

การเพิ่มอัตราการกระจายตัวของเจี๊พระนาบและเจี๊พระนาบแบบวี่งชนพ่น่ง
โดยใช้การปรึบเปลี่ยนรูปแบบปากทางออก



นางสาว ชมพึชานั้ คู้หึรัญ

สถาบันวิทย์บริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานึพนันี้เป็นส่วนหนึ่ของการศึษาตามหลั้กสูตรปรึญญาวึศวกรรมศาสตรมหาบัณจัต

สาขาวิชาวิศวกรรมครึ่องกล ภาควิชาวิศวกรรมครึ่องกล

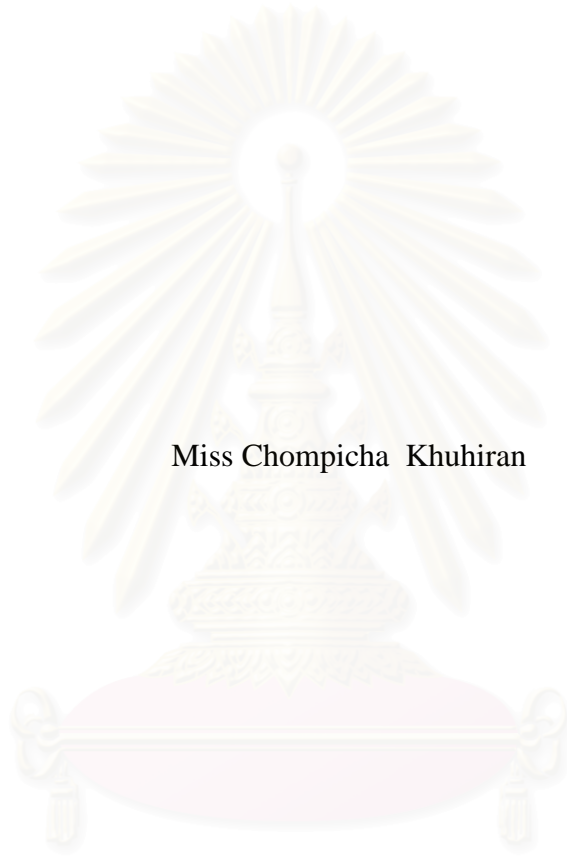
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึษา 2545

ISBN 974-17-2217-6

ลึชลึทึธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GROWTH RATE ENHANCEMENT FOR
PLANE JET AND IMPINGING PLANE JET
BY MEANS OF MANIPULATION OF A NOZZLE EXIT



Miss Chompicha Khuhiran

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2002
ISBN 974-17-2217-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มอัตราการกระจายตัวของเจ้าหน้าที่ระนาบและเจ้าหน้าที่ระนาบแบบวงรี
โดย นางสาว ชมพิวานันท์ คุ้มทรัพย์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราคุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราคุลย์)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ศักดิ์ มลิลา)

ชมพิจาน์ คูหิรัญ : การเพิ่มอัตราการกระจายตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนัง โดยการใช้การปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออก (GROWTH RATE ENHANCEMENT FOR PLANE JET AND IMPINGING PLANE JET BY MEANS OF MANIPULATION OF A NOZZLE EXIT) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราคุลย์, 127 หน้า. ISBN 974-17-2217-6.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของเจ็ทระนาบ (Plane jet) และเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนัง (Impinging plane jet) โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกของเจ็ททั้งสองแบบนี้ใช้โหลบรูปทรงคล้ายปิรามิดซึ่งมีความยาวคาบต่างกันสองค่าคือ 2 และ 4 เท่าของขนาดความกว้างปากทางออกเจ็ท (h) ตามลำดับโดยในงานวิจัยนี้พิจารณาผลการกระจายตัวของอนุภาคน้ำของเจ็ทร้อนทั้งสองแบบ จากผลการทดลองในส่วนของการลดลงของสัมประสิทธิ์อนุภาคน้ำ (C_{TG}) นั้นพบว่า ในแนวฐานโหลบชนกันนั้นการลดลงของอนุภาคน้ำลดลงอย่างมีความต่อเนื่อง ในขณะที่ลักษณะการลดลงของอนุภาคน้ำในแนวยอดโหลบชนกันนั้นเกิดมีจุดอนุภาคน้ำต่ำสุดและสูงสุดในบริเวณ Near field และในบริเวณ Near field นี้อนุภาคน้ำจะลดลงเร็วกว่าหากเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติดโหลบ เมื่อพิจารณาผลการกระจายตัวของอนุภาคน้ำในแนวแกนยาวของหน้าตัดทางออกเจ็ทที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวการไหล พบว่าการกระจายตัวมีลักษณะเป็นคลื่นซึ่งเป็นไปตามลักษณะของโหลบ โดยในบริเวณ Near field จำนวนลูกคลื่นอนุภาคน้ำมีเท่ากับจำนวนโหลบย่อย ถัดจากนั้นไปตามแนวการไหลจำนวนลูกคลื่นอนุภาคน้ำจะลดลงเรื่อยๆจนในที่สุดการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมีความสม่ำเสมอ จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคน้ำดังกล่าวข้างต้นนี้มีลักษณะอย่างเดียวกันสำหรับการติดโหลบทั้งสองแบบสำหรับการไหลแบบเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนัง จากผลการทดลองนั้นโดยทั่วไปแล้วกล่าวได้ว่าโหลบแบบ L140 ซึ่งมีคาบยาวกว่าโหลบแบบ L120 นั้นส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคน้ำได้มากกว่า รวมทั้งการติดโหลบส่งผลต่อการไหลแบบเจ็ทระนาบได้มากกว่าการไหลแบบเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนัง ซึ่งในส่วนรายละเอียดนั้นดูได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....ชมพิจาน์ คูหิรัญ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270267021: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: MIXING / MIXING ENHANCEMENT / LOBED NOZZLE/LOBE/
PLANE JET / IMPINGING PLANE JET

CHOMPICHA KHUHIRAN: GROWTH RATE ENHANCEMENT FOR PLANE
JET AND IMPINGING PLANE JET BY MEANS OF MANIPULATION OF A
NOZZLE EXIT. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA,
Ph.D., 127 pp. ISBN 974-17-2217-6.

The effects of pyramid-like lobed nozzle on the characteristics of a plane jet and a plane impinging jet are investigated. Two lobe sets are used: one with a period (T) twice the nozzle widths ($T = 2h$, L120), the other four times ($T = 4h$, L140). Heated jet is used and temperature distributions are surveyed. The results show that lobe has effects on the centerline temperature decay such that the decay at the through of the lobe exhibits the rather usual decay while the decay at the peak of the lobe exhibits a local minimum and a local maximum in the near field. In addition, the centerline decay along the peak shows steep decay in the near field region in comparison to the lobe-free nozzle. Furthermore, the spanwise distribution exhibits a periodic temperature distribution with the number of peaks and valleys equal to the number of lobes in the near field. As the flow develops further downstream, the number of peaks and valleys decrease until the spanwise temperature distribution reaches uniformity. These are common characteristic for both sets of lobed nozzle and for both cases of a plane jet and a plane impinging jet. In general, though, it is found that the lobe with longer period (L140) affects temperature distribution more than that with shorter period (L120), and that the lobe affects a plane jet more than a plane impinging jet. Details of temperature distribution are discussed.



Department.....Mechanical Engineering.....Student's signature.....Chompicha Khuhiran.....
Field of study.....Mechanical Engineering.....Advisor's signature.....
Academic year.....2002.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้นั้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และลุงอ้วน ที่เข้าใจ อดทนและเสียสละชีวิตอย่างยิ่ง ในช่วงแห่งการศึกษาและการทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งให้การสนับสนุนในทุกด้านยาวนานตลอดมา คอยเป็นกำลังแรงใจและเป็นแสงสว่างนำทางท่ามกลางความมืดทั้งปวง

กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงแก่ รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ที่กรุณาตั้งใจให้คำแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในทุกๆด้าน อย่างดียิ่ง รวมทั้งให้ความอดทน เสียสละ เป็นกำลังใจและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยมานาน โดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เคชะอำไพ รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ศักดิ์ มลิตา และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่ครั้งผู้วิจัยยังศึกษาในระดับปริญญาตรีตลอดจนถึงปริญญาโท รวมทั้งกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาคเครื่องกลทุกท่านด้วย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ภายใต้กิจกรรมการให้ทุนแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ปีงบประมาณ 2544 และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นอกจากนี้ขอขอบคุณขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้อง ในห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล อันประกอบไปด้วยพี่สุธรรม พี่ก๊วย พี่ทศ พี่โอม พี่ป้อ พี่ตั้ง พี่ตี พี่จิบ พี่บู๊ญ บอย พจน์ น้องกัมพ์ ที่มีน้ำใจเอื้อเฟื้อเผื่อแผ่ ให้ความช่วยเหลือและความห่วงใยเอื้ออาทรต่อผู้วิจัยเป็นอย่างมากเสมอมา รวมทั้งเก่ง ที่ทำให้รู้จักระโรหลายอย่างที่ยังไม่เคยรู้

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณครูไพโรจน์และเพื่อนที่ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และให้ยืมอุปกรณ์ในด้านงานช่างต่างๆ ขอขอบคุณพี่หมิงที่คอยเป็นกำลังใจเสมอโดยตลอด และให้ความช่วยเหลือในทุกด้านแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณพี่ เพื่อน น้อง ที่ให้ความเอื้อเฟื้อต่างๆ เป็นกำลังใจ คอยเป็นห่วงเป็นใยอยู่เสมอ อันได้แก่ บอล สันต์ ปู ปอม สัม พร พี่ก๊วย พี่ประสาทพร พี่ทวี พี่วัฒน์ พี่ปอนด์ พี่นิพนธ์ พี่โดม พี่เวช น้องเปาว์ น้องนิ ไบ้ น้องๆกลุ่ม Cyclone กลุ่ม Pulsed jet กลุ่ม Swirling tabbed jet พี่ๆและครูใน Shop เครื่องกล รวมทั้งเพื่อนๆร่วมภาคและอื่นๆอีกหลายคนซึ่งไม่สามารถยกมากล่าวได้หมดในที่นี้

ชมพิชาน์ คูหิรัญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์	4
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4. ความคาดหวังของงานวิจัย	5
บทที่ 2 ชุมทดลองและการทดลอง.....	6
2.1. รายละเอียดชุมทดลอง	6
2.2. พืชอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง	12
2.3. วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด	12
บทที่ 3 ผลการทดลอง	15
3.1. ผลของโหลบต่อการไหลแบบเจ้พระนาบ.....	15
3.2. ผลของโหลบการไหลแบบเจ้พระนาบว้งชนผนัง.....	21
3.3. เปรียบเทียบผลของโหลบต่อการไหลแบบเจ้พระนาบและเจ้พระนาบว้งชน ผนัง.....	24
บทที่ 4 อภิปรายผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง.....	26
รายการอ้างอิง.....	118
ภาคผนวก ก	120
ภาคผนวก ข	125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	สรุปลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต	หน้า
		29



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 พัดลม และ Flexible duct	41
รูปที่ 2.2 Inverter	41
รูปที่ 2.3 Orifice plate	41
รูปที่ 2.4 Guide vane.....	41
รูปที่ 2.5 Schematic drawing แสดงอุโมงค์ลม	42
รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายอุโมงค์ลม	42
รูปที่ 2.7 Contraction แบบสองมิติ.....	43
รูปที่ 2.8 ส่วนทดลอง (Test section)	43
รูปที่ 2.9 Honeycomb	43
รูปที่ 2.10 Heater “W” Form แบบมีคิริบ	44
รูปที่ 2.11 แผงวงจรควบคุม Heaters	44
รูปที่ 2.12 Lobe จากงานวิจัยของ Stitsuwongkul, T. (2000).....	44
รูปที่ 2.13 ใบพัดแบบสี่ใบ	45
รูปที่ 2.14 ใบพัดแบบแปดใบ	45
รูปที่ 2.15 ท่อทรงกระบอกแนวนอนและแนวตั้ง.....	45
รูปที่ 2.16 กริดเหล็กหน้ากว้าง 2 นิ้ว.....	46
รูปที่ 2.17 กริดเหล็กหน้ากว้าง 1½ นิ้ว.....	46
รูปที่ 2.18 ตะแกรงเหล็กเจาะรูขนาดใหญ่และขนาดเล็ก	46
รูปที่ 2.19 Schematic drawing แสดง Lobe	47
รูปที่ 2.20 Lobe L120 และ L140	47
รูปที่ 2.21 Thermocouple probe สำหรับวัดอุณหภูมิ T และ T_j	47
รูปที่ 2.22 แนวการวัดอุณหภูมิของการไหลแบบเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบวงวนผนัง.....	48
รูปที่ 2.23 พิกัดแกนอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง	48
รูปที่ 2.24 การจัดวางตัวของอุปกรณ์ต่างๆภายในห้องทำความร้อน (Heating chamber).....	49
รูปที่ 2.25 Thermocouple probe แบบ A	49
รูปที่ 2.26 Pitot probe	49
รูปที่ 2.27 อุปกรณ์สำหรับการเปรียบเทียบ Thermocouple วัดอุณหภูมิ	50
รูปที่ 2.28 Immersion circulator	50

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.29 Water bath	50
รูปที่ 2.30 Thermocouple thermometer	51
รูปที่ 2.31 Inclined manometers	51
รูปที่ 2.32 ผลการปรับเทียบระบบเครื่องมือวัดอุณหภูมิสำหรับ Thermocouple probe แบบ A52	
รูปที่ 2.33 ผลการปรับเทียบระบบเครื่องมือวัดอุณหภูมิสำหรับ Thermocouple probe แบบ B52	
รูปที่ 2.34 สถานะเริ่มต้นของอุณหภูมิบริเวณหน้าตัดทางออกเจ็ทสำหรับการไหลแบบเจ็ทระนาบ..	
.....	53
รูปที่ 2.35 สถานะเริ่มต้นของอุณหภูมิบริเวณหน้าตัดทางออกเจ็ทสำหรับการไหลแบบเจ็ทระนาบ	
วิ่งชนผนัง	53
รูปที่ 3.1 การลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล ที่	
$y=0$	54
รูปที่ 3.2 การลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล ที่	
$y=0$	55
รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบตามแนวขวางการ	
ไหล ที่ $y=0$	56
รูปที่ 3.4 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบตามแนวขวางการ	
ไหล ที่ $y=0$	57
รูปที่ 3.5 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล	58
รูปที่ 3.6 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000	59
รูปที่ 3.7 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 ที่ $z/h=0$	60
รูปที่ 3.8 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 ที่ $z/h=5$	61
รูปที่ 3.9 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 ที่ $z/h=6$	62
รูปที่ 3.10 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L120	63
รูปที่ 3.11 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L120 ที่ $z/h=0$	
(Apex).....	64
รูปที่ 3.12 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L120 ที่ $z/h=5$	
(Base)	65
รูปที่ 3.13 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L140	66

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L140 ที่ $z/h=0$ (Apex).....	67
รูปที่ 3.15 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L140 ที่ $z/h=6$ (Base)	68
รูปที่ 3.16 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล	69
รูปที่ 3.17.การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000	70
รูปที่ 3.18 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L120	71
รูปที่ 3.19 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L140	72
รูปที่ 3.20 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล	73
รูปที่ 3.21.การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=0$ (Apex)	74
รูปที่ 3.22.การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=5$ และ 6 (Base)	75
รูปที่ 3.23 การลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $y=0$	76
รูปที่ 3.24 การลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $y=0$	77
รูปที่ 3.25 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวขวางการไหล ที่ $y=0$	78
รูปที่ 3.26 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวขวางการไหล ที่ $y=0$	79
รูปที่ 3.27 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวแกนการไหล	80
รูปที่ 3.28 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i	81
รูปที่ 3.29 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i ที่ $z/h=0$	82
รูปที่ 3.30 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i ที่ $z/h=5$	83
รูปที่ 3.31 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i ที่ $z/h=6$	84

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.32.รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L120i	85
รูปที่ 3.33.รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L120i ที่ $z/h=0$ (Apex).....	86
รูปที่ 3.34 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L120i ที่ $z/h=5$ (Base).....	87
รูปที่ 3.35.รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L140i 88	
รูปที่ 3.36 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L140i ที่ $z/h=0$ (Apex).....	89
รูปที่ 3.37.รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L140i ที่ $z/h=6$ (Base).....	90
รูปที่ 3.38.การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล	91
รูปที่ 3.39.การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i....	92
รูปที่ 3.40.การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L120i....	93
รูปที่ 3.41 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L140i....	94
รูปที่ 3.42 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล	95
รูปที่ 3.43.การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=0$ (Apex)	96
รูปที่ 3.44 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=5$ และ 6 (Base)	97
รูปที่ 3.45 เปรียบเทียบการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจำรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบและเจ็ท ระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $y=0$	98
รูปที่ 3.46 เปรียบเทียบการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจำรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบและเจ็ท ระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $y=0$	99
รูปที่ 3.47 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตาม แนวแกนการไหล	100
รูปที่ 3.48.เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตาม แนวแกนการไหลในกรณี L000 และ L000i	101

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.63 เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนนึ่งตามแนวแกน การไหลที่ $z/h=0$ (Apex).....	116
รูปที่ 3.64 เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนนึ่งตามแนวแกน การไหลที่ $z/h=5$ และ 6 (Base).....	117



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดปากทางออกเจ็ท
h	ความกว้างของปากทางออกเจ็ท
C_{TG}	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (Global coefficient of temperature)
Re_h	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number)
T_{ref}	อุณหภูมิอ้างอิง
C_T	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Coefficient of temperature)
T_a	อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม
\overline{T}_J	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area – averaged temperature) ที่หน้าตัดทางออกเจ็ท
T	อุณหภูมิที่ตำแหน่งใดๆ
u	ความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่งใดๆ
Nu	Nusselt number
x	แกนพิกัดฉาก X
y	แกนพิกัดฉาก Y
z	แกนพิกัดฉาก Z

อักษรกรีก

δ	ค่าความไม่แน่นอนในการทดลอง (Uncertainty)
ρ	ค่าความหนาแน่นของอากาศ
β	อัตราส่วนช่องเปิดของ Orifice

อักษรย่อ

SWG	British standard wire gauge
L000	กรณีการไหลแบบเจ็ทระนาบที่ไม่มีการติดโหลบบนที่ปากทางออกเจ็ท
L000i	กรณีการไหลแบบเจ็ทระนาบวงรีที่มุมที่ 90 องศาที่ไม่มีการติดโหลบบนที่ปากทางออกเจ็ท
L120	กรณีการไหลแบบเจ็ทระนาบที่ติดโหลบบนแบบ L120 ที่ปากทางออกเจ็ท
L120i	กรณีการไหลแบบเจ็ทระนาบวงรีที่ติดโหลบบนแบบ L120 ที่ปากทางออกเจ็ท
L140	กรณีการไหลแบบเจ็ทระนาบที่ติดโหลบบนแบบ L140 ที่ปากทางออกเจ็ท
L140i	กรณีการไหลแบบเจ็ทระนาบวงรีที่ติดโหลบบนแบบ L140 ที่ปากทางออกเจ็ท
Apex	ตำแหน่งที่ยอดโหลบชนกัน
Base	ตำแหน่งที่ฐานโหลบชนกัน

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลของอากาศผ่านช่องยาวรูปสี่เหลี่ยม (Slot) ซึ่งมีลักษณะที่เรียกว่าเจ็ทระนาบ (Plane jet) นั้นสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในงานทางด้านวิศวกรรม ตัวอย่างหนึ่งเช่น การไหลของอากาศเย็นผ่านหัวจ่ายที่มีลักษณะเป็น Slot ภายในห้องและอาคารขนาดใหญ่ที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศแบบใช้ Chiller ซึ่งส่งอากาศเย็นผ่านตามท่อไปยังห้องต่างๆภายในอาคาร แล้วถูกปล่อยออกมาทางหัวจ่ายที่มีลักษณะเป็น Slot ดังกล่าว ภายในบริเวณห้องปรับอากาศนั้นอาจมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ อุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆภายในห้องนั้นค่อนข้างจะมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ใต้หัวจ่ายที่มีลักษณะเป็น Slot นั้นจะมีอุณหภูมิต่ำและความเร็วอากาศสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งจะทำให้คนที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวรู้สึกหนาวและไม่สบายในขณะที่คนที่อยู่ในบริเวณอื่นๆของห้องจะรู้สึกร้อน ที่เป็นเช่นนี้เพราะการกระจายตัวของอากาศเย็นที่ออกมาจากหัวจ่ายแบบ Slot นั้นไม่ดีพอ ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องนั้นไม่สม่ำเสมอและเหมาะสม

ลักษณะการไหลของอากาศที่ออกมาจากหัวจ่ายแบบ Slot นั้นมีลักษณะเป็นเจ็ทระนาบและในขณะที่ถ้าอากาศไหลจนกระทั่งชนผนังหรือพื้นห้องการไหลจะมีลักษณะเป็นเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนัง (Impinging plane jet) ดังนั้นหากมีความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการไหลของอากาศแบบเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนัง แล้วนั้นจะทำให้สามารถควบคุมลักษณะการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องหรืออาคารขนาดใหญ่ที่มีระบบปรับอากาศได้ดีขึ้น

ส่วนในแง่การเผาไหม้โดยเฉพาะห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะห้องเป็นสี่เหลี่ยมนี้ต้องการให้เชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันอย่างมีประสิทธิภาพและในระยะเวลาที่พอเหมาะเพื่อให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีที่สุดซึ่งจะส่งผลถึงการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม ในส่วนนี้ก็เกี่ยวข้องกับลักษณะการกระจายตัวของเจ็ทเช่นกัน

เนื่องจากลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลออกมาจาก Slot นี้มีลักษณะเป็นเจ็ทระนาบดังนั้นความพยายามในการที่จะเพิ่มการกระจายตัวของอากาศจึงต้องมุ่งเน้นไปที่วิธีการในการเพิ่มการกระจายตัวของเจ็ทระนาบตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนรูปแบบปากทางออก Nozzle หรือโดยใช้การกระตุ้น เป็นต้นดังที่จะเห็นได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาดังนี้

คณะนักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการศึกษาดังนี้ โดย Khuhiran et al. (1999) ทำการศึกษาผลของช่องเปิดท้ายห้องระบายอากาศต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องระบายอากาศโดยความเร็วของ Supply air เป็น 4.4 เมตรต่อวินาที พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องระบายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากถ้าช่วงการปิดผนังท้ายห้องอยู่ในช่วงเปิดหมดจนปิดน้อยกว่าขนาดความหนาของเจ็ทซึ่งวัดที่ท้ายห้อง แต่เมื่อปิดเกินกว่าความหนาของเจ็ทแล้วอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องระบายอากาศจะประมาณคงที่ Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000) และ Stitsuwongkul (2001) ทำการศึกษาถึงผลของการใช้ Lobed Nozzle ซึ่งรูปร่างพื้นฐานเป็น Nozzle ที่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องเปิดท้ายห้องทดลองหรือห้องระบายอากาศ และผลของความเร็วของ Supply air ที่เข้าสู่ห้องทดลองหรือห้องระบายอากาศร่วมกับผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องเปิดท้ายห้องในกรณีที่ไม่ใช้ Lobed Nozzle โดยใช้ความเร็ว Supply air สองค่า คือ 4.4 และ 0.5 เมตรต่อวินาที พบว่า Lobed Nozzle สามารถช่วยให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องระบายอากาศดีขึ้นโดยจะมีผลทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ด้านล่างของห้องทดลองสูงขึ้น โดยการใช้ Lobed Nozzle L240 (ซึ่งได้ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นนี้ด้วย) สามารถช่วยให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องทดลองดีขึ้นโดยจะมีผลทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณด้านล่างห้องทดลองสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ขนาดช่องเปิดมีค่าน้อย (อัตราส่วนการเปิดน้อยกว่า 24%) ส่วน Lobed Nozzle L224 จะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด สำหรับในกรณีที่ไม่ใช้ Lobed Nozzle นั้น ที่ความเร็วต่ำ (0.5 เมตรต่อวินาที) อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องทดลองจะขึ้นอยู่กับขนาดช่องเปิดท้ายห้องทดลองตลอดช่วงการเปิดแม้ว่าปิดเกินกว่าความหนาของเจ็ทแล้วก็ตาม ที่ความเร็วสูง (4.4 เมตรต่อวินาที) อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากถ้าช่วงการปิดผนังท้ายห้องอยู่ในช่วงเปิดหมดจนปิดน้อยกว่าขนาดความหนาของเจ็ทซึ่งวัดที่ท้ายห้อง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปิดเกินกว่าความหนาของเจ็ทแล้วอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องระบายอากาศจะประมาณคงที่

Zaman และ Raman (1997) ทำการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทแบบปั่นป่วนจากปากทางออกกลมที่มีการติด Tab สองตัวตรงข้ามกันร่วมกับการทำการกระตุ้นโดยใช้ระบบขับเคลื่อนแบบไฟฟ้า พบว่าการที่เจ็ทมีทั้งการติด Tab ร่วมกับการกระตุ้นจะทำให้อัตราการกระจายตัวของเจ็ทลดลง ถึงแม้ว่าผลของการติด Tab อย่างเดียวหรือการกระตุ้นอย่างเดียวจะช่วยเพิ่มอัตราการกระจายตัวของเจ็ทก็ตาม

Jones IV และ Rogers ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของความเร็วของเจ็ทหน้าตัดวงกลมซึ่งมีค่าเรย์โนลด์เป็น 12.5×10^4 โดยใช้อุโมงค์น้ำและมีการเปลี่ยนรูปแบบปากทางออก Nozzle โดยติด Delta Tab หนึ่งตัวเอนไปทางด้านท้ายการไหลเป็นมุม 45° และติด Half Delta

Wing Vortex Generator หนึ่งตัวซึ่งมีมุม Attack เอนเข้าไปในปาก Nozzle 5 ค่าต่างๆกัน พบว่าการไหลเมื่อผ่าน Vortex Generator แล้วจะก่อให้เกิดบริเวณที่มีการไหลหมุนวนสวนทางกันซึ่งจะช่วยในการดึงมวลน้ำภายนอกเข้ามาผสมได้ดีขึ้น และเมื่อมุม Attack ของ Vortex Generator เปลี่ยนจาก 30° ไปเป็น 45° ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วของเจ็ทน้ำนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างสิ้นเชิง แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการดึงมวลเข้ามาผสมนั้นไม่เพิ่มขึ้นมากนักเมื่อมุม Attack เพิ่มขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการดึงมวลเข้ามาผสมนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุมปะทะโดยตรงแต่ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและระยะห่างของการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นจากการติด Tab และ Vortex Generator

Belovich and Sammy (1996) ได้ทำการศึกษาการไหลใน Coaxial Jet ที่มี Inner Jet ไหลผ่าน Lobed-Mixer โดยทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็วภายในต่อภายนอกสามค่า คือ อัตราส่วนความเร็วภายในต่อความเร็วภายนอกเป็น 1:1, 1:3 และ 3:1 พบว่าการผสมผสานจะดีขึ้นเมื่อมีการไหลหมุนวนตามทิศทางการไหลและ Large scale structure อันเกิดจากความไม่มีเสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz ของการไหลเพิ่มขึ้น

Foss and Jones (1968) ศึกษาผลของ secondary flow ที่มีต่อ Rectangular Jet และ Owczarek and Rockwell (1972) ศึกษาเกี่ยวกับการไหลที่ใช้ Nozzle แบบสองมิติ เสนอว่าการที่ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วตามแนว Spanwise ของเจ็ทมีลักษณะไม่สม่ำเสมออาจเนื่องมาจาก Secondary flow และการยึดตัวของ Vortex ตามลำดับ

Krothapalli et al. (1981) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผสมของเจ็ทที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Jet) แบบสามมิติที่ปล่อยออกสู่อากาศนิ่งภายนอก พบว่าการไหลของเจ็ทที่พุ่งออกจาก Nozzle ที่มีหน้าตัดทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ Potential core region, Two-dimensional type region และ Axisymmetric-type region

Ricou and Spalding (1961) และ Sforza and Mons (1978) ศึกษาการ Entrainment ของเจ็ทพบว่าอัตราการ Entrainment เป็นฟังก์ชันของ $(\rho_\alpha / \rho_{jet})^{1/2} (x / d_{jet})$; ρ_α คือค่าความหนาแน่นของ Freestream, ρ_{jet} คือ ค่าความหนาแน่นของเจ็ท, x คือแกนพิกัดจากเจ็ทไปทาง Downstream และ d_{jet} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ท

ดังจะเห็นได้จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาว่าวิธีที่ช่วยทำให้การกระจายตัวของเจ็ทดีขึ้นนั้นมีหลายวิธีการ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ แบบไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก (Passive control) และแบบอาศัยพลังงานจากภายนอก (Active control) ซึ่งการติดตั้ง Tab หรือ

Lobe ที่ปากทางออกของ Nozzle ซึ่งเป็นการควบคุมแบบ Passive control นั้นเป็นแบบที่กำลังได้รับความนิยมในงานวิจัยในปัจจุบัน เนื่องจากสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่า และดำเนินการติดตั้งได้ง่ายกว่าแบบ Active control โดยเฉพาะการใช้การปรับเปลี่ยนลักษณะปากทางออกของเจ็ทโดยการติดตั้ง Tab หรือ Lobe เพื่อเพิ่มการกระจายตัวและการผสมของเจ็ท

ส่วนตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการผสมตัวหนึ่งที่นิยมใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ นั้น ได้แก่ ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วกับลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ซึ่งถ้ากระบวนการผสมระหว่างเจ็ทอากาศกับอากาศปกติภายในห้องเป็นไปได้ด้วยดี หรืออีกนัยหนึ่งถ้าเจ็ทอากาศที่พุ่งออกมามีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมและพลังงานกับอากาศภายนอกอย่างมีประสิทธิภาพจะมีผลทำให้การกระจายตัวของความเร็วและอุณหภูมิอากาศภายในห้องเป็นไปอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วนั้นจะเห็นว่าได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนรูปแบบปากทางออก Nozzle โดยใช้ Tab หรือ Vortex Generator หรือ Lobe ที่มีต่อการกระจายตัวและการผสมของเจ็ทหน้าตัดวงกลมเป็นส่วนใหญ่ แต่การศึกษาเกี่ยวกับผลการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกต่อการไหลแบบเจ็ทระนาบ ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงเป็นประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาศึกษาเนื่องจากจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมได้หลายด้าน เช่น งานด้านระบบปรับอากาศ หรือ งานที่เกี่ยวกับห้องเผาไหม้ซึ่งต้องการการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างเหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของเจ็ทระนาบ และเจ็ทระนาบแบบวงรีวงรี เมื่อมีการทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะปากทางออกของ Nozzle ที่มีลักษณะเป็นช่องยาวรูปสี่เหลี่ยม (Slot) โดยการติดตั้ง Tab หรือ Vortex Generator หรือ Lobe

1.2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกของ Nozzle รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อการกระจายตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวงรีวงรี โดยจะเลือกใช้ Lobe ที่มีลักษณะคล้ายกับของ Tosapole Stitsuwongkul (2001)

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาเบื้องต้น
2. ทำการตัดแปลงอุโมงค์ลมที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นให้มีความเหมาะสมกับที่จะใช้ในงานวิจัย โดย

- 2.1. เปลี่ยนชุดพัดลมเพื่อให้ได้ความเร็วลมที่ปากทางออก Contraction มีค่าประมาณ 30-40 เมตรต่อวินาที
- 2.2. สร้างส่วน Contraction แบบที่ทำให้การไหลเป็น 2 มิติ มีขนาดหน้าตัดปากทางออกของ Contraction เป็น 2×50 เซนติเมตร² เพื่อให้มีความเร็วลมที่ปากทางออกประมาณ 30 เมตรต่อวินาที
3. จัดทำ Lobe ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้
4. ทำการทดลองเพื่อดูผลการกระจายตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวงรีที่ไม่นิ่งและมีมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออก โดยทำการวัดอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆของเจ็ท
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้

1.4. ความคาดหวังของงานวิจัย

1.4.1. ผลที่คาดว่าจะได้รับเชิงวิชาการ

เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจและให้ได้มาซึ่งข้อมูลพื้นฐานของการไหลแบบเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวงรีรวมทั้งผลของการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกของเจ็ทโดยใช้ไหลบดต่อการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวงรี

1.4.2. ผลที่คาดว่าจะได้รับเชิงประยุกต์

จากความรู้ความเข้าใจและข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกของเจ็ทต่อการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของ เจ็ทระนาบ และเจ็ทระนาบแบบวงรีชนิดนี้จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงลักษณะการกระจายตัวของอากาศภายในห้องปรับอากาศที่มีหัวจ่ายอากาศเย็นแบบเป็นช่องยาว (Slot) ให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงยิ่งขึ้น อีกทั้งในแง่การเผาไหม้นั้นยังสามารถนำมาใช้ปรับปรุงการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศในห้องเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพผสมและการเผาไหม้ดียิ่งขึ้นซึ่งจะเป็นการช่วยอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ชุดทดลองและการทดลอง

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของเจ็ทระนาบ (Plane jet) และเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนัง (Impinging plane jet) รวมทั้งศึกษาผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกของเจ็ททั้งสองแบบด้วย โดยชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 6 ส่วน ดังนี้คือ พัดลม (Turbofan) , ชุด Guide vane , Orifice plate , ชุดทดลองการไหล หรือที่เรียกกันว่า อุโมงค์ลม (Wind tunnel) , Contraction , ส่วนทดลอง (Test section) , และ Lobe รูปที่ 2.5 เป็นรูป Schematic drawing แสดงส่วนประกอบต่างๆของชุดทดลองและรูปที่ 2.6 แสดงภาพถ่ายของชุดทดลอง

หลักการทำงานของชุดทดลอง เริ่มต้นจากพัดลมดูดอากาศเข้ามาแล้วเป่าผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) เข้าสู่ชุด Guide vane ซึ่งจะช่วยปรับทิศทางลมจากพัดลมที่จะไหลเข้าสู่ชุดทดลองการไหลหรืออุโมงค์ลมให้เป็นแนวขนานกับชุดทดลองการไหล อากาศที่ผ่านออกจากชุด Guide vane แล้วจะไหลผ่าน Orifice plate ก่อนที่จะเข้าสู่ชุดทดลองการไหล โดย Orifice plate นี้ใช้เพื่อตรวจดูอัตราการไหลภายในระบบระหว่างการทดลอง จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่ชุดทดลองการไหลขนาดหน้าตัด 50×50 เซนติเมตร² ซึ่งประกอบด้วย 1. ชุดจัดปรับการไหล (Flow Straightener) ส่วนแรก เพื่อกระจายการไหลของอากาศให้เต็มพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลม และปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีความสม่ำเสมอในระดับหนึ่ง 2. ส่วนทำความร้อน (Heating section) ซึ่งมีหน้าที่เพิ่มความร้อนให้กับอากาศ 3. ชุดจัดปรับการไหล (Flow Straightener) ส่วนหลัง หรือที่เรียกกันว่า Settling chamber ซึ่งช่วยจัดเรียงการไหลของอากาศร้อนที่มีความปั่นป่วนและการไหลแบบหมุนวนในระดับหนึ่งอันเกิดจากพัดลมและการไหลผ่าน Heater จากนั้นอากาศร้อนซึ่งมีความเร็วต่ำที่ไหลออกจากชุดทดลองการไหลจะผ่านเข้าสู่ Contraction แบบสองมิติ โดยอากาศร้อนนี้จะถูกร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นแล้วปล่อยผ่านปากทางออกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2×50 เซนติเมตร² ซึ่งขณะนี้การไหลมีลักษณะเป็นเจ็ทระนาบ หลังจากนั้นเจ็ทอากาศร้อนจะพุ่งเข้าสู่ส่วนทดลอง (Test section) เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

2.1. รายละเอียดชุดทดลอง

2.1.1. พัดลม (Turbofan)

พัดลมที่ใช้เป็นแบบ Turbo-pressure blower ของ CHICAGO รุ่น 2T-40-20 ขนาด 34 นิ้ว น้ำ 4200 CFM พัดลมนี้มีปากทางสำหรับเป่าลมออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 20×36

เซนติเมตร² พัดลมนี้ใช้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ TECO 2 Phase Induction 2 Pole ขนาด 30 แรงม้า (22 กิโลวัตต์) มีความเร็วรอบ 2925 rpm ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz ปรับความเร็วรอบมอเตอร์โดยต่อเข้ากับ Inverter ของ ABB type ACS401003032 ซึ่งมี Nominal motor squared torque เป็น 30 กิโลวัตต์ ที่ได้ฐานวางพัดลมติดตั้งสปริงไว้ 4 ด้านด้านละหนึ่งตัว สปริงนี้ทำหน้าที่ลดการสั่นสะเทือนอันเกิดจากการเปิดพัดลมใช้งาน รูปที่ 2.1 และ 2.2 เป็นภาพถ่ายแสดงพัดลม และ Inverter ตามลำดับ

2.1.2. ท่ออ่อน (Flexible Duct) และ ชุด Guide Vane

เนื่องจากข้อจำกัดด้านสถานที่จึงมีความจำเป็นต้องติดตั้งพัดลมโดยที่แนวกึ่งกลางพัดลมและชุดท่อลดการไหลนั้นไม่ตรงกันดังนั้นจึงต้องใช้ท่ออ่อนและชุด Guide vane มาต่อระหว่างพัดลมและชุดท่อลดการไหล ท่ออ่อนซึ่งทำจากผ้าใบนี้ใช้สำหรับต่อเชื่อมระหว่างพัดลมกับชุด Guide vane โดยพัดลมกับชุด Guide vane และชุดท่อลดการไหลมีแนวกึ่งกลางเชื่อมกันประมาณ 5 เซนติเมตร แนวกึ่งกลางพัดลมอยู่ต่ำกว่าของชุด Guide vane ประมาณ 15 เซนติเมตร และอยู่ต่ำกว่าของชุดท่อลดการไหลประมาณ 82 เซนติเมตร นอกจากนี้ท่ออ่อนยังทำหน้าที่ลดแรงสั่นสะเทือนอันเกิดจากพัดลมแล้วส่งผลต่อไปยังส่วนอื่นๆของชุดท่อลดการไหล

ชุด Guide vane นั้นเป็นท่อคล้ายรูปตัว S หน้าตัดทางเข้าและทางออกเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 20×36 เซนติเมตร² ซึ่งเท่ากับขนาดทางออกพัดลมและทางเข้าชุดท่อลดการไหล ท่อนี้ประกอบขึ้นจากแผ่นไม้อัดหนา 10 มิลลิเมตร โดยด้านข้างทั้งสองของท่อไม้ส่วนล่างและส่วนบนจะเป็นช่องโค้ง 8 ช่อง ขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตร แต่ละช่องมีรัศมีความโค้งเป็น 10 เท่ากัน ระยะห่างของแต่ละช่องเป็น 5 เซนติเมตร ซึ่งช่องโค้งนี้ใช้สำหรับสอดแผ่นอลูมิเนียมสี่เหลี่ยมขนาด 36 เซนติเมตร² หนา 0.5 มิลลิเมตร เข้าไป และแผ่นอลูมิเนียมนี้เองทำหน้าที่เป็นใบสำหรับช่วยปรับทิศทางลมจากพัดลมที่เข้าสู่ท่อไม้ส่วนล่างผ่านขึ้นไปสู่ท่อไม้ส่วนบนแล้วเข้าไปยังชุดท่อลดการไหล ให้มีทิศทางตามแนวระดับ รูปที่ 2.1 และ 2.4 แสดงท่ออ่อนและชุด Guide vane ตามลำดับ โดยท่อไม้ส่วนล่างของชุด Guide vane ต่อกับท่ออ่อนและพัดลม ท่อไม้ส่วนบนต่อกับชุดท่อลดการไหล

2.1.3. Orifice Plate

Orifice plate ซึ่งมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดทางเข้า (β) เป็น 0.45 นี้ทำจากแผ่นอลูมิเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 38×53.5 เซนติเมตร² หนา 3 มิลลิเมตร ตรงกลางแผ่นกลึงเป็นรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร โดยทำ Chamfer มุม 45 องศา ที่ด้านหนาของขอบรูเป็น 1 มิลลิเมตร โดยที่แผ่น Orifice นี้ติดตั้งอยู่ระหว่างหน้าแปลนทางออกของชุด Guide vane และ หน้าตัดทางเข้าอุโมงค์ลม แสดงรูปที่ 2.3

2.1.4. ชุดทดลองการไหล หรืออุโมงค์ลม (Wind Tunnel)

อุโมงค์ลมนี้มีขนาดหน้าตัดเป็น 50×50 เซนติเมตร² เท่ากันตลอด ประกอบด้วย ชุดจัดปรับการไหล (Flow straightener) ส่วนแรก, ส่วนทำความร้อน (Heating section), ชุดจัดปรับการไหล (Flow straightener) ส่วนหลัง หรือที่เรียกกันว่า Settling chamber, และ Contraction ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.5, 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

ชุดจัดปรับการไหลส่วนแรก มีลักษณะเป็นกรอบไม้เนื้อแข็งรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 3 กรอบ วางเรียงต่อกัน ระหว่างกรอบกันด้วยปะเก็นไฟเบอร์ 224 หนา 3 มิลลิเมตร แต่ละกรอบมีความหนา 15 เซนติเมตร และขนาดหน้าตัดภายใน 50×50 เซนติเมตร² ขนาดหน้าตัดภายนอก 70×70 เซนติเมตร² โดยบนด้านหนึ่งของกรอบไม้แต่ละกรอบนั้นจึงตาข่าย (Screen) ขนาด Mesh 4 ซึ่งทำจากเส้นลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 มิลลิเมตร ดังนั้นตาข่าย Mesh 4 ทั้ง 3 แผ่นนี้จึงมีระยะห่างระหว่างกันเท่ากับ 15 เซนติเมตร ทั้งนี้ชุดจัดปรับการไหลส่วนแรกอันประกอบด้วยตาข่าย Mesh 4 จำนวน 3 แผ่น ทำหน้าที่กระจายการไหลของอากาศให้เต็มพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม รวมทั้งปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีความสม่ำเสมอ (Uniform) ในระดับหนึ่งก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ส่วนทำความร้อน ระหว่างชุดจัดปรับการไหลส่วนแรกและส่วนทำความร้อนนั้นกันด้วยปะเก็นไฟเบอร์ 1500 หนา 2 มิลลิเมตร

ส่วนทำความร้อนซึ่งมีหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศนั้นทำด้วยแผ่นเหล็กขนาดหนา 5 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยม (Chamber) ขนาดหน้าตัดภายใน 50×50 เซนติเมตร² ความยาวห้องเป็น 120 เซนติเมตร ที่ด้านต้นและท้ายของห้องเป็นหน้าแปลนเหล็กขนาดหน้าตัด 70×70 เซนติเมตร² ใช้สำหรับต่อกับชุดจัดปรับการไหลส่วนแรกและส่วนหลังตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของส่วนทำความร้อนนั้นจะอธิบายในหัวข้อถัดไปจากนี้

ระหว่างส่วนทำความร้อนกับชุดจัดปรับการไหลส่วนหลังกันด้วยปะเก็นไฟเบอร์ 1500 หนา 2 มิลลิเมตร หลังจากผ่านส่วนทำความร้อนแล้ว อากาศร้อนจะไหลเข้าสู่ Settling chamber อันประกอบไปด้วยชุดจัดปรับการไหลส่วนหลังทั้งหมด ซึ่งมีลักษณะเป็นกรอบไม้เนื้อแข็งรูปสี่เหลี่ยมขนาดเหมือนกับที่ใช้ในชุดจัดปรับการไหลส่วนแรก จำนวนกรอบไม้ที่ใช้ทั้งหมด 6 กรอบ วางเรียงต่อกัน ระหว่างกรอบกันด้วยปะเก็นไฟเบอร์ 224 หนา 3 มิลลิเมตร สำหรับกรอบแรกนั้นเป็นส่วนรังผึ้ง (Honeycomb) ดังรูปที่ 2.9 คือภายในบรรจุท่อทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางใน 17 มิลลิเมตร หนา 0.45 มิลลิเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร จนเต็ม แล้วจึงปิดกรอบนี้ทั้งสองด้านด้วยตาข่าย (Screen) Mesh 4 รังผึ้งนี้ทำหน้าที่ช่วยลดการไหลแบบหมุนวน (Swirling flow) ส่วนกรอบไม้อื่นๆจำนวน 4 กรอบถัดจาก Honeycomb นั้นบนด้านหนึ่งของแต่ละกรอบจึงด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 16×18 ดังนั้น

เช่นเดียวกับในชุดจัดปรับการไหลส่วนแรก ตาข่ายอลูมิเนียม Mesh 16 ทั้ง 3 แผ่นนี้จึงมีระยะห่างระหว่างกันเป็น 15 เซนติเมตร สำหรับกรอบไม้สุดท้ายนั้นบนด้านหนึ่งซึ่งด้วยตาข่ายสแตนเลส Mesh 30 ซึ่งตาข่ายนี้ก็ห่างจากตาข่ายอันก่อนหน้านี้ 15 เซนติเมตร เช่นกัน หลังจากอากาศร้อนผ่านส่วนชุดจัดปรับการไหลส่วนหลังนี้แล้วก็จะเข้าสู่ Contraction ต่อไป

2.1.5. ส่วนทำความร้อน (Heating section)

ส่วนทำความร้อนทำด้วยแผ่นเหล็กขนาดหนา 5 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยม (Chamber) ขนาดหน้าตัดภายใน 50×50 เซนติเมตร² ความยาวห้องเป็น 120 เซนติเมตร ที่ด้านต้นและท้ายของห้องเป็นหน้าแปลนเหล็กขนาดหน้าตัด 70×70 เซนติเมตร² ใช้สำหรับต่อกับชุดจัดปรับการไหลส่วนแรกและส่วนหลังตามลำดับ บริเวณผนังด้านนอกของส่วนทำความร้อนนี้หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนชนิดใยแก้ว เพื่อช่วยลดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก ภายในห้องทำความร้อนนี้บรรจุ Heater 3 ตัว, ใบบัดแบบสี่ใบ, กริดเหล็กขนาดใหญ่, ตะแกรงเหล็กเจาะรูขนาดใหญ่, ใบบัดแบบแปดใบ, กริดเหล็กขนาดเล็ก, ตะแกรงเหล็กเจาะรูขนาดเล็กตามลำดับ แต่ละส่วนวางห่างกันเป็นระยะต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.24 กล่าวคือ Heater ทั้งสามวางห่างจากด้านต้นห้องเป็นระยะ 14 เซนติเมตร ถัดจากนั้นไป 10.5 เซนติเมตร เป็นใบบัดแบบสี่ใบอีก 17.5 เซนติเมตร เป็นกริดเหล็กขนาดใหญ่ ต่อมาอีก 6.5 เซนติเมตร เป็นตะแกรงเหล็กเจาะรูขนาดใหญ่ จากนั้นอีก 14.5 เซนติเมตร เป็นใบบัดแบบแปดใบ ต่อมาอีก 9.75 เซนติเมตร เป็นกริดเหล็กขนาดเล็ก และท้ายสุดเป็นตะแกรงเหล็กเจาะรูขนาดเล็กซึ่งอยู่ห่างจากด้านท้ายห้องทำความร้อน 9 เซนติเมตร

Heater 3 ตัว ซึ่งอยู่ภายในห้องทำความร้อนนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับอากาศที่ไหลผ่าน โดย Heater ทั้ง 3 ตัวนี้เป็นแบบเดียวกัน ดังรูปที่ 2.10 กล่าวคือเป็น Heater แบบมีกริบของ Grimwood รุ่น PMN500W240 แบบ "W" FORM ขนาดความสูง 433 มิลลิเมตร ขาหน้า-ขาหลัง ห่างกัน 190 มิลลิเมตร nominal แต่ละตัวมีขนาด 5000 วัตต์ และมีค่าความต้านทานตอนที่ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็น 21 โอห์ม Heater ทั้งสามนี้ติดตั้งให้ครอบคลุมเต็มหน้าตัดห้องทำความร้อน โดยขาหน้าของแต่ละตัววางห่างจากด้านต้นห้อง 14 เซนติเมตร แนวการวางตัวทำมุม 45 องศากับแนวผนังห้องทั้งสองด้าน ส่วนระยะห่างระหว่าง ขาหน้า-ขาหน้า และ ขาหลัง-ขาหลังของแต่ละตัวห่างกัน 15.5 เซนติเมตร สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับ Heater ทั้งสามควบคุมด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 24940 VA ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แรงดันไฟฟ้าสำหรับ Heater แต่ละตัวเป็น 230 โวลต์ เท่ากัน รูปที่ 2.11 แสดงภาพถ่ายแผงวงจรควบคุม Heaters

ใบบัดแบบสี่ใบและแปดใบ ดังแสดงในภาพถ่ายรูปที่ 2.13 และ 2.14 ทำจากแผ่นสังกะสีขนาดหน้าตัด 50×50 เซนติเมตร² นำมาตีเส้นแบ่งเป็นสี่และแปดส่วนตามจำนวนใบที่ต้องการแล้วตัดแต่ละส่วนให้เป็นริ้วโดยไม่ให้ขาดจากกันคือเหลือส่วนตรงกลางแผ่นไว้ จากนั้นตัด

และพับครึ่งส่วนที่ตัดแล้วให้มีลักษณะคล้ายใบพัดและมัดกริปลายใบให้ติดกับตัวแผ่นโดยใช้หัว
 แร้งและสังกะสีแท่งโดยก่อนที่จะทำการมัดกริปต้องทากรด 100% บริเวณที่ต้องการมัดกริปก่อน

กริดเหล็กขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.16 ทำจากเหล็กไร้เกรดแบบกลวงหน้ากว้างสอง
 นิ้ว ตัดเป็นท่อนยาว 46 เซนติเมตร จำนวน 10 ท่อน นำมาเชื่อมต่อกันให้เป็นกริด ส่วนกริดเหล็ก
 ขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.17 ก็เช่นเดียวกัน คือ ทำจากเหล็กไร้เกรดแบบกลวงหน้ากว้างหนึ่งนิ้วครึ่ง ตัด
 เป็นท่อนยาว 46 เซนติเมตร จำนวน 12 ท่อน นำมาเชื่อมต่อกันให้เป็นกริด สำหรับตะแกรงเหล็ก
 ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 2.18

สำหรับใบพัดแบบสี่ใบและแปดใบ, กริดเหล็กขนาดใหญ่และเล็ก, ตะแกรงเหล็ก
 ขนาดใหญ่และเล็กนั้น มีหน้าที่ช่วยให้อากาศร้อนภายในห้องทำความร้อนผสมกันอย่างทั่วถึง
 เพื่อให้ได้การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณปากทางออก Contraction มีความสม่ำเสมอเพียง
 พอที่จะทำการทดลองได้

2.1.6. Contraction แบบสองมิติ

Contraction แสดงดังรูปที่ 2.7 นี้เป็น Contraction แบบสองมิติ มีอัตราส่วน
 ระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้ากับด้านทางออกเท่ากับ 25 โดยรูปร่างเส้นโค้งของ Contraction
 ออกแบบตามสมการโพลีโนเมียลดีกรี 4 โดยมีจุดเปลี่ยนความโค้งอยู่ที่ระยะ 2/3 เท่าของความยาว
 62.5 เซนติเมตร ที่ด้านเข้าของส่วนโค้งจะเป็นส่วนตรงขนานกับทิศทางการไหลต่อยาวออกมาอีก
 10 เซนติเมตร ดังนั้น Contraction จึงมีความยาวรวมเป็น 72.5 เซนติเมตร ตัว Contraction มี
 หน้าเร่งให้อากาศร้อนที่ผ่านเข้ามามีความเร็วสูงขึ้นจนได้ความเร็วบริเวณหน้าตัดทดสอบตามที่
 ต้องการ โดย Contraction นี้ทำขึ้นจากแผ่นไม้และแผ่นอลูมิเนียมประกบกัน เริ่มจากนำแผ่นไม้
 อัดลักษณะหนา เซนติเมตร มาตัดให้ได้รูปร่างตามเส้นโค้ง Contraction ที่ออกแบบไว้ จำนวน 2
 ชิ้น จากนั้นต้องนำมาทำให้ผิวไม้ด้านในซึ่งเป็นส่วนที่อากาศร้อนไหลผ่านนั้นให้เรียบ โดยการขัด
 ฝืดด้วยกระดาษทรายไม้แล้วทำความสะอาดก่อนจากนั้นจึงใช้ยูริเทนสำหรับทาภายในทาลงที่ผิวไม้
 รอให้แห้งแล้วขัดด้วยกระดาษทรายน้ำโดยใช้น้ำล้างไปเล็กน้อยขณะขัดเสร็จแล้วเช็ดให้แห้ง ทำการ
 ทายูริเทนและขัดกระดาษทรายดังนี้ซ้ำไปโดยเพิ่มความเข้มข้นของยูริเทนขึ้นเรื่อยๆ ประมาณ 5-6
 รอบทำงานกระทั่งผิวไม้เรียบมัน จากนั้นทำแผ่นไม้ทั้งสองมาติดหน้าแปลนอลูมิเนียมฉากเล็กๆตาม
 ส่วนความโค้งทั้งสองด้านเพื่อใช้สำหรับยึดกับแผ่นอลูมิเนียม นำแผ่นไม้ทั้งสองยึดเข้ากับแต่ละข้าง
 ของกรอบไม้ตัวสุดท้ายในส่วนอุโมงค์ลม แล้วจึงนำแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.5 มิลลิเมตร สองแผ่นมา
 ค่อยๆประกอบไปตามส่วนความโค้งเข้ากับหน้าแปลนอลูมิเนียมฉากบนแผ่นไม้ดังกล่าวจนได้เป็น
 Contraction โดยที่ระหว่างส่วนแผ่นไม้กับแผ่นอลูมิเนียมนั้นใส่ปะเก็นกระดาษซึ่งทาทั้งสองด้าน
 ทับด้วยปะเก็นเหลวเพื่อกันไม่ให้อากาศร้อนรั่วออก เมื่อได้เป็น Contraction สมบูรณ์แล้วจึงยา
 ระหว่างรอยต่อทั้งหมดด้วยซิลิโคนกันความร้อนอีกชั้นหนึ่ง ที่บริเวณแผ่นไม้ด้านข้าง Contraction

ทั้งสองนั้นเจาะรูขนาด 0.8 มิลลิเมตร บริเวณกึ่งกลางแผ่นที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออก Contraction เข้ามา 20 มิลลิเมตร ($x = -20$ มิลลิเมตร) แล้วใส่เข็มฉีดยาเบอร์ 21 ซึ่งฝนปลายแหลมออกแล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็น Static pressure taps สำหรับการวัดสถานะเริ่มต้นของความเร็วบริเวณปากทางออก Contraction

2.1.7. ส่วนทดลอง (Test Section)

ส่วนทดลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 มีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 122 เซนติเมตร สูง 244 เซนติเมตร ห้องนี้มีผนังสามด้านคือด้านข้างสองด้านและด้านหน้าซึ่งเป็นด้านที่ต่อกับ Contraction ส่วนด้านบนและล่างไม่มีผนังแต่จึงปิดด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 16×18 สำหรับที่ด้านท้ายกรณีการทดลองเจ็ทระนาบนั้นเปิดโล่ง แต่หากเป็นกรณีของเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังจะมีผนังด้านท้ายที่ตำแหน่ง 30 เท่าของความกว้างปากทางออกเจ็ทวัดจากปากเจ็ทไปตามแนวแกนการไหล ($x/h=30$) ด้วย

ส่วนทดลองนี้ผนังด้านหน้าซึ่งต่อแนบพอดีเข้ากับหน้าตัดทางออกของ Contraction ทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 10 มิลลิเมตร ขนาด 83×122 เซนติเมตร² ตรงกลางแผ่นเจาะเป็นช่องสี่เหลี่ยมสำหรับต่อกับปากทางออกของเจ็ทร้อน ผนังด้านหน้านี้ทำหน้าที่กั้นไม่ให้อากาศที่ไหลผ่านผิวด้านบนและล่างของ Contraction เข้ามามีผลกระทบในส่วนทดลอง ในส่วนผนังด้านข้างทั้งสองนั้นเช่นเดียวกันคือทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 10 มิลลิเมตร ขนาด 122×244 เซนติเมตร² ซึ่งผนังข้างทั้งสองนี้ทำหน้าที่กั้นการ โตะของเจ็ทในแนวขวางการไหล (แนว Spanwise – แกน z) ผนังทุกด้านของห้องนี้วางตัวในแนวตั้งโดยยึดติดกับกรอบโครงเหล็กด้วยน็อตฝังหัวแบบ Countersink แล้วใช้สติกเกอร์ใสปิดทับหัวน็อต สำหรับตาข่ายอลูมิเนียมที่ใช้ปิดด้านบนห้องนั้นเป็นกรอบมุ้งลวดจำนวน 6 กรอบ มีความกว้างเป็น 51.4 เซนติเมตร เท่ากัน และขนาดความยาวต่างๆกัน ได้แก่ ขนาดยาว 100, 90, 50, 40, 30, 20 เซนติเมตร โดยกรอบมุ้งลวดจะเปลี่ยนหรือเลื่อนสลับไปมาให้เหมาะสมกับตำแหน่งของ Probe ในการทดลองขณะนั้นๆ

2.1.8. โหลบ (Lobe)

โหลบที่ใช้มีลักษณะคล้ายปิรามิด ทำขึ้นจากแผ่นเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร มาเชื่อมต่อกัน บริเวณผิวโหลบด้านที่เจ็ทอากาศร้อนต้องไหลผ่านนั้นมีการขัดผิวให้เรียบและยารอยร้าวด้วยกาว Epoxy โหลบที่ใช้ในการทดลองนี้มีสองแบบ คือ แบบ L120 และ L140 โดยสัญลักษณ์ที่ใช้ LXXX มีความหมายดังนี้ L หมายถึง โหลบ (Lobe) และ XXX แทนตัวเลขแต่ละตัวโดยตัวเลขนี้แสดงค่าเป็น X เท่าของขนาดความกว้างปากทางออกเจ็ท (h) ตัวเลขตัวแรก แทนแอมพลิจูด (A) ซึ่งวัดจากฐานถึงยอดของโหลบย่อยแต่ละตัว ในการทดลองนี้ใช้ความยาวคาบคงที่เป็น

1 ถัดมาตัวเลขตัวที่สอง แทนความยาวคาบ (T) ของไหลย่อยแต่ละตัวซึ่งก็คือขนาดความกว้างของฐานสามเหลี่ยมนั่นเอง และตัวเลขตัวสุดท้าย แทน Gap (G) หรือระยะห่างระหว่างไหลย่อยแต่ละตัว ซึ่งในการทดลองไม่มีระยะห่างระหว่างไหลย่อยนั่นคือ Gap มีค่าคงที่เท่ากับ 0 ส่วนค่าความลึกของไหล (B) ใช้เป็น 0.5 เท่าของความกว้างปากเจ็ท (h) เท่ากันหมดสำหรับไหลทั้งสองแบบ โดยรูปไหลทั้งสองแบบแสดงดัง Schematic drawing และภาพถ่ายรูปที่ 2.19 และ 2.20 สัญลักษณ์ L120 หมายถึง ไหลที่มีค่าแอมพลิจูด, ความยาวคาบ และระยะห่างระหว่างไหลย่อย เป็น $1h$, $2h$ และ $0h$ ตามลำดับ

การติดตั้งไหลที่ปากทางออก Contraction นั้นทำโดยวางไหลแบบเดียวกันจำนวนสองชิ้นแนบเข้ากับด้านหน้าของหน้าแปลนลูมินีเยมขนาด 1.5×50 เซนติเมตร² ของ Contraction ทั้งบนและล่าง แล้วใช้แม่เหล็กสี่เหลี่ยมหน้าตัด 9×17 มิลลิเมตร²หนา 3 มิลลิเมตรกับแม่เหล็กหน้าตัดกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร ติดเข้าที่ด้านหลังหน้าแปลนทั้งสองของ Contraction เพื่อคูดไหลทั้งสองชิ้นให้ติดอยู่ได้ อนึ่งไหลแบบเดียวกันทั้งสองชิ้นบน-ล่างนี้วางโดยให้ยอดไหลมาชนกันที่แนวแกนยาวกึ่งกลางของหน้าตัดทางออกเจ็ท

2.2. พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

ระบบแกนอ้างอิง (Coordinate system) ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังรูปที่ 2.23 กำหนดเป็นระบบพิกัดฉาก X, Y และ Z โดยนิยามให้จุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัดปากทางออกเจ็ท และให้แกน x มีทิศทางไปตามแนวแกนการไหลของเจ็ท (Streamwise direction) ส่วนแกน z มีทิศทางตามแนวขวางการไหล (Spanwise direction) และแกน y ซึ่งตั้งฉากกับแกน x และ z มีทิศทางชี้ขึ้นด้านบนของส่วนทดลอง (Transverse direction)

2.3. วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด

การทดลองในงานวิทยานิพนธ์นี้แบ่งเป็นสองส่วน คือ การไหลแบบเจ็ทระนาบและแบบเจ็ทระนาบวิงชนผนัง โดยที่การไหลแบบเจ็ทระนาบนั้นทำการทดลอง 3 กรณี คือ กรณีตั้งต้นซึ่งไม่มีการติดไหลใดๆ (L000), กรณีติดไหลแบบ L120 (L120) และ กรณีติดไหลแบบ L140 (L140) ส่วนการไหลแบบเจ็ทระนาบวิงชนผนังทำการทดลอง 3 กรณี ในลักษณะเดียวกัน คือ กรณีตั้งต้นซึ่งไม่มีการติดไหลใดๆ (L000i), กรณีติดไหลแบบ L120 (L120i) และ กรณีติดไหลแบบ L140 (L140i)

ในแต่ละกรณีการทดลองนั้นมีการวัดปริมาณต่างๆดังนี้ คือ อุณหภูมิสถานะเริ่มต้นและอุณหภูมิภายในส่วนทดลอง, อัตราเร็วของการไหลบริเวณหน้าตัดทางออกเจ็ท หรืออัตราเร็ว

สภาวะเริ่มต้น และความดันตกคร่อมแผ่น Orifice โดยต้องทำการวัดสภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิ และอัตราเร็วก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้ง

2.3.1. การวัดสภาวะเริ่มต้น

การวัดสภาวะเริ่มต้นทางอุณหภูมิ

สำหรับการวัดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิบริเวณปากทางออกเจ็ทนั้น วัดที่ระยะ $x = -1$ เซนติเมตร หรือ 1 เท่าความกว้างหน้าตัดทางออกเจ็ท โดยวัดเป็นเมตริกซ์ 5 จุด \times 27 จุด ตามแนวแกนยาว (แกน y) กับแกนสั้น (แกน z) ของปากเจ็ท ซึ่งตามแกน y วัด 5 แนว คือ $y = 0, \pm 0.4$ และ ± 0.8 เซนติเมตร แต่ละแนววัด 27 จุด ดังนี้ $z = 0, \pm (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 24, 24.5)$ โดยใช้ Thermocouple probe แบบ A ดังภาพถ่าย รูปที่ 2.25 จากนั้นนำค่าอุณหภูมิทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยโดยพื้นที่ซึ่งนิยามจาก $\frac{1}{A} \int T_j dA$ จะได้เป็น \bar{T}_j สำหรับสภาวะเริ่มต้นทางอุณหภูมิของการไหลแบบเจ็ทระนาบกับเจ็ทระนาบแบบวังซนผนังนั้นแสดงดังรูปที่ 2.34 และ 2.35 ลำดับ

Thermocouple probe ดังกล่าวทำขึ้นจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 7.9 มิลลิเมตร สวมเข้ากับท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 6.3 มิลลิเมตร จากนั้นต่อเข้ากับท่อทองเหลืองซึ่งคัดโค้งเป็นมุมฉากแล้วต่อเข้ากับเข็มฉีดยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 7 เซนติเมตร จากนั้นสอดสาย Thermocouple Type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -270 ถึง 400 องศาเซลเซียส และมีฉนวนกันความร้อนหุ้มสองชั้นคือ หุ้มโลหะแต่ละเส้นและ หุ้มสองเส้นคู่กัน ตามลำดับ โดยที่ส่วนปลาย Thermocouple ซึ่งทำการ Spot โลหะ 2 ชนิด ให้เชื่อมต่อกันเป็นจุดนั้นทำหน้าที่เป็น Sensor ตรวจวัดอุณหภูมิ โดยส่วน Sensor นี้ ยื่นออกมาจากปลายเข็มฉีดยา 5 มิลลิเมตร สำหรับปลายสายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับปลั๊กตัวผู้ใช้ต่อเข้ากับตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple Thermometer) ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 54II ดังรูปที่ 2.30 ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียส โดยชุดโพรบ Thermocouple กับตัวอ่านค่าอุณหภูมิ ทั้งชุดนี้ได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานแล้ว

การเปรียบเทียบระบบเครื่องมือวัดอุณหภูมินี้ทำโดยวัดอุณหภูมิของน้ำเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานยี่ห้อ THOMAS SCIENTIFIC Co. จำนวนสองตัว คือที่มีช่วงอ่านค่าอุณหภูมิต่างกับ 25-50 °C และ 50-80 °C โดยเทอร์โมมิเตอร์ทั้งสองนี้มี Resolution เท่ากับ 0.1 °C ซึ่งในการเปรียบเทียบนี้ใช้อุปกรณ์รูปที่ 2.27 ถึง 2.29 โดยใส่ น้ำลงใน

Water bath จากนั้นให้ความร้อนแก่น้ำโดยใช้ Immersion circulator ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 2.32

การวัดสถานะเริ่มต้นทางอัตราเร็ว

สำหรับการวัดอัตราเร็วบริเวณปากทางออกเจ็ทนั้น วัดที่ระยะ $x=-2$ เซนติเมตร โดยวัดเป็นเมตริกซ์ 5 จุด \times 15 จุด ตามแนวแกนยาว (แกน y) กับแกนสั้น (แกน z) ของปากเจ็ท ซึ่งตามแกน y วัด 5 แนว คือ $y = 0, \pm 0.4$ และ ± 0.8 เซนติเมตร แต่ละแนววัด 15 จุด ดังนี้ $z = 0, \pm (3, 7, 9, 11, 15, 19, 24, 24.5)$ โดยใช้ Pitot probe ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งวัดเทียบกับความดันสถิตที่ตำแหน่ง $x=-2$ เซนติเมตร ผ่าน Static pressure tap ที่ผนังด้านข้างของ Contraction โดยที่ Pressure tap ดังกล่าวทำจากเข็มฉีดยาเบอร์ 21 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร อ่านค่าความดันแตกต่างโดยใช้มาโนมิเตอร์แบบเอียง (Inclined manometer) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.31 แล้วแปลงให้เป็นความดันจลน์ของการไหลโดยใช้สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation)

2.3.2. การวัดอุณหภูมิภายในส่วนทดลอง

การวัดอุณหภูมิภายในส่วนทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.22 ดังนี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองของอุณหภูมิตามแนวแกนการไหล ทำโดยวัดอุณหภูมิตามแกน x ที่ $z/h=0, 5$ และ 6 ในกรณีไม่ติดไหล (L000) ส่วนกรณีติดไหลแบบ L120 และ L140 นั้น วัดที่ $z/h=0, 5$ และ $z/h=0, 6$ ตามลำดับ จากนั้นเพื่อให้ได้ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวขวางการไหล ทำโดยการวัดอุณหภูมิตามแกน z ที่ $x/h=0 \& 0.5, 2.5, 7.5, 12, 18.5, 32, 40, 51.5$ สำหรับการไหลแบบเจ็ทระนาบ และที่ $x/h=0 \& 0.5, 2.5, 7.5, 12, 18.5, 23.5, 28.5$ สำหรับการไหลแบบเจ็ทระนาบวังชนผนังซึ่งมีผนังด้านท้ายที่ $x/h=30$ ส่วนที่สาม เพื่อรูปร่างการพัฒนาของเจ็ท ทำโดยวัดอุณหภูมิตามแนวแกน y ที่ตำแหน่งเดียวแนวขวางการไหล

บทที่ 3

ผลการทดลอง

งานวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกของเจ็ทการไหลสองแบบคือ เจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังชนผนัง โดยใช้ไหลสองแบบซึ่งมีคาบแตกต่างกันคือ โหลบแบบ L120 และ L140 ซึ่งมีคาบเป็น 2 และ 4 เท่าของขนาดความกว้างหน้าตัดทางออกเจ็ท (h) ตามลำดับ

ผลการทดลองสำหรับการไหลแต่ละแบบแสดงในรูปค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) จากการวัดคุณลักษณะ ของอุณหภูมิ 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการลดลงของอุณหภูมิตามทิศทางการไหล (Decay rate) ส่วนที่สองเป็นผลการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนขวางการไหลกึ่งกลาง (Spanwise distribution) และส่วนที่สามเป็นการพัฒนาตัวของเจ็ทตามทิศทางการไหล (Flow development)

ในการอธิบายผลการทดลองเพื่อความกระชับจะใช้สัญลักษณ์ดังนี้ TJ แทนคำว่า อุณหภูมิที่ตำแหน่งปากเจ็ท Apex แทนคำว่า ยอดโหลบชนกัน Base แทนคำว่า ฐานโหลบชนกัน PJ แทนคำว่า การไหลแบบเจ็ทระนาบ IPJ แทนคำว่า การไหลแบบเจ็ทระนาบวังชนผนัง L แทนคำว่า ระยะทางที่วัดจากหน้าตัดทางออกเจ็ทถึงผนังด้านท้าย สำหรับเจ็ทระนาบแบบวังชนผนัง

3.1. ผลของโหลบต่อการไหลแบบเจ็ทระนาบ

3.1.1. พิจารณาลักษณะการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG})

ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดยรูปที่ 3.1 แสดงการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ตามแนวแกนการไหลที่ $y=0$ แบ่งตามแต่ละกรณีการทดลอง รูปที่ 3.2 แสดงการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ตามแนวแกนการไหลแบ่งตามแนว Apex และ Base ตามลำดับจากรูปที่ 3.1 กรณี L000 ซึ่งไม่ติดโหลบที่ปากทางออก Contraction พบลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตั้งสามแนวคือ $z/h=0, 5$ และ 6 นั้น ไม่มีความแตกต่างกันเลย ส่วนกรณี L120 ซึ่งติดโหลบแบบ L120 นั้น ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตั้งสองแนวแตกต่างกันที่แนว $z/h=0$ ซึ่งเป็นแนว Apex ของโหลบ L120 อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดต่ำสุดแล้วกลับเพิ่มขึ้นจนประมาณเท่ากับอุณหภูมิตั้งสามแนว $z/h=5$ ซึ่งเป็นแนว Base นั้น ภายในระยะทาง 7.5 (h คือขนาดความกว้างของหน้าตัดทางออกเจ็ท) วัดจากปากเจ็ทอุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ ด้วยอัตราเร็วประมาณเท่ากับที่แนว $z/h=5$ กรณี L140 ซึ่งติดโหลบแบบ L140 มีลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตั้งสามแนวเหมือนกันกับกรณี L120 นั้นคือที่แนว $z/h=0$ (แนว Apex) อุณหภูมิลดลง

อย่างรวดเร็วจนถึงจุดต่ำสุดแล้วกลับเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่แนว $z/h=6$ (แนว Base) ภายในระยะทาง 18.5h จากนั้นอุณหภูมิของทั้งสองแนวซึ่งมีค่าเท่ากัน จะลดลงอย่างช้าๆ ไปพร้อมกัน

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการลดลงของอุณหภูมิของทุกกรณีการทดลองโดยแบ่งตามแนว Apex และ Base จากรูปที่ 3.2 ที่ $z/h=0$ (แนว Apex) กรณี L000 อุณหภูมิ ลดลงเป็น 50% TJ ภายในระยะประมาณ 17h ในขณะที่กรณีติดโหลบทั้งสองแบบ อุณหภูมิลดลงเป็น 50% TJ ภายในระยะประมาณ 2h เท่านั้น หากพิจารณาระหว่างกรณีติดโหลบ พบว่า กรณี L120 อุณหภูมิลดลงจนเป็นประมาณ 35% TJ ที่จุดต่ำสุดในระยะ 2.5h จากนั้นเพิ่มขึ้นจนเป็นประมาณ 60% TJ ที่ $x/h=7.5$ ก่อนที่จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่ากรณีไม่ติดโหลบ (L000) ที่ x/h ประมาณ 30 ส่วนกรณี L140 อุณหภูมิลดลงจนเป็นประมาณ 15% TJ ที่จุดต่ำสุดในระยะทาง 5h จากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนเป็นประมาณ 33% ที่ $x/h=18.5$ ก่อนที่จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่ากรณีติดโหลบ (L000) ที่ x/h ประมาณ 40 เป็นที่น่าสังเกตว่าระยะทางวัดจากปากเจ็ทที่ทำให้ได้อุณหภูมิต่ำสุดของกรณี L140 เป็น 3 เท่าของกรณี L120 และระยะทางจากจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดจนถึงจุดที่อุณหภูมิสูงสุดก่อนที่จะเริ่มลดลง ของกรณี L140 นั้น เป็น 2.7 เท่าของกรณี L120

ที่ $z/h=5$ และ 6 ซึ่งเป็นแนว Base ของโหลบ L120 และ L140 ตามลำดับ ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตั้งแต่กรณีไม่ติดโหลบและติดโหลบ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กรณี L120 อุณหภูมิลดลงต่ำกว่ากรณี L000 จนถึง $x/h \approx 20$ จากนั้นอุณหภูมิต่ำกว่ากรณี L000 จนกระทั่งมีค่าเท่ากัน ที่ $x/h \approx 62$ กรณี L140 ในช่วงระยะประมาณ 8h นั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่ากรณี L000 จากนั้นอุณหภูมิต่ำกว่าจนกระทั่งที่ $x/h \approx 40$ จึงมีอุณหภูมิต่ำกว่ากรณี L000

3.1.2. พิจารณาการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแนวขวางการไหล

ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยรูปที่ 3.3 แสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ตามแนวแกน Z ที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวแกนการไหลแบ่งเป็นแต่ละกรณีการทดลองส่วนรูปที่ 3.4 แสดงที่ x/h ใดๆ รวมกันทั้งสามกรณีการทดลองจากรูปที่ 3.3 บนกรณีไม่ติดโหลบการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำกว่ากรณี L000 และพบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำกว่ากรณี L000 เป็นแอ่งตรงกลาง รูปที่ 3.3 กลาง กรณีติดโหลบแบบ L120 การกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำกว่ากรณี L000 เป็นคลื่นสามเหลี่ยมที่ $x/h=2.5$ พบว่าจำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมเท่ากับจำนวนโหลบสามเหลี่ยมทั้งหมดของโหลบแบบ L120 ซึ่งเท่ากับ 11 ลูก โดยที่ยอดสามเหลี่ยมด้านอุณหภูมิต่ำนั้นตรงกับแนว Apex ที่ $x/h=7.5$ จำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนโหลบย่อยทั้งหมดของโหลบแบบ L120 จนกระทั่งที่ $x/h=3.2$ เป็นต้นไป แทบจะไม่เห็น

การกระจายตัวเป็นลูกคลื่นแล้ว ส่วนที่ตำแหน่ง x/h ถัดไปตามแนวแกนการไหลพบว่าจำนวนลูกคลื่นและแอมพลิจูดของอุณหภูมิสูงสุดจะลดลงเป็นลำดับ

รูปที่ 3.3 ต่าง กรณีติดโหลบบแบบ L140 เป็นเช่นเดียวกับกรณี L120 คือ การกระจายตัวของอุณหภูมิมีลักษณะเป็นคลื่นสามเหลี่ยมที่ $x/h=2.5, 7.5$ และ 12 พบว่า จำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมเท่ากับจำนวนโหลบบสามเหลี่ยมทั้งหมดของโหลบบแบบ L140 ซึ่งเท่ากับ 5 ลูก โดยที่ยอดสามเหลี่ยมด้านอุณหภูมิต้านขึ้นตรงกับแนว Apex โดยที่แต่ละตำแหน่งตามแนวแกนการไหลนั้น แอมพลิจูดของอุณหภูมิสูงสุดมีค่าลดลงเป็นลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่าที่ $x/h=7.5$ แอมพลิจูดของอุณหภูมิต่ำสุดของคลื่นนั้นเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดของกรณี L140 นี้

ที่ $x/h=32$ เป็นต้นไป แทบจะไม่เห็นการกระจายตัวเป็นลูกคลื่นแล้ว หากเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของทั้งสามกรณีการทดลอง ที่ x/h ใดๆ จากรูปที่ 3.4 (กรณีติดโหลบบทั้งสองใช้สัญลักษณ์เป็นเส้นทึบกับเส้นประเพื่อให้เกิดความชัดเจน) ที่ $x/h=2.5$ กรณีไม่ติดโหลบบอุณหภูมิกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนกรณีติดโหลบบทั้งสองพบการกระจายตัวลักษณะเป็นคลื่นสามเหลี่ยม โดยมีจำนวนลูกคลื่นเท่ากับจำนวนโหลบบสามเหลี่ยมย่อยในแต่ละกรณี ดังที่กล่าวแล้วในผลการทดลองรูปที่ 3.3 สำหรับแอมพลิจูดของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นสามเหลี่ยมกรณีติดโหลบบ มีค่าประมาณเท่ากันในทั้งสองกรณี

ที่ $x/h=7.5$ พบว่าจำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยม ของกรณี L120 ลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนโหลบบในขณะที่กรณี L140 นั้น จำนวนลูกคลื่นยังคงเท่ากับจำนวนโหลบบย่อย ส่วนแอมพลิจูดของอุณหภูมิของคลื่นในกรณี L140 นั้นมีค่าสูงกว่า แอมพลิจูดของกรณี L120

ที่ $x/h = 12$ กรณี L140 การกระจายตัวของอุณหภูมียังคงมีจำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมเท่ากับจำนวนโหลบบย่อย

ที่ $x/h=18.5$ ไม่พบการกระจายตัวลักษณะลูกคลื่นสามเหลี่ยมแล้วในทั้งสองกรณีที่ติดโหลบบและตั้งแต่ $x/h=32$ เป็นต้นไป พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิจึงมีค่าประมาณเท่ากับในทุกกรณีการทดลอง

3.1.3. พิจารณารูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทในแต่ละตำแหน่งตามแนวแกนการไหล

ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงในรูปที่ 3.5 ถึง 3.22 โดยรูปที่ 3.5 เป็นแผนผังแสดงรูปร่างการพัฒนาตัวของแบ่งตามกรณีการทดลอง ซึ่งดูรายละเอียดดังรูปที่ 3.6 ถึง 3.15 ส่วนรูปที่ 3.16 เป็นแผนผังแสดงการพัฒนาตัวของเจ็ทที่ระยะ x/h ใดๆ แบ่งตามกรณีการทดลอง ซึ่งดูรายละเอียดดังรูปที่ 3.17 ถึง 3.19 ส่วนรูปที่ 3.20 เป็นแผนผังแสดงการพัฒนาตัวของเจ็ทที่ระยะ x/h ใดๆ แบ่งตามแนว Apex และ Base ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.21 และ 3.22

จากรูปที่ 3.5 เห็นได้ว่ากรณีไม่ติดโหลบ (L000) รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทตามทิศทางการไหลที่ $z/h=0, 5$ และ 6 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน สำหรับกรณีติดโหลบทั้งสองแบบนี้เห็นได้ชัดว่ารูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทที่แนว Apex และ Base มีลักษณะแตกต่างกัน

กรณี L000 (รูปที่ 3.6 ถึง 3.9) รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทค่อยๆ โตขึ้นตามทิศทางการไหล โดยที่ $x/h=51.5$ อุณหภูมิที่จุดสูงสุดมีค่าประมาณ 25% ของอุณหภูมิที่ปากเจ็ท รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทที่ z/h ทั้งสามค่อนข้างสมมาตรตามแนวแกนการไหล (รูปที่ 3.6)

กรณีติดโหลบแบบ L120 (รูปที่ 3.5 และ รูปที่ 3.10 ถึง 3.12) รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทตามทิศทางการไหล ที่แนว Apex ($z/h=0$) กับแนว Base ($z/h=5$) นั้นมีความแตกต่างกัน (รูปที่ 3.5, 3.10) โดยที่แนว Apex (รูปที่ 3.11) รูปร่างเจ็ทที่หน้าโหลบ ($x/h=0.5$) มีลักษณะแคบมากอันเนื่องมาจากการที่ยอดโหลบชนกัน ซึ่งทำให้ช่องทางที่เจ็ทจะพุ่งออกมาเล็กมาก จากนั้นที่ $x/h=2.5$ อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของเจ็ทลดลงจนเป็นประมาณ 35% ของอุณหภูมิที่หน้าโหลบ และพบว่ารูปร่างของเจ็ทไม่เป็นลักษณะโค้งตามปกติแต่มีลักษณะเป็นคลื่นสามเหลี่ยมสองลูกคล้ายกรรไกรโดยสามเหลี่ยมสองลูกนี้ต่อกันที่กึ่งกลางเจ็ท ซึ่งลักษณะรูปร่างเจ็ทนี้ว่าจะเกิดมาจากการติดโหลบ ต่อมาที่ $x/h=7.5$ อุณหภูมิสูงสุดของเจ็ทสูงขึ้นจากที่ $x/h=2.5$ โดยมีค่าประมาณ 60% TJ และรูปร่างของเจ็ทมีลักษณะโค้งอีกครั้ง ที่ x/h ต่อไปตามทิศทางการไหล รูปร่างของเจ็ทมีลักษณะโค้งและอุณหภูมิสูงสุดของเจ็ทลดลงเป็นลำดับ สำหรับที่แนว Base ของกรณี L120 (รูปที่ 3.12) รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ททุกตำแหน่ง x/h มีลักษณะโค้งและอุณหภูมิสูงสุดของเจ็ทลดลงเป็นลำดับตามทิศทางการไหล

กรณีติดโหลบแบบ L140 (รูปที่ 3.5 และ รูปที่ 3.13 ถึง 3.15) จากรูปที่ 3.5 และ 3.13 พบว่า รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทตามทิศทางการไหลที่แนว Apex ($z/h=0$) กับแนว Base ($z/h=6$) นั้นมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับกรณี L120 โดยที่แนว Apex (รูปที่ 3.14) รูปร่างเจ็ทที่หน้าโหลบ ($x/h=0.5$) มีลักษณะแคบมากอันเนื่องมาจากการที่ยอดโหลบชนกัน ซึ่งทำให้ช่องทางที่เจ็ทจะพุ่งออกมาเล็กมาก จากนั้นที่ $x/h=2.5$ รูปร่างของเจ็ทยังคงมีขนาดเท่ากับที่ $x/h=0.5$ แต่อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทลดลงเป็นประมาณ 35% ของอุณหภูมิที่หน้าโหลบ (ซึ่งเท่ากับของกรณี L120 ที่ $x/h=2.5$ เหมือนกัน) ที่ $x/h=7.5$ อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทลดลงอีกจนเป็นประมาณ 15% TJ และพบว่ารูปร่างของเจ็ทไม่เป็นลักษณะโค้งตามปกติ แต่มีลักษณะเป็นคลื่นสองลูกคล้ายรูปฟันตะแคง โดยเป็นแอ่งบริเวณกึ่งกลางเจ็ท ซึ่งลักษณะรูปร่างเจ็ทแบบนี้ น่าจะเกิดเนื่องมาจากการติดโหลบ ต่อมาที่ $x/h=12$ รูปร่างเจ็ทยังคงมีลักษณะเป็นคลื่น 2 ลูก ซึ่งอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทลดลงกลับสูงขึ้นจนเป็นประมาณ 25% TJ ส่วนที่ $x/h=18.5$ อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทเพิ่มขึ้นอีกจนประมาณเท่ากับที่ $x/h=2.5$ (35% TJ) และรูปร่างเจ็ทมีลักษณะโค้งตามปกติ จากนั้นที่ x/h ต่อไปตามทิศทางการไหล รูปร่างของเจ็ทมีลักษณะโค้งและอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทลดลงอีกเพียงเล็กน้อย

สำหรับที่แนว Base ของกรณี L140 นี้ (รูปที่ 3.15) ที่ $x/h=0.5$ (ตำแหน่งหน้าไหล) และ ที่ $x/h=2.5$ รูปร่างเจ็ทมีลักษณะโค้ง ต่อมาที่ $x/h=7.5$ รูปร่างเจ็ทมีลักษณะคล้ายจรวดตะแคง โดยอุณหภูมิมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทลดลงเป็นประมาณ 80% ของอุณหภูมิตั้งที่ $x/h=0.5$ จากนั้น ที่ $x/h=12$ รูปร่างเจ็ทยังคงมีลักษณะคล้ายเจ็ทตะแคง โดยอุณหภูมิมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทลดลงอีกจนเป็น 45% TJ สำหรับที่ x/h ต่อๆ ไปตามทิศทางไหล รูปร่างของเจ็ทมีลักษณะโค้งตามปกติ และอุณหภูมิตั้งที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ทลดลงเป็นลำดับ

รูปที่ 3.16 พิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ทที่ตำแหน่ง x/h ใดๆ โดยแบ่งเป็นแต่ละกรณีการทดลอง ซึ่งดูรายละเอียดได้จากรูปที่ 3.17 ถึง 3.19 ซึ่งแสดงกรณี L000, L120 และ L140 ตามลำดับ

กรณีไม่ติดไหล (L000) พบว่ารูปร่างของเจ็ทในแนว $z/h = 0, 5$ และ 6 (รูปที่ 3.16 และ 3.17) ที่ตำแหน่ง x/h ตั้งแต่ 0 ถึง 51.5 นั้นไม่มีความแตกต่างกัน นั่นคือเจ็ทนี้มีการพัฒนาตัว หรือการโตตามแนวแกน x (Streamwise direction) กับแกน y (Transverse direction) แต่ไม่มีการโตตามแนว z (Spanwise direction) หรืออีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าเจ็ทการไหลนี้เป็นแบบสองมิติ

กรณีติดไหลแบบ L120 พบว่าที่แนว Apex ($x/h = 0$) และ Base ($z/h = 5$) รูปร่างของเจ็ทมีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ $x/h = 0.5$ และ 2.5 (รูปที่ 3.16 และ 3.18) โดยจากรูปที่ 3.18 ที่ $x/h = 0.5$ (หรือที่หน้าไหล) พบว่าที่แนว Apex รูปร่างของเจ็ทมีลักษณะแคบมาก อันเนื่องมาจากการที่ยอดไหลชนกัน ซึ่งทำให้ช่องทางที่เจ็ทจะพุ่งออกมาเล็กมาก ส่วนที่แนว Base รูปร่างของเจ็ทจะโตกว่าโดยอุณหภูมิตั้งที่จุดสูงสุดของทั้งสองแนว ต่างกันเล็กน้อย ต่อมาที่ $x/h=2.5$ พบว่าที่แนว Apex และแนว Base รูปร่างของเจ็ทมีขนาดเท่ากัน แต่อุณหภูมิมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทมีค่าต่างกัน ประมาณ 80% โดยที่แนว Apex รูปร่างเจ็ทมีลักษณะคลื่นสามเหลี่ยม 2 ลูกคล้ายกรรไกร (ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จากผลการทดลองรูปที่ 3.11) จากนั้นที่ $x/h = 7.5$ และ 12 รูปร่างของเจ็ทที่ z/h ทั้งสองแนว พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนที่ $x/h = 18.5$ ถึง 51.5 รูปร่างของเจ็ทต่างกันเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการติดไหล

กรณีติดไหลแบบ L140 (รูปที่ 3.18) พบว่ารูปร่างของเจ็ทที่แนว Apex และ Base มีลักษณะแตกต่างกันที่ $x/h = 0.5$ ถึง 12 โดยจากรูปที่ 3.19 ที่ $x/h=0.5$ หรือที่หน้าไหล พบว่ารูปร่างของเจ็ทที่แนว Apex มีลักษณะแคบมาก อันเนื่องมาจากการที่ยอดไหลชนกัน ซึ่งทำให้ช่องทางที่เจ็ทจะพุ่งออกมาเล็กมาก ส่วนที่แนว Base รูปร่างเจ็ทมีขนาดโตกว่า โดยที่อุณหภูมิตั้งที่จุดสูงสุดของทั้งสองแนวประมาณเท่ากัน ต่อมาที่ $x/h=2.5$ พบว่ารูปร่างของเจ็ทที่แนว Apex ยังคงมีขนาดเล็กกว่าที่แนว Base และอุณหภูมิตั้งที่จุดสูงสุดของเจ็ทที่ทั้งสองแนวมีค่าต่างกันประมาณ 65% ต่อมาที่ $x/h=7.5$ พบว่ารูปร่างเจ็ทที่แนว Apex มีลักษณะคล้ายรูปพัดตะแคง (ดังที่กล่าวไว้จากผลการทดลอง รูปที่ 3.14) ส่วนที่แนว Base รูปร่างเจ็ทมีลักษณะคล้ายเจ็ทตะแคง (ดังที่กล่าว

ไว้จากผลการทดลองรูปที่ 3.15) โดยรูปร่างเจ็ทที่แนว Apex มีขนาดเล็กกว่าที่แนว Base เล็กน้อย และอุณหภูมิที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ทต่างกันประมาณ 65% เท่ากันที่ $x/h=2.5$ จากนั้นที่ $x/h=12$ พบว่ารูปร่างของเจ็ทที่ทั้งสองแนวมีขนาดประมาณเท่ากัน โดยที่แนว Apex ของเจ็ทยังคงมีลักษณะคล้ายฟันตะแคง ในขณะที่แนว Base รูปร่างของเจ็ทมีลักษณะโค้งตามปกติ ส่วนอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทต่างกันประมาณ 20 % สำหรับที่ $x/h=18.5$ ถึง 51.5 รูปร่างของเจ็ทมีขนาดประมาณเท่ากัน

รูปที่ 3.20 พิจารณารูปร่างเจ็ทของทุกระณีการทดลอง ที่ x/h ใดๆ โดยแบ่งตามแนว Apex และ Base ซึ่งดูรายละเอียดได้จากรูปที่ 3.21 และ 3.22

ที่แนว Apex (รูปที่ 3.21) ที่ $x/h=2.5$ กรณีติดโหลบบแบบ L140 เจ็ทมีขนาดโตที่สุด รองลงมาเป็นกรณีไม่ติดโหลบ (L000) และกรณีติดโหลบบแบบ L120 เจ็ทมีขนาดเล็กที่สุด (รูปร่างของเจ็ทกรณีติดโหลบทั้งสองแบบมีลักษณะเบี้ยวไม่เป็นเส้นโค้ง) ส่วนอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเจ็ทนั้นกรณีติดโหลบทั้งสองมีค่าประมาณเท่ากัน โดยมีค่าประมาณ 33% ของอุณหภูมิกรณีไม่ติดโหลบ ต่อมาที่ $x/h=7.5$ พบว่าขนาดของเจ็ทของทั้งสองกรณีที่ติดโหลบนั้นเท่ากัน ซึ่งมีขนาดโตกว่ากรณีไม่ติดโหลบ (แต่รูปร่างเจ็ทกรณี L140 มีลักษณะเบี้ยวไม่เป็นเส้นโค้ง ซึ่งต่างจากของอีกสองกรณี)

เจ็ทกรณีไม่ติดโหลบ (L000) มีค่าสูงสุด กรณี L120 และ L140 อุณหภูมิมีค่าประมาณ 86% และ 14% ของกรณี L000 ตามลำดับ ต่อมาที่ $x/h=12$ ขนาดของเจ็ทกรณีติดโหลบทั้งสองแบบนี้ยังคงเท่ากัน และมีขนาดโตกว่ากรณี L000 (ส่วนรูปร่างของเจ็ทกรณี L140 ยังคงมีลักษณะเบี้ยวอยู่ ซึ่งต่างจากของอีกสองกรณีที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง) อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของเจ็ทของกรณี L120 ต่ำกว่าของกรณี L000 เล็กน้อย แต่อุณหภูมิของกรณี L140 มีค่าประมาณ 42% ของอุณหภูมิกรณี L000

ที่ $x/h=18.5$ พบว่า ทั้งสามกรณีการทดลองมีขอบล่างของเจ็ทใกล้เคียงกัน แต่ขอบบนของเจ็ทกรณี L140 อยู่บนสุด ตามด้วย L120 และ L000 ตามลำดับ นั่นคือรูปร่างของเจ็ทกรณี L140 โตกว่าของกรณี L120 และ L000 และกรณี L120 ก็โตกว่ากรณี L140 ส่วนอุณหภูมิสูงสุดของเจ็ทกรณีไม่ติดโหลบกับติดโหลบบแบบ L120 มีค่าเท่ากัน แต่กรณี L140 มีค่าต่ำกว่า

$x/h=32$ พบว่ารูปร่างของเจ็ทกรณี L000 กับ L120 ไม่แตกต่างกัน ส่วนกรณี L140 รูปร่างเจ็ทโตกว่าของทั้งสองกรณีดังกล่าว ที่ $x/h=40$ และ 51.5 รูปร่างของเจ็ทกรณี L140 โตกว่าของกรณี L120 และ L000

จากรูปที่ 3.22 ที่แนว Base ($x/h=5$ และ 6) ที่ $x/h=2.5$ กรณีไม่ติดโหลบ รูปร่างเจ็ทที่ $x/h=5$ และ 6 ไม่แตกต่างกัน ส่วนกรณีติดโหลบบแบบ L140 เจ็ทมีขนาดโตกว่ากรณี L120 ซึ่งเจ็ทมีขนาดโตกว่ากรณี L000 เป็นลำดับไป โดยอุณหภูมิสูงสุดของทั้งสามกรณีประมาณเท่ากัน ต่อมาที่ $x/h=7.5$ พบว่าลักษณะการโตของเจ็ทคล้ายคลึงกับที่ $x/h=2.5$ คือกรณี L140 เจ็ทมีขนาดโตกว่ากรณี L120 และโตกว่ากรณี L000 ด้วย และอุณหภูมิสูงสุดของทั้งสามกรณีประมาณเท่ากัน

จะเห็นว่ากรณี L140 รูปร่างเจ็ทมีลักษณะคล้ายเจ็ทตะแคง (ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จากผลการทดลองรูปที่ 3.15) ส่วนอุณหภูมิสูงสุดของกรณี L120 มีค่าประมาณ 81% ของกรณี L140 และ L000 ซึ่งมีค่าเท่ากัน ที่ $x/h=12$ เช่นเดียวกับที่ $x/h=7.5$ คือ กรณี L140 รูปร่างคล้ายเจ็ทตะแคง อีกทั้งมีขนาดโตกว่ากรณี L120 กับ L000 ซึ่งกรณี L120 เจ็ทที่มีขนาดโตกว่ากรณีไม่ติดโหลบ สำหรับอุณหภูมิสูงสุดนั้น กรณี L000 มีอุณหภูมิสูงสุด มีค่ามากกว่ากรณี L120 ซึ่งมีค่ามากกว่ากรณี L140 อีกด้วย ซึ่งกรณี L140 มีอุณหภูมิสูงสุดเป็นประมาณ 70% ของกรณีไม่ติดโหลบ จากนั้นที่ $x/h=18.5$ เช่นเดียวกับที่ $x/h=12$ คือ กรณี L140 เจ็ทที่มีขนาดโตสุด รองลงมาคือกรณี L120 และ L000 ตามลำดับ โดยอุณหภูมิสูงสุดของกรณี L120 และ L000 มีค่าเท่ากัน ส่วนกรณี L140 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดเป็น 70% ของอุณหภูมิสูงสุดของทั้งสองกรณีข้างต้น

3.2. ผลของโหลบการไหลแบบเจ็ทระนาบวิงชนผนัง

3.2.1. พิจารณาลักษณะการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG})

ผลการทดลองในส่วนนี้ แสดงในรูปที่ 3.23 และ 3.24 แสดงการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ตามทิศทางการไหล (Streamwise direction, แกน x) สามแนว คือ $z/h=0, 5$ และ 6 โดยรูปที่ 3.23 แบ่งตามแต่ละกรณีการทดลองอันได้แก่ L000i, L120i และ L140i ส่วนรูปที่ 3.24 แสดงทุกกรณีรวมในกราฟเดียวและแบ่งตามแนวที่ตรงกับตำแหน่ง Apex ($z/h=0$) และ Base ($z/h=5$ และ 6) จากรูปที่ 3.23 พบว่ากรณี L000i ซึ่งไม่ได้ติดโหลบ ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตั้งสามแนวนั้นไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนกรณี L120i ซึ่งติดโหลบแบบ L120 นั้นลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตามแนว Apex ($z/h=0$) กับ Base ($z/h=5$) มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง $x/h=0.5-9$ หรือประมาณ 30 % ของระยะที่ทำการทดลอง ($x/h=0-30$) โดยภายในระยะทางวัดจากปากเจ็ทไปประมาณ $3.5h$ อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็น 45 % ของอุณหภูมิตรงตำแหน่งปากเจ็ท จากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนเป็น 65 % TJ ที่ระยะ $x/h=9$ (หาที่บอกว่าใช้ TJ แทนอุณหภูมิตรงตำแหน่งปากเจ็ท $x=0$ (L000i), $x=0.5$ (L1X0) ถัดจากนั้นอุณหภูมิตั้งสามแนวเท่ากันกับที่แนว Apex และอุณหภูมิลดลงเป็นลำดับอย่างช้าๆจนเป็น 55 % TJ ที่ผนังด้านท้าย

กรณี L140i ซึ่งติดโหลบแบบ L140 มีลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตามแนว Apex ($z/h=0$) กับ Base ($z/h=6$) เช่นเดียวกับที่พบในกรณี L120i นั้นคือมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง $x/h=0.5-15$ หรือคิดเป็นระยะประมาณครึ่งหนึ่งของระยะทั้งหมดที่ทำการทดลอง โดยภายในระยะประมาณ $5h$ วัดจากปากเจ็ท อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นประมาณ 27 % TJ (ซึ่งอุณหภูมิต่ำลงกว่าของกรณี L120i, จากนั้นอุณหภูมิตั้งสามแนวจะเพิ่มขึ้นจนเป็น 45% TJ (ซึ่งเป็นที่

น่าสังเกตว่าเท่ากับอุณหภูมิต่ำสุดของกรณี L120i เห็นได้จากรูปที่ 3.23 ด้วย) ที่ระยะ $x/h = 15$ ถัดจากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย ซึ่งอุณหภูมิประมาณเท่ากันกับที่แนว $z/h=6$ จากรูปที่ 3.24 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตามแนว Apex ($z/h=0$) ของทั้งสามกรณีการทดลอง พบว่าระหว่างกรณี L120i กับ L140i นั้นอัตราการลดลงของอุณหภูมิในช่วงประมาณ 8.5 % ของระยะจากปากเจ็ทถึงผนังท้าย ($x/h=0-2.5$) นั้นใกล้เคียงกัน เลยไปจากนี้กรณี L140i อุณหภูมิยังคงลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่กรณี L120i นั้นอุณหภูมิเริ่มเพิ่มขึ้น แสดงว่าไหลแบบ L140 มีผลต่อการไหลได้มากกว่าและไกลกว่าไหลแบบ L120 เปรียบเทียบระหว่างกรณี L000i กับ L120i พบว่าลักษณะการลดลงของอุณหภูมิต่างอย่างชัดเจนในช่วงประมาณ $x/h=0.5-9$ (ประมาณ 30% ของระยะทั้งหมดที่ทำการทดลอง) ซึ่งสอดคล้องกับผลจากรูปที่ 3.23 ดังที่กล่าวไปแล้ว สำหรับระหว่างกรณี L000i กับ L140i นั้นพบว่าความแตกต่างนี้ สามารถพบได้ไกลกว่าคืออยู่ในช่วงประมาณ $x/h=0.5-18.5$ (ประมาณ 60 % ของระยะทั้งหมด) แสดงว่าไหลแบบ L140 ส่งผลต่อการไหลได้ไกลกว่าไหลแบบ L120 และเป็นที่น่าสังเกตว่า แบบ L140 ส่งผลได้ไกลกว่าแบบ L120 ประมาณสองเท่าจากรูปที่ 3.24 ล่าง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตามแนวตำแหน่ง Base ($z/h=5$ กรณี L120i และ $z/h=6$ กรณี L140i) พบว่าในช่วงประมาณ 23% แรกนั้นทั้งสามกรณีให้อุณหภูมิใกล้เคียงกัน ถัดจากนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิจะเห็นได้ชัดขึ้นซึ่งต่างจากผลที่ได้จากแนว Apex ส่วนอุณหภูมิโดยรวมนั้นกรณี L120i อุณหภูมิจะสูงกว่ากรณีไม่ติดไหล (L000i) ในขณะที่กรณี L140i อุณหภูมิจะต่ำกว่ากรณีไม่ติดไหล

โดยสรุปแล้วผลที่พบจากลักษณะการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) แสดงว่าที่แนว Apex ทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นการไหล แล้วอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นและลดลงอีกครั้งจนประมาณใกล้เคียงกับกรณีไม่ติดไหล ต่างจากที่แนว Base ซึ่งอุณหภูมิในช่วงกลางถึงท้ายการไหลมีความแตกต่างกับกรณี L000i หากเปรียบเทียบระหว่างไหลทั้งสองแบบแล้วไหลแบบ L140 ส่งผลต่อการไหลได้มากกว่าและไกลกว่าแบบ L120

3.2.2. พิจารณาการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแนวขวางการไหล

รูปที่ 3.25 และ 3.26 แสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ตามแนวขวางการไหล (Spanwise direction, แกน y) ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกนการไหล โดยรูปที่ 3.25 แบ่งตามแต่ละกรณีการทดลองอันได้แก่ L000i, L120i และ L140i ส่วนรูปที่ 3.26 แสดงทุกกรณีรวมในกราฟเดียวกันและแบ่งตามตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกนการไหล

จากรูปที่ 3.25 รูปบนสุดกรณีไม่ติดไหล พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นแอ่งตรงกลาง การกระจายตัวของอุณหภูมิต่างอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ต้นถึงท้ายการไหล ส่วนกรณี L120i ซึ่งติดไหล L120 พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิต่างอย่างชัดเจนเป็นคลื่น

สามเหลี่ยมซึ่งยอดชี้ลง อนึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมมีเท่ากับจำนวนโหลบย่อยของโหลบ L120 คือเท่ากับ 11 โหลบย่อย โดยที่ตำแหน่งหน้าโหลบ ($x/h=0.5$) ยังเห็นไม่ชัดเจนแต่พบลักษณะคลื่นสามเหลี่ยมอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง $x/h=2.5$ ส่วนที่ตำแหน่งถัดไปตามแนวแกนการไหลนั้นพบว่าจำนวนลูกคลื่นและแอมพลิจูดของอุณหภูมิลดลงเป็นลำดับจนกระทั่งที่ตำแหน่ง $x/h=23.5$ เป็นต้นไปแทบจะไม่เห็นการกระจายตัวเป็นลูกคลื่นแล้ว สำหรับกรณี L140i ซึ่งติดโหลบ L140 พบการกระจายตัวของอุณหภูมิลักษณะเป็นคลื่นสามเหลี่ยมเช่นเดียวกับกรณี L120i รวมทั้งพบว่าจำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมมีเท่ากับจำนวนโหลบย่อย โดยที่ตำแหน่งหน้าโหลบ ($x/h=0.5$) ยังเห็นไม่ชัดแต่พบลักษณะคลื่นสามเหลี่ยมอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง $x/h = 2.5$ ส่วนที่ตำแหน่ง $x/h = 7.5$ และ 12 ยังคงมีจำนวนลูกคลื่นเท่ากับจำนวนโหลบย่อย เพียงแต่แอมพลิจูดของอุณหภูมิลดลง เป็นที่น่าสังเกตว่าแอมพลิจูดของอุณหภูมิต่ำสุดของลูกคลื่นที่ตำแหน่ง $x/h = 2.5, 7.5$ และ 12 มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิต่อรวมที่ตำแหน่ง $x/h = 18.5, 23.5$ และ 28.5 ซึ่งต่างกับกรณี L120i ซึ่งอุณหภูมิต่ำสุดมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิต่อรวม แสดงว่าโหลบ L140 มีผลต่อการไหลได้มากกว่า และไกลกว่าโหลบ L120 จากรูปที่ 3.26 เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามตำแหน่งหนึ่ง, ตามแนวแกนการไหลของทั้งสามกรณีการทดลอง โดยกรณี L120i ใช้เป็นเส้นประเพื่อให้สามารถเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนพบว่าผลสอดคล้องกับรูปที่ 3.25 ที่ตำแหน่ง $x/h = 2.5$ พบจำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมเท่ากับจำนวนโหลบย่อยในทั้งสองกรณีที่ติดโหลบโดยแอมพลิจูดของอุณหภูมิต่ำสุดกรณี L140i ต่ำกว่ากรณี L120i ถัดมาที่ตำแหน่ง $x/h=7.5, 12$ ยังคงพบลักษณะแบบลูกคลื่นสามเหลี่ยมหากแต่มีแอมพลิจูดลดลงโดยกรณี L120i นั้นจำนวนลูกคลื่นมีน้อยลงในขณะที่กรณี L140i จำนวนลูกคลื่นยังคงเท่ากับจำนวนโหลบย่อย ที่ตำแหน่งท้ายการไหลถัดไปจนกระทั่งถึงที่ผนังด้านท้าย อุณหภูมิต่ำสุดมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามกรณี

โดยสรุปแล้วผลที่พบจากการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแนวขวางการไหล (Spanwise direction, แกน z) มีความสอดคล้องกับผลที่พบ (C_{TG}) จากลักษณะการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) นั่นคือ โหลบแบบ L140 ส่งผลต่อการไหลได้ไกลกว่าโหลบแบบ L120

3.2.3. พิจารณารูปปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทในแต่ละตำแหน่งตามแนวแกนการไหล

รูปที่ 3.27 เป็นรูปแผนผังรวมแสดงรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทตามแนวแกนการไหล โดยแบ่งเป็นแต่ละกรณีการทดลอง ซึ่งแต่ละกรณีการทดลองแบ่งออกเป็น 3 รูป คือที่แนว $z/h = 0, 5$ และ 6 ตามลำดับ จากซ้ายไปขวา ส่วนรูปที่ 3.28, 3.32 และ 3.35 แสดงแยกตามกรณีการทดลอง ได้แก่ L000i, L120i และ L140i ตามลำดับ

รูปที่ 3.38 เป็นรูปแผนผังรวมแสดงการพัฒนาตัวของเจ็ทตามแนวแกนการไหลของแต่ละกรณีการทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นตำแหน่งต่างๆ จากต้นจนถึงท้ายการไหล แยกเป็นกรณีดังรูปที่ 3.39, 3.40 และ 3.41 ตามลำดับ รูปที่ 3.42 แสดงรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทตามแนวแกนการไหลแบ่งตามแนว Apex และแนว Base ส่วนรูปที่ 3.43 และ 3.44 แสดงที่แนว Apex และ Base ตามลำดับ จากรูปที่ 3.27 เห็นได้ว่ารูปร่างการพัฒนาของเจ็ทกรณีติดโหลบทั้งสองเชื่อมกับของกรณีไม่ติดโหลบไปทางขวาเล็กน้อย แสดงว่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวมของเจ็ทกรณีติดโหลบมีค่าสูงกว่าของเจ็ทกรณีไม่ติดโหลบ หากพิจารณากรณีไม่ติดโหลบ ($L000i$) ดังรูปที่ 3.28 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทในทั้งสามแนว ($z/h=0,5$ และ 6) ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่เหมือนผลกรณีติดโหลบจากรูปที่ 3.29 กรณี $L120i$ พบว่าที่แนว Apex ชนกัน ($z/h=0$) อุณหภูมิลดลงเร็วกว่าที่แนว Base ($z/h=5$) จะเห็นได้จากที่ $z/h=0$ อุณหภูมิสูงสุดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง $x/h=0-2.5$ ซึ่งต่างกับที่แนว Base สำหรับกรณี $L140i$ แสดงดังรูปที่ 3.41 ได้ผลในลักษณะเดียวกัน

จากรูปที่ 3.42 และ 3.43 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทมีลักษณะใกล้เคียงกันส่วนกรณี $L120i$ ดังรูปที่ 3.42 และ 3.44 ระหว่างแนว Apex กับ Base นั้นรูปร่างเจ็ทมีความแตกต่างกันในช่วง $x/h=0-2.5$ หรือประมาณ 8 % ของระยะทั้งหมดที่ทดลองและที่ $x/h=2.5$ อุณหภูมิสูงสุดของแนว Apex มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแนว Base หากเป็นกรณี $L140i$ จะพบความแตกต่างดังกล่าวได้ไกลกว่ากรณี $L120i$ คือในช่วง $x/h=0-7.5$ สังเกตว่าที่ $x/h=2.5$ อุณหภูมิสูงสุดของแนว Apex มีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของแนว Base จากรูปที่ 3.43 เปรียบเทียบรูปร่างของเจ็ทที่แนว Apex ของทุกกรณีการทดลอง โหลบทั้งสองแบบส่งผลต่อการไหลภายในช่วง 30% ของระยะทั้งหมดที่ทดลอง

จากรูปที่ 3.44 เปรียบเทียบรูปร่างของเจ็ทที่แนวฐานโหลบของทั้งสามกรณีพบว่ารูปร่างเจ็ทของทั้งสามกรณีมีลักษณะคล้ายคลึงกันแต่กรณีติดโหลบทั้งสองกรณีทำให้เจ็ทโตเร็วกว่ากรณีไม่ติดโหลบแสดงว่าโหลบช่วยให้เจ็ทตั้งอากาศภายนอกเข้ามาผสมได้เร็วขึ้น

3.3. เปรียบเทียบผลของโหลบต่อการไหลแบบเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบวงวนผนัง

3.3.1. พิจารณาลักษณะการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG})

ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงในรูปที่ 3.45 และ 3.46 โดยรูปที่ 3.45 แสดงการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ตามแนวแกนการไหลที่ $y=0$ แบ่งตามแต่ละกรณีการทดลอง รูปที่ 3.46 แสดงการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ตามแนวแกนการไหลแบ่งตามแนว Apex และ Base ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.45 กรณีไม่ติดโหลบ (L000 และ L000i) ซึ่งไม่ติดโหลบที่ปากทางออก Contraction พบว่าลักษณะการลดลงของอุณหภูมิทั้งสามแนวคือ $z/h=0, 5, 6$ นั้นไม่มีความแตกต่างกันเลย ระหว่างการไหลแบบเจ็ทระนาบ และเจ็ทระนาบวิ่งชนผนัง (IPJ) ส่วนกรณีติดโหลบแบบ L120 (L120 & L120i) ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิที่ $z/h=0,5$ ของเจ็ทระนาบกับเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนังนั้น เป็นดังที่ได้อธิบายข้างต้นในหัวข้อ 3.1.1 และ 3.2.1 ตามลำดับ แต่พบว่า IPJ นั้นมีอุณหภูมิสูงกว่า PJ ส่วนกรณีติดโหลบแบบ L140 (L140 & L140i) ได้ผลเช่นเดียวกับกรณี L120 & L120i ดังกล่าว

จากรูปที่ 3.46 ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิซึ่งแบ่งตามแนว Apex และ Base ของการไหลแต่ละแบบ PJ & IPJ ได้อธิบายที่หัวข้อ 3.1.1 และ 3.2.1 ข้างต้น พบว่าระหว่าง IP กับ IPJ นั้น อุณหภูมิของ IPJ สูงกว่า IP ทั้งในแนว Apex และ Base

3.3.2. พิจารณารูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ททั้งสองแบบในแต่ละตำแหน่งตามแนวการไหล

ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงในรูปที่ 3.47 ถึง 3.64 โดยรูปที่ 3.47 เป็นแผนผังแสดงรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ท แบ่งตามกรณีการทดลอง ซึ่งดูรายละเอียดดังรูปที่ 3.48 ถึง 3.57 รูปที่ 3.58 เป็นแผนผังแสดงการพัฒนาตัวของเจ็ทที่ระยะ x/h ใดๆ แบ่งตามกรณีการทดลอง ซึ่งดูรายละเอียดดังรูปที่ 3.59 ถึง 3.61 ส่วนรูปที่ 3.62 เป็นแผนผังแสดงการพัฒนาตัวของเจ็ทที่ระยะ x/h ใดๆ แบ่งตามแนว Apex และ Base ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.63 และ 3.64

จากรูปที่ 3.47 พบว่ารูปร่างของเจ็ท IP กับ IPJ นั้นมีความแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นกรณีการทดลองใด คือ บริเวณขอบบนกับล่างของเจ็ท IP นั้น อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ และมีการลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ IPJ นั้นอุณหภูมิจะกลับเพิ่มขึ้นอีก อันเนื่องมาจากเมื่อเจ็ทระนาบวิ่งชนผนังที่ $x/h=30$ แล้วจะมีการสะท้อนกลับมา

กรณีไม่ติดโหลบ (L000 & L000i) (รูปที่ 3.47 ถึง 3.51) พบว่าบริเวณขอบบนขอบล่างของ IPJ มีอุณหภูมิสูงกว่าของ IP ส่วนบริเวณกลางเจ็ทนั้น เจ็ททั้งสองแบบมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับกรณีติดโหลบแบบ L120 (L120 & L120i) (รูปที่ 3.52 ถึง 3.54)

บทที่ 4

อภิปรายผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งกรณีเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนังในแต่ละสามกรณีการทดลองได้แก่ กรณีไม่ติดไหล, กรณีติดไหลแบบ L120 และกรณีติดไหลแบบ L140 พบว่าการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกเจ็ทโดยใช้ไหลทั้งสองแบบ ทำให้เจ็ททั้งสองแบบมีอัตราการโตเร็วขึ้น จากรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ท ซึ่งเนื่องมาจากไหลช่วยทำให้เจ็ทร้อนนี้ดึงอากาศภายนอกเข้ามาผสมได้ดีขึ้น ทั้งนี้เพราะไหลสามเหลี่ยมรูปทรงแปดเหลี่ยมก่อให้เกิด Vortex 2 ลูกคู่กันที่แต่ละข้างของสามเหลี่ยมโดย Vortex ทั้งสองนี้หมุนสวนทางกัน และมีแนวแกนการไหล (Streamwise direction) เป็นแกนการหมุน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Streamwise vortices โดยที่แนวยอดไหลชนกันพบว่าอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะทางใกล้ๆ ไหลต่อมาอุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณเท่ากับอุณหภูมิที่ฐานไหล จากนั้นอุณหภูมิ ลดลงอีกเล็กน้อยอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวขวางการไหล (Spanwise direction) พบลักษณะเป็นคลื่นสามเหลี่ยมและมีจำนวนลูกคลื่นเท่ากับจำนวนไหลย่อยด้วย ซึ่งการที่เกิดปรากฏการณ์ลักษณะนี้ น่าจะเกิดจากการติดไหลอย่างสมมาตรนี้ดังรูปที่ 2.20 ทำให้การไหลถูกแบ่งเป็นเจ็ทลำเล็กๆ ตามตรงฐานไหลซึ่งมีลักษณะเป็นช่วงเจ็ทลำเล็กแต่ละลำเหล่านี้จะขึ้นจนกระทั่งมาซ้อนทับกันที่สุดในที่สุด

จากการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนรูปแบบปากทางออกโดยใช้ไหล L120 กับ L140 กับการไหลแบบเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนัง โดยผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของการไหลนั้นๆ พบว่าหากพิจารณาในส่วนของลักษณะการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมนั้น กรณีการไหลแบบเจ็ทระนาบทั้งไหล L120 และ L140 ทำให้อุณหภูมิภายในช่อง 10 h แรกลดลงอย่างรวดเร็ว นั่นคือผลจากการติดไหลช่วยเพิ่มอัตราการผสมกันระหว่างเจ็ทร้อนกับสถานะแวดล้อมอย่างมาก ในช่วงห่างจากไหลไม่มากนัก ในช่วง 10h ถัดมาอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นอุณหภูมิเริ่มลดลงอย่างช้าๆ อันเนื่องมาจากผลจากไหลค่อยๆ อ่อนกำลังลง สำหรับกรณีเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนังก็ได้ผลอย่างเดียวกันแต่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างไหล L120 กับ L140 พบว่าไหล L140 นั้นส่งผลต่อการไหลได้ไกลกว่า L120 อีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิโดยรวมลดต่ำกว่าที่ไหล L120 ทำได้ รวมทั้งอัตราการลดลงของอุณหภูมิเร็วกว่าด้วย ซึ่งแสดงว่าผลของไหลนั้นขึ้นอยู่กับการไหลของไหล ซึ่งในที่นี้คือคาบของไหลสำหรับในส่วนลักษณะการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมตามแนวแกนยาวกึ่งกลางหน้าตัดทางออกพบลักษณะรูปร่างแบบเป็นแอ่งตรงกลางซึ่งน่าจะเกิดเนื่องมาจากการที่มีผนังด้านข้างทำให้เจ็ทร้อนสามารถดึง

อากาศเข้ามาผสมได้จากด้านบนและด้านล่างเท่านั้นในขณะที่ไม่สามารถดึงอากาศเข้ามาผสมได้ในบริเวณด้านข้างใกล้ผนังจึงทำให้อุณหภูมิบริเวณด้านข้างใกล้ผนังทั้งสองนั้นมีค่าสูงกว่าบริเวณตรงกลางเจ็ท นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายตัวอุณหภูมิมีลักษณะเป็นลูกคลื่นสามเหลี่ยมต่อกันซึ่งเป็นไปตามลักษณะของไหลโดยในช่วงต้นการไหลนั้น จำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมมีขนาดเท่ากับจำนวนไหล ถัดจากนั้นจำนวนลูกคลื่นรวมทั้งค่าแอมพลิจูดอุณหภูมิของลูกคลื่นจะลดลงเป็นลำดับการกระจายตัวค่อนข้างราบเรียบที่ระยะประมาณ 18.5 เท่าของขนาดความกว้างปากทางออกเจ็ท แต่เป็นที่น่าสนใจว่าการกระจายตัวอุณหภูมิจากไหล L140 นั้นให้จำนวนลูกคลื่นสามเหลี่ยมเท่ากับจำนวนไหลย่อยไปได้ระยะทางไกลกว่ารวมทั้งแอมพลิจูดอุณหภูมิลดลงช้ากว่าซึ่งผลการทดลองที่ได้ทั้งสามส่วนนี้ของทั้งเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังชนผนังมีความสอดคล้องกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทด้วย ผลที่ได้ต่อการไหลทั้งสองแบบนี้ไม่แตกต่างกันมาก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประมวลตาราง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
1	Perkins (1970)	<ul style="list-style-type: none"> ห้องทดลองที่ใช้มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 12×12 inch² ยาว 66 inch ต่ออยู่กับปากทางออกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 14.5×14.5 inch² ของอุโมงค์ลมแบบเป่าลม โดยต่อให้ผนังสองด้านของห้องทดลองต่อเนื่องกับผนังอุโมงค์ลม ส่วนผนังสองด้านที่เหลือซึ่งมี Sharp Leading Edge นั้นถูกจัดทำขึ้นให้ทำมุมจากกันอย่างเที่ยงตรง ใช้เส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 inch วางที่ตำแหน่ง 2.25 inch ถัดจาก Leading Edge ของผนัง เพื่อวัดขวาง Boundary Layer ที่ก่อตัวขึ้นจาก Leading Edge Reynolds Stress หาได้โดยใช้ค่าที่วัดได้จาก X Array Hot-Wire Probe Mean Secondary Current หาได้โดยใช้ค่าที่วัดได้จาก Hot-Wire ที่วางตัวในแนวระนาบ x-y เมื่อการไหลของของไหลอยู่ในแนวแกน x 	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> ทำการศึกษา Streamwise Vorticity ในการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นทั้งจาก Mean Flow Skewing และจาก Non-Uniformities ใน Wall Turbulence โดยเน้นที่ตัวหลัง ในการทำการทดลองเพื่อศึกษา Corner Boundary Layer กระทำที่ตำแหน่ง 51.75 inch ถัดจากตำแหน่งของเส้นลวดวัดขวาง ในภาวะแรงดันคงที่ 	<ul style="list-style-type: none"> องค์ประกอบของ Reynolds Stress ในกรณี Transverse Inhomogeneous Flow มีสามส่วนคือ <ul style="list-style-type: none"> Primary Shear Stress ซึ่งมี Resultant Stress ที่มีการวางตัวโดยประมาณตั้งฉากกับ Isovel และมีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานจลน์ปั่นป่วน Secondary Shear Stress ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนใน Boundary Region โดยส่วนแรกมีขนาดที่พิจารณาได้จาก Local Skewing และส่วนที่สองมีขนาดที่ขึ้นอยู่กับระดับ Distortion ของ Direct Stress Field Anisotropic Direct Stress ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับระยะห่างจากพื้นผิว ในกรณี Slowly-Developing Corner Boundary Layer ที่ทำการศึกษาพบว่าสามารถละทิ้งบางพจน์ในสมการ Mean Streamwise Vorticity ทำให้ได้สมการอย่างง่าย สมการอย่างง่ายที่ได้ สามารถนำไปใช้ในการพิจารณาได้เพียงทิศทางของ Secondary Current เพราะยังขาดข้อมูลการทดลองที่จะนำไปใช้แก้ปัญหาในกรณี Developing Boundary Layer ทิศทางของ Secondary Current สำหรับ Nominally Two-Dimensional Boundary Layer,

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
					Salient Edge Flow และ Corner Boundary Layer ที่พิจารณาได้จากสมการอย่างง่าย มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต
2	Sakakibara, Hishida and Maeda (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ปากทางออกของ Nozzle เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $14.5 \times 150 \text{ mm}^2$ พื้นผิวร้อนตกกระทบมีขนาด $130 \times 145 \text{ mm}^2$ แผ่นหลังเป็น Bakelite หนา 3 mm ชั้นกลางเป็น Strip ขนาด $130 \times 29 \text{ mm}^2$ เรียงตัวกันห้าอันเต็มพื้นที่ และมี Stainless Steel Foil หนา $30 \text{ }\mu\text{m}$ เป็นตัวให้ความร้อน วัดอุณหภูมิของพื้นผิวร้อนด้วย Copper-Constantan Thermocouple ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $100 \text{ }\mu\text{m}$ และติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านหลังของ Foil หาเวกเตอร์ความเร็วของของไหลด้วย Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) ที่ใช้ Sumitomo-Seika HE-5023 เป็น Tracer Particles หาอุณหภูมิของของไหลด้วย Laser Induced Fluorescence (LIF) ที่ใช้ Laser ชนิด Ar-ion ขนาด 4 W และใช้ Rhodamine B เป็น 	น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> ทำการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้าง Vortex และการถ่ายเทความร้อนในบริเวณ Stagnation ของ Impinging Plane Jet ซึ่งเป็น Water Jet ที่ถูกฉีดขึ้นในแนวตั้งไปกระทบพื้นผิวร้อนที่วางตัวอยู่ในแนวระดับ Jet มี Velocity Profile สมมาตรที่ปากทางออกของ Nozzle และมีความเข้ม Streamwise Turbulence ประมาณ 1.5% ความเร็วที่ปากทางออก Nozzle เท่ากับ 107 mm/s ซึ่งคิดเป็นค่าเรย์โนลด์ที่ขึ้นกับความกว้างของปากทางออก Nozzle ได้เท่ากับ 2000 อัตราส่วนระหว่าง ระยะห่างของ Nozzle ถึงพื้นผิวร้อน ต่อ ความกว้างของปากทางออก Nozzle เท่ากับ 8 พื้นที่ทำการวัดมีขนาด $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 	<ul style="list-style-type: none"> Impinging Jet ทำให้มีคู่ของ Vortices ในแนวแกน X ที่หมุนสวนทางกัน ในบริเวณ Stagnation โดยคู่ของ Vortices นี้เกิดขึ้นจากบริเวณ Free Jet แล้วถูกพามาพร้อมการไหลจนถึงบริเวณใกล้ผนังก็ถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นด้วย Vortex-Stretching ในแนวแกน X อันเนื่องมาจาก Diverging Flow ของ Impinging Jet คู่ของ Vortices นี้ช่วยกวาดของไหลอุณหภูมิสูง บริเวณผนังที่อยู่ระหว่างคู่ของ Vortices ออกไป ยังบริเวณการไหลด้านนอก และ กวาดของไหลอุณหภูมิต่ำที่อยู่ด้านข้างคู่ของ Vortices เข้าไป จนผนัง บริเวณที่เกิดการกวาดของไหลอุณหภูมิสูงเรียกว่าบริเวณ Upwash ส่วนบริเวณที่เกิดการกวาดของไหลอุณหภูมิต่ำเรียกว่าบริเวณ Downwash การกวาดของไหลอุณหภูมิสูง โดย คู่ของ Vortices ที่หมุนสวนทางกัน นี้ เป็นตัวการหลักที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใน

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		Fluorescence Dye		วางตัวในระนาบ Y-Z เมื่อ การไหลของของไหลอยู่ในแนวแกน Y และ Stagnation Line อยู่ในแนวแกน Z	บริเวณ Stagnation
3	Smith et al. (1997)	<ul style="list-style-type: none"> • ใช้อุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่มี Contraction Ratio เท่ากับ 4:1 และ Test Section มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 9.5×9.5 cm² • ใช้ Injector ที่แตกต่างกัน 3 อัน คือ 5 Lobed Injector A มี Profile ลักษณะ Sinusoidal Wave, 3 Lobed Injector B มี Profile ลักษณะ Rounded Square Wave และ Straight Slot Injector C • ใช้ CO₂ เป็นตัวแทนเชื้อเพลิงและใช้ Acetone เป็น Marker ของเชื้อเพลิง • ใช้การถ่ายภาพ Acetone ด้วยเทคนิค Planar Laser-Induced Fluorescence (PLIF) ในการทำ Flow Visualization • ใช้ Pitot Probe ในการวัดความหนาโมเมนต์ • ใช้ Hot-Wire Anemometer ในการวัดความเร็ว 	CO ₂ และ อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> • ทำการทดลองเพื่อศึกษาการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่เกิดขึ้นใน Lobed Injector เมื่อเชื้อเพลิงและอากาศ Coflowing และไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีในการผสม • ในการทดลองสำหรับแต่ละ Injector ได้กำหนดเงื่อนไขการไหลไว้ 3 สถานะ คือ <ul style="list-style-type: none"> • กำหนดให้ เชื้อเพลิงและอากาศมีความเร็วเท่ากัน ที่ 11.5 m/s • กำหนดให้ อากาศมีความเร็ว 4.5 m/s และ เชื้อเพลิงมีความเร็วเป็น 2 เท่า ที่ 9 m/s • กำหนดให้ อากาศที่ไหลทางด้านบนของ Injector มีความเร็ว 3 m/s และ อากาศที่ไหลทางด้านล่างของ Injector มีความเร็วเป็น 6 เท่า ที่ 18 m/s ส่วนเชื้อเพลิงมีความเร็วเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วทั้งสอง คือ 10.5 m/s 	<ul style="list-style-type: none"> • จากภาพ Mixture Fraction พบว่า ในเงื่อนไข I มีการดึง Injectant Fluid จากยอดและแอ่งของ Profile ของของไหล ไปยังบริเวณ Inflection โดย Streamwise Vorticity ที่เกิดจาก Lobed Injector B แต่ในกรณี Lobed Injector A นั้นไม่มีการดึงเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าผลของการดึงนี้ ในเงื่อนไข II และ III เมื่อเทียบกับในเงื่อนไข I มีค่าลดลง และมีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ • ค่า Unmixedness ในเงื่อนไข I และ III ของ Lobed Injector ทั้ง A และ B มีค่าน้อยกว่า Straight Injector C ส่วนในเงื่อนไข II นั้นค่า Unmixedness ของ Straight Injector C กลับน้อยกว่า Lobed Injector ทั้งสอง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก Spanwise Vorticity ที่เกิดในกรณีของ Lobed Injector ถูกจำกัดความรุนแรงลงด้วย Lobed Shape • ค่า Strain Rate ในเงื่อนไข II และ III ของ Lobed Injector B มีค่าสูงกว่า Injector ที่เหลือ

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
					<p>อีกสองตัว ส่วนในเงื่อนไข ซึ่งแม้ว่าจะมีค่าต่ำกว่า แต่ก็ยังสูงพอที่จะช่วยชะลอการจุดระเบิดในบริเวณ Near Field ได้</p> <ul style="list-style-type: none"> สรุปได้ว่า Lobed Injector สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในระดับโมเลกุลระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศได้ รวมทั้งยังช่วยชะลอการจุดระเบิดในบริเวณ Near Field ได้อีกด้วย
4	Strickland, Selerland and Karagozian (1998)	<ul style="list-style-type: none"> เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขที่ใช้ระเบียบวิธี Lagrangian Vortex Element และระเบียบวิธี Scalar Transport ในการสร้างแบบจำลองเพื่อนำไปทำการศึกษารูปแบบการไหล และลักษณะการผสมที่เกิดขึ้นใน Lobed Injector Lobed Injector ที่ทำการศึกษามี Profile ที่แตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ Sinusoidal Wave และ Rounded Square Wave 	แบบจำลองของเชื้อเพลิงและอากาศ	<ul style="list-style-type: none"> ทำการศึกษานครณีที่เชื้อเพลิงและอากาศ Coflowing และไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีในการผสม ความเร็วของเชื้อเพลิงและอากาศมีค่าเท่ากัน ที่ประมาณ 4.7 mm/s ซึ่งคิดเป็นค่าเรย์โนลด์ที่ขึ้นกับความยาวคาบของ Lobe ได้เท่ากับ 5,842 ทำการศึกษาเชิงพารามิเตอร์ ที่ครั้งหนึ่งของมุมบาน เท่ากับ 8.8° และ 20° รวมทั้ง ที่ อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดต่อความยาวคาบ เท่ากับ 0.3 และ 0.97 	<ul style="list-style-type: none"> เมื่อทำการตรวจสอบผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลข กับ ผลจากการทดลองของ Smith et al. (1997) พบว่า ที่ค่าเรย์โนลด์ต่ำ ผลมีความสอดคล้องกันมากกว่า ที่ค่าเรย์โนลด์สูง จึงทำการศึกษาเชิงพารามิเตอร์ที่ความเร็วการไหลปานกลาง ผลจากการศึกษาเชิงพารามิเตอร์ พบว่า การผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ <ul style="list-style-type: none"> อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดต่อความยาวคาบของ Lobe มีค่าลดลง มุมบานของ Lobe มีค่าเพิ่มขึ้น รูปร่างของ Lobe มี Profile ลักษณะ Rounded Square Wave

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
5	Khuhiran et al. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> ใช้อุโมงค์ลมซึ่งประกอบด้วยพัดลม, Heating chamber, Settling chamber และ Contraction ที่มีอัตราส่วนพื้นที่เท่ากับ 12.5 มีขนาดปากทางออกเท่า $50 \times 4 \text{ cm}^2$ ห้องทดลองมีขนาด $50 \times 50 \times 100 \text{ cm}^3$ และขนาดปากทางเข้าเท่ากับขนาดปากทางออก contraction ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการวัดอุณหภูมิ 	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาถึงผลของช่องเปิดท้ายห้องระบายอากาศต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในห้องระบายอากาศ ความเร็วที่ทางเข้าห้องทดลองเท่ากับ 4.4 เมตรต่อวินาทีคิดเป็นค่าเรย์โนลด์สประมาณ 8800 อนุภาคนิวเคลียสที่ทางเข้าห้องทดลองมีค่าในช่วง $69-74 \text{ }^\circ\text{C}$ ตลอดทุกการทดลอง ใช้ $C_T = (T - T_R) / (T_I - T_R)$ เป็นพารามิเตอร์ในการบ่งบอกถึงการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส 	<ul style="list-style-type: none"> ในกรณีความเร็วปล่อยอากาศเข้ามีค่าสูงการเปลี่ยนขนาดช่องเปิดท้ายห้องจะมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในห้องทดลองอย่างชัดเจนก็ต่อเมื่อมีการปิดท้ายห้องทดลองในช่วงประมาณเท่ากับความหนาของ Jet (δ) ซึ่งวัดที่ท้ายห้องทดลองแต่เมื่อปิดท้ายห้องทดลองเกิน δ แล้วลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก
6	Stitsuwongkul and Bunyajitradulya (2000), Stitsuwongkul (2001)	<ul style="list-style-type: none"> ใช้อุโมงค์ลมซึ่งประกอบด้วยพัดลม, Heating chamber, Settling chamber และ Contraction ที่มีอัตราส่วนพื้นที่เท่ากับ 12.5 มีขนาดปากทางออกเท่า $50 \times 4 \text{ cm}^2$ ห้องทดลองมีขนาด $50 \times 50 \times 100 \text{ cm}^3$ และขนาดปากทางเข้าเท่ากับขนาดปากทางออก Contraction คือ $50 \times 4 \text{ cm}^2$ ใช้ Lobed Nozzle 8 ตัว ได้แก่ L240, L241, 	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาถึงผลของการใช้ Lobed Nozzle ร่วมกับผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องเปิดท้ายห้อง ศึกษาถึงผลของความเร็วอากาศที่เข้าสู่ห้องทดลองร่วมกับผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องเปิดท้ายห้องในกรณีที่ไม่ใช้ Lobed Nozzle ความเร็วที่ทางเข้าห้องทดลองเป็น 	<ul style="list-style-type: none"> Lobed Nozzle จะมีผลต่ออนุภาคนิวเคลียสถ้าขนาดช่องเปิดมีค่ามาก คือ $v/H > 0.24$ ส่วนในช่วง $v/H \leq 0.24$ นั้น Lobed Nozzle จะมีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสมากในส่วนด้านล่างของห้องทดลอง Lobed Nozzle L240 ทำให้อนุภาคนิวเคลียสภายในห้องทดลองด้านล่างมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดใน Series L24X และ L224 ทำให้อนุภาคนิวเคลียสสูงสุดใน Series L22X เมื่อเปรียบเทียบกับ L240 และ L224

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		<p>L242, L244, L220, L221, L222, L224 โดยพารามิเตอร์ต่างๆของ Lobe มีความสัมพันธ์กับขนาดความสูงของทางเข้าห้องทดลอง</p> <ul style="list-style-type: none"> ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการวัดอุณหภูมิช่องเปิดท้ายห้องทดลองใช้ 6 ค่า ได้แก่ 12.5, 10.5, 8.5, 6.25, 3.0, 1.0 cm 		<p>0.5 และ 4.4 m/s หรือคิดเป็นค่าเรย์โนลด์ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงของทางเข้าห้องทดลองประมาณ 1300 และ 8800 ตามลำดับ</p> <ul style="list-style-type: none"> ทุกกรณีการทดลองอุณหภูมิ Jet มีค่าอยู่ในช่วง 65-71 °C ส่วนอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าอยู่ในช่วง 28-32 °C ใช้ $C_T = (T - T_{ref}) / (T_J - T_{ref})$ ในการบ่งบอกถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิ ใช้ $C_p = (p - p_{ref}) / q$ ในการบ่งบอกความดัน static ที่สูญเสียที่เกิดขึ้น 	<p>แล้วได้ว่า L224 ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด</p> <ul style="list-style-type: none"> ผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ทางเข้าห้องทดลองที่มีต่ออุณหภูมิเฉลี่ยในกรณีที่ไม่ใช้ Lobed Nozzle นั้นมีผลน้อยในบริเวณด้านบนห้องทดลองแต่มีผลอย่างมากบริเวณด้านล่างของห้องทดลองที่ขนาดช่องเปิดเดียวกัน ในกรณีความเร็วต่ำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงขึ้นกับช่วงการปิดผนังท้ายห้องตลอด ส่วนในกรณีความเร็วสูงนั้นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยขึ้นอยู่กับช่วงการปิดผนังท้ายห้องภายในการปิดไม่เกินขนาดความหนาของ Jet ซึ่งวัดที่ท้ายห้องเท่านั้น
7	Jones and Rogers (2000)	<ul style="list-style-type: none"> ชุดอุโมงค์น้ำและปากทางออกซึ่งสามารถปรับขนาดได้ (Nozzle) ใช้ Nozzle หน้าตัดวงกลม 3 แบบในการทดลอง ได้แก่ Nozzle พื้นฐานสำหรับใช้เป็นตัวอ้างอิง, Nozzle ที่ติด Delta Tab, และ Nozzle 5 ชุด ที่แต่ละชุดติด Half Delta Wing Vortex Generator อันเดียว โดยมุม attack เทียบกับทิศทางการไหลมีขนาดต่างๆกัน 5 ค่า คือ 15°, 30°, 45°, 60° และ 90° 	น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> ทำการทดลองที่ค่าเรย์โนลด์ (Re_d) เท่ากับ 125,000 ซึ่งคิดเป็นความเร็วที่ปากทางออกได้เท่ากับ 5 m/s ซึ่งที่ค่าเรย์โนลด์นี้นั้นการไหลแบบ Jet จะเป็นแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ 	<ul style="list-style-type: none"> Vortex Generator ที่ติดตั้งที่ปากทางออกของ Jet น้ำ ทั้ง 5 กรณี ซึ่งมีมุม attack ต่างๆกัน ได้แก่ 15°, 30°, 45°, 60° และ 90° นั้น ทั้ง 5 กรณีก่อให้เกิดบริเวณที่มีการไหลหมุนวนสวนทางกัน ส่วนความแข็งแรง, ทิศทาง และความสมมาตรของบริเวณการไหลหมุนวนสวนทางนี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมุม attack ของ Vortex Generator เพิ่มขึ้น มวลที่ถูกดึงเข้ามาสู่ Jet น้ำ เนื่องจากการติด

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		<ul style="list-style-type: none"> Nozzle ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 1 inch ส่วน Half Delta Wing Vortex Generator มีความสูง (h/D_i) เท่ากับ 0.20 และมุม sweep เป็น 60° สำหรับ Delta Tab นั้นมีแนวการวางตัวโดยเอียงไปทางด้านท้ายการไหล เป็นมุม 45° กับทิศทางการไหล ใช้ TSI Laser Doppler Velocimeter ในการวัดความเร็วการไหลของ Jet นี้ 			<p>Vortex Generators และ Delta Tab นั้นขึ้นอยู่กับทั้งความแข็งแรงของ vortices ลัพธ์ที่เกิดขึ้นที่มีแกนหมุนในแนวแกนการไหล และ ทิศทางการวางตัวของ vortices ที่หมุนสวนทาง</p> <ul style="list-style-type: none"> Vortex Generator และ Delta Tab ที่ก่อให้เกิดคู่ของ vortice ที่หมุนสวนทางที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า, กระจายตัวห่างกันมากกว่า รวมทั้งลักษณะการหมุนวนมีความสมมาตรนั้น จะให้ประสิทธิภาพในการดึงมวลเข้ามาผสมได้ดีกว่า Vortex Generator และ Delta Tab ที่ก่อให้เกิดคู่ของ vortices หมุนสวนทางกันที่มีความแข็งแรงมากกว่า,วางตัวใกล้กันมากกว่า ซึ่งจะมี primary และ secondary vortex อยู่ภายใน
8	Zaman and Raman (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ใช้ชุดทดลองแบบ Jet อีสระซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกของ Nozzle เท่ากับ 8.8 cm ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นการไหล ใช้ Pitot Probe และ Hot-Wire anemometer ในการวัดความเร็ว ติด delta-tab 2 ตัวให้ตั้งอยู่ตรงข้ามกันที่ 	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาลักษณะการไหลของ Jet แบบปั่นป่วนปากทางออกกลมที่มีการติด Tab และทำการกระตุ้นโดยใช้ระบบขับเคลื่อนส่ง Jet อากาศ ค่ามัธยของ Jet เป็น 0.22 ซึ่งคิดเป็นค่าเรย์ โนลด์ ที่ขึ้น อยู่กับ เส้นผ่านศูนย์กลาง Nozzle ได้เท่ากับ 450,000 ความเข้ม turbulence ที่กึ่งกลางปาก 	<ul style="list-style-type: none"> ผลของการกระตุ้นเหนี่ยวนำให้เกิดคู่ของการไหลหมุนวนใน Jet ที่ติด Tab นี้ การที่ Jet มีทั้งการติด tab และการกระตุ้นพร้อมกันทำให้อัตราการกระจายตัวของ Jet ลดลง ถึงแม้ว่าผลของการติด Tab อย่างเดียวหรือการกระตุ้นอย่างเดียวจะช่วยเพิ่มอัตราการกระจายตัวของ Jet ก็ตาม

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		ทางออกของ Nozzle		ทางออก Nozzle มีค่าประมาณ 2%	
9	Krothapalli et al.(1981)	<ul style="list-style-type: none"> เป็นการทดลองในอุโมงค์ลมที่มีหน้าตัดทางออกของ Nozzle เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 50×3 mm² (โดยมี Aspect Ratio เท่ากับ 16.7) ใช้ Hot-wire Anemometer วัดความเร็ว ทำการวัดความเร็วเฉลี่ยและ Turbulence shear stress 	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> ความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งทางออก Nozzle เท่ากับ 60 m/s ซึ่งคิดเป็นค่าเรย์โนลด์ที่ขึ้นกับความกว้างของปากทางออก Nozzle ได้เท่ากับ 1.2×10^4 ที่ตำแหน่งทางออกของ Nozzle มีระดับความเป็น turbulence ต่ำและที่ผนังมีชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ 	<ul style="list-style-type: none"> การไหลของ Jet ที่พุ่งออกจาก Nozzle ที่มีหน้าตัดทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ Potential core region, Two-dimensional type region และ Axisymmetric-type region Two-dimensional type region ซึ่งถือว่าการไหลภายในบริเวณนี้เป็นแบบ 2 มิติและความเร็วจะลดลงในอัตราที่คล้ายกับ Planar jet จะเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ตำแหน่งที่ Shear layer ซึ่งแยกตัวออกจากขอบด้านยาวของ Nozzle ทั้ง 2 ด้านมาบรรจบกัน Axisymmetric-type region ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ต่อจาก Two-dimensional type region และความเร็วของการไหลภายในบริเวณนี้จะลดลงในอัตราที่คล้ายกับ Axisymmetric jet นั้นจะเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ตำแหน่งที่ Shear layer ซึ่งแยกตัวออกจากขอบด้านสั้นของ Nozzle ทั้ง 2 ด้านมาบรรจบกัน
10	Hitchman et al. (1990)	<ul style="list-style-type: none"> ใช้ชุดอุโมงค์ลมและ 2D-Contraction ปากทางออกของ Contraction เป็นแบบ Slot 	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของ Plane Jet ที่ฉีดออกมาจากผนังซึ่งวางตัวใน 	<ul style="list-style-type: none"> ที่ Aspect Ratio เดียวกันอัตราการลดลงของความเร็วทั้งในกรณี Jet แบบอิสระและ Jet แบบ

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		<p>ขนาดความยาว 600 mm และ ความสูง 10 mm</p> <ul style="list-style-type: none"> วัดความเร็วเฉลี่ยโดยใช้ Pitot Tube และ Hot-Wire Anemometer 		<p>แนวระดับทั้งแบบที่มีผนังด้านข้าง และ ไม่มีผนังด้านข้าง</p> <ul style="list-style-type: none"> ลักษณะการไหลเป็นแบบ Plane Jet ความเข้ม turbulence ที่ปากทางออก มีค่าต่ำ คือ เท่ากับ 0.008 Boundary Layer ของผนังที่ปากทางออก Jet เป็นแบบราบเรียบ 	<p>มีผนังด้านข้างสองข้างนั้นต่างก็ลดลงหาก Aspect Ratio เพิ่มขึ้น</p> <ul style="list-style-type: none"> อัตราการโตของ Jet แบบมีขอบเขตนั้นมีความผันผวนน้อยกว่าอัตราการโตของ Jet แบบอิสระ อัตราการโตเฉลี่ยของ Jet แบบมีขอบเขตนั้นน้อยกว่าของ Jet แบบอิสระ ที่ Aspect Ratio ค่าหนึ่งๆนั้น Jet แบบอิสระนั้นมีความไวต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมมากกว่าและมีบริเวณที่มีการไหลแบบ 2 มิติน้อยกว่า Jet แบบมีขอบเขต ที่ Aspect Ratio หนึ่งๆนั้นการที่มีผนังด้านข้างทั้งสองนั้นมีผลให้อัตราการลดลงของความเร็วรวมทั้งการไม่มีขอบเขตของโมเมนตัมฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากและยังไม่แน่ว่าจะมีการอนุรักษ์โมเมนตัมหรือไม่
11	Marsters (1980)	<ul style="list-style-type: none"> ใช้ sharp-edged orifice Nozzle หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า 4 ตัว โดยแต่ละตัวมีค่า Aspect Ratio ต่างๆกัน ได้แก่ AR= 3.39, 6.44, 9.07, และ 11.88 ความสูงของทางออก Nozzle มีขนาดระบุประมาณ 12.7 mm 	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> ความเร็วที่ปากทางออก Nozzle ประมาณ 60 m/s ซึ่งคิดเป็นค่าเรย์โนลด์ที่ขึ้นอยู่กับขนาดความสูงของ Nozzle ประมาณ 50000 รูปร่างการกระจายตัวของความเร็วที่ทางออก Nozzle มีลักษณะ flat 	<ul style="list-style-type: none"> ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วที่ตำแหน่งหน้าตัดต่างๆ ไปทางด้านท้ายการไหลนั้นมีลักษณะเป็น “อานม้า” (Saddle-Backed) แต่ยังไม่สามารถทราบได้ว่ากลไกใดที่ทำให้เกิดลักษณะแบบ “อานม้า” นี้ บริเวณใกล้ขอบ Jet นั้น ความเข้มของ

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		<ul style="list-style-type: none"> ใช้ Hot-Wire Anemometer ในการวัดความเร็วอากาศ ใช้ digital signal analyzer และ digital collector ในการหา autocorrelations และ cross-correlations 		<ul style="list-style-type: none"> ระดับความเป็น turbulence มีค่าประมาณน้อยกว่า 0.6% ละทิ้งความสามารถในการอัดตัว 	turbulence มีค่าเพิ่มขึ้นมากเนื่องจาก shear layers ทั้ง 4 ด้านของ Jet มีการบดบังกัน
12	Belovich and Samimy (1996)	<ul style="list-style-type: none"> เป็นการไหลใน Coaxial Jet ที่มี Inner Jet เป็นแบบ Lobed-Mixer Nozzle ซึ่งมี Ramp Angle = 20° โดยมีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 450 mm² Contraction มี Area Ratio = 7.44:1 โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางขาออก = 63.5 mm ใช้ LDV ในการวัดความเร็ว ใช้ Tobacco Smoke ในการทำ Flow Visualization 	อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> ทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็วภายในต่อภายนอก 3 ค่า ได้แก่ 3:1, 1:1 และ 1:3 	<ul style="list-style-type: none"> การผสมผสานจะดีขึ้นเมื่อมีการหมุนวนตามทิศทางการไหลและ Large-Scale Structure อันเกิดจากความไม่เสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz ของการไหลเพิ่มขึ้น กรณีอัตราส่วนความเร็วภายใน:ภายนอกเป็น 3:1 พบว่าการผสมผสานจะเกิดจากอิทธิพลของการหมุนวนตามทิศทางการไหลและความไม่เสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz กรณีอัตราส่วนความเร็วภายใน:ภายนอกเป็น 1:1 พบว่าการผสมผสานจะเกิดจากอิทธิพลของการหมุนวนตามทิศทางการไหลเพียงอย่างเดียว กรณีอัตราส่วนความเร็วภายใน:ภายนอกเป็น 1:3 พบว่าการผสมผสานจะเกิดจากอิทธิพลของการไหลของ Jet ด้านนอกและอิทธิพลของ Ambient Air
13	Ritchie and Seitzman (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ใช้ planar laser-induced fluorescence โดยการ seed acetone ไปที่ Jet ชี้นอกตามแนวการไหล 	ก๊าซเชื้อเพลิง	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาการใช้ตัวควบคุม Jet หน้าตัดกลมที่มีมวลสุทธิเป็นศูนย์ (zero net- 	<ul style="list-style-type: none"> การใช้ Active flow control ด้วยวิธีมวลสุทธิเป็นศูนย์จะทำให้การดึงมวลเข้ามาผสมและการผสม

ตารางที่ 1 (ต่อ)

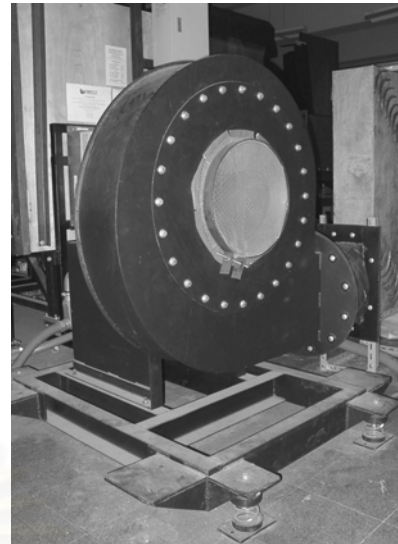
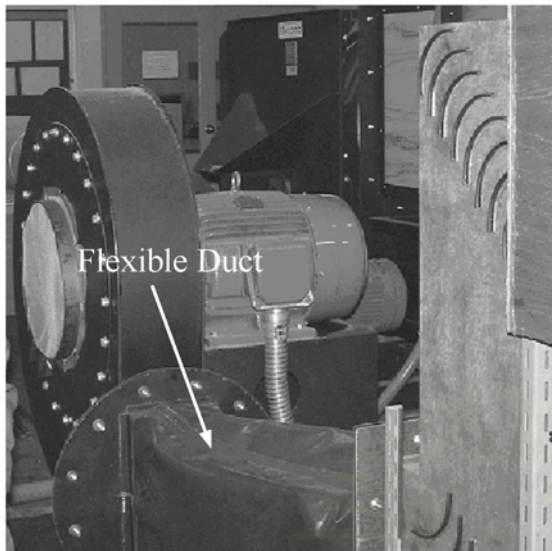
ลำดับที่	ผู้วิจัย	รายละเอียดของชุดทดลอง	ของไหล	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้จากงานวิจัย
		เพื่อคุณภาพการผสม	และ อากาศ ผสมกัน	mass-flux actuators) ในการควบคุม การผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศ สภาพเป็นก๊าซ	ของ Jet ดีขึ้นซึ่งสังเกตได้จากความเข้มข้นของ acetone ลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประมวรูปภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



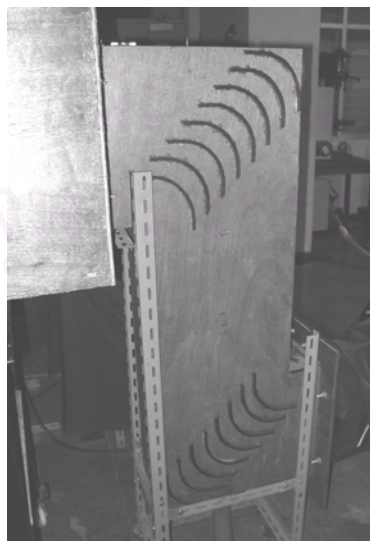
รูปที่ 2.1 พัดลม และ Flexible duct



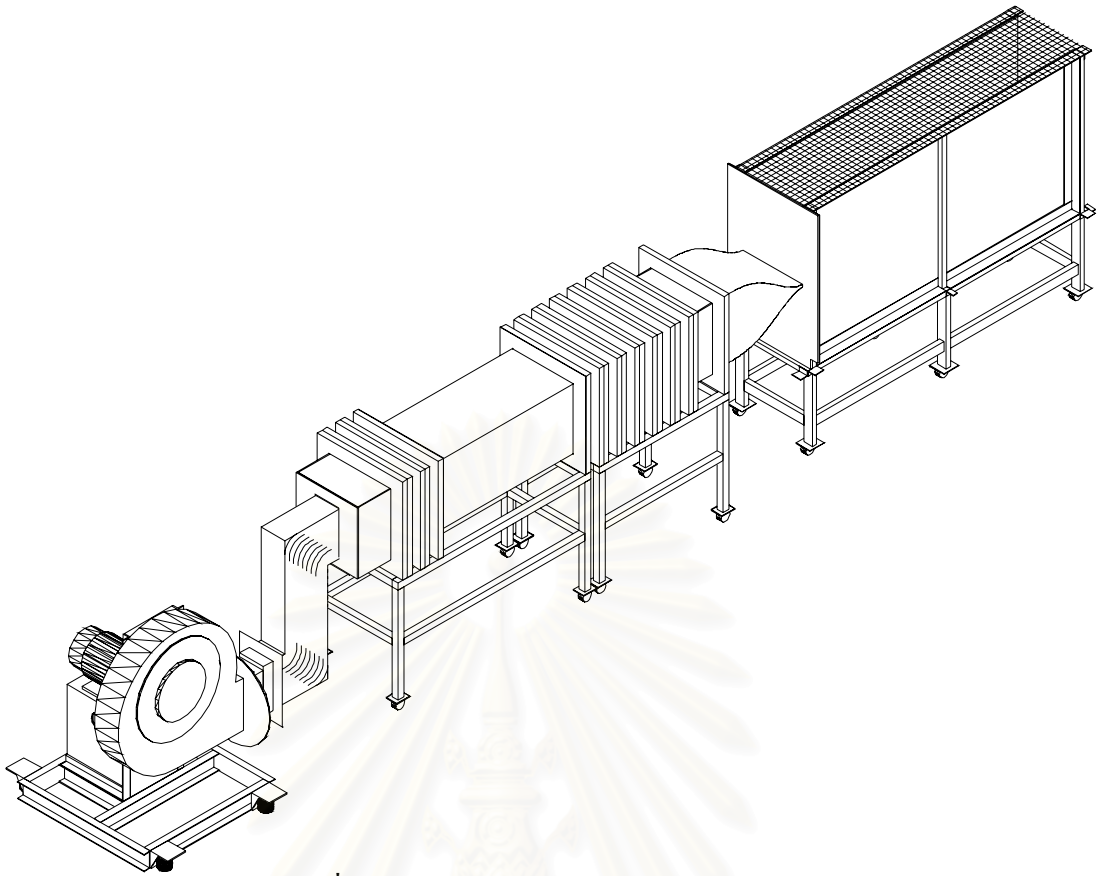
รูปที่ 2.2 Inverter



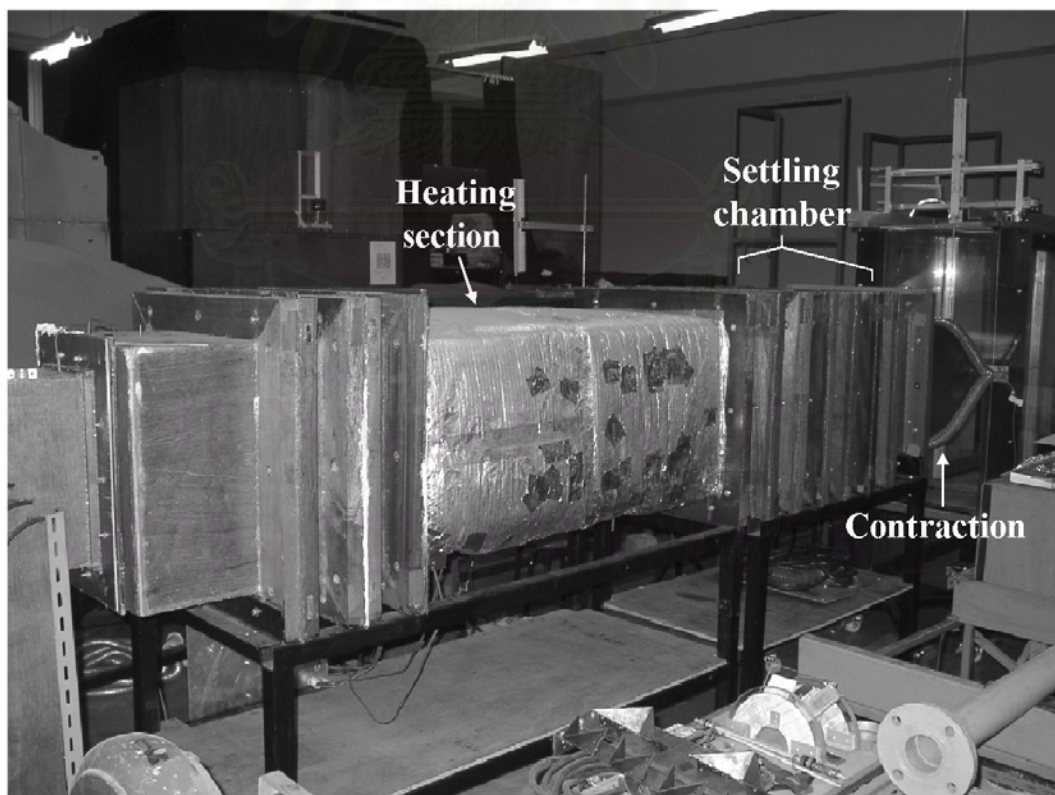
รูปที่ 2.3 Orifice plate



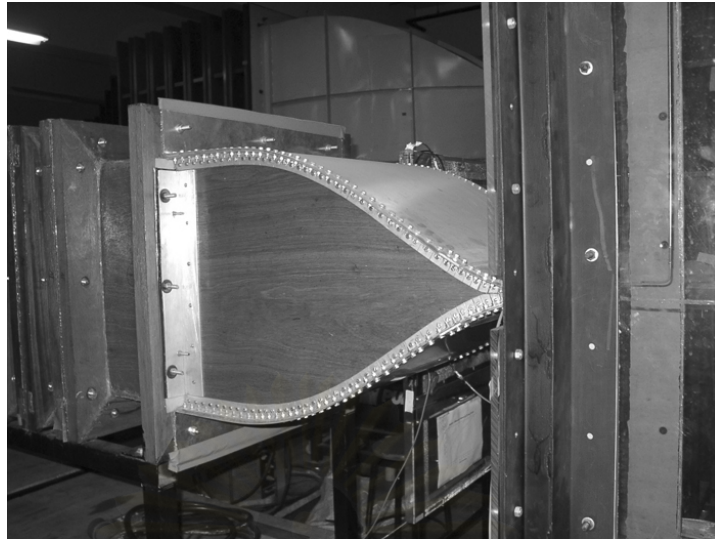
รูปที่ 2.4 Guide vane



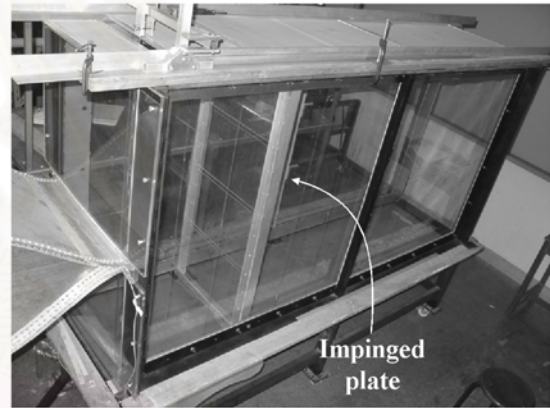
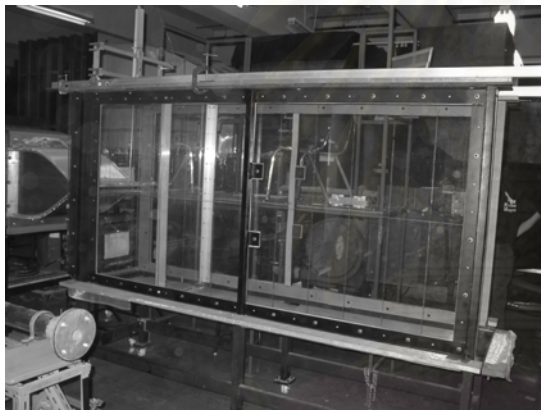
รูปที่ 2.5 Schematic drawing แสดงอุโมงค์ลม



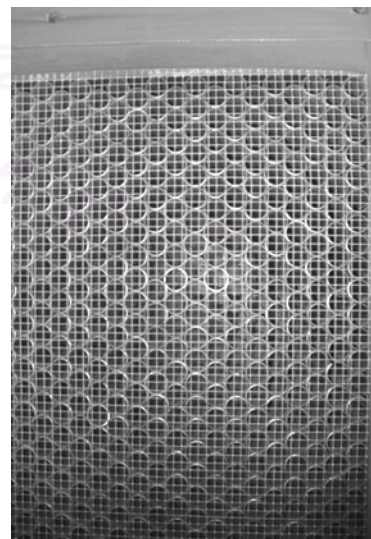
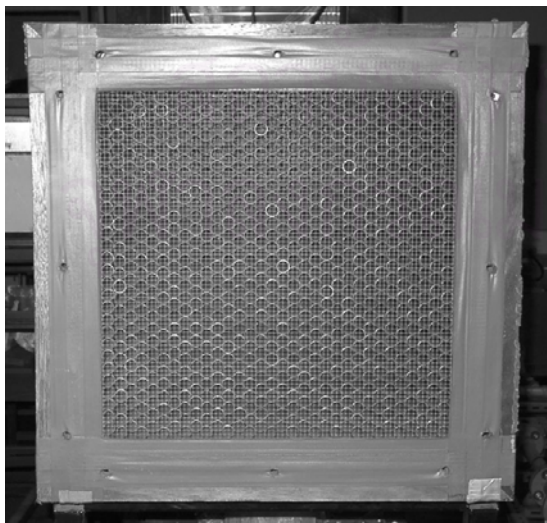
รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายอุโมงค์ลม



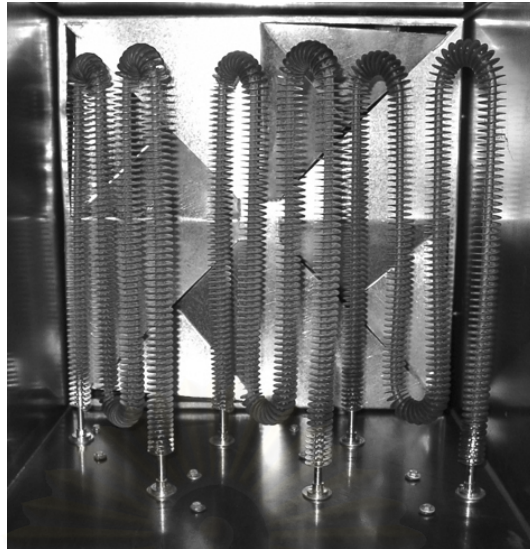
รูปที่ 2.7 Contraction แบบสองมิติ



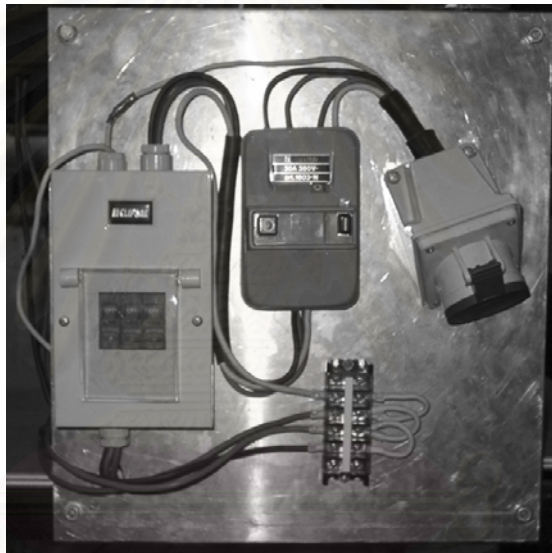
รูปที่ 2.8 ส่วนทดลอง (Test section)



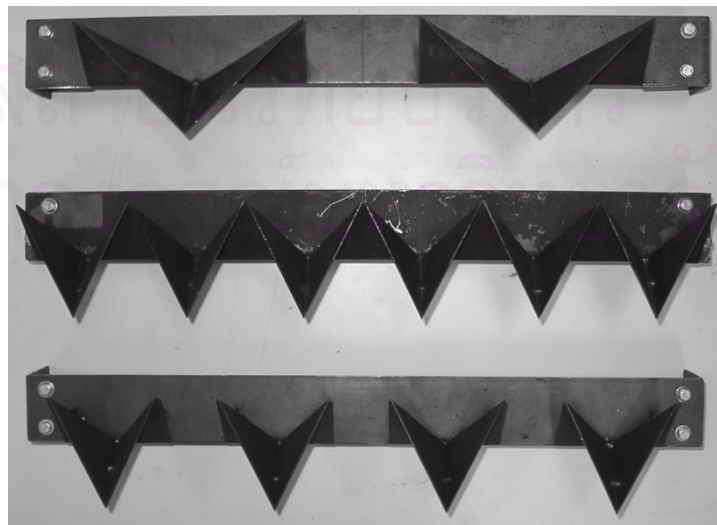
รูปที่ 2.9 Honeycomb



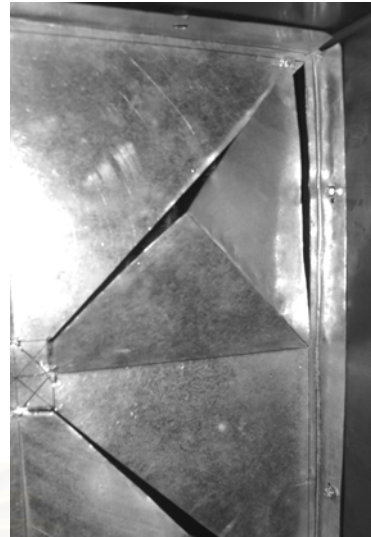
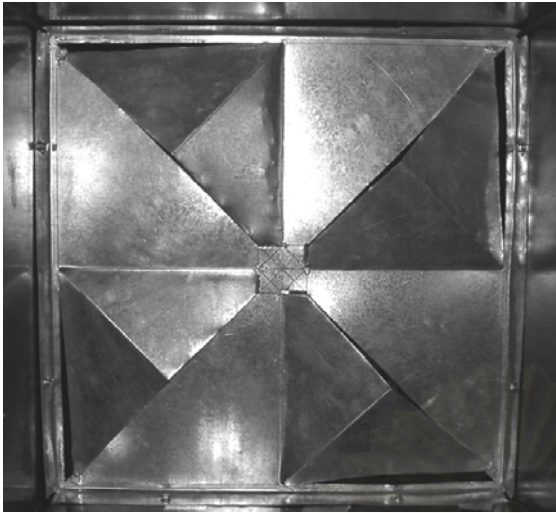
รูปที่ 2.10 Heater “W” Form แบบมีครีป



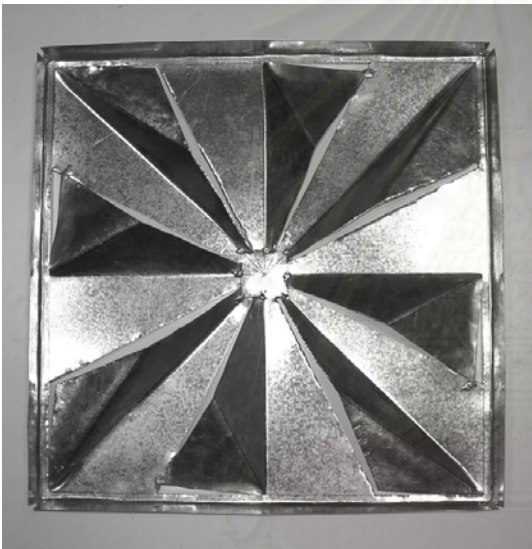
รูปที่ 2.11 แผงวงจรควบคุม Heaters



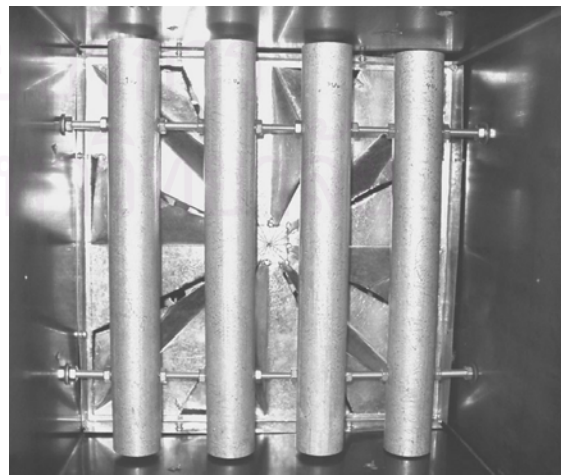
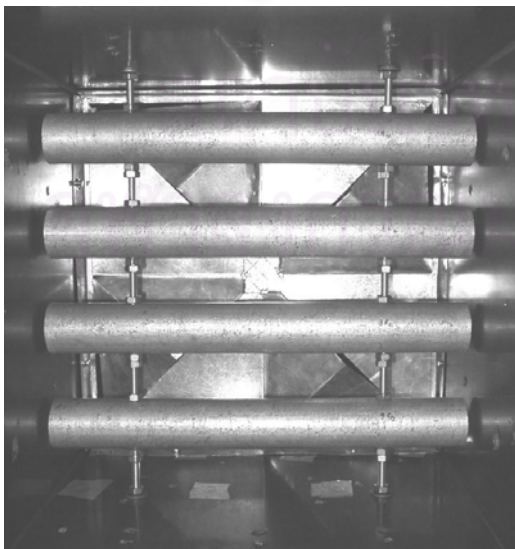
รูปที่ 2.12 Lobe จากงานวิจัยของ Stitsuwongkul, T. (2000)



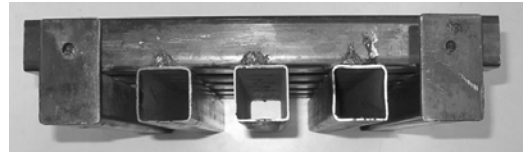
รูปที่ 2.13 ใบพัดแบบสี่ใบ



รูปที่ 2.14 ใบพัดแบบแปดใบ



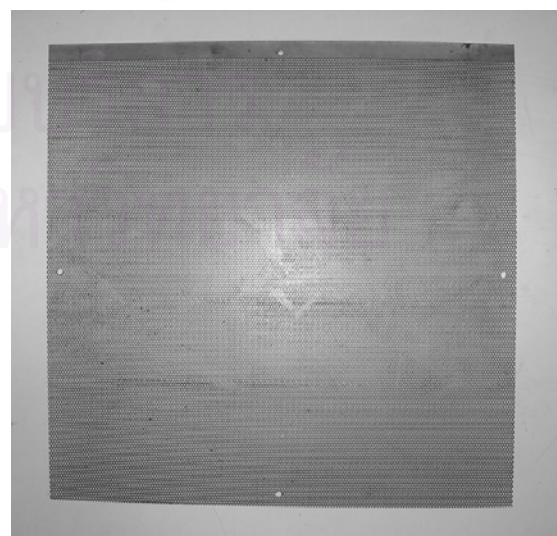
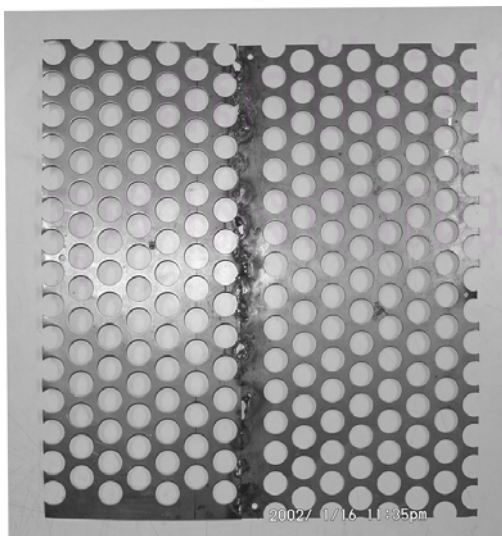
รูปที่ 2.15 ท่อทรงกระบอกแนวนอนและแนวตั้ง



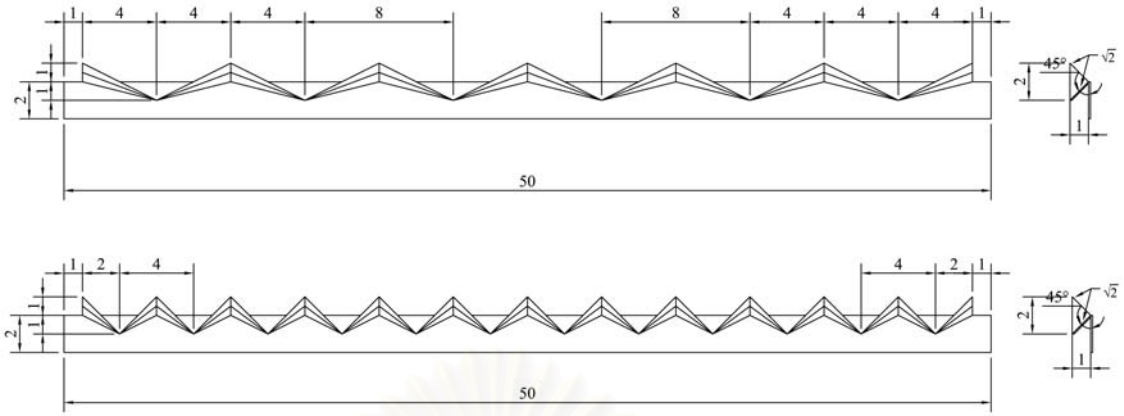
รูปที่ 2.16 กริดเหล็กหน้ากว้าง 2 นิ้ว



รูปที่ 2.17 กริดเหล็กหน้ากว้าง 1½ นิ้ว

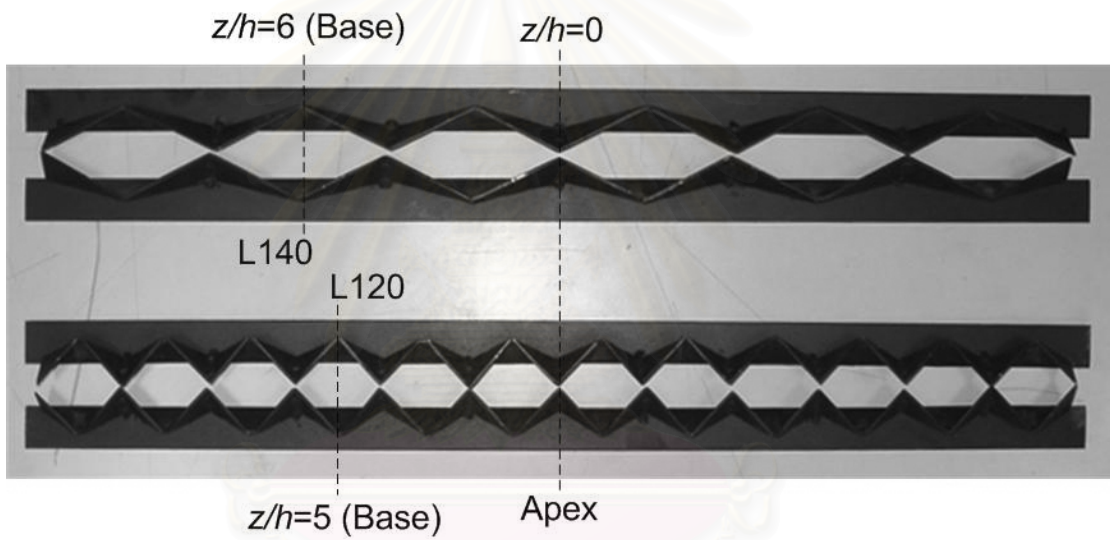


รูปที่ 2.18 ตะแกรงเหล็กเจาะรูขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

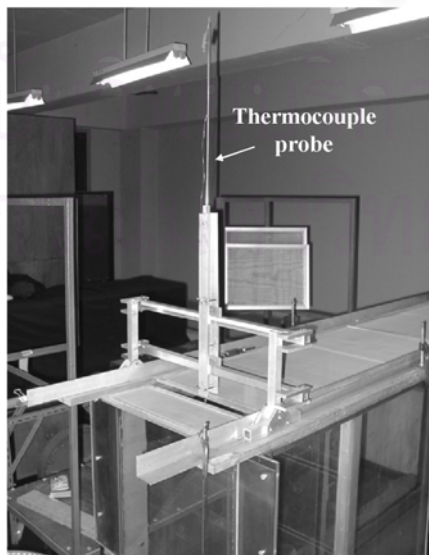


All dimensions are in cm.

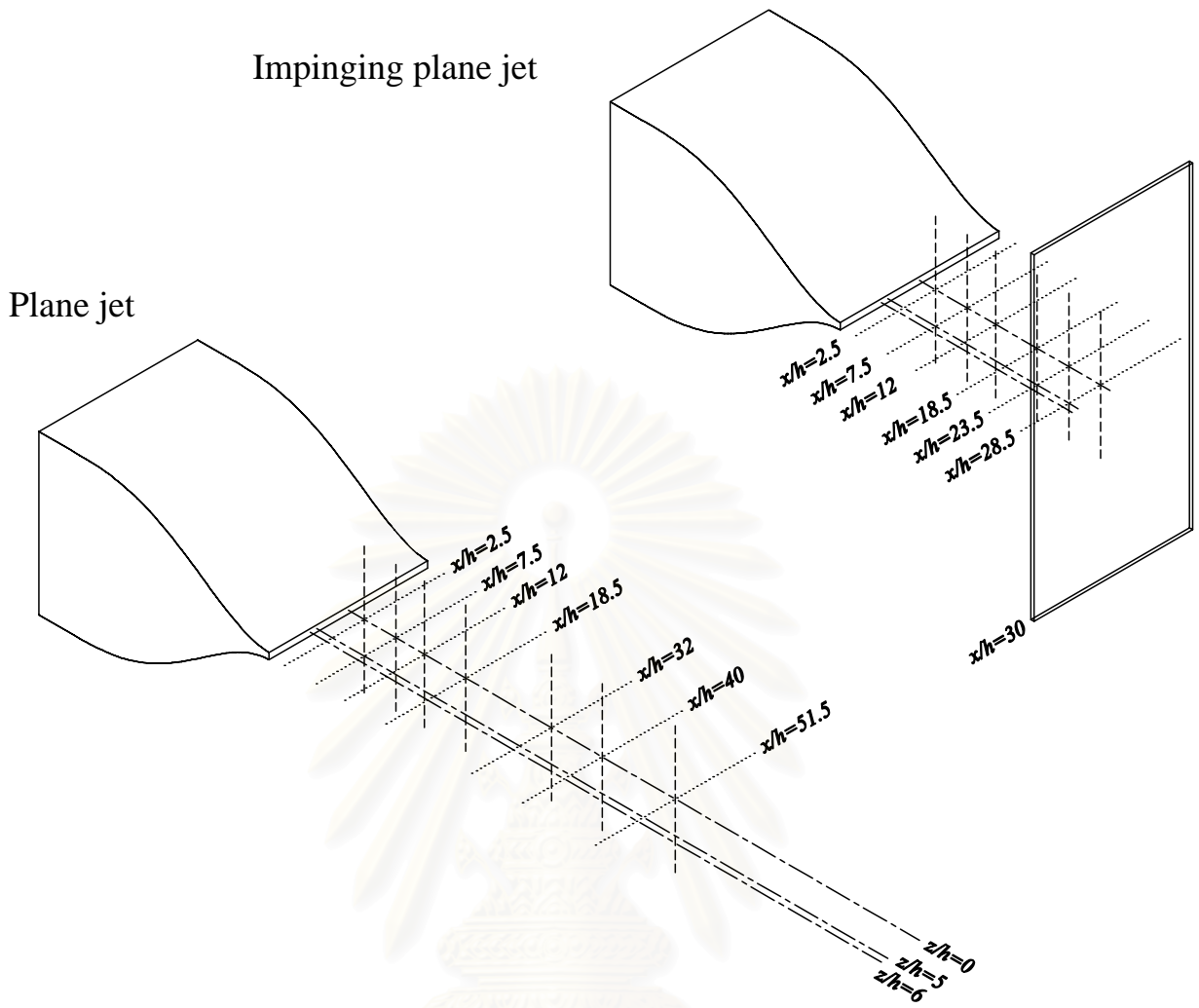
รูปที่ 2.19 Schematic drawing แสดง Lobe



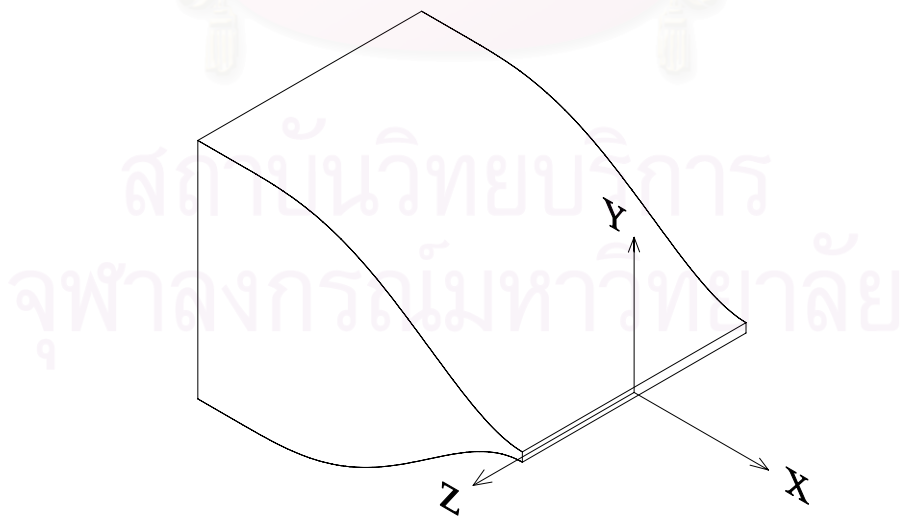
รูปที่ 2.20 Lobe L120 และ L140



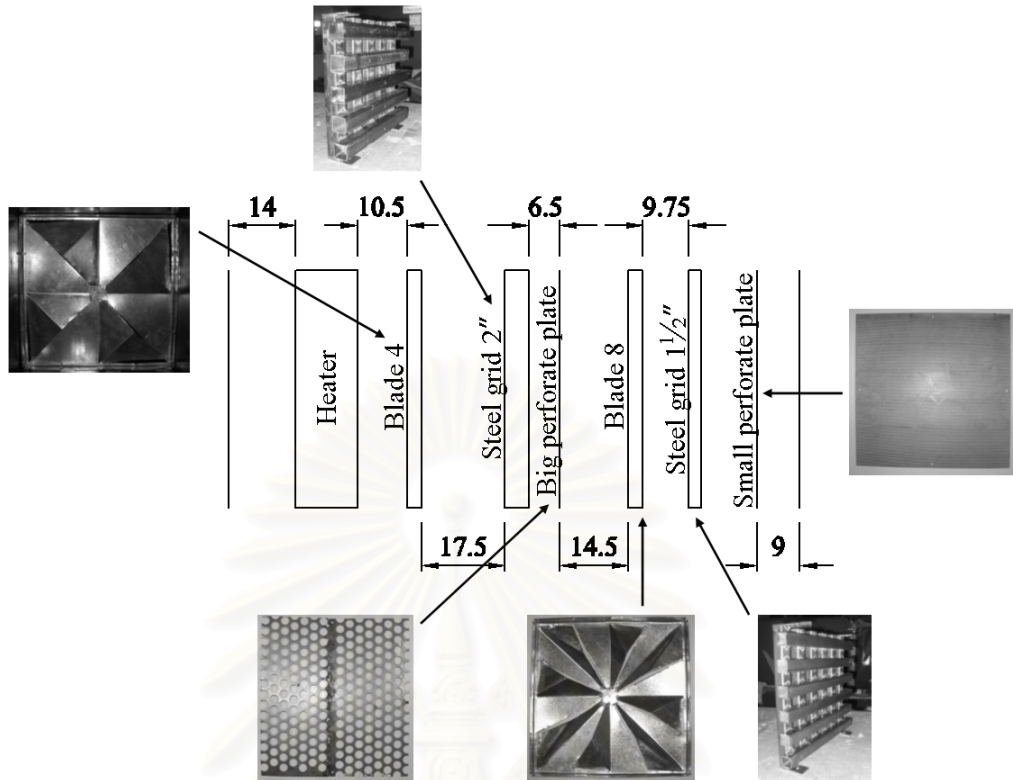
รูปที่ 2.21 Thermocouple probe สำหรับวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2



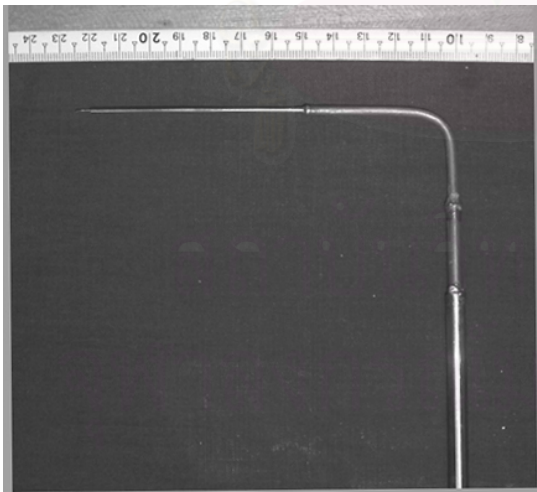
รูปที่ 2.22 แนวการวัดอุณหภูมิของการไหลแบบเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบวิ่งชนผนัง



รูปที่ 2.23 พิกัดแกนอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.24 การจัดวางตัวของอุปกรณ์ต่างๆภายในห้องทำความร้อน (Heating chamber)



รูปที่ 2.25 Thermocouple probe แบบ A



รูปที่ 2.26 Pitot probe



รูปที่ 2.27 อุปกรณ์สำหรับการเปรียบเทียบ Thermocouple วัดอุณหภูมิ



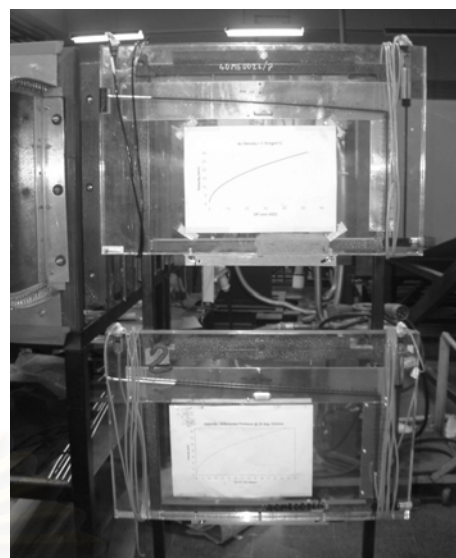
รูปที่ 2.28 Immersion circulator



รูปที่ 2.29 Water bath

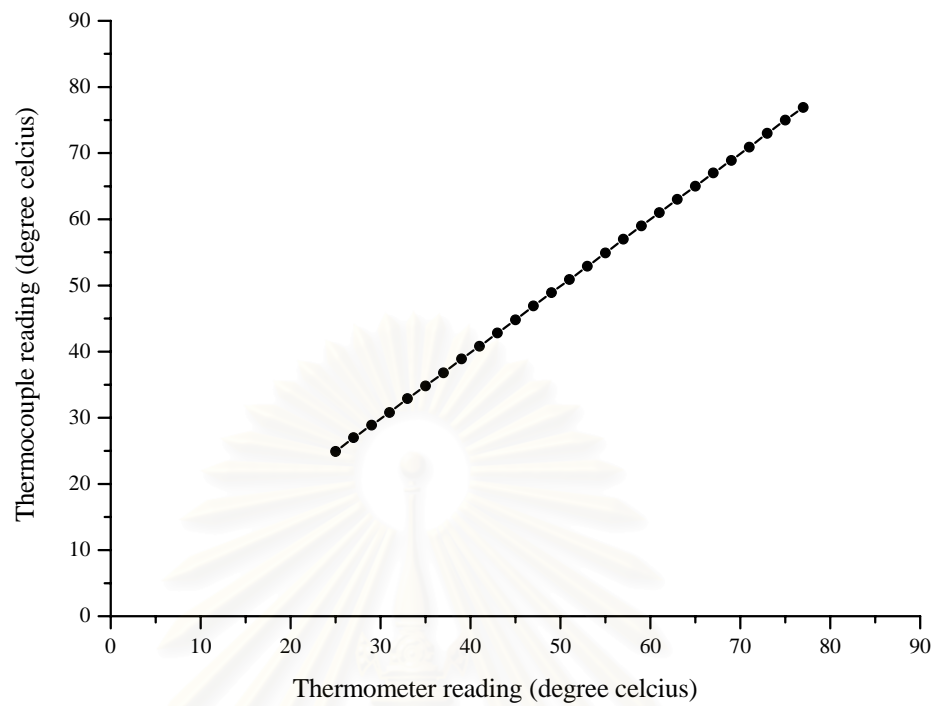


รูปที่ 2.30 Thermocouple thermometer

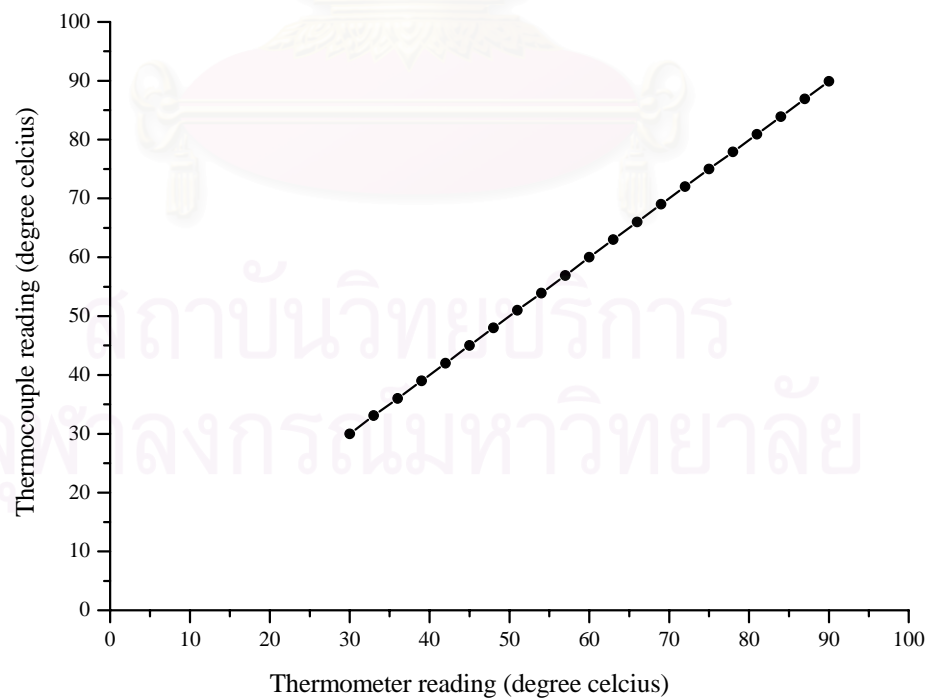


รูปที่ 2.31 Inclined manometers

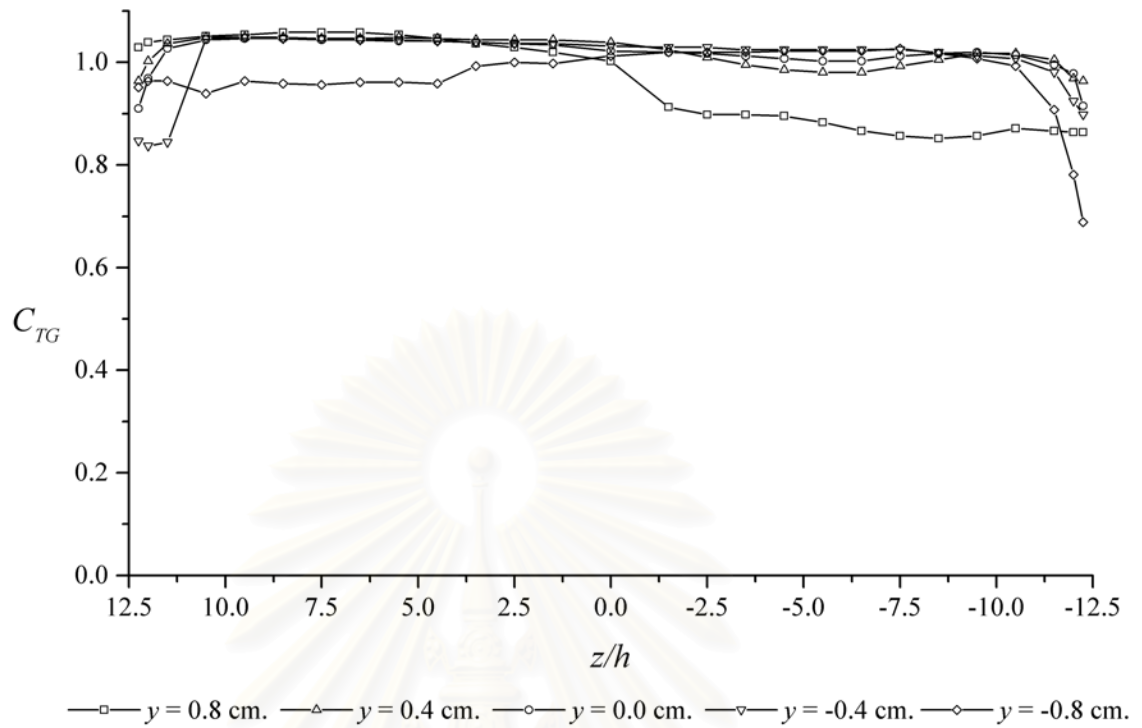
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



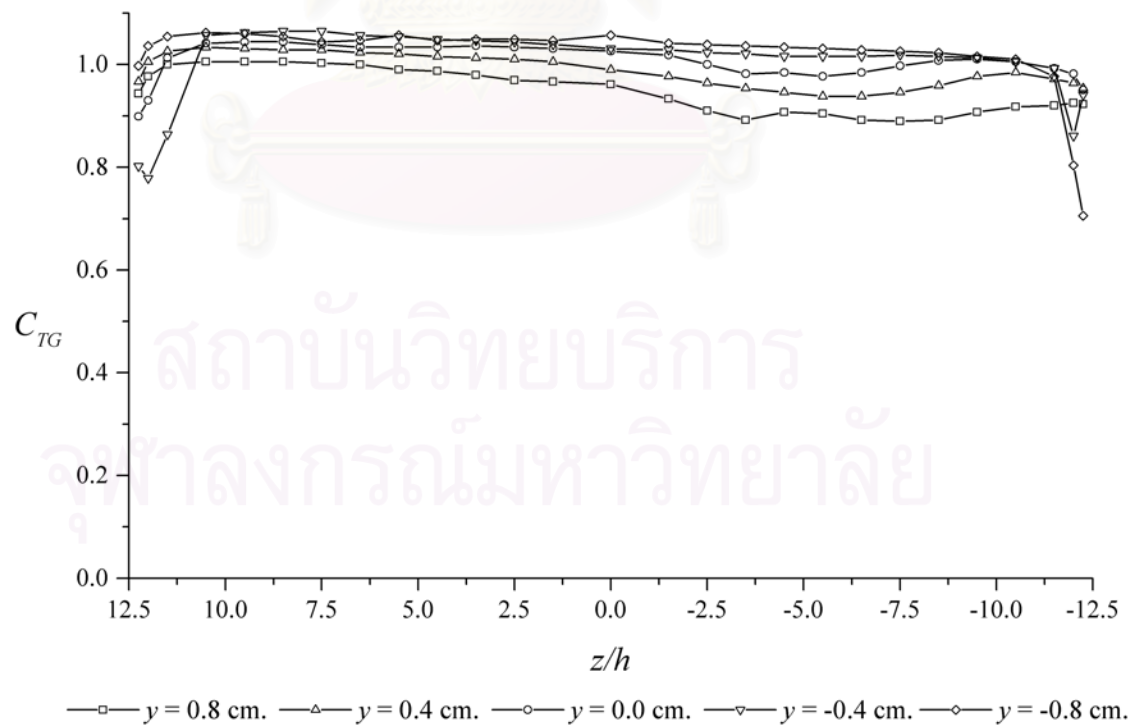
รูปที่ 2.32 ผลการปรับเทียบระบบเครื่องมือวัดอุณหภูมิสำหรับ Thermocouple probe แบบ A



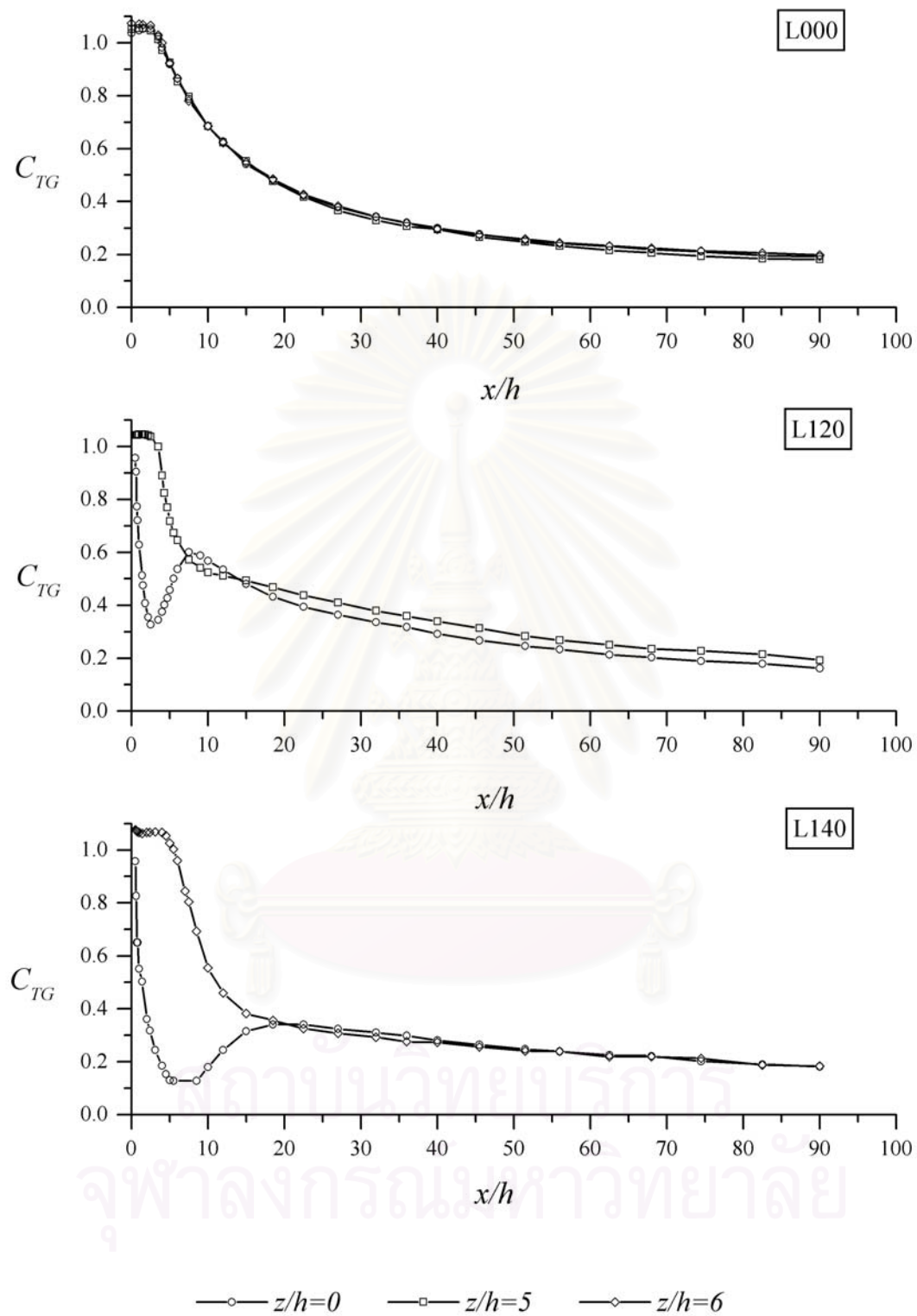
รูปที่ 2.33 ผลการปรับเทียบระบบเครื่องมือวัดอุณหภูมิสำหรับ Thermocouple probe แบบ B



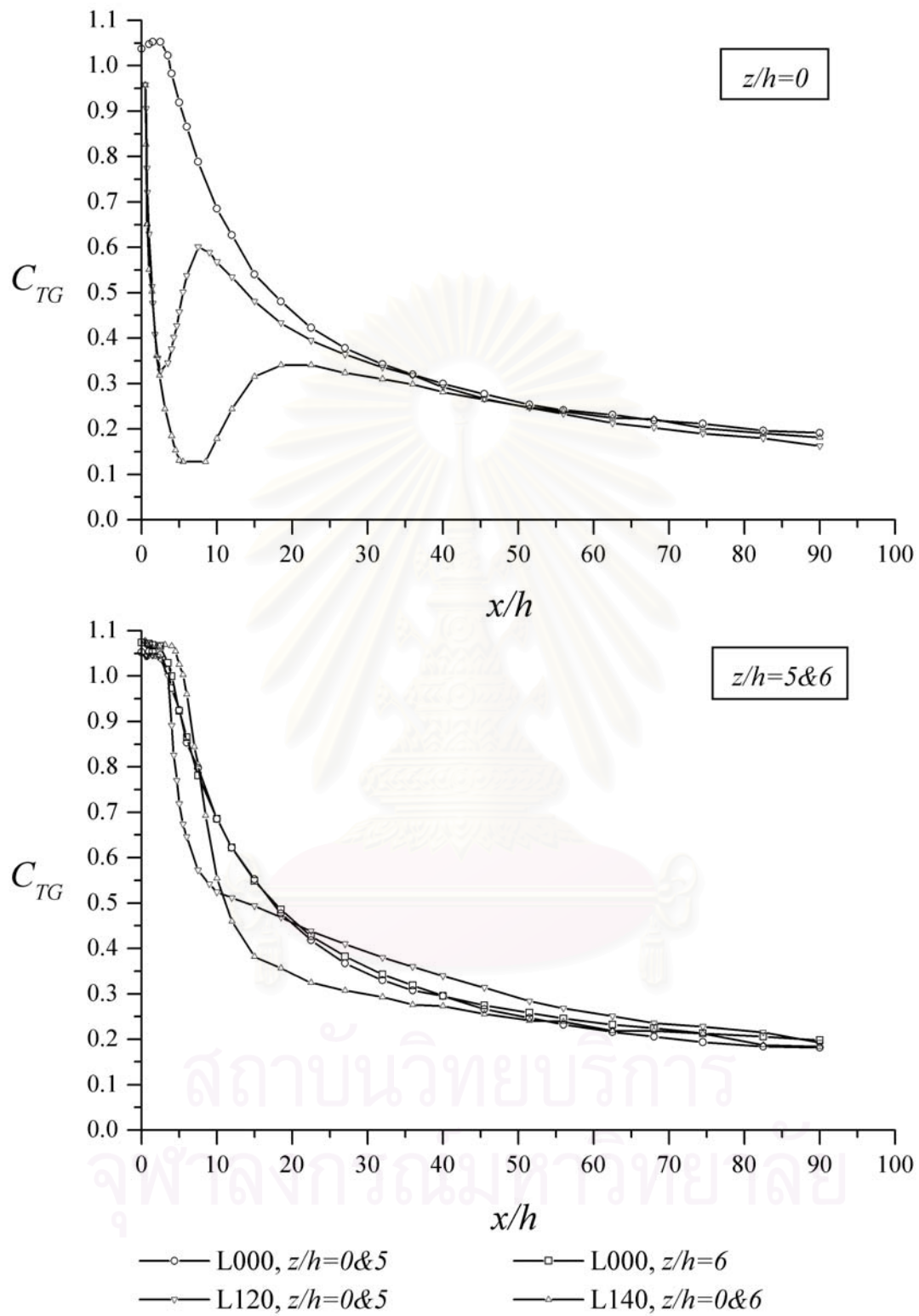
รูปที่ 2.34 สภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิบริเวณหน้าตัดทางออก جهتสำหรับกรไหลแบบเจ้กระนาบ



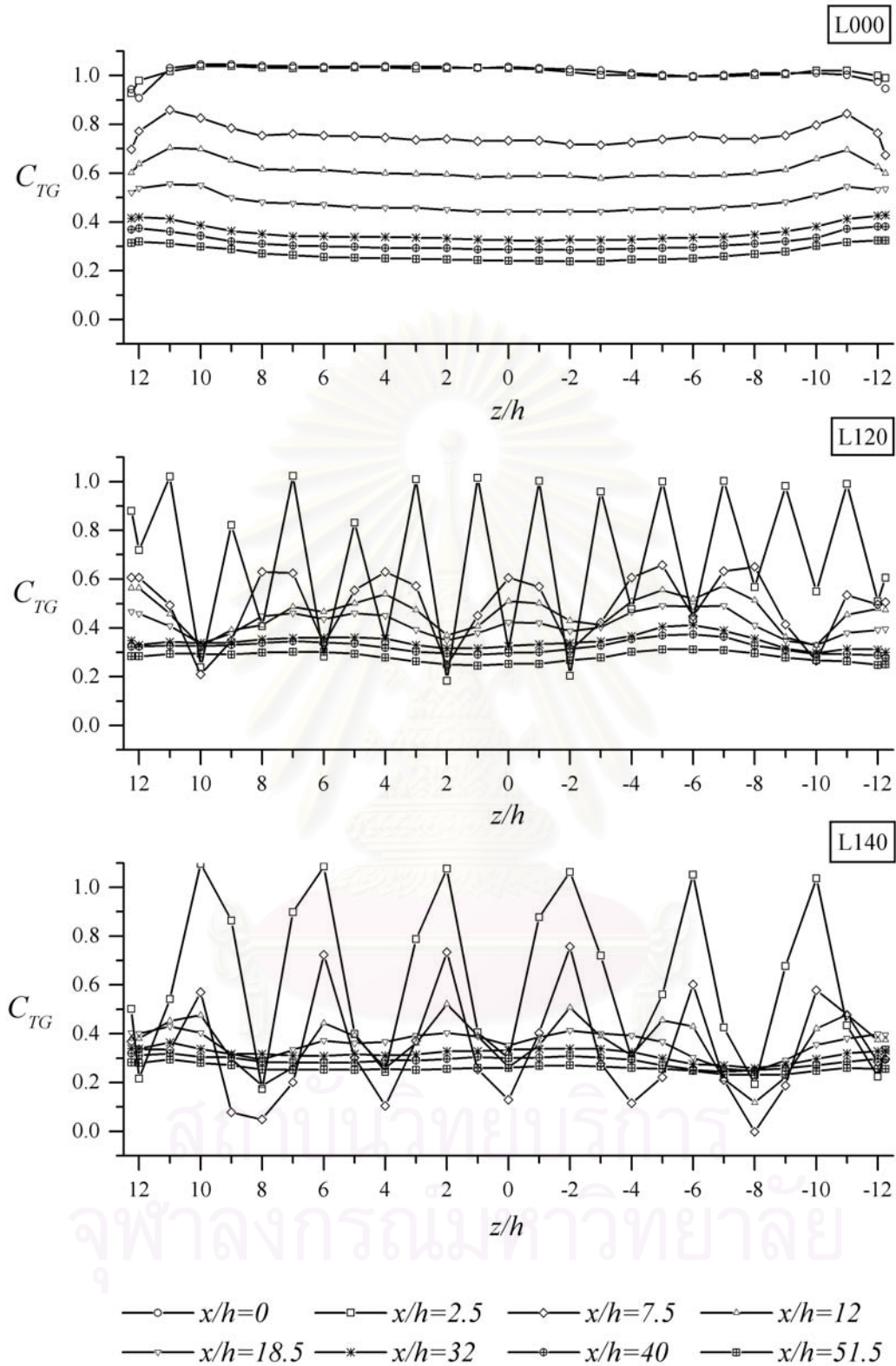
รูปที่ 2.35 สภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิบริเวณหน้าตัดทางออก جهتสำหรับกรไหลแบบเจ้กระนาบ
วิ้งชนผนัง



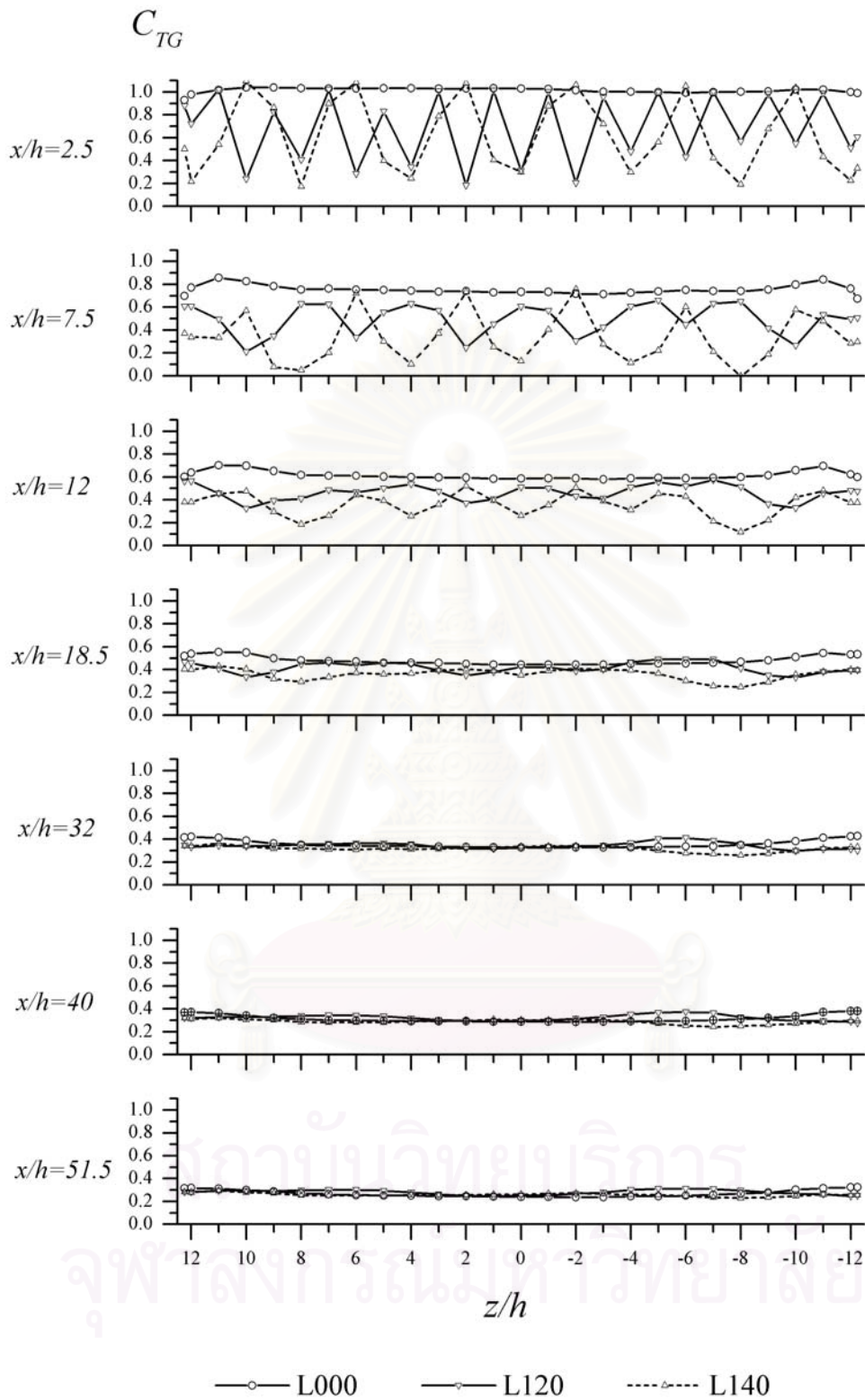
รูปที่ 3.1 การลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล
ที่ $y=0$



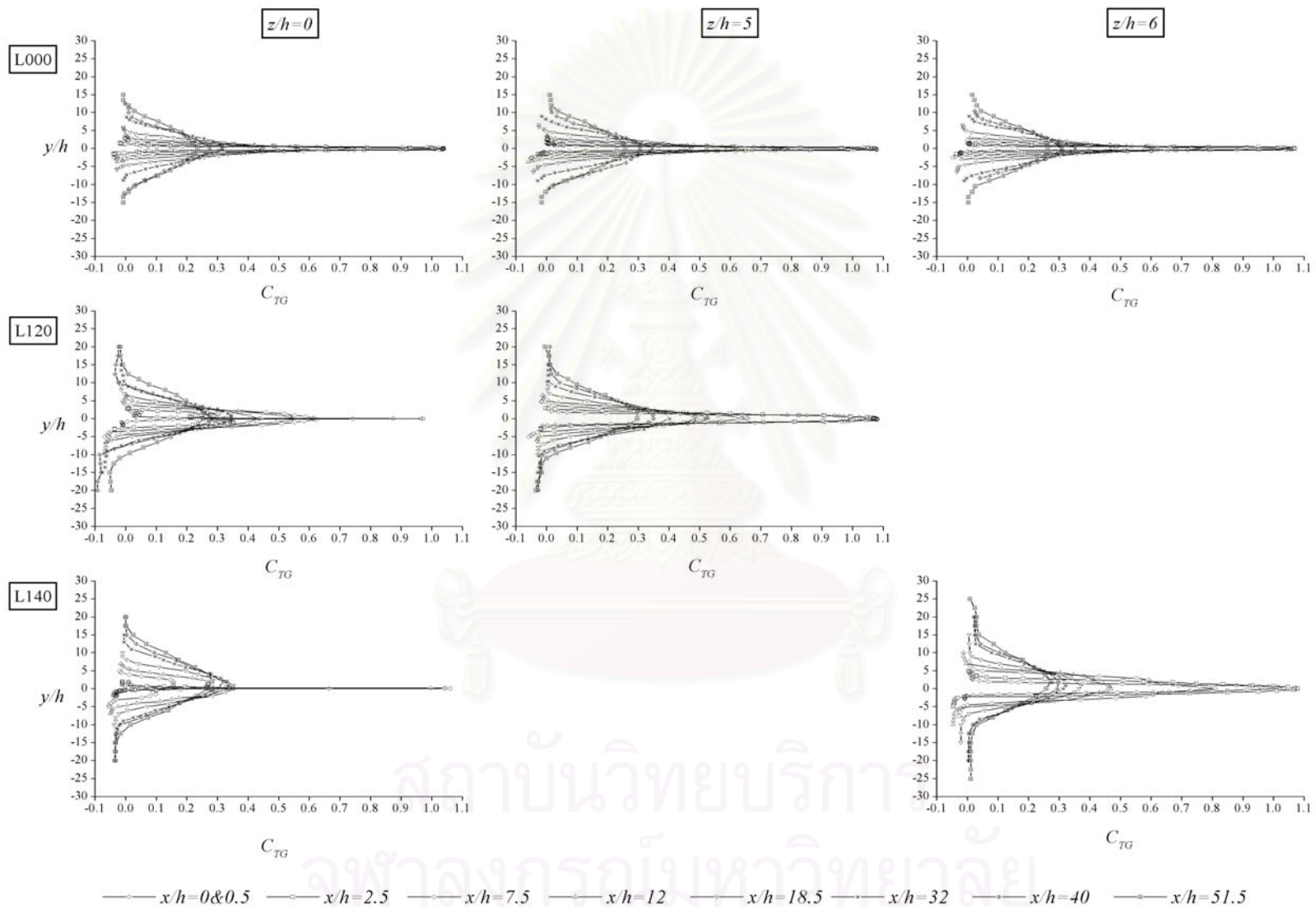
รูปที่ 3.2 การลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล
ที่ $y=0$



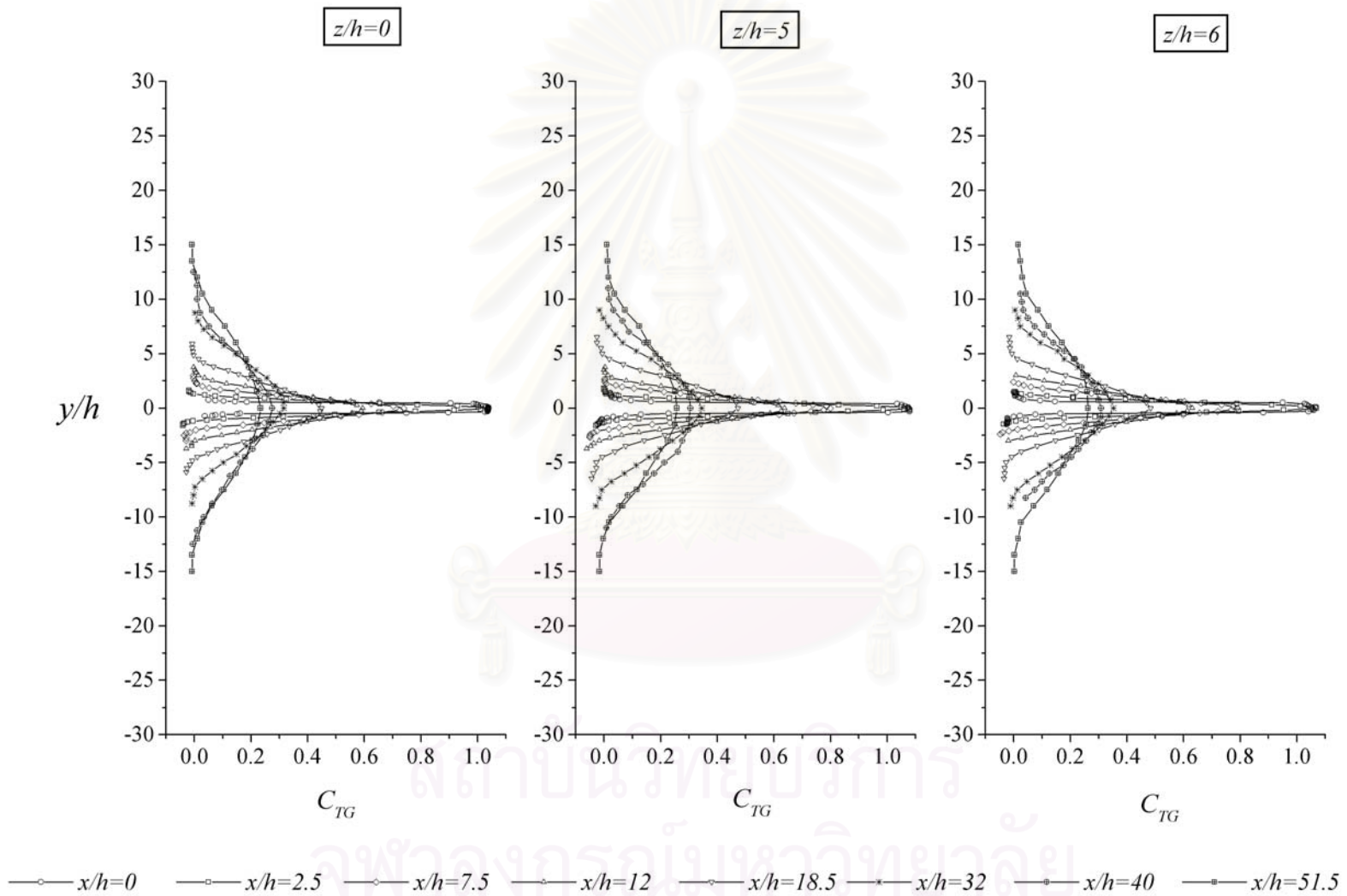
รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบตามแนวทางการไหลที่ $y=0$



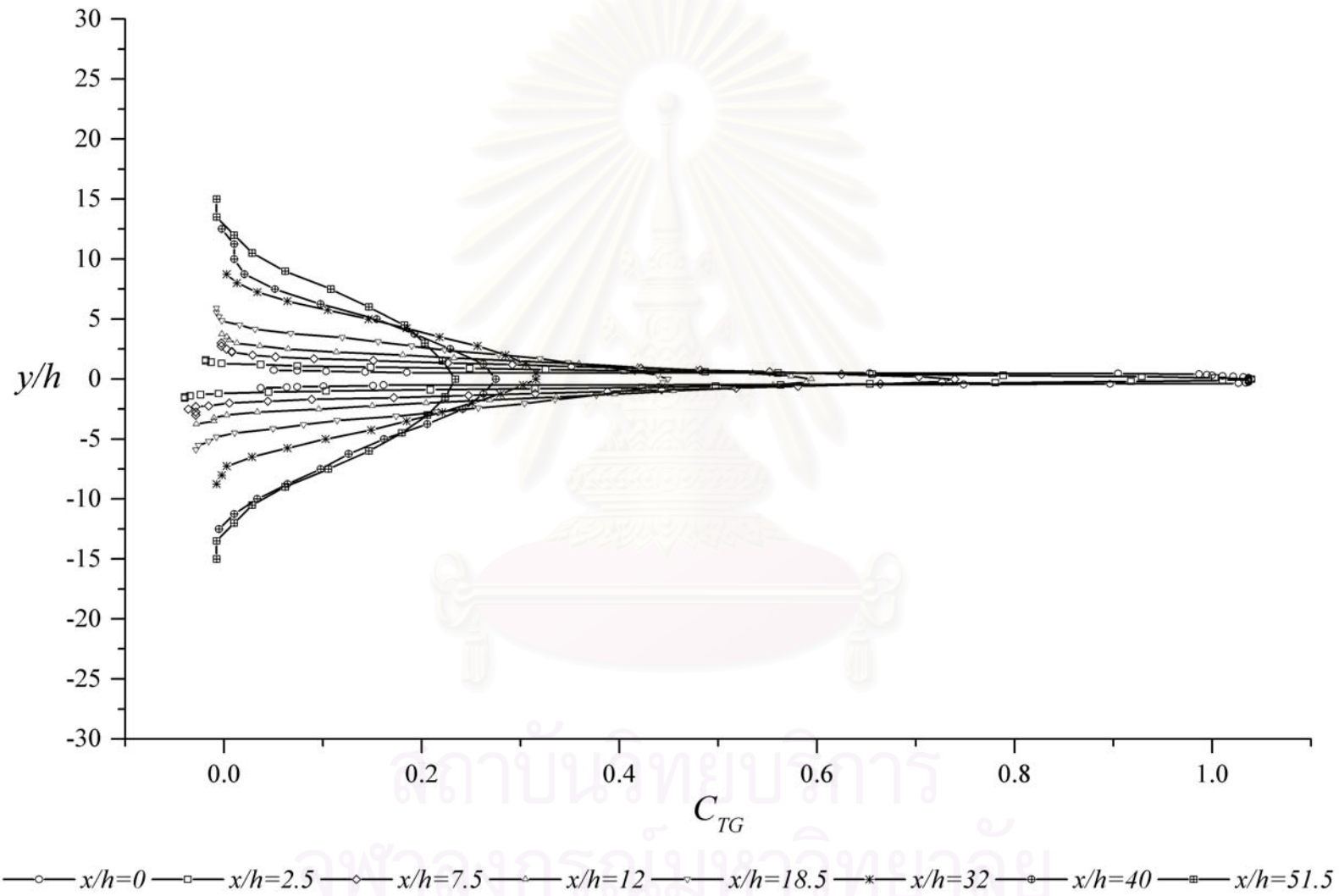
รูปที่ 3.4 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบตามแนวขวางการไหลที่ $y=0$



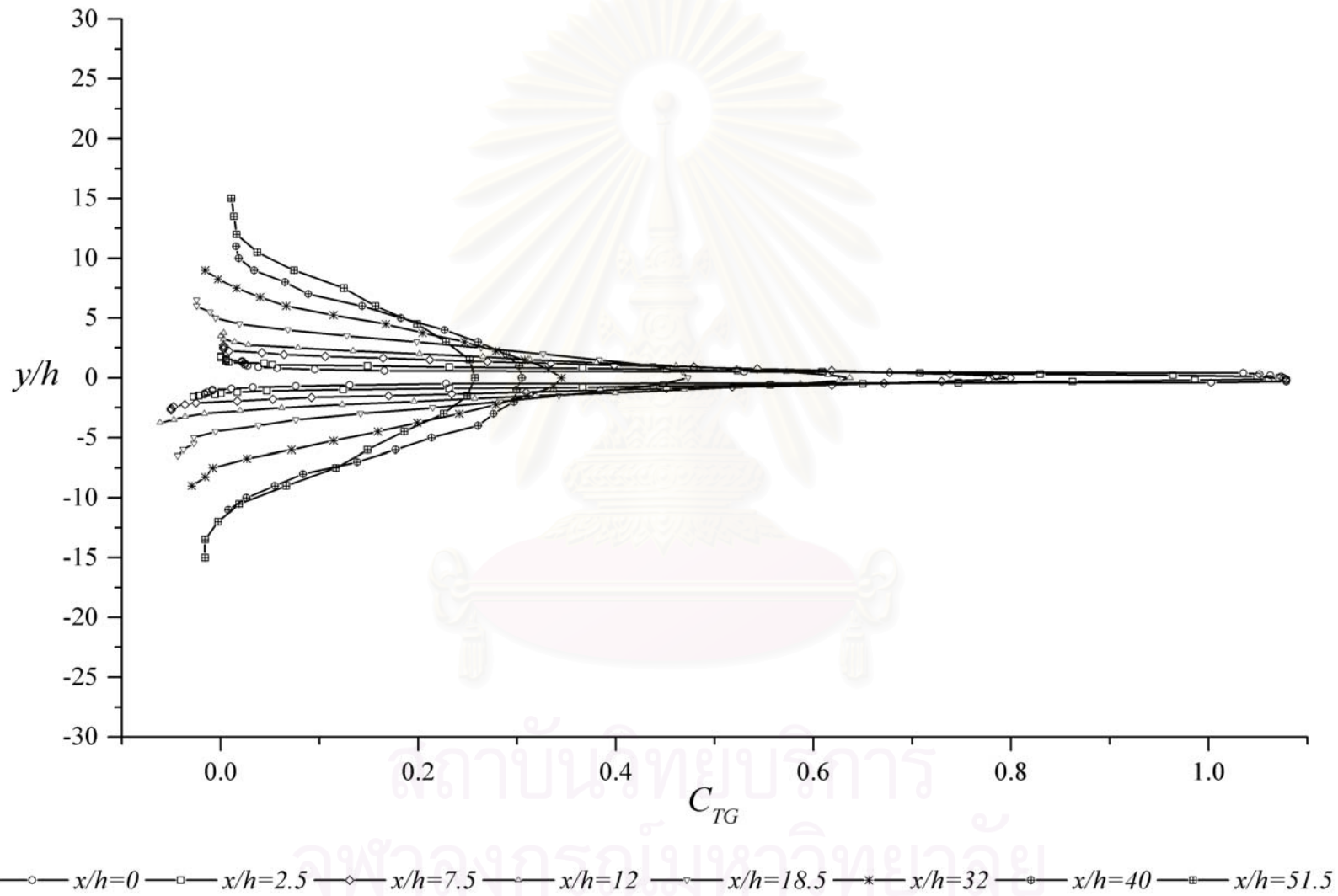
รูปที่ 3.5 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล



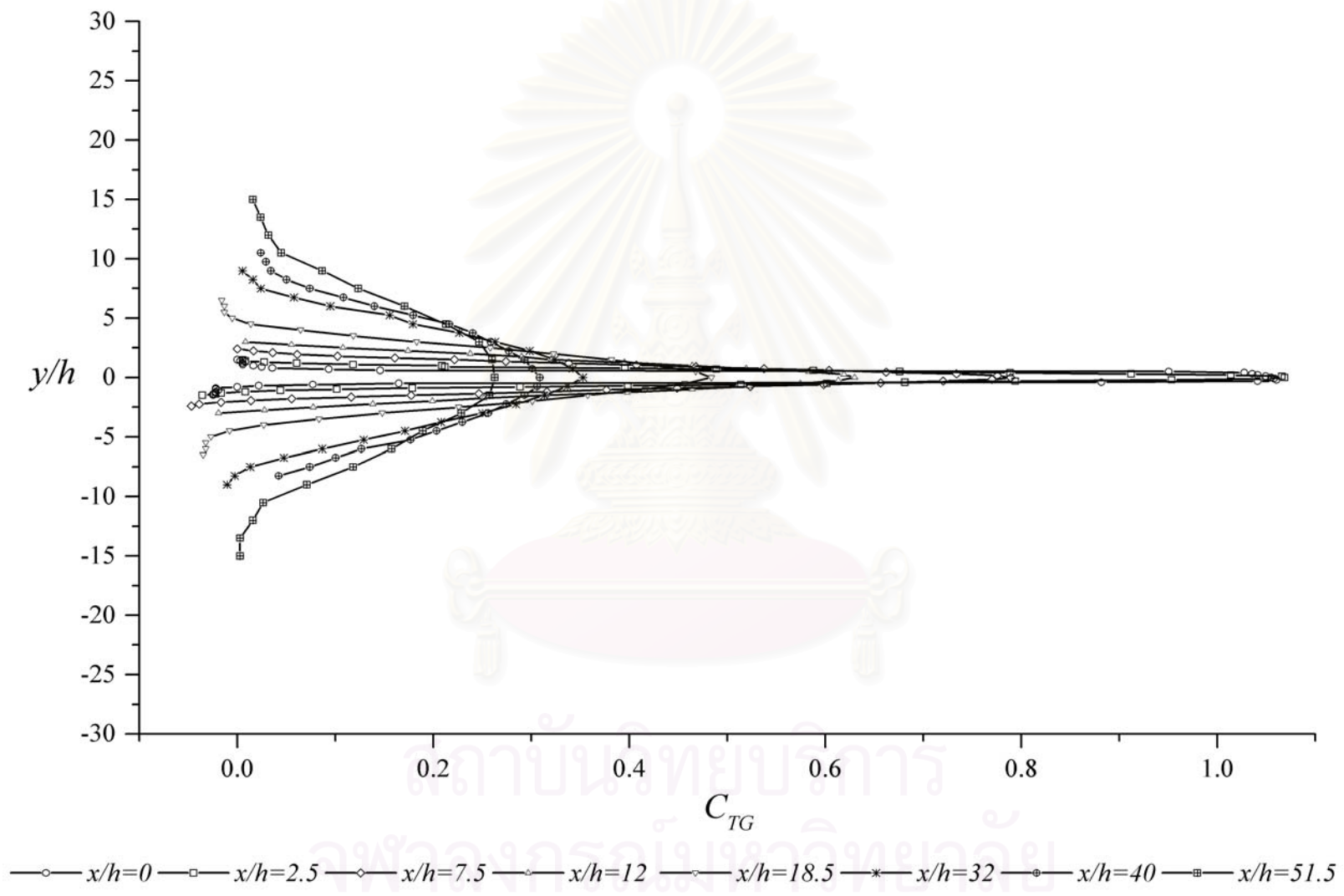
รูปที่ 3.6 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000



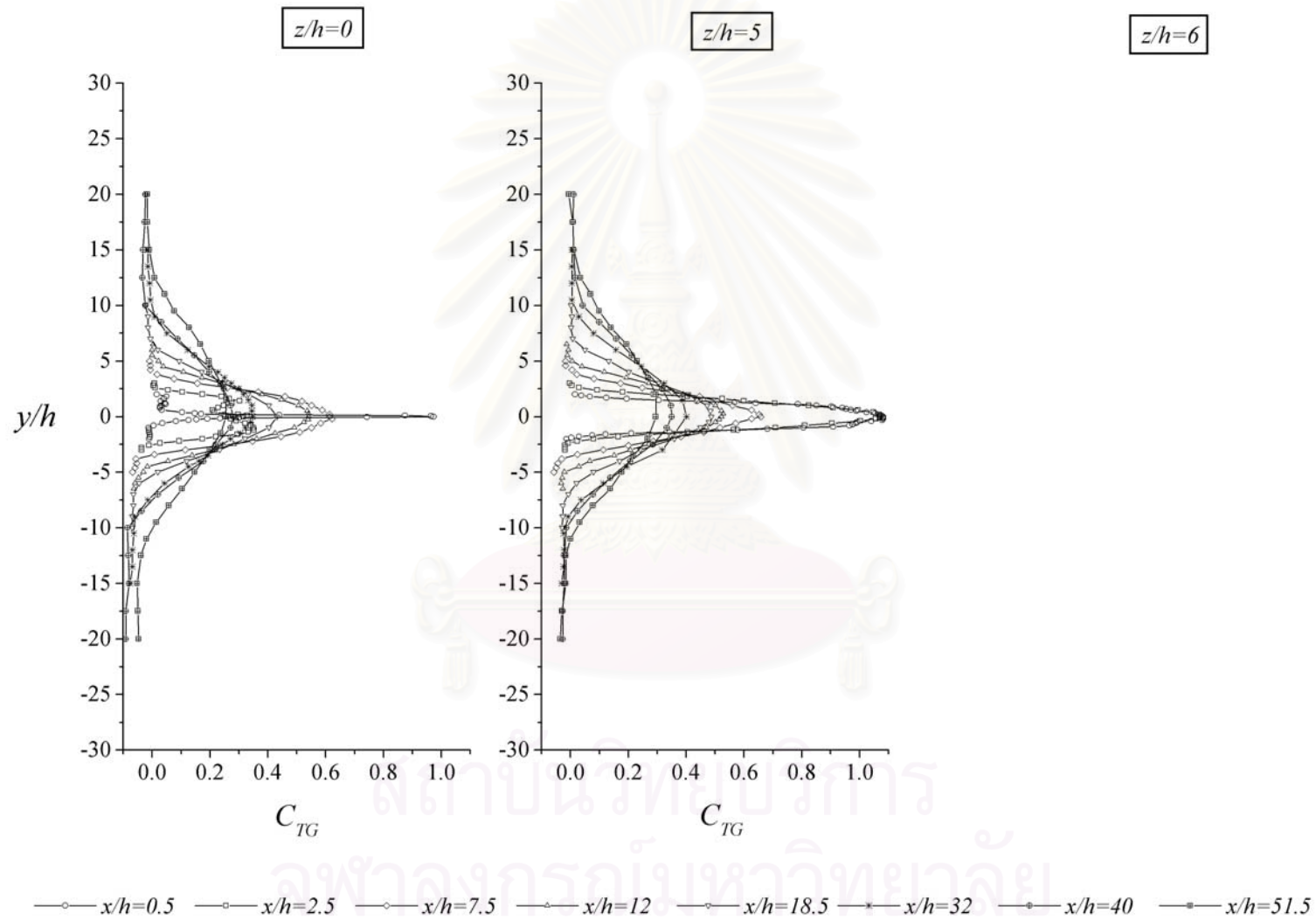
รูปที่ 3.7 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนกรไหลในกรณี L000 ที่ $z/h=0$



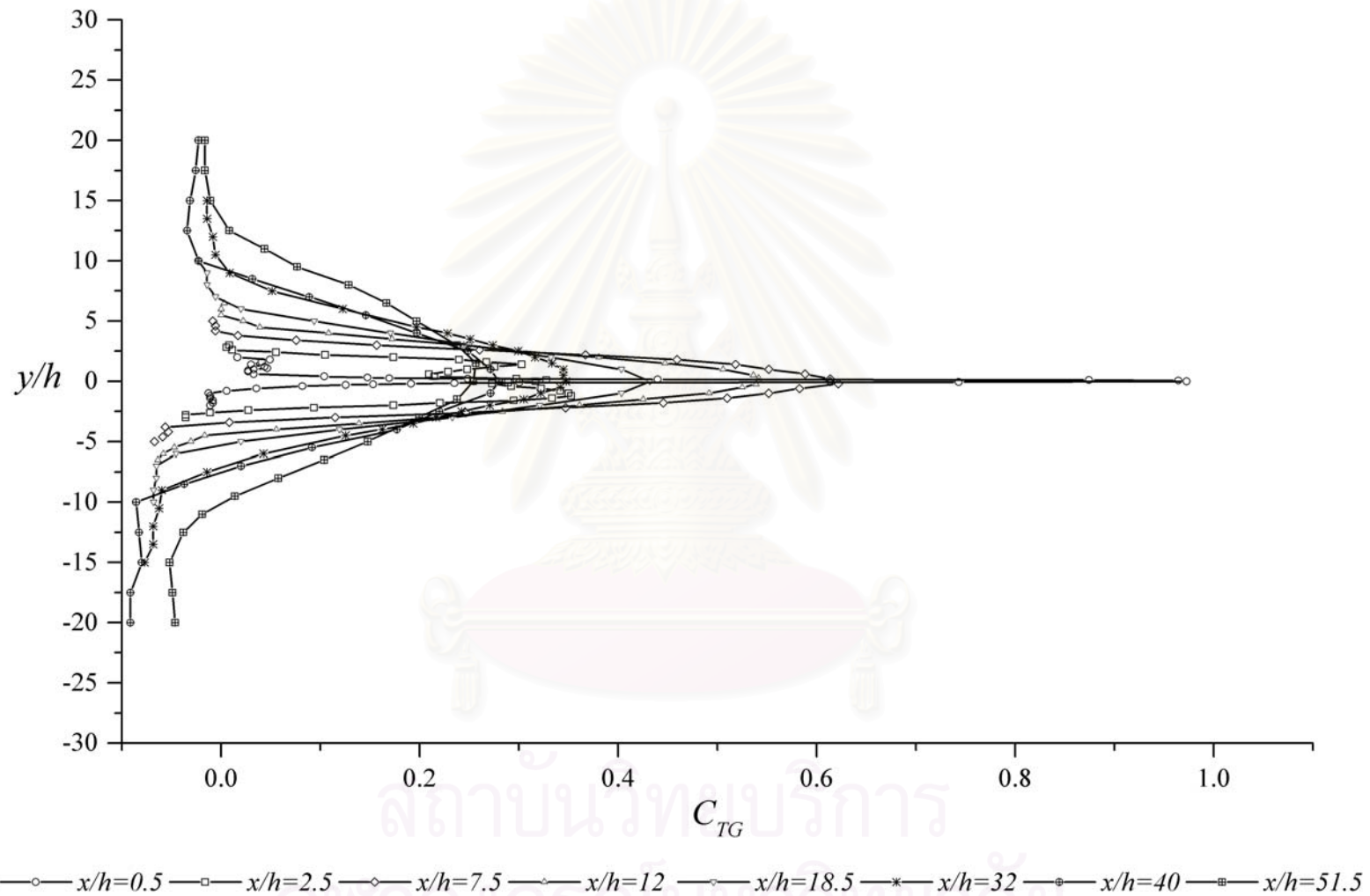
รูปที่ 3.8 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 ที่ $z/h=5$



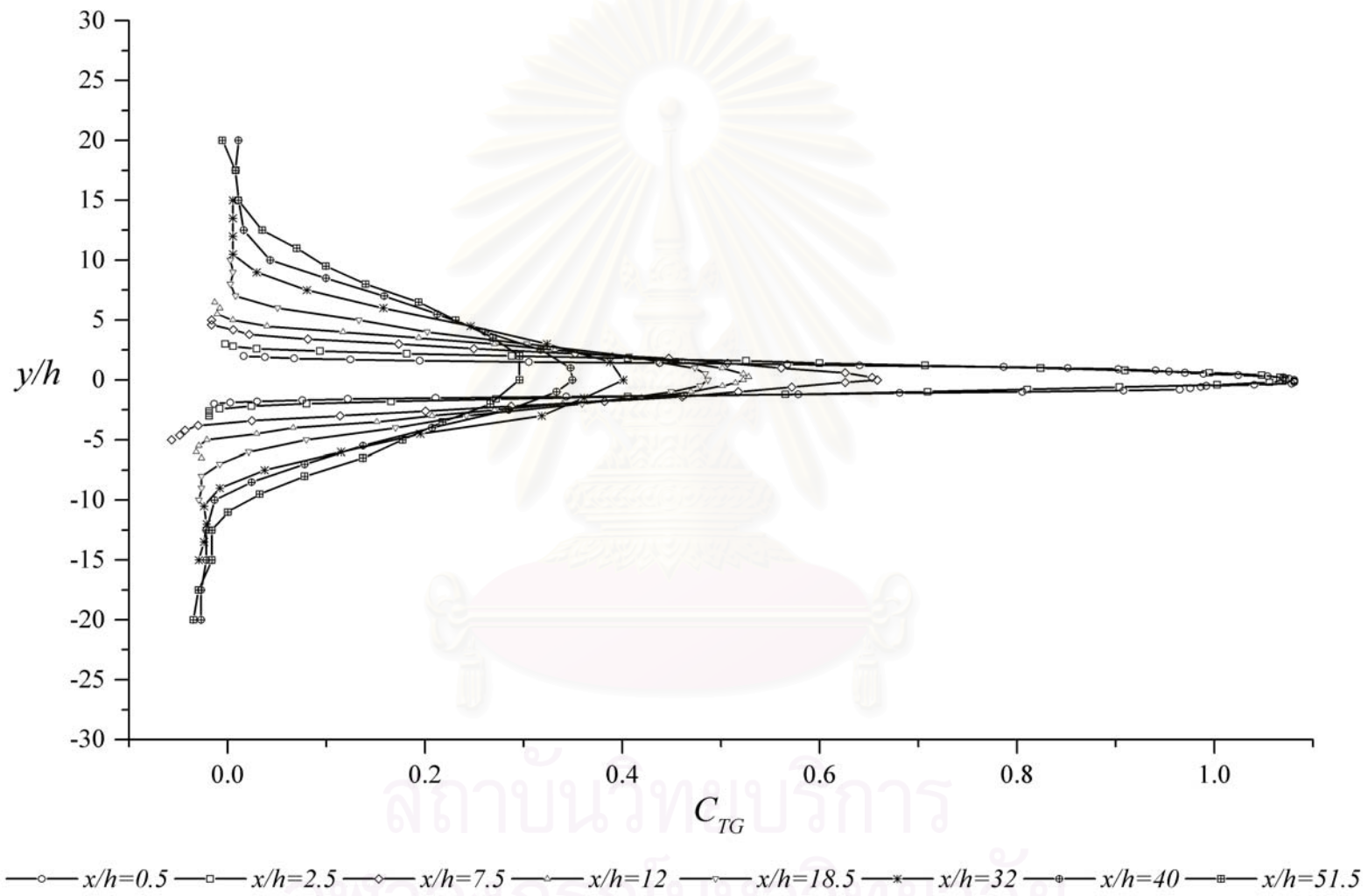
รูปที่ 3.9 รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 ที่ $z/h=6$



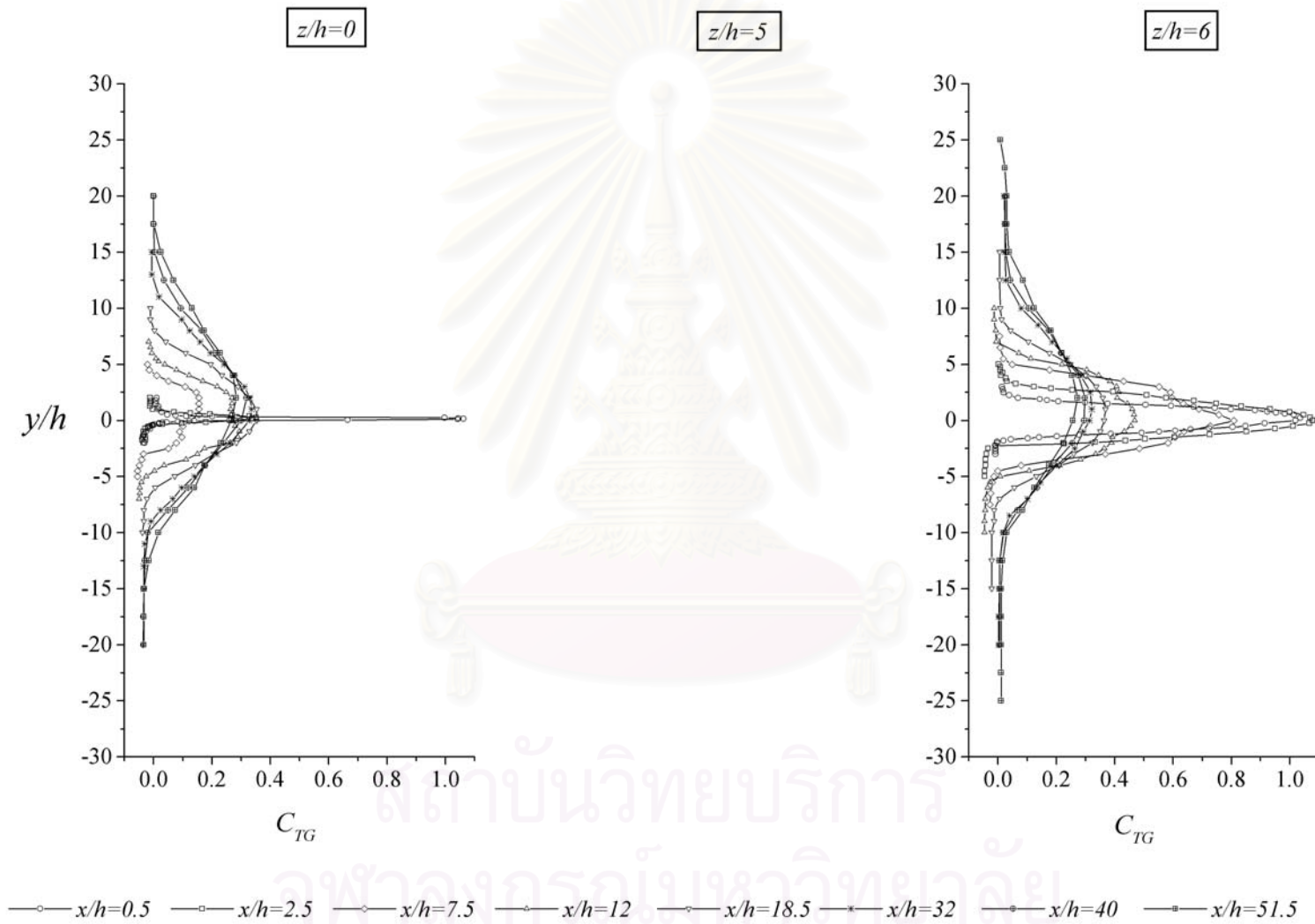
รูปที่ 3.10 รูปร่างการพัฒนาดวงของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L120



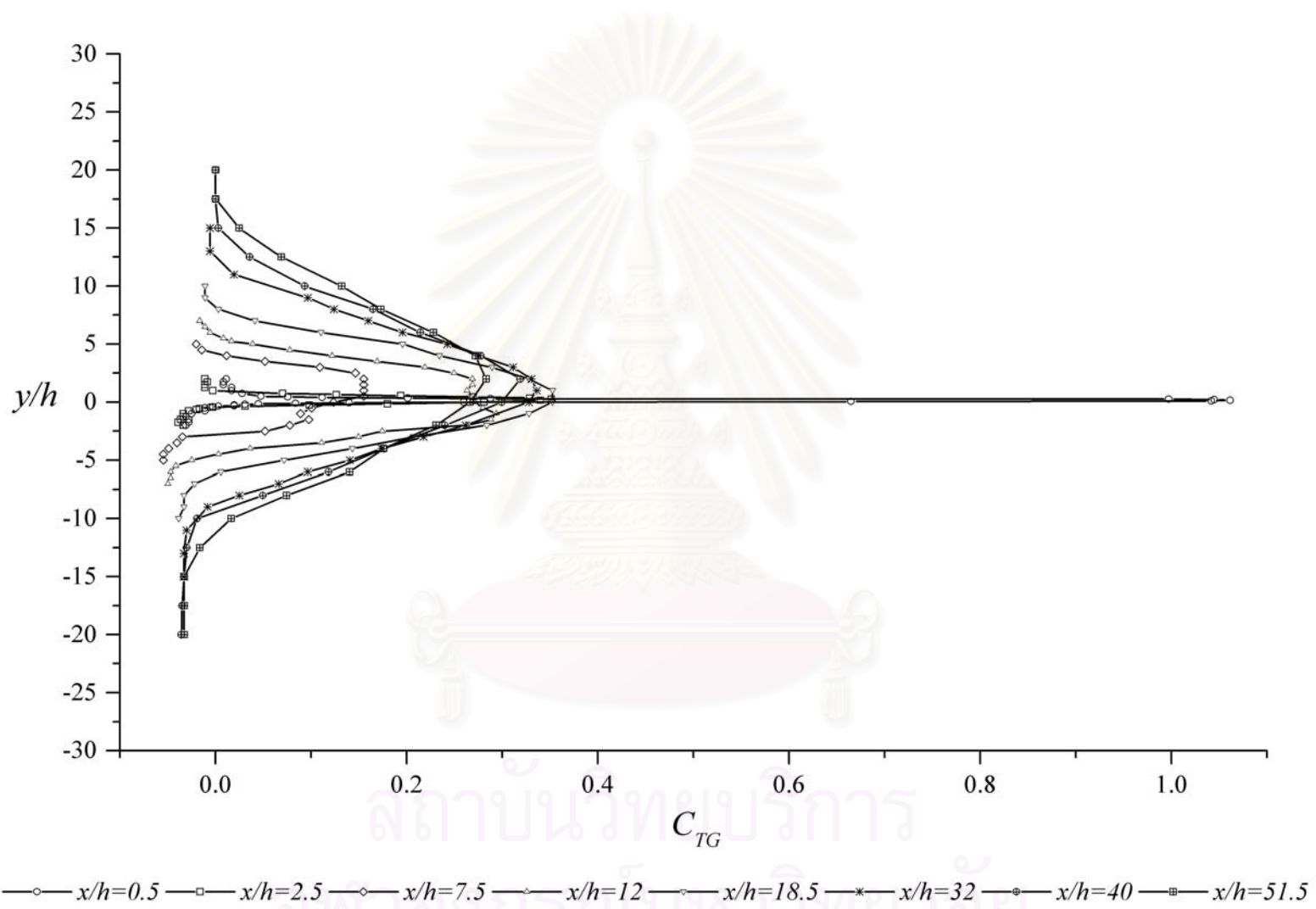
รูปที่ 3.11 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L120 ที่ $z/h=0$ (Apex)



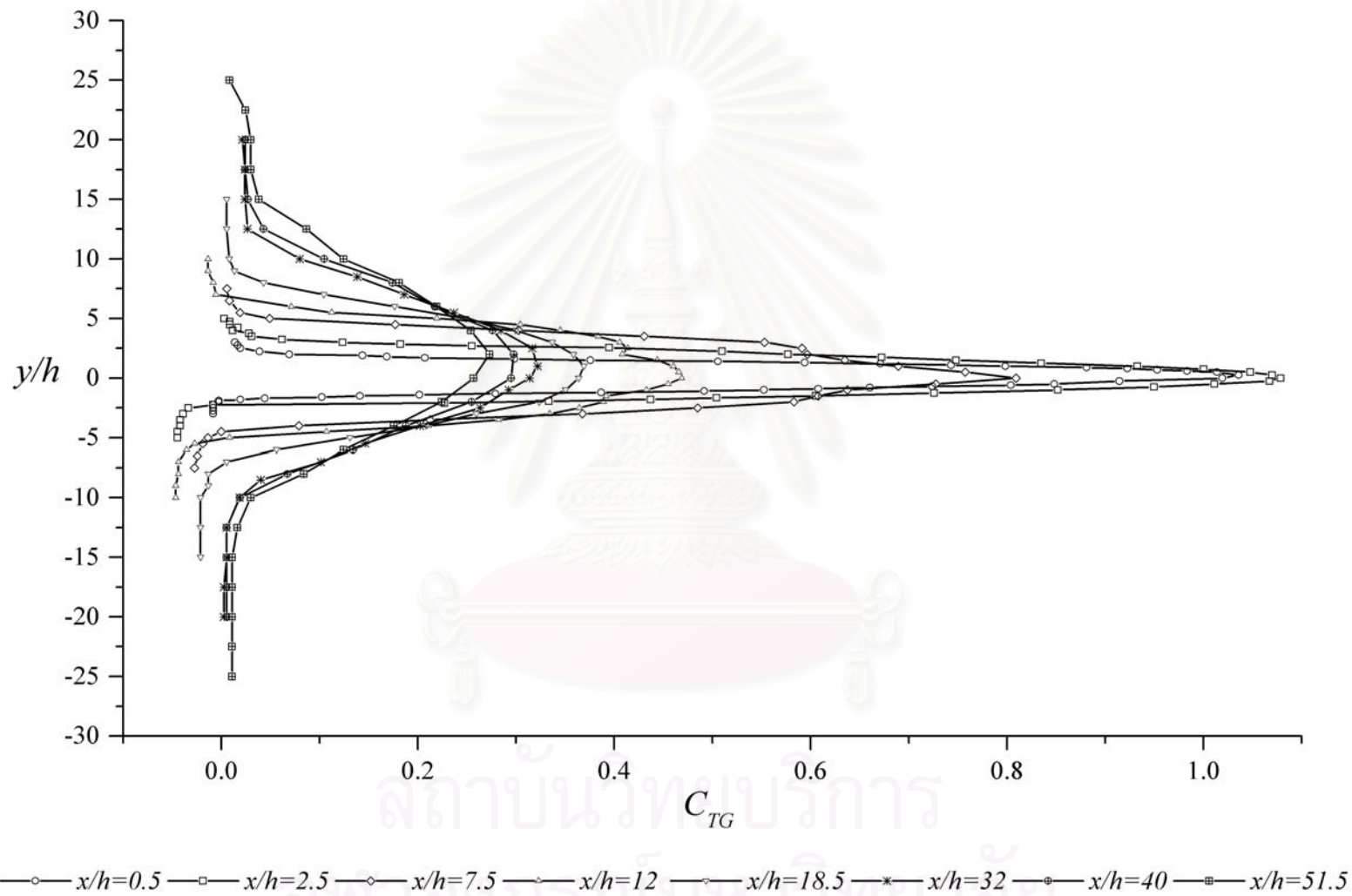
รูปที่ 3.12 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L120 ที่ $z/h=5$ (Base)



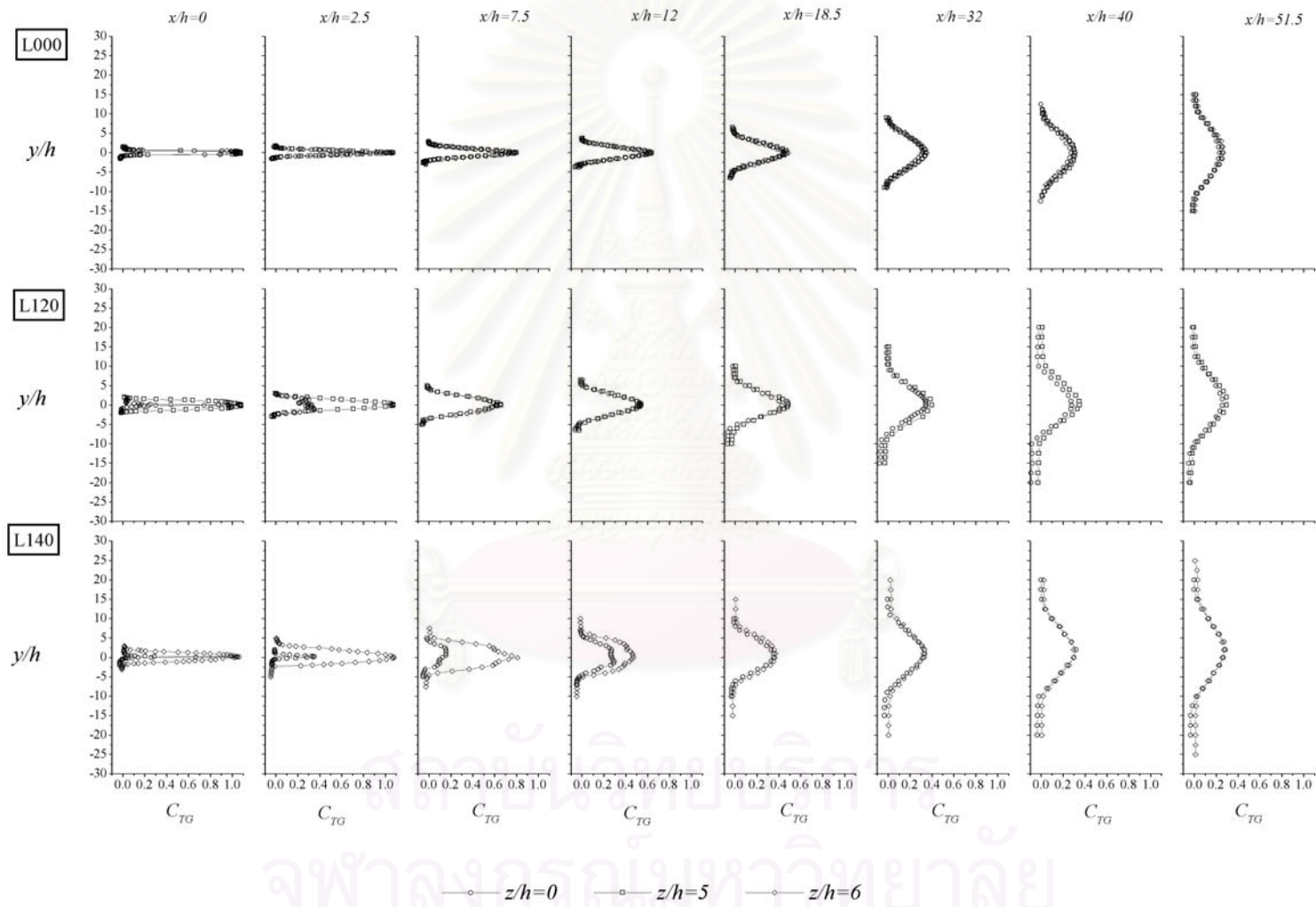
รูปที่ 3.13 รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L140



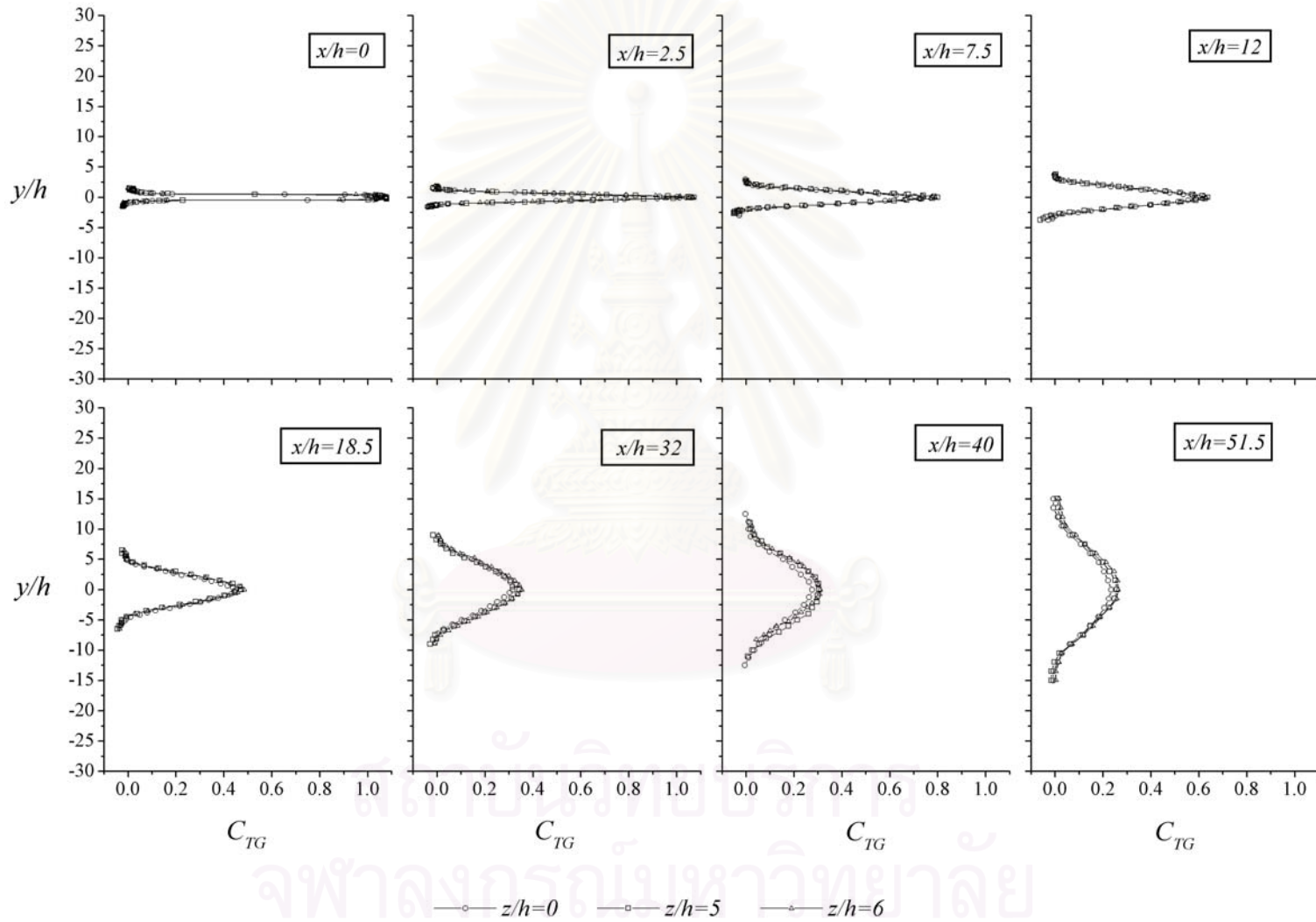
รูปที่ 3.14 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L140 ที่ $z/h=0$ (Apex)



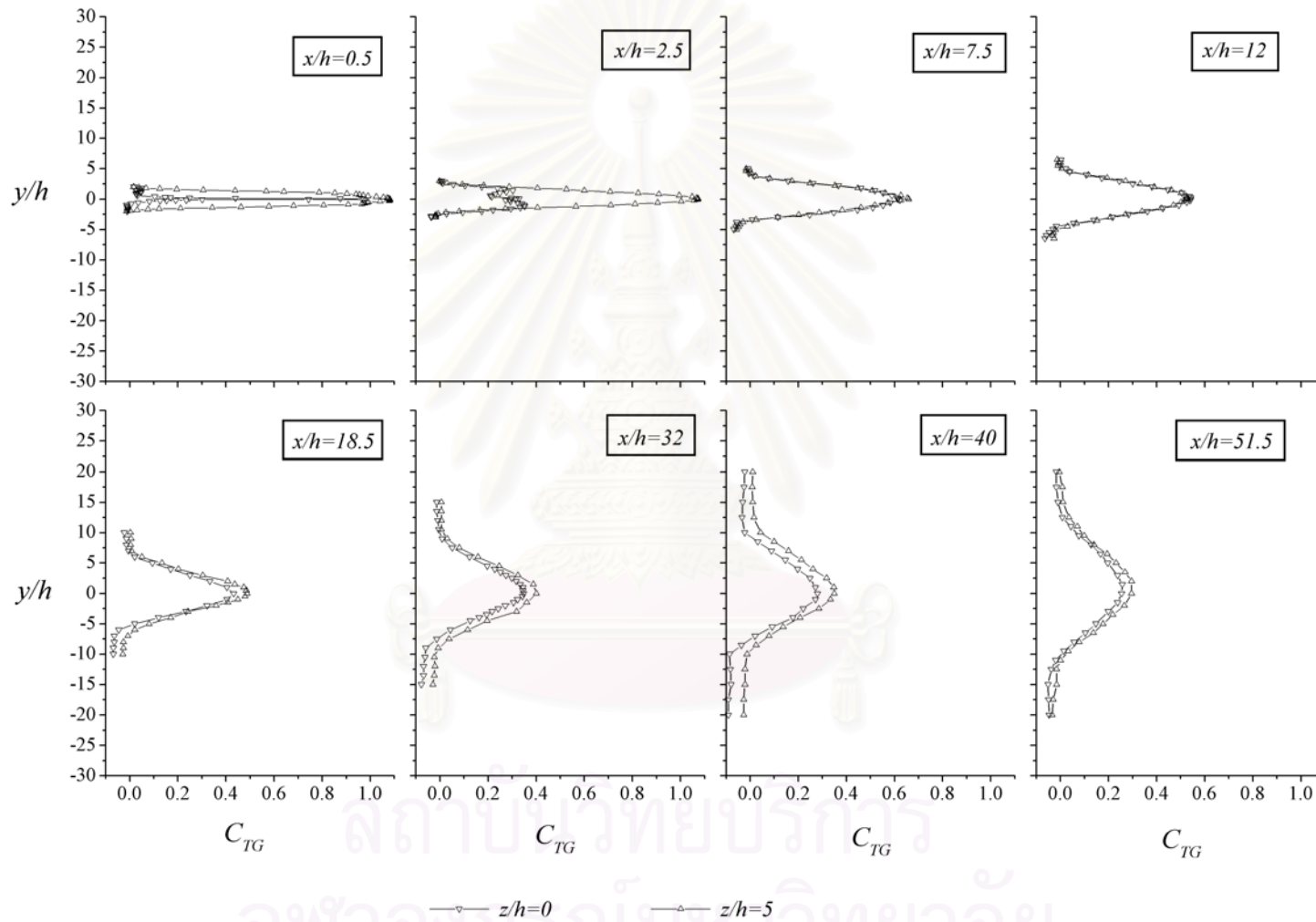
รูปที่ 3.15 รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L140 ที่ $z/h=6$ (Base)



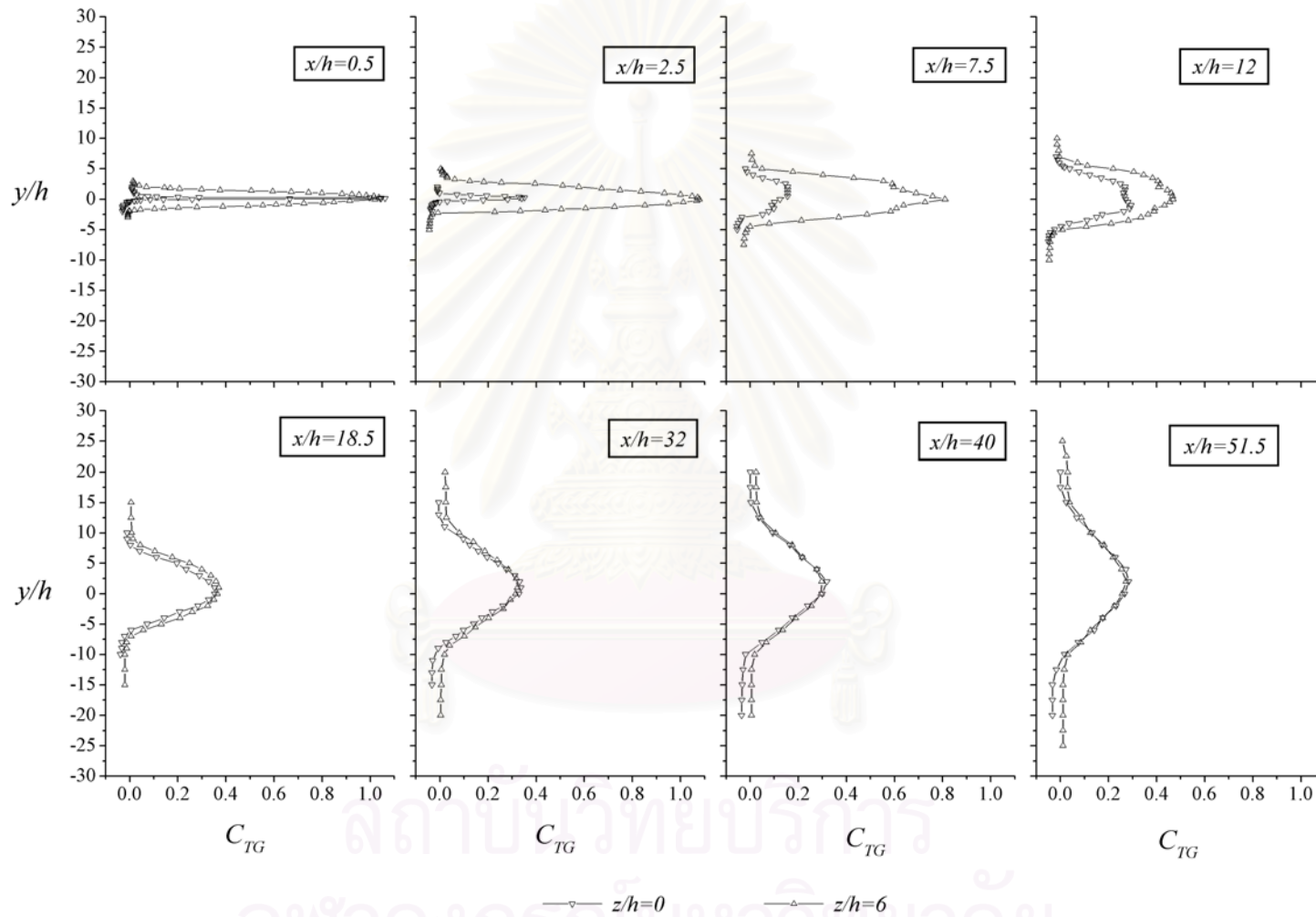
รูปที่ 3.16 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล



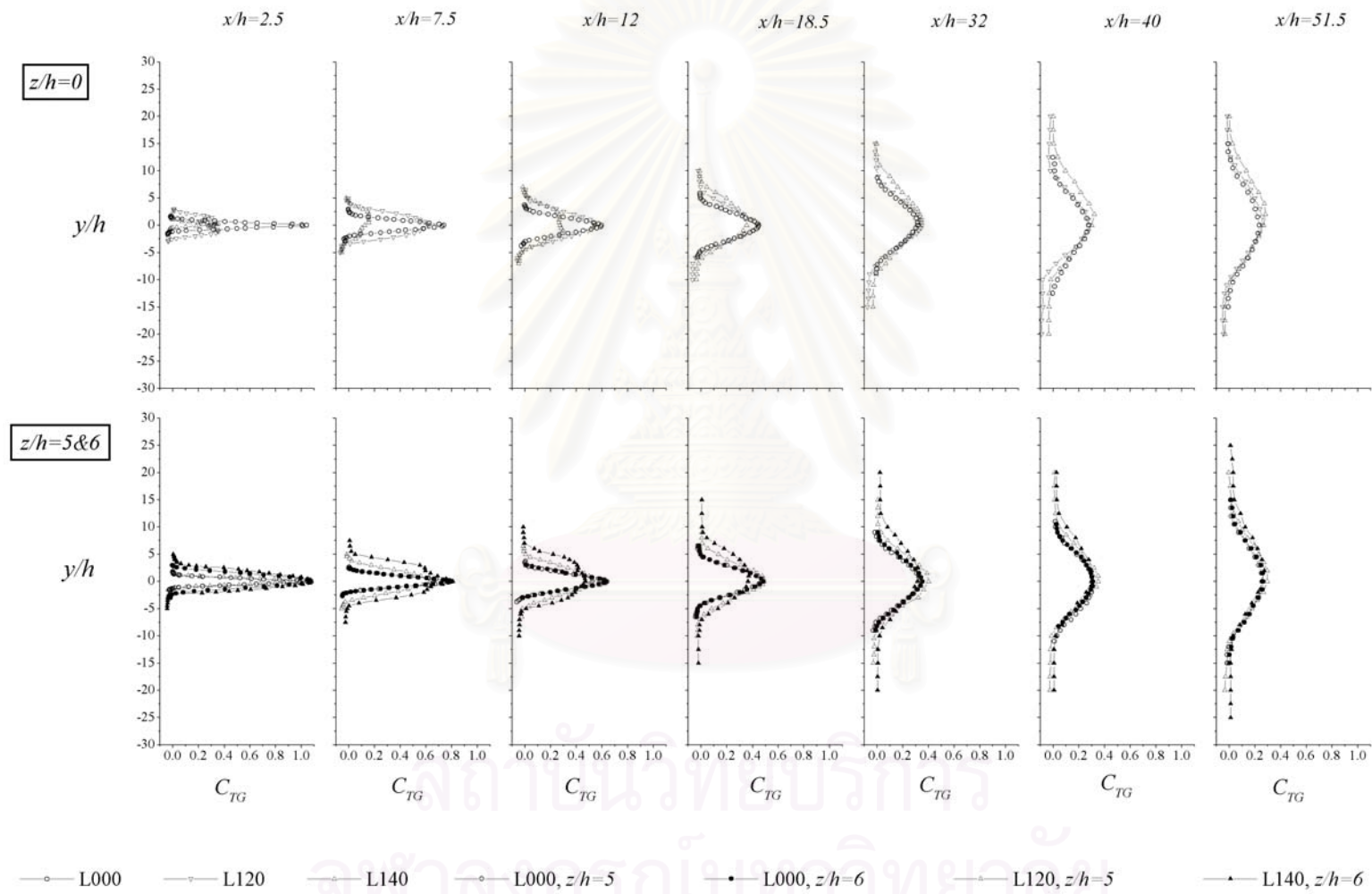
รูปที่ 3.17. การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L000



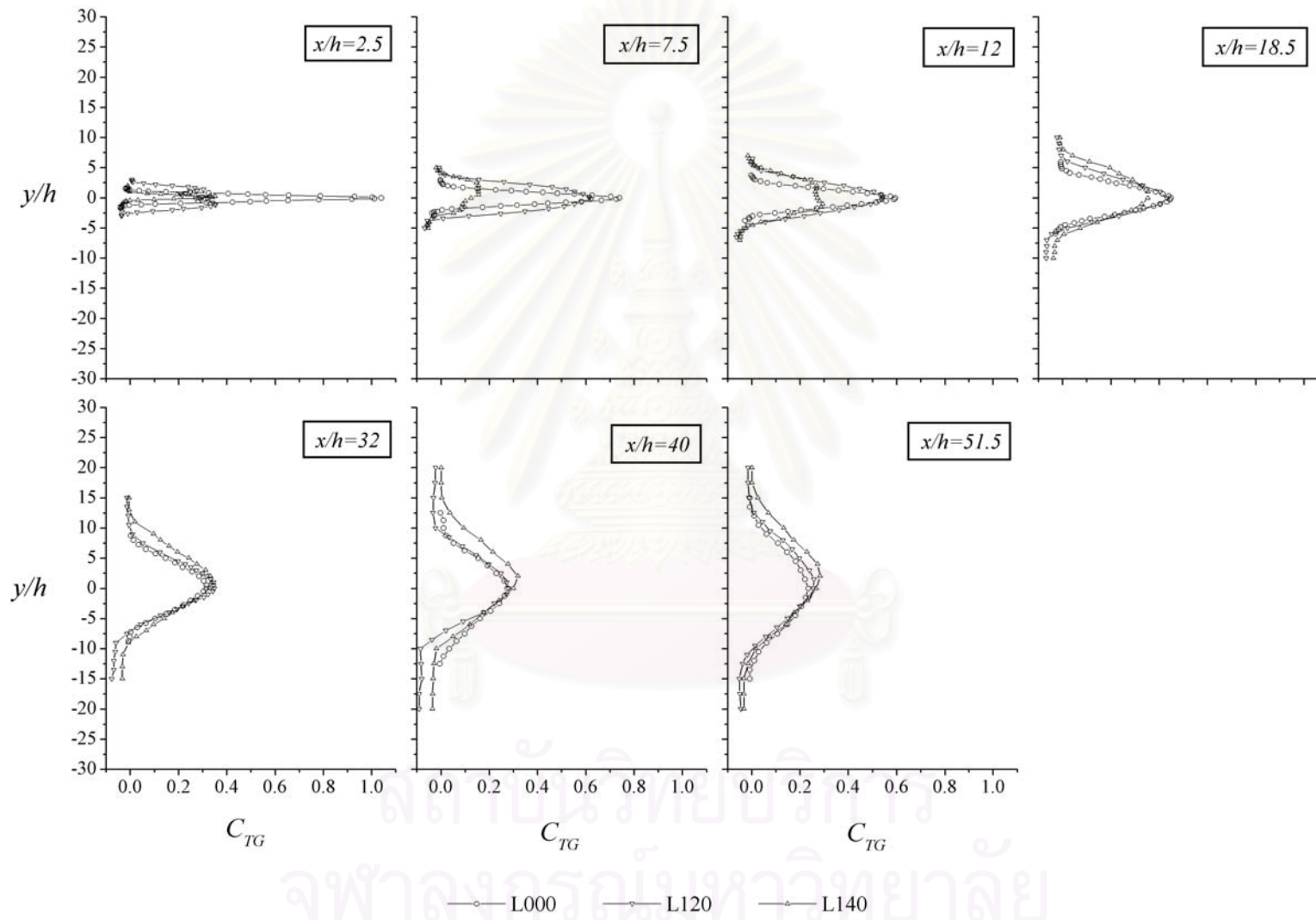
รูปที่ 3.18 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L120



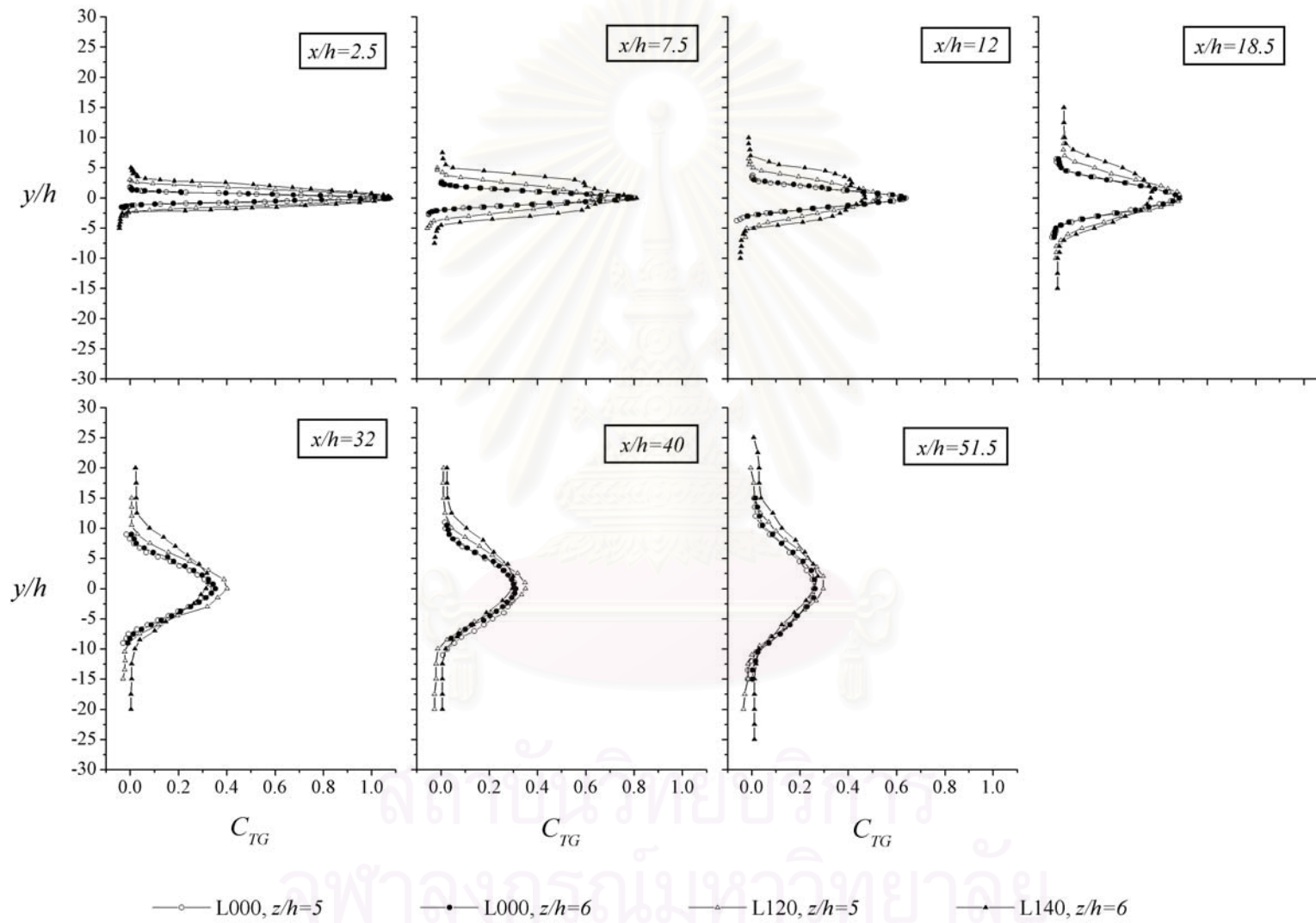
รูปที่ 3.19 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหลในกรณี L140



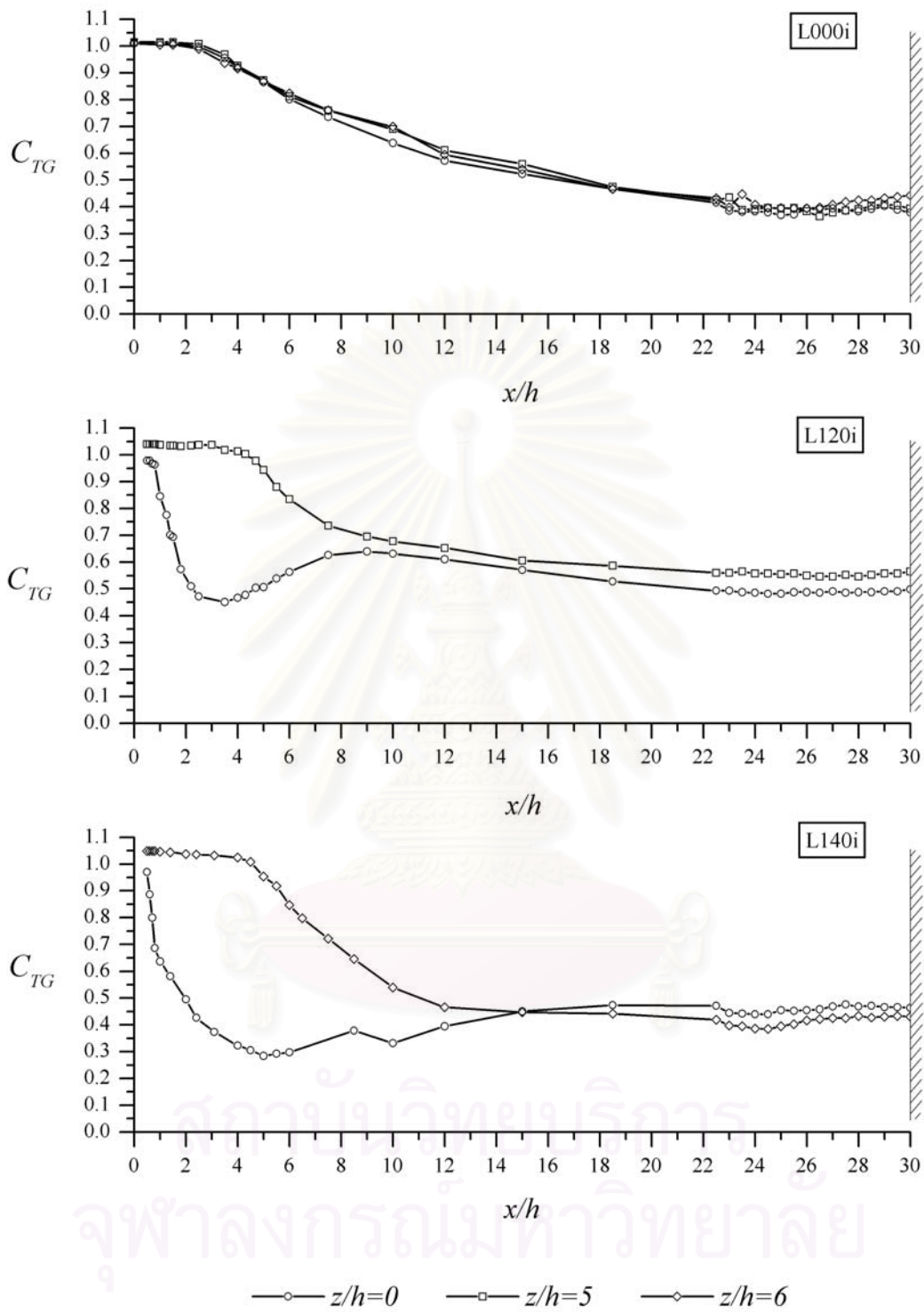
รูปที่ 3.20 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล



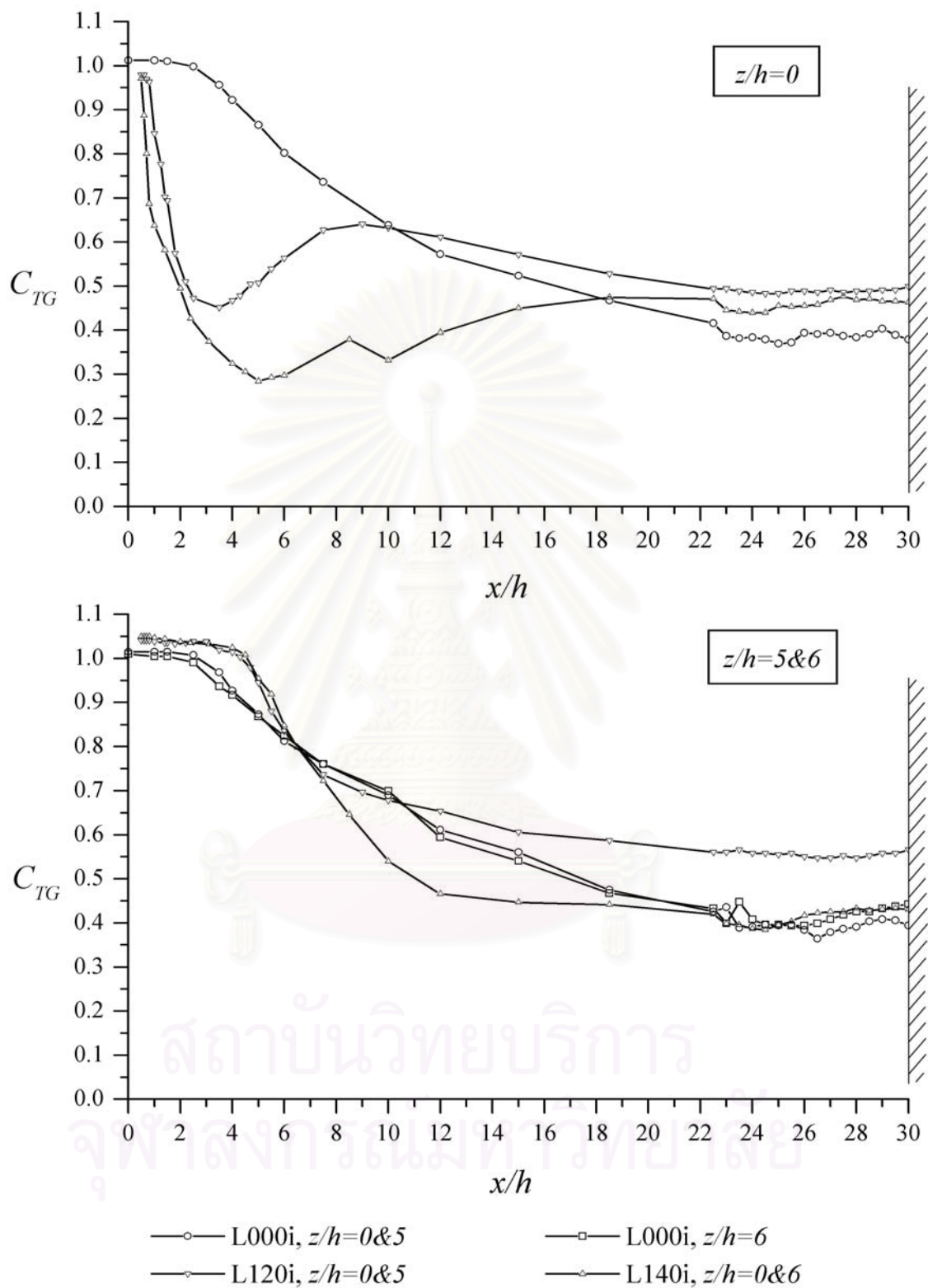
รูปที่ 3.21. การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=0$ (Apex)



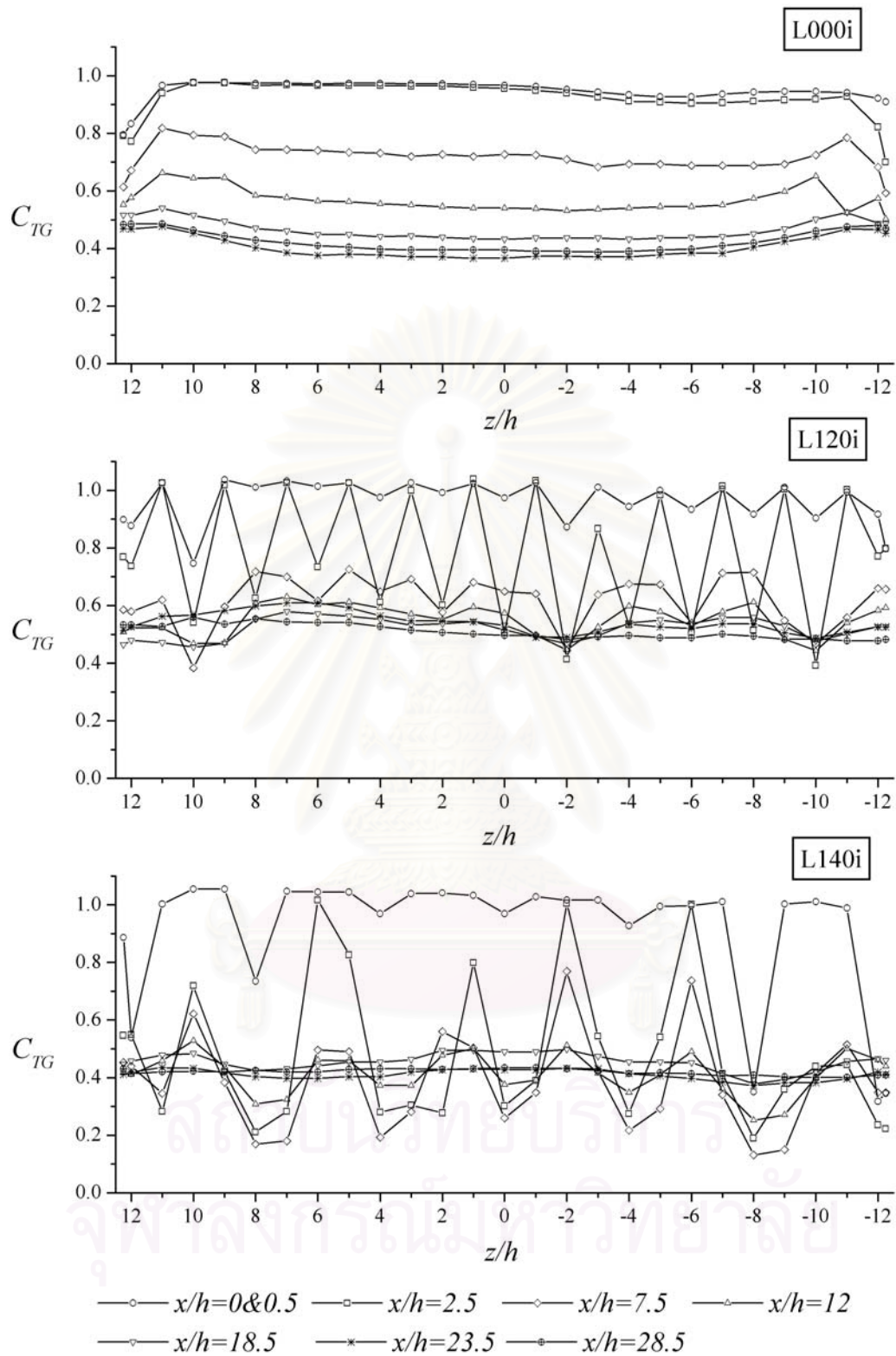
รูปที่ 3.22. การพัฒนาตัวของเส้นระนาบตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=5$ และ 6 (Base)



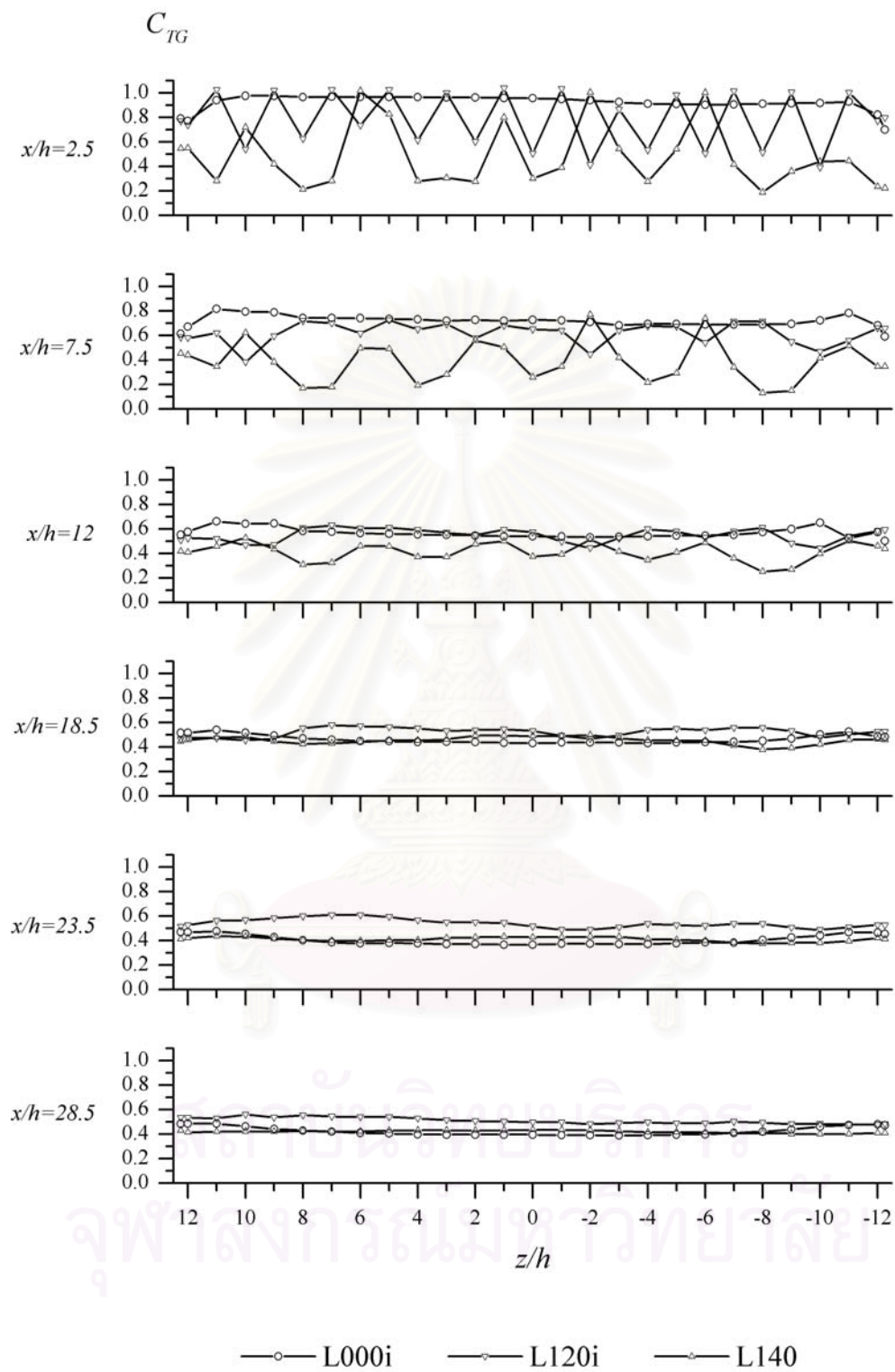
รูปที่ 3.23 การลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบแบบวี่งชันผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $y=0$



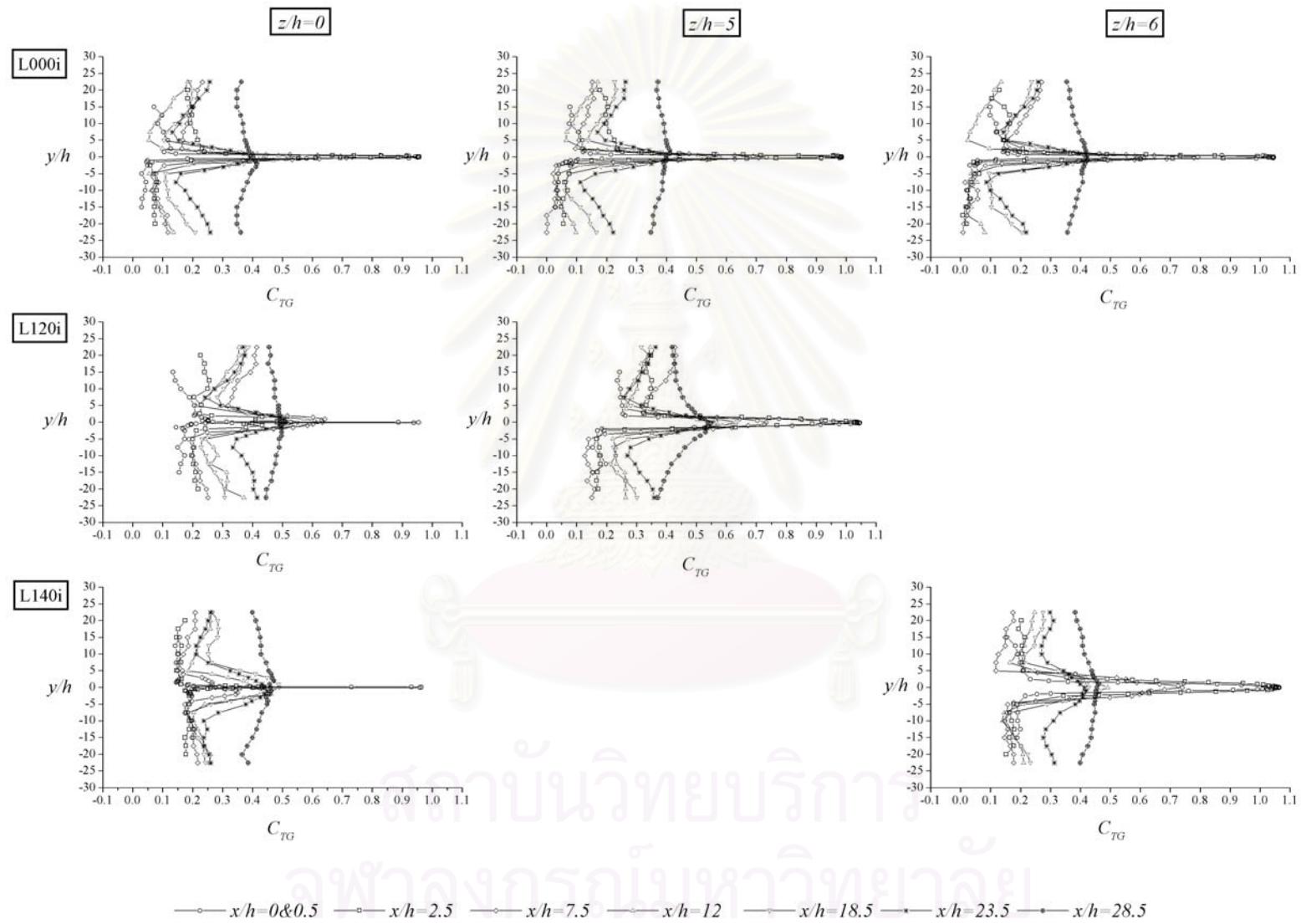
รูปที่ 3.24 การลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบแบบวังชันผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $y=0$



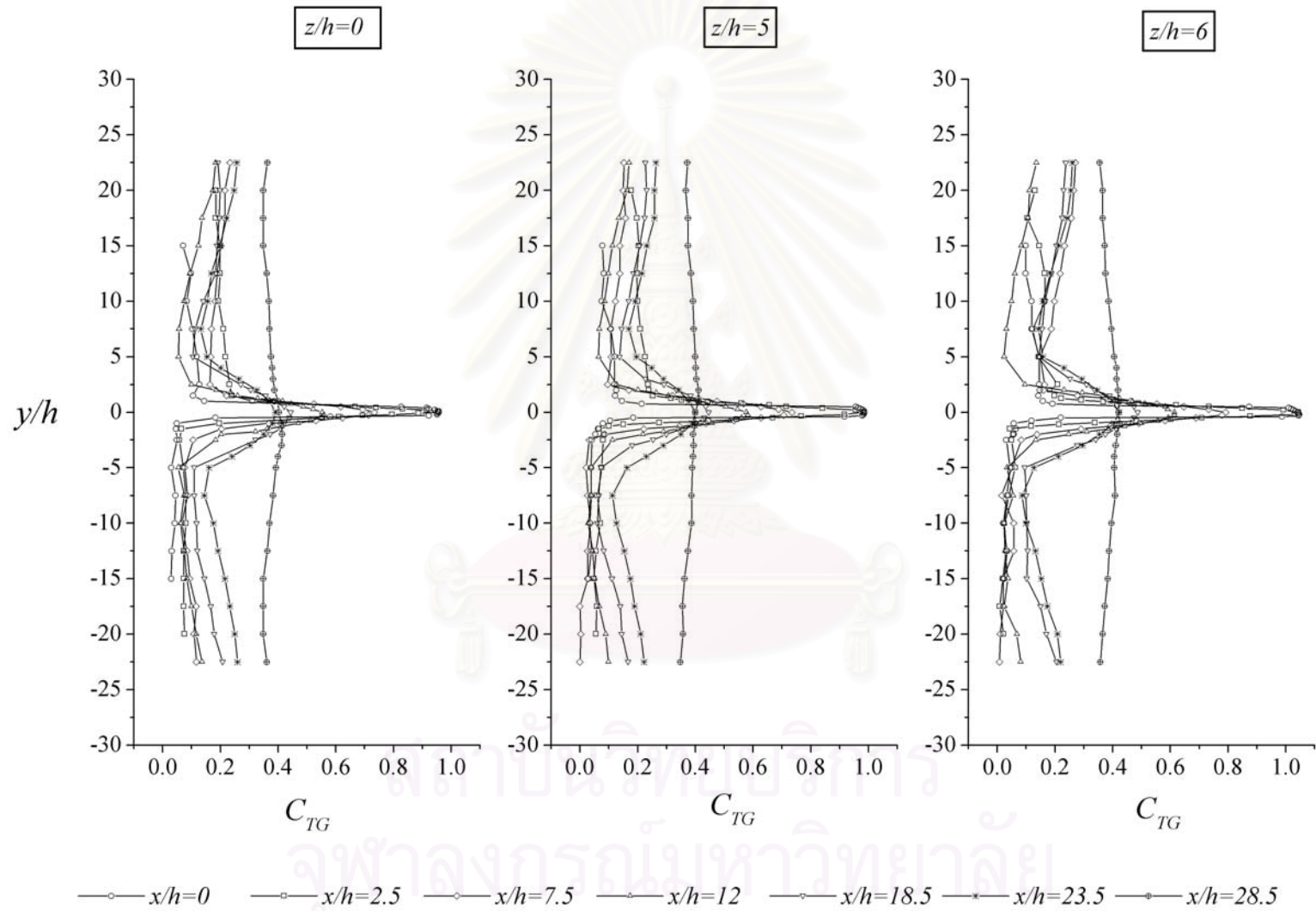
รูปที่ 3.25 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิตรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบแบบว้างขนานตามแนวขวางการไหล ที่ $y=0$



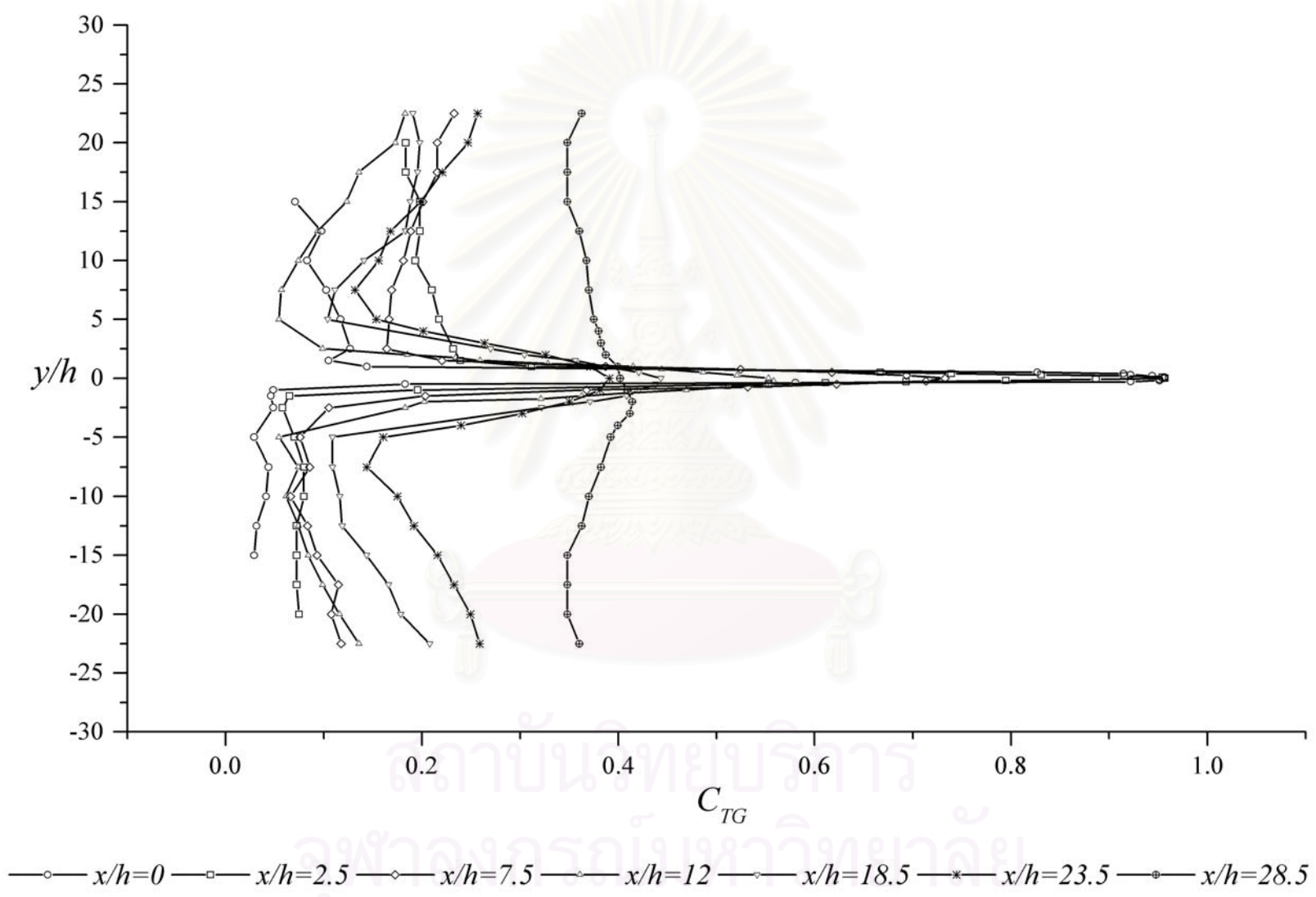
รูปที่ 3.26 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวขวางการไหล ที่ $y=0$



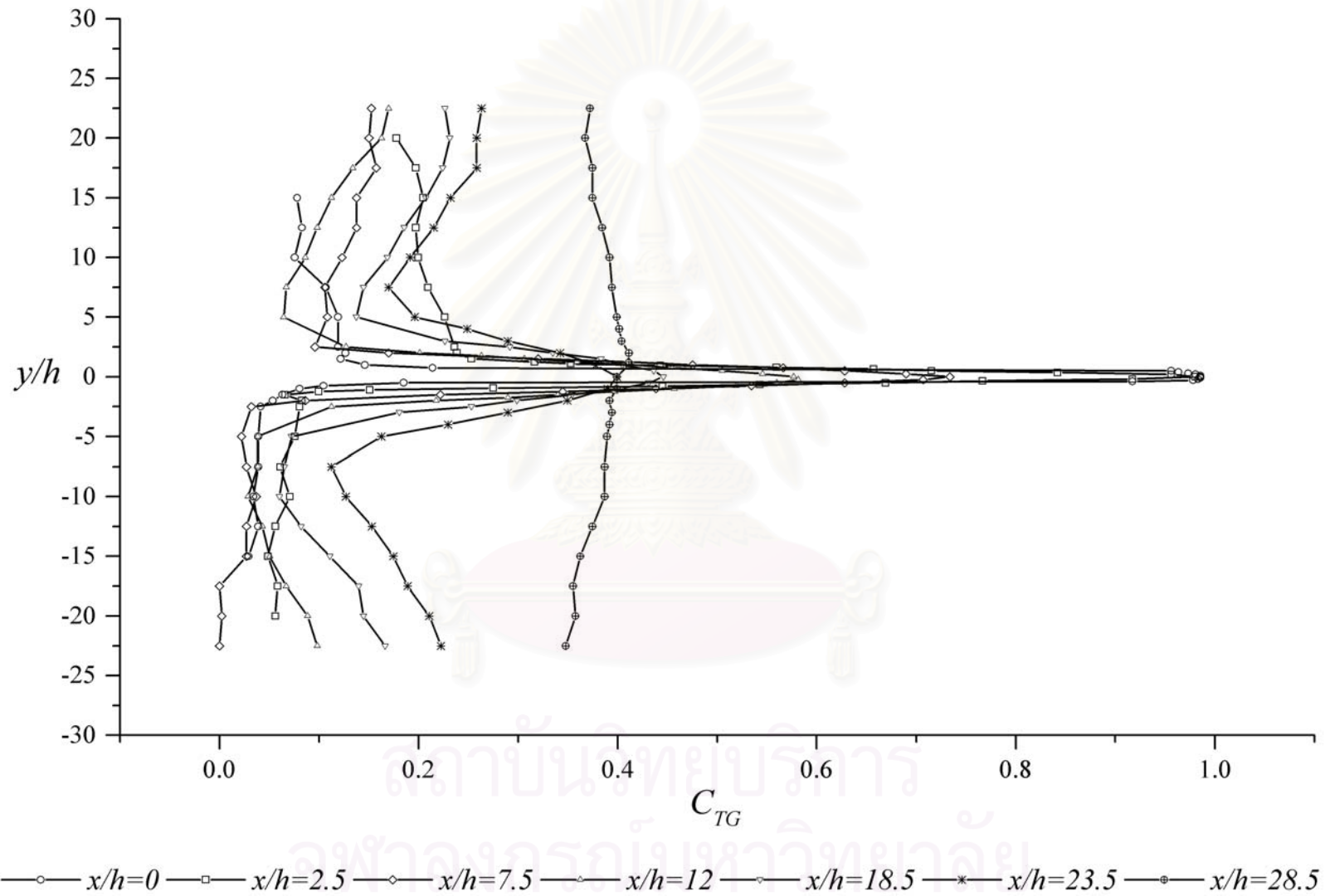
รูปที่ 3.27 รูปร่างการพัฒนาดำของเจ้พระนาบแบบวิ้งชนผนังตามแนวแกนการไหล



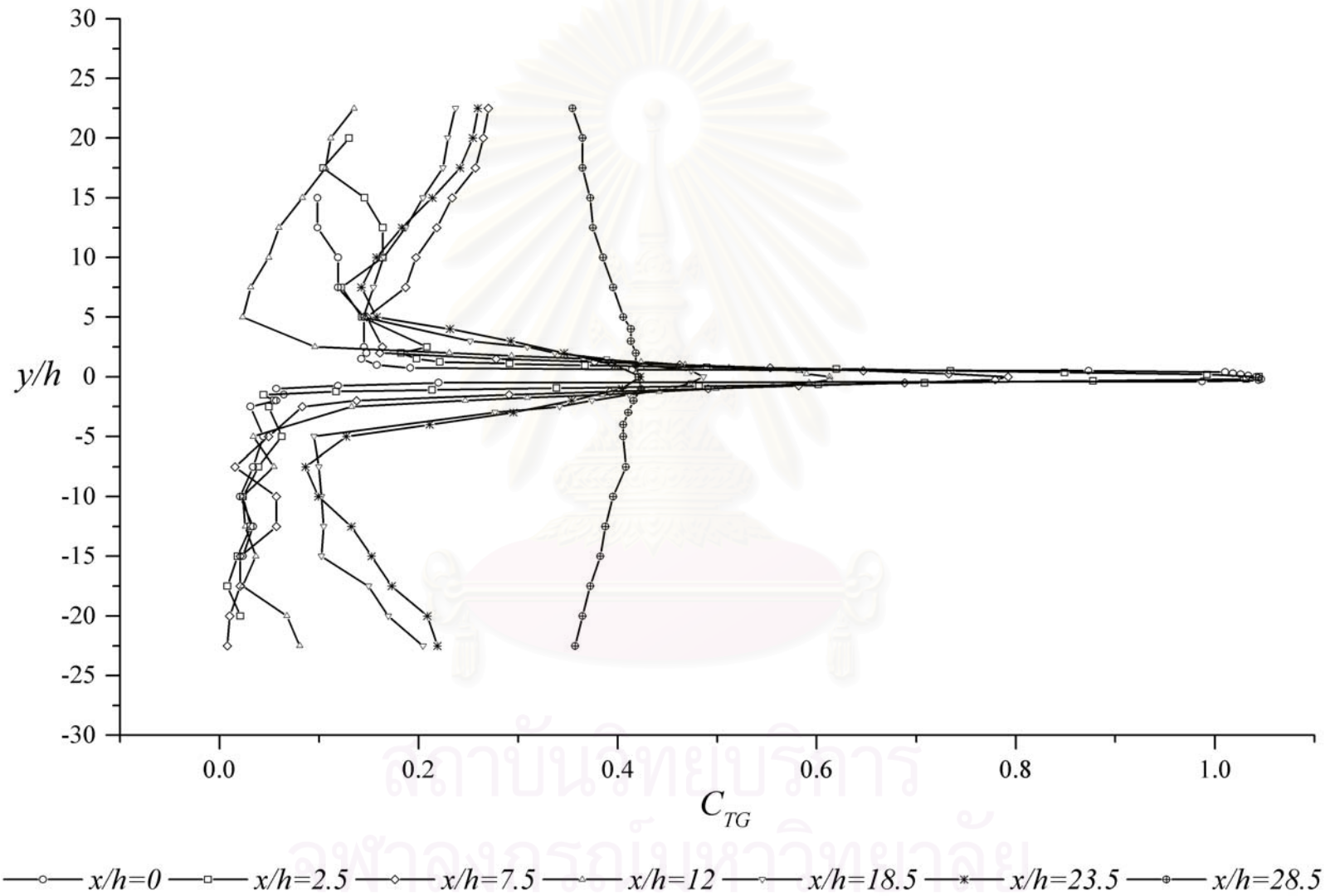
รูปที่ 3.28 รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบแบบวีงชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i



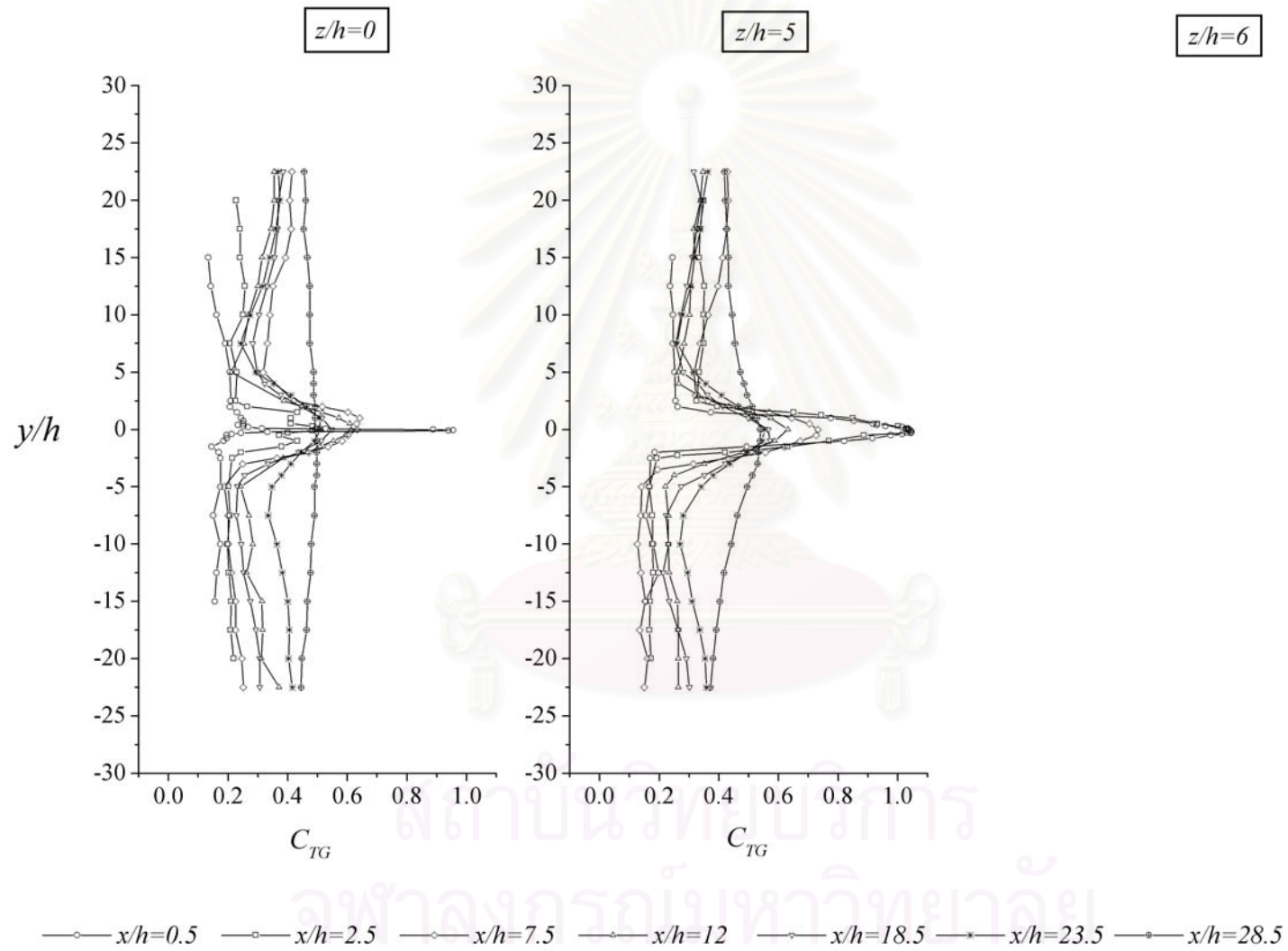
รูปที่ 3.29 รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบแบบวงรีขนานกับแนวแกนการไหลในกรณี L000i ที่ $z/h=0$



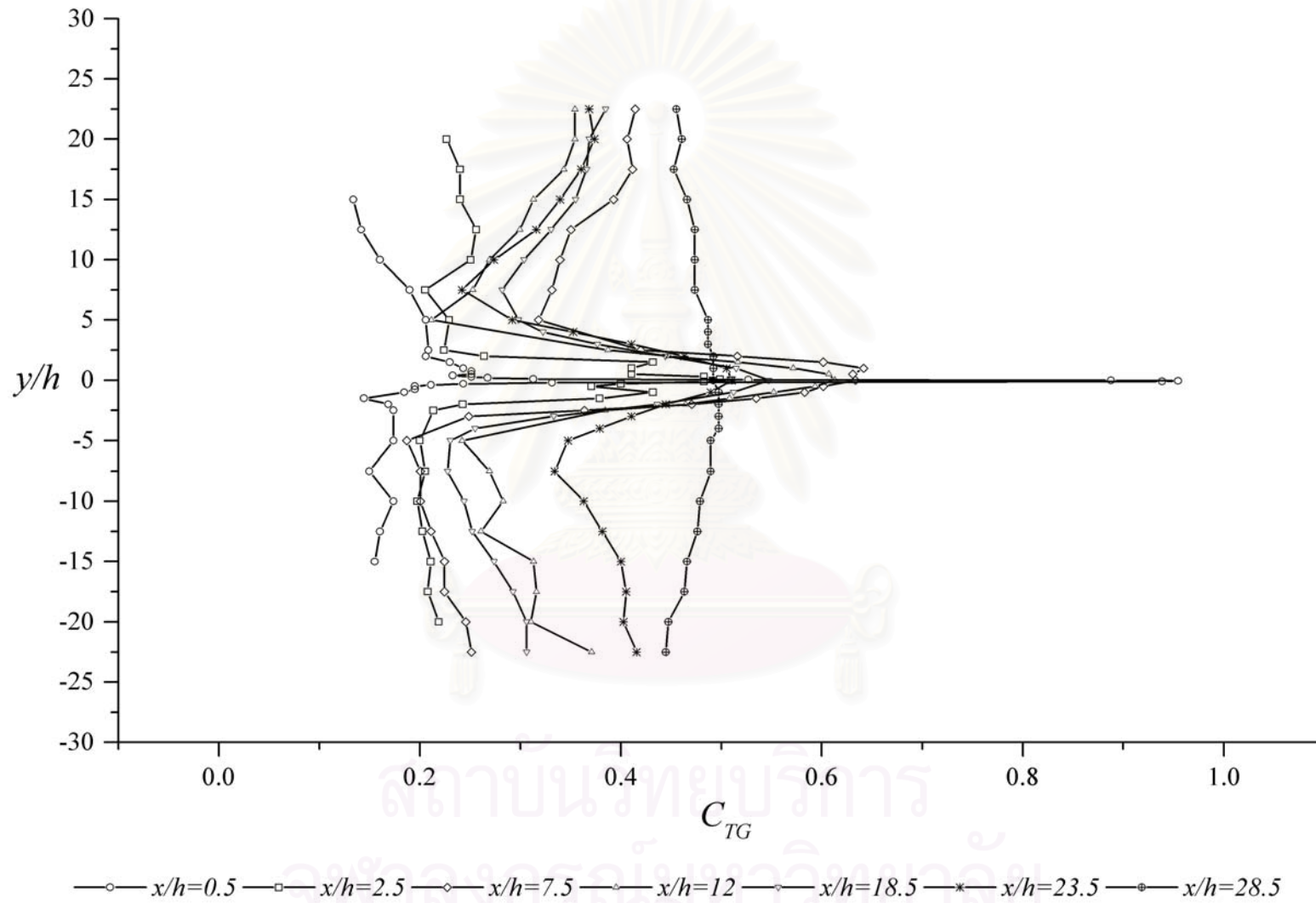
รูปที่ 3.30 รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบแบบวีงชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i ที่ $z/h=5$



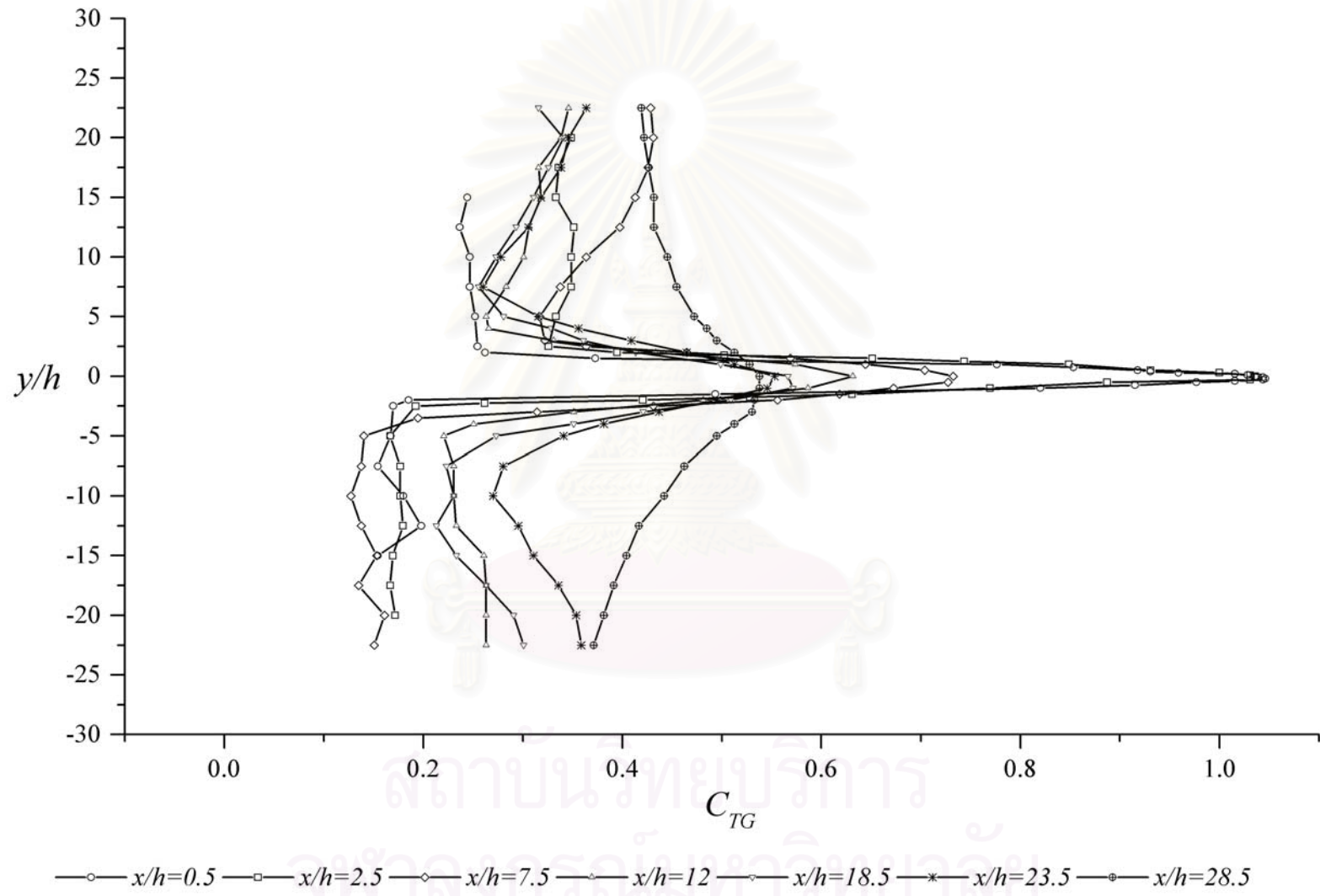
รูปที่ 3.31 รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i ที่ $z/h=6$



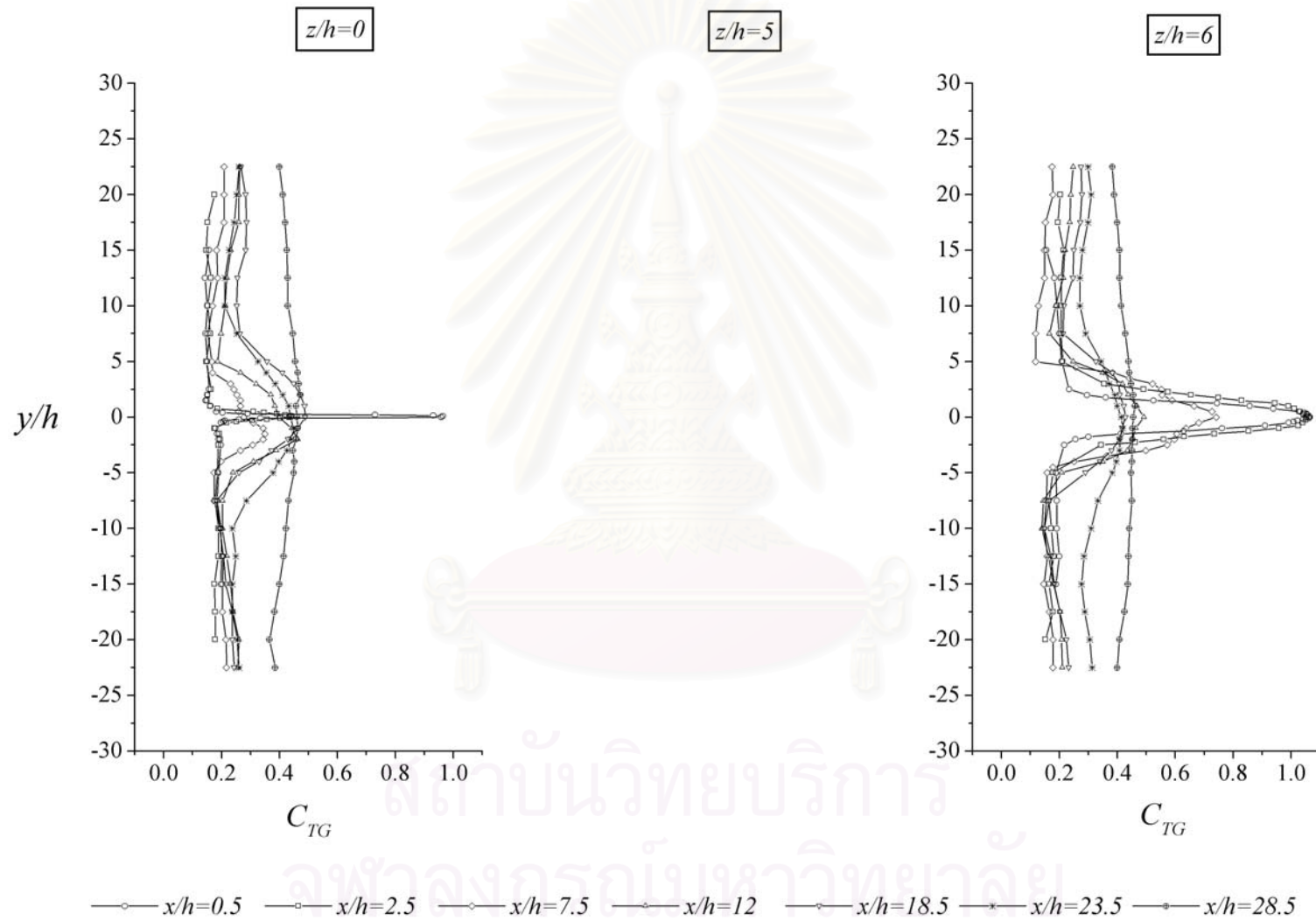
รูปที่ 3.32.รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวีจันผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L120i



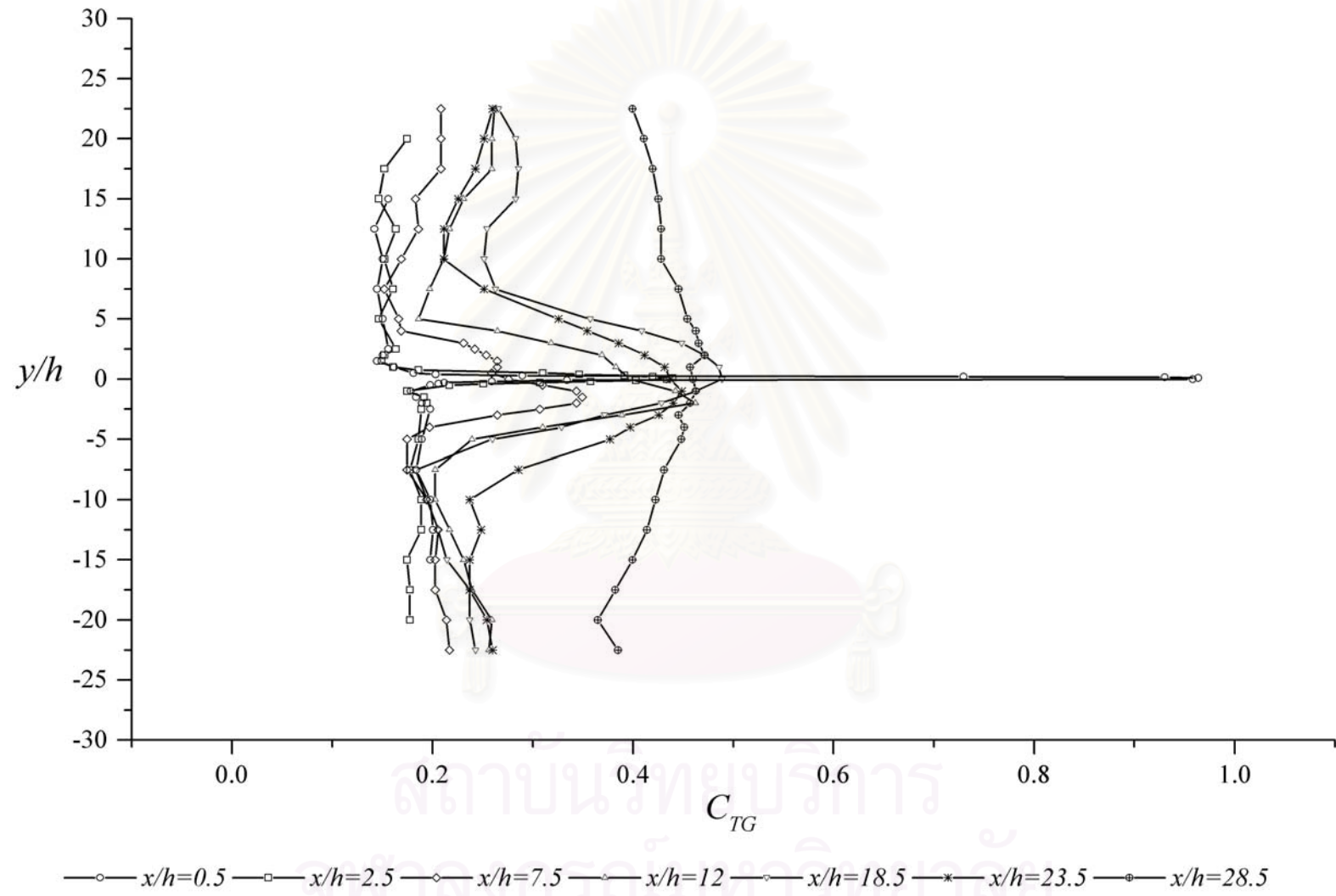
รูปที่ 3.33.รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L120i ที่ $z/h=0$ (Apex)



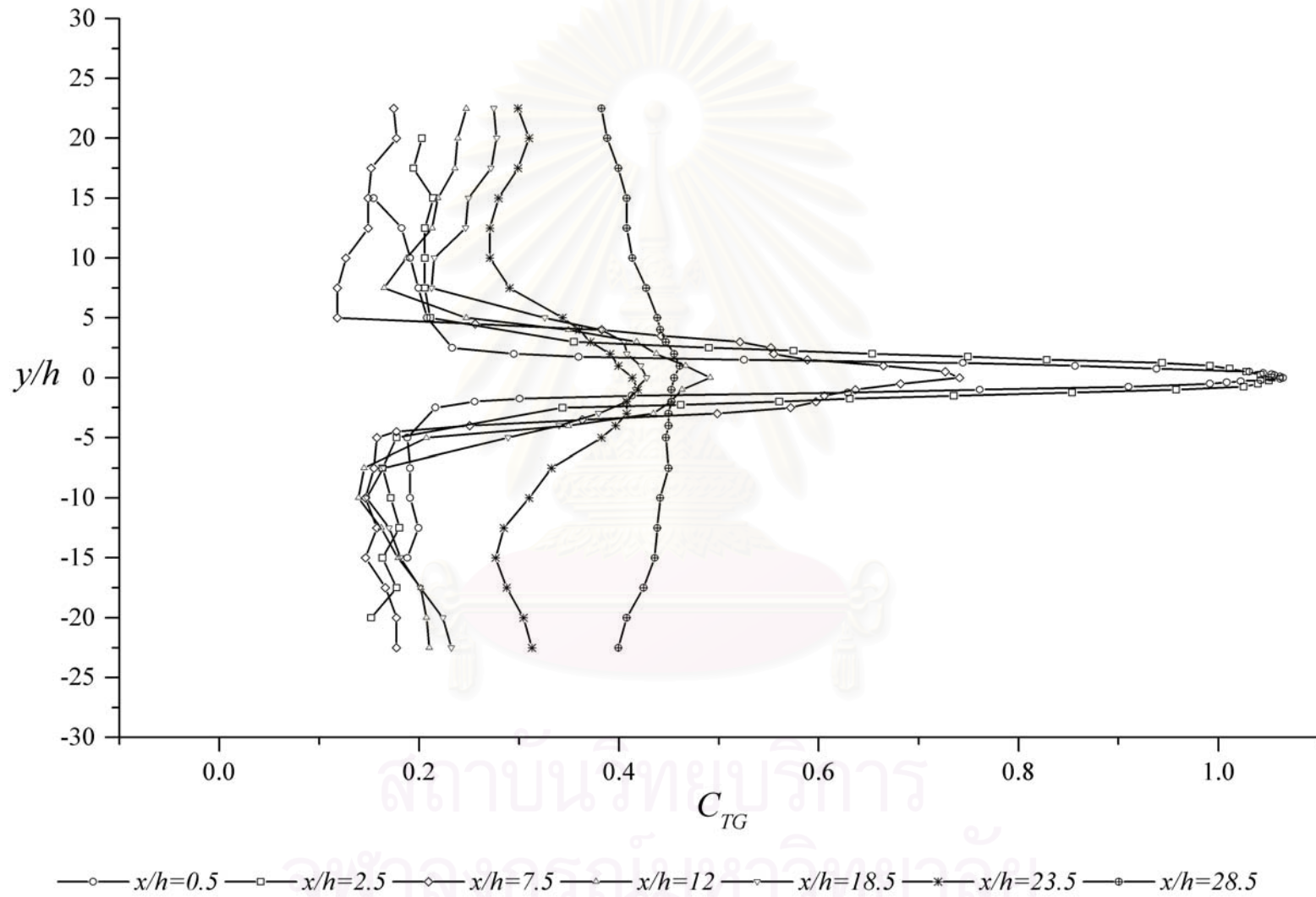
รูปที่ 3.34 รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบแบบวงรีตามแนวแกนการไหลในกรณี L120i ที่ $z/h=5$ (Base)



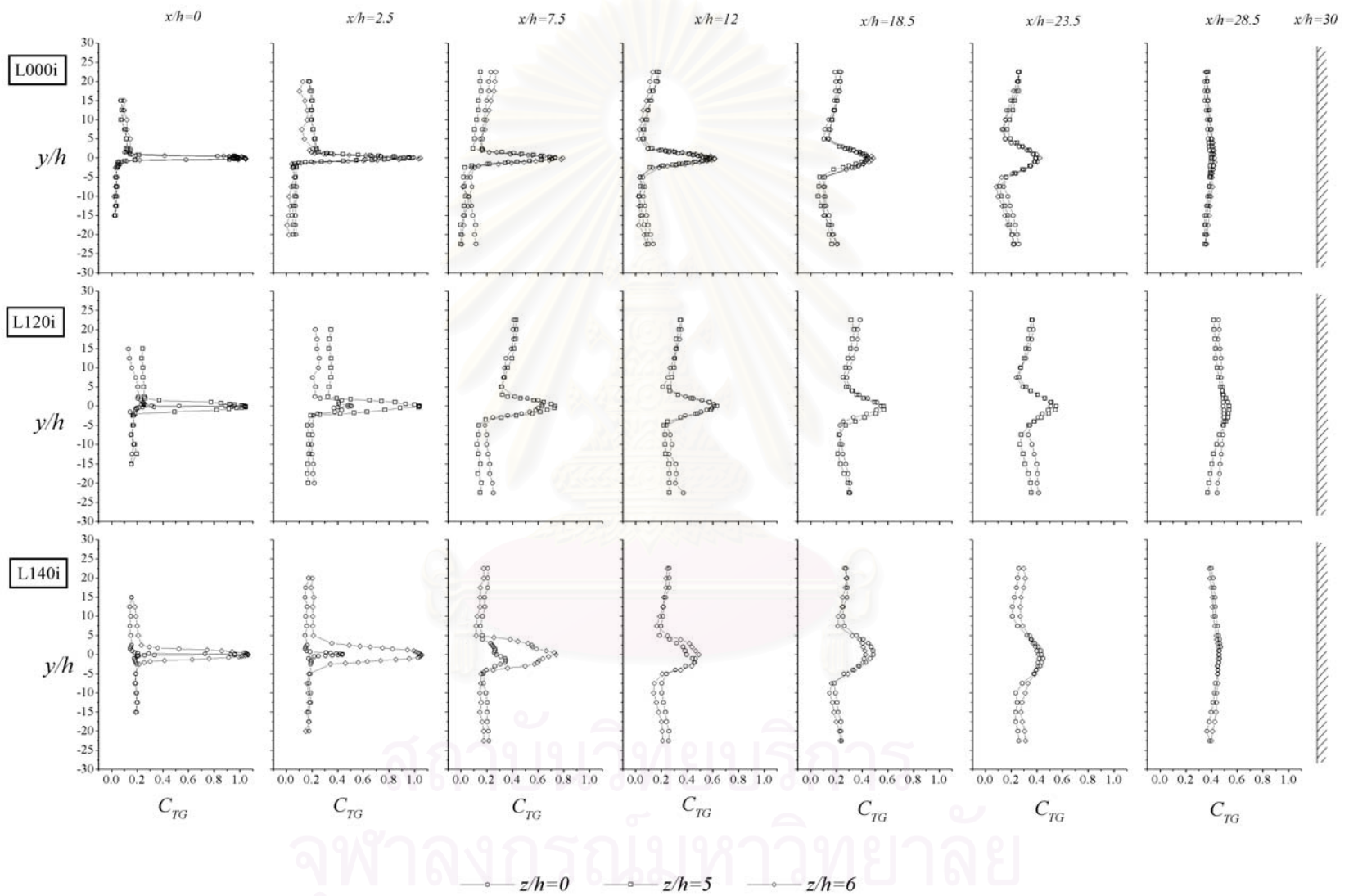
รูปที่ 3.35.รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวีงชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L140i



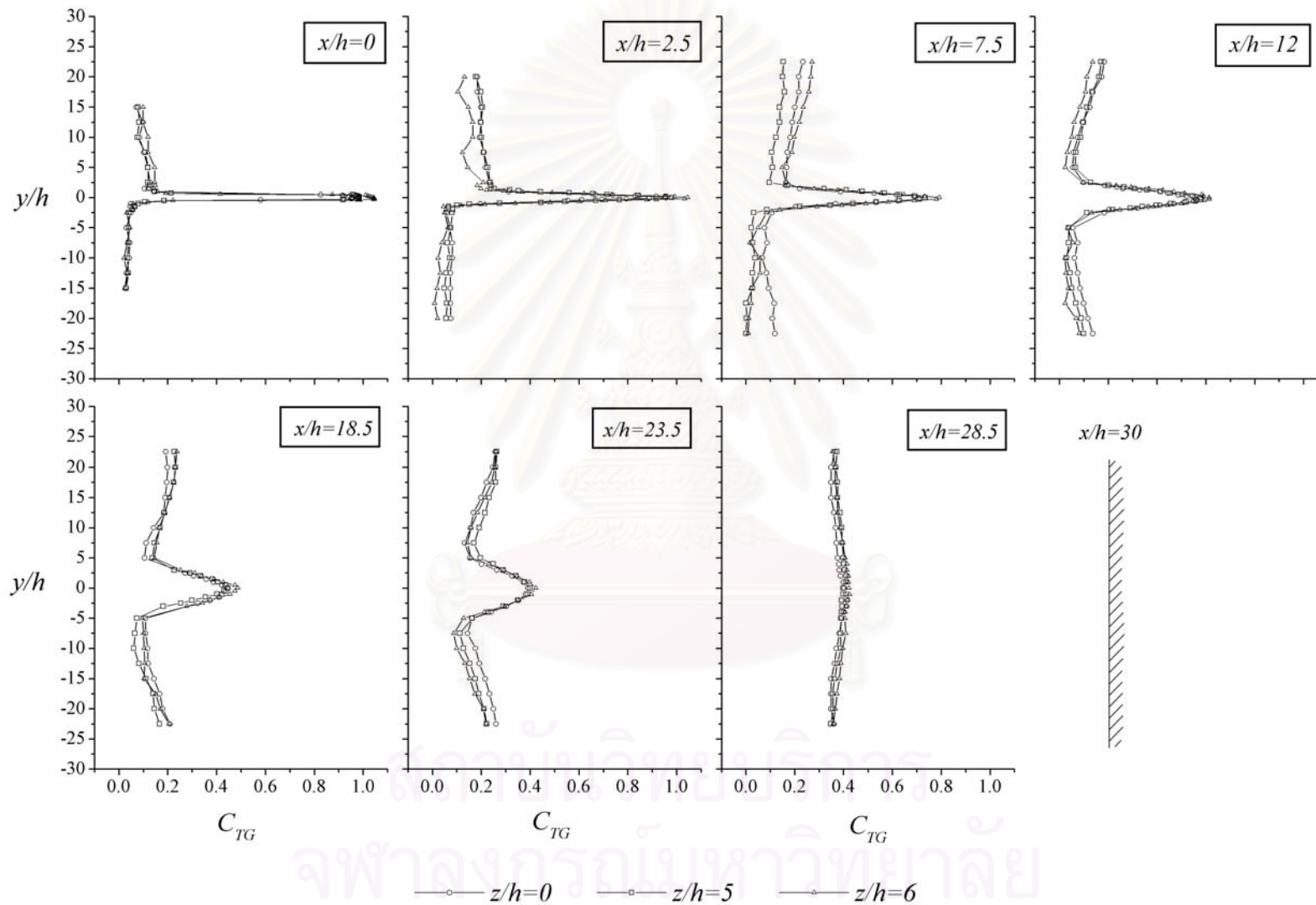
รูปที่ 3.36 รูปร่างการพัฒนาดำของเจ็ทระนาบแบบวิ้งขนนึ่งตามแนวแกนการไหลในกรณี L140i ที่ $z/h=0$ (Apex)



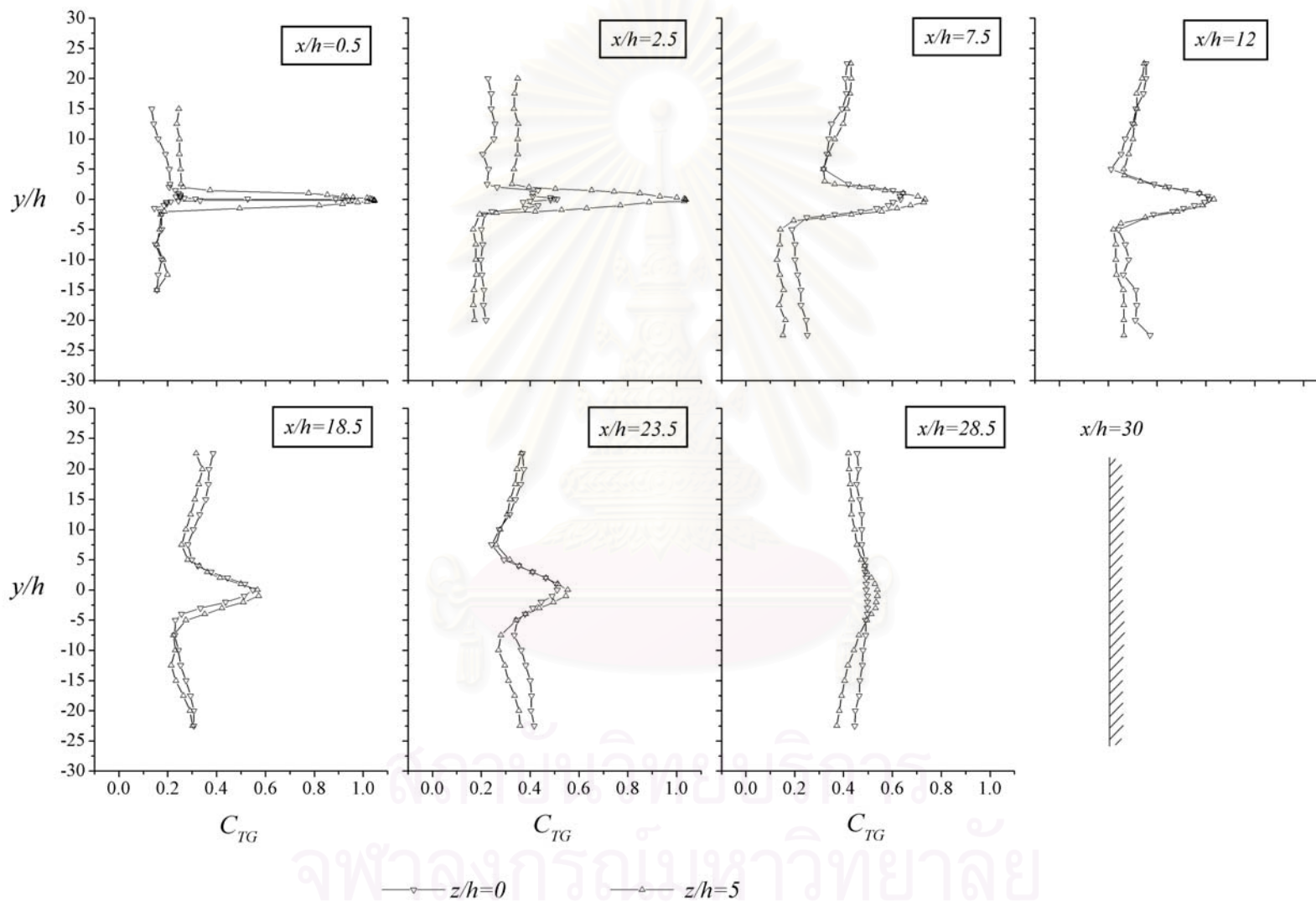
รูปที่ 3.37.รูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบแบบวงรีตามแนวแกนการไหลในกรณี L140i ที่ $z/h=6$ (Base)



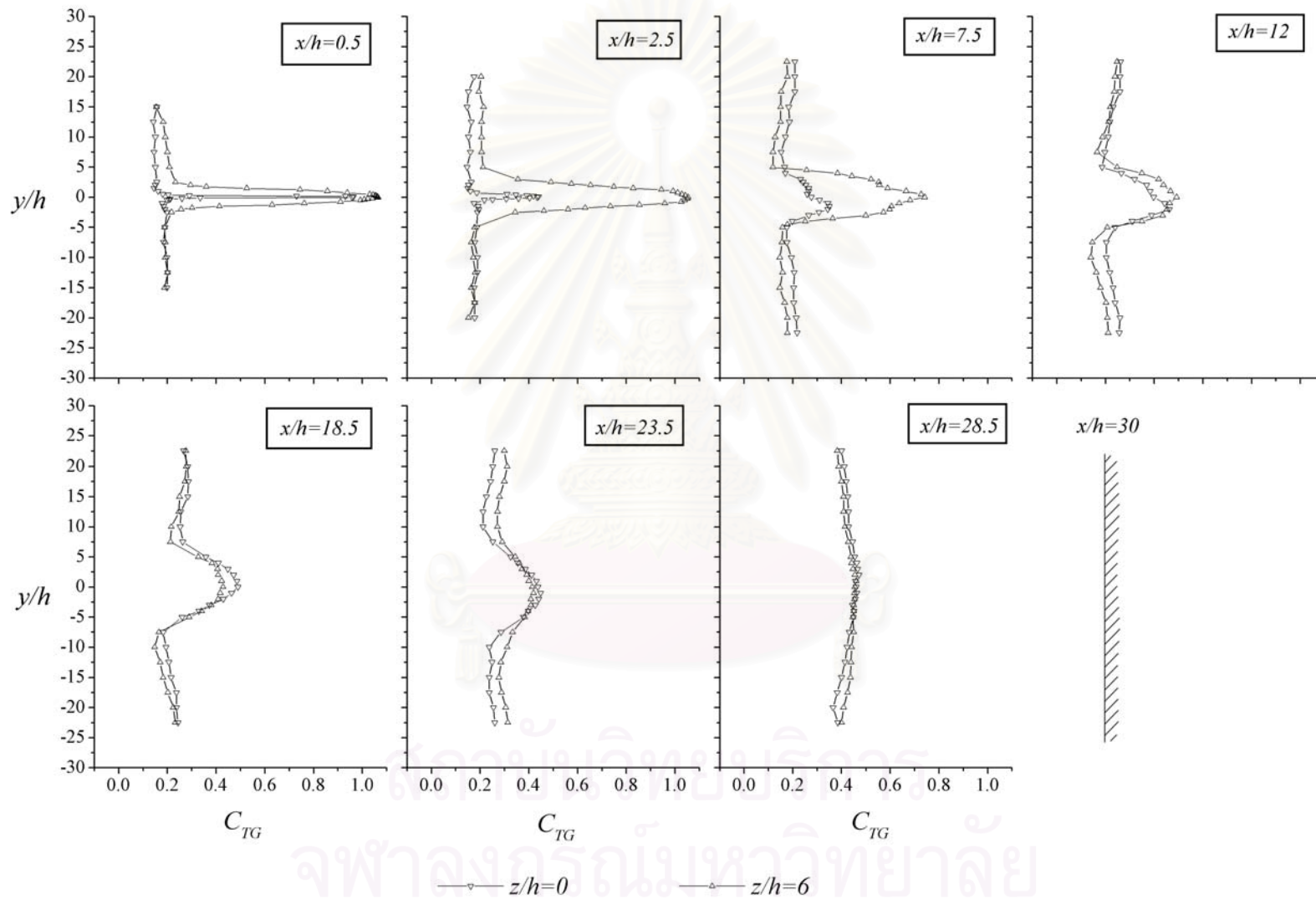
รูปที่ 3.38. การพัฒนาตัวของเจี๊ระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล



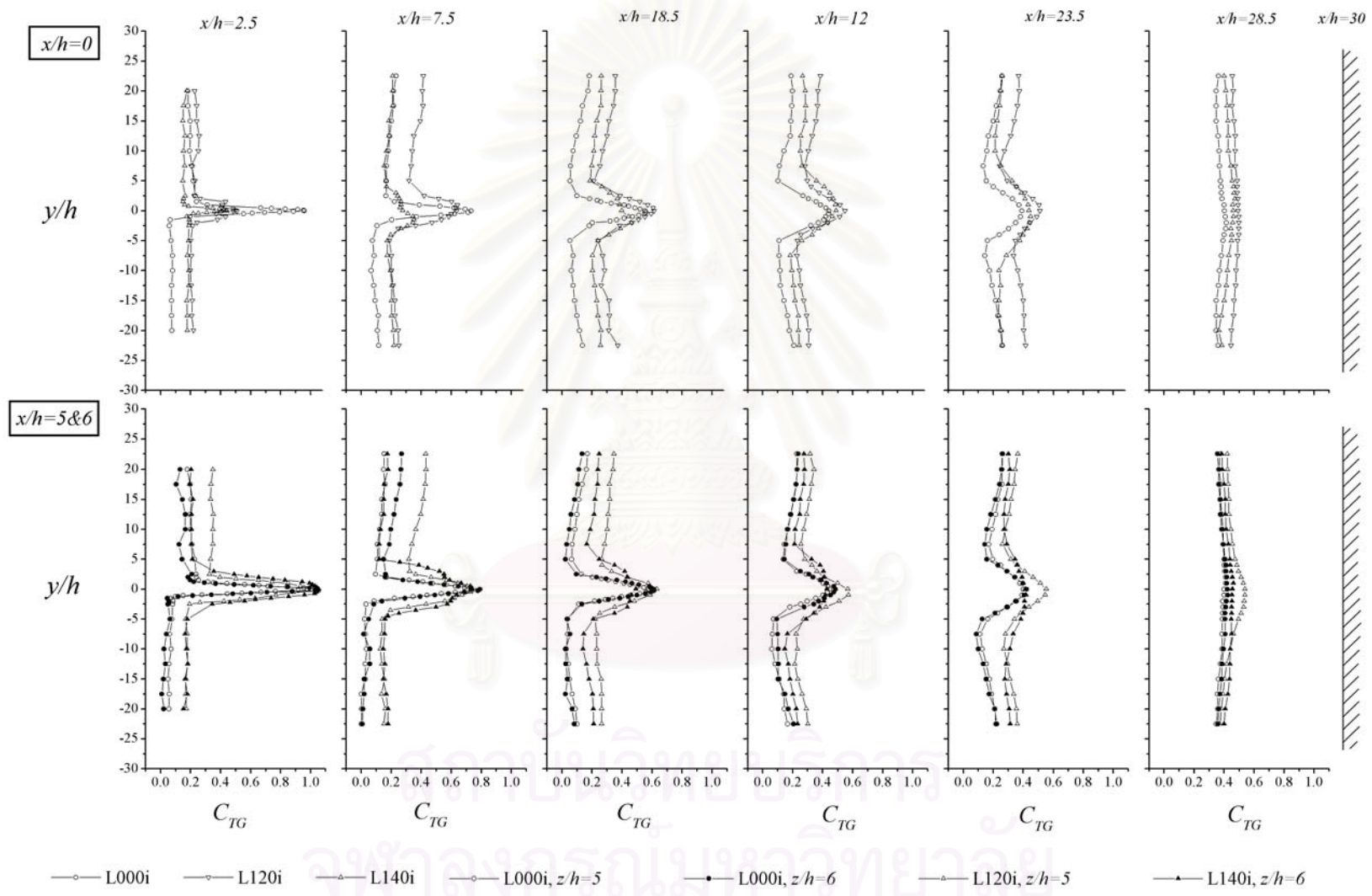
รูปที่ 3.39. การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวงจรมันนิ่งตามแนวแกนการไหลในกรณี L000i



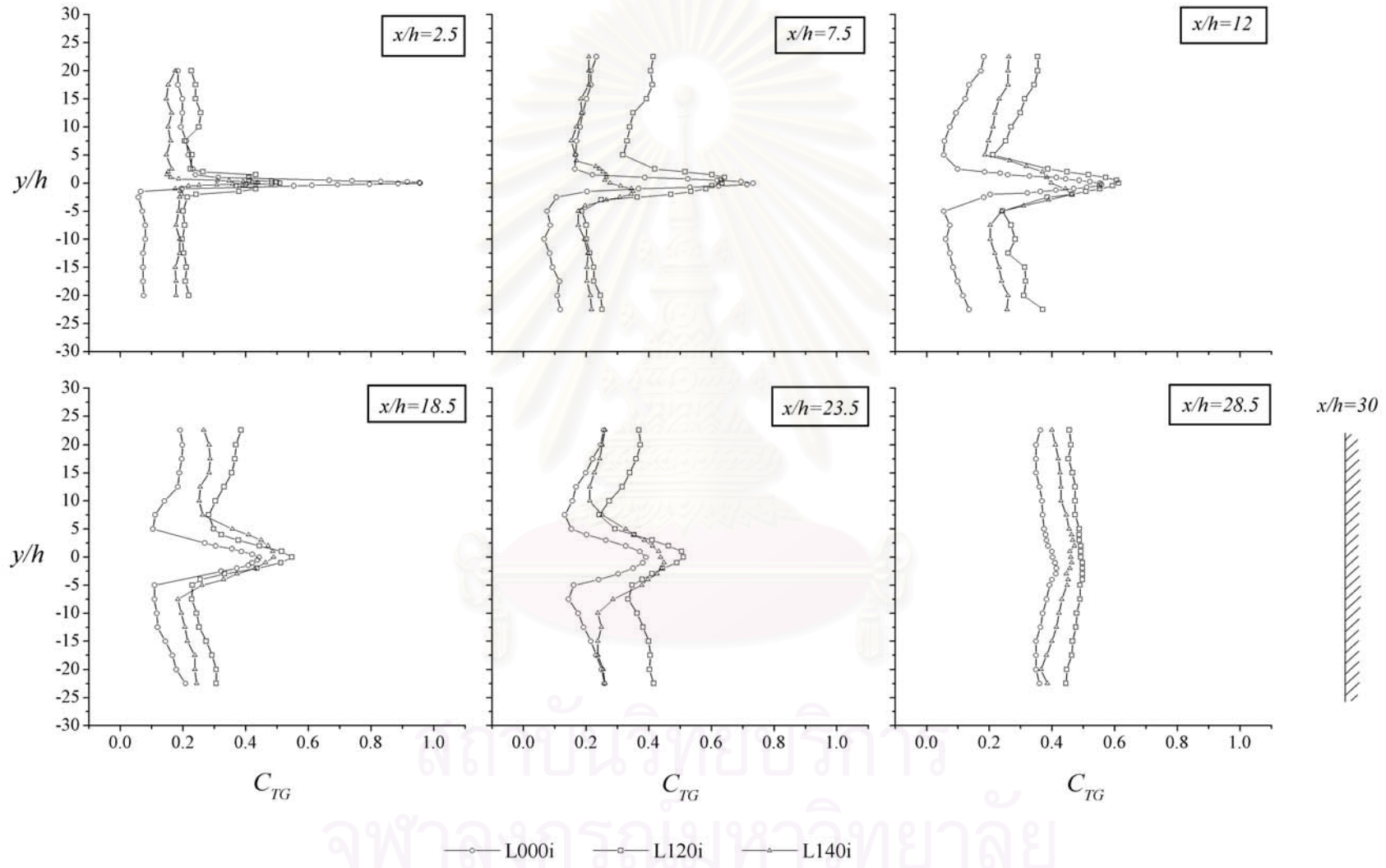
รูปที่ 3.40. การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวingspanning ตามแนวแกนการไหลในกรณี L120i



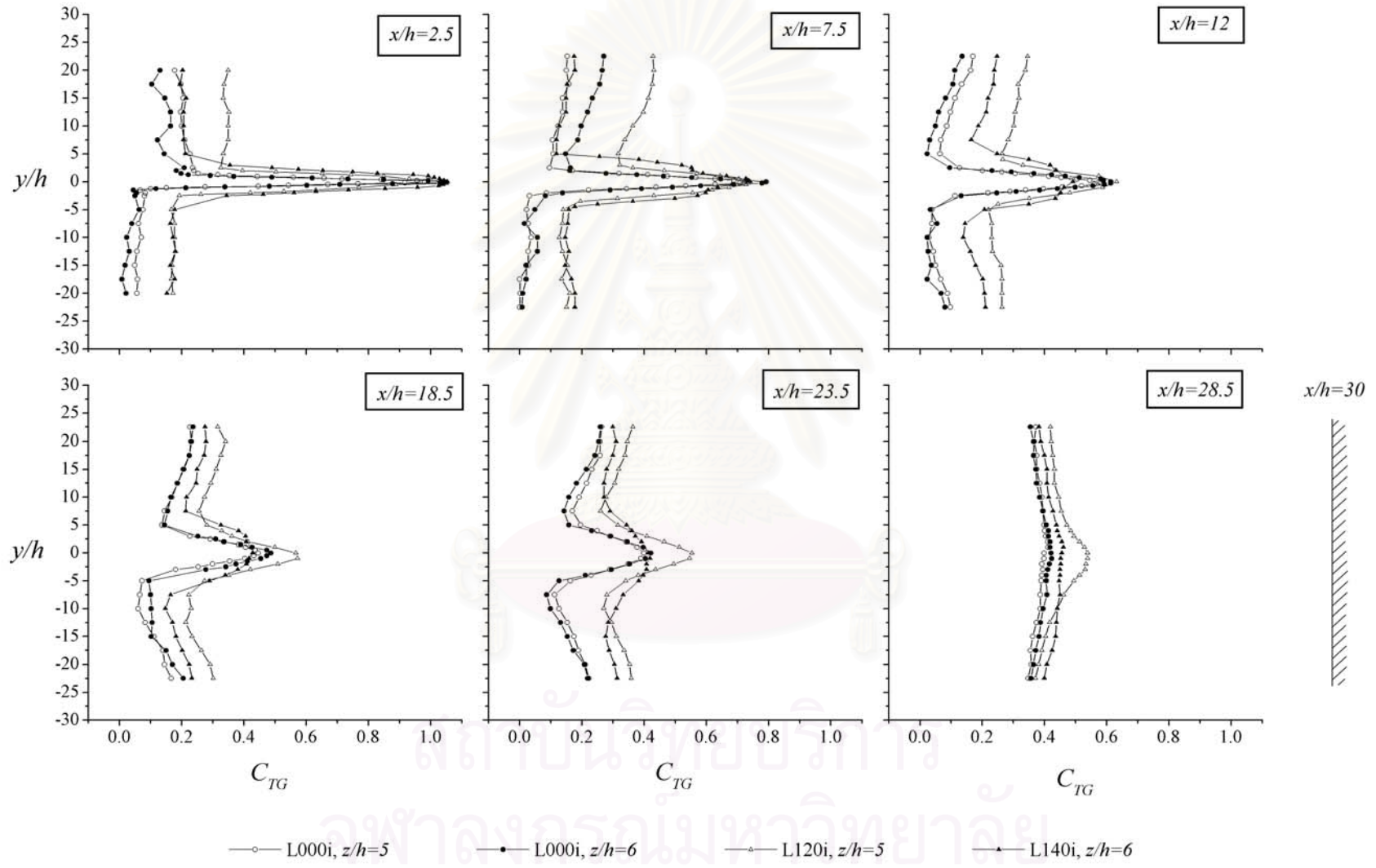
รูปที่ 3.41 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบโค้งขนานตามแนวแกนการไหลในกรณี L140i



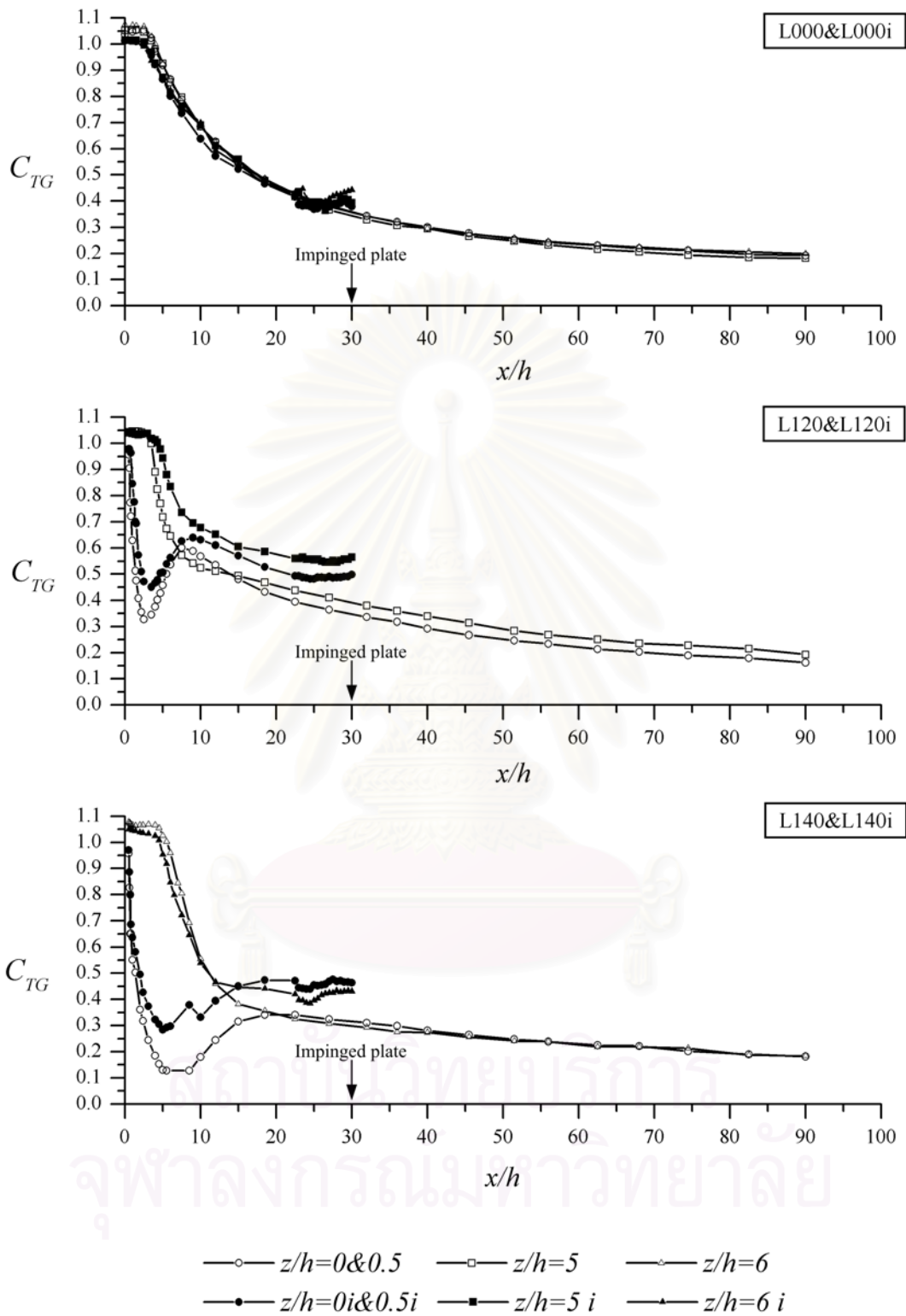
รูปที่ 3.42 การพัฒนาตัวของเคอร์เนลของเวกซ์ตามแนวแกนการไหล



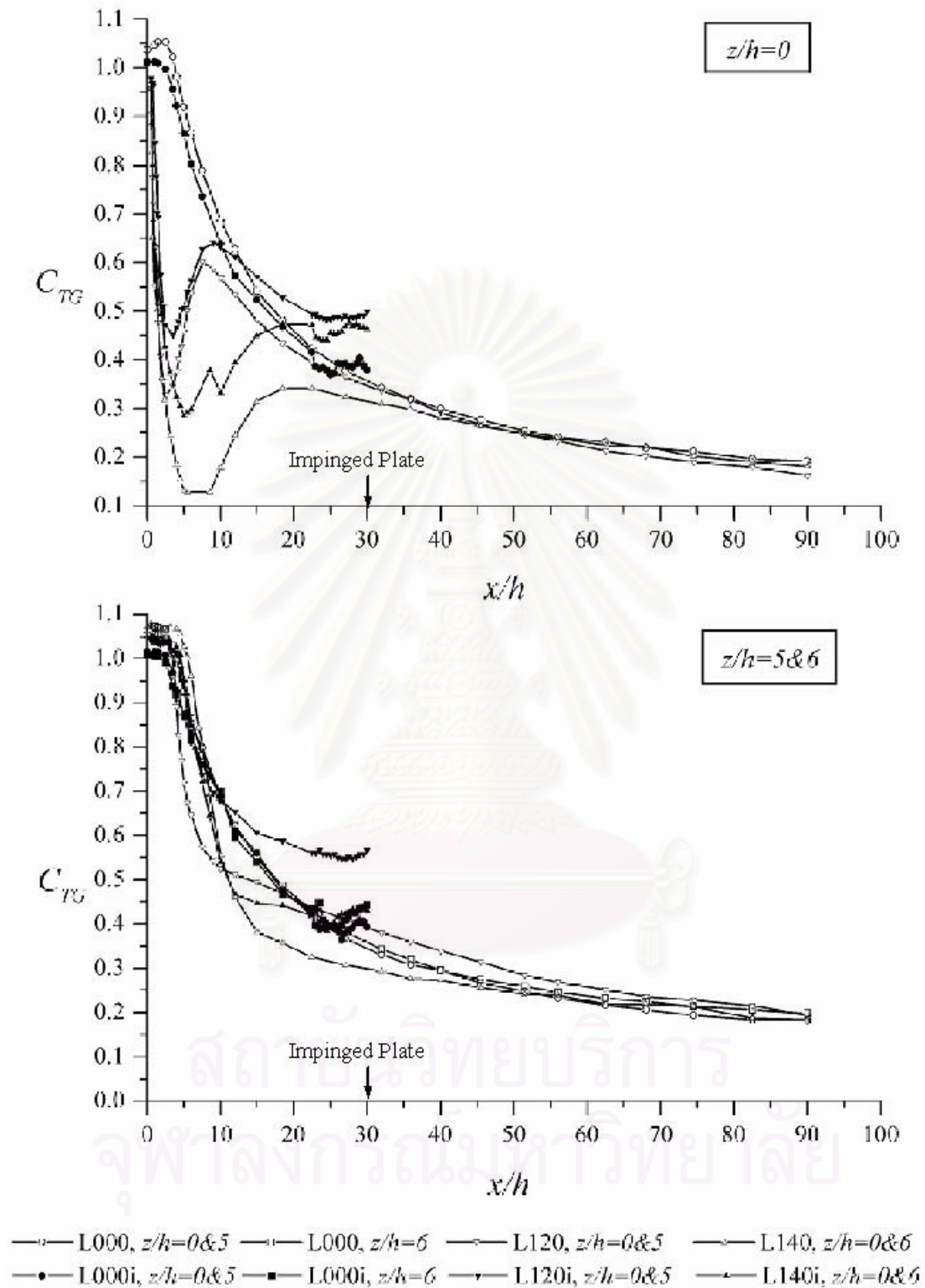
รูปที่ 3.43. การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=0$ (Apex)



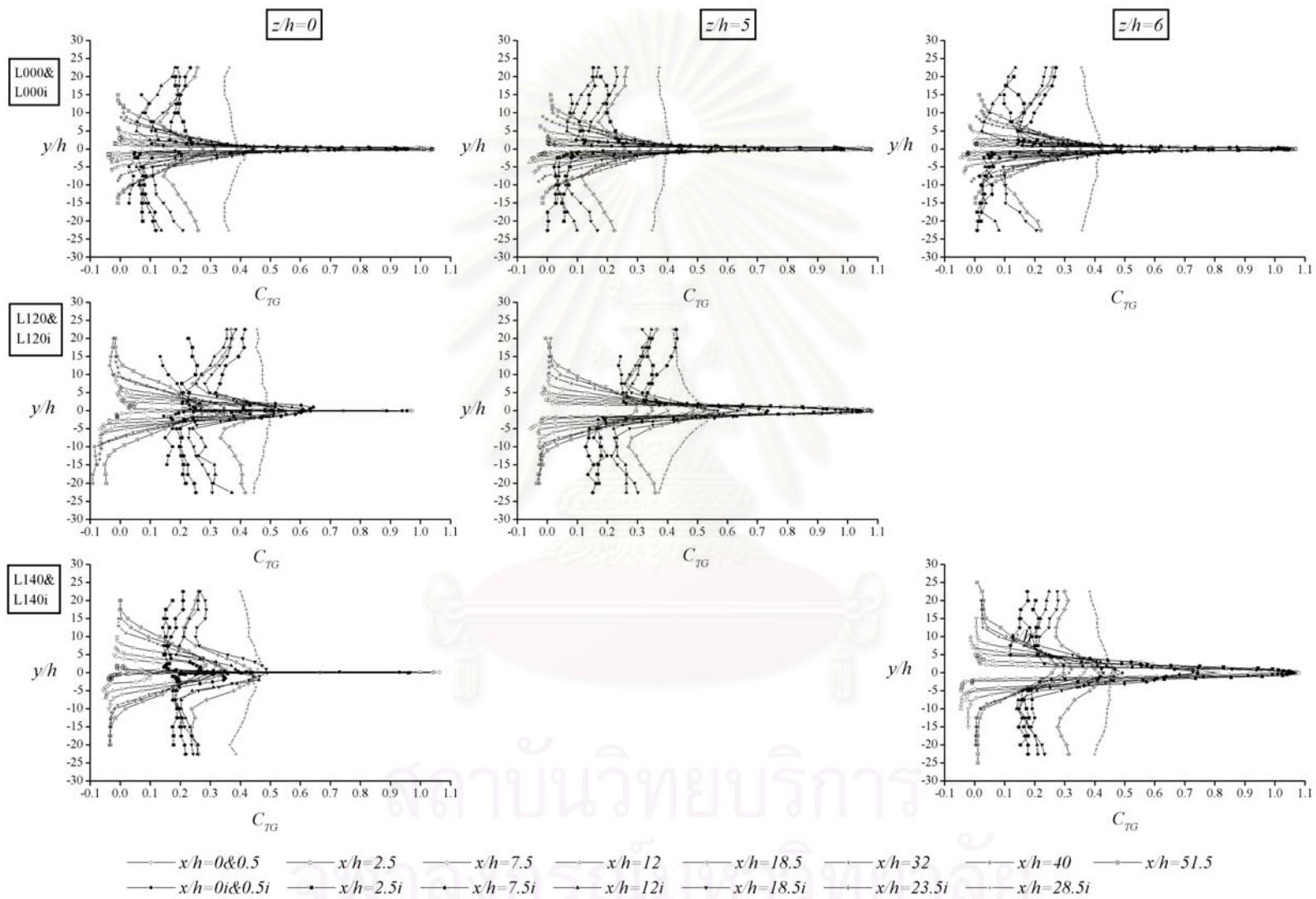
รูปที่ 3.44 การพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบแบบวงขนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=5$ และ 6 (Base)



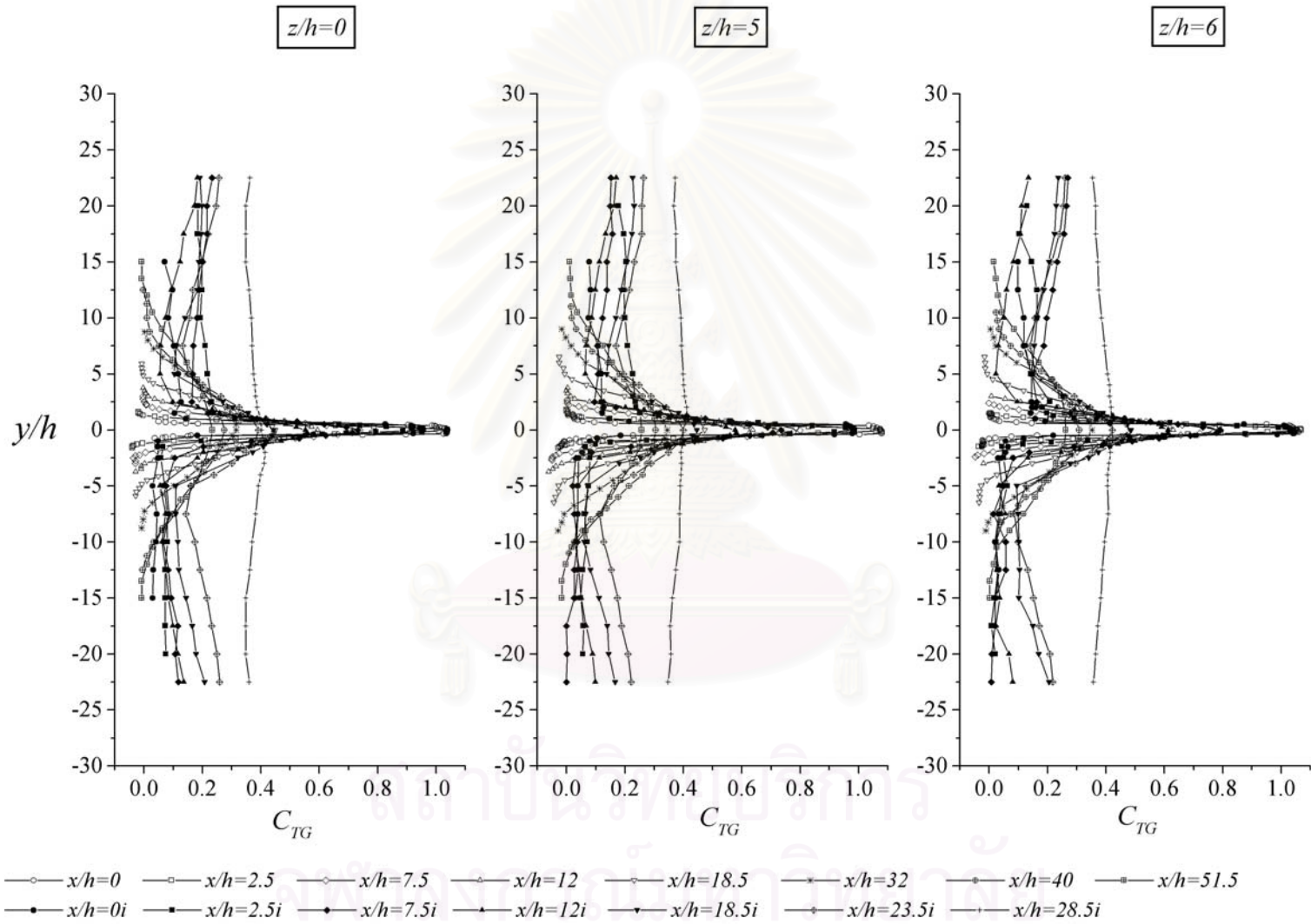
รูปที่ 3.45 เปรียบเทียบการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบว้างชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $y=0$



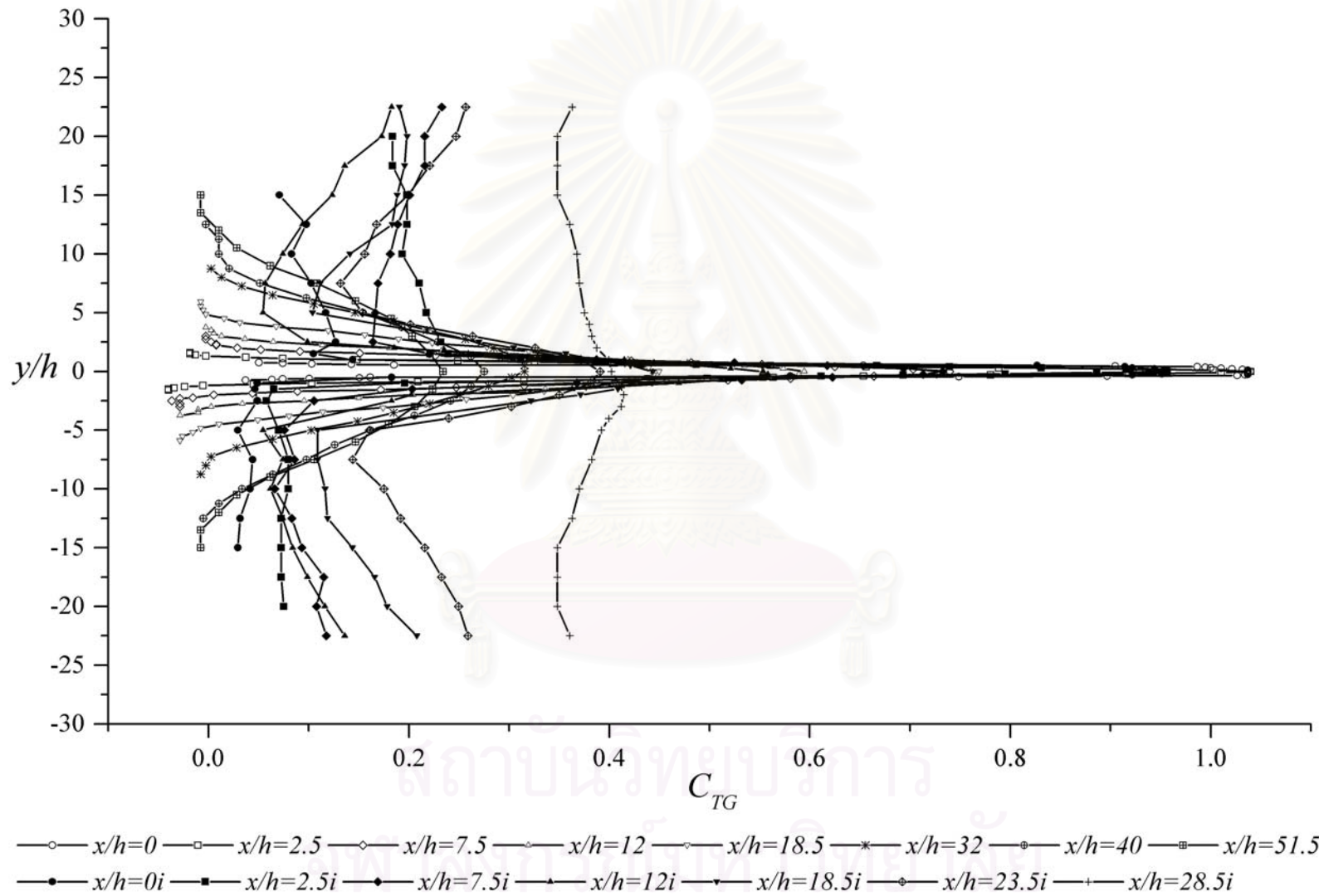
รูปที่ 3.46 เปรียบเทียบการลดลงของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบว้างขนพนังตามแนวแกนการไหล ที่ $y=0$



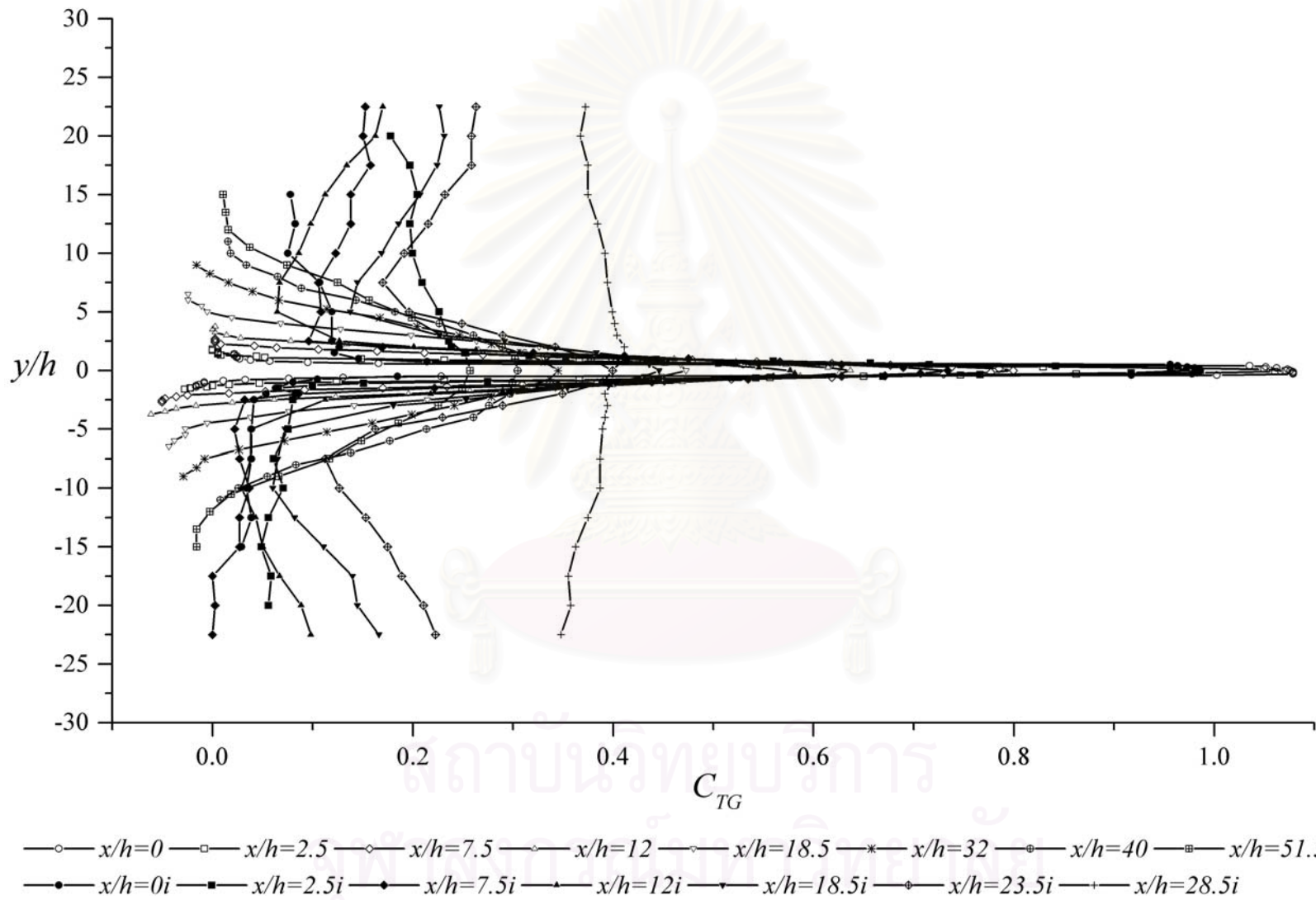
รูปที่ 3.47 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวงวนผนังตามแนวแกนการไหล



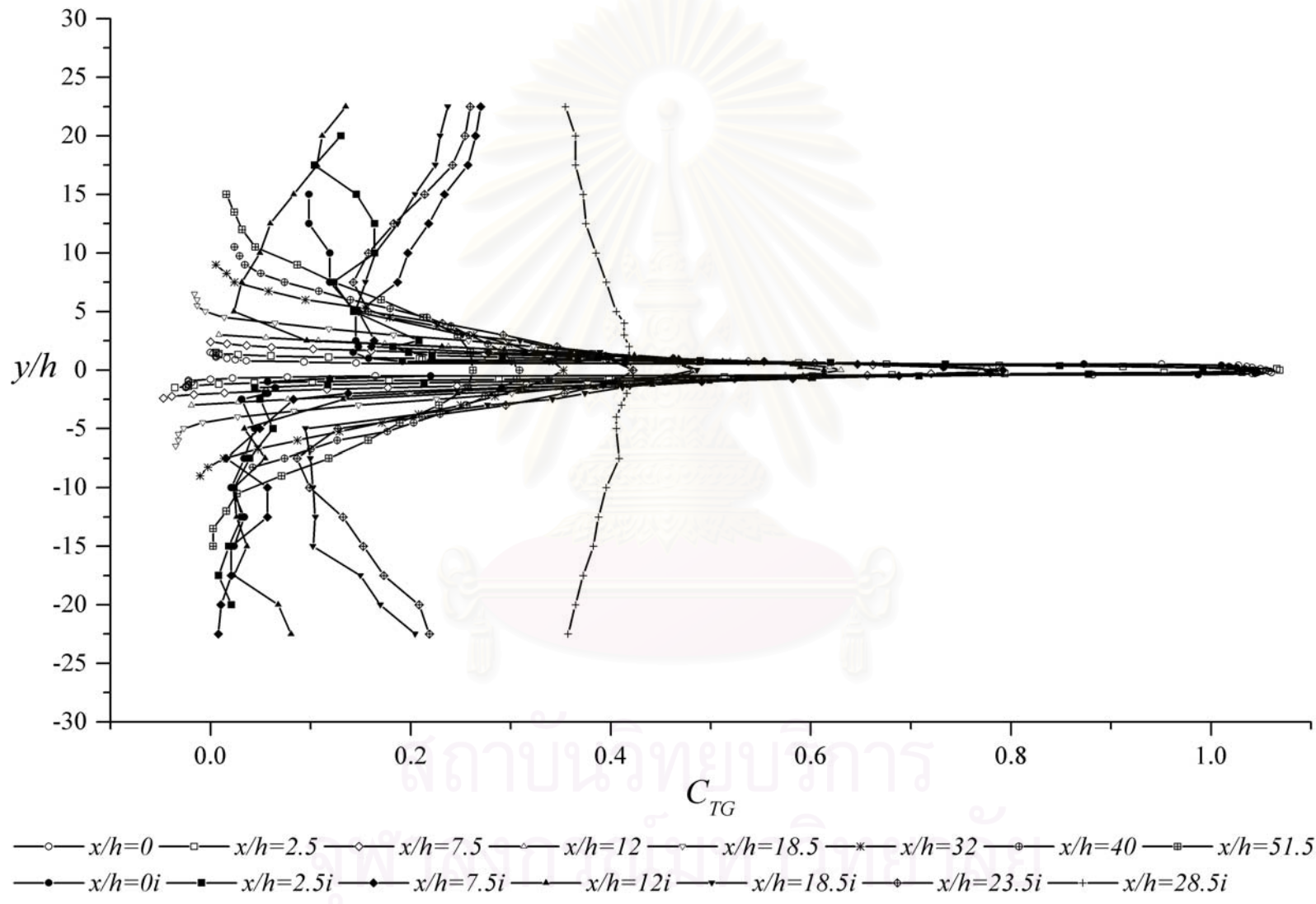
รูปที่ 3.48.เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวงขนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 และ L000i



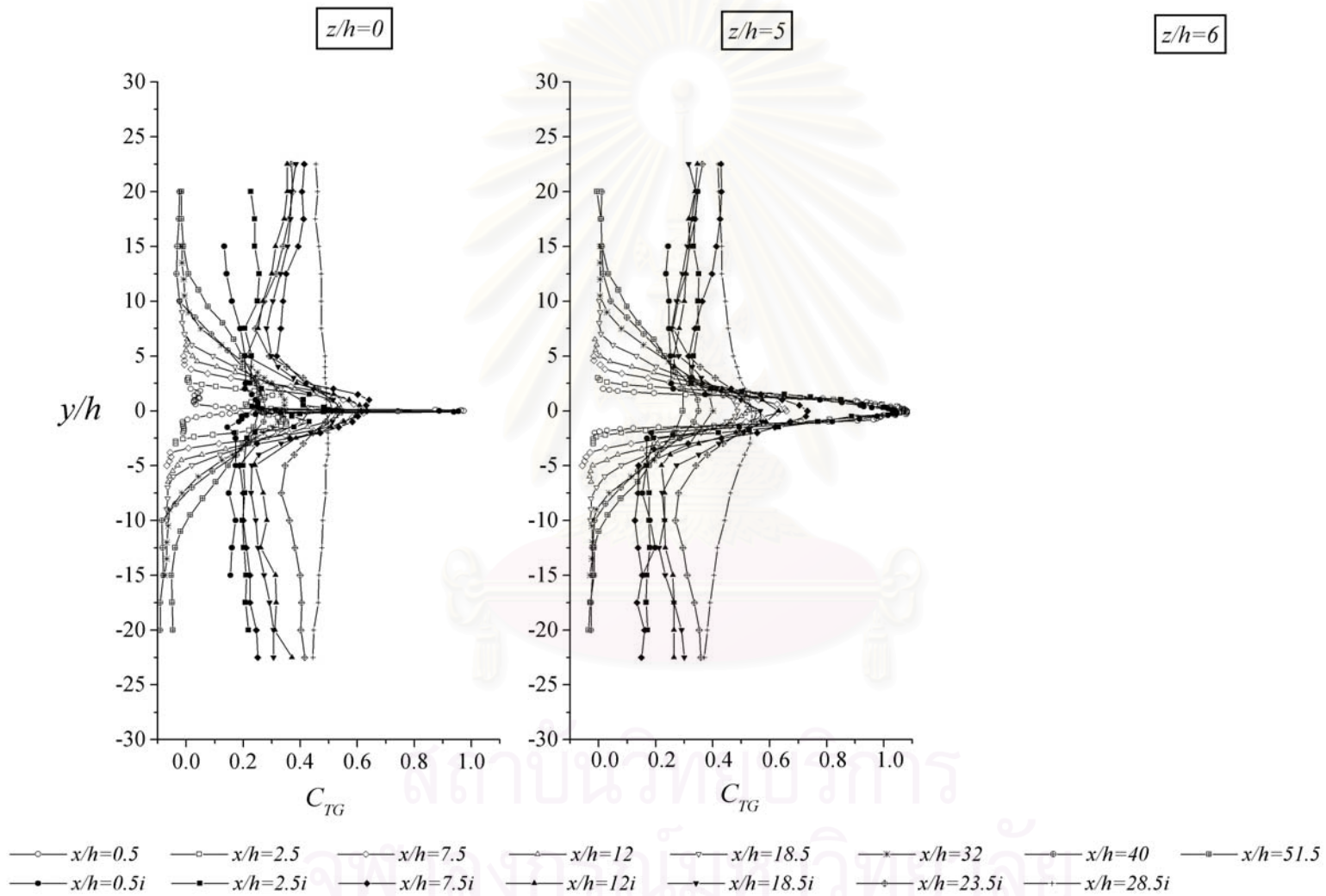
รูปที่ 3.49 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 และ L000i ที่ $z/h=0$



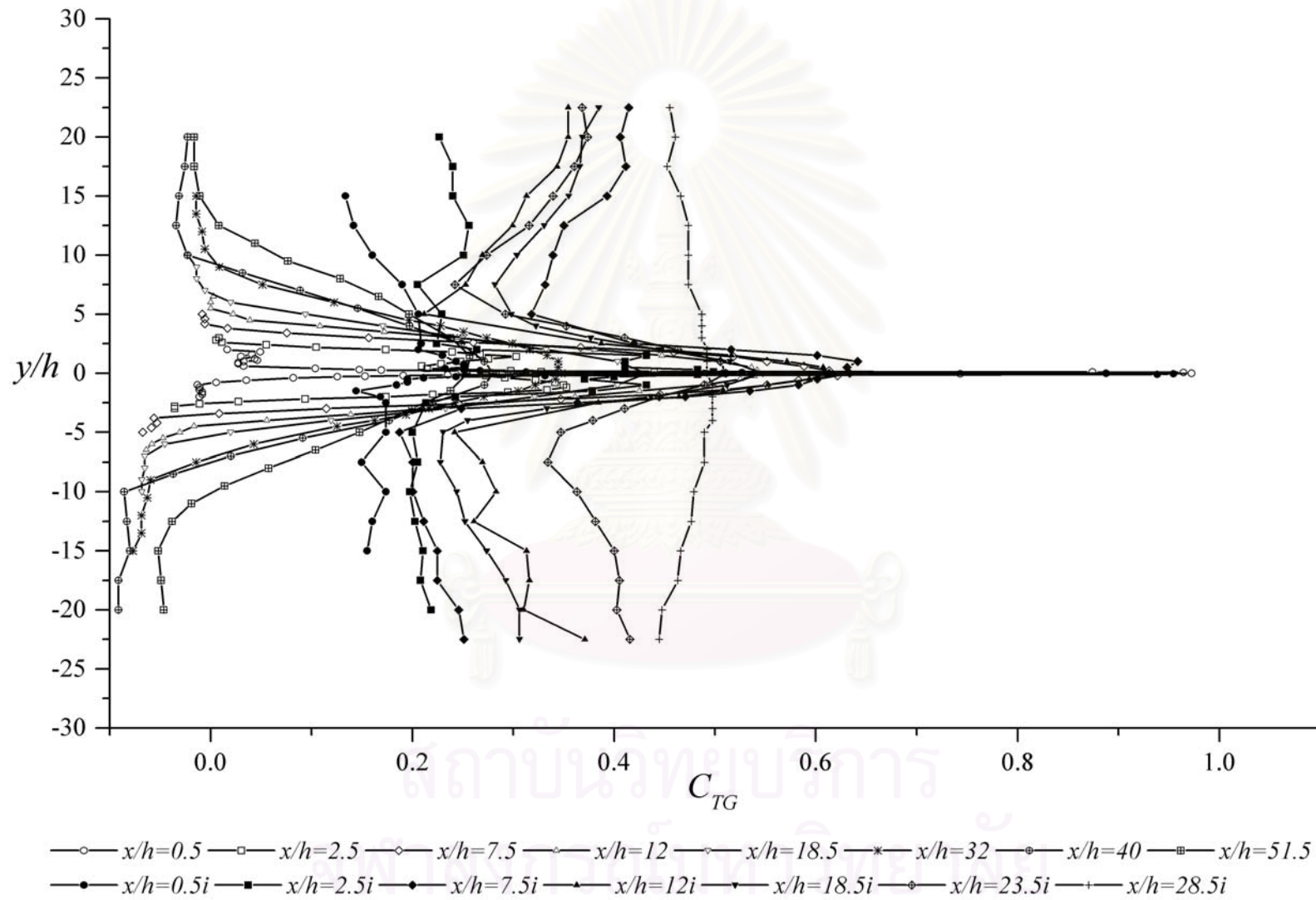
รูปที่ 3.50.เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังขนนางตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 และ L000i ที่ $z/h=5$



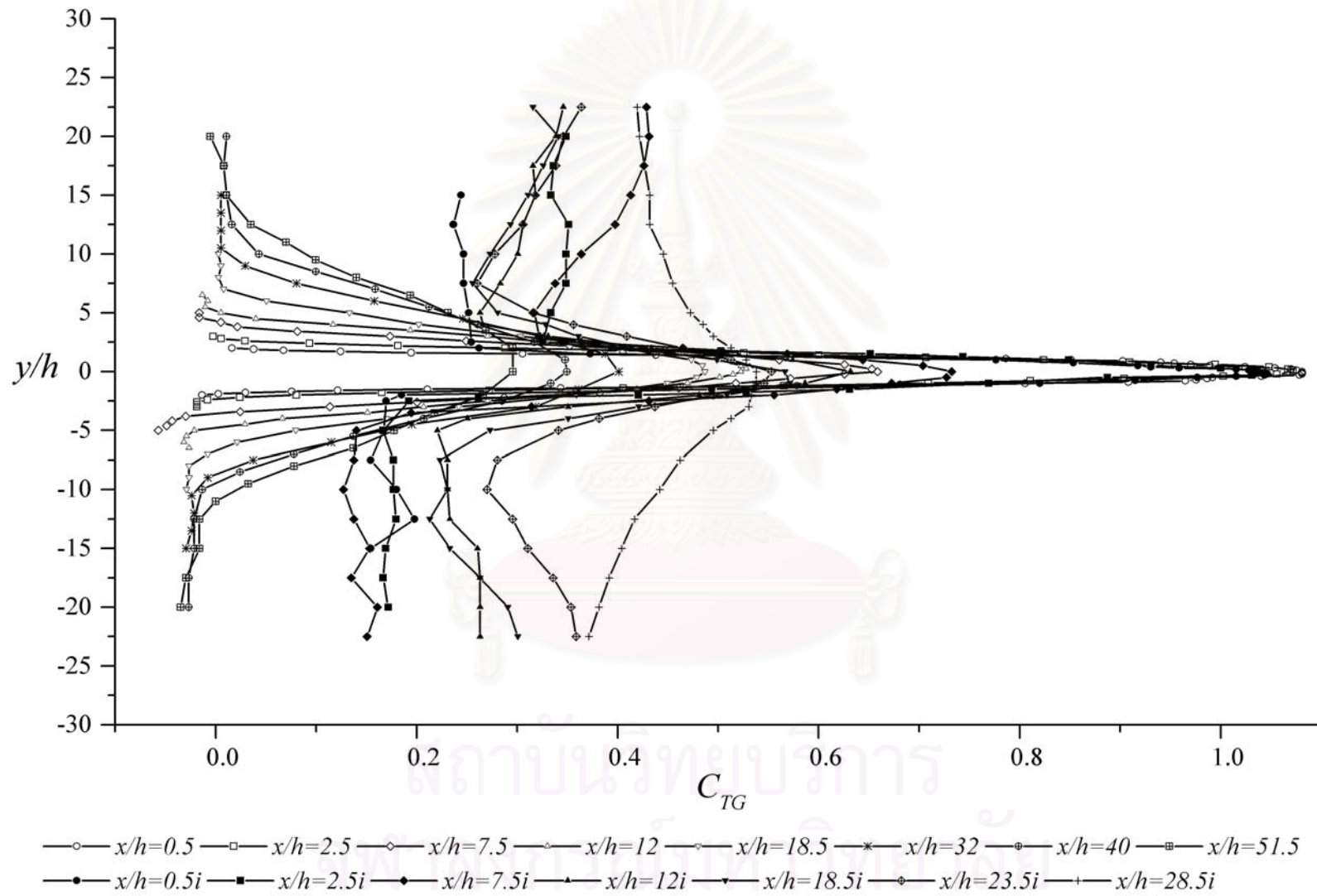
รูปที่ 3.51 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ่งขนนึ่งตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 และ L000i ที่ $z/h=6$



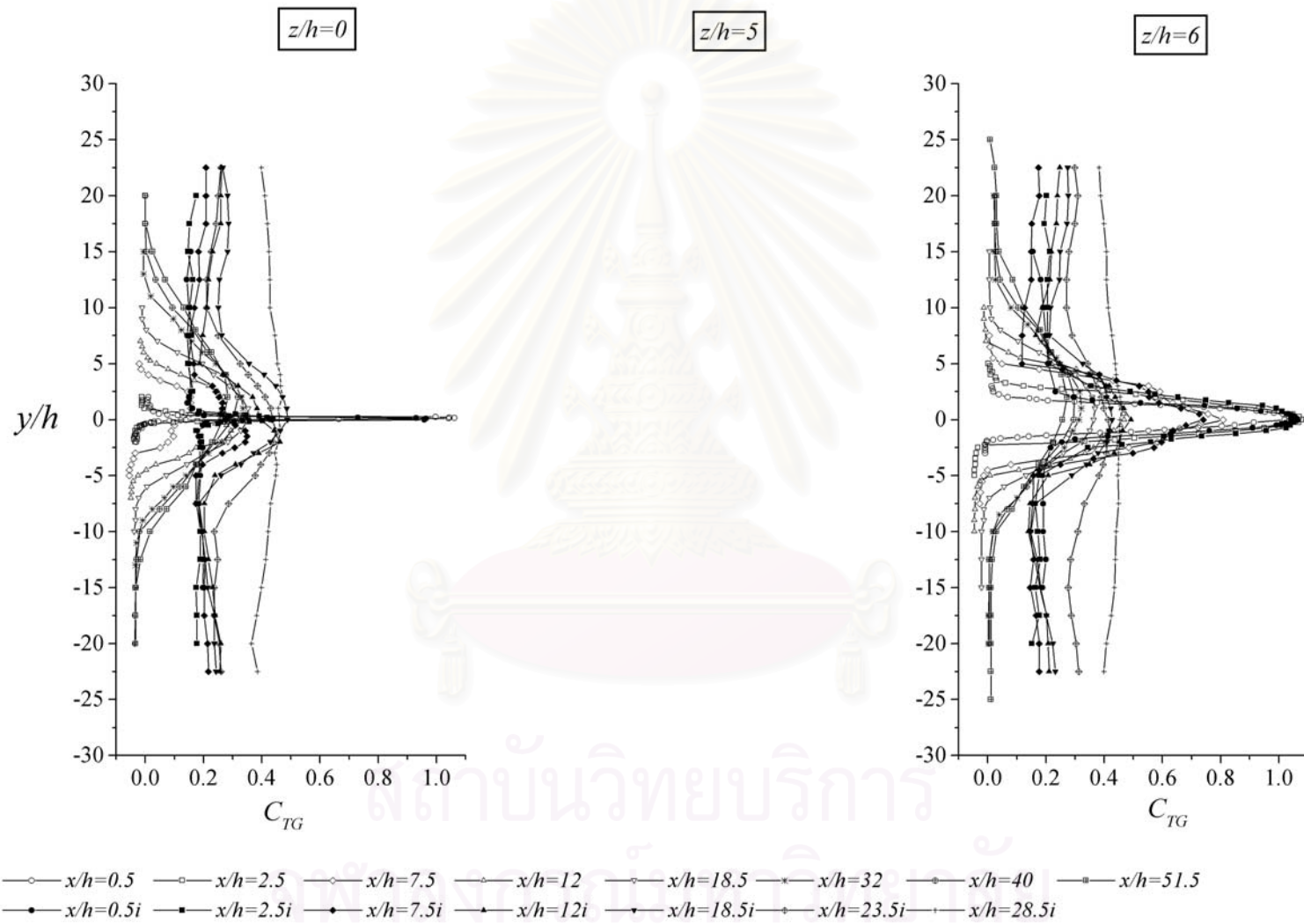
รูปที่ 3.52 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาดัชนีของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวงรีตามแนวแกนการไหลในกรณี L120 และ L120i



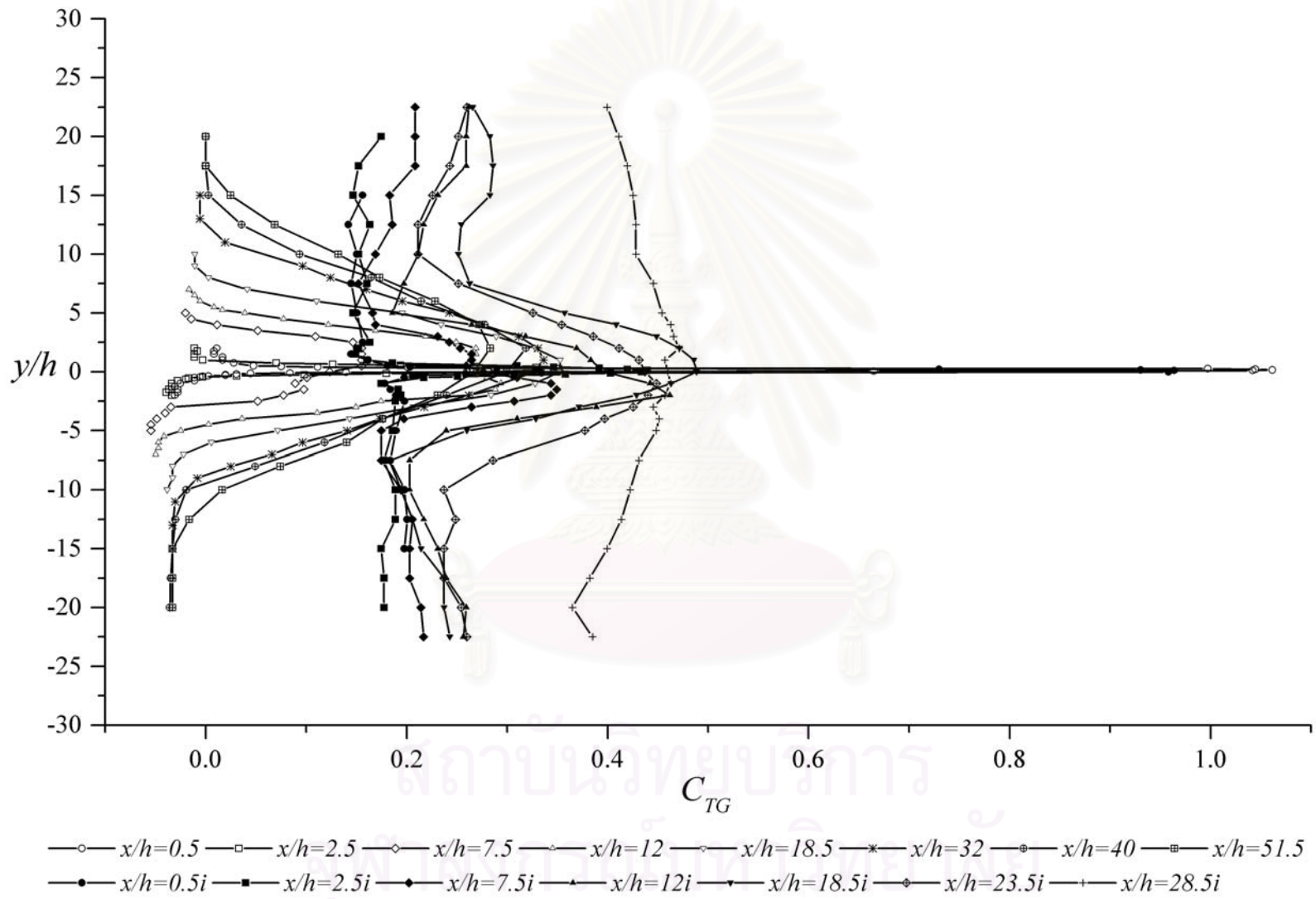
รูปที่ 3.53 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาดำของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังขนานตามแนวแกนการไหลในกรณี L120 และ L120i ที่ $z/h=0$ (Apex)



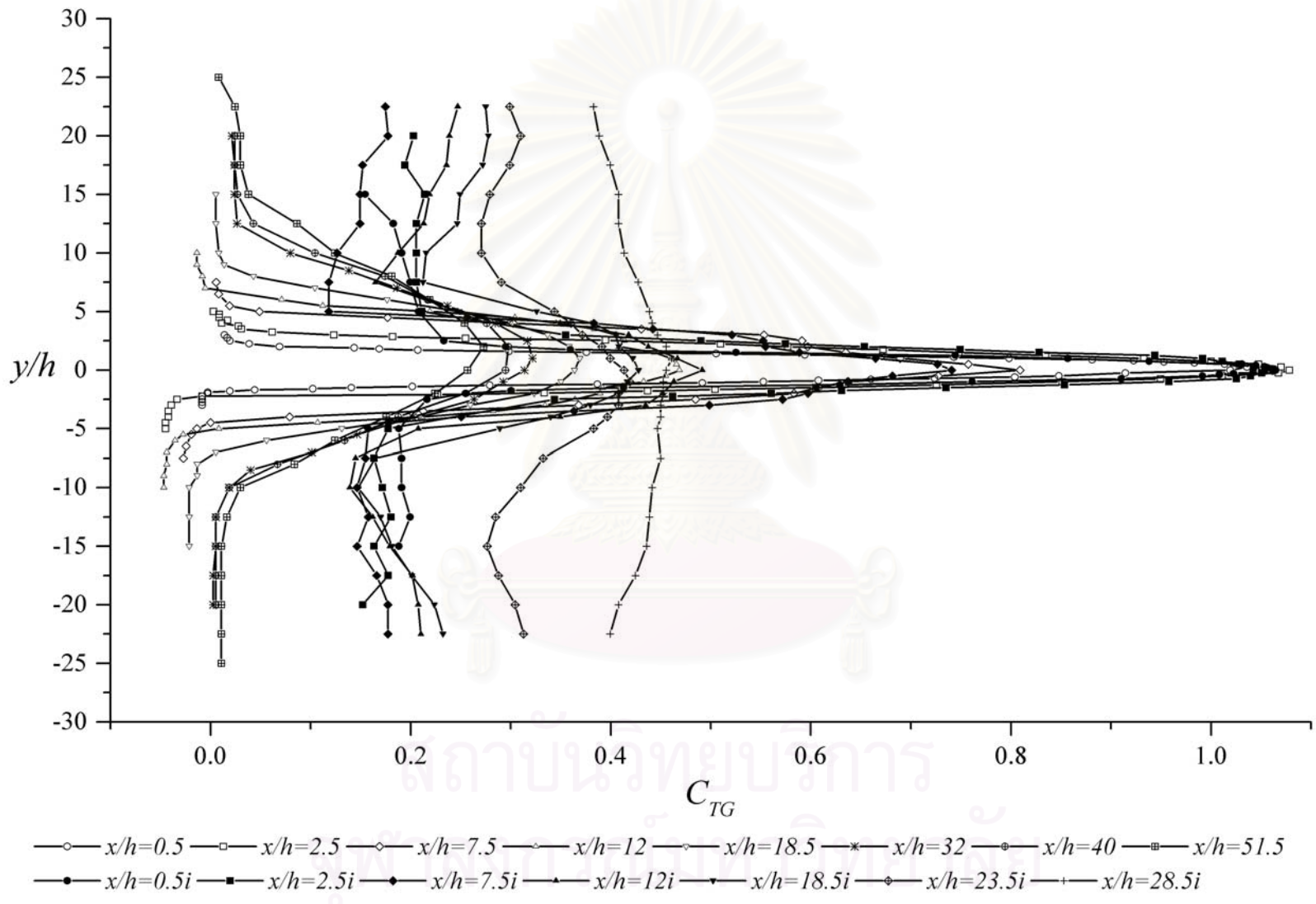
รูปที่ 3.54 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาดำของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบว้างขนานตามแนวแกนการไหลในกรณี L120 และ L120i ที่ $z/h=5$ (Base)



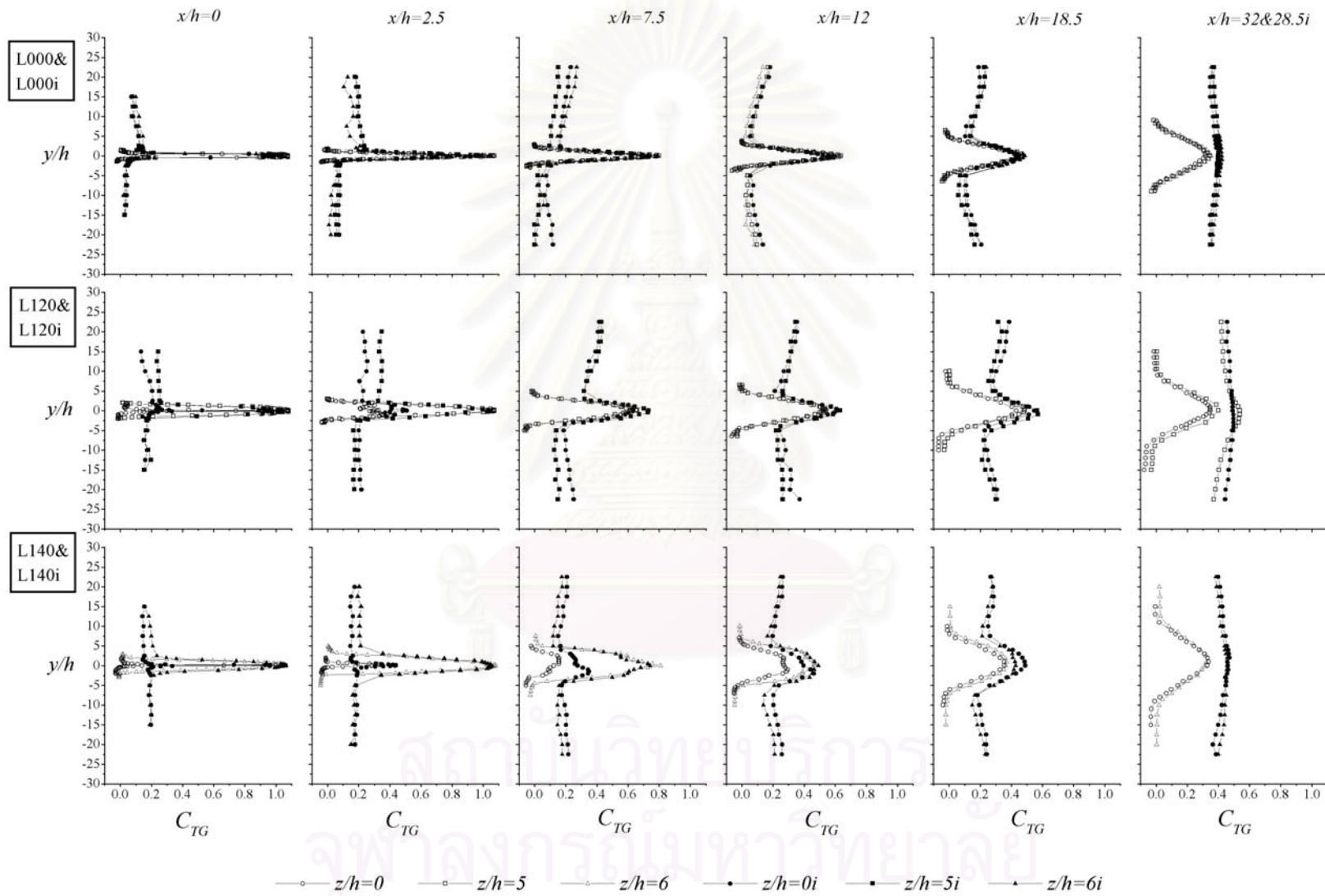
รูปที่ 3.55 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังขนนกตามแนวแกนการไหลในกรณี L140 และ L140i



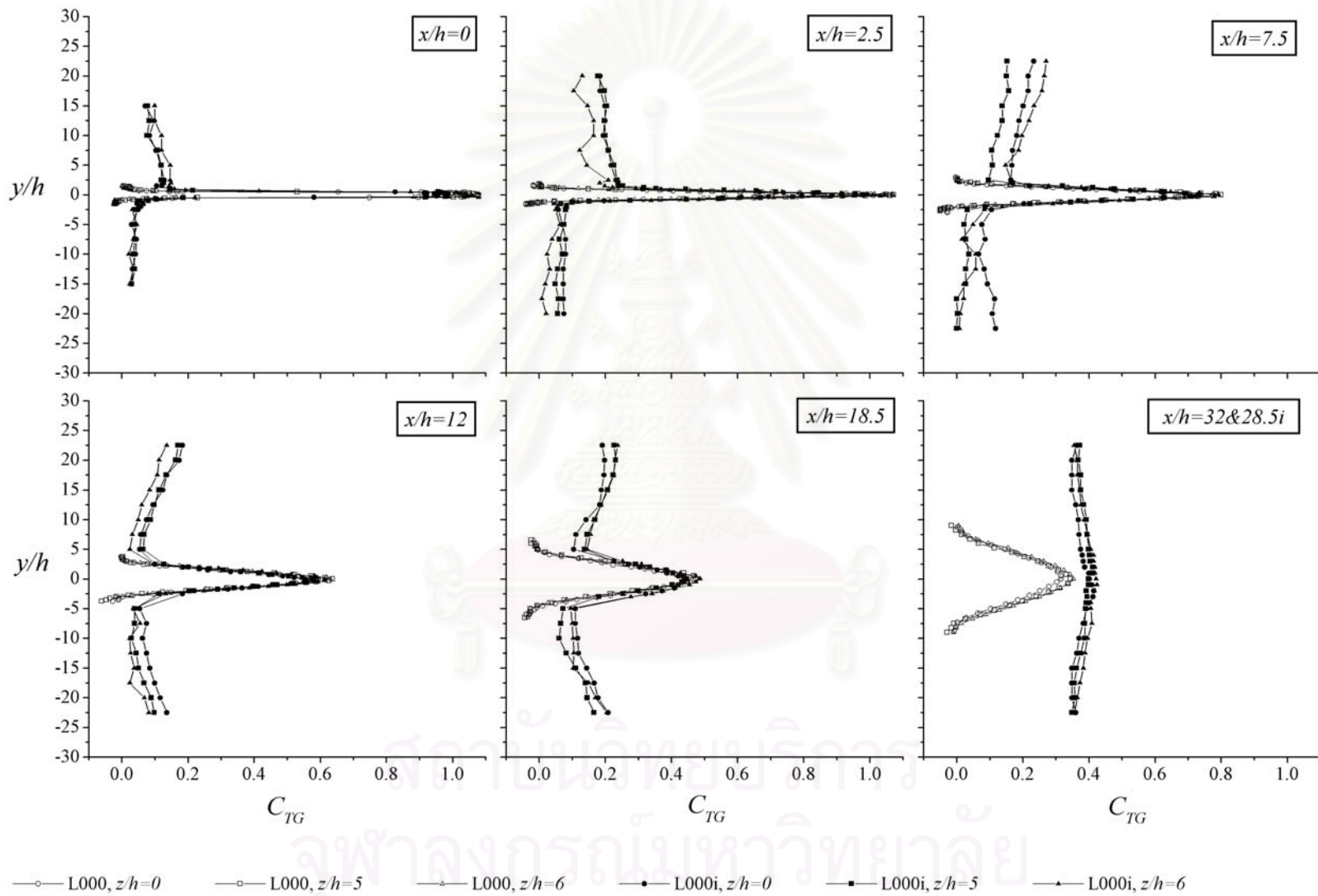
รูปที่ 3.56 เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบว้างชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L140 และ L140i ที่ $z/h = 0$ (Apex)



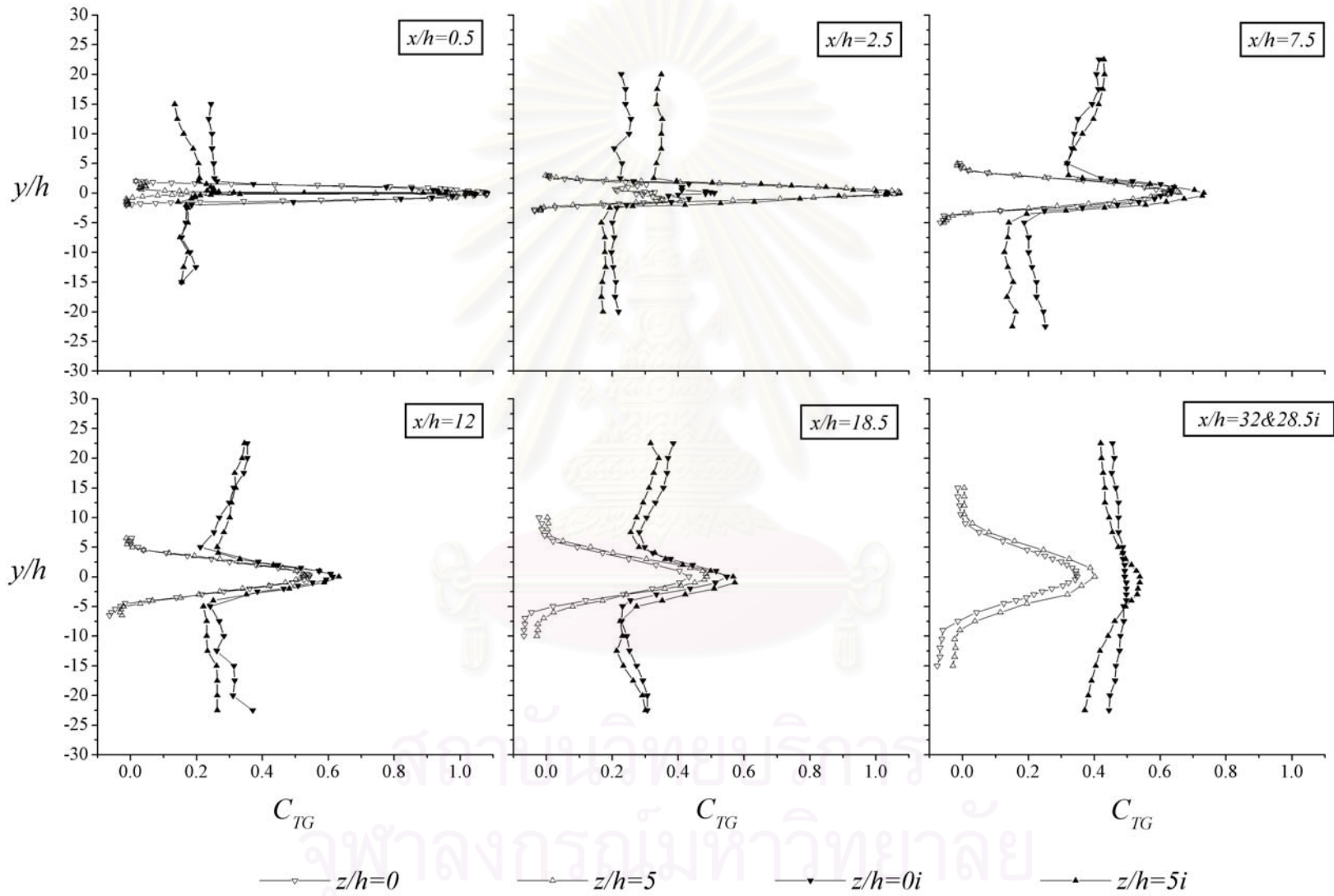
รูปที่ 3.57.เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวุ้งผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L140 และ L140i ที่ $z/h=6$ (Base)



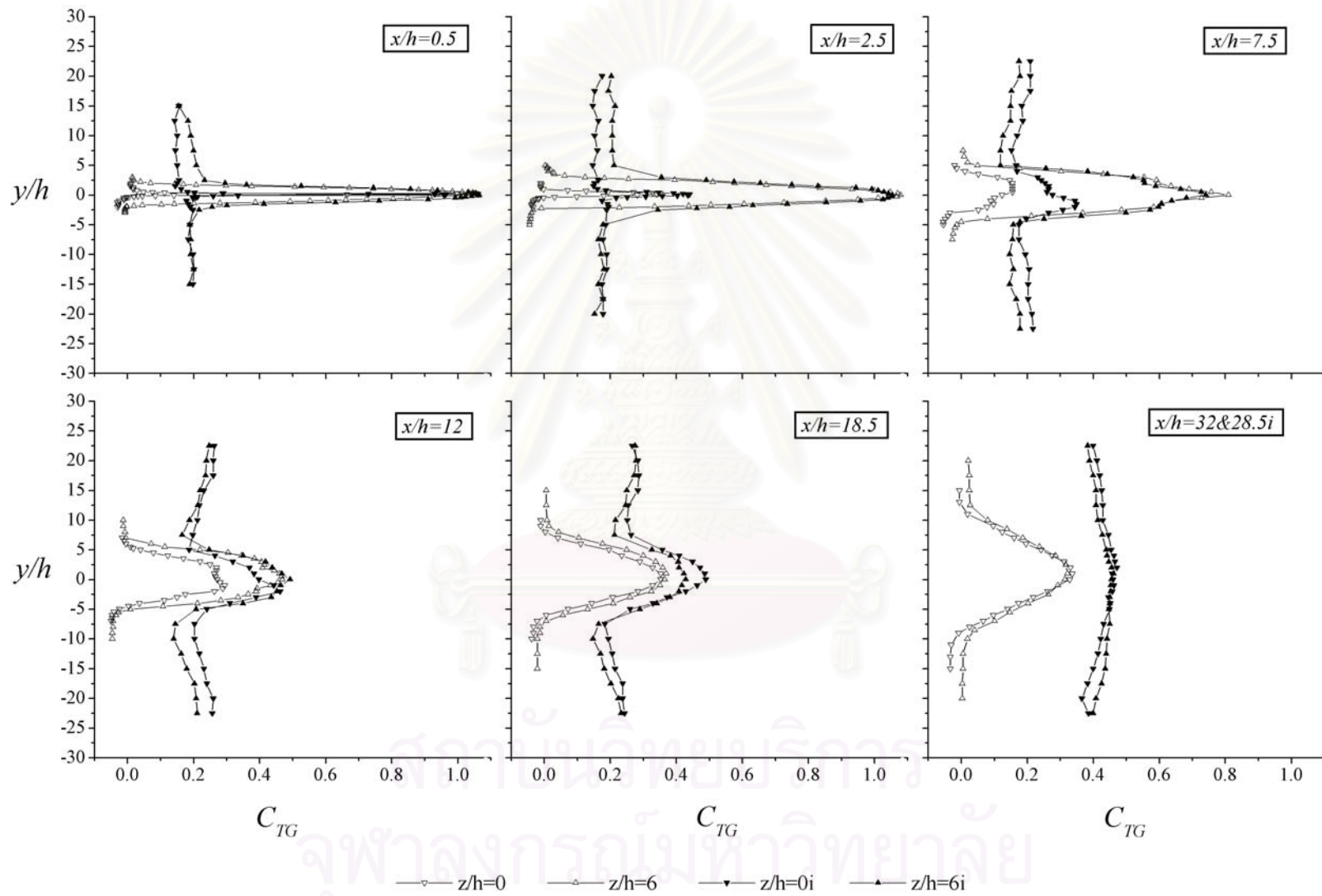
รูปที่ 3.58 เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังขนผนังตามแนวแกนการไหล



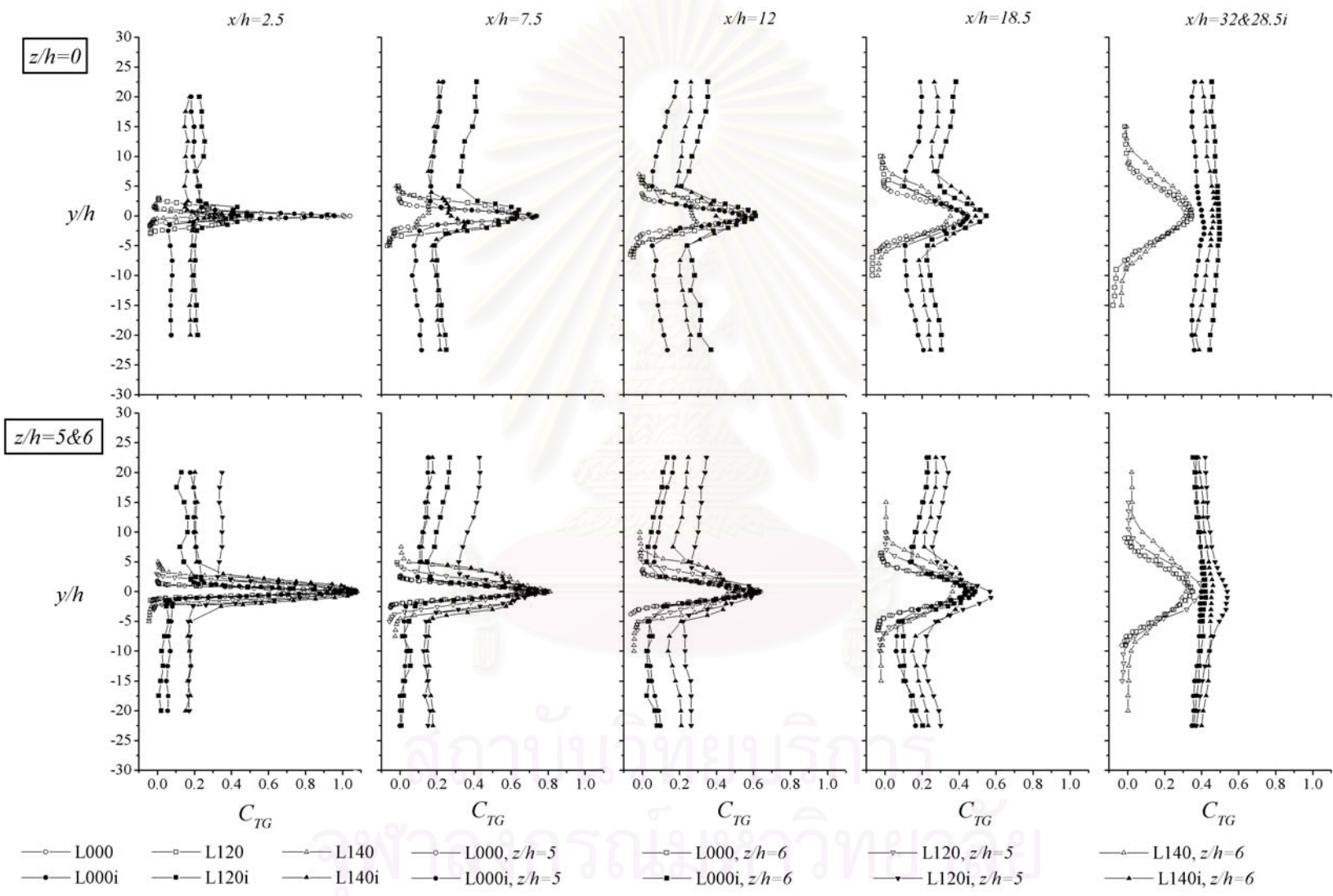
รูปที่ 3.59.เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวิ้งชนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L000 และ L000i



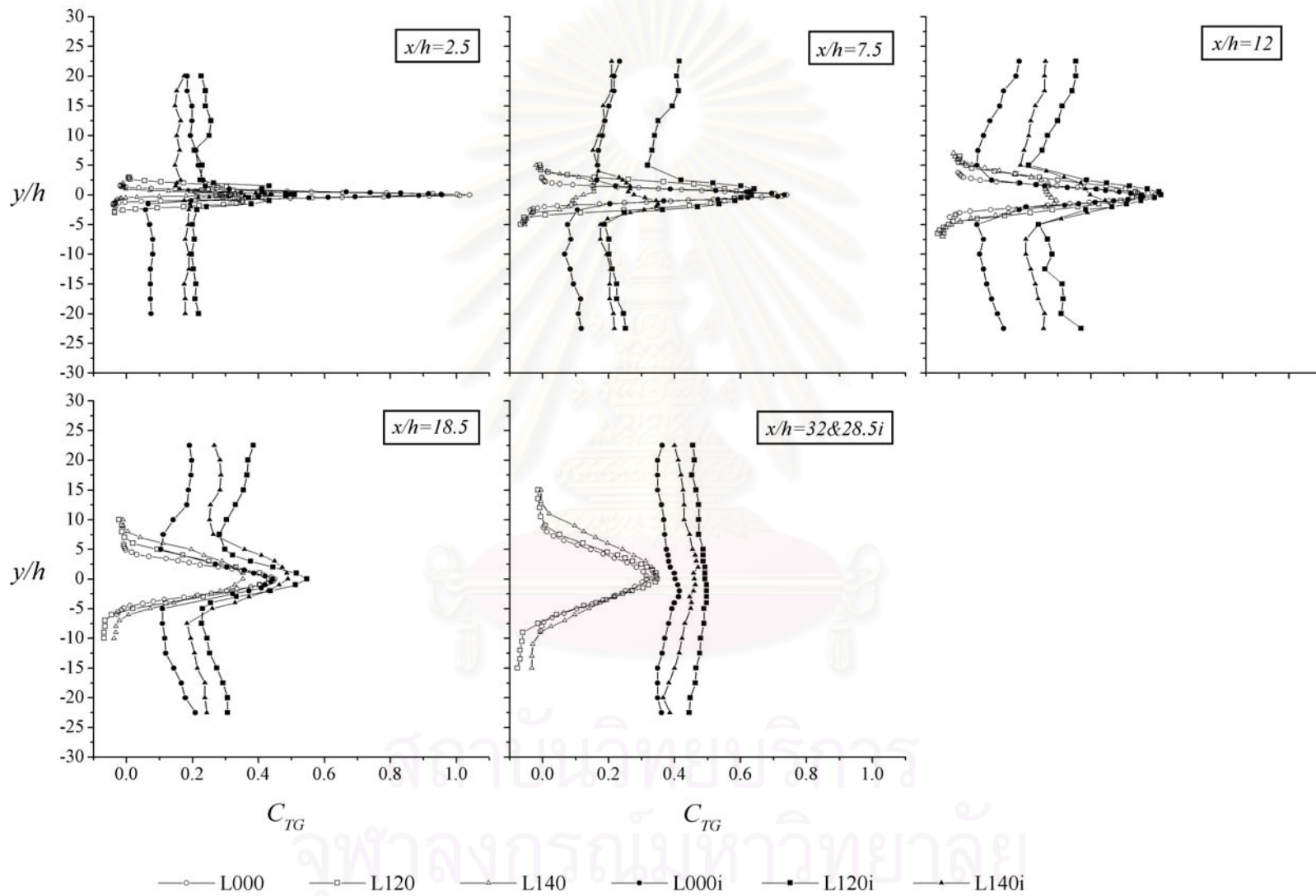
รูปที่ 3.60.เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังขนผนังตามแนวแกนการไหลในกรณี L120 และ L120i



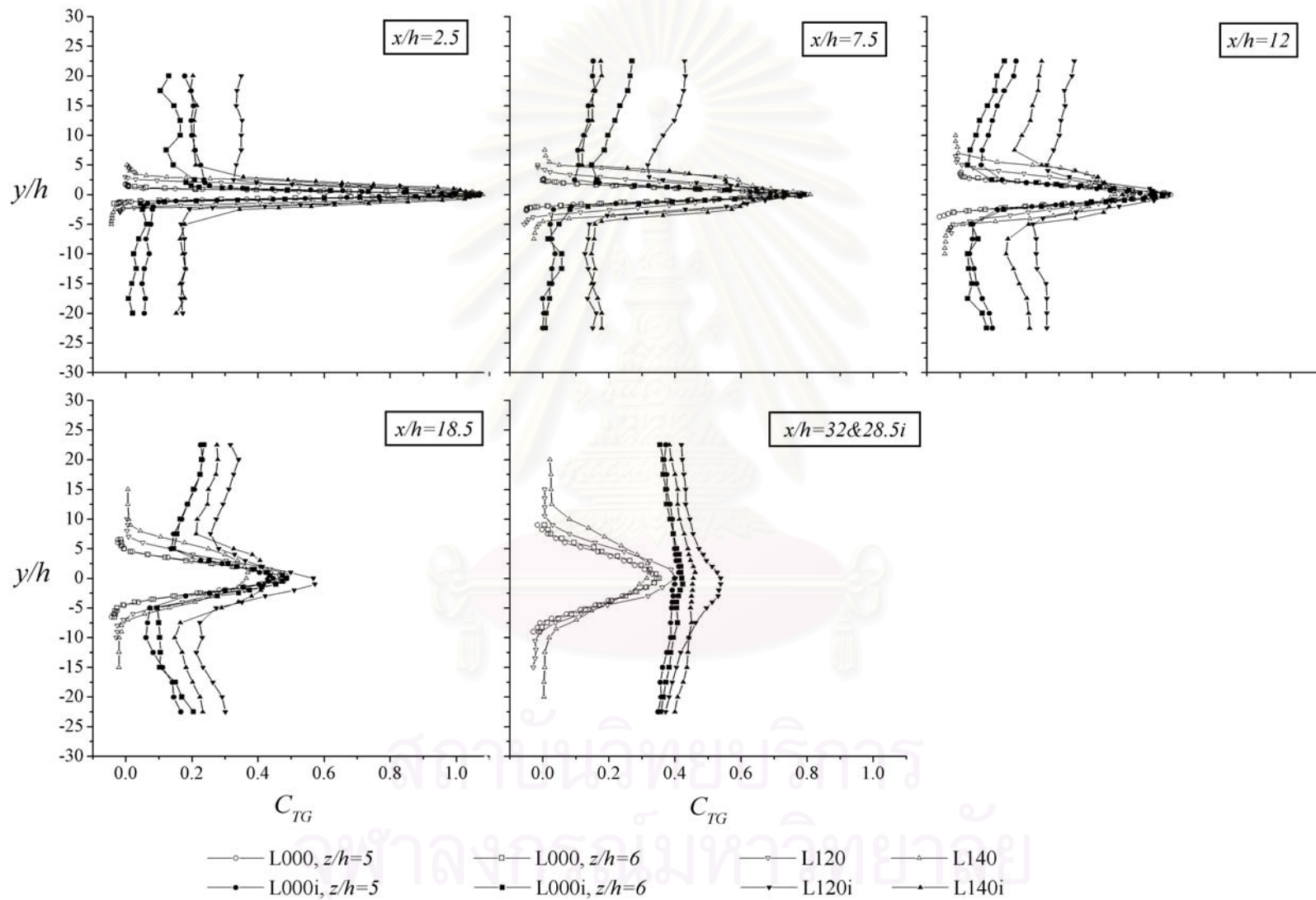
รูปที่ 3.61.เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังขนนกตามแนวแกนการไหลในกรณี L140 และ L140i



รูปที่ 3.62.เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเงี๊ตระนาบและเงี๊ตระนาบแบบว้จชนผนังตามแนวแกนการไหล



รูปที่ 3.63 เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวี่งชนผนังตามแนวแกนการไหล ที่ $z/h=0$ (Apex)



รูปที่ 3.64 เปรียบเทียบการพัฒนาตัวของเจ็ทระนาบและเจ็ทระนาบแบบวังขนนกตามแนวแกนการไหลที่ $z/h=5$ และ 6 (Base)

รายการอ้างอิง

- Belovich, V.M.; and Samimy, M. Mixing Processes in a Coaxial Geometry with a Central Lobed Mixer-Nozzle. AIAA Paper 96-0118 (1996): 1-29.
- Bradbury, L.J.S.; and Khadem, A.H. The distortion of a jet by tab. J. Fluid Mech. 70 part 4 (1974): 801-813.
- Foss, J.F.; and Jones, J.B. Secondary Flow Effects in a Bounded Rectangular Jet. Journal of Basic Engineering Transactions of the ASME, (1968): 241-249.
- Hitchman, G.J.; Strong, A.B.; Slawson, P.R.; and Ray, G.D. Turbulent Plane Jet With and Without Confining End Walls. AIAA Journal 28 No. 10 (1990): 1699-1700.
- Jones IV, J.N.; and Rogers, C.B. Circulation in a Jet due to Vortex Generator. Undergraduate Thesis, Tufts University, 2000.
- Kuhhiran, C.; Mantajit, J.; Wetchagarun, S.; Boonrat, S.; Katsuwan, S.; Stitsuwongkul, T.; and Bunyajitradulya, A. Effect of End-Wall Opening on Temperature Distribution in A Ventilated Chamber. Proceeding of The Thirteenth National Mechanical Engineering Conference 1 (1999): 9-16.
- Krothapalli, A.; Baganoff, D.; and Karamcheti, K. On the mixing of a rectangular jet. J. Fluid Mech. 107 (1981): 201-220.
- Marsters, G.F. Spanwise Velocity Distributions in Jets from Rectangular Slots. AIAA Paper 80-0202R (1980).
- Owczarek, J.A.; and Rockwell, K.O. An Experimental Study of Flows in Planar Nozzles. Journal of Basic Engineering Transactions of the ASME (1972): 682-688.
- Ricou, F.P.; and Spalding, D.B. Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets. J. Fluid Mech. 11 (1961): 21-32.
- Rockwell, D.O. Vortex Stretching Due to Shear Layer Instability. Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME (1977): 240-244.
- Sforza, P.M.; and Mons, R.F. Mass momentum and energy transport in turbulent free jets. Int. J. Heat Mass Transfer 21 (1978): 371-384.
- Stitsuwongkul, T.; and Bunyajitradulya, A. Temperature distribution inside a ventilated chamber: Effects of lobed nozzle, supply-air velocity, and end-wall opening. Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand 11 No. 3 (2000): 57-68.
- Tosapole Stitsuwongkul. Mixing Enhancement in A Ventilated Chamber by Means of Manipulation of A Nozzle Exit. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2001.
- Zaman, K.B.M.Q.; and Raman, G. Reversal in spreading of a tabbed circular jet under controlled excitation. Physics of Fluid 9 No. 12 (1997): 256-276.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

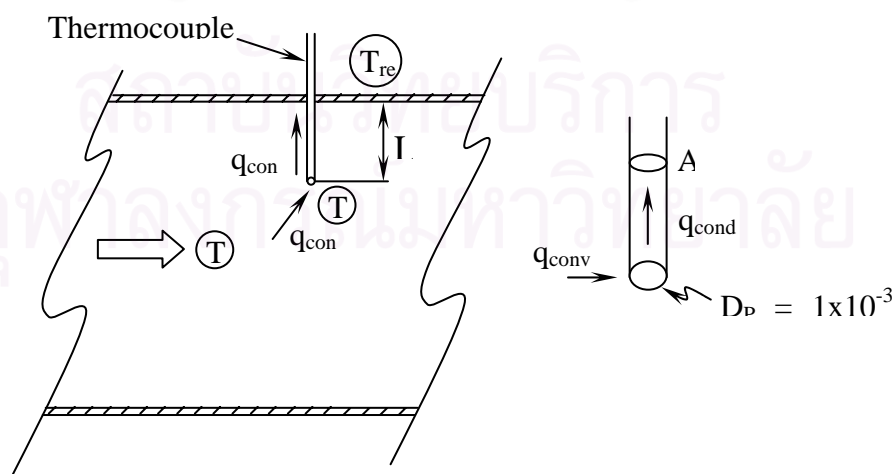
ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty analysis)

ในการวัดค่าอุณหภูมิของงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้โพรบ (Probe) ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งภายในโพรบนี้ได้สอดสาย Thermocouple type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -270 ถึง 400 องศาเซลเซียส และมีค่าความถูกต้อง (Accuracy) ในช่วงที่ทำการทดลองประมาณ 0.3 องศาเซลเซียส สาย Thermocouple มีฉนวนกันความร้อนหุ้มสองชั้นคือ หุ้มโลหะแต่ละเส้นและ หุ้มสองเส้นคู่กัน ตามลำดับ โดยที่ส่วนปลาย Thermocouple ซึ่งทำการ spot โลหะ 2 ชนิด ให้เชื่อมต่อกันเป็นจุดนั้นทำหน้าที่เป็น sensor ตรวจวัดอุณหภูมิ โดยส่วน sensor นี้ ยื่นออกมาจากปลาย Probe เล็กน้อย ที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับปลั๊กตัวผู้ใช้ต่อเข้ากับตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple Thermometer) ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 54 II ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียส โดยชุดโพรบ Thermocouple กับตัวอ่านค่าอุณหภูมิ ทั้งชุดนี้ได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานแล้วดังที่กล่าวในส่วนการวัดสถานะเริ่มต้นทางอุณหภูมิในบทที่ 2

เมื่อคิดโดยรวมแล้วระบบเครื่องมือวัดนี้มีค่าความไม่แน่นอนทางอุณหภูมิ (δ_T) ประมาณเท่ากับ 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2σ) จากกราฟผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิซึ่งแสดงในรูปที่ 2.32

เนื่องจากงานวิทยานิพนธ์นี้ทำการวัดอุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่มีความเร็ว ทำให้อาจมีผลของการพา (Convection) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้อุณหภูมิที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนไปโดยในที่นี่จะพิจารณาถึงผลของการพาดังกล่าวโดยใช้แบบจำลอง (Model) ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ภาพแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าความคลาดเคลื่อนของโพรบวัดอุณหภูมิ

รูปที่ ก.1 แบบจำลองในการพิจารณาผลของการพา (Convection) ที่มีต่อการวัดอุณหภูมิ โดยจากกฎการอนุรักษ์พลังงานและสมมติฐานที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากลวด Thermocouple สู่บรรยากาศ ทำให้กระบวนการในการถ่ายเทความร้อนในการวัดอุณหภูมินี้เป็นผลจากการพาความร้อนของอากาศ (Convection) และการนำความร้อนของลวด Thermocouple เท่านั้นดังสมการ

$$\begin{aligned}
 q_{conv} &= q_{cond} \\
 hAdT &= kA \frac{dT}{dx} \\
 hA(T_F - T_P) &= \frac{kA}{L}(T_P - T_a) \\
 \frac{T_F - T_P}{T_P - T_a} &= \frac{k}{hL} = \left(\frac{k}{hD}\right)\left(\frac{D}{L}\right) \\
 \therefore \frac{T_F - T_P}{T_P - T_a} &= \frac{1}{Nu}\left(\frac{D}{L}\right)
 \end{aligned} \tag{ก.1}$$

โดย

T_F คือ อุณหภูมิของอากาศที่ต้องการวัด

T_P คือ อุณหภูมิที่อ่านได้จากการใช้ Thermocouple

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของปลาย sensor สมมุติว่ามีรูปร่างเป็นทรงกลม (Sphere) มีค่าประมาณ 1 มิลลิเมตร

L คือ ความยาวของสาย Thermocouple มีค่าประมาณ 5 เมตร

Nu คือ ค่า Nusselt number ซึ่งประมาณจากความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนผ่านรูปทรงกลมจาก White (1991) ตามสมการ

$$Nu_{m,sphere} \approx 2.0 + 0.3Pr^{1/3} Re^{3/5} \tag{ก.2}$$

สำหรับอากาศที่อุณหภูมิ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส มีค่า $Pr = 0.706$ และ

$$\text{ที่ } u_j = 27 \text{ m/s และ } T_j = 72 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (Re)_{D_p} = \frac{u_j D_p}{\nu_a} = \frac{(27 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 1273$$

แทนในสมการ ก.2 จะได้ Nusselt number เป็น 21.5

ก.1 ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG})

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) นิยามตามสมการ

$$C_{TG} = \frac{T - T_J}{T_J - T_{ref}} = C_{TG}(T, T_J, T_{ref}) \quad (ก.3)$$

เมื่อ

T คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง

T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิง

T_J คือ อุณหภูมิบริเวณหน้าตัดทางออกของเจ็ท

จากสมการ Propagation of Uncertainty โดย S.J.Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ (C_{TG}) ได้จากความสัมพันธ์

$$\delta_{C_{TG}} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T_J} \delta_{T_J}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T_{ref}} \delta_{T_{ref}}\right)^2} \quad (ก.4)$$

$$\frac{\partial C_{TG}}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{T - T_{ref}}{T_J - T_{ref}} \right) = \frac{(T_J - T_{ref})(1) - (T - T_{ref})(0)}{(T_J - T_{ref})^2} = \frac{T_J - T_{ref}}{(T_J - T_{ref})^2} = \frac{1}{T_J - T_{ref}}$$

$$\frac{\partial C_{TG}}{\partial T_J} = \frac{\partial}{\partial T_J} \left(\frac{T - T_{ref}}{T_J - T_{ref}} \right) = \frac{(T_J - T_{ref})(0) - (T - T_{ref})(1)}{(T_J - T_{ref})^2} = \frac{T_{ref} - T}{(T_J - T_{ref})^2}$$

$$\frac{\partial C_{TG}}{\partial T_{ref}} = \frac{\partial}{\partial T_{ref}} \left(\frac{T - T_{ref}}{T_J - T_{ref}} \right) = \frac{(T_J - T_{ref})(-1) - (T - T_{ref})(-1)}{(T_J - T_{ref})^2} = \frac{T - T_J}{(T_J - T_{ref})^2}$$

สำหรับการทดลองนี้แทนค่า T_J ด้วย \bar{T}_J ซึ่งคืออุณหภูมิสถานะแวดล้อมขณะทำการทดลองและแทนค่า T_{ref} ด้วย T_a ซึ่งคืออุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-Averaged temperature) ที่ปากทางออกเจ็ทได้เป็น

$$\delta_{C_{TG}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{T}_J - T_a} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{T_a - T}{(\bar{T}_J - T_a)^2} \delta_{\bar{T}_J}\right)^2 + \left(\frac{T - \bar{T}_J}{(\bar{T}_J - T_a)^2} \delta_{T_a}\right)^2} \quad (ก.5)$$

โดยที่ค่าความไม่แน่นอนของ T (δ_T) กับ \bar{T}_J ($\delta_{\bar{T}_J}$) ประมาณเท่ากับ 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2σ) จากกราฟผลการเปรียบเทียบระบบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ซึ่งแสดงในรูปแบบที่

2.32 และค่าความไม่แน่นอนของ T_a (δ_{T_a}) ประมาณเท่ากับ 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกราฟผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิซึ่งแสดงในรูปที่ 2.30 เช่นกัน

ซึ่ง δ_T กับ $\delta_{\bar{T}_j} \approx 2(0.07)$ และ $\delta_{T_a} \approx 2(0.05)$

ส่วนค่า T , \bar{T}_j และ T_a ใช้ค่าจากผลการทดลองกรณี ซึ่ง $T = 73.4$ $\bar{T}_j = 70$ และ $T_a = 34.7$

ดังนั้น

$$\delta_{C_{TG}} = \sqrt{\left(\frac{1}{70-34.7}(0.5)\right)^2 + \left(\frac{34.7-73.4}{(70-34.7)^2}(0.5)\right)^2 + \left(\frac{73.4-70}{(70-34.7)^2}(0.5)\right)^2}$$

$$\delta_{C_{TG}} = 0.021$$

แต่เนื่องจากขณะทำการวัดอุณหภูมินั้น Thermocouple probe มีการสั่นอันเนื่องมาจากแรงลมด้วย ดังนั้นจึงใช้ค่า $\delta_{C_{TG}}$ เป็น 0.05

ก.2 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe

การคำนวณความเร็วของการไหลด้วย Pitot probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการเมื่อ เป็นความดันจลน์ของการไหล

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = u(\Delta P, \rho) \quad (ก.6)$$

เมื่อ ΔP เป็นความดันจลน์ของการไหล

ρ เป็นความหนาแน่นของอากาศ

จากสมการ Propagation of Uncertainty โดย S.J. Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว δ_u ตามสมการ

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial(\Delta P)} \delta_{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial \rho} \delta_{\rho}\right)^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial(\Delta P)} = \frac{\partial}{\partial(\Delta P)} \left(\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{-1/2} \frac{2}{\rho} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} = \frac{1}{\rho u}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \rho} = \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{-1/2} \left(\frac{-2\Delta P}{\rho^2} \right) = \frac{1}{u} \left(\frac{-\Delta P}{\rho^2} \right) = -\frac{\Delta P}{\rho^2 u}$$

โดยที่ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดันจากมาโนมิเตอร์แบบเอียง (Inclined manometer) ซึ่งสามารถอ่านค่าความดันได้ในช่วง 0-50 mmWG ($\delta_{\Delta P} \approx 0.02$) แสดงในรูปที่ 2.28 มีค่าประมาณ ± 0.2 mmH₂O ($\delta_{\Delta P} \approx 0.02$) และให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความหนาแน่นอากาศมีค่าน้อยประมาณศูนย์ได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho u} \delta_{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{\rho^2 u} \delta_\rho\right)^2}$$

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{1}{1 \times 28} (0.02)\right)^2}$$

$$\delta_u = 0.0007$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนของค่าความเร็วที่ตั้งต้นเจ็ทจากการวัดด้วย Pitot probe มีค่าประมาณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ความรู้พื้นฐาน

ข.1 การไหลผ่าน Lobed nozzle (รูปทรงปิรามิด)

การไหลของของไหลผ่าน Lobed nozzle รูปทรงปิรามิดนี้จะทำให้เกิด Streamwise vortices (ω_x) ขึ้นที่บริเวณด้านข้างของ Lobed nozzle ทั้ง 2 ด้าน โดย Streamwise vortices ทั้ง 2 นี้จะมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงเรียกว่า Counter-rotating streamwise vortices ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการเกิด Streamwise vortices เหล่านี้ได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาการไหลแบบ 2 มิติที่บริเวณใกล้ปากทางออกของ Contraction ทางด้าน Upstream จะพบว่ามีความแตกต่าง (Gradient) ของความเร็ว Streamwise ในแนว Traverse ($\partial u/\partial y$) เกิดขึ้นเท่านั้นเนื่องจากการที่ได้รับอิทธิพลจากชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นบริเวณผนังด้านบนและด้านล่างของ Contraction ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Spanwise vortices ขึ้น ต่อมาเมื่อการไหลไหลมาชน Lobed nozzle ที่บริเวณปากทางออกของ Contraction ก็จะทำให้เกิดความแตกต่างของความเร็ว Streamwise ในแนว Spanwise ($\partial u/\partial z$) ขึ้น จึงทำให้การไหลที่ไหลผ่าน Lobed nozzle นี้มี Streamwise vortices เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของ Lobed nozzle และ Streamwise vortices ทั้ง 2 นี้จะมีทิศทางการหมุนที่ตรงข้ามกัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จาก "Vorticity equation"

ข.2 สมการ Vorticity

สมการ Vorticity สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{D \bar{\omega}}{Dt} = \underbrace{\bar{\omega} \cdot \bar{\nabla} \bar{u}} + \underbrace{\nu \bar{\nabla}^2 \bar{\omega}} \quad (\text{ข.1})$$

"Rate of change of particle vorticity"

"Rate of deformation of vortex lines (Vortex Turning / Stretching)"

"Net rate of viscous diffusion of $\bar{\omega}$ "

$\frac{D\bar{\omega}}{Dt}$ แสดงถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Vorticity ทั้งหมดของอนุภาคของของไหล

$\bar{\omega} \cdot \nabla \bar{u}$ แสดงถึง อัตราการเปลี่ยนแปลง Vorticity เนื่องจากการเกิด Deformation ของ Vortex tube อันเป็นผลมาจากการเกิด Deformation ของ Velocity field ซึ่งเทอมนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1) Vortex stretching และ 2) Vortex turning ปรัชญาการเกิดการเกิดการเปลี่ยนแปลง $\bar{\omega}$ เนื่องจากเทอมนี้มีลักษณะเป็นปรัชญาการทาง Inviscid และเป็นแบบ 3 มิติ กล่าวคือ ไม่ต้องอาศัย Viscosity และเกิดขึ้นในการไหลแบบ 3 มิติเท่านั้น

$\nu \nabla^2 \bar{\omega}$ แสดงถึง อัตราการเปลี่ยนแปลง Vorticity เนื่องจากการเกิด Diffusion ซึ่งเทอมนี้เป็นเทอม Viscous ที่จะพบเฉพาะในการไหลที่มีแรงเสียดทานเท่านั้น โดยจะอาศัยกระบวนการ Diffusion ในการกระจาย Vorticity เหล่านี้ภายในการไหล

จากที่มาของ "Vorticity equation" นี้จะเห็นได้ว่าสำหรับการไหลที่อัดตัวไม่ได้ และมีความหนาแน่นคงที่นั้น แรงเนื่องจากความดัน (Pressure force) และแรงโน้มถ่วง (Gravity force) จะไม่มีผลกับการเกิด Vorticity โดยตรง ทั้งนี้เนื่องจาก Vorticity นั้นเป็นค่าที่แสดงถึงการหมุนแบบ Solid-body แต่แรงเนื่องจากความดันและแรงโน้มถ่วงนั้นจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางมวลจึงทำให้ไม่สามารถสร้างการหมุนจากแรงเหล่านี้ได้ ในทางตรงกันข้ามแรงหนืด (Viscous force) นั้นจะกระทำในลักษณะเฉือน (Shear) ที่บริเวณผิวของอนุภาคและถ้าหากเกิดความไม่สมดุลของแรงนี้ขึ้นจะทำให้เกิดการหมุนขึ้นได้ อย่างไรก็ตามผลของความดันและแรงโน้มถ่วงจะทำให้เกิด $\nabla \bar{u}$ ขึ้นได้จึงมีผลต่อการเกิด $\bar{\omega}$ ในทางอ้อม

เนื่องจากการไหลที่บริเวณทางออกของ Contraction ในกรณีที่ไม่ใช่ Lobed nozzle ของงานวิจัยนี้นั้นมีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติและอัดตัวไม่ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะ Streamwise vorticity (ω_x) จะได้ว่า

$$\frac{D\omega_x}{Dt} = \cancel{\phi_x} \frac{\partial u}{\partial x} + \cancel{\phi_y} \frac{\partial u}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \cancel{u}}{\partial z} + \cancel{\nu \nabla^2} \cancel{\phi_x} = 0 \quad (\text{ข.2})$$

จากสมการ (ข.2) จะเห็นได้ว่าสำหรับการไหลแบบ 2 มิติ ซึ่งในตอนเริ่มต้นไม่มี Streamwise vorticity นั้นจะยังคงไม่มี Streamwise vorticity ต่อไป เนื่องจาก $\frac{D\omega_x}{Dt} = 0$ ตลอดเวลา จึงทำให้ได้ว่าเมื่อการไหลในกรณีที่ไม่ใช่ Lobed nozzle นี้ดำเนินต่อไปก็จะยังคงไม่มี Streamwise vorticity เกิดขึ้น

ต่อมาพิจารณาการไหลที่บริเวณทางออกของ Contraction ในกรณีที่ใช้ Lobed nozzle ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ และอัดตัวไม่ได้ เมื่อพิจารณาเฉพาะ Streamwise vorticity จะได้ว่า

$$\frac{D\omega_x}{Dt} = \cancel{\omega_x \frac{\partial u}{\partial x}} + \cancel{\omega_y \frac{\partial u}{\partial y}} + \omega_z \frac{\partial u}{\partial z} + \cancel{\nabla^2 \omega_x} = \omega_z \frac{\partial u}{\partial z} \quad (\text{ข.3})$$

จากสมการ (ข.3) จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ใช้ Lobed nozzle นี้ $\frac{D\omega_x}{Dt} \neq 0$ เนื่องจากมี Gradient ของ Streamwise velocity ในแนว Spanwise เกิดขึ้น ($\frac{\partial u}{\partial z} \neq 0$) อันเนื่องจากรูปร่างของ Lobed nozzle ที่ใช้ จึงทำให้สามารถเกิด Streamwise vorticity (ω_x) ขึ้นภายในการไหลได้จากการปรับเปลี่ยนทิศทางของ Spanwise vorticity (ω_z) ด้วย $\frac{\partial u}{\partial z}$ นี้ นั่นเอง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ชมพิชาน์ คูหิรัญญ์ เกิดวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2521 ที่โรงพยาบาล
รามาธิบดี จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้า
ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย