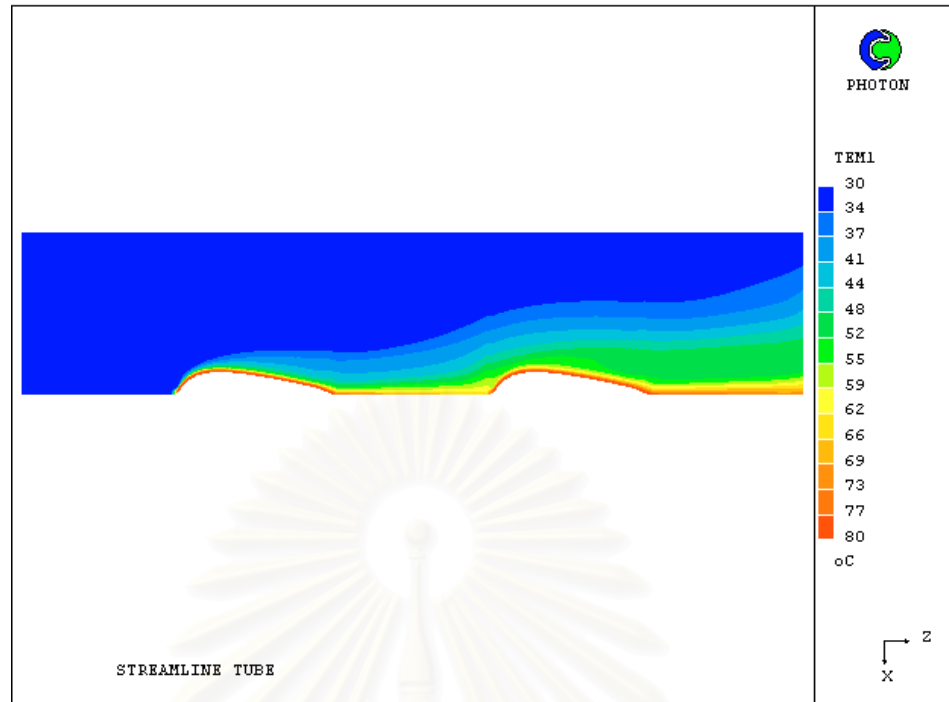
รูปที่ 6.137 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ($IY = 5$)



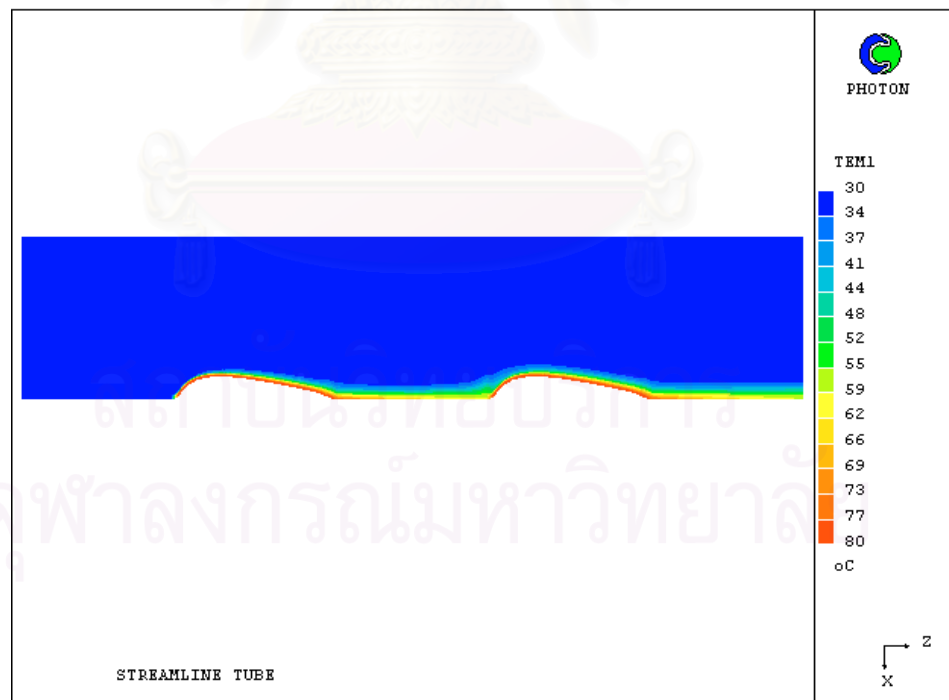
รูปที่ 6.138 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 10$



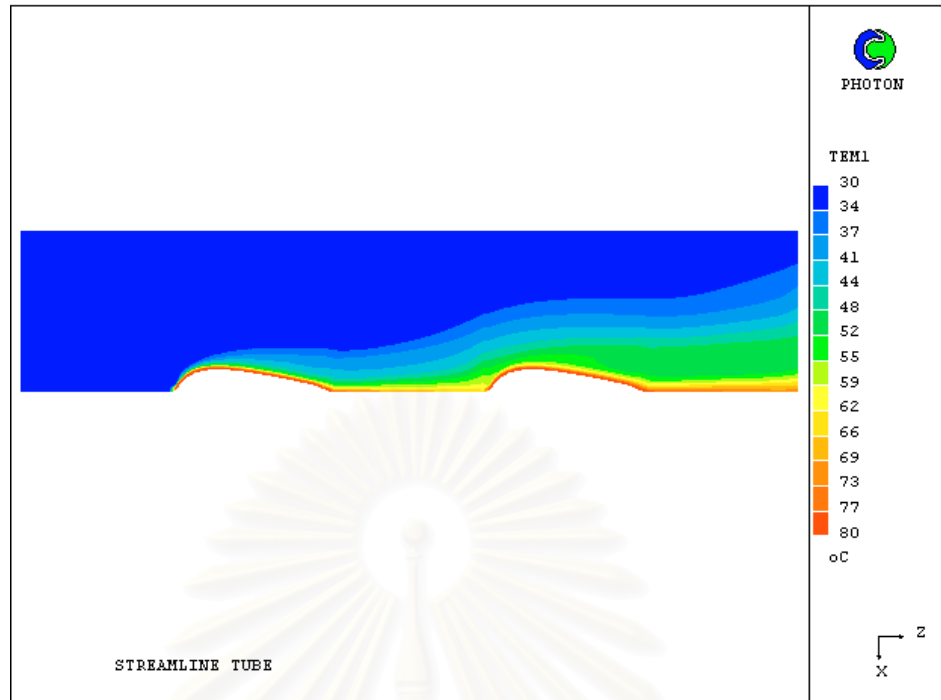
รูปที่ 6.139 การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงวงรี และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ในระนาบ XY



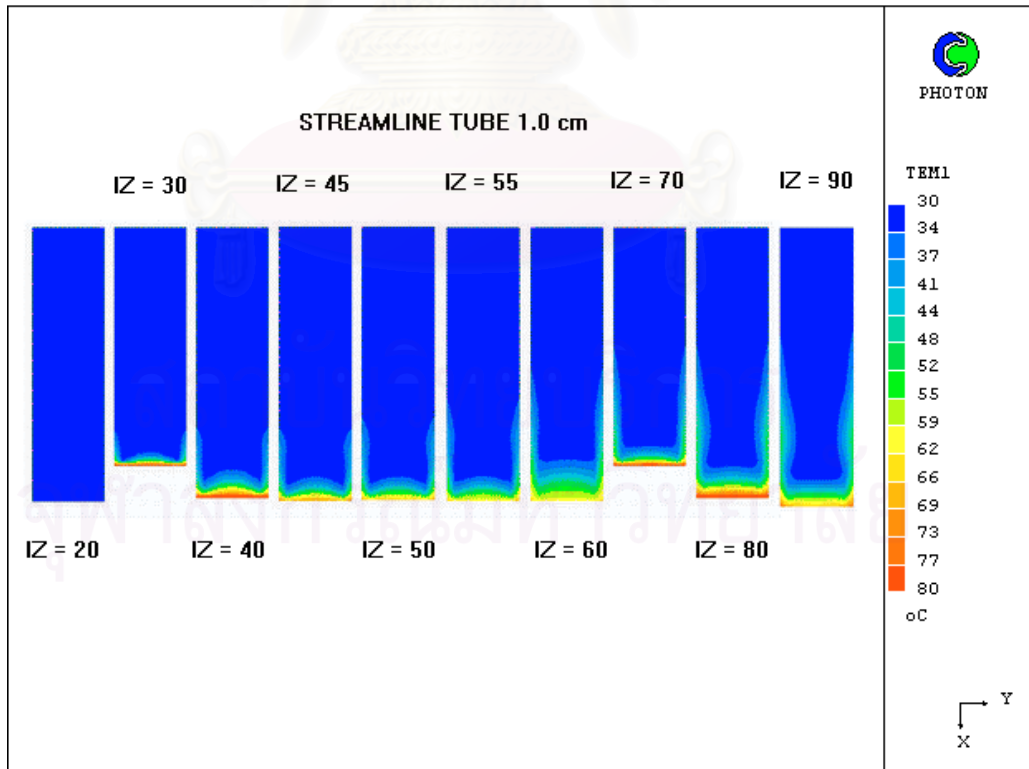
รูปที่ 6.140 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 1$



รูปที่ 6.141 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ($IY = 5$)



รูปที่ 6.142 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่น ด้าน $IY = 10$



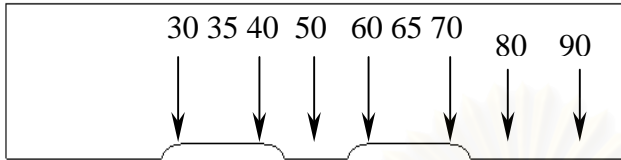
รูปที่ 6.143 การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น สำหรับกรณีท่อรูปทรงหยดน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ในระนาบ XY

จากรูป 6.120 ถึง 6.143 เป็นการแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อที่มีรูปทรงต่างกัน 3 รูปแบบ ดังนี้ คือท่อรูปทรงแบน ท่อรูปทรงวงรี และ ท่อรูปทรงหยดน้ำ ซึ่งเป็นแหล่งความร้อน จำนวน 2 ท่อ ด้วยการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน โดยมีระยะห่างระหว่างท่อทั้ง 2 เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตร โดยรูปที่นำมาแสดงจะเป็นบริเวณใกล้ผนังของครีบบนทั้ง 2 ด้าน ($Y = 1$ และ $Y = 10$) และบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ($Y = 5$) นอกจากนี้ยังแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศในระนาบ XY อีกด้วย เมื่อทำการพิจารณา Contour ของการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศ สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตร พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศ จะมีความคล้ายคลึงกันทั้งสามรูปทรงของท่อ แต่ค่าของอุณหภูมิอากาศจะแตกต่างกันไป ตามรูปทรงของท่อที่เป็นแหล่งความร้อน และ ตามระยะห่างระหว่างท่อทั้งสอง โดยอากาศบริเวณใกล้ผนังของครีบบนทั้งสองด้าน จะได้รับอิทธิพลทั้งจากความร้อนที่กระจายตัวอยู่ภายในครีบบน และจากผนังท่อทั้งสองที่เป็นแหล่งความร้อนโดยตรง ซึ่งผิดกับบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ที่ได้รับอิทธิพลจากผนังท่อทั้งสองที่เป็นแหล่งความร้อน และจากอากาศรอบข้างที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งมีค่าที่น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับความร้อนที่กระจายตัวอยู่ภายในครีบบน จึงทำให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจากบริเวณใกล้ผนังครีบบนได้ชัดเจน โดยการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่บริเวณผนังท่อที่หนึ่งจะมีน้อย และอุณหภูมิของอากาศจะมีการกระจายตัวมากขึ้นที่บริเวณด้านบนและด้านหลังของผนังท่อที่สอง ส่วนลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน จะเกิดขึ้นบริเวณแนวด้านหลังท่อทั้งสอง เมื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุของปรากฏการณ์ดังกล่าว พบว่าเมื่ออากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไหลเข้ามา อากาศที่อยู่ใกล้ผนังครีบบนทั้งสองด้าน ก็จะได้ความร้อนจากครีบบน และจากท่อทั้งสองอัน ตลอดช่วงเวลาการไหลของอากาศภายในช่องว่างระหว่างครีบบน จนทำให้อุณหภูมิจากอากาศมีไหลเข้ามาก่อนมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ และมีค่ามากที่สุดเมื่อไหลมาถึงบริเวณด้านหลังท่อที่สอง ส่วนอากาศที่ไหลอยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่างครีบบนทั้งสอง จะได้รับความร้อนจากผนังท่อที่เป็นแหล่งความร้อน และจากอากาศรอบข้างที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ตลอดช่วงเวลาการไหลของอากาศภายในช่องว่างระหว่างครีบบน จนทำให้อุณหภูมิจากอากาศมีไหลอยู่ในบริเวณด้านหลังท่อทั้งสองมีค่าสูงขึ้น และ เมื่อทำการพิจารณา Contour ของการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศในระนาบ XY พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศ จะอยู่บริเวณใกล้ผนังของครีบบนทั้งสองด้าน และบริเวณใกล้ผนังท่อทั้งสอง โดยที่การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศ จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในตำแหน่งตามแนวแกน Z ที่ $IZ = 25$ ถึง $IZ = 100$ สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ $IZ = 20$ ถึง $IZ = 100$ สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

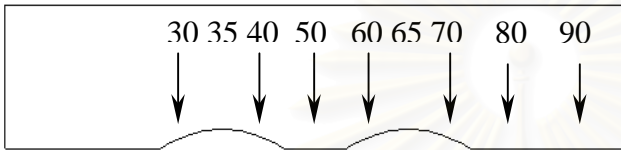
ส่วนต่อไปจะเป็นการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ แกน Z โดยจะทำการเปรียบเทียบในกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองแตกต่างกัน เช่นเดียวกับกรณีที่พิจารณาค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ

6.2.2.4 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อ

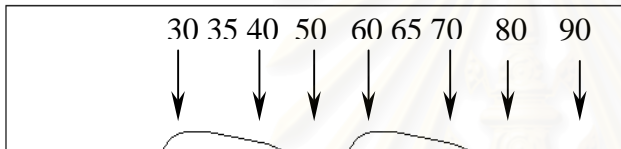
กรณีนี้จะใช้จุดตั้งรูปข้างล่างทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อรูปทรงต่าง ๆ เมื่อระยะห่างระหว่างท่อแตกต่างกัน



ก. ท่อรูปทรงแบน

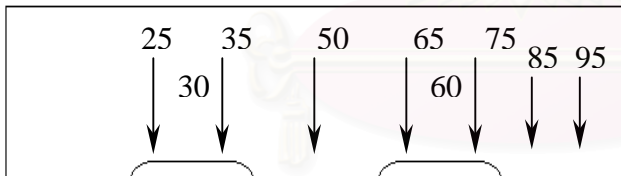


ข. ท่อรูปทรงวงรี

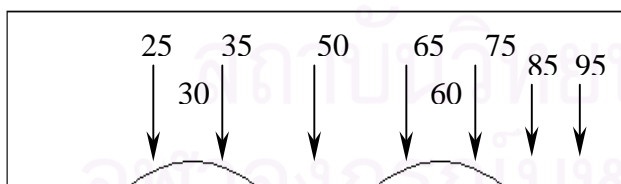


ค. ท่อรูปทรงหยดน้ำ

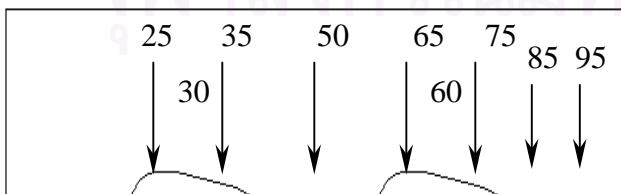
รูปที่ 6.144 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกน Z ที่นำมาพิจารณา สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร



ก. ท่อรูปทรงแบน



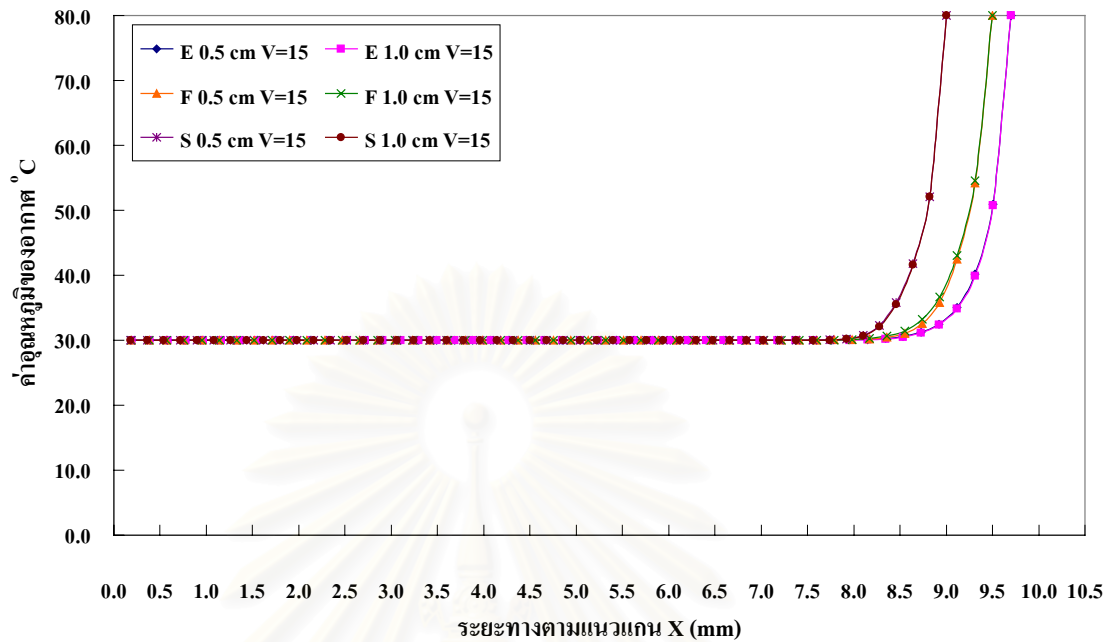
ข. ท่อรูปทรงวงรี



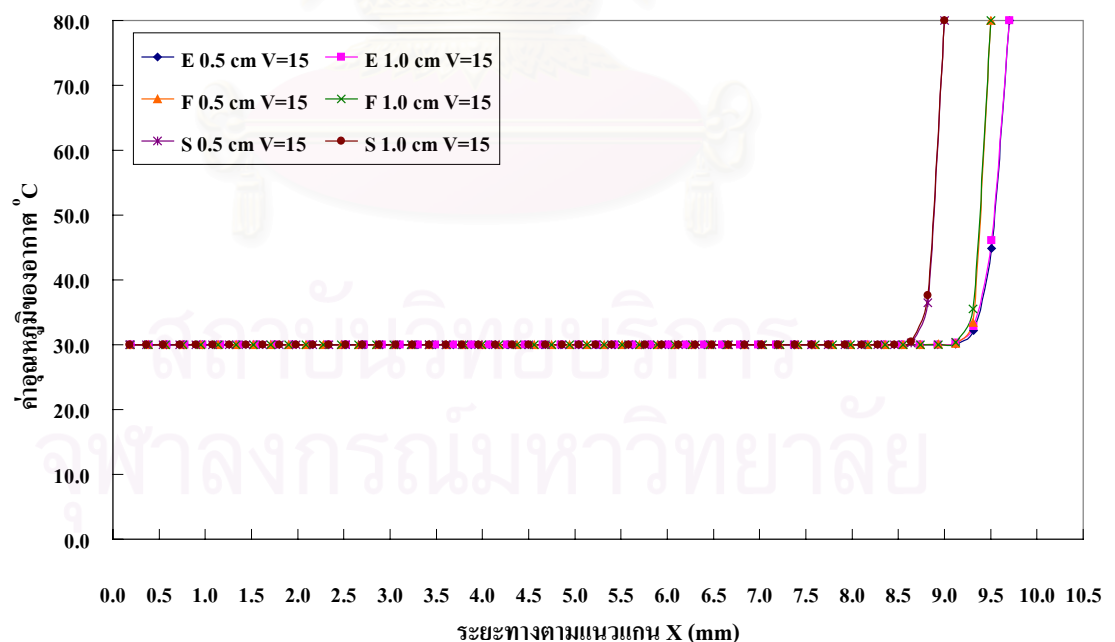
ค. ท่อรูปทรงหยดน้ำ

รูปที่ 6.145 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกน Z ที่นำมาพิจารณา สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อทั้งสองเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

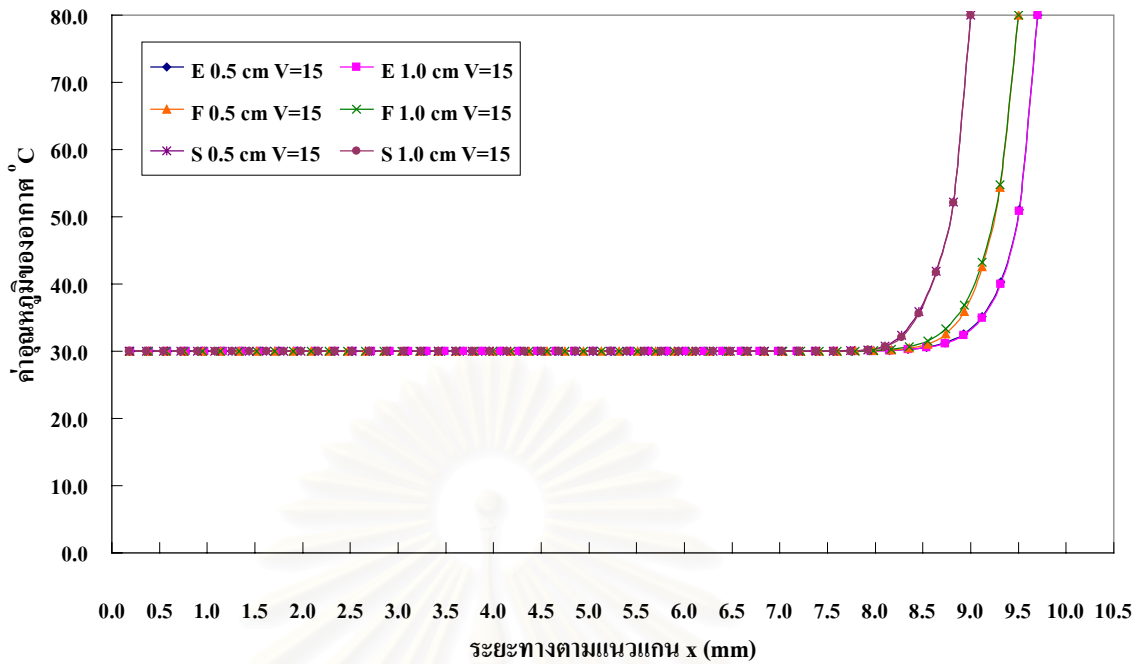
6.2.2.4.1 กรณีความเร็วของอากาศเข้าเท่ากับ 15 เมตร/วินาที



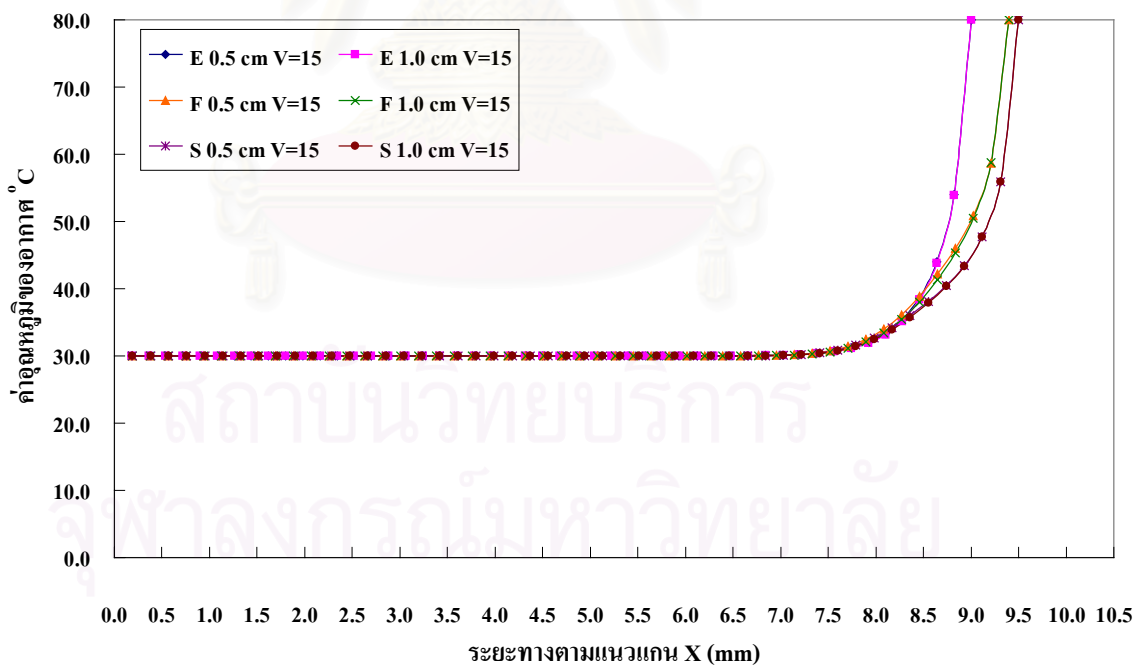
รูปที่ 6.146 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $IY = 1$



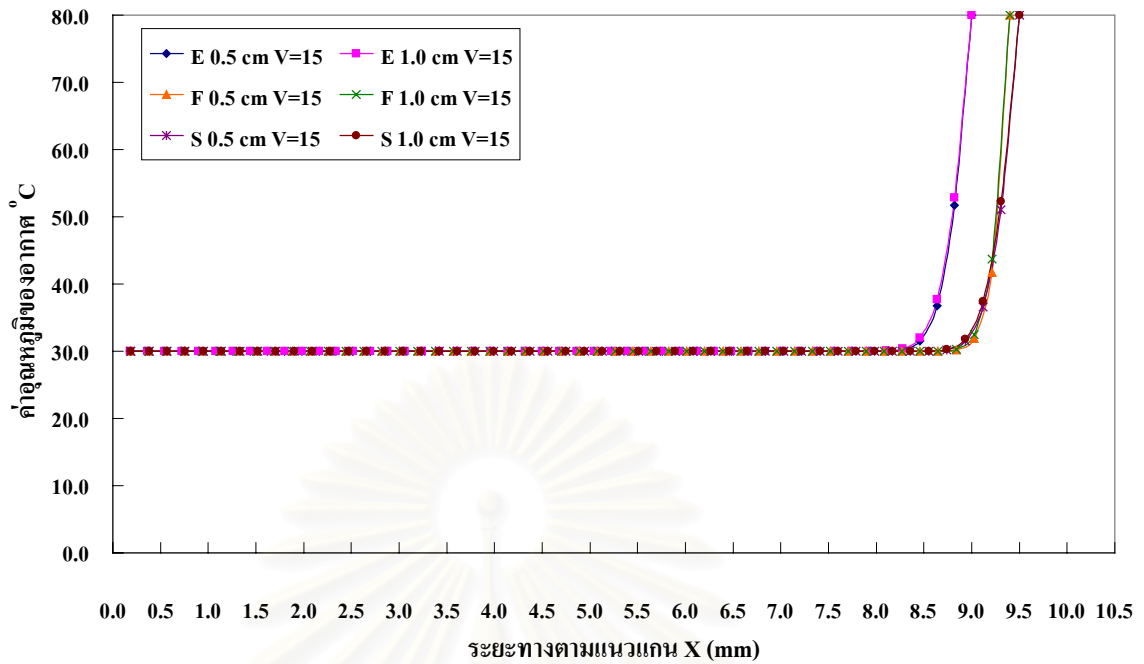
รูปที่ 6.147 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบแผ่น ด้าน $IY = 5$



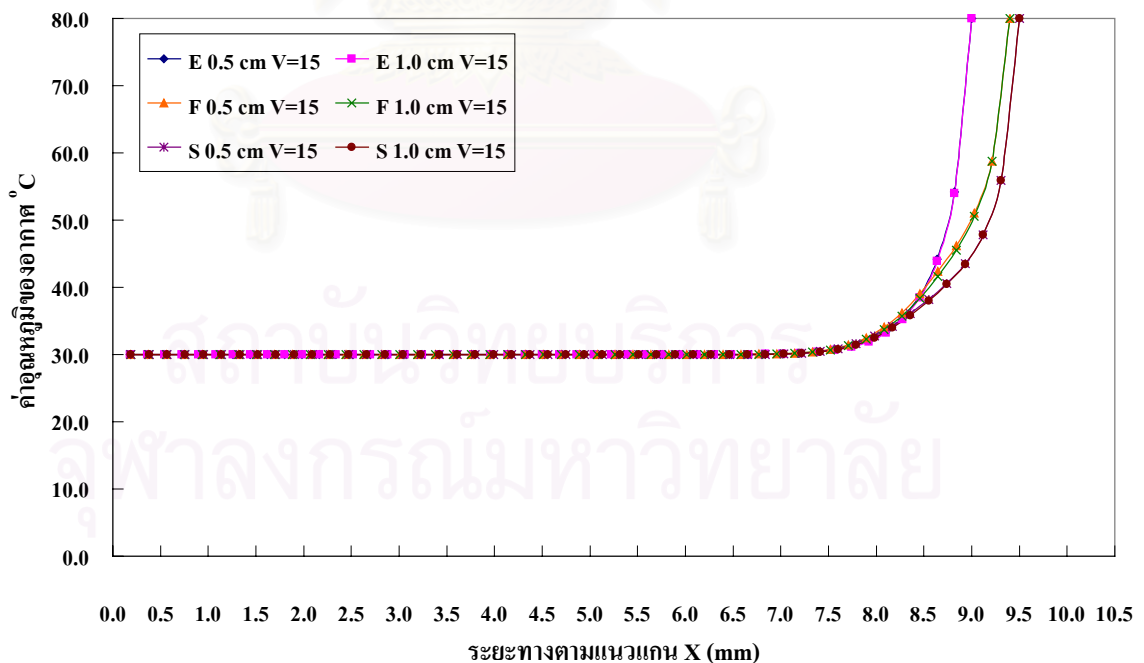
รูปที่ 6.148 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของกริบแผ่นด้าน $IY = 10$



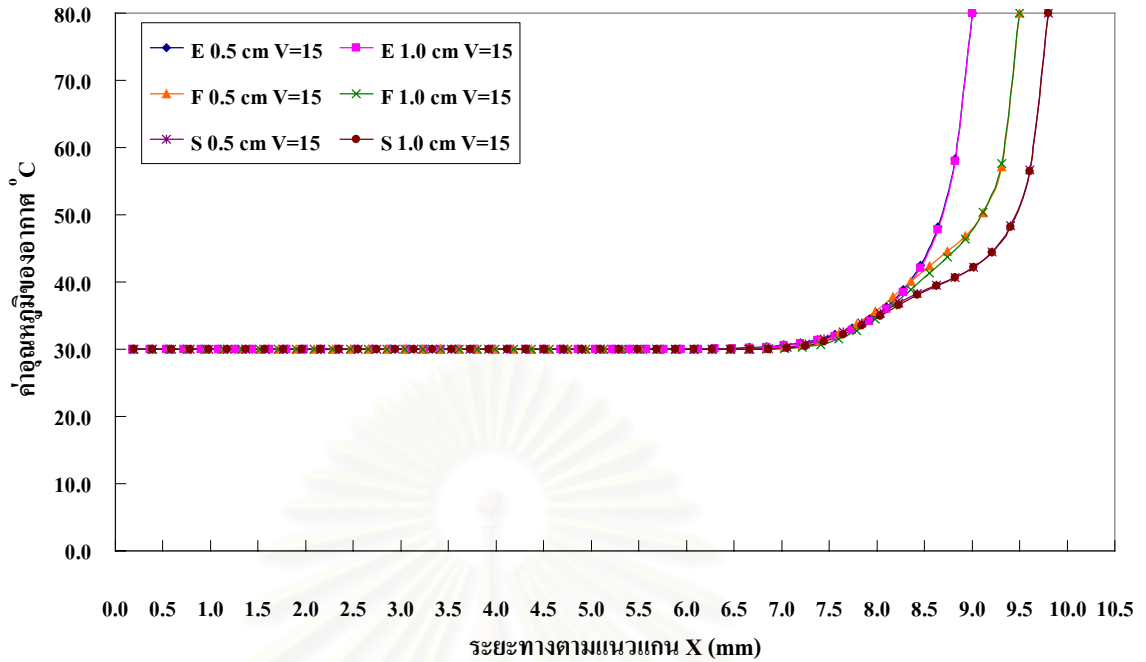
รูปที่ 6.149 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของกริบแผ่นด้าน $IY = 1$



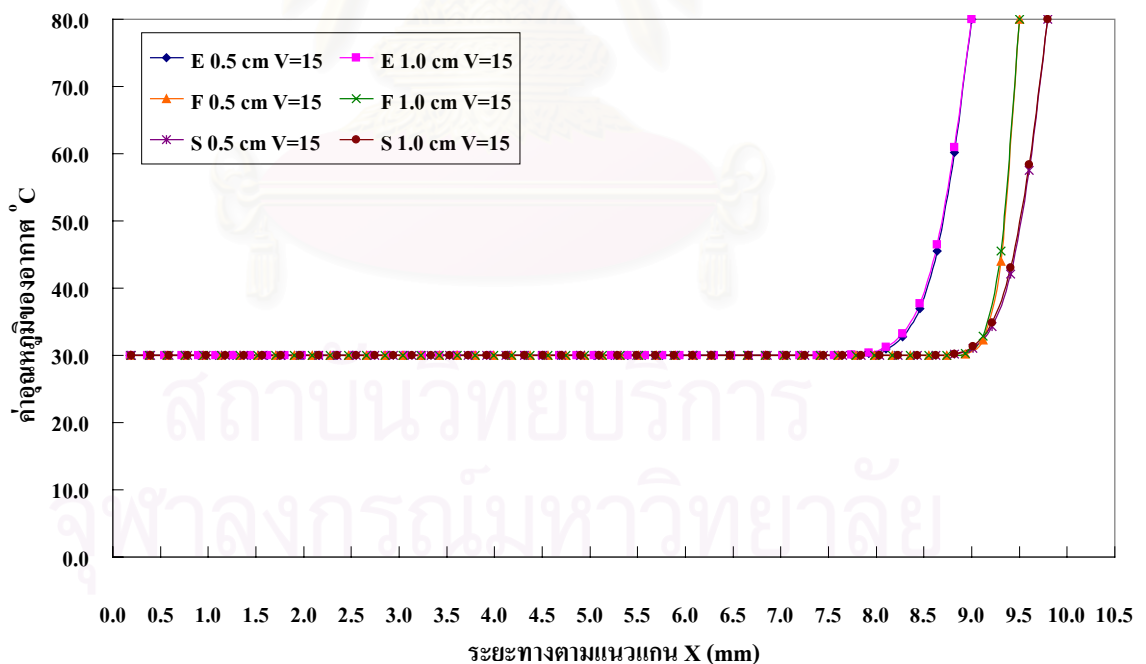
รูปที่ 6.150 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $IY = 5$



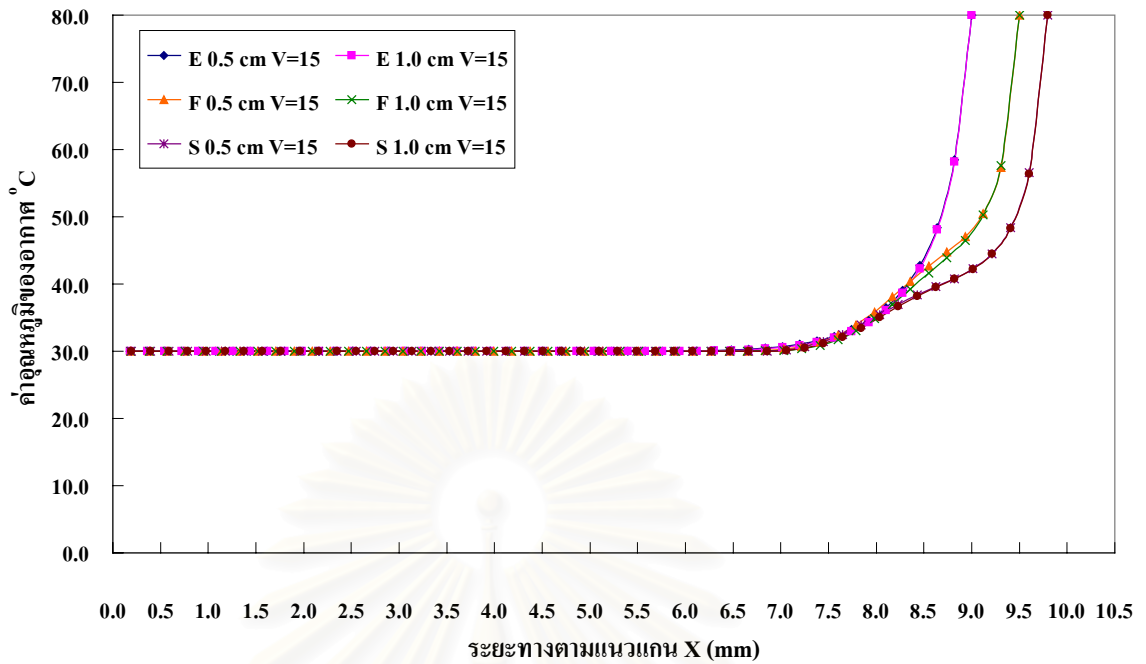
รูปที่ 6.151 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



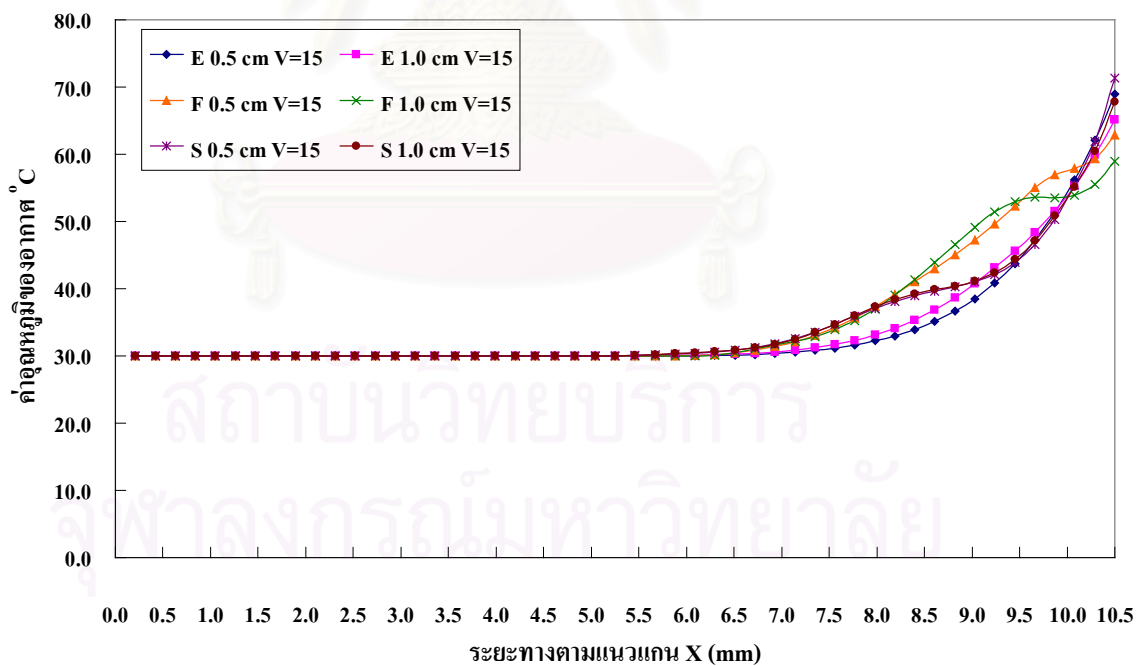
รูปที่ 6.152 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$



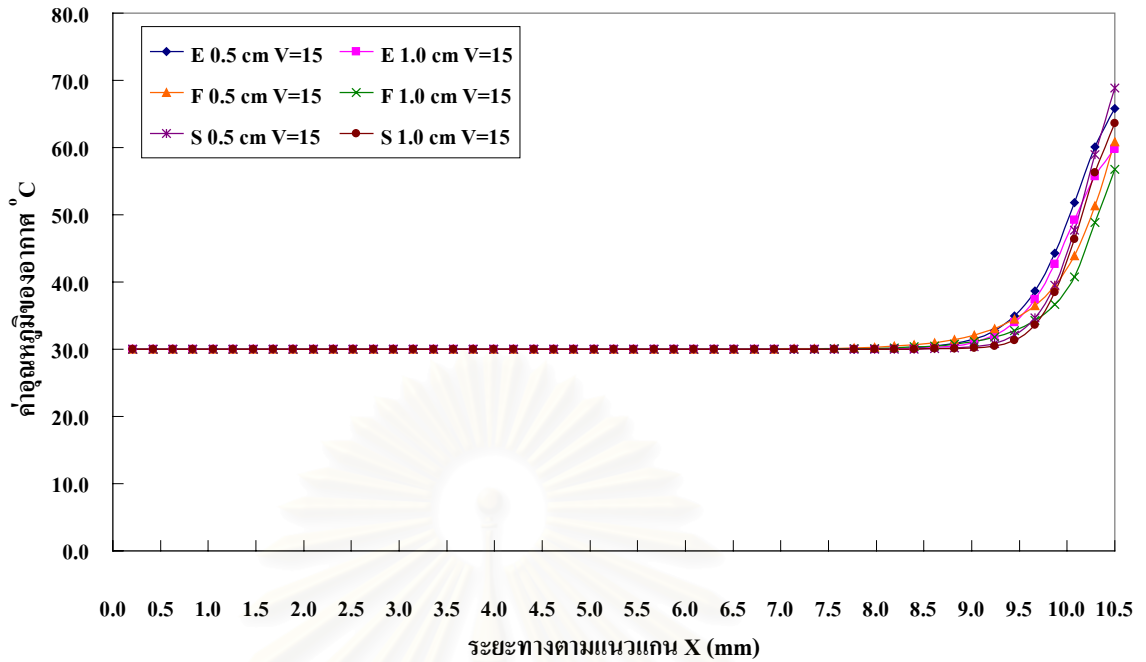
รูปที่ 6.153 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน $IY = 5$



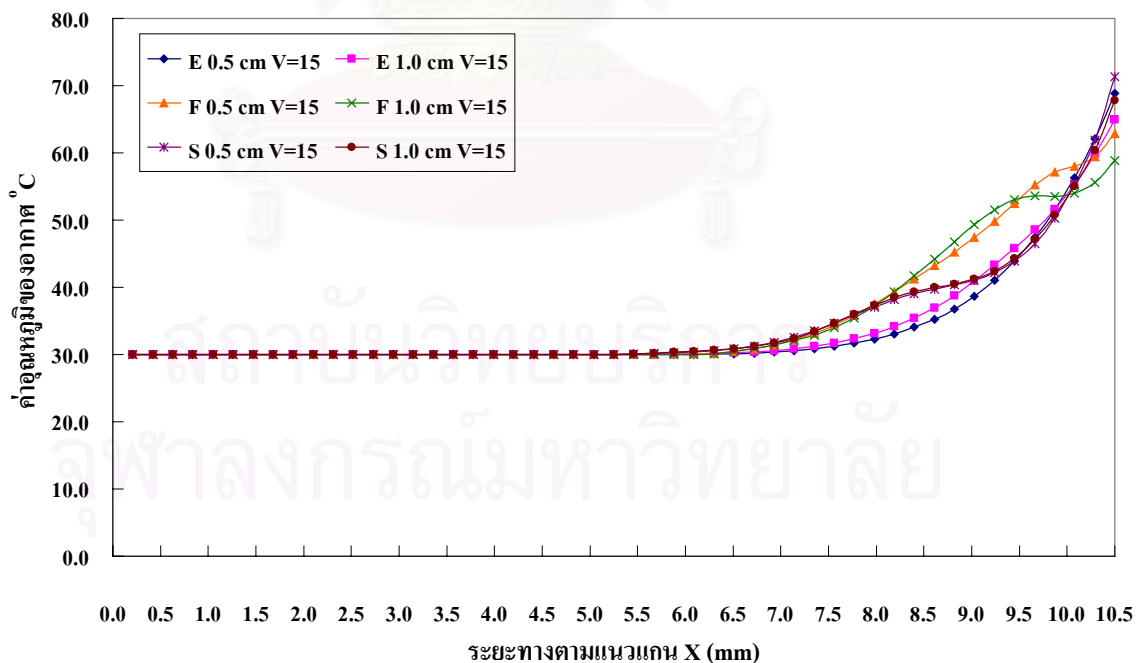
รูปที่ 6.154 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของกริบแผ่นด้าน $IY = 10$



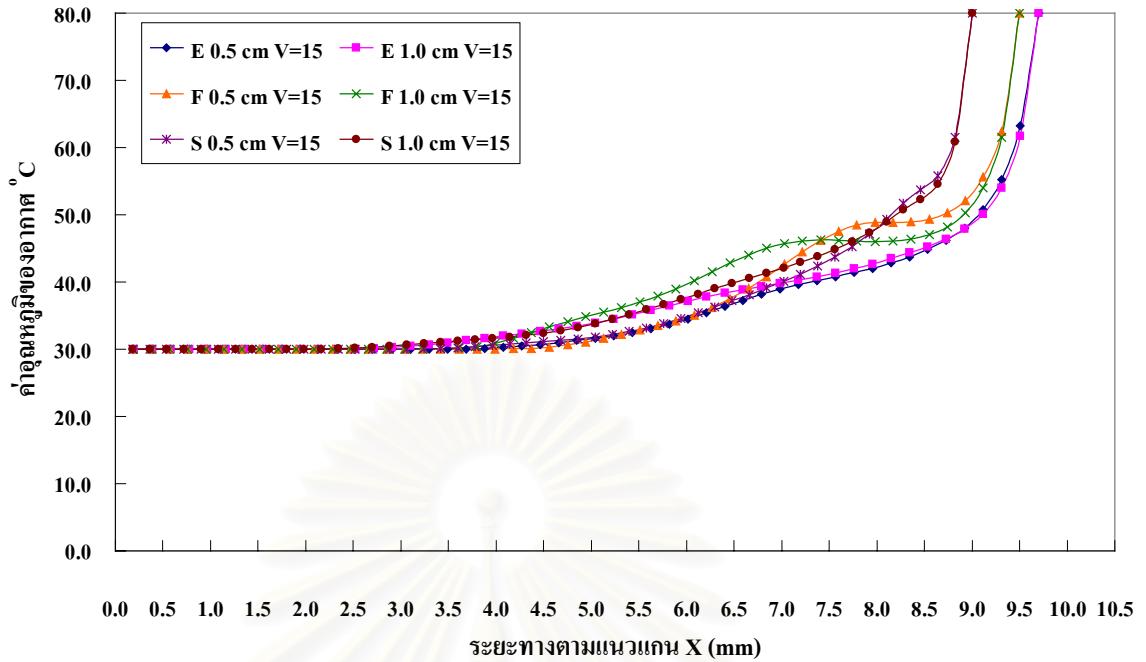
รูปที่ 6.155 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของกริบแผ่นด้าน $IY = 1$



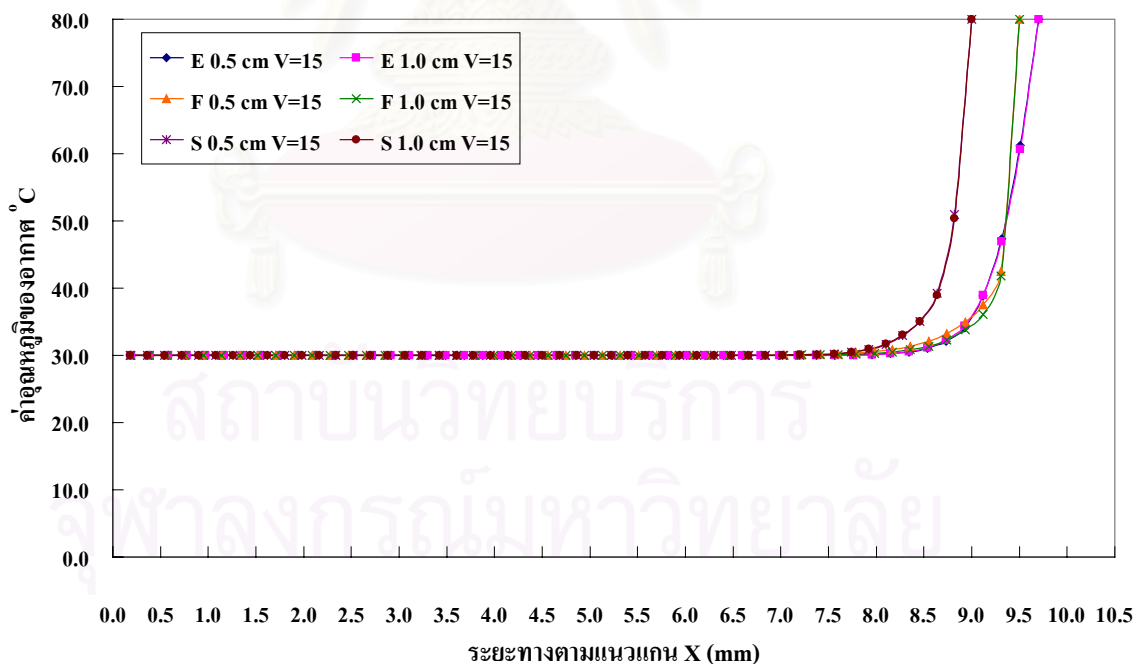
รูปที่ 6.156 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $IY = 5$



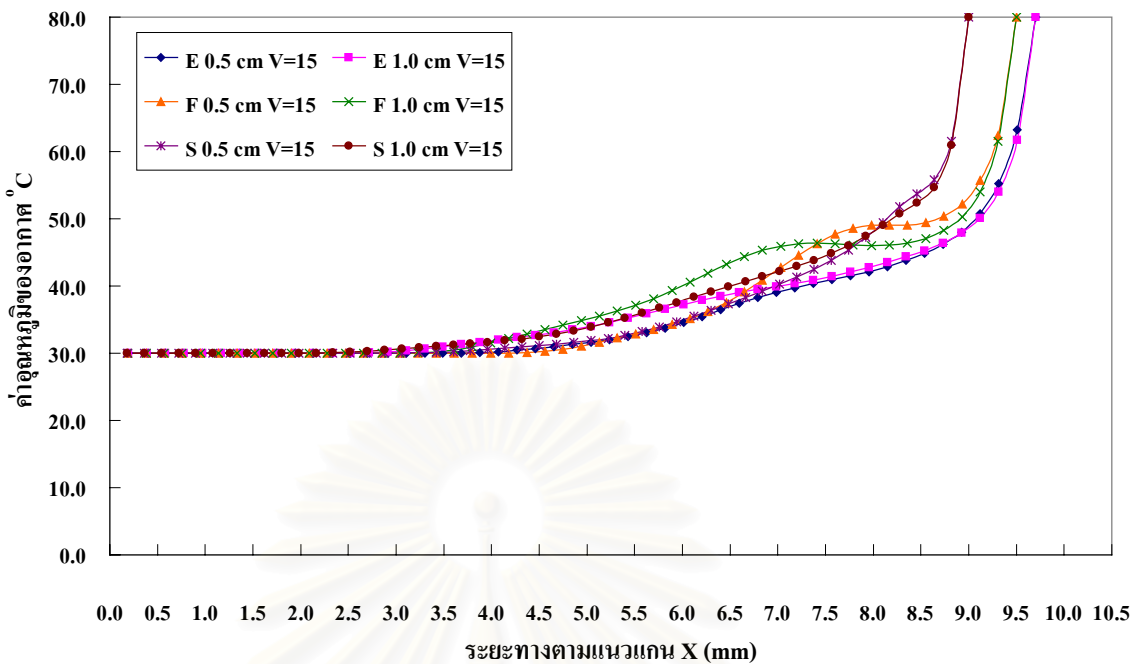
รูปที่ 6.157 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



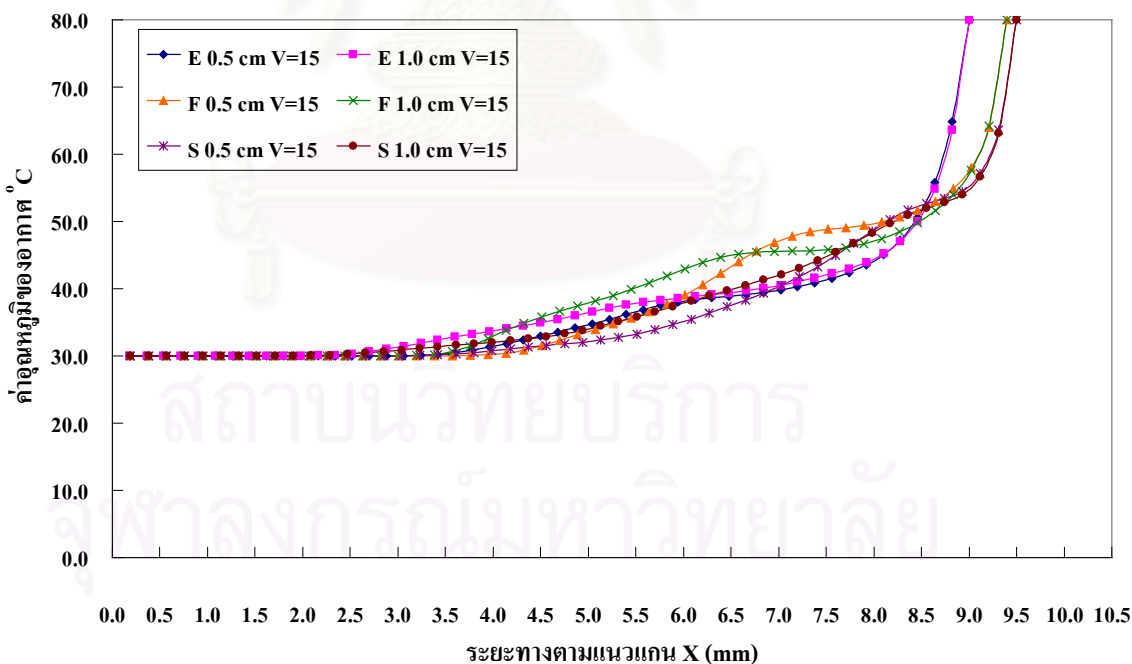
รูปที่ 6.158 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 1$



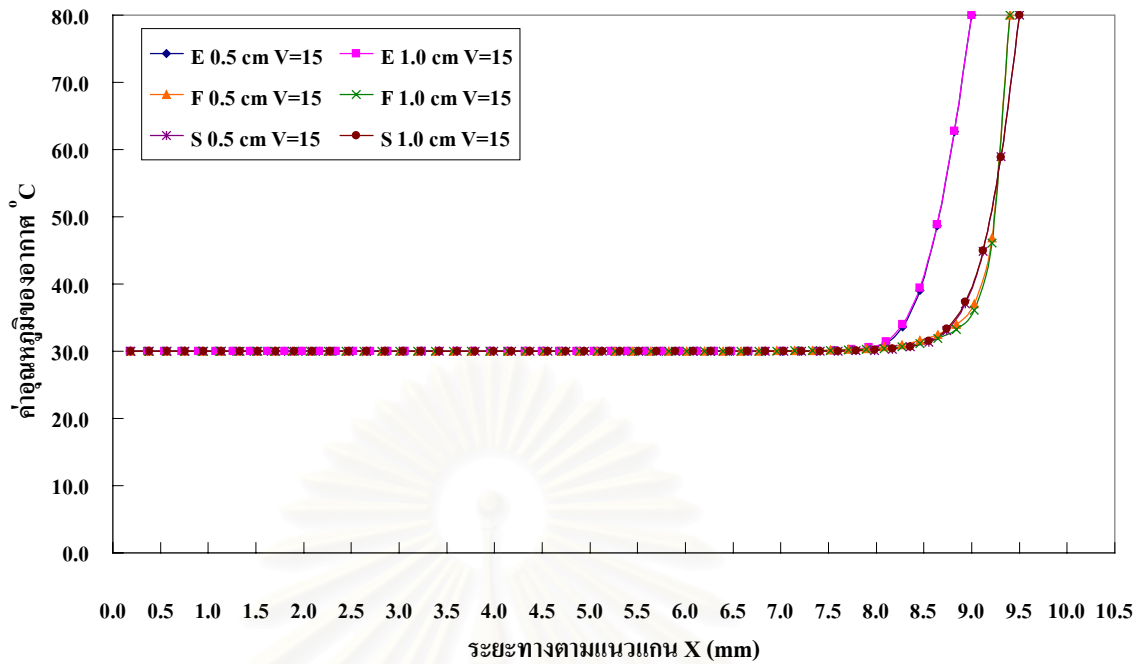
รูปที่ 6.159 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ด้าน $IY = 5$



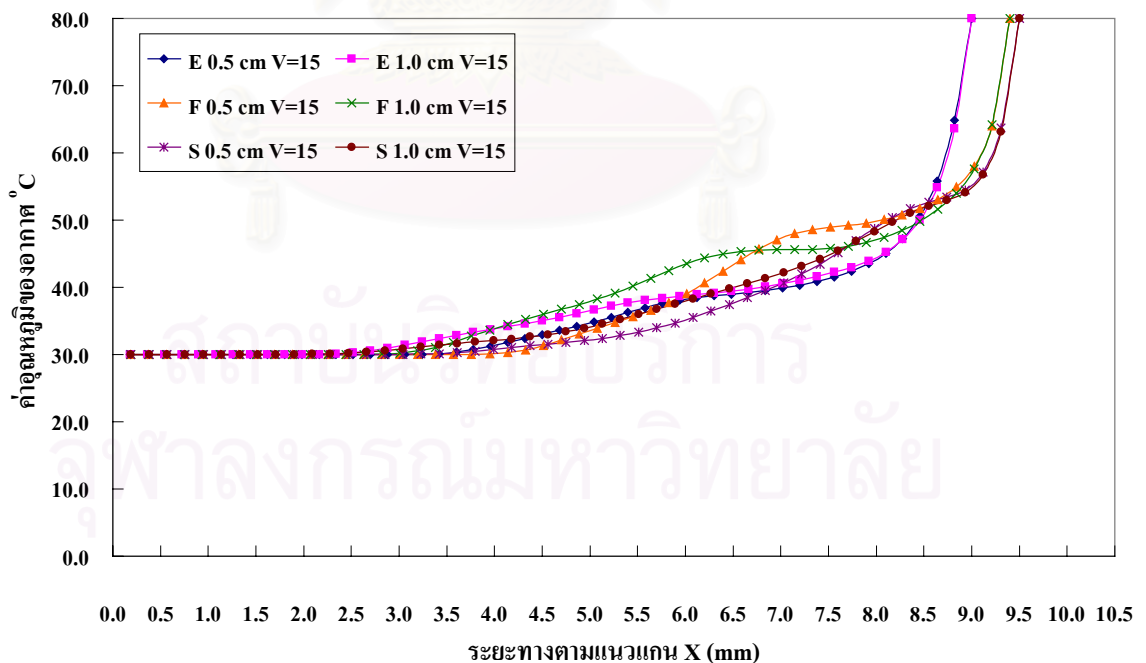
รูปที่ 6.160 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 10$



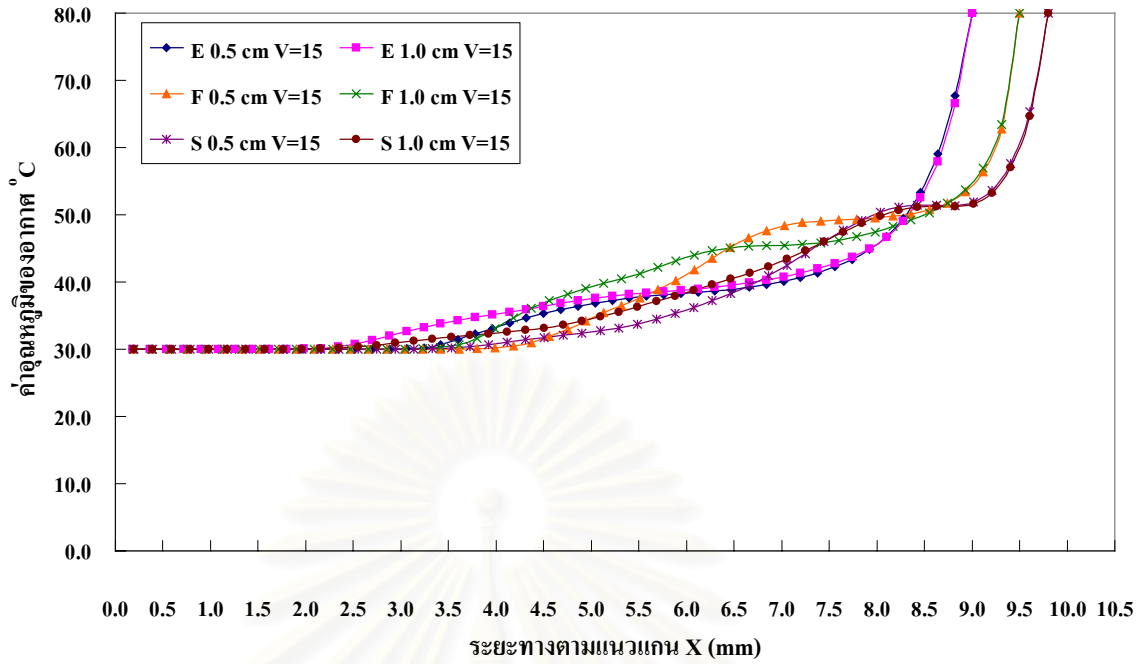
รูปที่ 6.161 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 1$



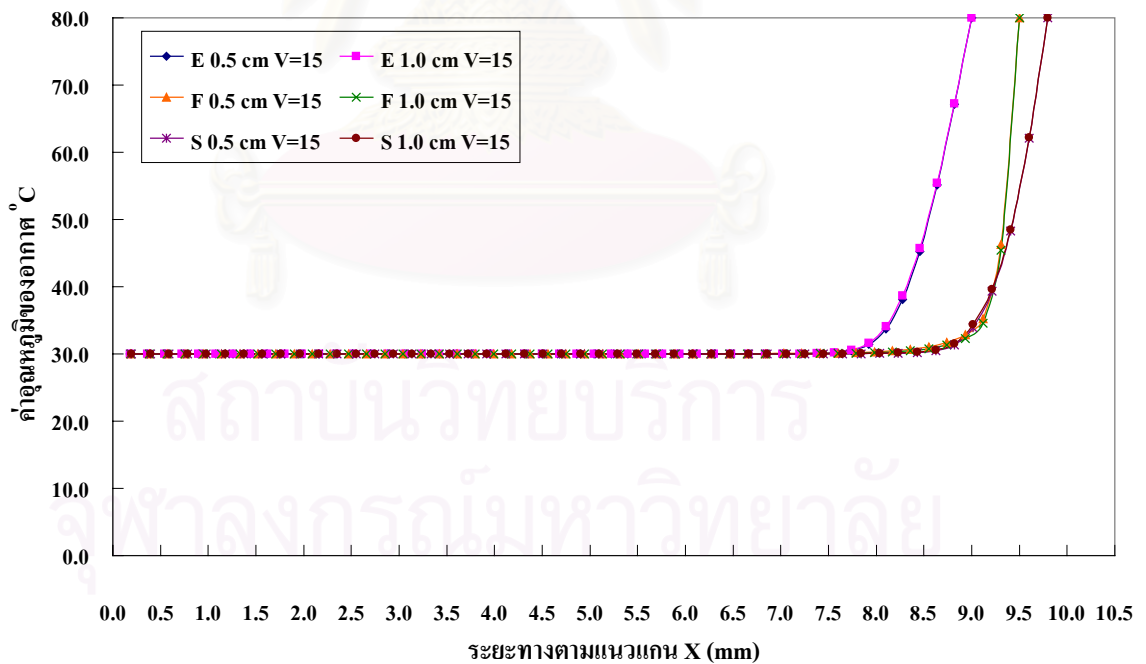
รูปที่ 6.162 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $IY = 5$



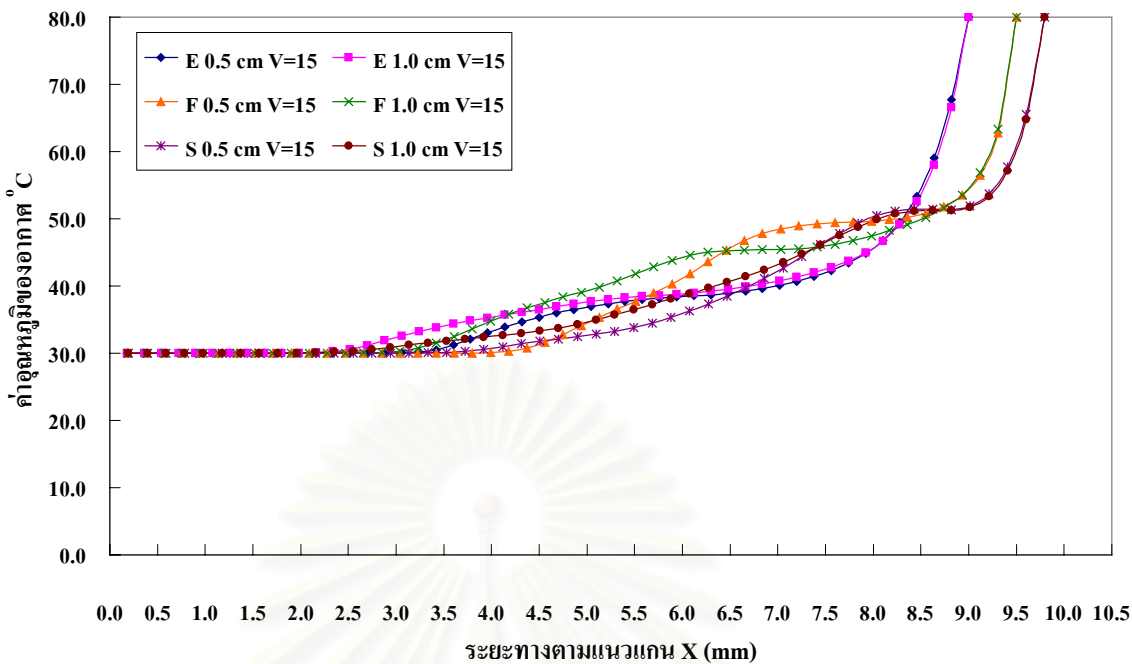
รูปที่ 6.163 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



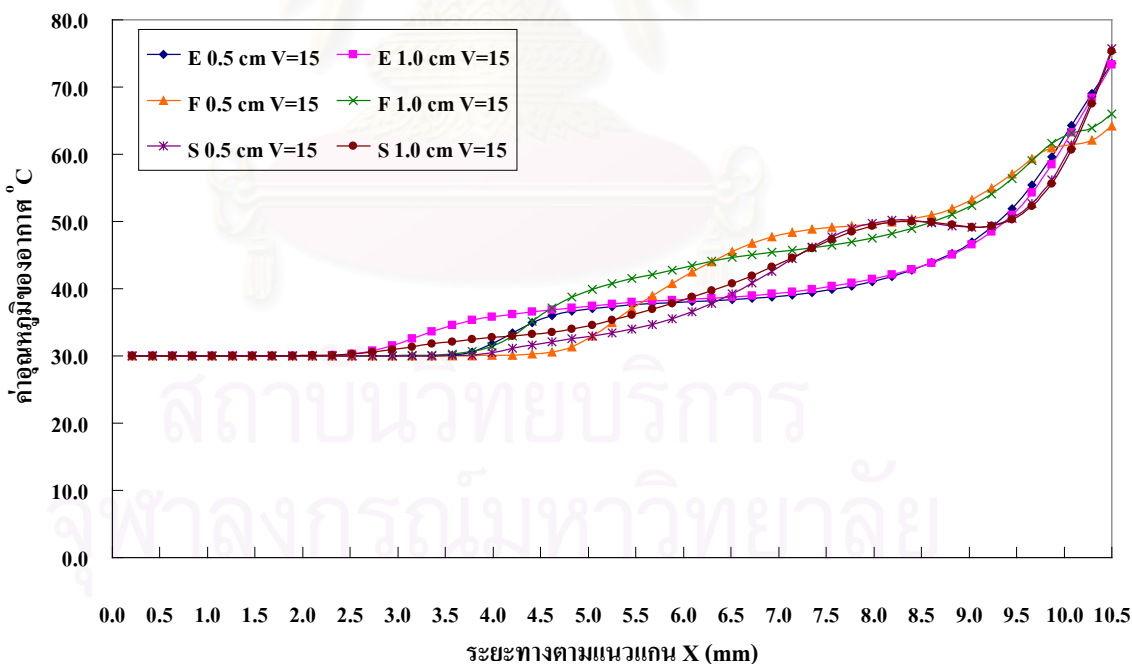
รูปที่ 6.164 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 70 และ IZ = 75 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน IY = 1



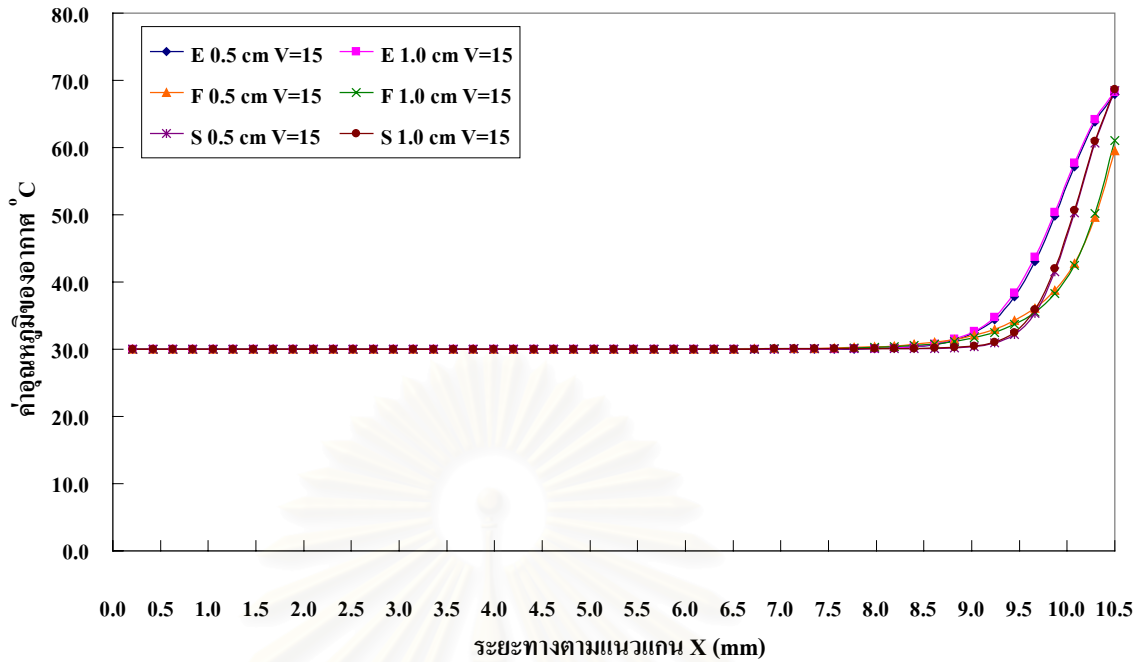
รูปที่ 6.165 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 70 และ IZ = 75 ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ด้าน IY = 5



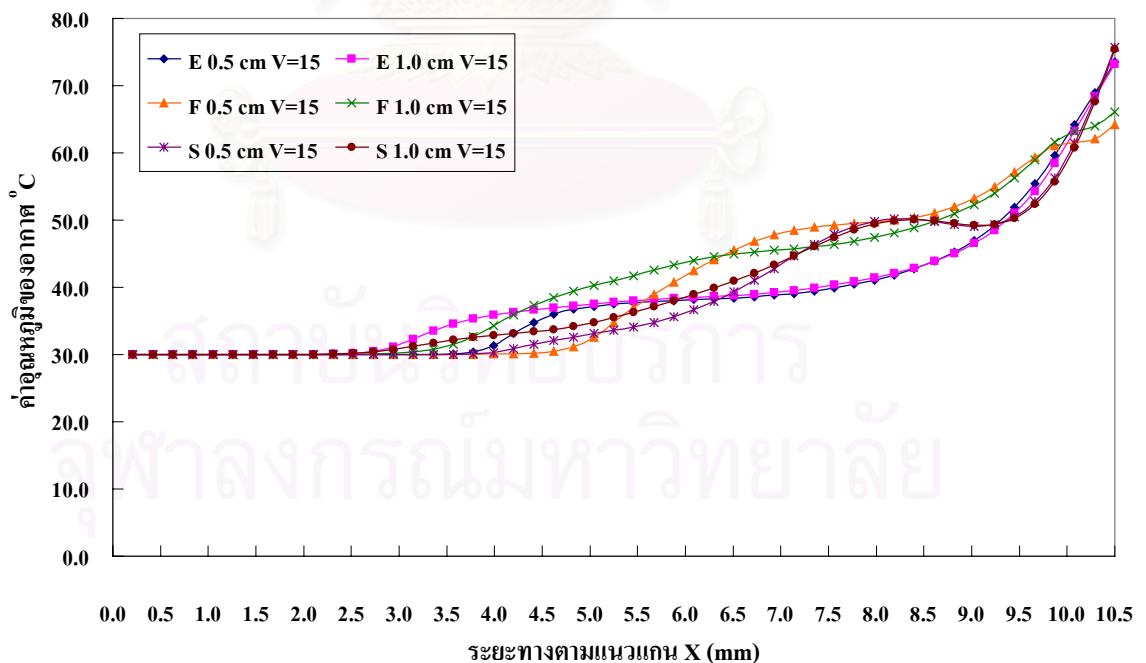
รูปที่ 6.166 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 70 และ IZ = 75 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน IY = 10



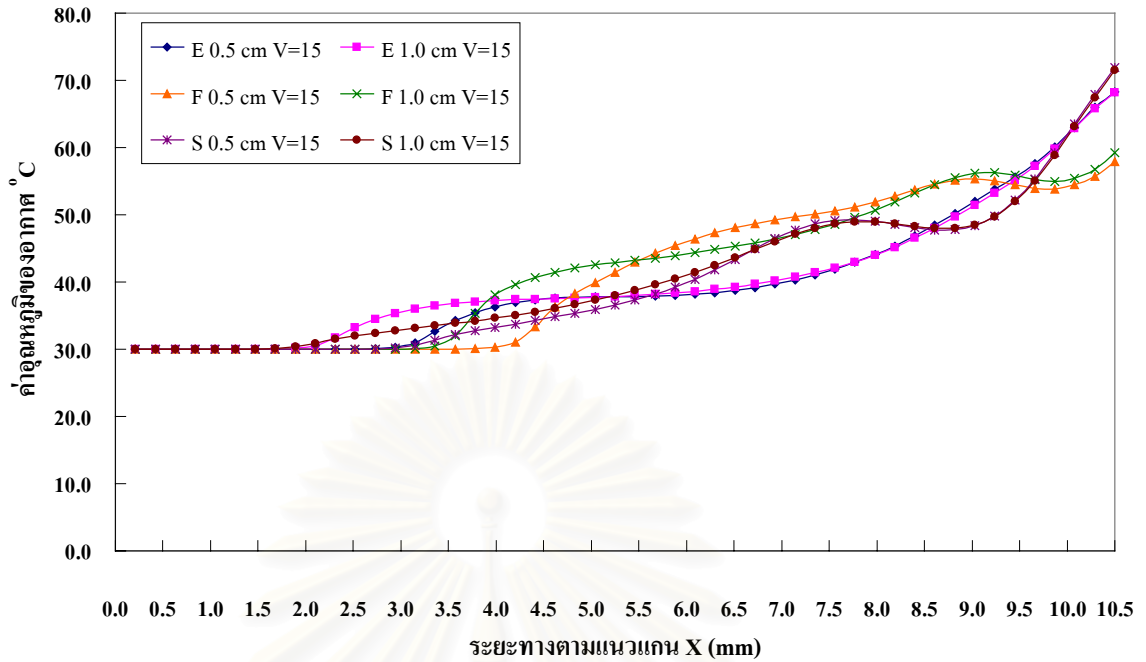
รูปที่ 6.167 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 80 และ IZ = 85 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน IY = 1



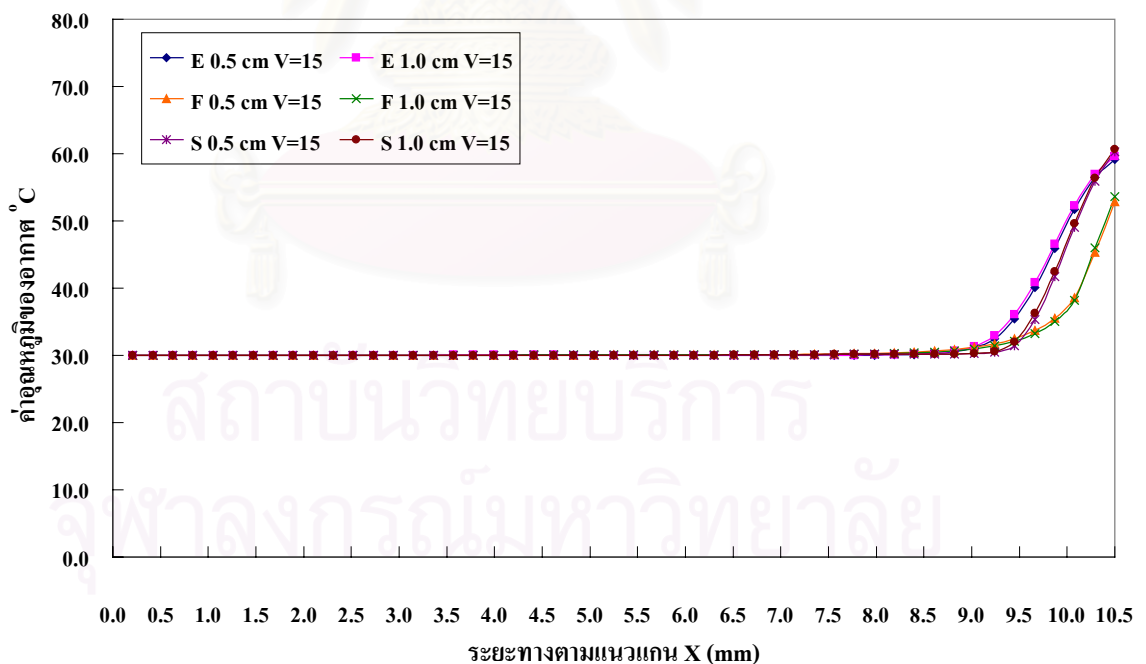
รูปที่ 6.168 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $IY = 5$



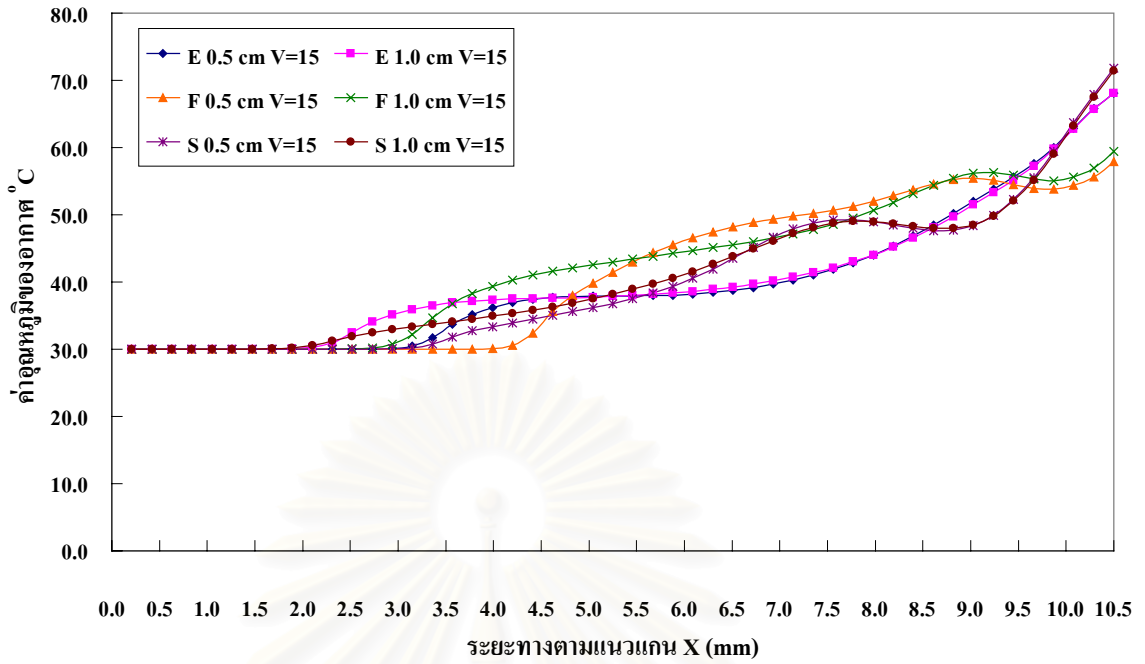
รูปที่ 6.169 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



รูปที่ 6.170 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$

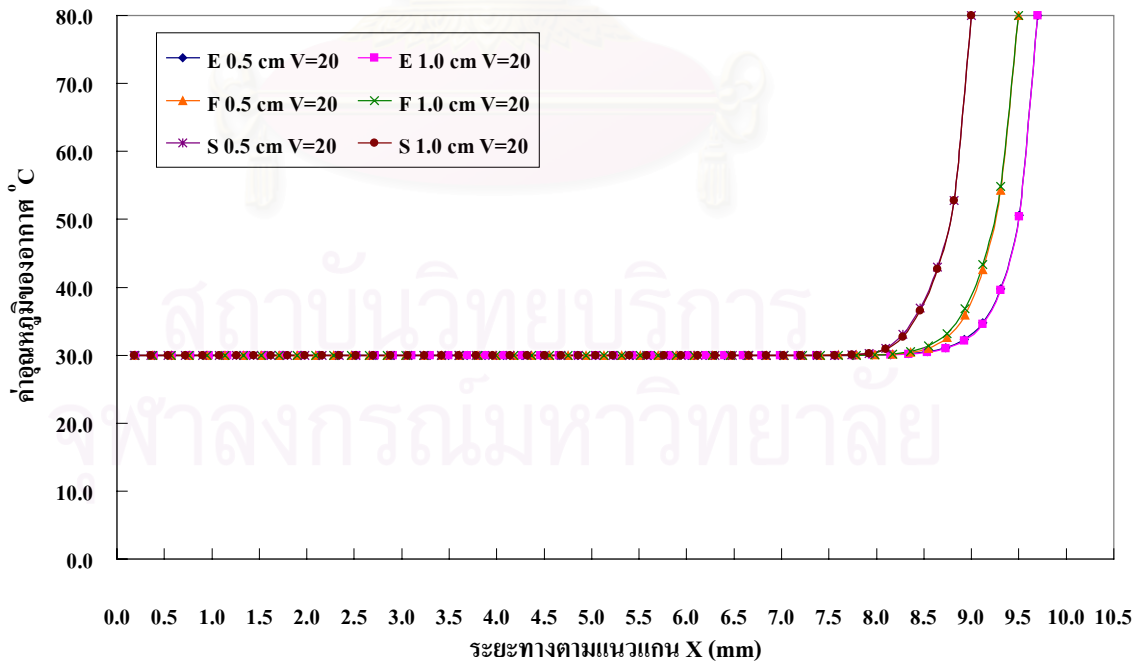


รูปที่ 6.171 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน $IY = 5$

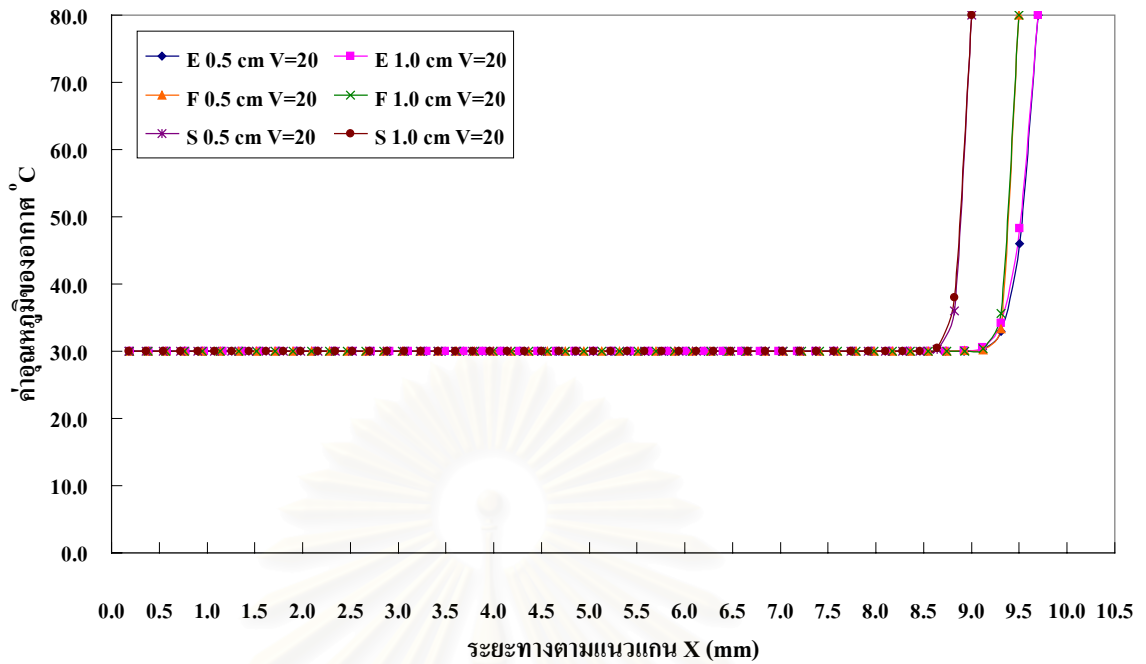


รูปที่ 6.172 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 90 และ IZ = 95 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน IY = 10

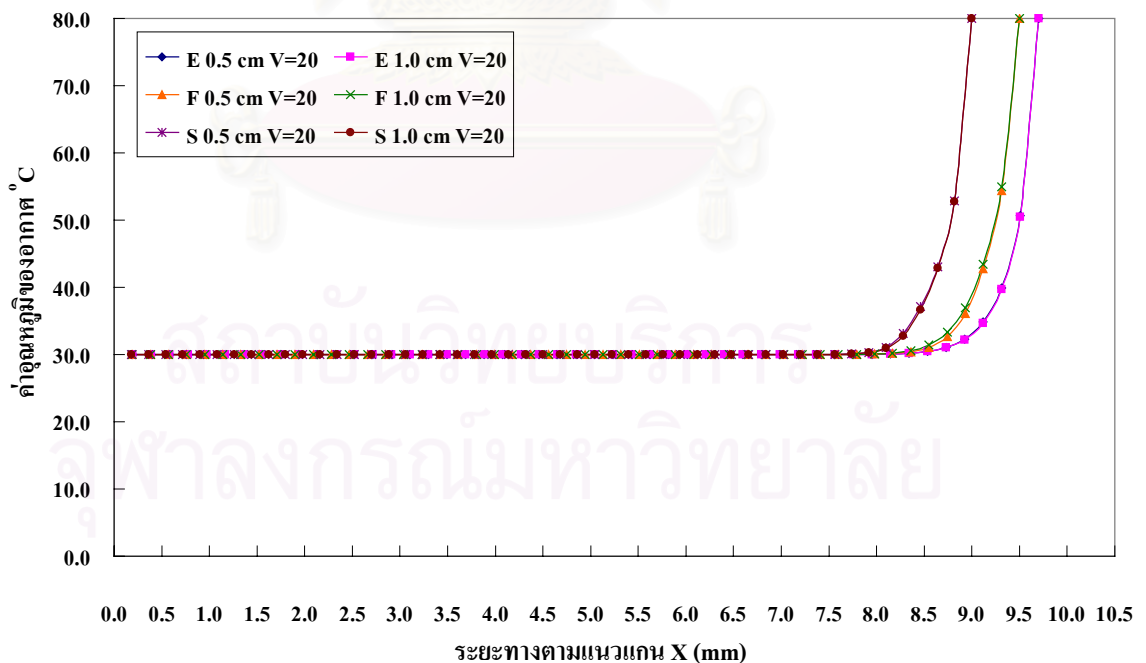
6.2.2.4.2 กรณีความเร็วของอากาศขาเข้าเท่ากับ 20 เมตร/วินาที



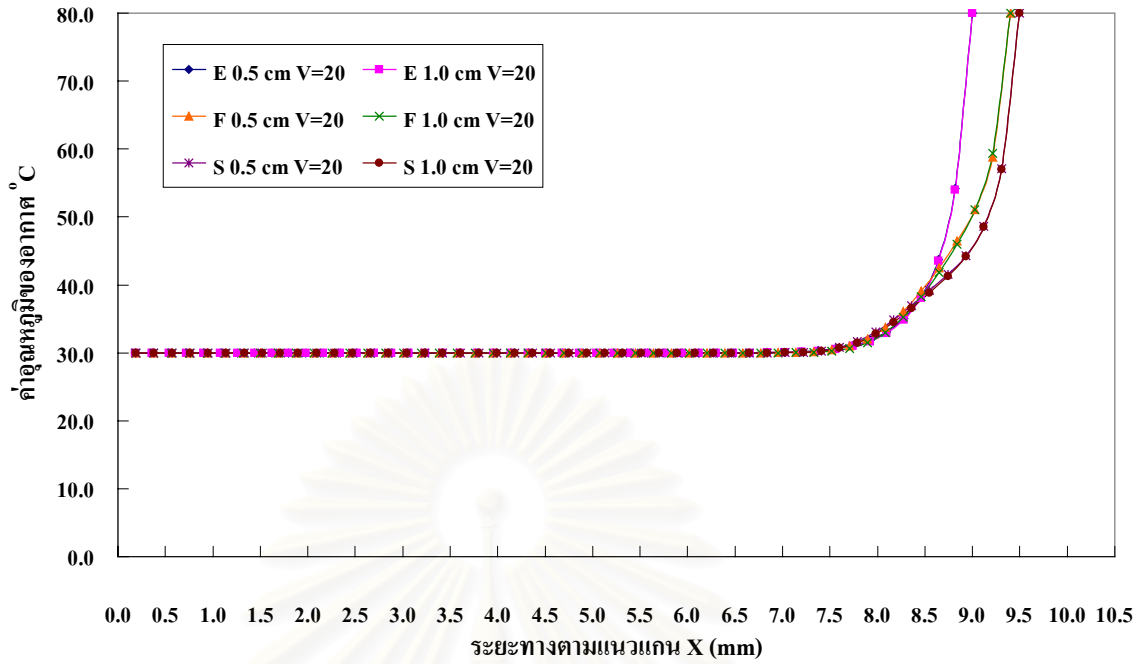
รูปที่ 6.173 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 30 และ IZ = 25 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน IY = 1



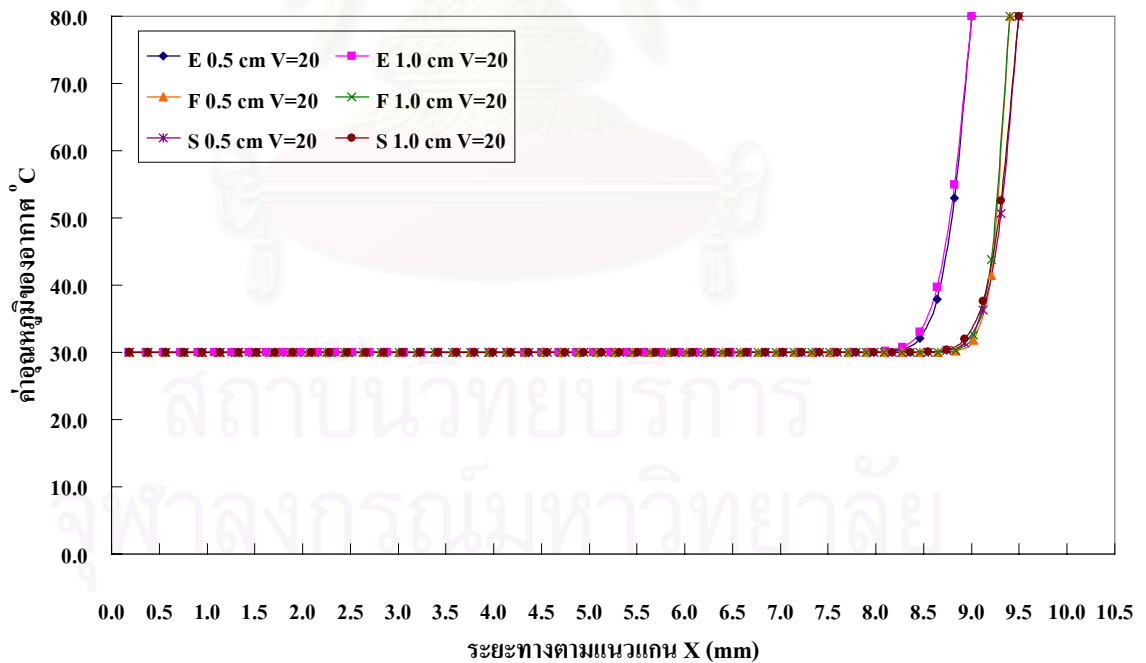
รูปที่ 6.174 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $IY = 5$



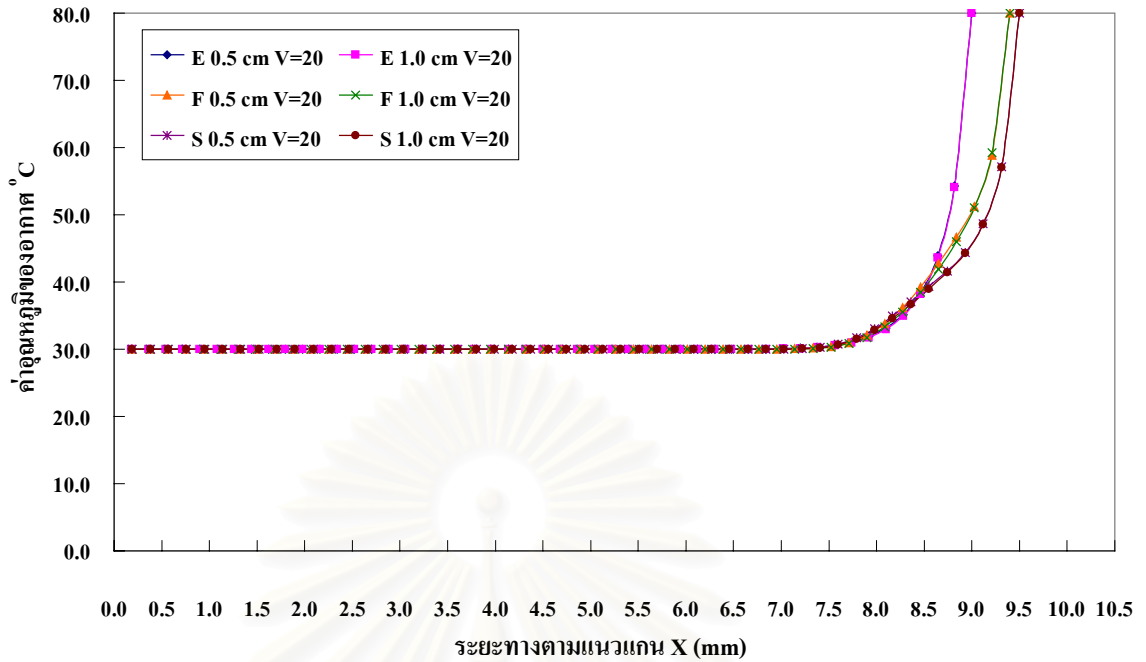
รูปที่ 6.175 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 30$ และ $IZ = 25$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



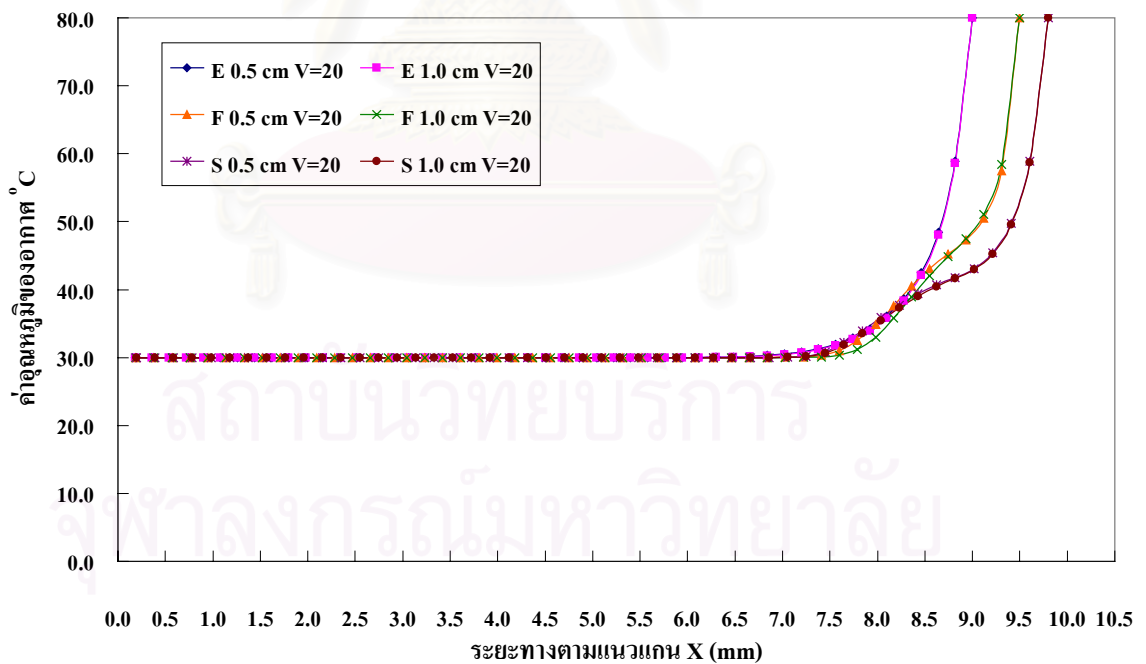
รูปที่ 6.176 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 35 และ IZ = 30 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน IY = 1



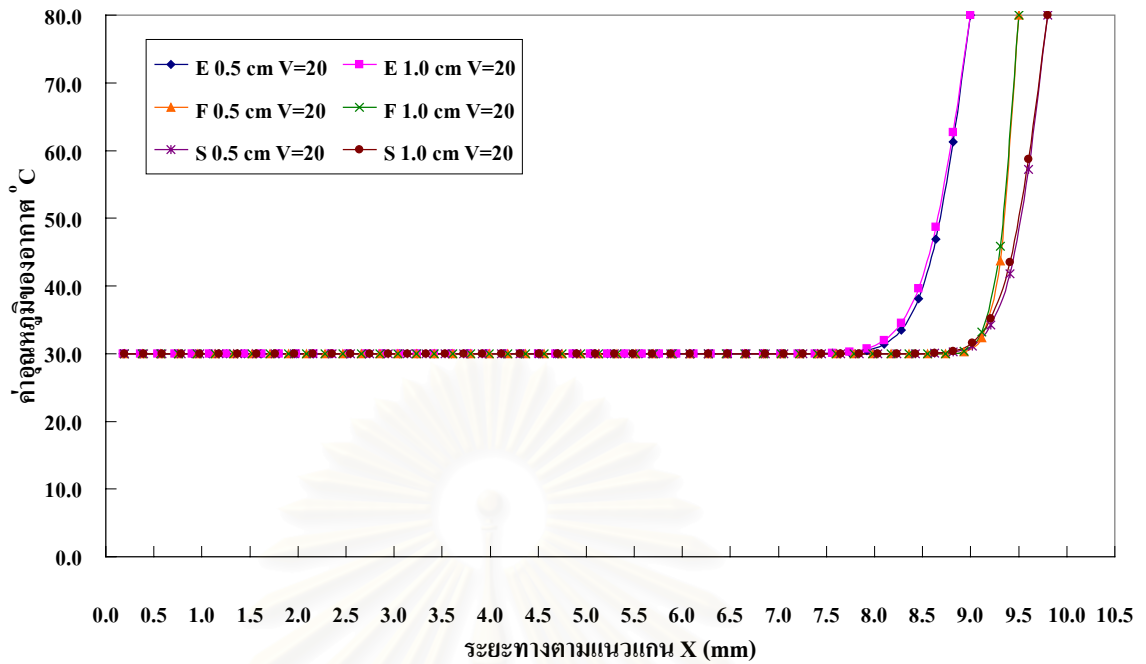
รูปที่ 6.177 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 35 และ IZ = 30 ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ด้าน IY = 5



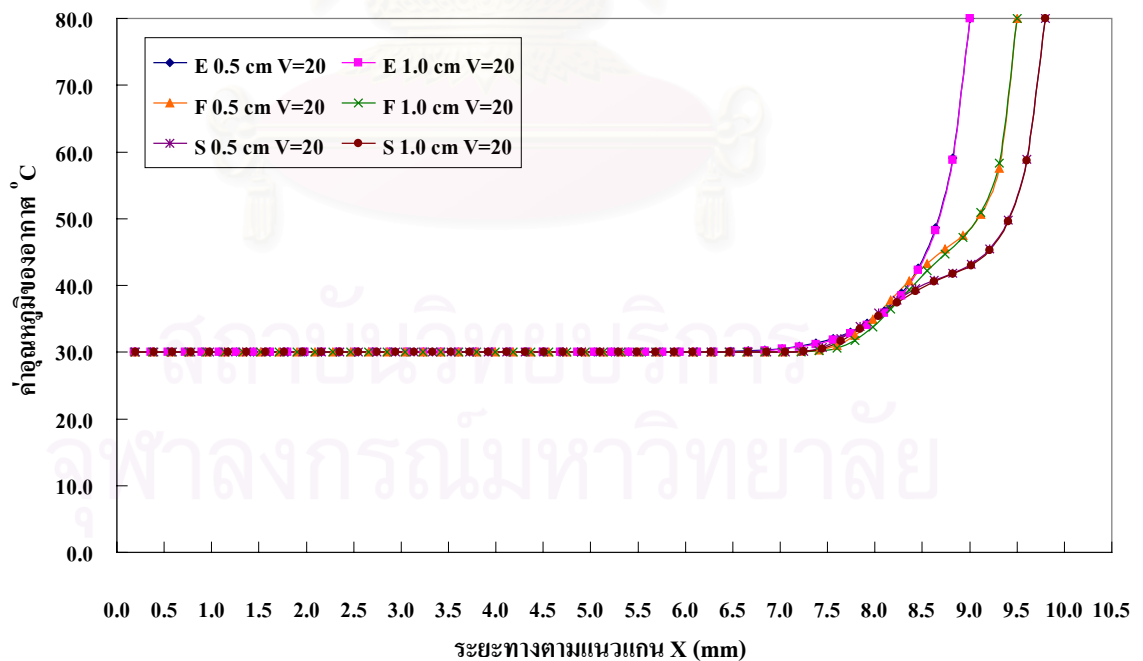
รูปที่ 6.178 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 35$ และ $IZ = 30$ ณ บริเวณใกล้ผนังของกริบแผ่นด้าน $IY = 10$



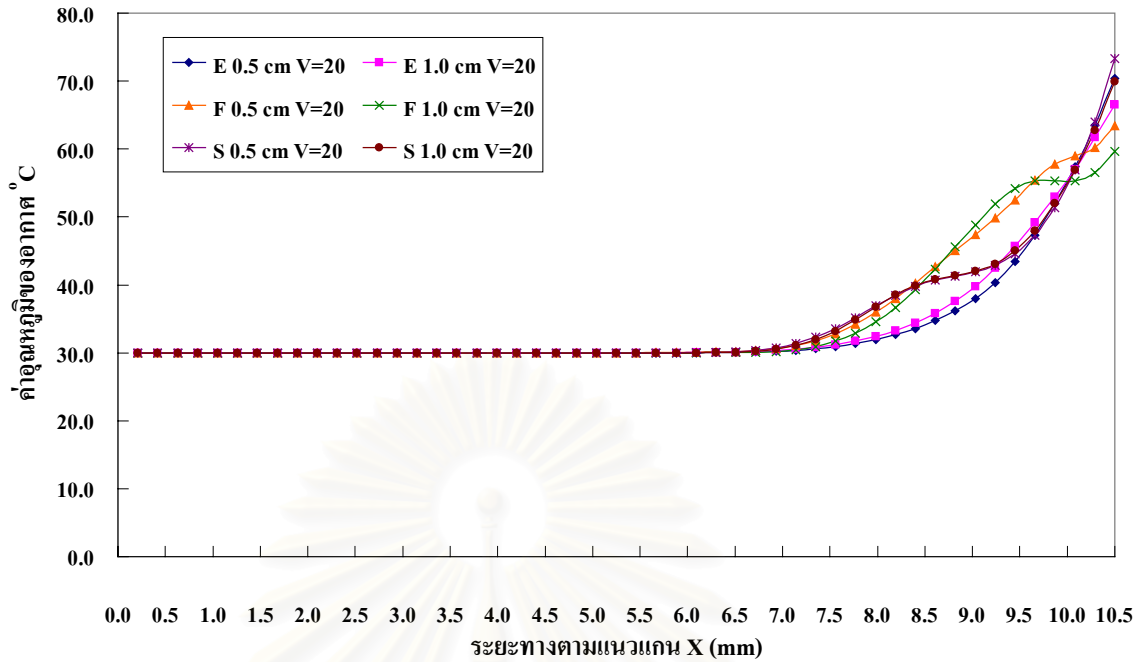
รูปที่ 6.179 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของกริบแผ่นด้าน $IY = 1$



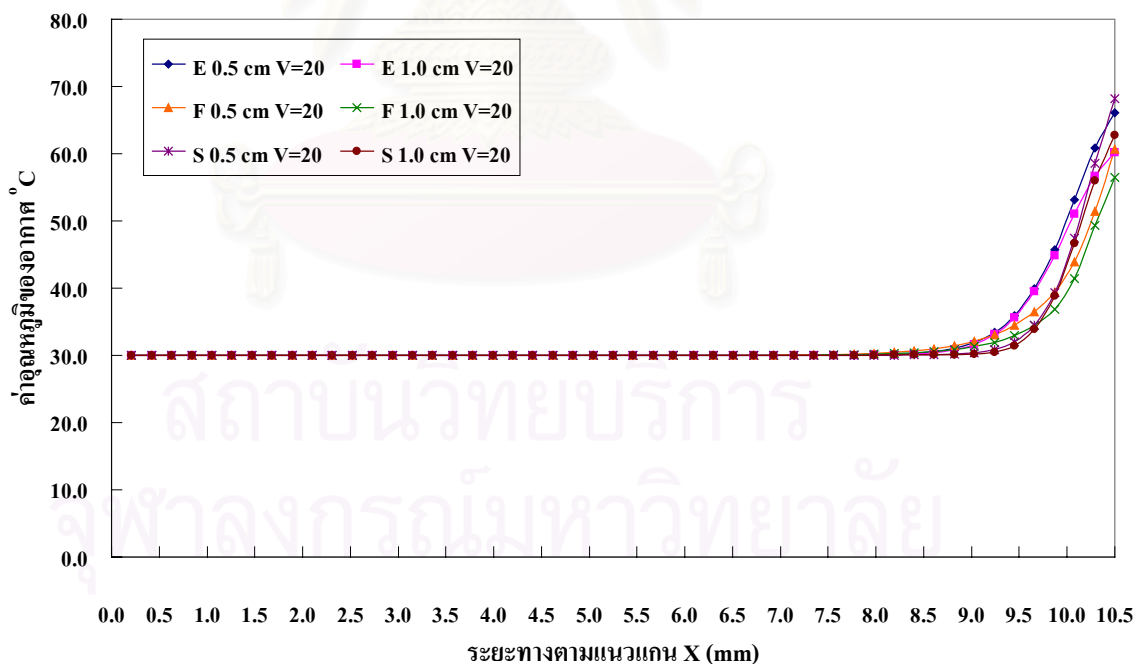
รูปที่ 6.180 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $IY = 5$



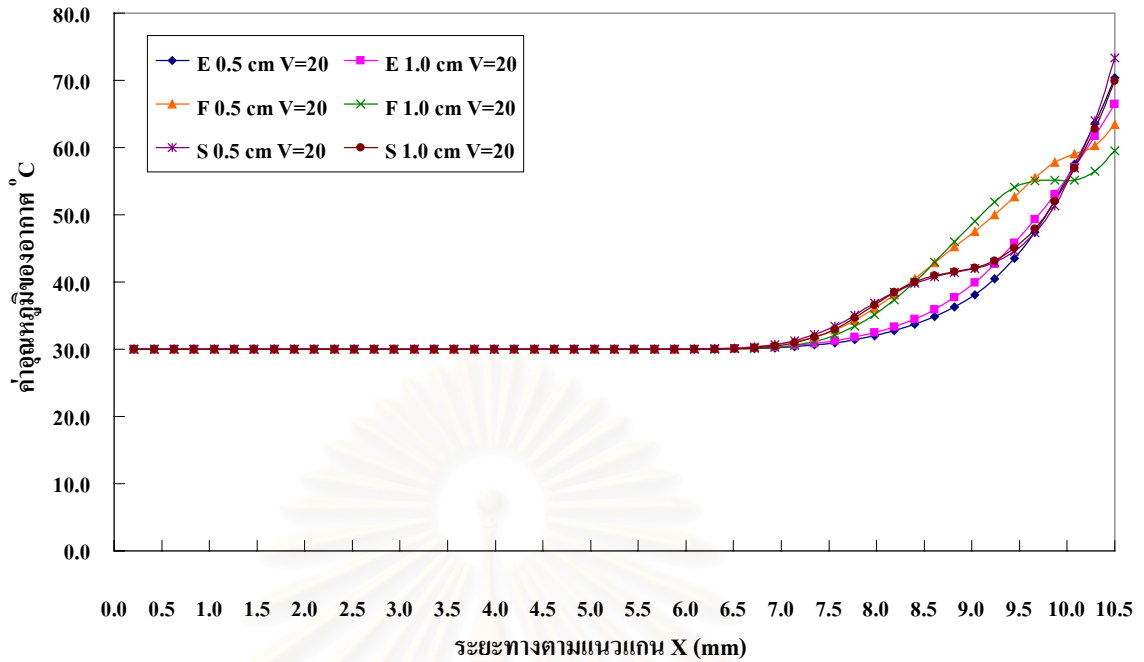
รูปที่ 6.181 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 40$ และ $IZ = 35$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



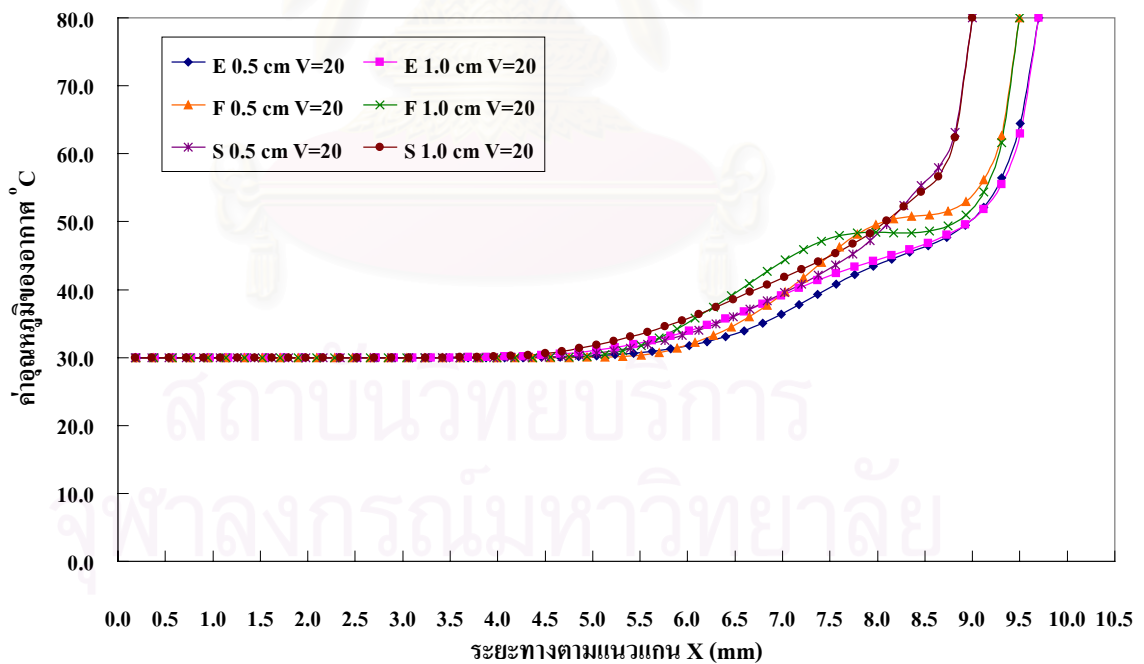
รูปที่ 6.182 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 1$



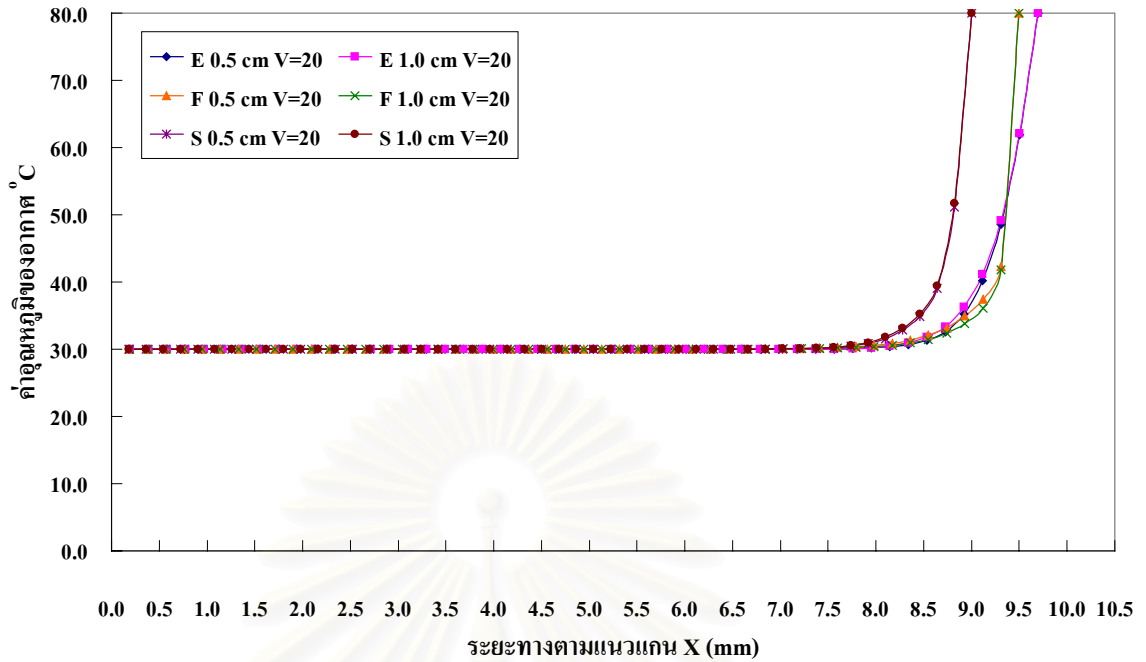
รูปที่ 6.183 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ด้าน $IY = 5$



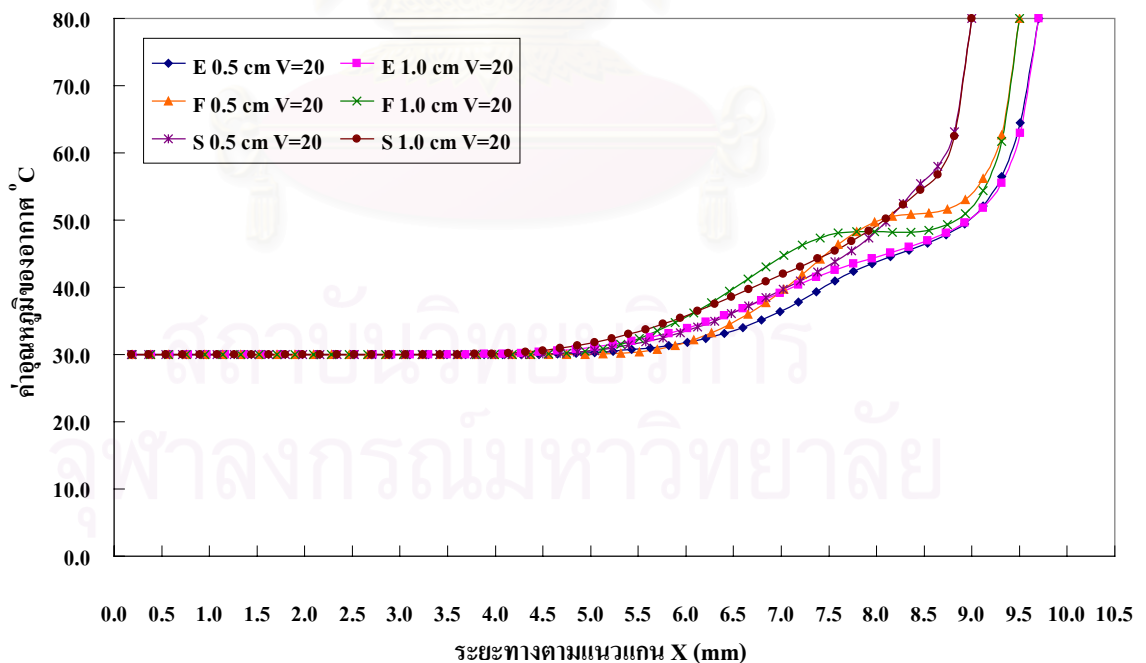
รูปที่ 6.184 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 50$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 10$



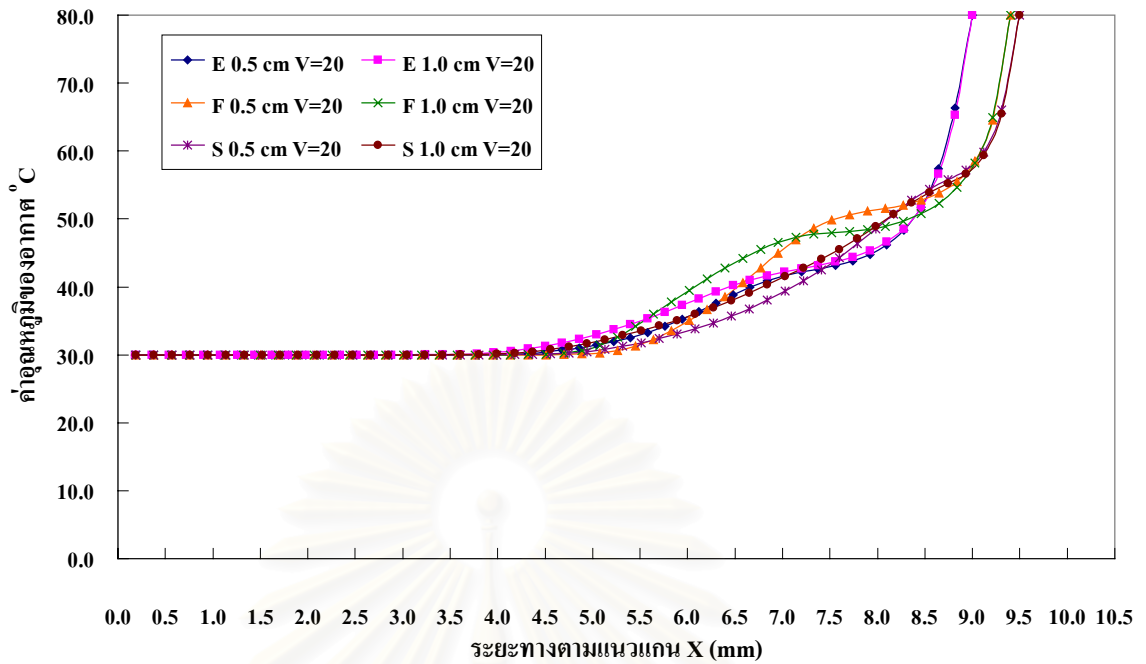
รูปที่ 6.185 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบแผ่นด้าน $IY = 1$



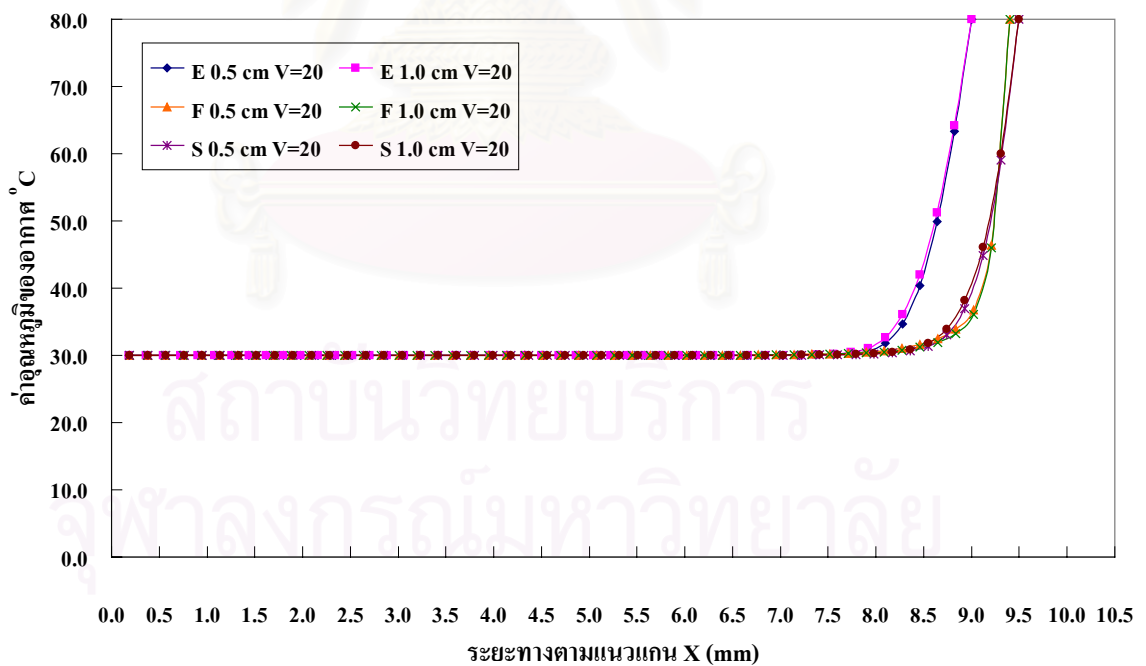
รูปที่ 6.186 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $IY = 5$



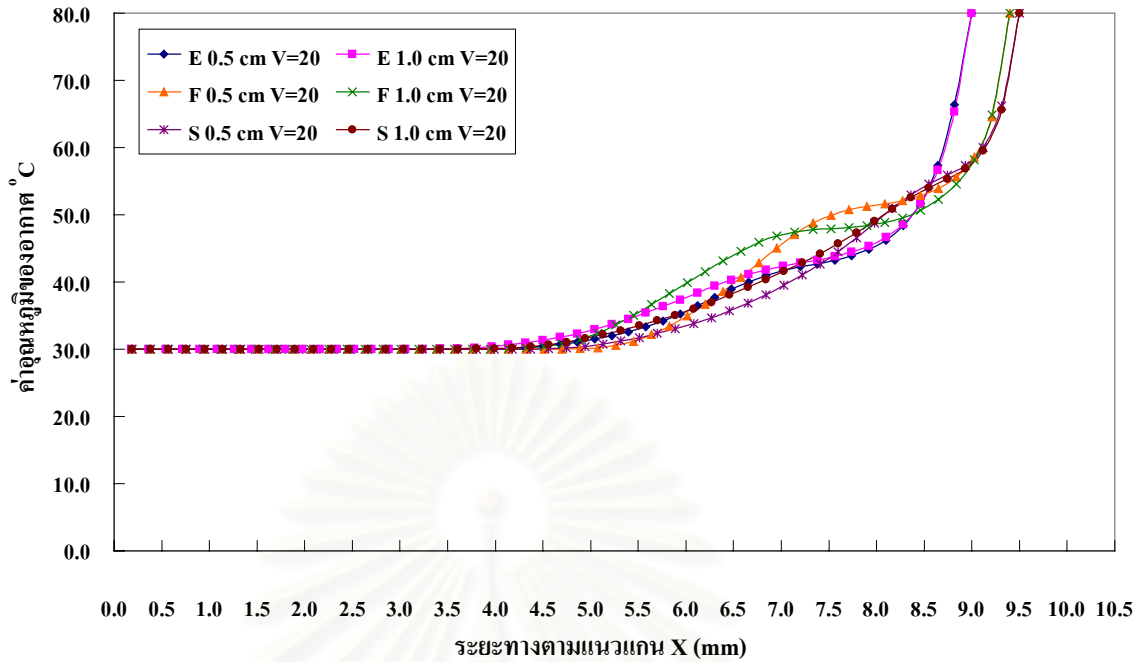
รูปที่ 6.187 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 60$ และ $IZ = 65$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



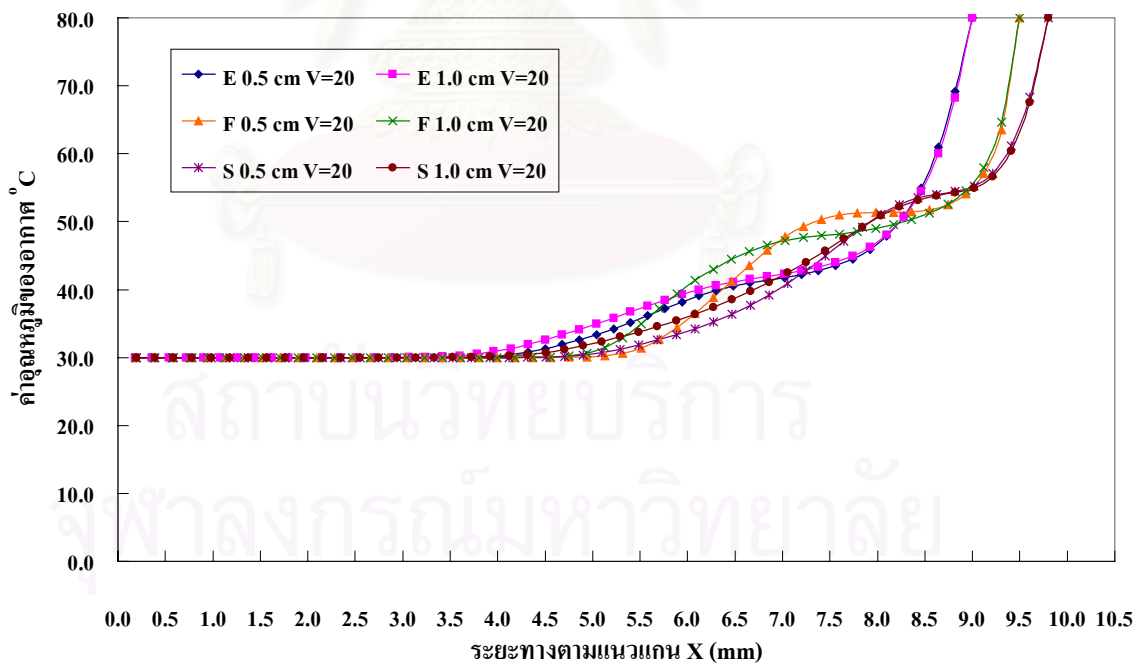
รูปที่ 6.188 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$



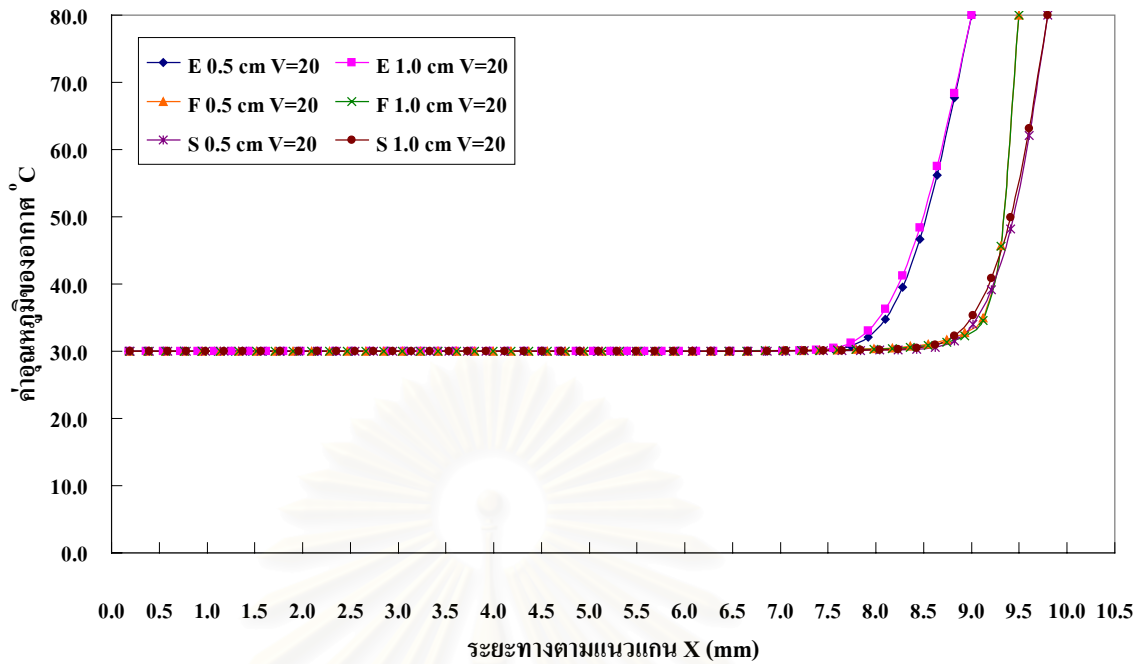
รูปที่ 6.189 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน $IY = 5$



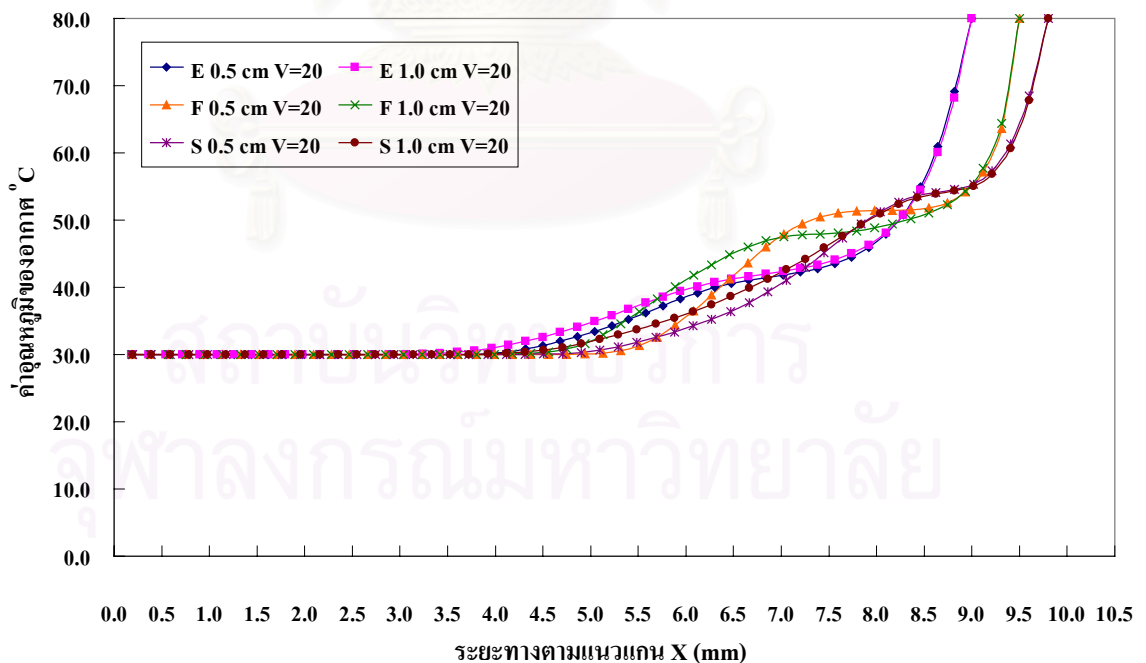
รูปที่ 6.190 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 65$ และ $IZ = 70$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $IY = 10$



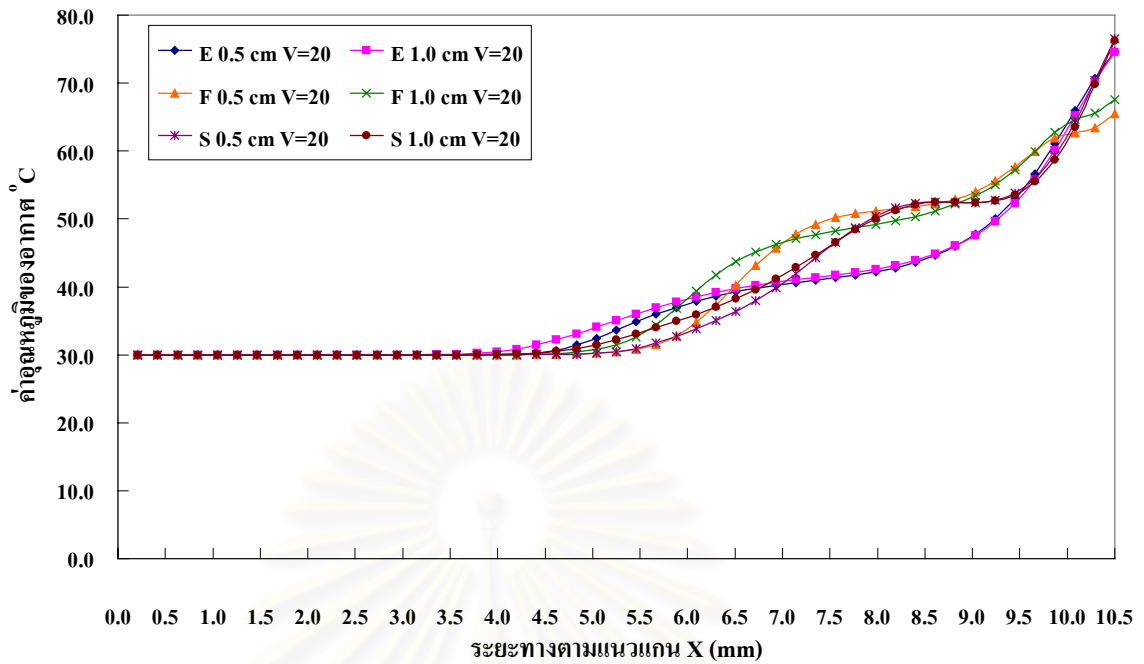
รูปที่ 6.191 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $IY = 1$



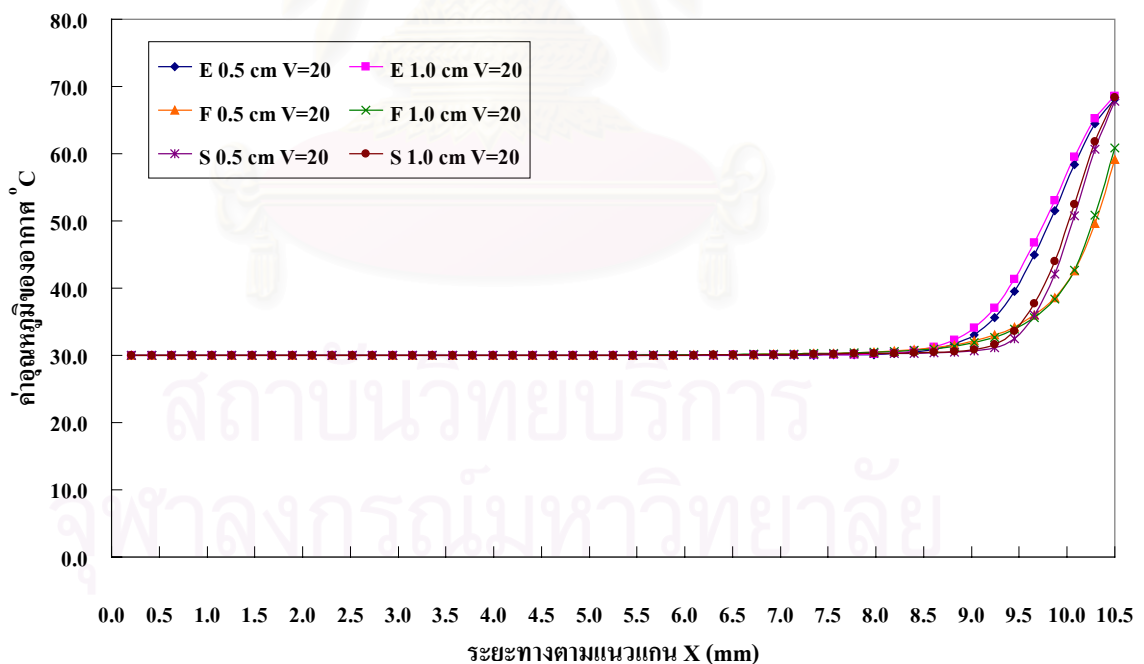
รูปที่ 6.192 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน ด้าน $IY = 5$



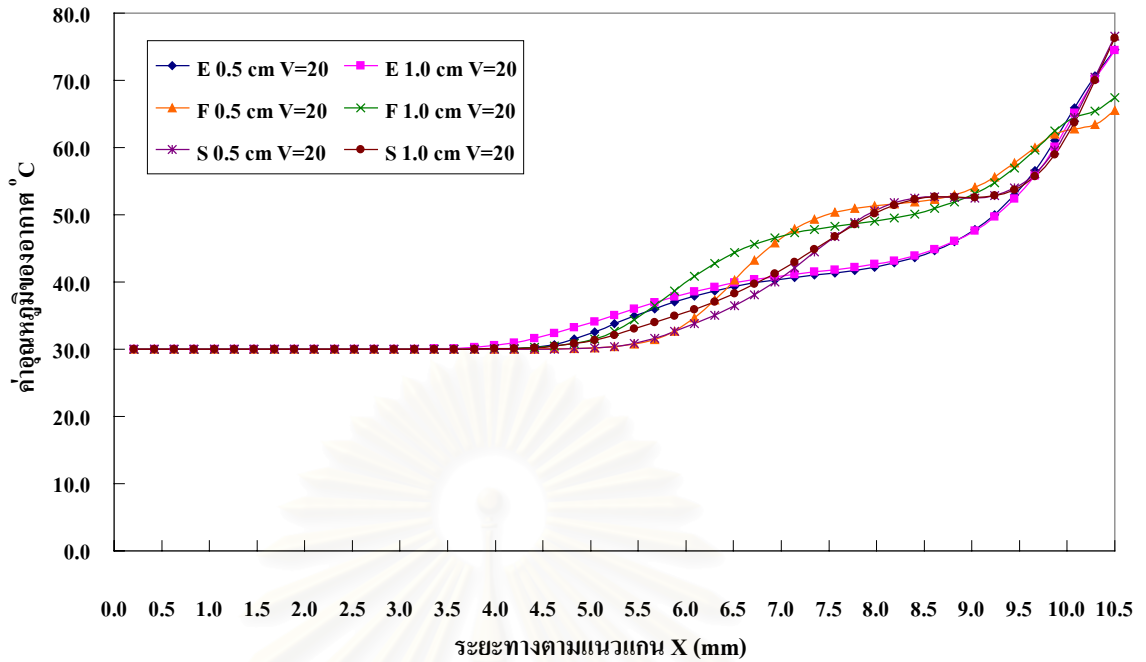
รูปที่ 6.193 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 70$ และ $IZ = 75$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 10$



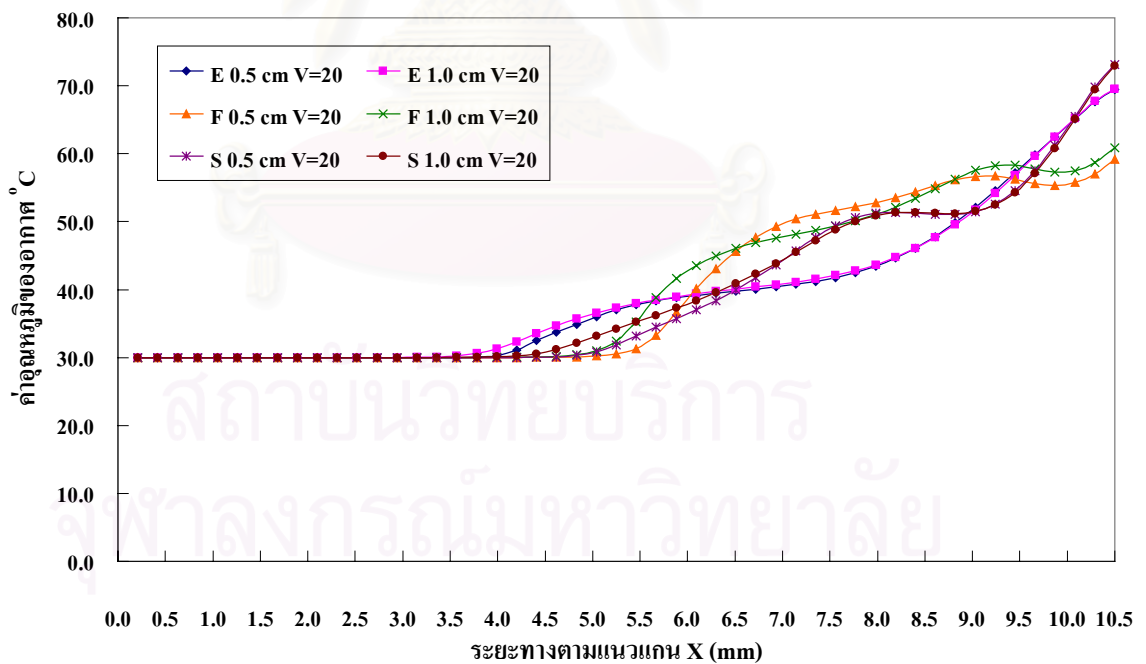
รูปที่ 6.194 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบบนด้าน $IY = 1$



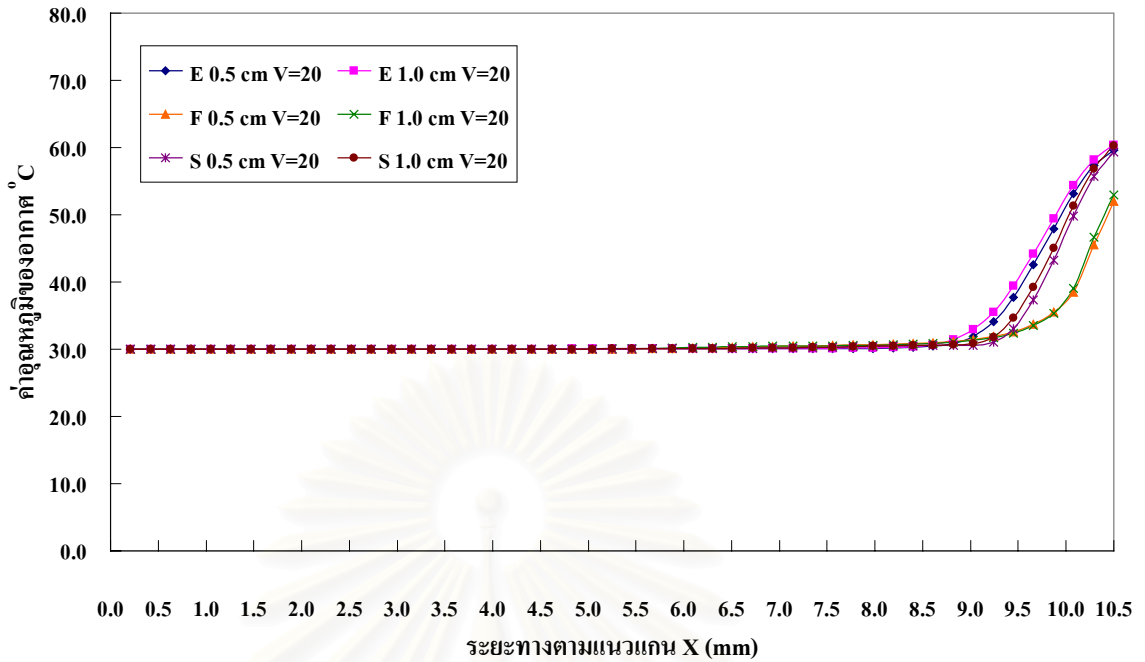
รูปที่ 6.195 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนด้าน $IY = 5$



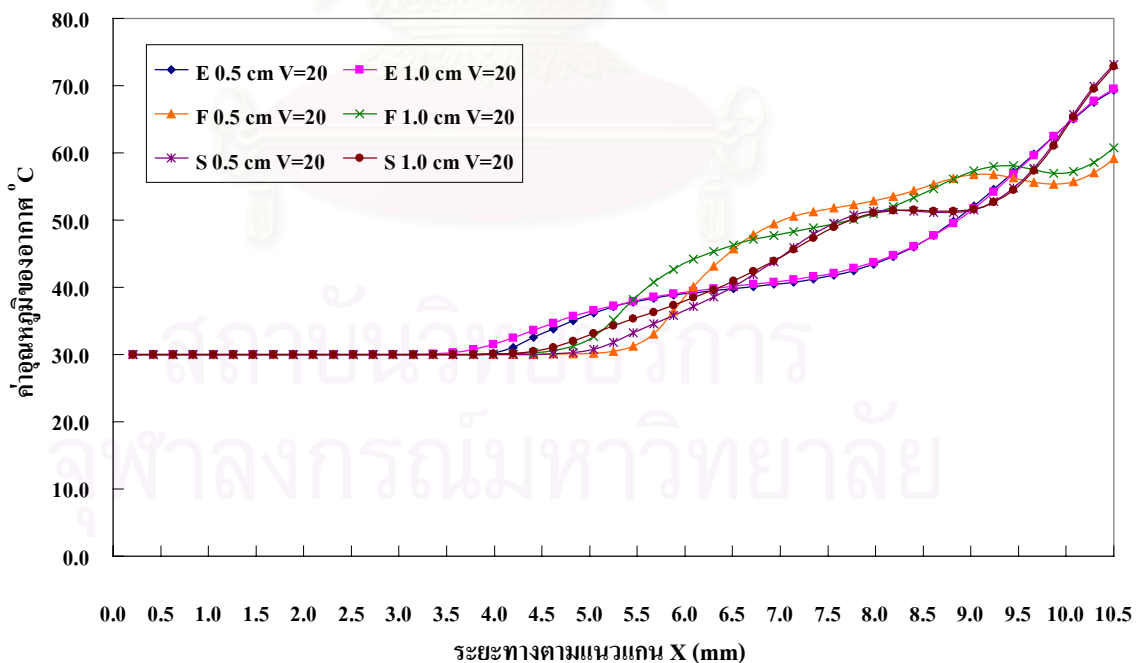
รูปที่ 6.196 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 80$ และ $IZ = 85$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $IY = 10$



รูปที่ 6.197 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง $IZ = 90$ และ $IZ = 95$ ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน $IY = 1$



รูปที่ 6.198 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 90 และ IZ = 95 ณ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบแผ่น ด้าน IY = 5



รูปที่ 6.199 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศ เท่ากับ 20 เมตร/วินาที ที่ตำแหน่ง IZ = 90 และ IZ = 95 ณ บริเวณใกล้ผนังของครีบแผ่นด้าน IY = 10

จากรูปที่ 6.146 ถึง 6.199 ได้แสดงค่าอุณหภูมิของอากาศตามตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน Z ที่กำหนดไว้ข้างต้น โดยพิจารณาค่าแห่งตามแนวแกน Y จำนวน 3 ตำแหน่ง ดังนี้ คือ บริเวณใกล้ผนังครีบบนและล่าง (Y= 1 และ Y= 10) และบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนและล่าง (Z = 5) โดยทำการเปรียบเทียบกันในแต่ละระยะห่างระหว่างท่อกับรูปทรงของท่อที่แตกต่างกัน

เมื่อทำการพิจารณากราฟที่แสดงค่าอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่ง IZ = 30, 35, 40 สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และที่ตำแหน่ง IZ = 25, 30, 35 สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณท่ออันที่หนึ่ง สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 15 เมตร/วินาที ที่บริเวณใกล้ผนังครีบบนและล่าง พบว่าค่าอุณหภูมิของอากาศ ที่ตำแหน่งทั้ง 3 จะได้ผลที่เหมือนกัน คือ ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบน > ท่อรูปทรงหยดน้ำ > ท่อรูปทรงวงรี และอุณหภูมิของอากาศสำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศสำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ส่วนบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนและล่าง พบว่าค่าอุณหภูมิของอากาศ ที่ตำแหน่งทั้ง 3 จะได้ผลที่เหมือนกัน คือ ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงวงรี > ท่อรูปทรงหยดน้ำ > ท่อรูปทรงแบน และอุณหภูมิของอากาศสำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 1.0 เซนติเมตร จะมีค่าที่มากกว่าอุณหภูมิของอากาศสำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อ เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อทำการพิจารณาที่ตำแหน่งกึ่งกลางระยะห่างระหว่างท่อ (IZ = 50) พบว่าค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อในแต่ละรูปทรงจะเริ่มเห็นถึงความแตกต่างเมื่อระยะทางตามแนวแกน X มีค่ามากกว่า 6.5 มิลลิเมตร และ 8.5 มิลลิเมตร สำหรับบริเวณใกล้ผนังทั้งสองด้าน และบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนและล่าง ตามลำดับ สำหรับที่บริเวณใกล้ผนังทั้งสองด้าน พบว่าความแตกต่างของค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ข้อมูลที่อยู่ในช่วง $6.5 > X > 10.5$ มาหาค่าเฉลี่ยจะได้ว่าค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบน (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (0.5 เซนติเมตร) สำหรับที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบนและล่าง พบว่าความแตกต่างของค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ข้อมูลที่อยู่ในช่วง $8.5 > X > 10.5$ มาหาค่าเฉลี่ยจะได้ว่าค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงวงรี (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (1.0 เซนติเมตร)

เมื่อทำการพิจารณาค่าอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่ง IZ = 60, 65, 70 สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และที่ตำแหน่ง IZ = 65, 70, 75 สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณท่ออันที่สอง สำหรับกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 15 เมตร/วินาที พบว่าที่บริเวณใกล้ผนังครีบบนและล่าง ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งทั้ง 3 จะเริ่มเห็นถึงความแตกต่างของค่าอุณหภูมิอากาศ เมื่อระยะตามแนวแกน X มีค่ามากกว่า 2.5 มิลลิเมตร และความแตกต่างของค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ข้อมูลที่อยู่ในช่วง $2.5 > X > 10.5$ มาหาค่าเฉลี่ย ผลที่ได้มีดังนี้ คือ

สำหรับตำแหน่งที่ $IZ = 60(0.5 \text{ เซนติเมตร})$ และ $IZ = 65(1.0 \text{ เซนติเมตร})$ ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบน (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) สำหรับตำแหน่ง $IZ = 65(0.5 \text{ เซนติเมตร})$ และ $IZ = 70(1.0 \text{ เซนติเมตร})$ ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบน (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (0.5 เซนติเมตร) สำหรับตำแหน่ง $IZ = 70(0.5 \text{ เซนติเมตร})$ และ $IZ = 75(1.0 \text{ เซนติเมตร})$ ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบน (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (0.5 เซนติเมตร) ส่วนที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างช่องว่างระหว่างครีบบน ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งทั้ง 3 จะได้ผลเหมือนกับที่ตำแหน่งทั้ง 3 ของท่ออันที่หนึ่ง

เมื่อทำการพิจารณาค่าอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่ง $IZ = 80, 90$ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และที่ตำแหน่ง $IZ = 85, 95$ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่บริเวณด้านหลังของท่ออันที่สอง สำหรับบริเวณใกล้เคียงทั้งสองด้าน พบว่าค่าอุณหภูมิของอากาศเริ่มเห็นถึงความแตกต่างเมื่อระยะทางตามแนวแกน X มีค่ามากกว่า 2.5 มิลลิเมตร ($IZ = 80$ และ $IZ = 85$) และ 2.0 มิลลิเมตร ($IZ = 90$ และ $IZ = 95$) และความแตกต่างของค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ข้อมูลที่อยู่ในช่วง $2.0 > X > 10.5$ สำหรับกรณี ($IZ = 80$ และ $IZ = 85$) และ ข้อมูลในอยู่ช่วง $2.5 > X > 10.5$ สำหรับกรณี ($IZ = 90$ และ $IZ = 95$) มาหาค่าเฉลี่ย ผลที่ได้ คือ ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบน (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (0.5 เซนติเมตร) โดยจะเหมือนกันทั้งสองกรณี ส่วนบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบน พบว่าค่าอุณหภูมิของอากาศเริ่มเห็นถึงความแตกต่างเมื่อระยะทางตามแนวแกน X มีค่ามากกว่า 8.5 มิลลิเมตร ทั้ง 2 ตำแหน่ง และความแตกต่างของค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ข้อมูลที่อยู่ในช่วง $8.5 > X > 10.5$ มาหาค่าเฉลี่ย ผลที่ได้ คือ ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงวงรี (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงวงรี (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (1.0 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงหยดน้ำ (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (0.5 เซนติเมตร) > ท่อรูปทรงแบน (1.0 เซนติเมตร) โดยจะเหมือนกันทั้ง 2 ตำแหน่ง

เมื่อความเร็วขาเข้าของอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 20 เมตร/วินาที พบว่าค่าของอุณหภูมิของอากาศ ยังคงได้ผลที่คล้ายคลึงกับกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 15 เมตร/วินาที แต่จะแตกต่างกันที่ระยะทางตามแนวแกน X ที่จะเริ่มเห็นถึงความแตกต่างของค่าอุณหภูมิอากาศของแต่ละรูปทรงท่อ และระยะห่างระหว่างท่อ โดยที่ระยะทางตามแนวแกน X ที่จะเริ่มเห็นถึงความแตกต่างของค่าอุณหภูมิอากาศสำหรับของกรณีนี้จะมีค่ามากกว่ากรณีแรก ในทุกตำแหน่งของระยะทางตามแนวแกน Z ที่ทำการพิจารณาโดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 60, 65, 70, 80, 90$ สำหรับระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร

และที่ตำแหน่ง $IZ = 50$ และ $IZ = 65, 70, 75, 85, 95$ สำหรับระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร จะเห็นถึงความแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วขาเข้าของอากาศมีค่าสูงขึ้นนั้น ทำให้เวลาที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่นมีน้อยลงเนื่องจากอากาศมีความเร็วมากขึ้น เป็นผลให้อากาศรับความร้อนจากแหล่งความร้อนได้น้อยลง จึงทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศมีค่าน้อยลง แต่การที่อากาศมีความเร็วขาเข้าที่สูงขึ้น ก็จะทำให้ความสามารถในการพาความร้อนภายในระบบออกสู่ภายนอกมีค่าที่สูงขึ้น แม้ว่าปริมาณความร้อนที่ออกจากระบบในแต่ละครั้งจะน้อยกว่ากรณีแรกก็ตาม

จากผลการจำลองข้างต้น จะเห็นว่ารูปทรงของท่อที่แตกต่างกัน ทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่นมีความแตกต่างกัน เนื่องด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับแหล่งความร้อนนั้นส่วนใหญ่เป็นการพาความร้อน ดังนั้นอิทธิพลด้านความเร็วและทิศทางของการไหลของอากาศ จึงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ที่บริเวณผิวท่อและบริเวณระยะห่างระหว่างท่อ มีความแตกต่างกัน จึงได้ทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการไหลของอากาศกับลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลภายในช่องว่างระหว่างครีบบแผ่นของท่อทั้ง 3 รูปทรง พบว่าที่บริเวณใกล้ผนังครีบบแผ่นทั้งสอง ลักษณะการไหลผ่านผิวท่อรูปทรงแบนทำให้ความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศที่บริเวณด้านหลังท่อมีการเปลี่ยนแปลงไปจากบริเวณผิวท่อด้านบนแบบทันทีทันใด ทำให้การไหลของอากาศกระจุกตัวอยู่ที่บริเวณด้านหลังท่อเป็นระยะเวลาสั้น จนอากาศที่อยู่บริเวณด้านหลังท่อมีเวลาในการรับความร้อนที่มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่บริเวณด้านหลังท่อมีค่าสูงกว่าอีก 2 กรณีอย่างเห็นได้ชัด ส่วนลักษณะการไหลที่ผ่านผิวท่อรูปทรงวงรีทำให้ความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศสามารถไหลสัมผัสกับผิวของท่อจนถึงบริเวณด้านหลังท่อ และยังสามารถเคลื่อนที่ออกจากผิวท่อได้โดยไม่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหลแบบทันทีทันใด จนอากาศที่อยู่บริเวณด้านหลังท่อมีเวลาในการรับความร้อนที่น้อยกว่าของท่อรูปทรงแบน จึงเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของอากาศที่บริเวณด้านหลังท่อมีค่าที่ต่ำกว่ากรณีท่อรูปทรงแบน ส่วนลักษณะการไหลผ่านผิวท่อรูปทรงหยดน้ำ ที่บริเวณด้านหน้าท่อ ความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วการไหลของอากาศถูกเร่งให้มีค่าที่สูงขึ้นและมีทิศทางการไหลของอากาศที่สัมผัสกับผิวท่อเช่นเดียวกับกรณีท่อรูปทรงวงรี แต่ค่าความเร็วของอากาศนั้นจะสูงกว่ากรณีท่อรูปทรงวงรี ทำให้อากาศพาความร้อนมาที่บริเวณด้านหลังท่อได้มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของอากาศที่บริเวณด้านหลังท่อมีค่ามากกว่าของกรณีท่อรูปทรงวงรี

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาลักษณะการไหลและการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสของอากาศที่ไหลแบบปั่นป่วนผ่านผิวท่อที่มีรูปทรงต่าง ๆ ที่เป็นแหล่งความร้อน ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบนและท่อ ด้วยการ Simulation ด้วยการใช้วิธีทางด้านซีเอฟดี โดยมีปัจจัยทางด้านรูปทรงของท่อเป็นปัจจัยหลักของการศึกษา และมีปัจจัยด้านระยะห่างระหว่างท่อ และปัจจัยด้านความเร็วขาเข้าของอากาศ เป็นปัจจัยรองที่นำมาพิจารณาพร้อมกับปัจจัยหลัก ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่งงานออกสามส่วนดังนี้

ส่วนแรกของงานวิจัยนี้ เป็นการคัดเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วน ที่สามารถอธิบายการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนได้เหมาะสมมากที่สุด โดยที่แบบจำลองที่นำมาพิจารณาเพื่อคัดเลือกได้รวบรวมจากทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการพิจารณาคัดเลือกด้วยการจำลองปรากฏการณ์ของลักษณะการไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงแปดเหลี่ยม ของของไหล ซึ่งผลที่ได้จากการพิจารณาค่าความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนที่ตำแหน่งต่าง ๆ และสรุปว่า แบบจำลอง Low K-Epsilon Model + Yap's Correction สามารถอธิบายลักษณะการไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงแปดเหลี่ยม พร้อมกับการเกิดจุด Separation และช่วงของการไหลวน (Recirculation Zone) ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ 6.90 % สำหรับระยะของการเกิด Separation Point และ 13.74 % สำหรับระยะสิ้นสุดของการไหลวน ดังนั้นจึงนำแบบจำลองนี้ไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ตามที่วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ส่วนที่สองของงานวิจัยนี้ เป็นการจำลองปรากฏการณ์ของการนำความร้อนภายในครีบบนซึ่งมีท่อรูปทรงต่าง ๆ เป็นแหล่งความร้อนเพียงอย่างเดียว เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในครีบบน ด้วยปัจจัยด้านรูปทรงของท่อ ที่นำศึกษามีอยู่ด้วยกัน 3 รูปทรง คือ ท่อรูปทรงแบน, ท่อรูปทรงวงรี และท่อรูปทรงหยดน้ำ ซึ่งเป็นแหล่งความร้อน ส่วนปัจจัยทางด้านระยะห่างระหว่างท่อ ที่นำมาศึกษามีอยู่ด้วยกัน 2 ระยะ คือ 0.5 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตร ผลการศึกษาที่ได้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยทางด้านรูปทรงของท่อมีผลกระทบน้อยมากเมื่อพิจารณาค่าอนุภาคนิวเคลียสตามแนวแกน X โดยอนุภาคนิวเคลียสที่กระจายตัวภายในครีบบนของแต่ละรูปทรงของท่อ พบว่ามีค่าที่ต่างกันเพียง 0.5 ถึง 1.0 องศาเซลเซียสเท่านั้น แต่เมื่อพิจารณาค่าอนุภาคนิวเคลียสตามแนวแกน Z ค่าอนุภาคนิวเคลียสที่กระจายตัวภายในครีบบนของแต่ละรูปทรงของท่อจะมีค่าที่แตกต่างกัน ส่วนปัจจัยทางด้านระยะห่างระหว่างท่อจะมีผลกระทบต่อ

กระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบบแผ่นอย่างมาก ซึ่งจากการพิจารณาอุณหภูมิที่กระจายภายในครีบบแผ่นของแต่ละรูปทรงของท่อ และแต่ละระยะห่างระหว่างท่อ พบว่าอุณหภูมิที่กระจายตัวภายในครีบบแผ่นที่บริเวณกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างท่อ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร มีค่าที่สูงกว่า กรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร และเวลาที่ใช้ในการทำให้ครีบบแผ่นมีอุณหภูมิเท่ากับแหล่งความร้อน สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร มีค่าที่น้อยกว่ากรณีที่ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

ส่วนสุดท้ายของงานวิจัยนี้ เป็นการจำลองปรากฏการณ์ของการนำความร้อนและการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบแผ่นและท่อ ซึ่งมีท่อรูปทรงต่าง ๆ เป็นแหล่งความร้อน เพื่อทำการศึกษาลักษณะการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงต่าง ๆ โดยมีสภาวะของการไหลเป็นแบบปั่นป่วน โดยที่มีปัจจัยที่ศึกษาเช่นเดียวกับส่วนของงานวิจัย และเพิ่มปัจจัยด้านความเร็วขาเข้าของอากาศ กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วนที่ได้จากส่วนแรกของงานวิจัย มาใช้ในการทำนายลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านผิวท่อรูปทรงต่าง ๆ และการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศ ผลการศึกษาที่ได้สามารถสรุปดังนี้

การไหลของอากาศมีลักษณะที่ไหลสัมผัสกับผิวท่อไปตลอดการเคลื่อนที่ โดยไม่มีการเกิดจุด Separation และช่วงของการไหลวน (Recirculation Zone) ซึ่งเหมือนกันทั้งสามรูปทรง ส่วนค่าความเร็วของอากาศได้ถูกเร่งให้มีค่าสูงขึ้นเมื่อไหลผ่านบริเวณผิวท่อทั้งสองอัน โดยมีค่าที่แตกต่างกัน รวมถึงตำแหน่งตามแนวแกน Z ของท่อ ที่ทำให้ความเร็วอากาศมีค่าสูงสุดด้วย โดยตำแหน่งที่ทำให้ความเร็วของอากาศมีค่าสูงสุด คือ บริเวณด้านหน้าท่อ สำหรับท่อรูปทรงแบนและ ท่อรูปทรงหยดน้ำ ส่วนท่อรูปทรงวงรี อยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของท่อ นอกจากนี้ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณท่ออันที่หนึ่ง มีค่าที่ต่ำกว่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณท่ออันที่สอง ส่วนปัจจัยด้านความเร็วขาเข้าของอากาศที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อลักษณะการไหลของอากาศ แต่ทำให้ค่าความเร็วอากาศภายในระบบสูงขึ้นเท่านั้น

การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศของทั้งสามรูปทรงของท่อ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยที่บริเวณใกล้ผนังทั้งสองด้านของครีบบแผ่น การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศบริเวณท่ออันที่หนึ่งมีให้น้อยกว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณท่ออันที่สองและด้านหลังท่ออันที่สอง ส่วนที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศบริเวณท่อทั้งสองจะใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาในระนาบ XY การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณผนังครีบบแผ่นกับบริเวณท่อ และกระจายตัวเข้าหากึ่งกลางของช่องว่างระหว่างครีบบแผ่น ส่วนปัจจัยทางด้านระยะห่างระหว่างท่อเริ่มมีอิทธิพลมากขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านบริเวณท่ออันที่หนึ่งไปแล้ว และปัจจัยด้านความเร็วขาเข้าของอากาศที่เพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศมีค่าที่น้อยลง แต่

ความสามารถในการพาความร้อนภายในระบบออกสู่ภายนอกระบบมีค่าที่สูงขึ้น แม้ว่าปริมาณความร้อนที่ออกจากระบบในแต่ละครั้งจะน้อยกว่ากรณีอากาศที่มีความเร็วขาเข้าที่ต่ำกว่า ส่วนลักษณะของการกระจายตัวยังคงไม่แตกต่างกัน

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการจำลองปรากฏการณ์การไหล และการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลแบบปั่นป่วนผ่านผิวท่อที่มีรูปทรงต่าง ๆ ที่เป็นแหล่งความร้อน ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีปแผ่นและท่อ ของงานวิจัยฉบับนี้ เป็นการพิจารณาด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่สำหรับปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจริง ๆ ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ยังมีเงื่อนไขอื่น ๆ อีกที่ไม่ได้นำมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นผู้เขียนจึงมีข้อเสนอแนะเพื่อให้ผลการคำนวณที่ได้ตรงกับความเป็นจริงมากขึ้นดังต่อไปนี้

1. เปลี่ยนการพิจารณาสถานะของการคำนวณ จากสภาวะคงตัว (Steady State) ไปเป็นสภาวะไม่คงตัว (Unsteady State)
2. เพิ่มเงื่อนไขของการสูญเสียพลังงานความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม
3. เพิ่มเงื่อนไขของแรงลอยตัวที่เกิดจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

รายการอ้างอิง

1. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. อุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. 2536.
2. Rosman, E.C. and Carajilescor, P. and Saboya, F.E.M. Performance of one-and Two-Row Tube and Plate Fin Heat Exchangers. J. Heat Transfer Vol.106 1984. : pp. 627-637.
3. Jiin-Yun Jang and Mu-Cheng Wu and Wen-Jeng Chang. Numerical and Experiment Studies of Three-Dimensional Plate-Fin and Tube Heat Exchangers. Int. Journal of Heat Mass Transfer. Vol.39. No.14. 1996. : pp. 3057-3066.
4. Rocha Lao and Saboya FEM and Vargas JVC. A Comparative Study of Elliptical and Circular in One- and Two-Row Tube and Plate fin Heat Exchangers. Int. Journal of Heat and Fluid Flow. Vol.18. No.2. 1997. : pp. 247-252.
5. S. F. TSAI and TONY W.H. SHEU. Some Physical Insight Into a Two-Row Finned Tube Heat Transfer. Computer & Fluid. Vol. 27. No. 1. 1998. : pp. 29-46.
6. Ricardo Romero-Méndez and Mihir Sen, K.T. Yang and Rodney McClain. Effect of Fin Spacing on Convection in a Plate Fin and Tube Heat Exchanger. Int.J. Heat & Mass Transfer. Vol.43. 2000. : pp.39-51.
7. John D. Anderson, Jr. Computation Fluid Dynamics. McGraw-Hill. 1995.
8. Bird, R.B. and Steward, W.E. and Lightfoot, E.N. Transport Phenomena. New York. John Wiley & Son. 1960.
9. Patankar, Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York. McGraw-Hill. 1980.

รายการอ้างอิง

10. Patankar, Suhas V. and Spalding, D.B. Int.J. Heat & Mass transfer. 15(1972) : 1787.
11. G. P. Almeida and D. F. G. Durão and M. V. Heitor. Wake Flow Behind Two-Dimensional Model Hills. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 7. 1993 : pp.87-101.
12. Jérôme RENARD and Dominique GRESSER. Computational Modeling of 2D Hill Flows. Dept. of Thermo and Fluid Dynamics. Chalmers University of Technology. Göteborg. Sweden. 1995.
13. James O. Wilkes. Fluid Mechanic For Chemical Engineers. Prentice-Hall. 1999.
14. Ralph L. Webb. Principles of Enhanced Heat Transfer. John Wiley & Sons. 1994.
15. CHAM/TR100. Shareware PHOENICS 1.4 Beginner's Guide. 2nd Edition. 1993.
16. CHAM/TR140. Shareware PHOENICS 1.4 PHOTON User Guide. 1993.
17. PHOENICS Encyclopedia. Turbulence Models. CHAM Limited. 1998.
18. PHOENICS Version 3.3. Manual Guide. CHAM Limited. 2000.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การแก้สมการพีชคณิตด้วยวิธี TDMA (TriDiagonal-Matrix Algorithm)

วิธี TDMA เป็นวิธีที่ใช้แก้สมการพีชคณิตในรูปแบบ 1 มิติ เมื่อพิจารณาจากระบบสมการที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวน N ตัว คือ $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ จัดเรียงกันในรูปแบบดังนี้

$$M_1 x_1 + U_1 x_2 = c_1 \quad (ก1)$$

$$L_1 x_1 + M_2 x_2 + U_2 x_3 = c_2 \quad (ก2)$$

$$L_2 x_2 + M_3 x_3 + U_3 x_4 = c_3 \quad (ก3)$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$L_{N-1} x_{N-2} + M_{N-1} x_{N-1} + U_{N-1} x_N = c_{N-1} \quad (ก4)$$

$$L_N x_{N-1} + M_N x_N = c_N \quad (ก5)$$

ตัวแปรที่มีค่าสัมประสิทธิ์ไม่เท่ากับศูนย์จะเรียงตัวกันเป็นแนวเฉียง โดยที่สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรจะมีค่าเฉพาะแนวกลาง (M_i) แถวบน (U_i) และ แถวล่าง (L_i) เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, N$

ในการแก้ระบบสมการข้างต้นจะเริ่มต้นจากการตัดพจน์ที่สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรในแถวล่าง (L_i) ออกในทุกสมการ จากนั้นจึงทำการแทนที่สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรในแถวกลางด้วยสมการ

$$M'_i = M_i - \frac{L_i U_{i-1}}{M'_{i-1}} \quad (ก6)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

และแทนที่พจน์ทางขวามือด้วยสมการ

$$c'_i = c_i - \frac{c'_{i-1} L_i}{M'_{i-1}} \quad (ก7)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

ดังนั้นเราจะได้ระบบสมการอยู่ในรูปแบบใหม่ดังนี้

$$M_1 x_1 + U_1 x_2 = c_1 \quad (\text{ก8})$$

$$M'_2 x_2 + U_2 x_3 = c'_2 \quad (\text{ก9})$$

$$M'_3 x_3 + U_3 x_4 = c'_3 \quad (\text{ก10})$$

.

.

.

$$M'_{N-1} x_{N-1} + U_{N-1} x_N = c'_{n-1} \quad (\text{ก11})$$

$$M'_N x_N = c'_N \quad (\text{ก12})$$

จากสมการที่ (ก12) พบว่าสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรตัวสุดท้ายได้ทันทีคือ

$$X_N = \frac{c'_N}{M'_N} \quad (\text{ก13})$$

ดังนั้นถ้าทำการคำนวณสมการย้อนกลับขึ้นไปเมื่อทราบค่า x_N ก็จะสามารถหาค่าของตัวแปรที่เหลือได้ตั้งสมการ

$$X_i = \frac{c'_i - U_i X_{i-1}}{M'_i} \quad (\text{ก14})$$

โดยเริ่มต้นการคำนวณที่ $X_i = X_{N-1}$ ไปสิ้นสุดที่ $X_i = X_1$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปัญญา รุ่งอรุณแสงชัย เกิดวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2521 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย