

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันด้านท้ายเจ็ตร้อนสองลำแบบเรียงแถวในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง โดยได้ศึกษาผลกระทบของจำนวนเจ็ตร ระยะห่างระหว่างเจ็ตร และการไหลแบบหมุนควงของกระแสมวลขวางที่มีต่อคุณลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันและการผสมของเจ็ตรในท่อ สำหรับความเร็วในการหมุนควงแสดงค่าด้วย Swirl ratio (Sr) โดยในการทดลอง ได้ทำการทดลองที่สภาวะต่างๆคือ จำนวนเจ็ตรหนึ่งและสองตัว, ระยะห่างระหว่างเจ็ตรตัวแรกและตัวที่สองเท่ากับ 0.5 และ 1.0 r_{effd} และกระแสมวลขวางไม่มีการหมุนควง ($Sr = 0$) และมีการหมุนควง ($Sr = 1.8$) ที่อัตราส่วนความหนาแน่นคงที่ที่ 0.83 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ 6.0 และอัตราส่วนโดยมวลของกระแสมวลขวางต่ออัตราส่วนโดยมวลของเจ็ตรคงที่ที่ 2.55 ผลการทดลองแต่ละกรณีจะแสดงที่ตำแหน่ง Downstream ต่างๆกัน โดยใช้ rd -scale และ D -scale คือในกรณี $S0rd00$ และ $S18rd00$ ทำการวัดที่ $x/r_{effd} = 0.25, 0.50, 0.75, 1.50, 2.00, 2.50$ และ 3.00 และที่ $x/D = 2.52$ และ 3.36 ในกรณี $S0rd05$ และ $S18rd05$ ทำการวัดที่ $x/r_{effd} = 0.25, 0.75, 1.50, 2.00, 2.50$ และ 3.00 และที่ $x/D = 2.52$ และ 3.36 และในกรณี $S0rd10$ และ $S18rd10$ ทำการวัดที่ $x/r_{effd} = 0.25, 0.50, 1.25, 1.50, 2.00, 2.50$ และ 3.00 และที่ $x/D = 2.52$ และ 3.36 โดยผลการทดลองจะแสดงจากคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristic) ซึ่งประกอบด้วยการพัฒนาตัวของเจ็ตร และการเปรียบเทียบผลการทดลองที่หน้าตัดต่างๆ และผลการศึกษาคุณลักษณะโดยรวม (Global characteristics) ซึ่งจะพิจารณาจาก อัตราการลดลงของอนุภาคน้ำมันสูงสุดแต่ละหน้าตัด (Decay rate) อัตราการเพิ่มขึ้นของอนุภาคน้ำมันต่ำสุดในแต่ละหน้าตัด (Increase rate) อัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยแต่ละหน้าตัด (Average increase rate) และเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันสูงสุด-ต่ำสุดแต่ละหน้าตัด (Trajectory) ของเจ็ตรตามแนวแกนการไหล โดยผลการทดลองดังกล่าวได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในกรณีการไหลแบบเจ็ตรหนึ่งตัวในท่อที่กระแสมวลขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง ($S0rd00$) โดยยึดเป็นกรณีพื้นฐานในการทดลอง

พิจารณาถึงรูปร่างการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันหลังเจ็ตร $0.25r_{effd}$

ก) ผลของจำนวนเจ็ตร

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองในกรณีต่างๆพบว่า จำนวนเจ็ดมีผลต่อรูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งหลังเจ็ด $0.25r_{effd}$ สำหรับกรณีที่กระแสมขวางไม่มีการหมุนควงและกรณีที่กระแสมขวางมีการหมุนควง (รูปที่ 3.14, 3.15, 3.25 และ 3.26)

ข) ผลของระยะห่างระหว่างเจ็ด

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองในกรณีต่างๆ ที่ตำแหน่งหลังเจ็ด $0.25r_{effd}$ พบว่ากรณีที่กระแสมขวางไม่มีการหมุนควง (รูปที่ 3.14 และ 3.25) เจ็ดตัวที่สองมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิหลังเจ็ดตัวแรกเล็กน้อย ในขณะที่เจ็ดตัวแรกมีผลอย่างมากต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิหลังเจ็ดตัวที่สองถ้าระยะห่างมีค่าน้อย ส่วนกรณีที่กระแสมขวางมีการหมุนควง (รูปที่ 3.15 และ 3.26) เจ็ดตัวที่สองมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิหลังเจ็ดตัวแรกเล็กน้อย และเจ็ดตัวแรกก็มีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิหลังเจ็ดตัวที่สองเล็กน้อยเช่นกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ระยะห่างระหว่างเจ็ด มีผลเล็กน้อยต่อรูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณีที่กระแสมขวางมีการหมุนควง

ค) ผลของการหมุนควงของกระแสมขวาง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองในกรณีต่างๆ พบว่าการไหลแบบหมุนควงมีผลต่อรูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งหลังเจ็ด $0.25r_{effd}$ (รูปที่ 3.16 และ 3.27)

และเมื่อพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (โดยดูตั้งแต่หลังเจ็ดที่ไกลสุด, หลัง $1.0 r_{effd}$)

ก) ผลของจำนวนเจ็ด

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิหลังเจ็ด (โดยดูตั้งแต่หลังเจ็ดที่ไกลสุด, หลัง $1.0 r_{effd}$) พบว่าเจ็ดสองตัวมีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่าเจ็ดหนึ่งตัว (รูปที่ 3.17 ถึง 3.22 และตารางที่ 3.1) โดยกรณีที่กระแสมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควงเจ็ดสองตัวมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอก่อนกรณีเจ็ดหนึ่งตัวเป็นระยะ 50% ตามทิศทางการไหล และก่อน 30% สำหรับกรณีที่กระแสมขวางมีการไหลแบบหมุนควง

ข) ผลของระยะห่างระหว่างเจ็ด

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิหลังเจ็ด (โดยดูตั้งแต่หลังเจ็ดที่ไกลสุด, หลัง $1.0 r_{effd}$) พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ด $0.5r_{effd}$ ก่อให้เกิดการผสมที่ดีกว่าที่ระยะห่างระหว่าง

เจ็ด $1.0r_{effd}$ (รูปที่ 3.17 ถึง 3.22 และตารางที่ 3.1) โดยกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ดสองตัว $0.5r_{effd}$ ต้องการระยะทางที่สั้นกว่าประมาณ 10%

ก) ผลของการหมุนควงของกระแสลมขวาง

กระแสลมขวางที่มีการไหลแบบหมุนควงก็แสดงให้เห็นถึงการผสมที่ดีกว่าในกรณีที่กระแสลมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง (รูปที่ 3.17 ถึง 3.22 และตารางที่ 3.1) โดยการไหลแบบหมุนควง (สำหรับกรณี $S18$) มีผลให้ระยะทางที่ใช้ลดลงอย่างน้อย 50%

จากผลของการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ก) จำนวนเจ็ด ข) ระยะห่างระหว่างเจ็ด และ ค) การหมุนควงของกระแสลมขวางมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดจนความสม่ำเสมอของอุณหภูมิซึ่งแสดงถึงการผสมกันของเจ็ดกับกระแสลมขวาง โดย ก) เจ็ดสองตัวมีผลทำให้ระยะทางที่ใช้สั้นกว่าเจ็ดหนึ่งตัว ข) ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ด $0.5r_{effd}$ ก่อให้เกิดการใช้ระยะทางที่สั้นกว่าที่ระยะห่างระหว่างเจ็ด $1.0r_{effd}$ อีกทั้ง ค) กระแสลมขวางที่มีการไหลแบบหมุนควงก็แสดงให้เห็นถึงใช้การระยะทางที่สั้นกว่าในกรณีที่กระแสลมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง ดังนั้น Condition ที่ทำให้เกิดการผสมที่เร็ว (การใช้ระยะทางที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอที่สั้นที่สุด) ที่สุดจึงน่าจะอยู่ที่กรณี $S18rd05$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการลดลง-การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามแนวแกน (รูปที่ 3.38) และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ตามแนวแกน (รูปที่ 3.39) ก็ยังให้ข้อสรุปเช่นเดียวกัน คือ Condition ที่ทำให้เกิดการผสมที่ดีที่สุดจึงอยู่ที่กรณี $S18rd05$

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองโดยยึด S -scale เป็นหลัก สามารถสรุปได้ว่า ข) ระยะห่างระหว่างเจ็ด และ ค) การหมุนควงของกระแสลมขวางมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดจนการผสมกันของเจ็ดกับกระแสลมขวาง โดยที่ระยะห่างระหว่างเจ็ด $1.0r_{effd}$ ก่อให้เกิดการผสมที่ดีกว่าที่ระยะห่างระหว่างเจ็ด $0.5r_{effd}$ เนื่องจากกระษะตาม Downstream ที่ไกลกว่า แต่กระแสลมขวางที่มีการไหลแบบหมุนควงก็ยังคงแสดงให้เห็นถึงการผสมที่ดีกว่าในกรณีที่กระแสลมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลของเจ็ดแบบเรียงแถวในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มียค่าการหมุนควงสูงๆ และตำแหน่งการฉีดเจ็ดตัวที่สองแบบเรียงแถว โดยงานวิจัยที่ใช้เจ็ดมากกว่าหนึ่งตัวส่วนใหญ่ยังคงเป็นการฉีดเจ็ด

ตามแนวเส้นรอบวงหรือฉีดเจ็ทเป็นมุมเอียง ซึ่งทำให้ความรู้ ความเข้าใจ และข้อมูลขั้นต้นที่เกี่ยวกับ เจ็ทแบบเรียงแถวยังมีอยู่น้อย จึงทำให้การไหลของเจ็ทแบบเรียงแถวในท่อที่มีการไหลแบบหมุน คงยังคงมีประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการทำการศึกษาเพิ่มเติมอยู่หลายประเด็นดังนี้

จำนวนเจ็ทแบบเรียงแถวมีผลต่อการไหล ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทดลองที่เจ็ทหนึ่งตัวและ สองตัว โดยพบว่าเจ็ทสองตัวแบบเรียงแถวมีผลทำให้ประสิทธิภาพการผสมที่ดีกว่าเจ็ทหนึ่งตัว อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ยังคงเป็นเพียงการเปรียบเทียบจำนวนเจ็ทหนึ่งตัวกับเจ็ทสองตัวเท่านั้น โดยหากเพิ่มจำนวนเจ็ทให้มากขึ้นอาจทำให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนเจ็ทก็มี ข้อจำกัดในเรื่องระยะทางตาม Downstream ที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลโดยตรงต่อการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งประเด็นนี้ เป็นประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการทำการศึกษาต่อไป

นอกจากการเพิ่มจำนวนแบบเรียงแถวแล้ว การเพิ่มจำนวนตามเส้นรอบวง ตลอดจนมุมการ ฉีดเจ็ทก็ยังเป็นปัจจัยที่น่าสนใจสำหรับการทำการศึกษาเช่นกัน

ระยะห่างระหว่างเจ็ท ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทดลองที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทตัวแรกและ เจ็ทตัวที่สองเท่ากับ 0.5 และ 1.0 r_{eff} โดยพบว่าการวางตำแหน่งเจ็ทตัวที่สองห่างจากเจ็ทตัวแรก เท่ากับ 0.5 r_{eff} มีผลทำให้ประสิทธิภาพการผสมดีกว่าระยะ 1.0 r_{eff} อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ ยังคงเป็นเพียงการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเจ็ทเพียงสองระยะเท่านั้น ไม่ได้หมายความว่า การ วางตำแหน่งระหว่างเจ็ทสองตัวใกล้กันจะผสมดีกว่าวางห่างกัน ดังนั้นระยะห่างระหว่างเจ็ทตัวแรก และเจ็ทตัวที่สองก็เป็นประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการทำการศึกษาต่อไป

ความเร็วในการหมุนคง ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทดลองที่ค่า Swirl ratio ประมาณ 1.8 พบว่าการหมุนคงมีผลทำให้การไหลของเจ็ทแบบเรียงแถวในท่อมมีประสิทธิภาพการผสมที่ดียิ่งขึ้น ดังนั้นการที่กระแสมวงมีการหมุนคงมีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้ อย่างไรก็ตาม การหาค่าระดับการหมุนที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการผสมที่ดี และการหมุนคงก็ยังมี ข้อจำกัดที่ค่า Swirl ratio ค่าหนึ่งเท่านั้น ซึ่งประเด็นนี้ก็ยังคงเป็นประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการทำการศึกษาต่อไปเช่นกัน

ในการศึกษาการไหลที่มีความเร็วในการหมุนคงด้วยนั้น ประเด็นหนึ่งที่มีความน่าสนใจ คือ การเกิด Vortex Breakdown ในการไหลที่มีระดับการหมุนคงสูงๆ โดยในงานของ Feyedelem and Sarpkaya (1997) พบว่าการไหลแบบเจ็ทหมุนคงอิสระจะเกิด Vortex Breakdown เมื่อการไหลมีค่า Swirl number ประมาณ 0.48 ถึง 0.50 ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่าการ ไหลแบบหมุนคงในท่อนั้นจะมีปรากฏการณ์ Vortex Breakdown เกิดขึ้นหรือไม่ และถ้ามีจะเกิด ที่ระดับการหมุนคงเท่าไร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ทสองลำแบบ

เรียงแถวในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง ที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลประมาณ 6.00 โดยทดลองที่ค่า Swirl number (Sn) สูงสุดประมาณ 0.85 แต่ยังไม่ได้ตรวจสอบปรากฏการณ์ Vortex Breakdown ว่าเกิดขึ้นที่ค่า Swirl number เท่าไร

จากข้อมูลในงานวิจัยนี้ น่าจะเป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการไหลในแบบอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นในแบบ Active หรือ Passive Control หรือทั้ง 2 แบบควบคู่กันไป เช่นการติดตั้ง Vortex Generator ควบคู่กับการใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) รวมทั้งยังเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับการไหลในลักษณะอื่นๆ ได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประมวลตาราง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Trajectory	ค่าคงที่ A	ค่าคงที่ m
Outer boundary	2.63	0.28
Centerline	2.05	0.28
Inner boundary	1.35	0.28

ตารางที่ 1.1 ค่าคงที่ A และ m สำหรับ Trajectory ตามความสัมพันธ์ $y/r_d = A(x/r_d)^m$
(Pratte and Baines, 1967)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.2 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1.	Pratte and Baines (1967)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเส้นทาง (Trajectory) และอัตราการกระจายตัว (Spread Rate) ทดลองโดยการใช้ความเร็วใน Wind Tunnel ปากเจ็ตอยู่สูงจากพื้น 8 นิ้ว ติดอยู่กับแผ่นราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว และไม่มีผลของ Boundary Layer จากพื้น 	$\frac{u_j}{u_{cf}} =$ <ul style="list-style-type: none"> $r_m = 5.15, 25.35$ $d = 0.158, 0.248, 0.362$ inches 	<ul style="list-style-type: none"> Trajectory ของความเร็วจะ Collapse ที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆ กันใน $r_m d$-scale อัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของเจ็ต ใน Vortex Zone (บริเวณ Far field) มีค่าคงที่ประมาณ 1.4 ในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกนเจ็ต แสดงถึงการมี Self Similarity ใน Vortex Zone อัตราส่วนการกระจายตัวของเจ็ตจะถูกควบคุมโดย Turbulent และ Vortex Motion
2	Kamotani and Greber (1972)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเส้นทางและคุณลักษณะการผสม ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วและอุณหภูมิในอุโมงค์ลม 	<ul style="list-style-type: none"> $r_m = \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} = 15.3, 59.6$ $T_j - T_{cf} = 0, 75, 320$ °F 	<ul style="list-style-type: none"> อัตราส่วนโมเมนตัมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ

		<p>ความเร็วและอุณหภูมิในอุโมงค์ลม</p> <ul style="list-style-type: none"> ปากเจ็ตอยู่ติดกับแผ่นราบซึ่งอยู่สูงจากผนังพื้น 2.5 นิ้วและอยู่ห่างจากขอบด้านบนของแผ่นราบ 2 นิ้ว ใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็ว และ ใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ 	<ul style="list-style-type: none"> $Re_{cf} = \frac{u_{cf}d}{\nu} = 2800-4200$ 	<ul style="list-style-type: none"> อัตราส่วนความหนาแน่นมีผลต่อเส้นทางของอุณหภูมิเล็กน้อยแต่ไม่ผลต่อเส้นทางของความเร็ เส้นทางของอุณหภูมิอยู่ต่ำกว่าเส้นทางของความเร็ที่อัตราส่วนโมเมนตัมเดียวกัน ปริมาณความปั่นป่วนของเจ็ตเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโมเมนตัม
3.	Fric and Roshko (1994)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษา Interaction ระหว่าง Vortex และ โครงสร้างที่เกิดขึ้นของเจ็ตในกระแสผสมขวาง ใช้ Hot Wire Anemometer และ Smoke – Wire Flow Visualization 	<ul style="list-style-type: none"> $r_{ii} = 2-10$ $Re_j = \frac{u_j d}{\nu} = 7,600-11,400$ $Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 3,800-11,400$ 	<ul style="list-style-type: none"> Wake Vortex ที่เกิดใน Flow Field ไม่ได้เกิดจากเจ็ตแต่เกิดจาก Laminar Boundary Layer ที่ผนังของพื้นของกระแสผสมขวางบริเวณปากเจ็ตซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากการเกิด Wake ด้านหลังทรงกระบอก Strouhal Frequency ของ Wake ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็ว
4.	Smith and Mungal (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาการผสมและการ Scale ในลักษณะต่างๆของเจ็ตในกระแสผสม 	<ul style="list-style-type: none"> $r_{eff} = \left(\frac{\rho_f u_f^2}{\rho_c u_c^2} \right)^{1/2}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Centerline concentration decay แปลตาม $(s/\alpha d)^{-1.3}$ บริเวณ Near

		<p>ขวาง</p> <ul style="list-style-type: none"> • ทำการทดลองโดยศึกษา Scalar concentration ใน Wind tunnel • ใช้ Planar Laser-Induced Fluorescence (PLIF) 	<p>, 5 – 25</p> <ul style="list-style-type: none"> • $Re_l = \frac{u_l d}{\nu}$, 8400 – 41500 	<p>field และแปรตาม $(s/\alpha d)^{-2/3}$ บริเวณ Far field โดยมี Branch point อยู่ที่ $s = 0.3r_{eff}^2 d$ (s คือระยะทางในแนว Centerline)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Probability density function (p.d.f.) มีลักษณะ Non-marching ก่อน Branch point และมีลักษณะ Tilted หลัง Branch point
5.	Lim et al. (2001)	<ul style="list-style-type: none"> • ทำการทดลองโดยศึกษา Large-scale Structure ของเจ็ตใน กระแสลมขวาง • ทำการทดลองโดยใช้เทคนิค Flow Visualization ใช้ dye/alcohol mixture และ Fluorescein disodium dye 	<ul style="list-style-type: none"> • $Re = 1600$ • $r_{eff} = 4.6$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Large-scale Structure ของเจ็ตใน กระแสลมขวาง ในบริเวณของ Jet shear layer vortices เป็นลักษณะของ Loops vortex ซึ่งไม่ได้เกิดจากการหมุนตัวของ Vortex rings แต่ Loops vortex เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Cylindrical vortex sheet หรือ Jet column

ตารางที่ 1.3 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะเจ็ดในกระแสมวลของพื้นที่จำกัด (JICCF)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
6.	Kroll et al. (2000)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของจำนวน Orifice, อัตราส่วนตามยาวต่อความกว้างของ Orifice (Aspect Ratio) และมุมของการฉีดต่อการผสม ทดลองโดยการหาอุณหภูมิของการผสม ใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิ 	<ul style="list-style-type: none"> จำนวน Orifice (n) = 6,8,10,12,16 Aspect Ratio (AR) = 1,3,5 Orifice Angle = 0,30,60° Momentum Ratio = 40 Mass Flow Ratio = 2.5 	<ul style="list-style-type: none"> การผสมที่ดีขึ้นกับค่า Momentum Flux Ratio ควบคู่กับจำนวน Orifice ที่เหมาะสม การผสมไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของจำนวน Orifice, อัตราส่วนตามยาวต่อความกว้างของ Orifice (Aspect Ratio) และมุมของ Orifice ความสัมพันธ์ในการเจาะทะลุ (Penetration depth) ของเจ็ตเป็นฟังก์ชันของพื้นที่ของ Orifice, การทำให้เกิดการหมุนเนื่องจากการฉีดเจ็ตเป็นมุมเอียง และการขวางในทิศทางเส้นรอบวง (Circumferential Blockage) การผสมที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่เส้นทาง (Trajectory) ของเจ็ตอยู่ในช่วง

				<p>$0.3 < \frac{z}{R} < 0.5$; $\frac{z}{R} = R-r$ โดยการวัดที่ตำแหน่ง $\frac{x}{R} = 1.0$</p> <ul style="list-style-type: none"> • การฉีดเป็นมุมเอียง โดยมีค่า Blockage น้อยๆ และไม่ทำให้เกิดการหมุน (การหมุนเนื่องจากการฉีดเจ็ทเป็นมุมเอียง) จะทำให้ประสิทธิภาพการผสมดีขึ้น • การฉีดที่จำนวน Orifice ที่เหมาะสม จะทำให้การผสมดีขึ้น ไม่ว่าจะใช้ Orifice ที่มี Aspect Ratio เท่าใดก็ตาม
7.	Stoy and Ben-Haim (1973)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาหาเส้นทางและจุดตัด (Impingement Points) ของเจ็ทในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด • ใช้การวิเคราะห์จากสมการและการทดลอง 	<ul style="list-style-type: none"> • $Re_{cf} = 1 \times 10^4, 5 \times 10^4$ 	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถใช้การวิเคราะห์ใน 1 มิติในการทำนายเส้นทาง (Trajectory) และตำแหน่งการชนผนัง (Impingement Points) ของเจ็ทในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (Confined Crossflow) ได้

		<ul style="list-style-type: none"> ใช้ Pilot Probe วัดรูปร่างการกระจายตัวของความเร็ว 		<ul style="list-style-type: none"> สมการ Impingement Points ที่ได้จากการวิเคราะห์จากสมการคือ $\frac{x}{d_{j0}} = 19.6 \left(\frac{v_c}{v_{j0}} \right)^{1.82}$
8	Jame.et.al (1996)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตโดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆคือ จำนวน Orifice (n), Momentum Flux Ratio (r_m), มุม Slot, อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว Slot และความแตกต่างระหว่างรูปร่าง Slot กับ hole ทดลองโดยการหาอนุหภูมิการผสม ใช้ Theomocouple วัดอุณหภูมิ 	<ul style="list-style-type: none"> คงที่ จำนวน Orifice 8 ตัว เมื่อเปลี่ยน (r_m) = 26.7, 55.4 และ 84.2 คงที่ r_m เท่ากับ 36 เมื่อเปลี่ยนจำนวน Orifice (n) = 10, 11, 12 และ 14 รูปร่าง Orifice แบบ Slot กับแบบ hole อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว Slot (L/W) = 1. 	<ul style="list-style-type: none"> ระยะการเจาะทะลุของเจ็ตลดลงเมื่อ 1) จำนวน Orifice (n) เพิ่มขึ้น ที่ Momentum Flux Ratio (r_m) คงที่ 2) ระยะการเจาะทะลุของเจ็ตลดลงเมื่อ Momentum Flux Ratio (r_m) เพิ่มขึ้น ที่จำนวน Orifice (n) คงที่ 3) อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว Slot (L/W) เพิ่มขึ้น ที่โมเมนต์คงที่ และ 4) Slot ทำมุมมากขึ้น รูปร่างการผสมตามแนว Downstream ขึ้นอยู่กับ Momentum Flux Ratio (r_m), และจำนวน Orifice (n)

			<p>2, 4, 6 และ 8</p> <ul style="list-style-type: none"> • มุมของ Slot ต่อ กระแสลมขวางเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 	
9.	Raud et al. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาผลของความไม่มีเสถียรภาพของ กระแสลมขวางที่มีผลต่อเจ็ตใน บริเวณ Near Field • ใช้การวิเคราะห์และการทดลอง • ใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิ 	<ul style="list-style-type: none"> • Acceleration = 506; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ • $Re_{cf} = 115,000$ • $\frac{\rho_f}{\rho_{cf}} = 0.5$ 	<ul style="list-style-type: none"> • เมื่อกระแสลมขวางไม่มีเสถียรภาพจะทำให้เจ็ตสั้น และมีผลทำให้การผสมดีขึ้น • ค่าระยะการเจาะทะลุมีค่าลดลง เมื่อความเร็วเจ็ตมีค่าลดลง • เจ็ตจะหักเหมากขึ้นเมื่อกระแสลมขวางมีความเร็วมากขึ้น • ค่าของการสั้นของเจ็ตจะลดลงเมื่อเจ็ตเฉียงไปทาง Downstream มากขึ้น

ตารางที่ 1.4 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะการไหลแบบหมุนวนในท่อ (SPF)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
10.	Anwer and So (1989)	<ul style="list-style-type: none"> วัดค่าคุณสมบัติต่างๆ ทาง Turbulence เพื่อดูผลที่เกิดขึ้นจากการไหลแบบหมุนวน ใช้ Hot Film Probe วัดปริมาณ Turbulence ที่ผนัง (Flush – Mounted) ใช้ Hot Wire Anemometer 	<ul style="list-style-type: none"> Swirl Number (Sn) = 1 สถานะก่อนเข้าท่อ หมุนเป็น Fully Developed Flow $Re_{cf} = 50,000$ 	<ul style="list-style-type: none"> การไหลแบบหมุนวนที่เกิดจากการไหลผ่านท่อ หมุน ทำให้เกิด Circumferential Shear Strain ที่บริเวณผนังท่อเนื่องจากที่ผนังทอมีความเร็วเป็นศูนย์ จึงเกิดการลดความเร็วลงอย่างรวดเร็วและทำให้การไหลเป็น Turbulent สูงที่บริเวณดังกล่าว ซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลบริเวณกลางท่อ ซึ่งจะมีค่า Circumferential Shear Strain เป็นศูนย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติการไหลเป็น Solid Body Rotation
11	Weske and Sturov (1974)	<ul style="list-style-type: none"> วัดค่าความเร็วเฉลี่ยของการไหลใน 3 ทิศทาง (ความเร็วในแนวแกน ความเร็วในทิศทางเส้นรอบวงและ 	<ul style="list-style-type: none"> Swirl Number (S) = 0-3 สถานะก่อนเข้าท่อ หมุนเป็น 	<ul style="list-style-type: none"> คุณสมบัติต่างๆของการไหลแบบหมุนวน ซึ่งยังมี การไหลแบบ Solid Body Rotation ขึ้นกับค่า Swirl Number

		<p>ความเร็วในแนวรัศมีท่อ)</p> <ul style="list-style-type: none"> วัดค่าอุณหภูมิโดยใช้ Hot Wire Anemometer 	<p>Uniform Flow</p> <ul style="list-style-type: none"> $Re_{cf} = 3 \times 10^4$ 	<ul style="list-style-type: none"> ระยะที่ใช้ในการสลายตัวของปริมาณ Turbulence ของการไหลแบบหมุนควงมีค่ามากกว่า 100 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
12	Kobkanjanakorn and Bunyajitradulya (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของการไหลแบบหมุนควงที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนของการไหลในท่อตรง ท่อโค้ง และหลังท่อโค้ง ทำการทดลองโดยการวัดความดันบริเวณผิวท่อ 	<ul style="list-style-type: none"> ใช้ Swirl generator แบบใบพัด (Guide Vane) ที่มีทิศทางการหมุนอยู่ในทิศเดียวกับทิศทางของการไหลและทิศทางตรงข้าม $S = 3.7$ $Re_D = 7.5 \times 10^4$ 	<ul style="list-style-type: none"> การไหลแบบหมุนควงที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนทำให้เกิดความแตกต่างความดันตามแนวเส้นรอบวงของท่อ การสลายตัวของความไม่สม่ำเสมอของความดันมีลักษณะเป็นเอกซ์โปเนนเชียลกับระยะทางการไหลตามแนวท่อ ความไม่สม่ำเสมอของความดันจะลดลงเป็น 5 % ของความดันจลน์ที่ระยะทางประมาณ $30D$ หลัง Swirl Generator กรณีการไหลแบบหมุนควงผ่านท่อโค้ง ความโค้งของท่อมีผลน้อยต่อดัชนีการกระจายตัวของค่าความ

				<p>แตกต่างความดันที่ท่อตรงด้านทาง ออกของท่อโค้ง แต่จะมีผลบ้างในช่วง ท่อโค้ง (ท่อโค้งมีขนาดรัศมีความโค้ง ต่อรัศมีท่อ = 3.2)</p>
--	--	--	--	--



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.5 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคูณลักษณะเจ็ตในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงโดยเจ็ตและของไหลมีทิศทางเดียวกัน (JICSCF)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
13.	Ahmed et al. (1985)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ตกับ Co-flow ต่อลักษณะการผสม ใช้ LDA วัดความเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> Helium/Air Jet $\frac{\rho_j}{\rho_a} = 0.3$ Flow คือ Air Swirl Number (Sn) = 2.25 $Re_{cf} = 5.49 \times 10^4$ 	<ul style="list-style-type: none"> ลักษณะความแตกต่างที่สำคัญระหว่าง Air กับ Helium/Air Jet เกิดจากคุณสมบัติของ Swirl และความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่าง Jet Fluid กับ Co-flow Confined Helium/Air Jet (ในกรณีไม่มี Swirl) มีการกระจายตัวสูง โดยระยะทางที่ใช้ในการปรับเข้าสู่สมดุลใหม่ $< 30d_j$ และระยะทางประมาณเท่ากับ Confined Air Jet (ใช้ข้อมูลของ Confined Air Jet จากการศึกษาทดลองของ So et al., 1985 ในการเปรียบเทียบ โดยค่า $\frac{\rho_j}{\rho_a} = 1$) Confined Helium/Air Jet เมื่อใส่

				<p>Swirl จะยังพบลักษณะของ Jet ที่ตำแหน่ง $> 40d_j$ คือ Decay Rate ต่ำกว่า Confined Air Jet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mechanism ที่สำคัญที่กีดขวางการ Diffusion ระหว่าง Helium กับ Air คือ Pressure Gradient ตามแนว Radial เนื่องจากความหนาแน่นที่ไม่เท่ากันของ Helium กับ Air ในขณะที่ Air กับ Air ไม่มี • การเคลื่อนที่แบบหมุน (Swirl) เป็นสิ่งที่ทำให้การผสมดีขึ้น ในกรณีนี้ Jet และ Co-flow มีความหนาแน่นเท่ากัน
--	--	--	--	--

ตารางที่ 1.6 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะเจตในทอที่มีการไหลแบบหมุนควงโดยเจตและของไหลมีทิศทางตรงข้ามกัน (JISPF)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
14.	Sharif and Busnaina (1989)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของการฉีดเจตในทอที่มีการไหลแบบหมุนควงด้วยการคำนวณและเปรียบเทียบกับการทดลอง การคำนวณ ใช้ $k-\epsilon$ model ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน 	<ul style="list-style-type: none"> $r_u = 2, 4$ และ 6 Swirl vane angle 0, 45 และ 70 องศา 	<ul style="list-style-type: none"> ระบะการเจาะทะลุของเจตตามแนวแกน, แนวลำมี และการเอียงไปตามเส้นรอบวงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วเจตกับการไหลแบบหมุนควง โดยเจตจะเอียงไปตามเส้นรอบวงมากขึ้นเมื่อค่าการหมุนควงสูงขึ้น การทำนายผลโดยวิธีคำนวณมีความใกล้เคียงกับการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยในแต่ละกรณีการทดลอง	ความแตกต่างมากที่สุดในแต่ละกรณี
สำหรับทุกกรณีการทดลอง		
อัตราส่วนโดยมวลของกระแสลมขวางต่ออัตราส่วนโดยมวลของเจ็ด (r_O)	2.55	$\pm 2\%$
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ($r_{eff} = (\rho_j \overline{u_j^2} / \rho_{cf} (\overline{u_{cf}^2} + w_R^2))^{1/2}$)	6.00	$\pm 5\%$
อัตราส่วนความหนาแน่น ($r_d = \rho_j / \rho_{cf}$)	0.83	$\pm 1\%$
กรณี S0rdxx		
ความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง ($\overline{u_{cf}}$)	1.40 m/s	$\pm 7\%$
ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของกระแสลมขวาง ($u_{cf,c}$)	1.63 m/s	$\pm 5\%$
อุณหภูมิเฉลี่ยของกระแสลมขวาง ($\overline{T_{cf}}$)	34.3 °C	$\pm 2\%$ (คิดจาก °C)
อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของกระแสลมขวาง ($T_{cf,c}$)	35.6 °C	$\pm 1\%$ (คิดจาก °C)
ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ด ($\overline{u_j}$)	9.23 m/s	$\pm 2\%$
ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของเจ็ด ($u_{j,c}$)	12.14 m/s	$\pm 2\%$
อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ด ($\overline{T_j}$)	97.3 °C	$\pm 1\%$ (คิดจาก °C)
อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของเจ็ด ($T_{j,c}$)	100 °C	$\pm 1\%$ (คิดจาก °C)
กรณี S18rdxx		
ความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง ($\overline{u_{cf}}$)	1.40 m/s	$\pm 7\%$
ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของกระแสลมขวาง ($u_{cf,c}$)	1.56 m/s	$\pm 5\%$
ความเร็วที่ขอบท่อของกระแสลมขวาง (w_R)	2.52 m/s	$\pm 5\%$
อุณหภูมิเฉลี่ยของกระแสลมขวาง ($\overline{T_{cf}}$)	34.3 °C	$\pm 1\%$ (คิดจาก °C)
อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของกระแสลมขวาง ($T_{cf,c}$)	34.6 °C	$\pm 1\%$ (คิดจาก °C)
ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ด ($\overline{u_j}$)	19.01 m/s	$\pm 2\%$
ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของเจ็ด ($u_{j,c}$)	22.54 m/s	$\pm 1\%$
อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ด ($\overline{T_j}$)	97.3 °C	$\pm 1\%$ (คิดจาก °C)
อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของเจ็ด ($T_{j,c}$)	100 °C	$\pm 1\%$ (คิดจาก °C)

ตาราง 2.1 รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี

Case	$\pm 0.10 (C_{TG})$		$\pm 0.05 (C_{TG})$	
	$x/r_{eff}d$	x/D	$x/r_{eff}d$	x/D
<i>S0rd00</i>	2.50	4.20	-	-
<i>S0rd05</i>	2.00	2.37	-	-
<i>S0rd10</i>	2.12	2.52	-	-
<i>S18rd00</i>	1.50	1.68	-	-
<i>S18rd05</i>	1.50	1.18	2.50	1.96
<i>S18rd10</i>	1.50	1.18	3.00	2.36

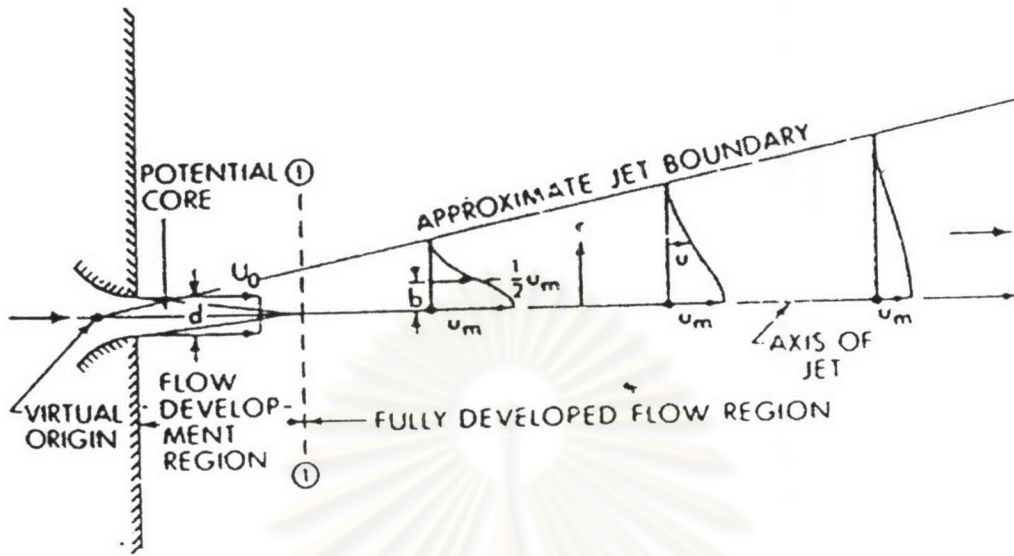
ตาราง 3.1 ระยะทางตาม Downstream ที่ใช้เพื่อให้การกระจายตัวของอนุภาคมีความสม่ำเสมอสำหรับกรณีต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

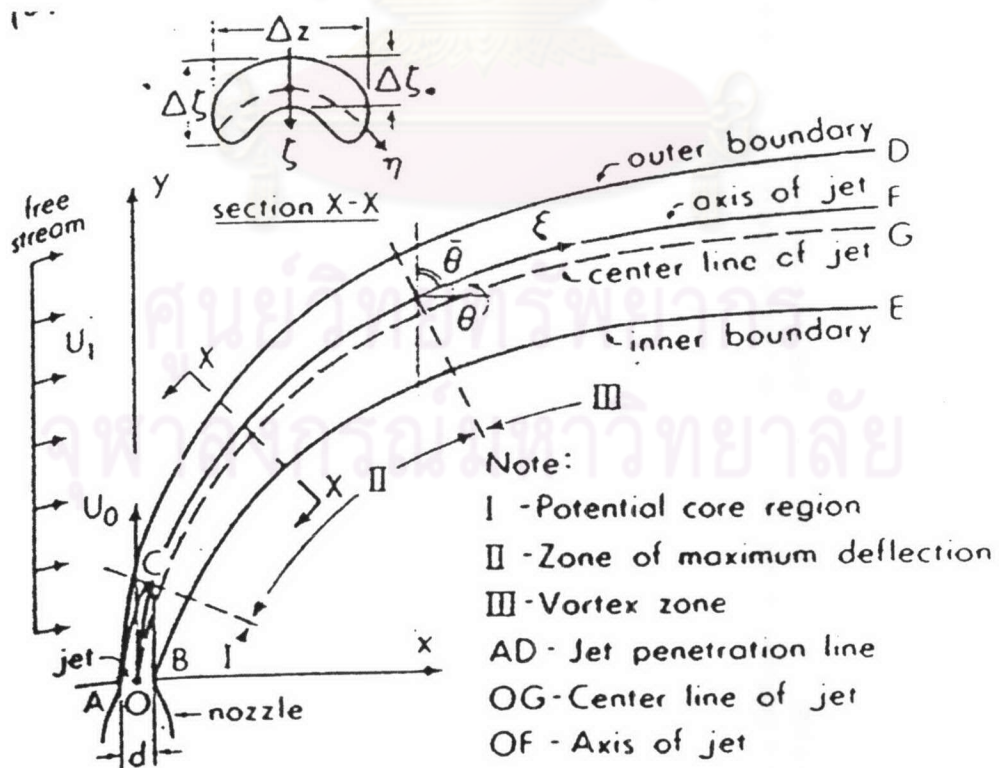


ประมวลรูปภาพ

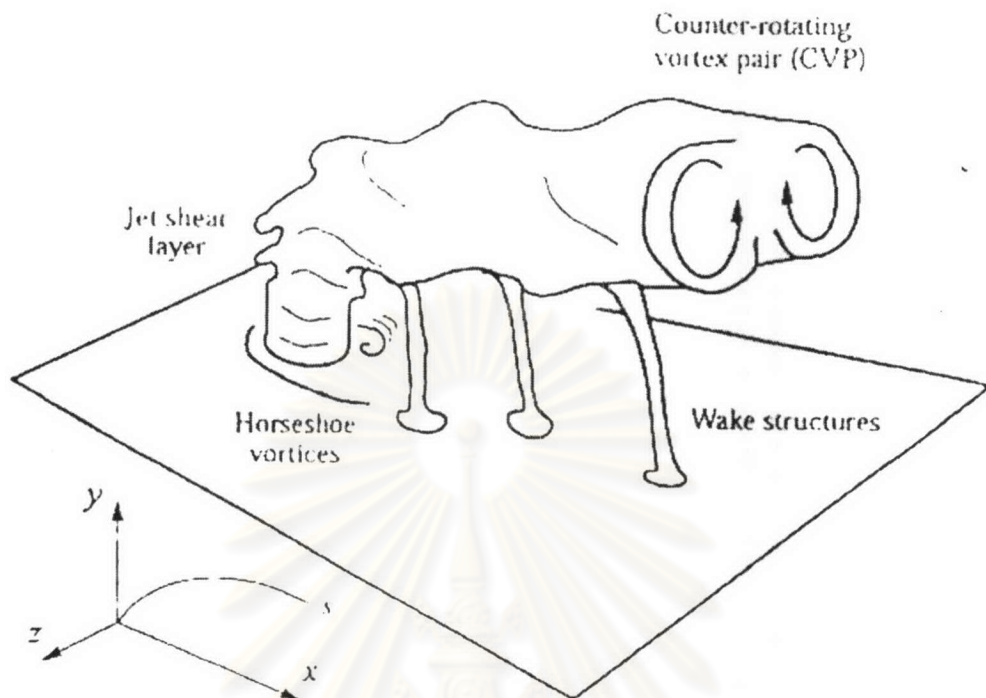
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.1 ลักษณะของ Circular Turbulent Jet (Rajaratnam, 1976)

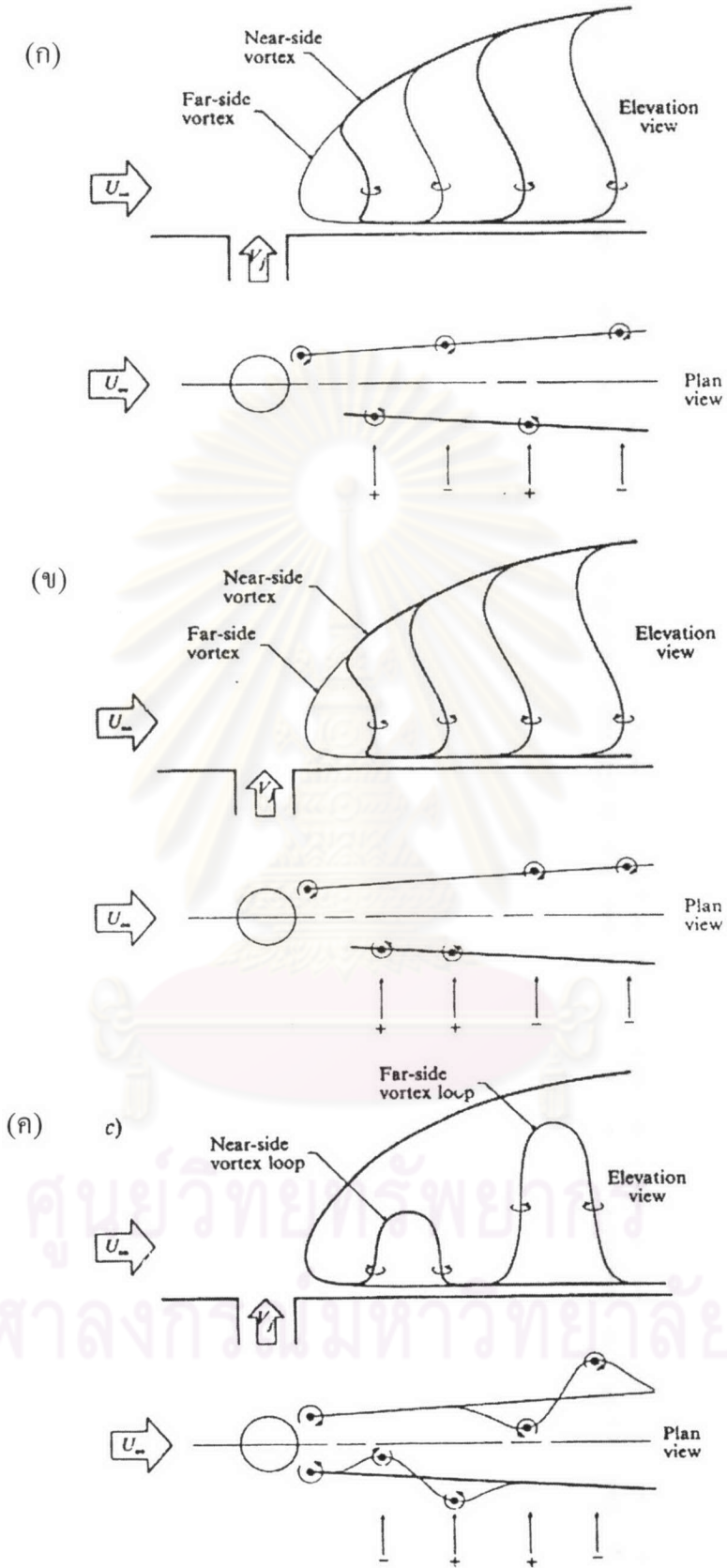


รูปที่ 1.2 ลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Rajaratnam, 1976)

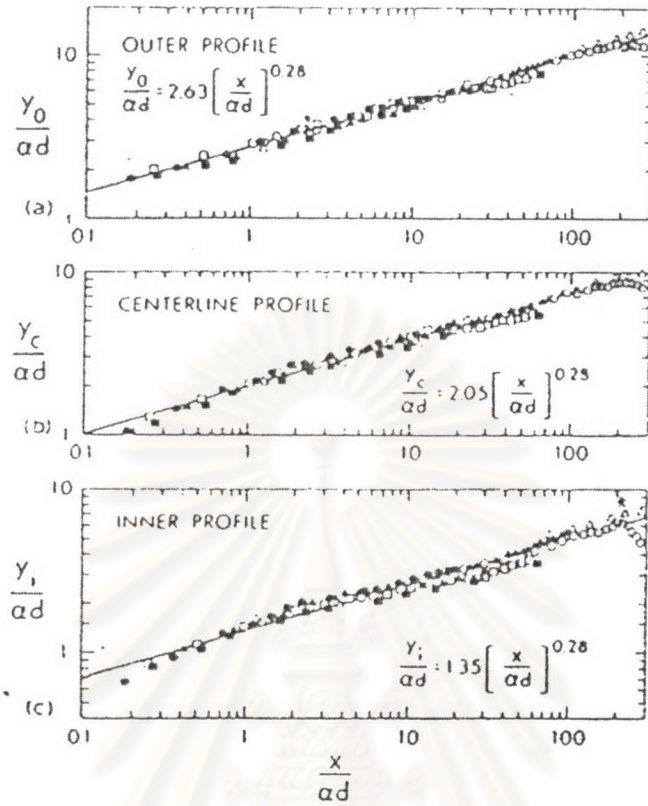


รูปที่ 1.3 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง
(Fric and Roshko, 1994)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

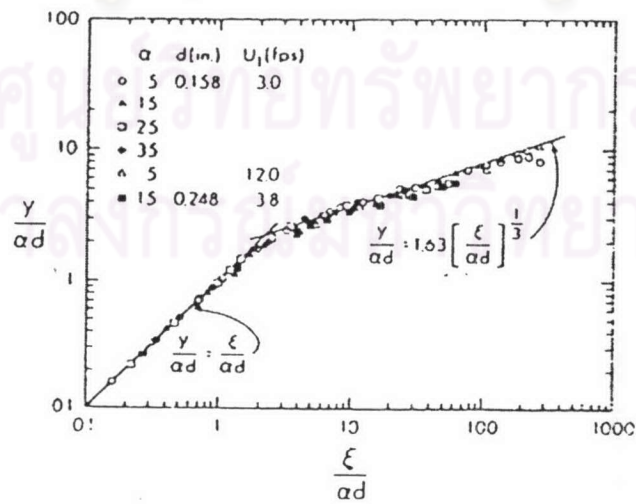


รูปที่ 1.4 ลักษณะของ Wake vortices (Kelso et al., 1996) (ก) Von Kármán vortex street (ข) Mushroom-like upright vortex structure (ค) Alternative Mushroom-like upright

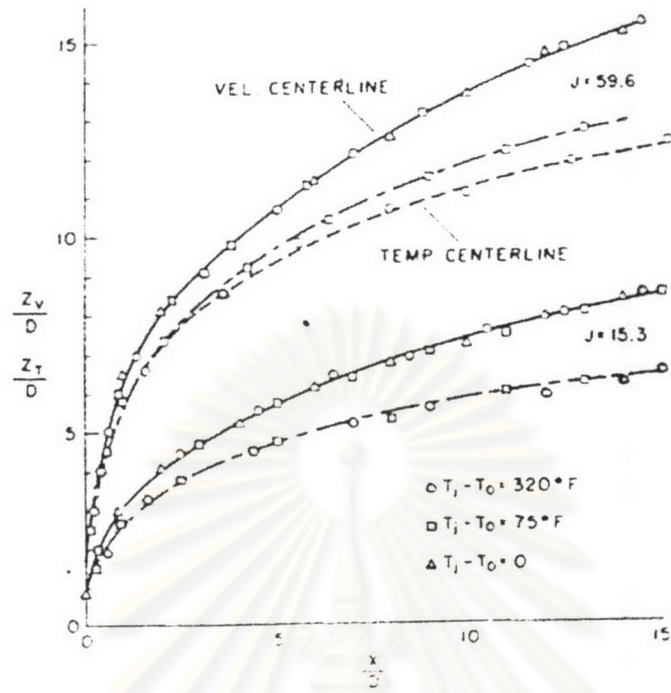


α	$d(\text{in})$	$U_1(\text{fps})$	$d(\text{in})$	$U_1(\text{fps})$
○	5	0.158	30	
△	15		5	120
□	25		15	0.248
●	35		38	

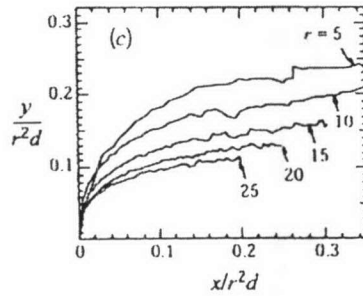
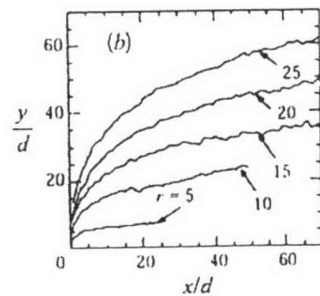
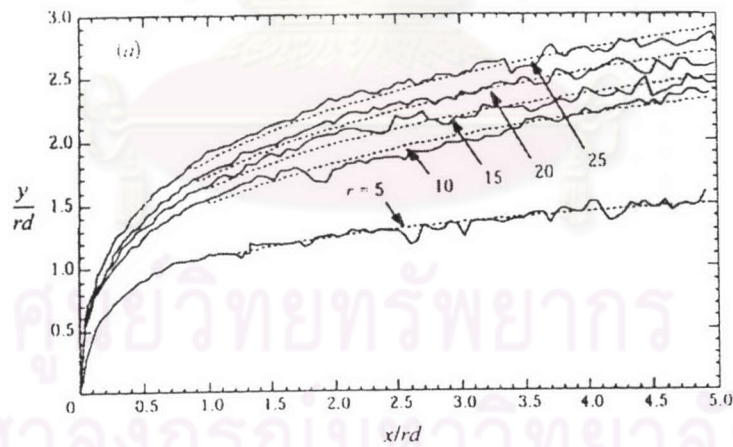
รูปที่ 1.5 เส้นทาง (Trajectory) ของเจ็ตในกระแสมขวาง (Pratte and Baines, 1967)



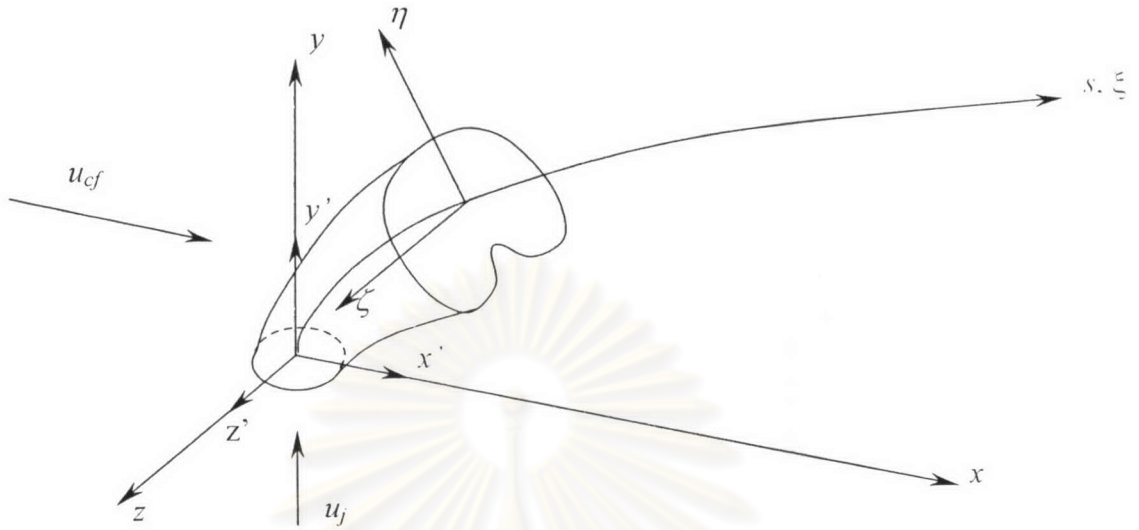
รูปที่ 1.6 Centerline Trajectory ตามแนวแกนเจ็ตของเจ็ตในกระแสมขวาง (Pratte and Baines, 1967)



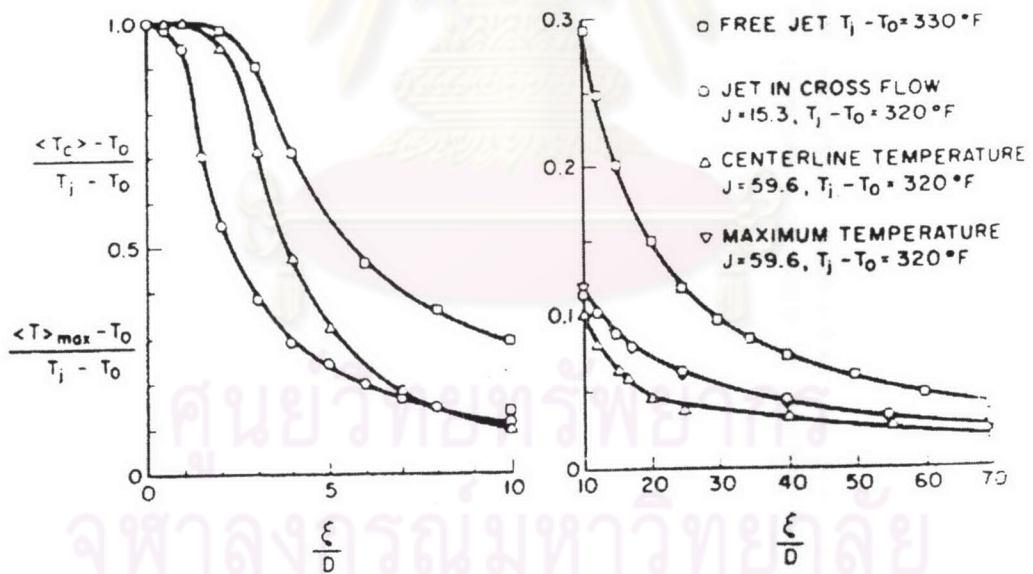
รูปที่ 1.7 เส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิในกรณี $T_j - T_o = 0^\circ\text{F}$, $T_j - T_o = 75^\circ\text{F}$ และ $T_j - T_o = 320^\circ\text{F}$ (Kamotani and Greber, 1972)



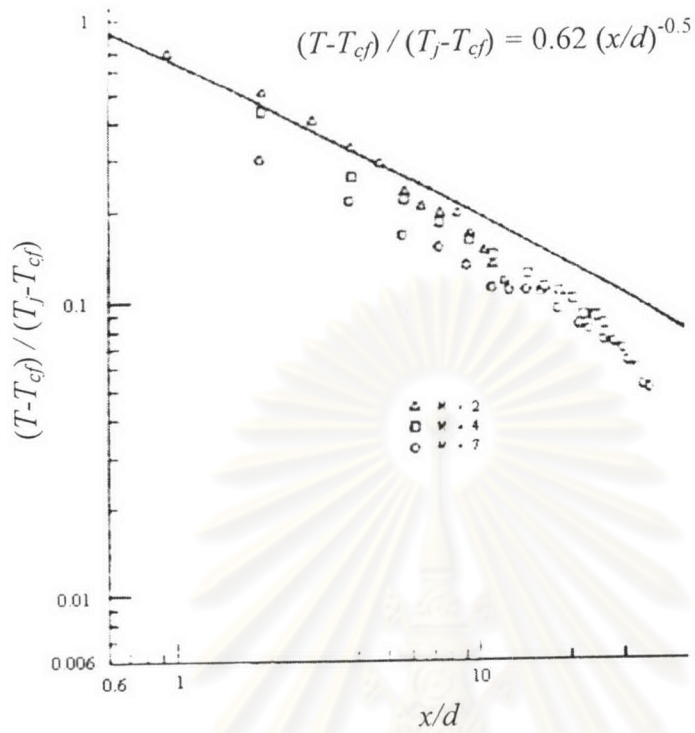
รูปที่ 1.8 Centerline trajectory (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 1.9 พิกัดอ้างอิง Cartesian

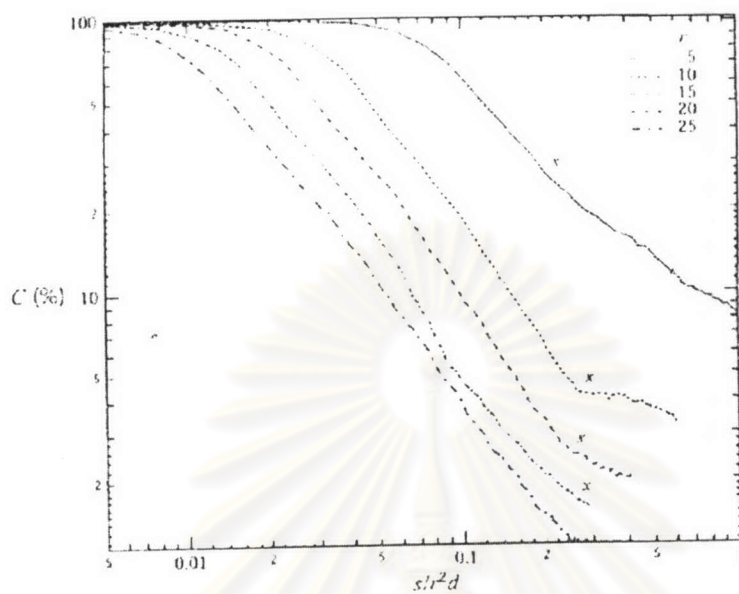


รูปที่ 1.10 การลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ต (ξ) บนระนาบสมมาตร (Kamotani and Graber, 1972)

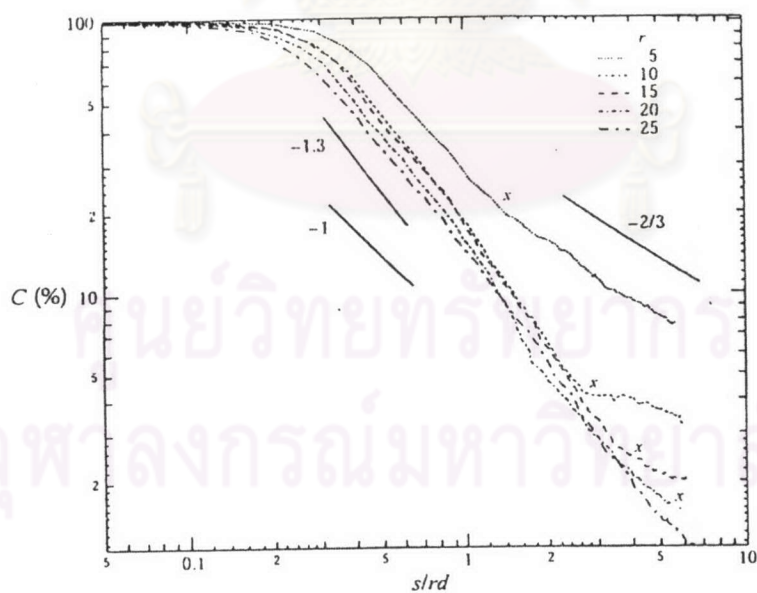


รูปที่ 1.11 การลดลงของอุณหภูมิตามแนว Downstream (x) บนระนาบสมมาตร (Sherif and Pletcher, 1989)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



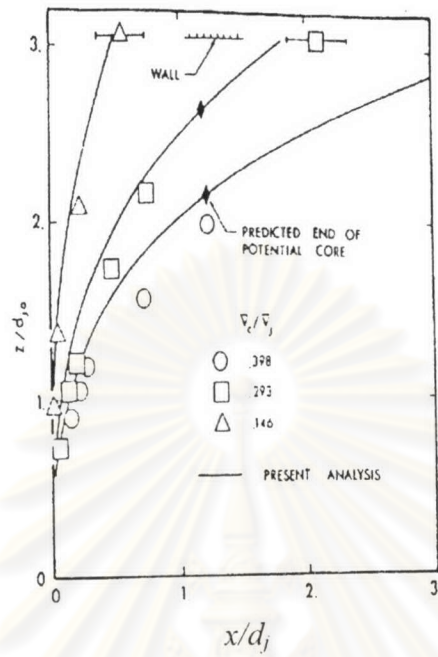
(ก)



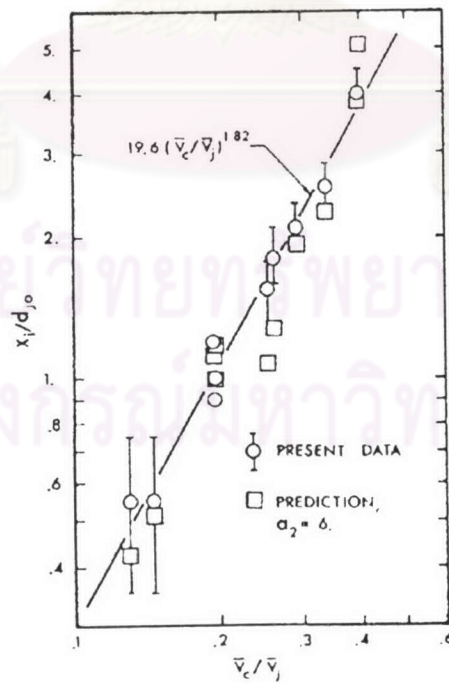
(ข)

รูปที่ 1.12 การลดลงของ Concentration ตามแนวแกนเจ็ต (s) (Smith and Mungal, 1998)

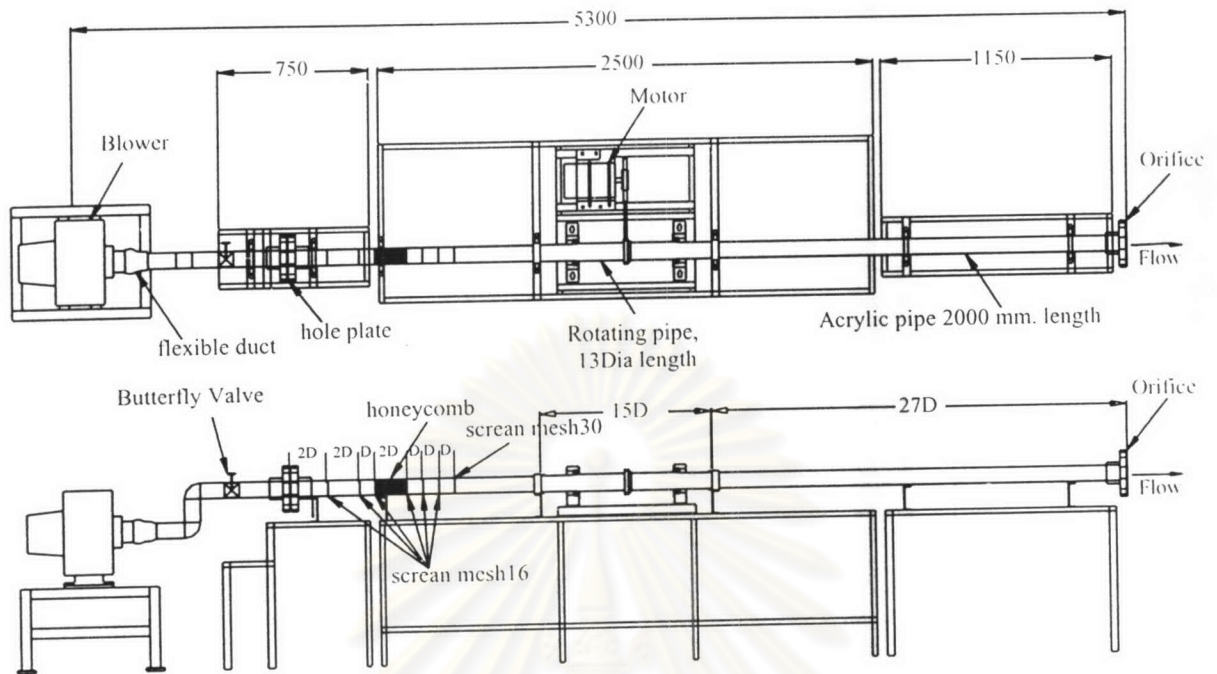
(ก) สเกลด้วย $r^2 d$ (ข) สเกลด้วย rd



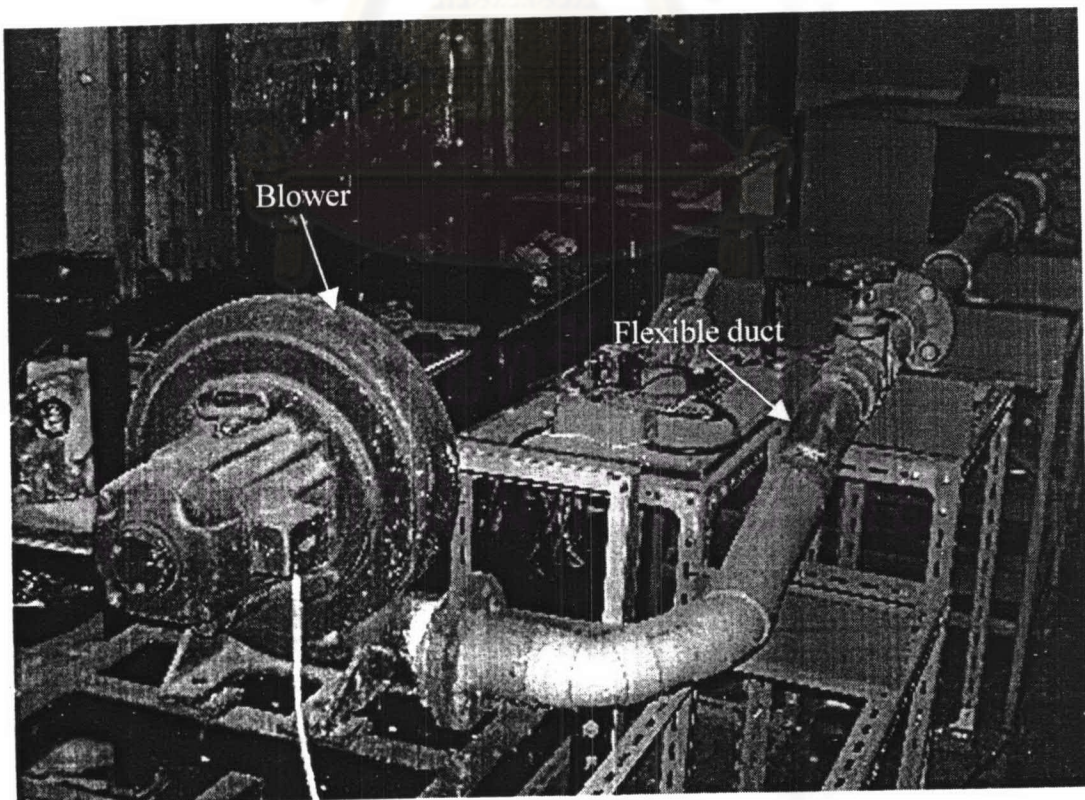
รูปที่ 1.13 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เส้นทางของเจ็ตใน Channel flow ($L/d_{j0} = 3.05$) (Stoy and Ben-Haim, 1973)



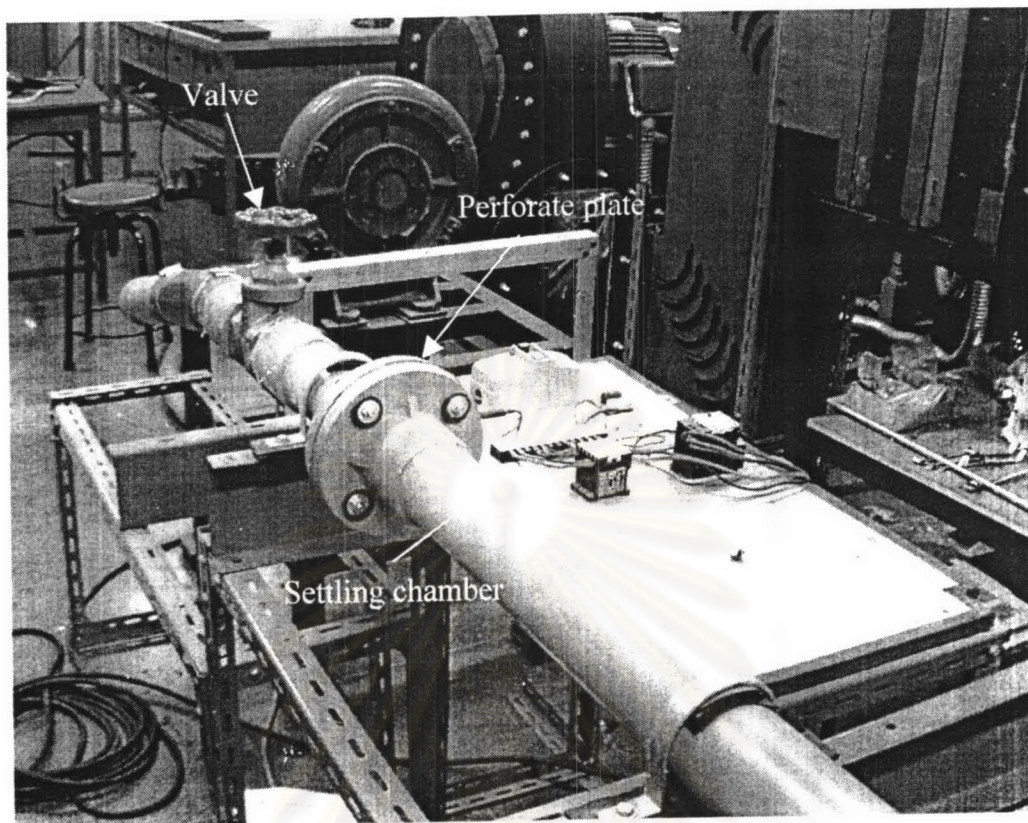
รูปที่ 1.14 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ จุดตัด (Impingement length) ของเจ็ตใน Channel flow ($L/d_{j0} = 3.05$) (Stoy and Ben-Haim, 1973)



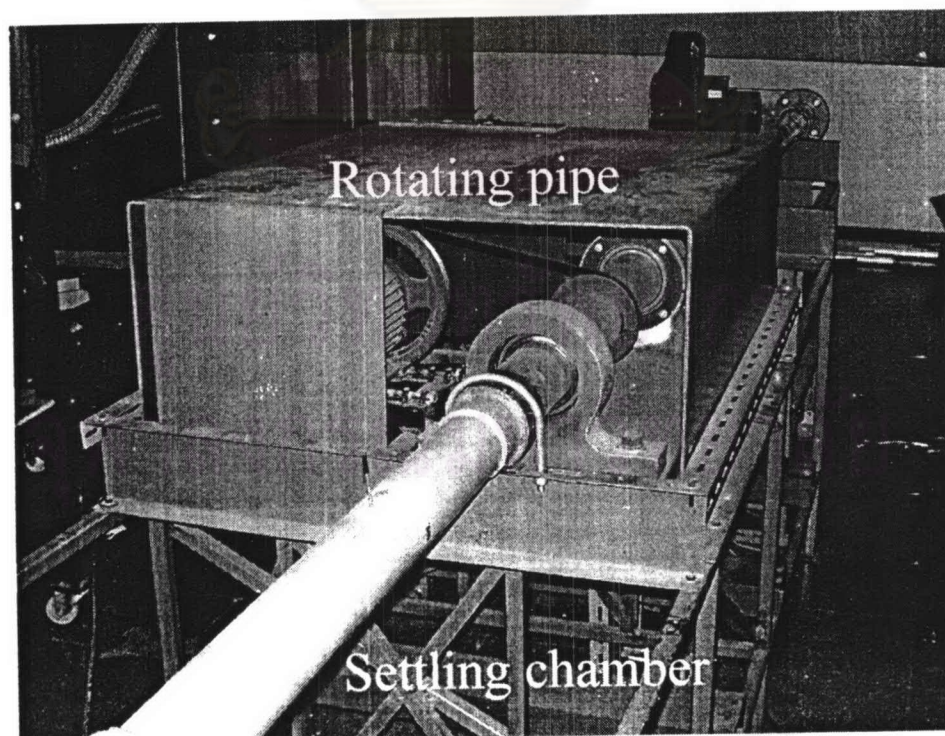
รูปที่ 2.1 รูป Schematic ของชุดทดสอบการไหล (All dim. in mm.)



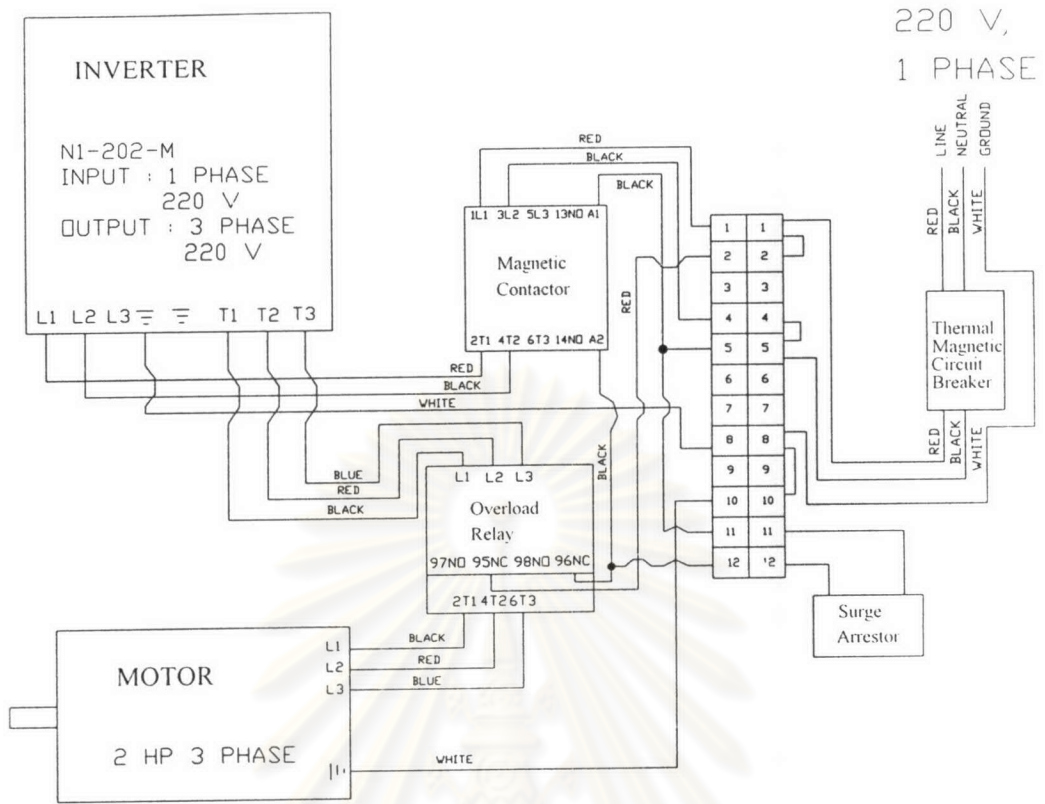
รูปที่ 2.2 พัดลมหยอโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ที่ใช้ในชุดทดสอบการไหล



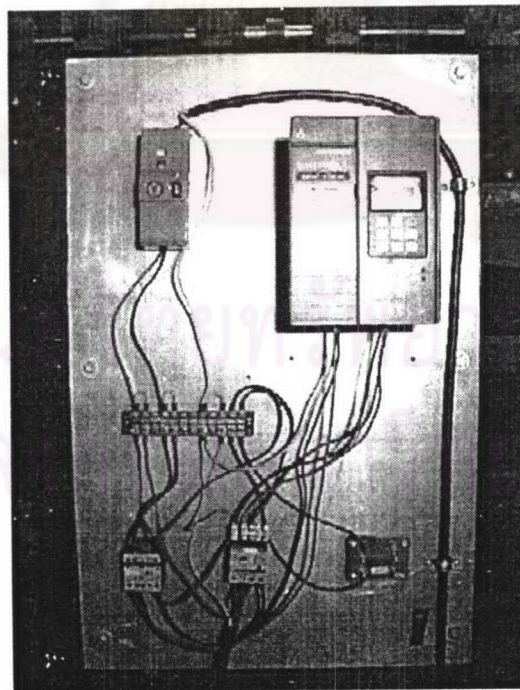
รูปที่ 2.3 ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber)



รูปที่ 2.4 ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) และท่อหมุน (Rotating pipe)

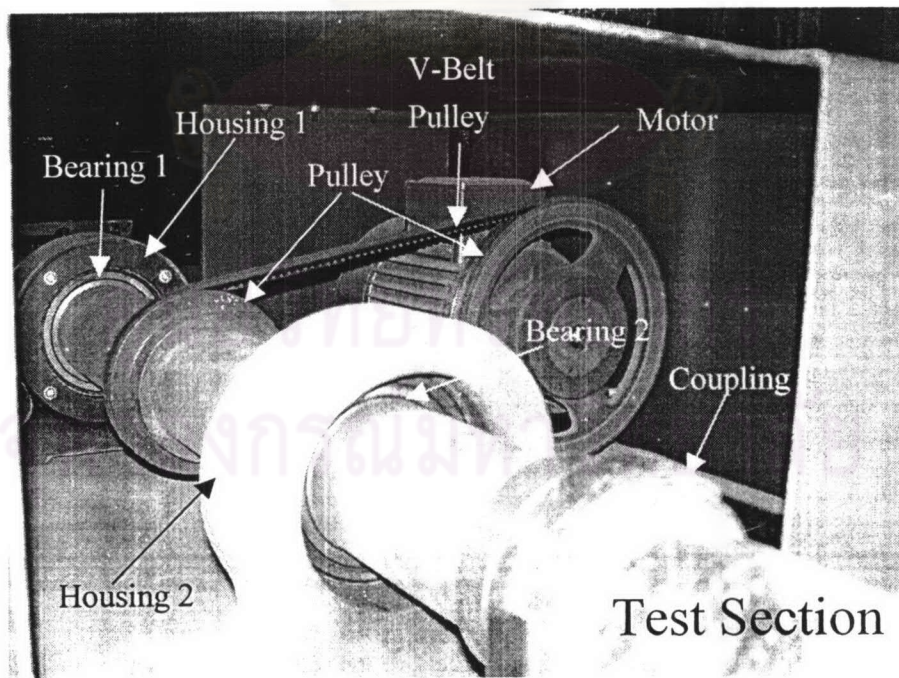
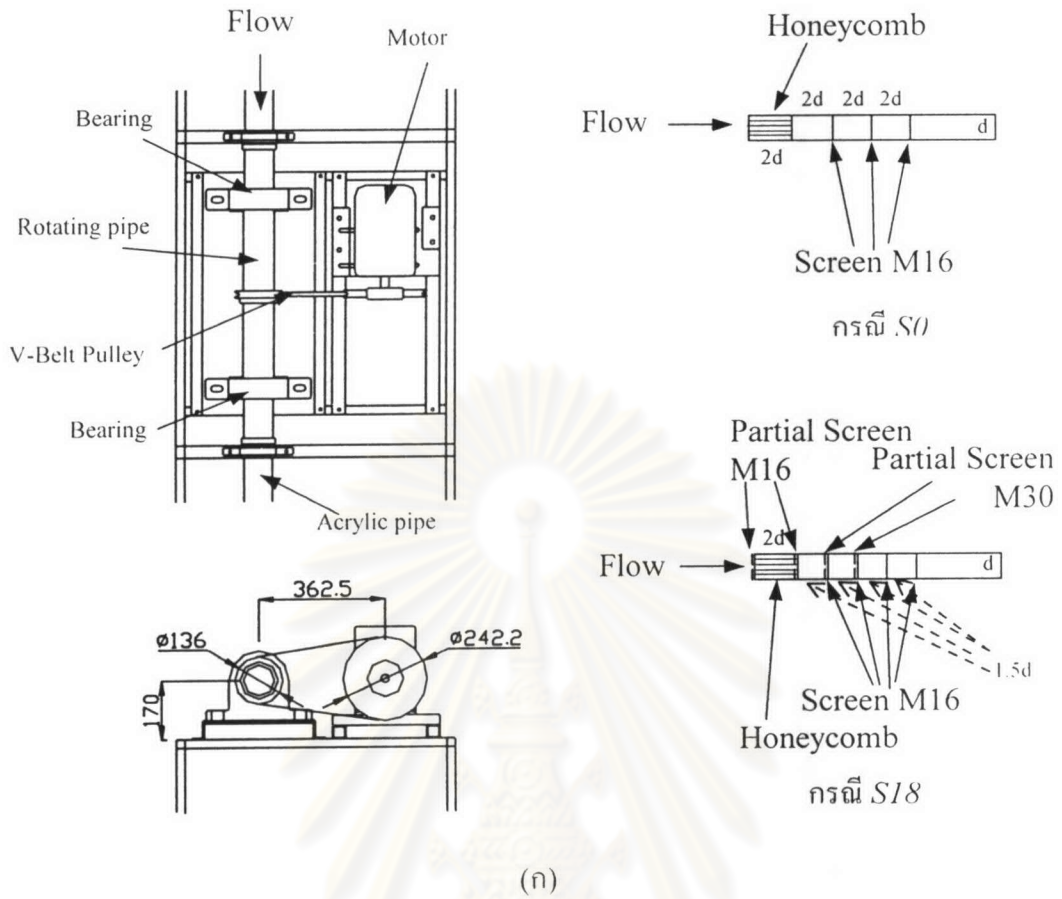


(ก)



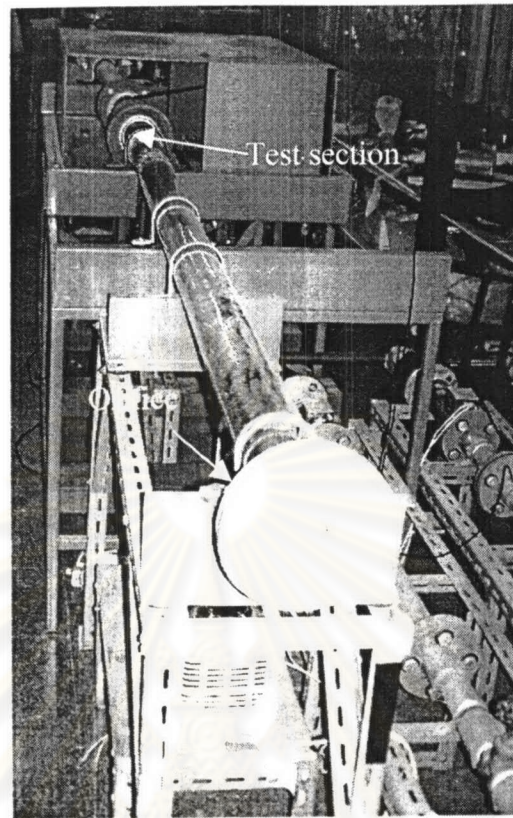
(ข)

รูปที่ 2.5 วงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วของท่อหมุน (ก) รูป Schematic, (ข) รูปถ่าย

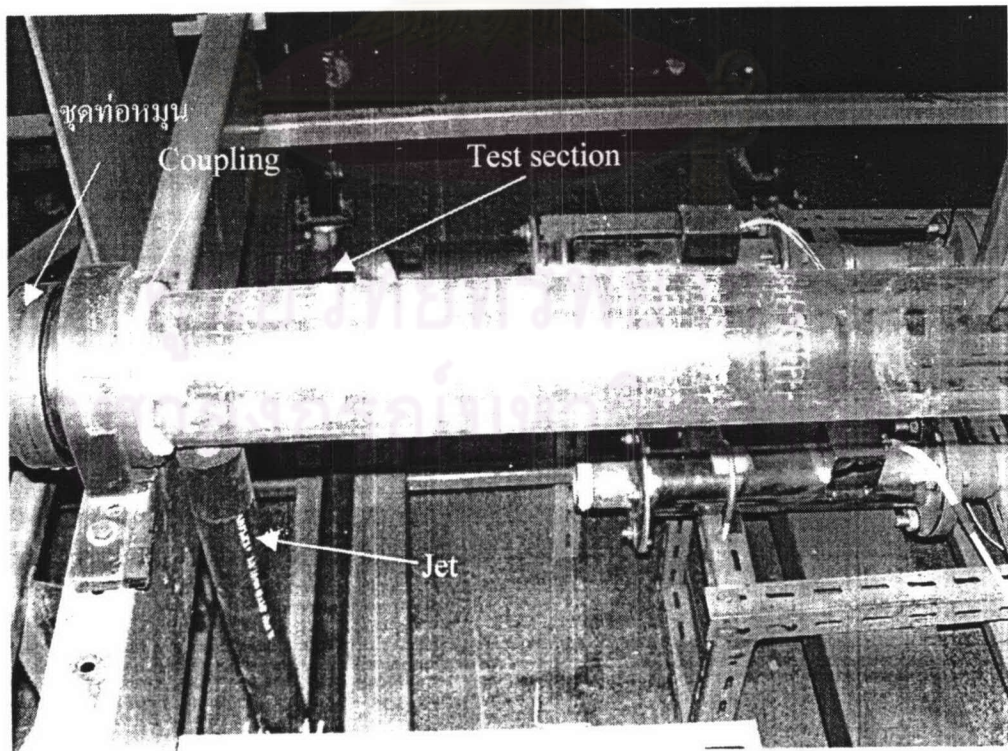


(ข)

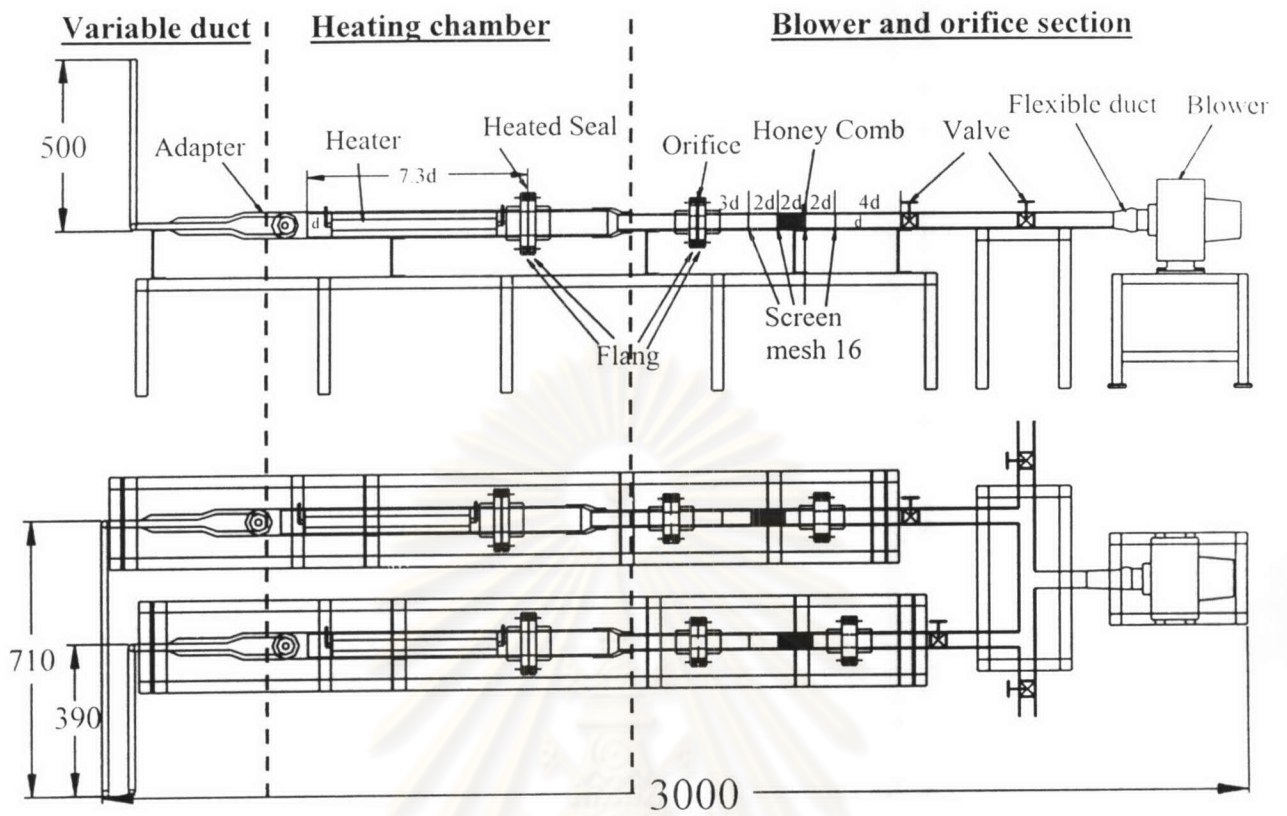
รูปที่ 2.6 รายละเอียดชุดท่อหมุน (Rotating pipe) (ก) รูป Schematic, (ข) รูปถ่าย



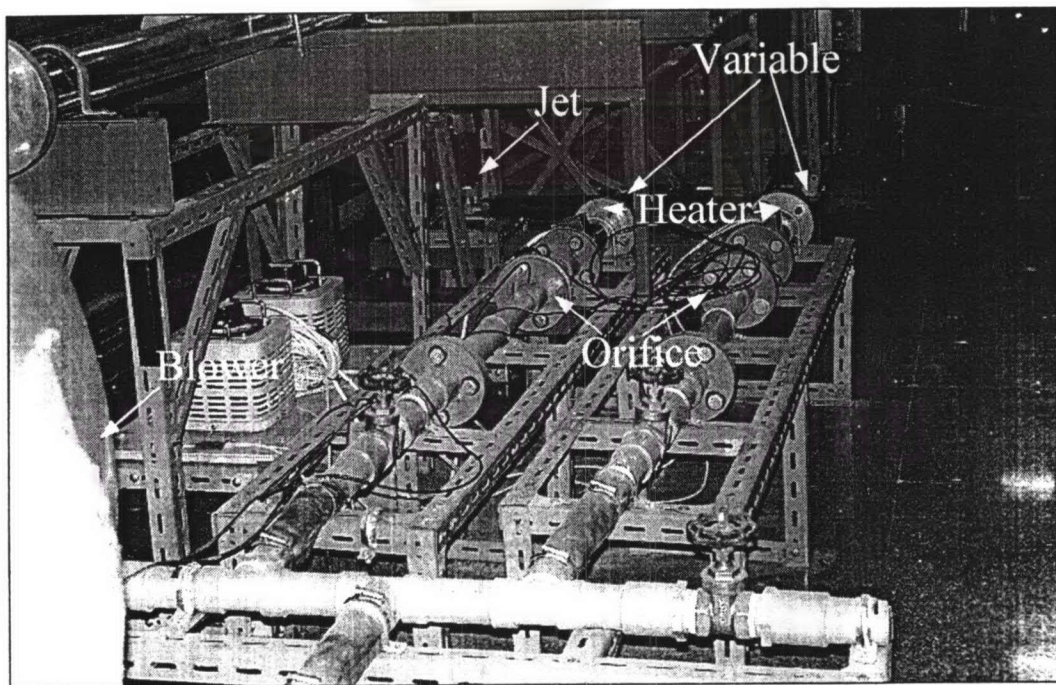
รูปที่ 2.7 หน้าตัดทดสอบ (Test section) และ Orifice



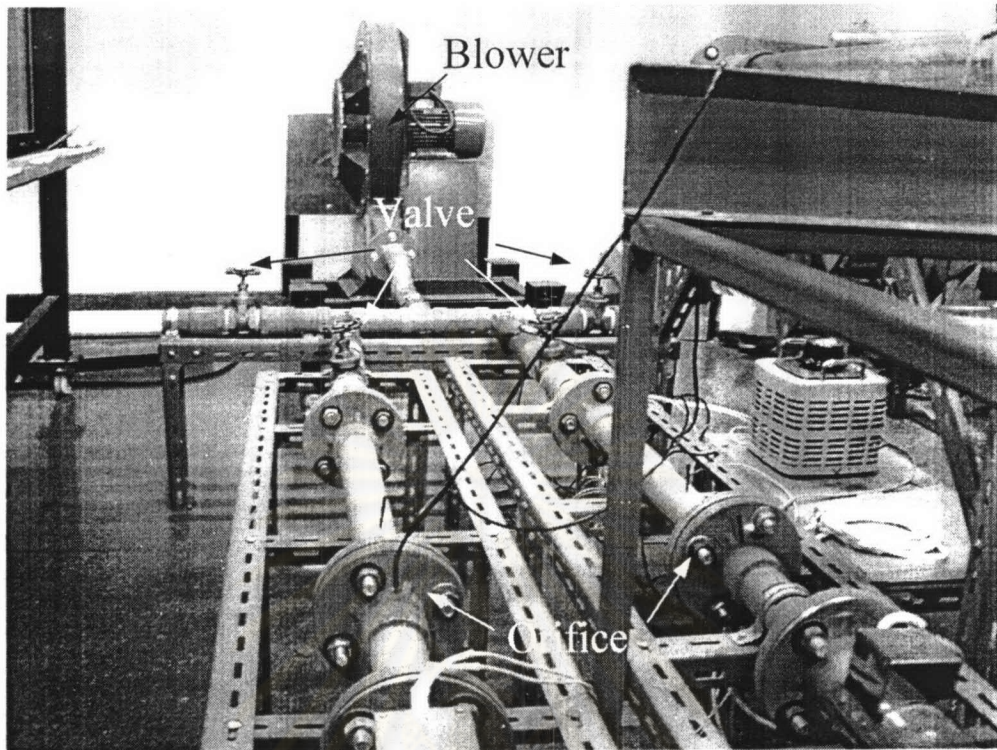
รูปที่ 2.8 รูปการประกอบ Test section กับชุดท่อหมุน



รูปที่ 2.9 รูป Schematic แสดงส่วนประกอบของชุดเจ็ต (All dim. in mm.)

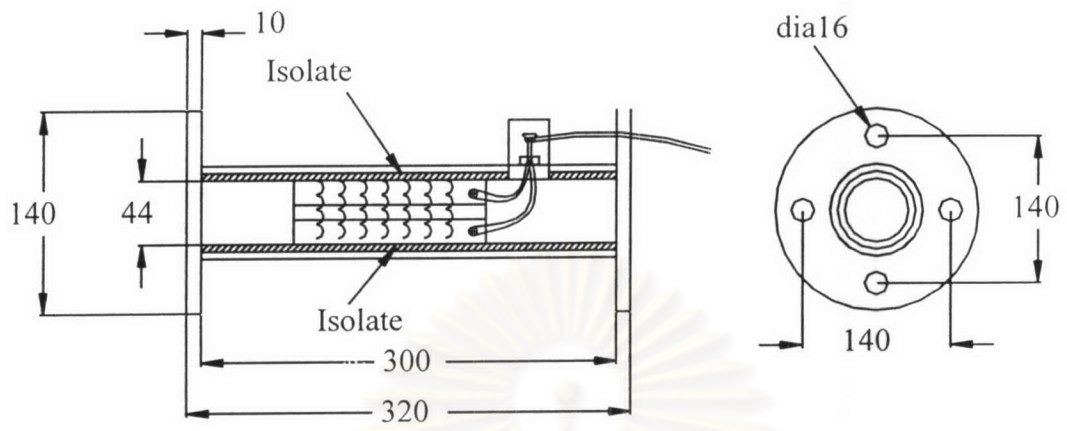


รูปที่ 2.10 ชุดเจ็ตทั้งสามส่วนคือส่วนพัลลมและ Orifice ส่วน Heating chamber และส่วนขั้วผลต่อเจ็ต (Variable duct)

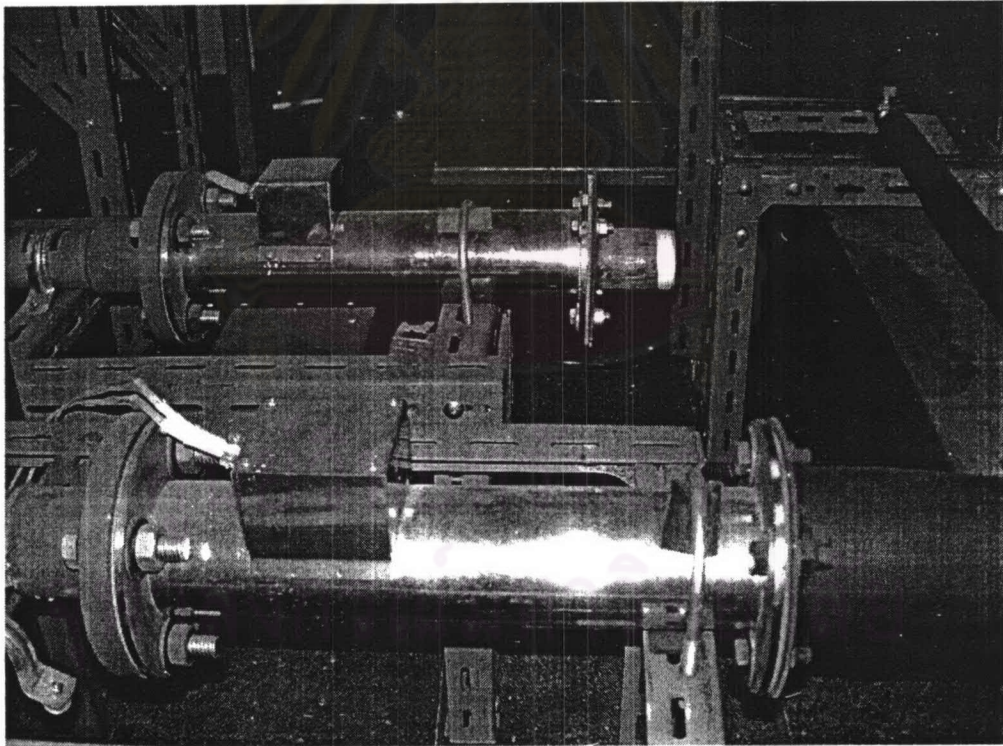


รูปที่ 2.11 ส่วนพัดลม (Blower) และ Orifice ของชุดเจ็ด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

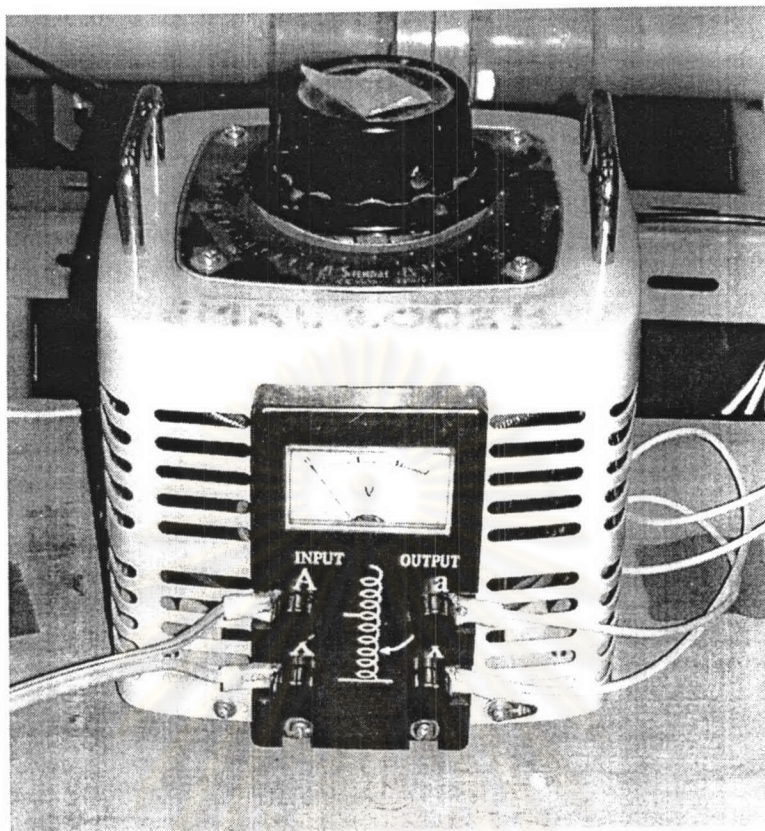


(ก)

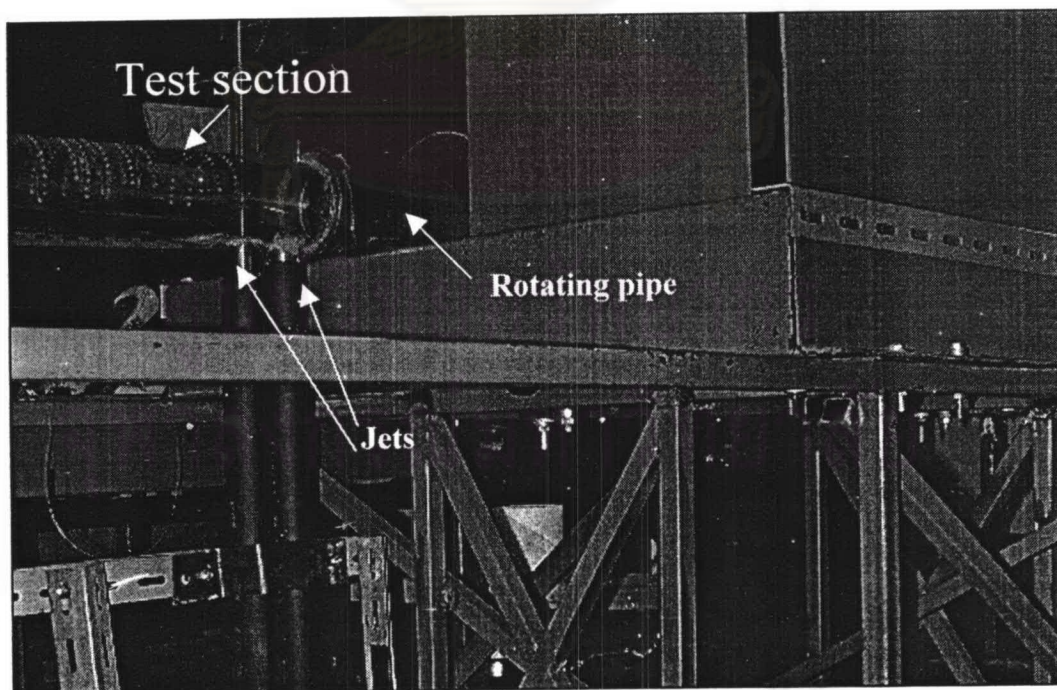


(ข)

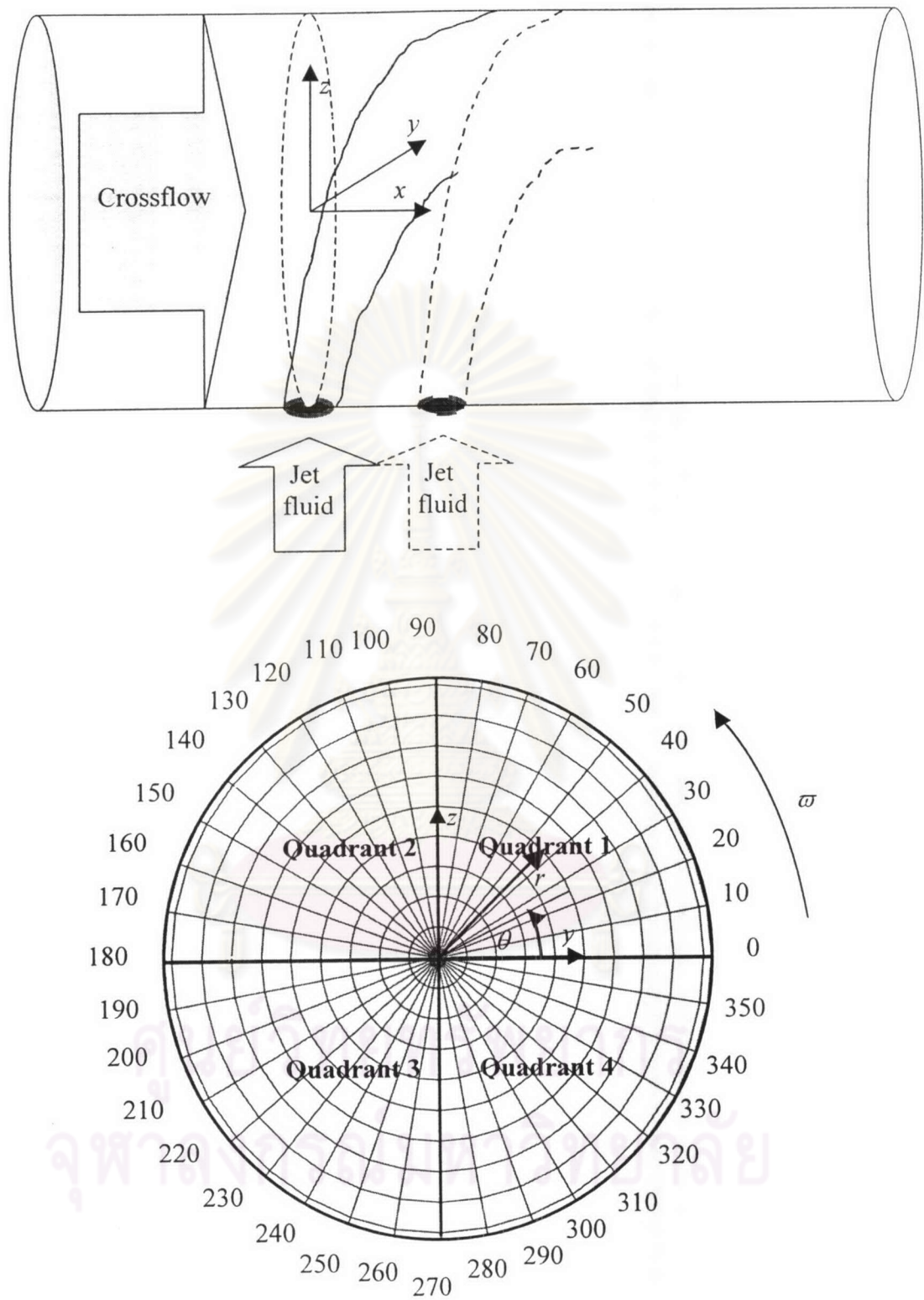
รูปที่ 2.12 ส่วน Heating chamber ของชุดเจ็ด (ก) รูป Schematic (ข) รูปถ่าย
(All dim. in mm.)



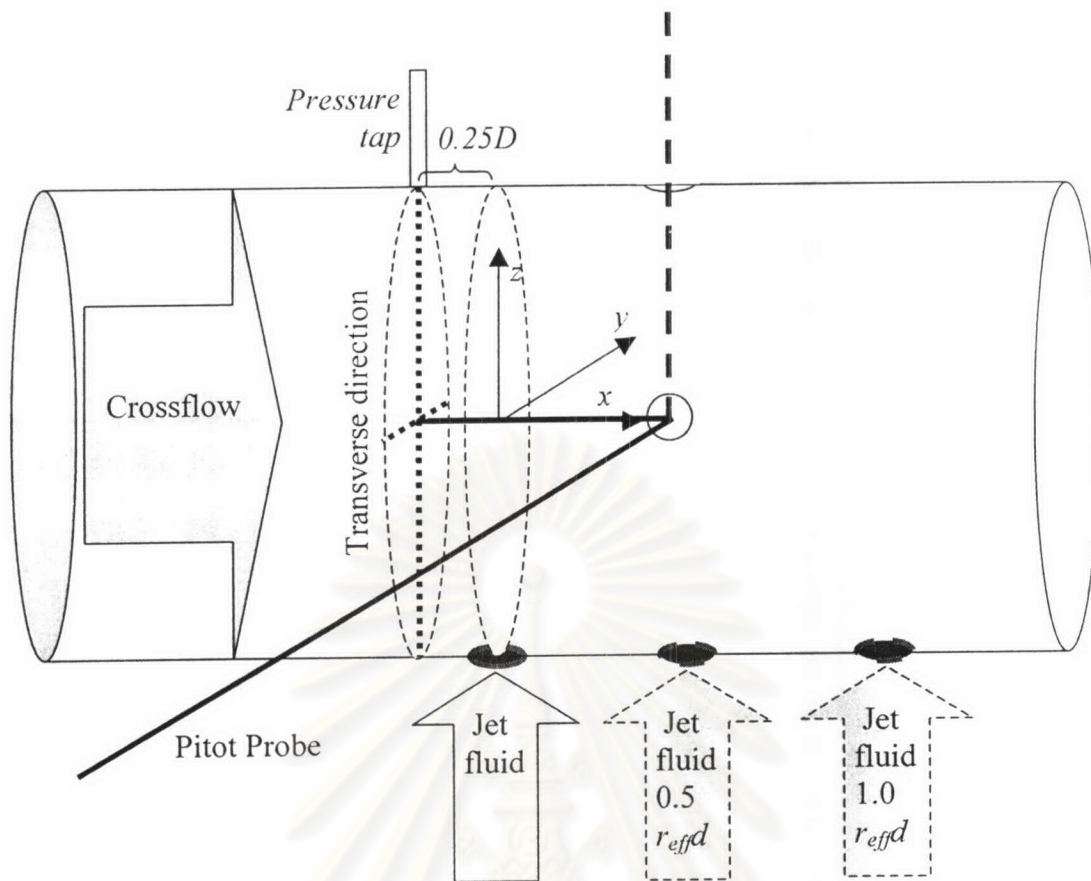
รูปที่ 2.13 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Variac ที่ใช้สำหรับ Heater



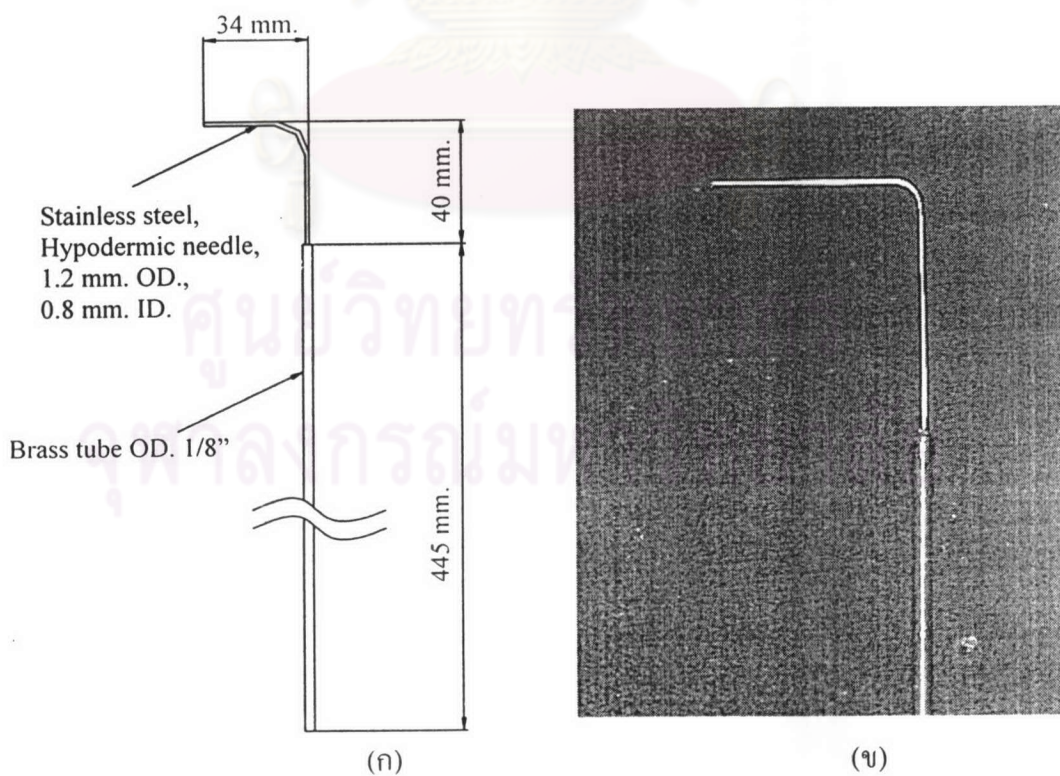
รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายแสดงการประกอบกันระหว่างชุดเจ็ตและหน้าตัดทดสอบ



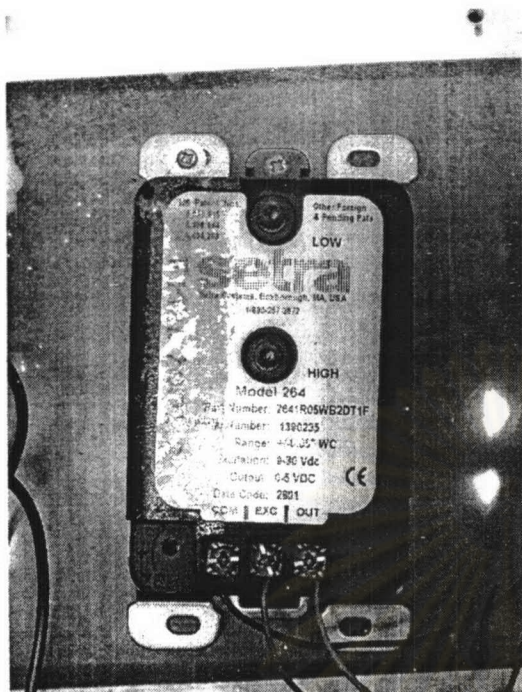
รูปที่ 2.15 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง (มองจาก End view)



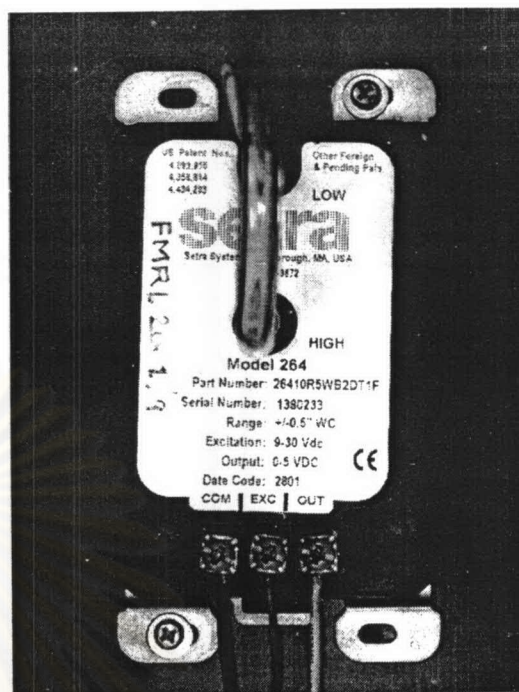
รูปที่ 2.16 การวัดสถานะเริ่มต้นของกระแสลมขวางในกรณีที่ไม่มีการไหลแบบหมุนควง



รูปที่ 2.17 รูป Pitot probe ที่ใช้ในการวัดความเร็ว (ก) รูป Schematic, (ข) รูปถ่าย



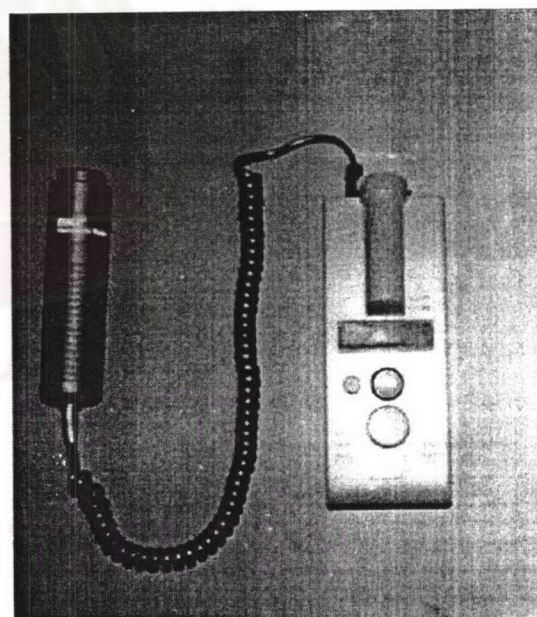
(ก)



(ข)

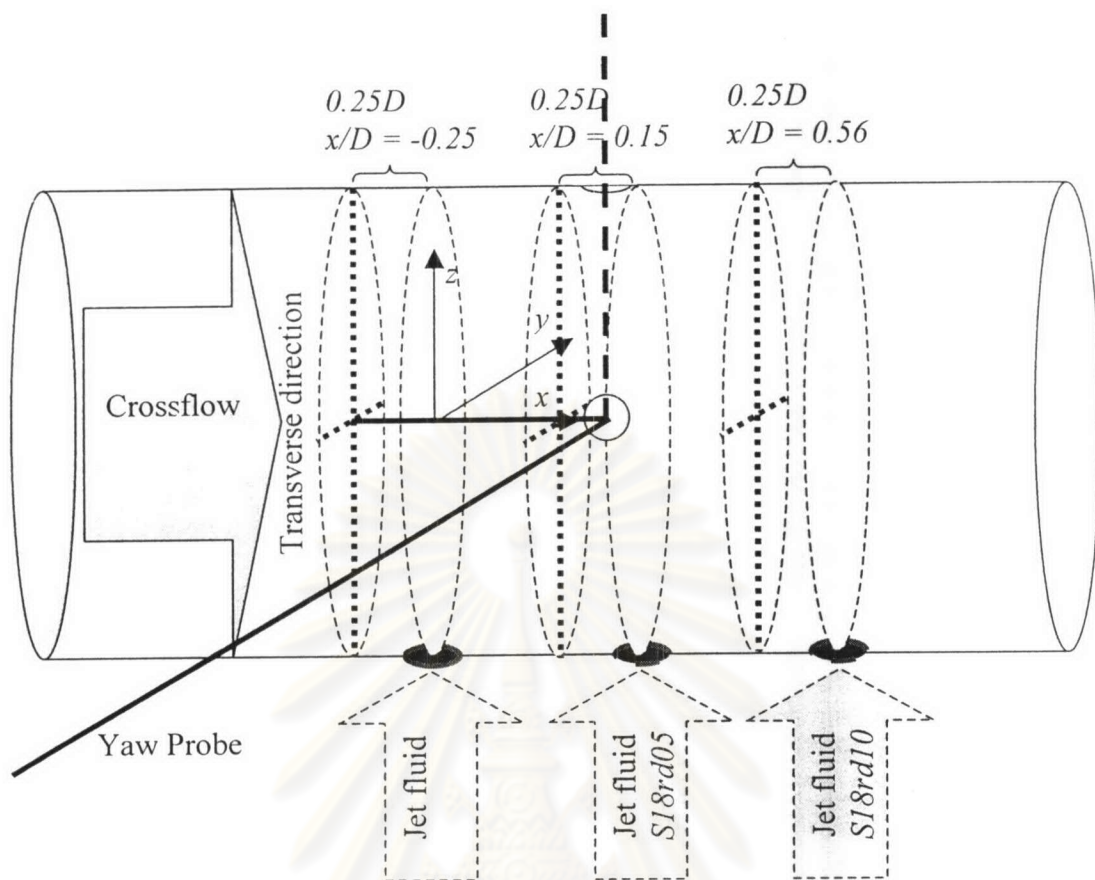


(ค)



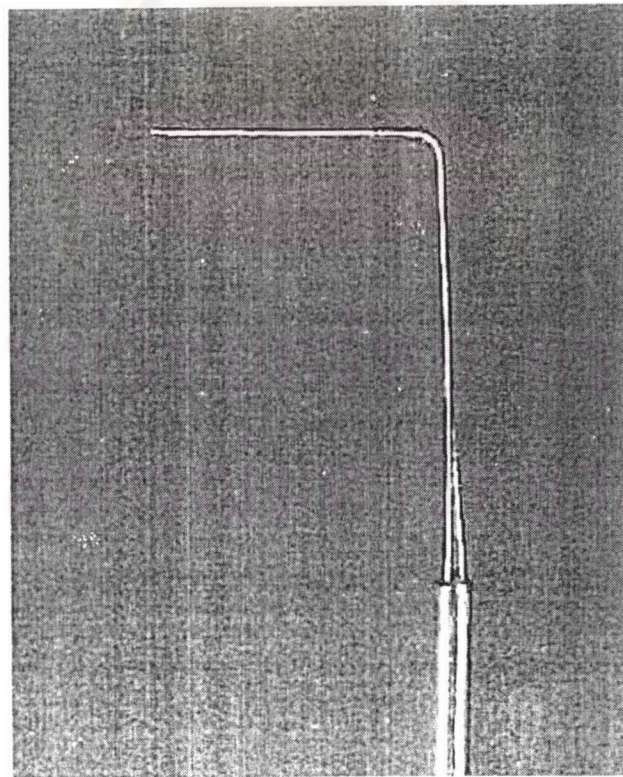
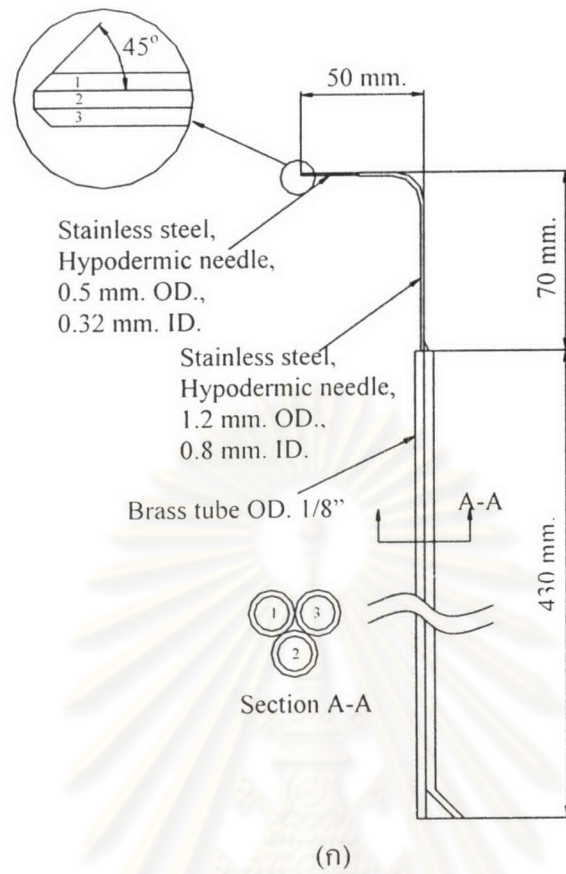
(ง)

รูปที่ 2.18 อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการวัดความเร็ว (ก) Pressure Transducer ขนาด ± 0.05 .
(ข) Pressure Transducer ขนาด ± 0.5 , (ค) Digital multimeter, (ง) Optical Tachometer

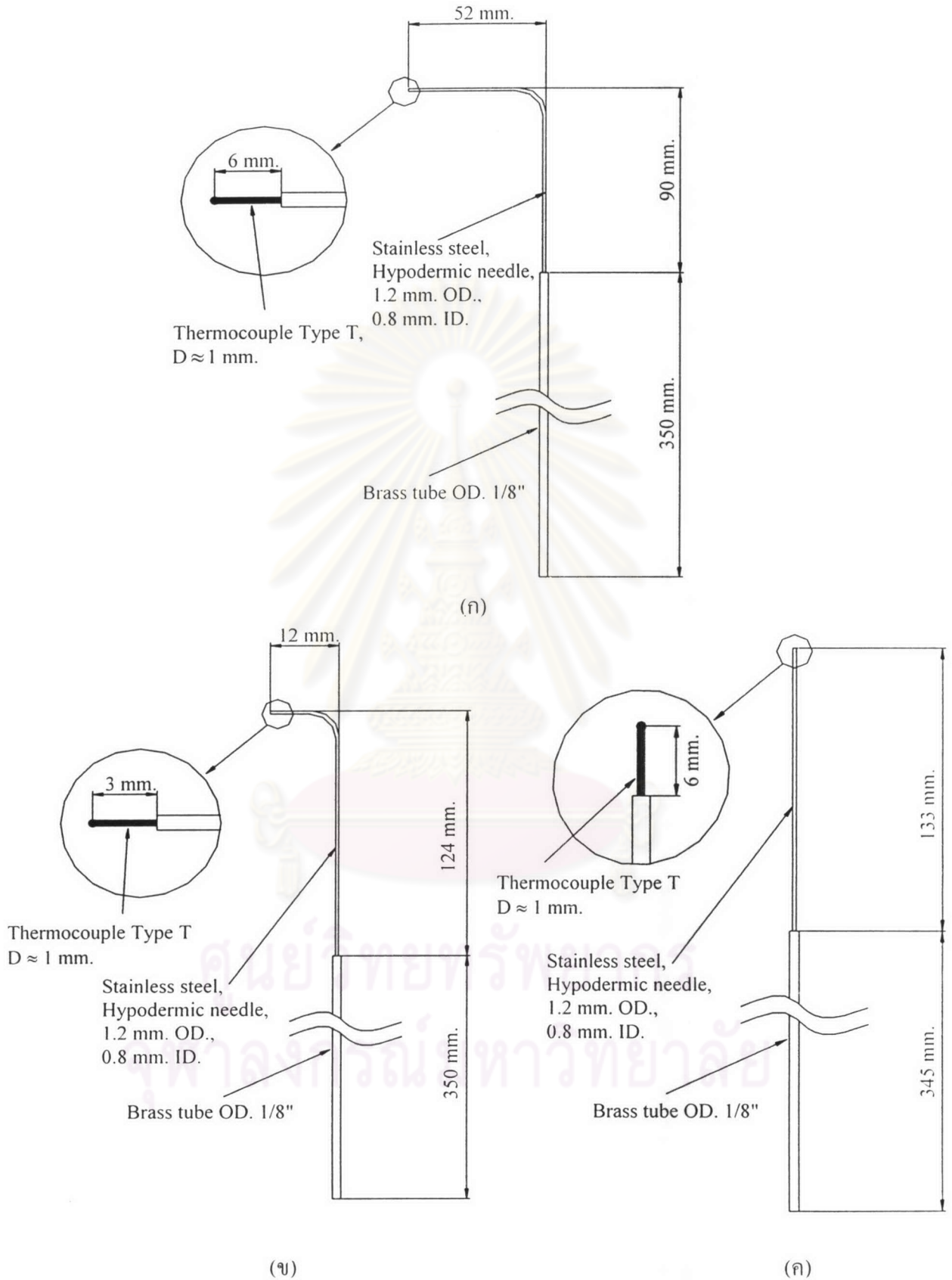


รูปที่ 2.19 การวัดสถานะเริ่มต้นของกระแสมวงในกรณีที่มีการไหลแบบหมุนควง

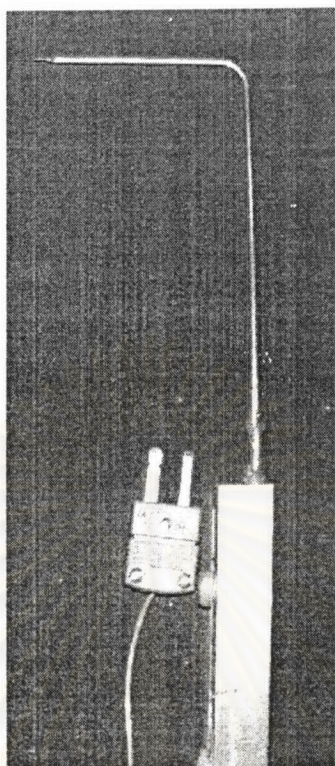
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



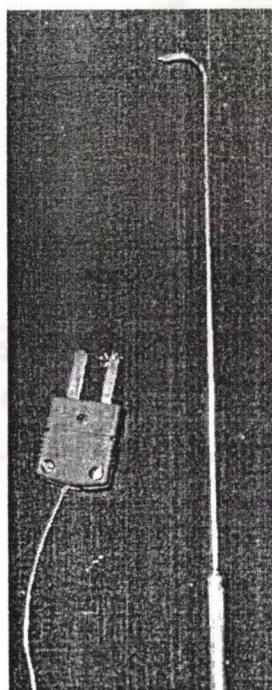
รูปที่ 2.20 รูป Yaw probe ที่ใช้ในการวัดความเร็ว (ก) รูป Schematic, (ข) รูปถ่าย



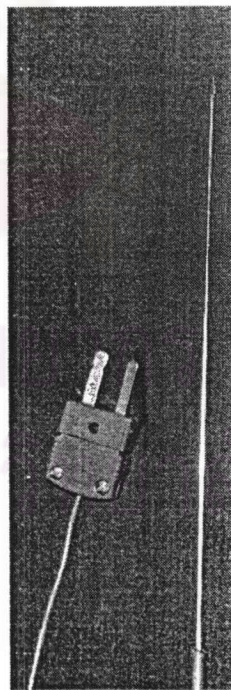
รูปที่ 2.21 รูป Schematic ของ Thermocouple probe ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ
(ก) แบบ A, (ข) แบบ B, (ค) แบบ C



(ก)

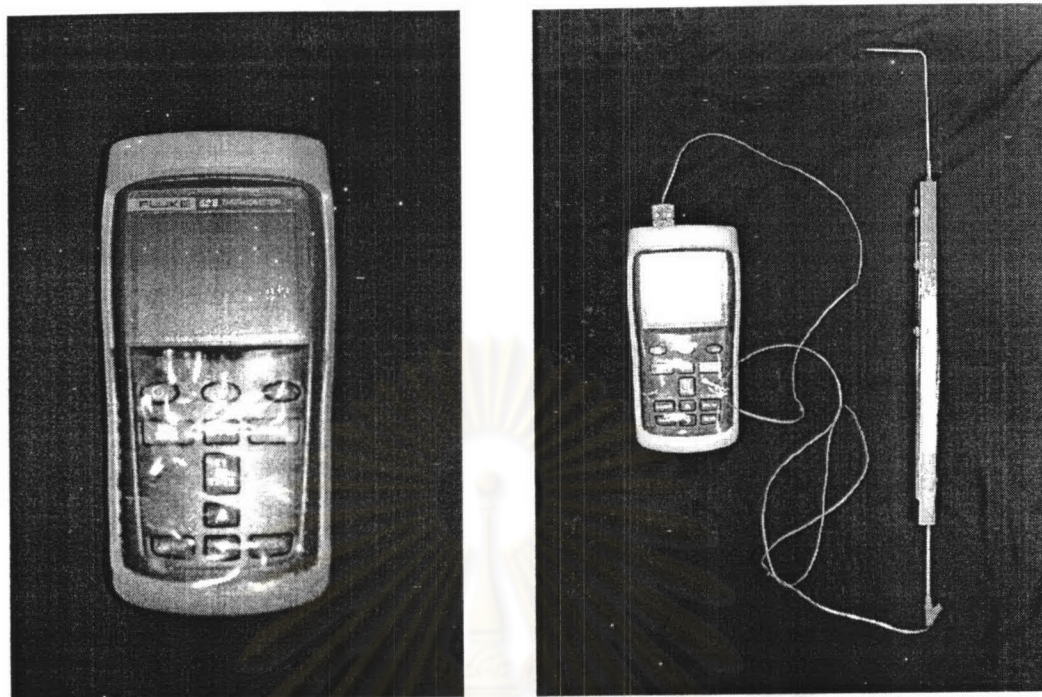


(ข)

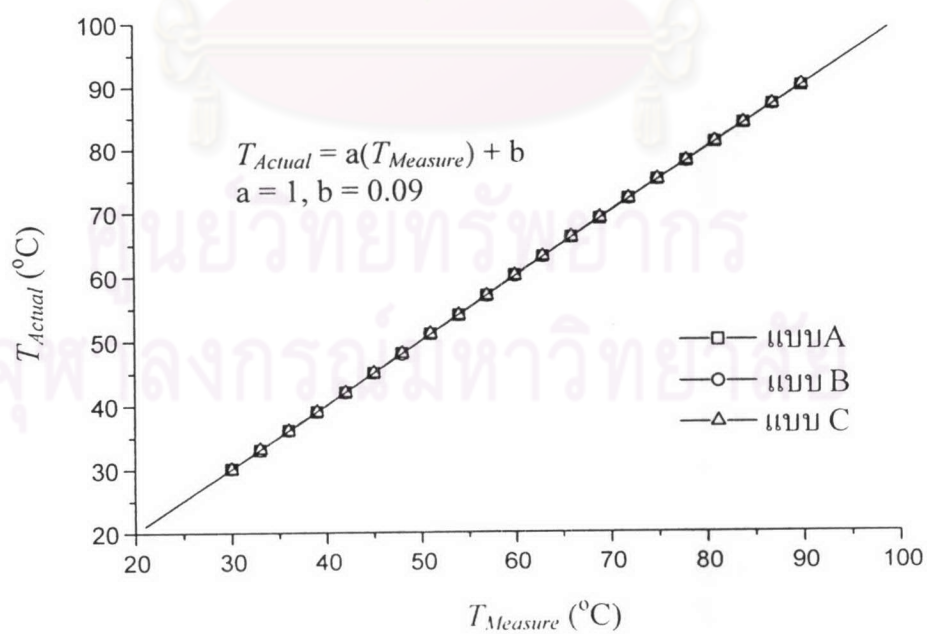


(ค)

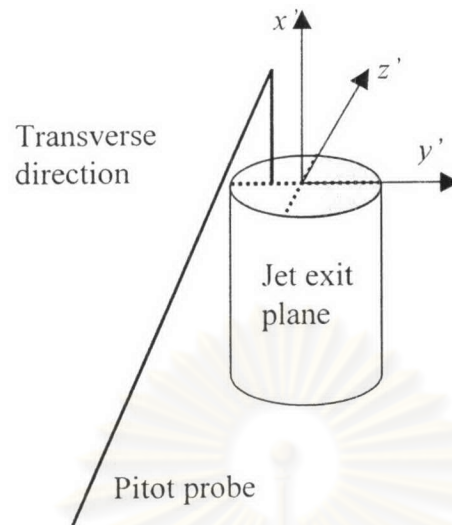
รูปที่ 2.22 รูปถ่ายของ Thermocouple probe ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ
(ก) แบบ A, (ข) แบบ B, (ค) แบบ C



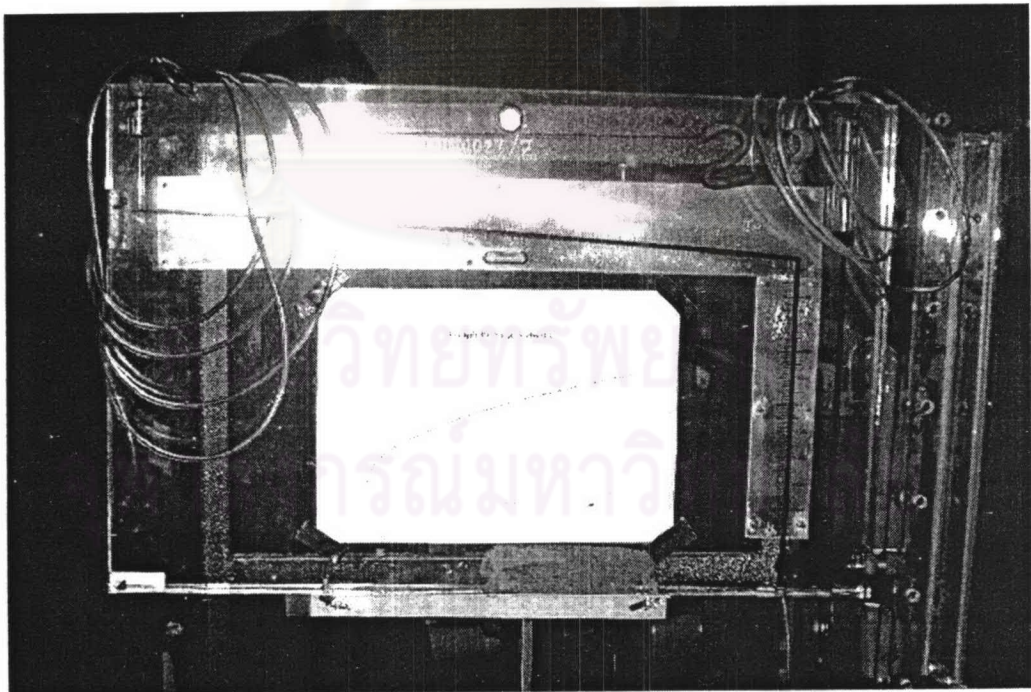
รูปที่ 2.23 ตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermometer thermocouple) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 และใช้งานร่วมกับ Thermocouple probe



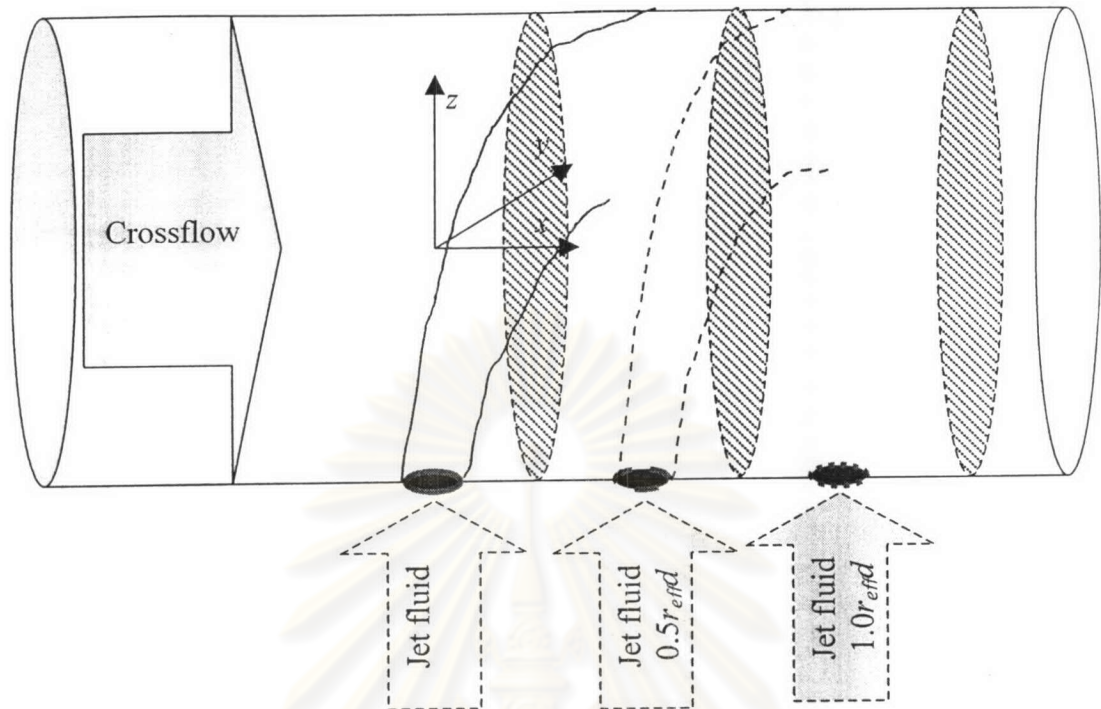
รูปที่ 2.24 ผลการสอบเทียบ Thermocouple probe เทียบกับ Thermometer



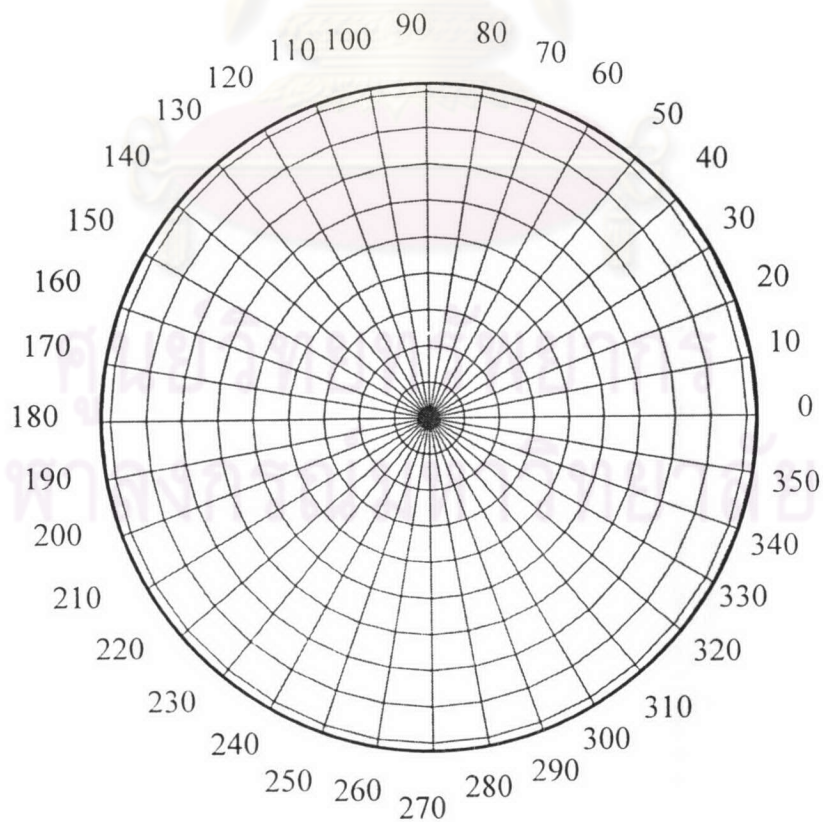
รูปที่ 2.25 การวัดสภาวะเริ่มต้นที่ปากเจ็ต



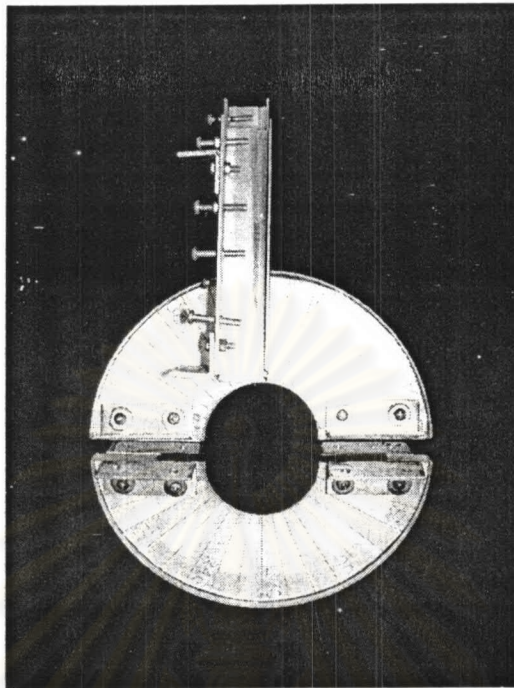
รูปที่ 2.26 รูป Inclined manometer



รูปที่ 2.27 ลักษณะการวัดการกระจายตัวเป็นหน้าตัด

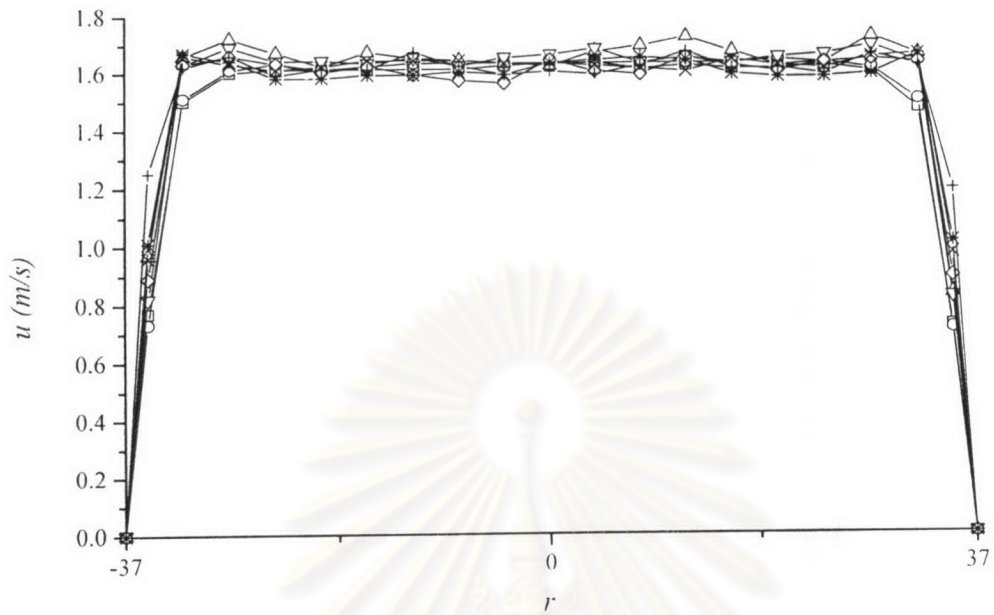


รูปที่ 2.28 ตำแหน่งวัดในแต่ละหน้าตัด (มองจาก End view)

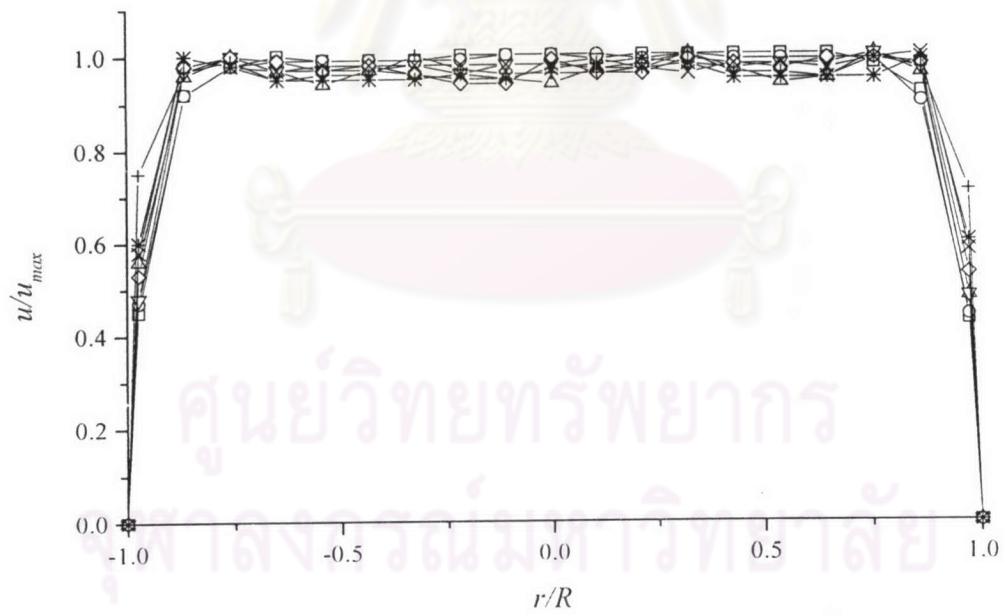


รูปที่ 2.29 ที่จับ Thermocouple probe

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

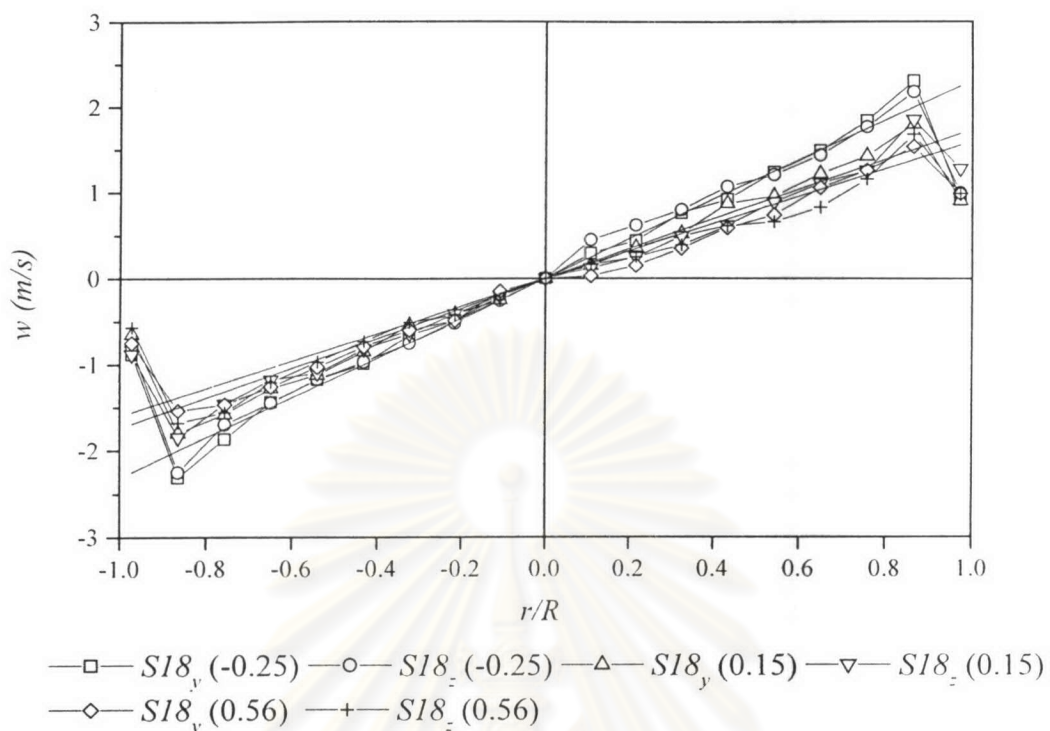


(ข)

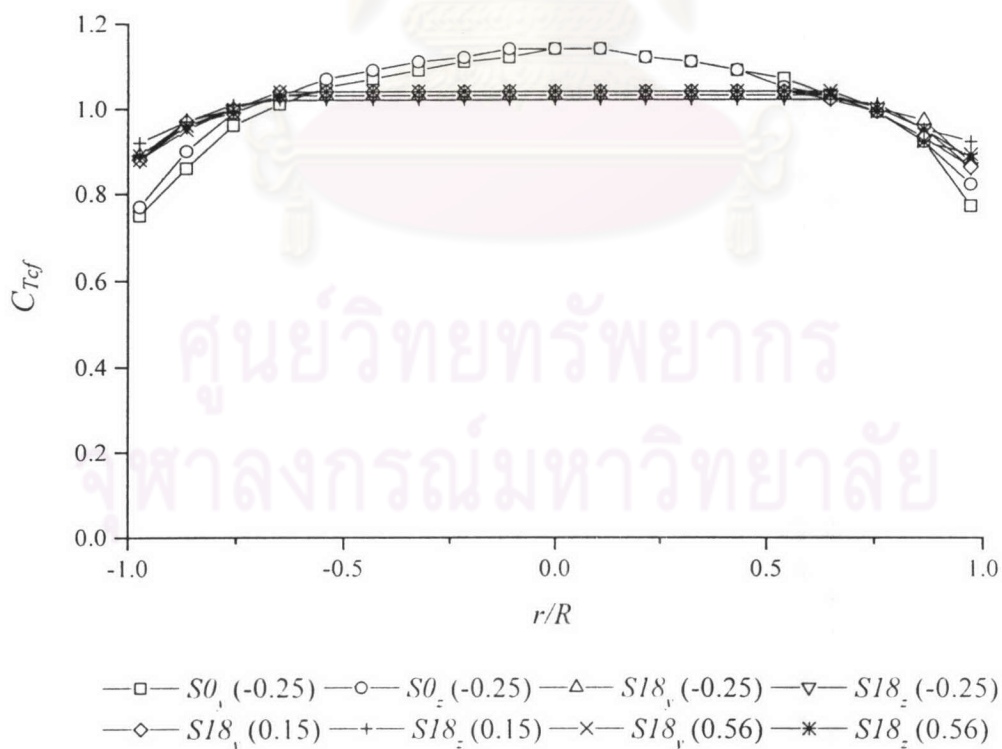
—□— $S0_y(-0.25)$ —○— $S0_z(-0.25)$ —△— $S18_y(-0.25)$ —▽— $S18_z(-0.25)$
 —◇— $S18_y(0.15)$ —+— $S18_z(0.15)$ —×— $S18_y(0.56)$ —*— $S18_z(0.56)$

รูปที่ 3.1 รูปร่างความเร็วในแนวแกนของกระแสมวงที่ตำแหน่ง $0.25D$ ก่อนถึงเจ็ต

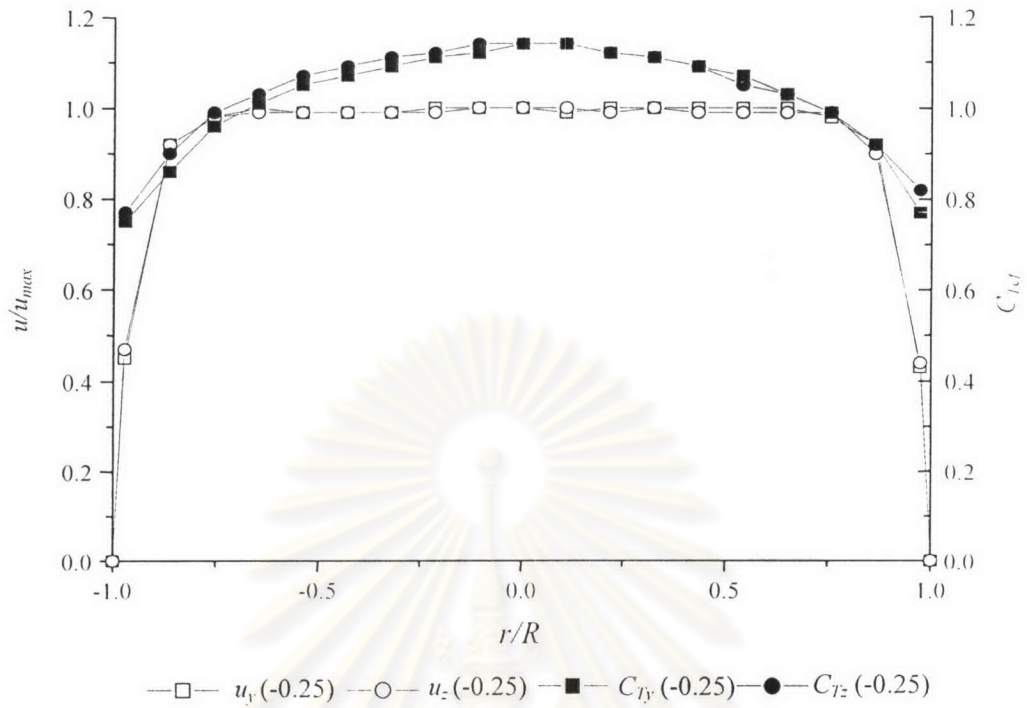
(ก) u . (ข) u/u_{max}



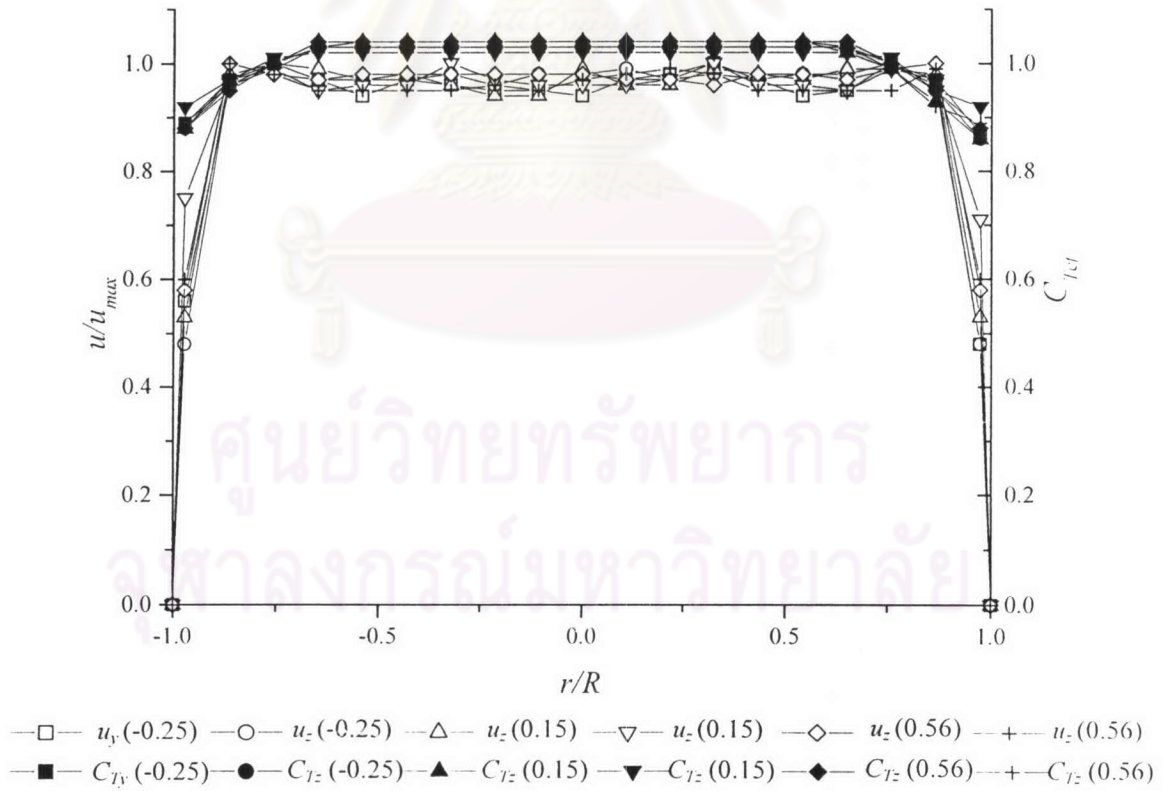
รูปที่ 3.2 รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสมวงที่ตำแหน่ง $0.25D$ ก่อนถึงเจ็ต



รูปที่ 3.3 รูปร่างอุณหภูมิของกระแสมวงที่ตำแหน่ง $0.25D$ ก่อนถึงเจ็ต

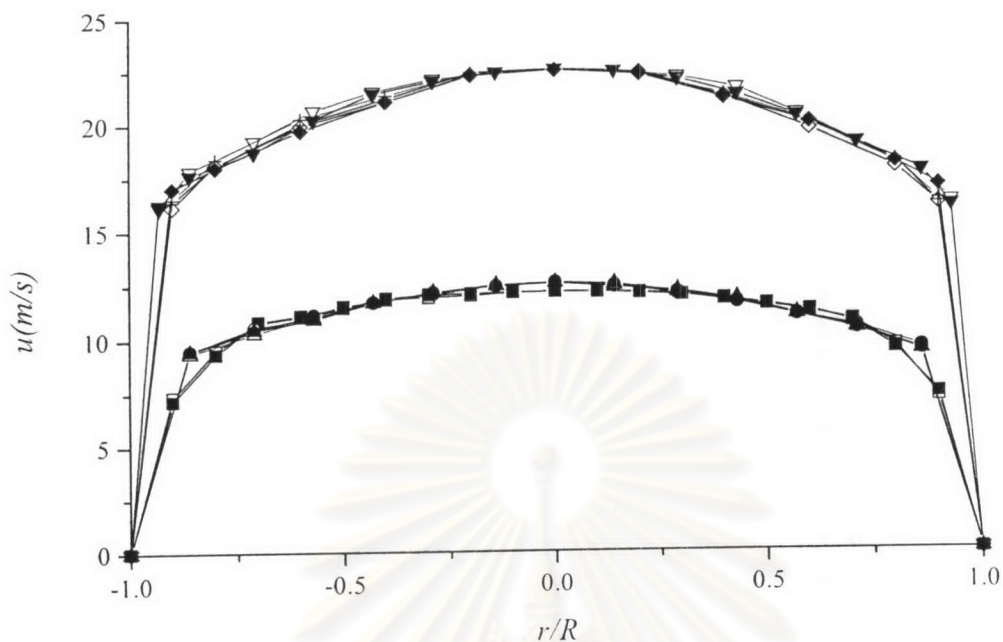


(ก)

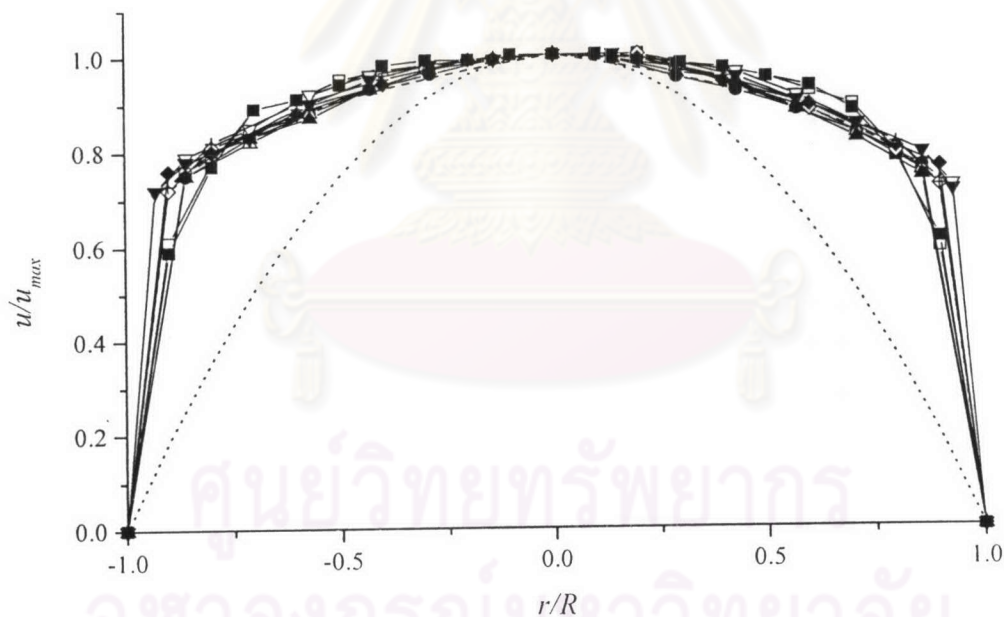


(ข)

รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบกับการกระจายตัวของความเร็วกับการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ในแนวแกน (ก) S0, (ข) S18



(ก)

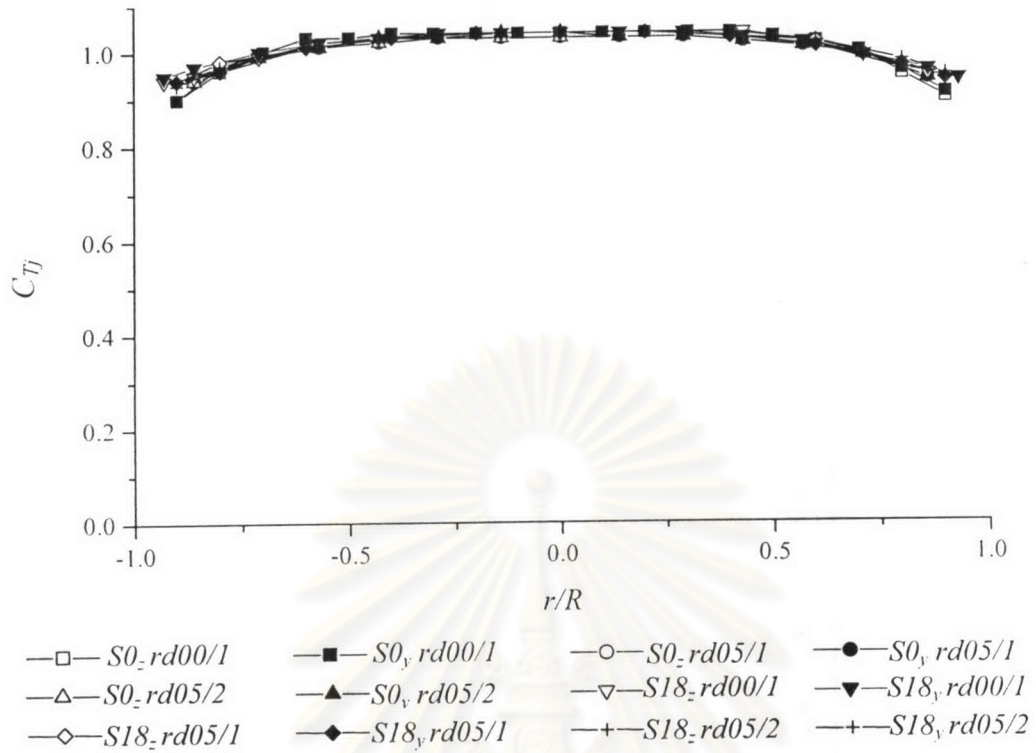


(ข)

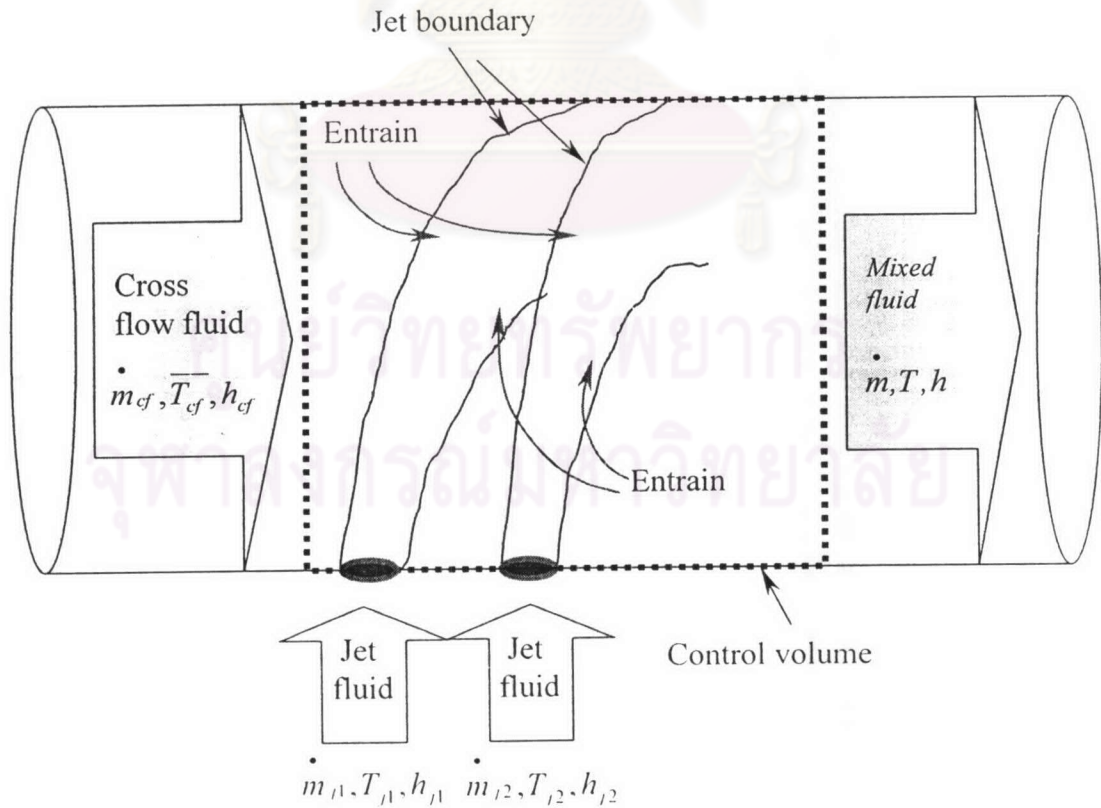
- | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| ----- Laminar | Turbulent | | |
| —□— $S0_z$ rd00/1 | —■— $S0_y$ rd00/1 | —○— $S18_z$ rd05/1 | —●— $S0_y$ rd05/1 |
| —△— $S0_z$ rd05/2 | —▲— $S0_y$ rd05/2 | —▽— $S18_z$ rd00/1 | —▼— $S18_y$ rd00/1 |
| —◇— $S18_z$ rd05/1 | —◆— $S18_y$ rd05/1 | —+— $S18_z$ rd05/2 | —+— $S18_y$ rd05/2 |

รูปที่ 3.5 รูปร่างความเร็วในแนวแกนของเจ็ตอากาศที่ตำแหน่งทางออกเจ็ต

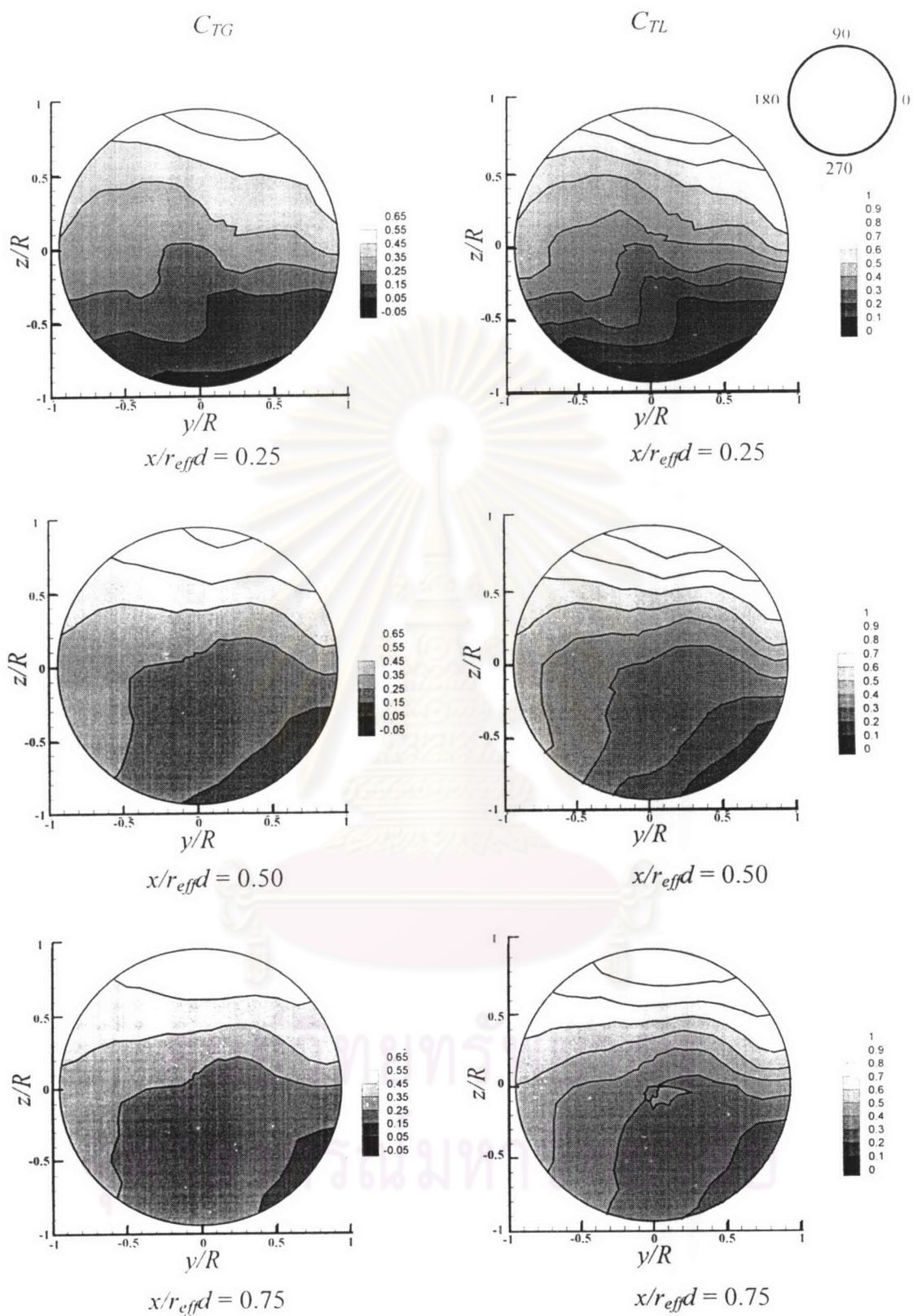
(ก) u , (ข) u/u_{max}



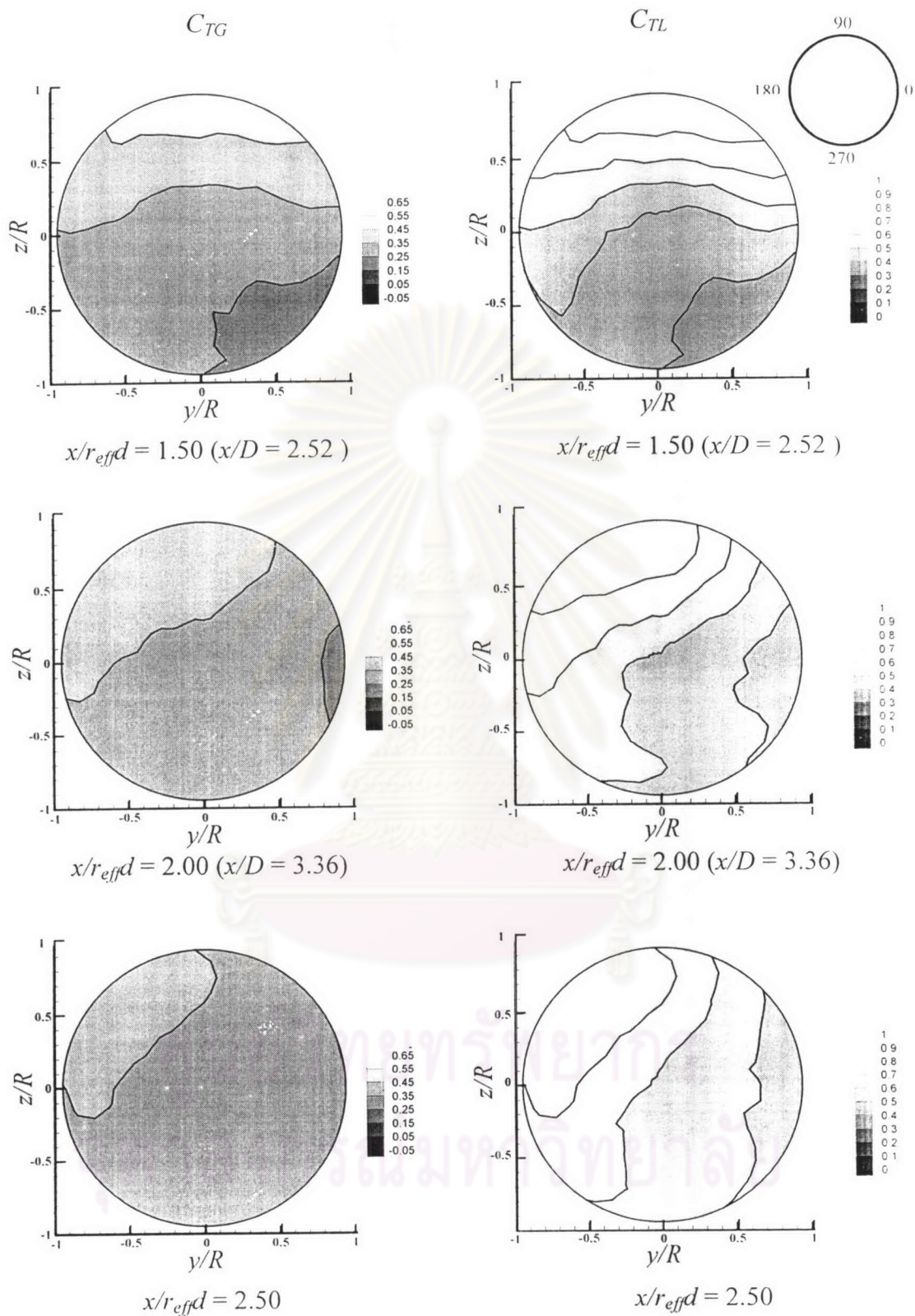
รูปที่ 3.6 รูปร่างอุณหภูมิในแนวแกนของเจ็ตอากาศที่ตำแหน่งทางออกเจ็ต



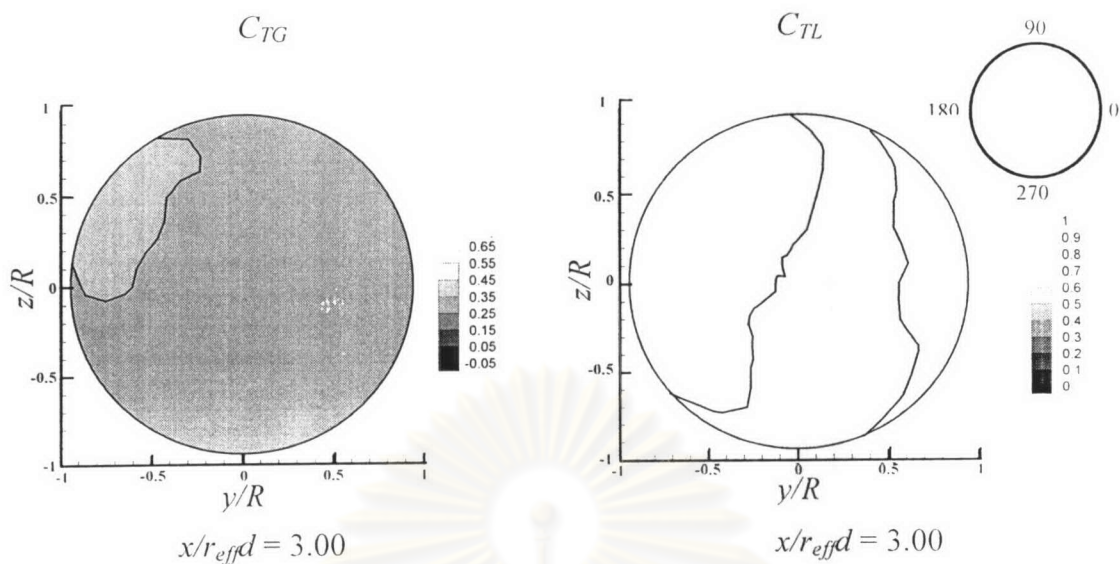
รูปที่ 3.7 ปริมาตรควบคุมในการวิเคราะห์คุณลักษณะการผสมที่แสดงโดย C_{Tj}



รูปที่ 3.8 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd00$

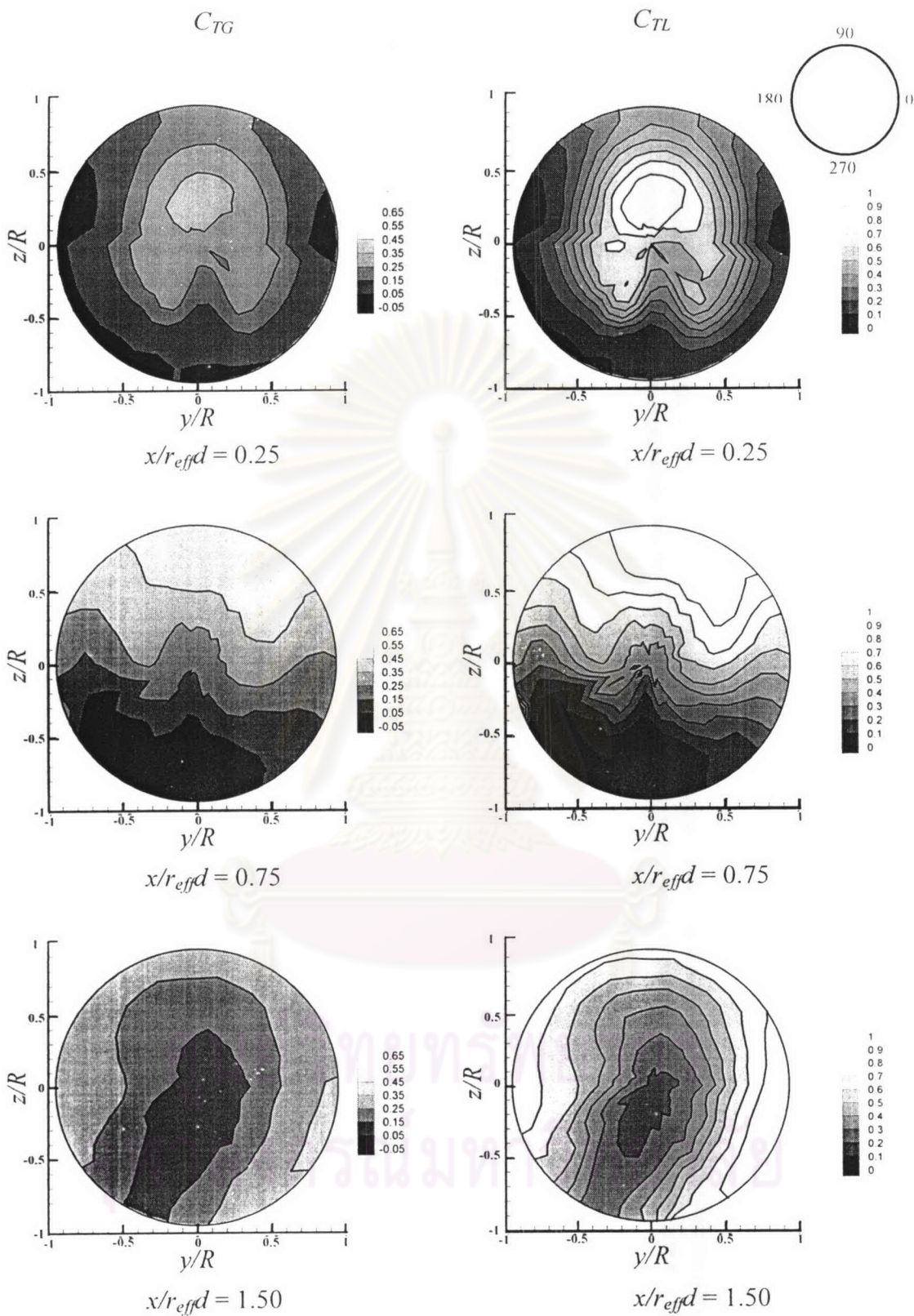


รูปที่ 3.8 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจميع (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd00$ (ต่อ)

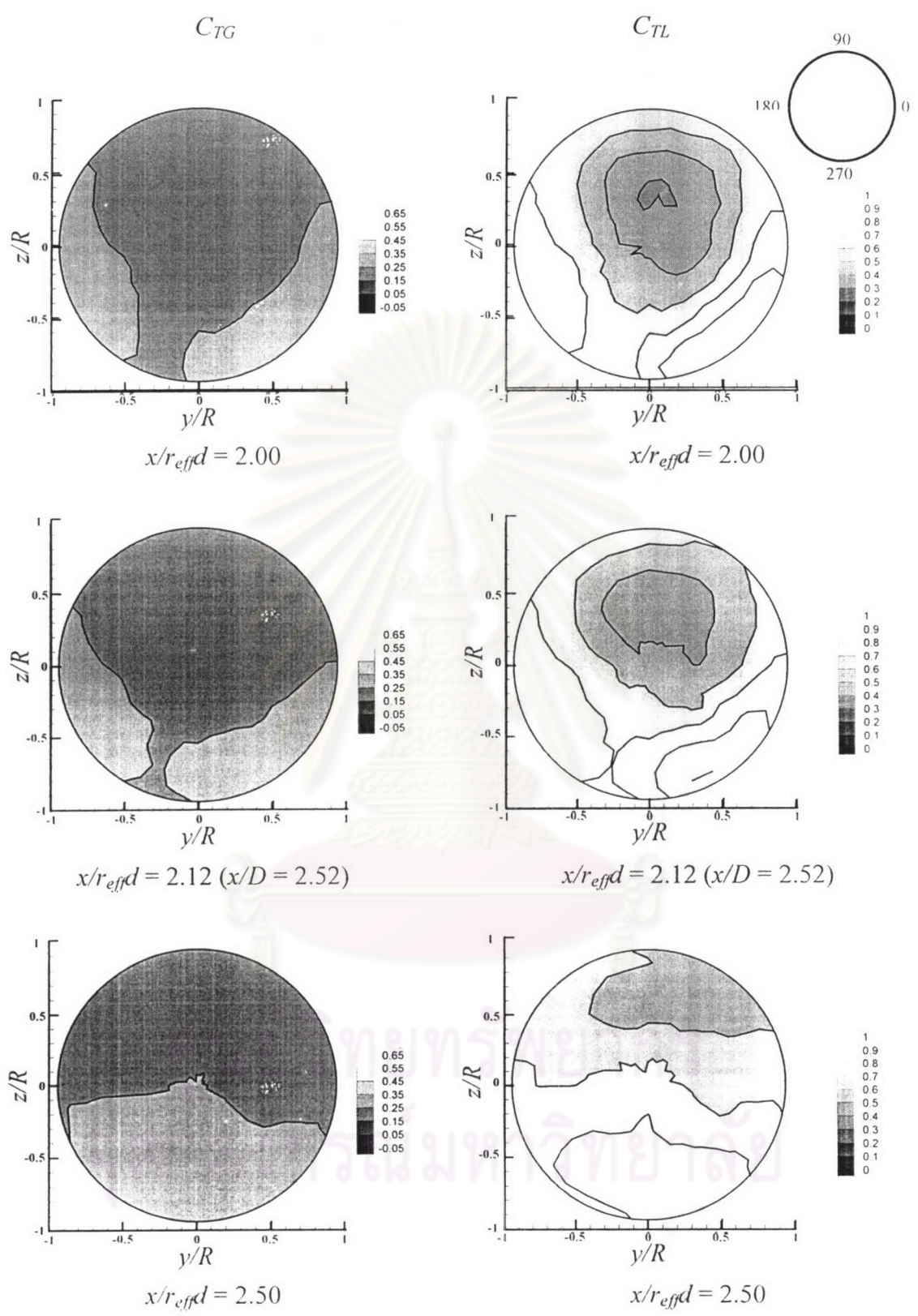


รูปที่ 3.8 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd00$ (ต่อ)

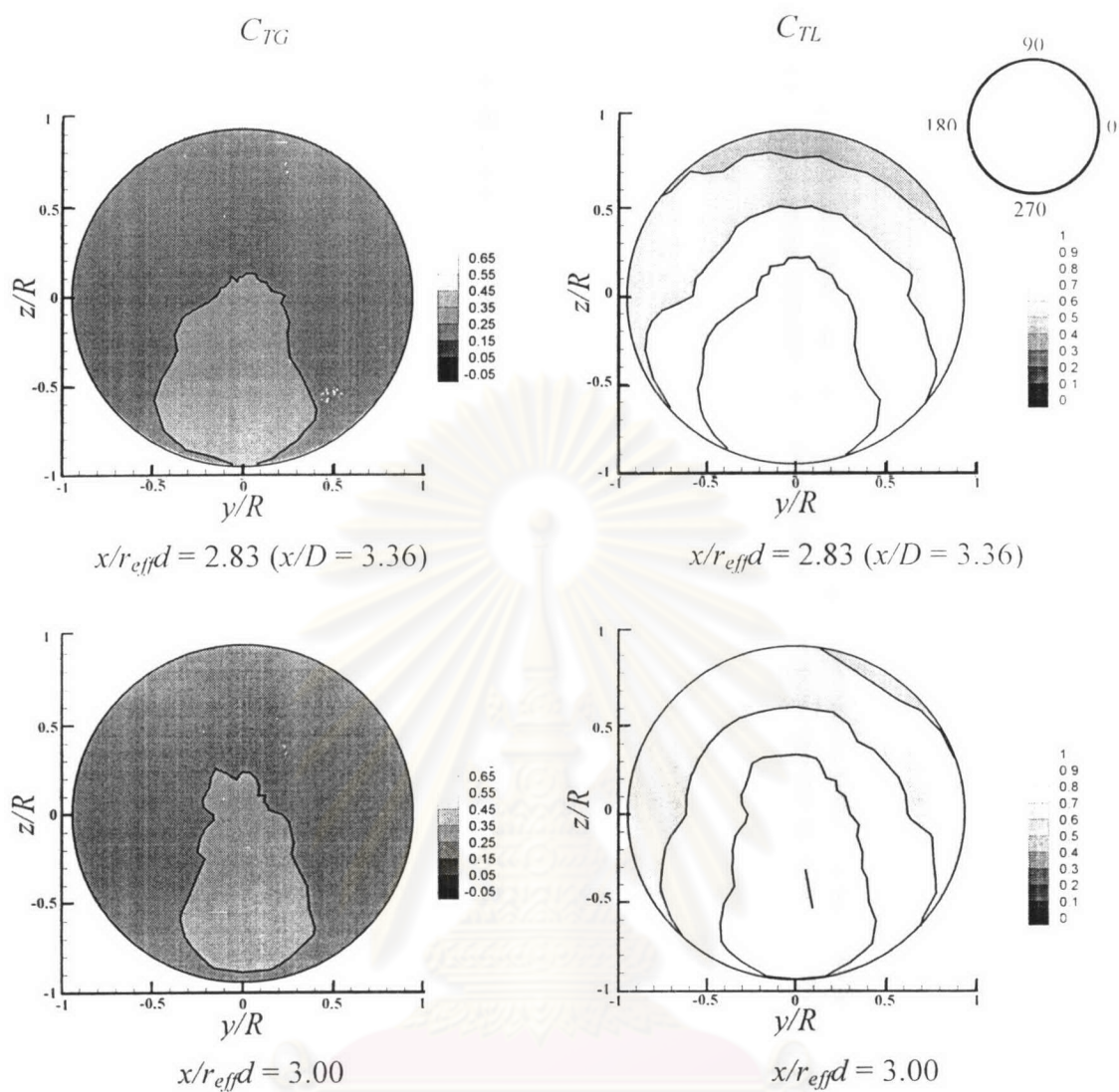
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd05$

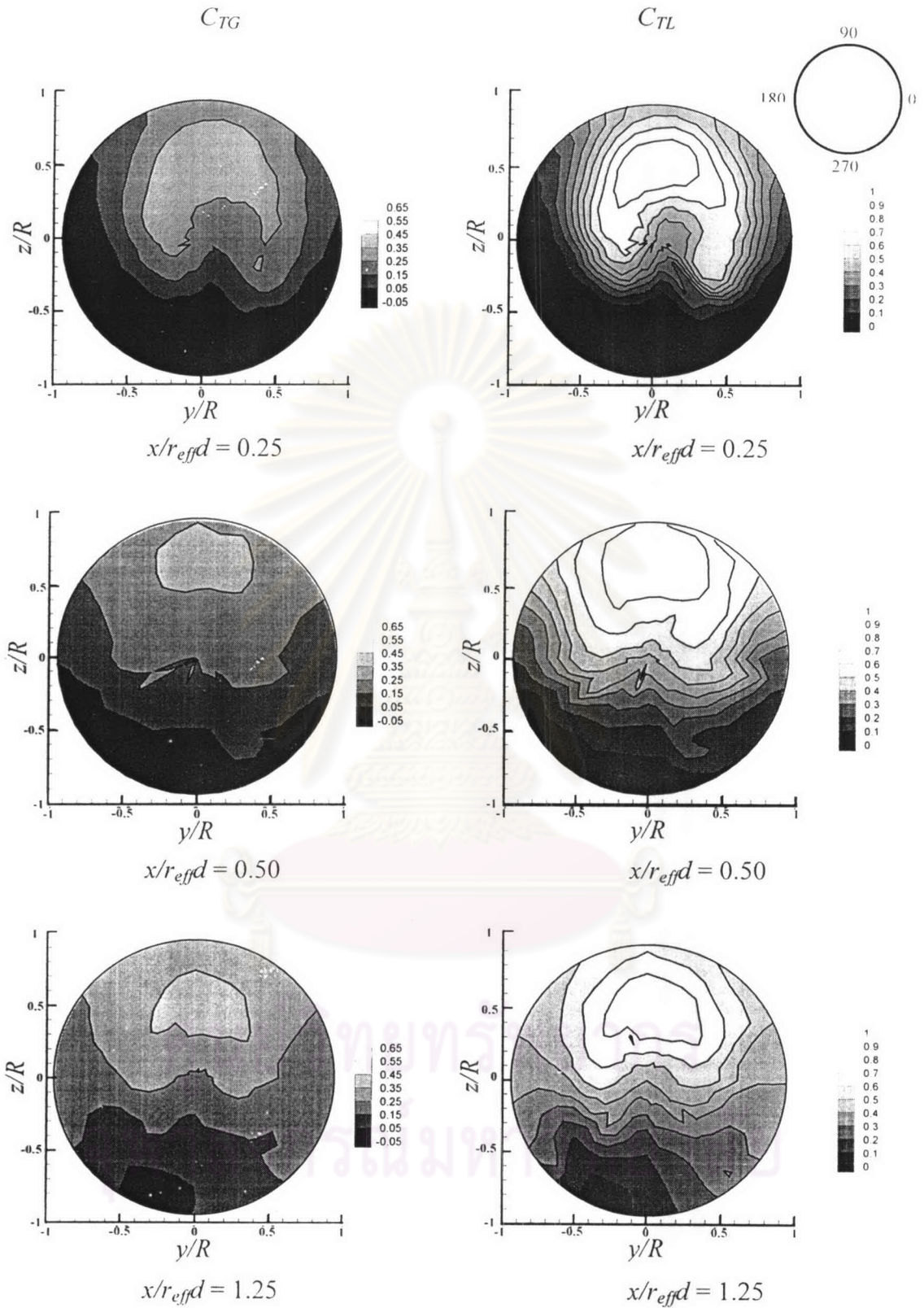


รูปที่ 3.9 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd05$ (ต่อ)

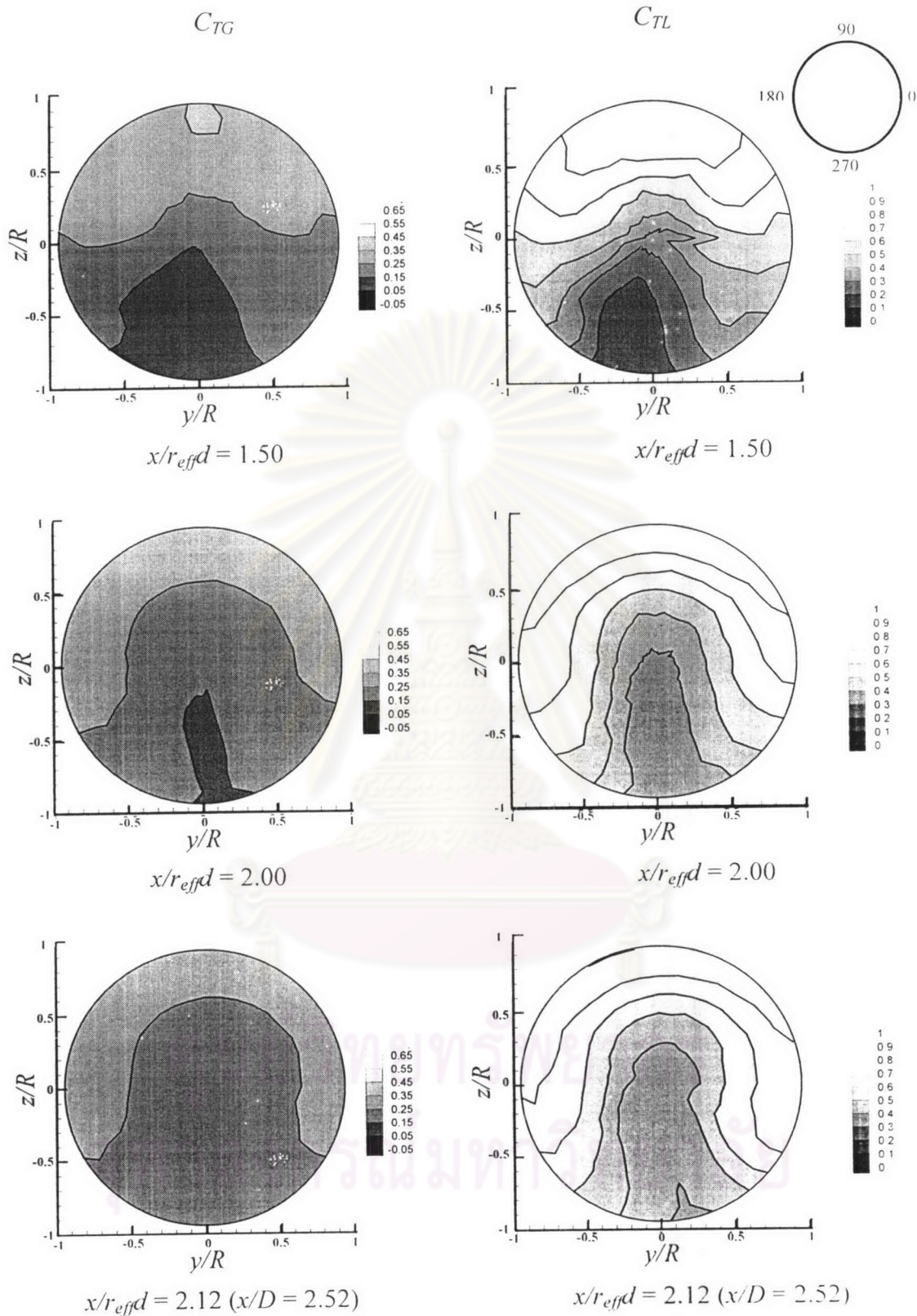


รูปที่ 3.9 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd05$ (ต่อ)

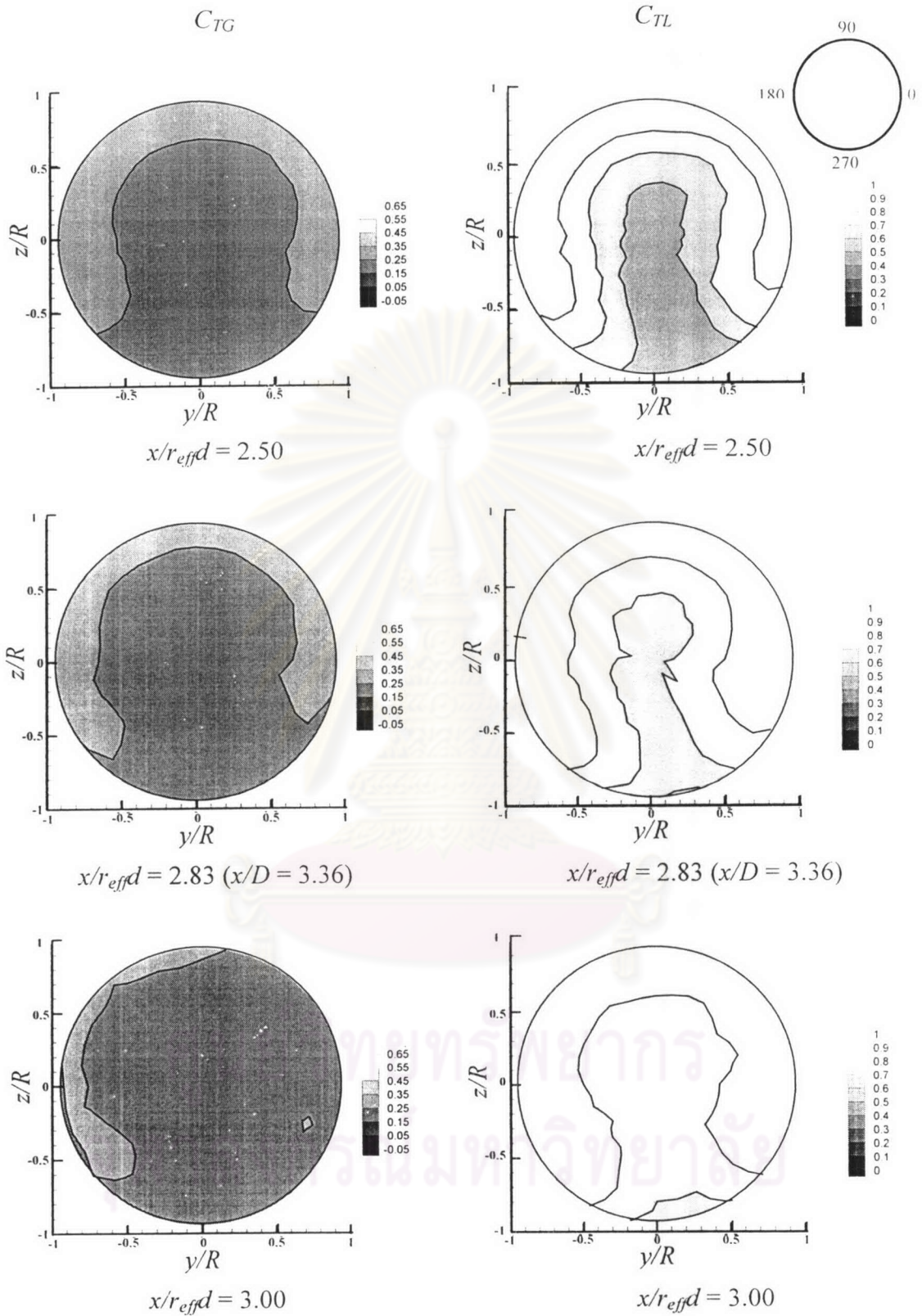
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



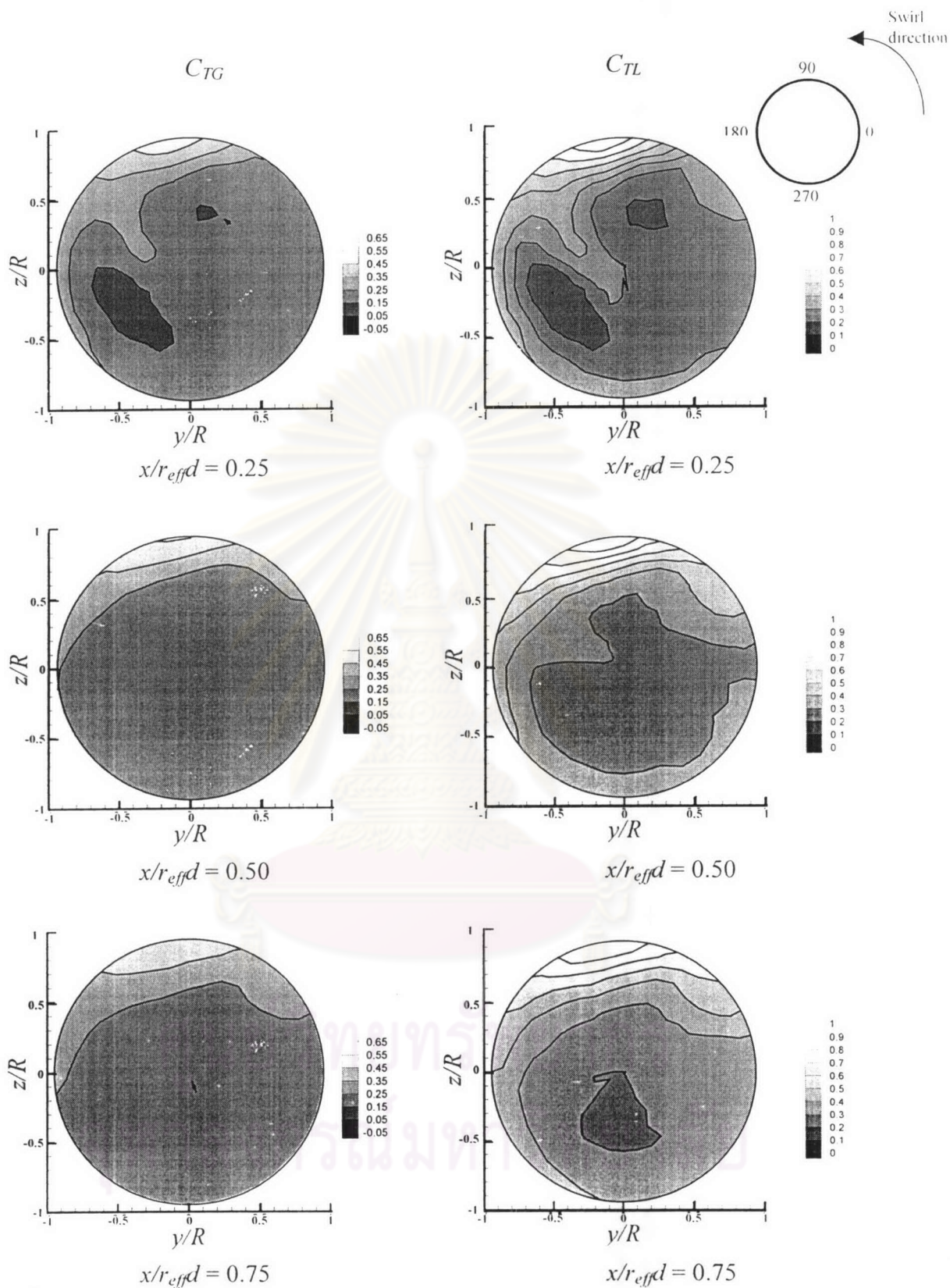
รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd10$



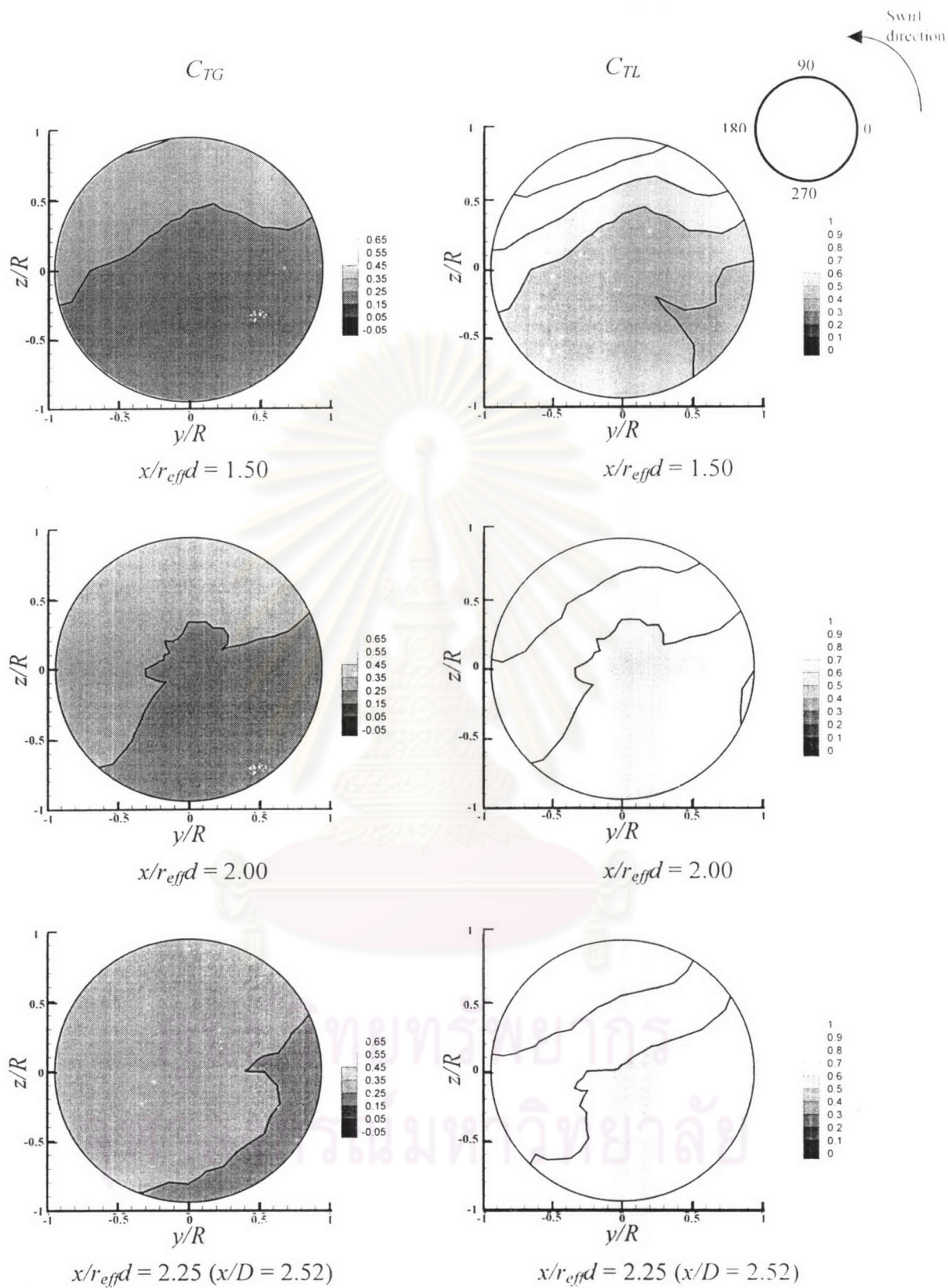
รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd10$ (ต่อ)



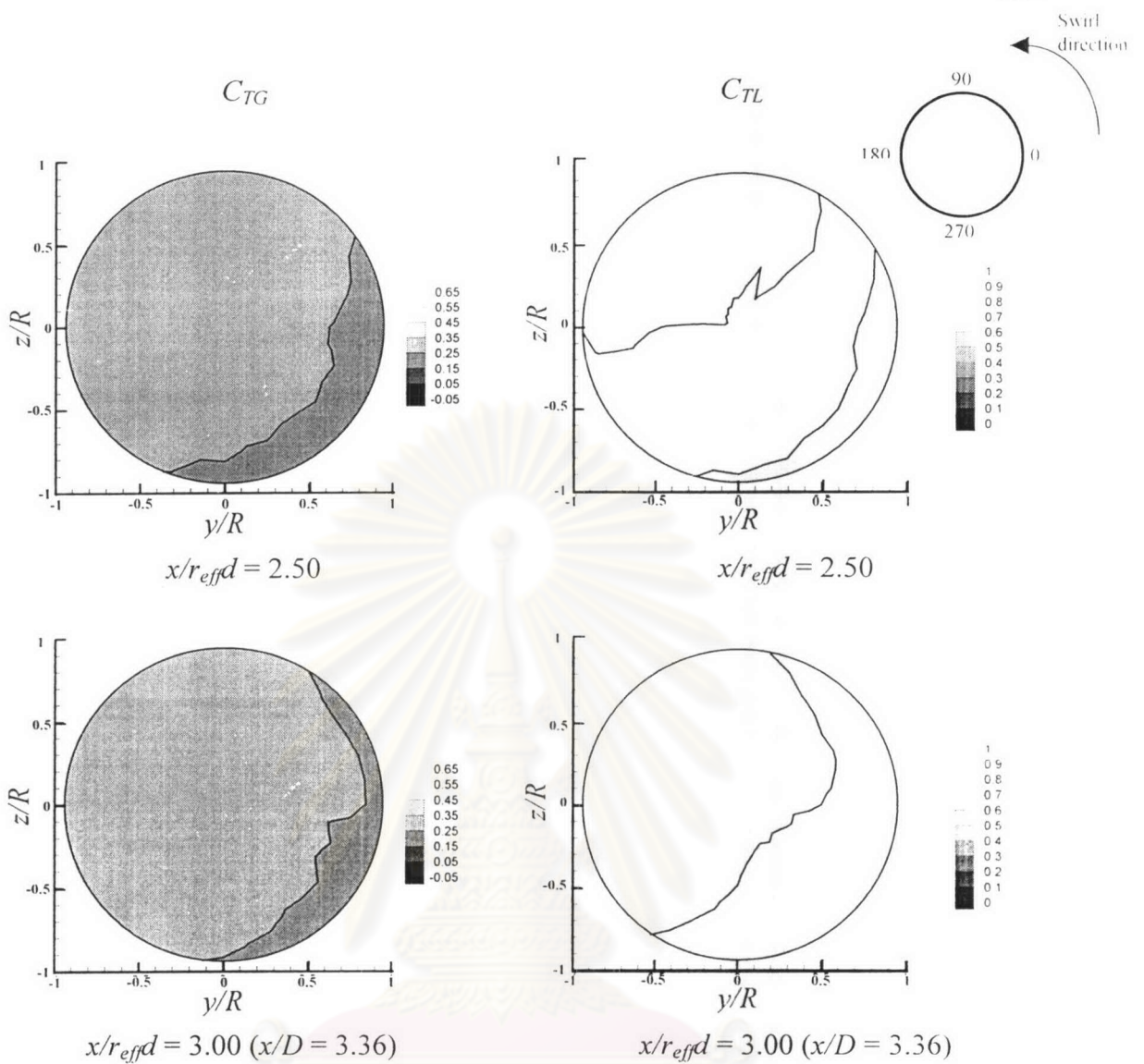
รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิตรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $Sord10$ (ต่อ)



รูปที่ 3.11 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd00$



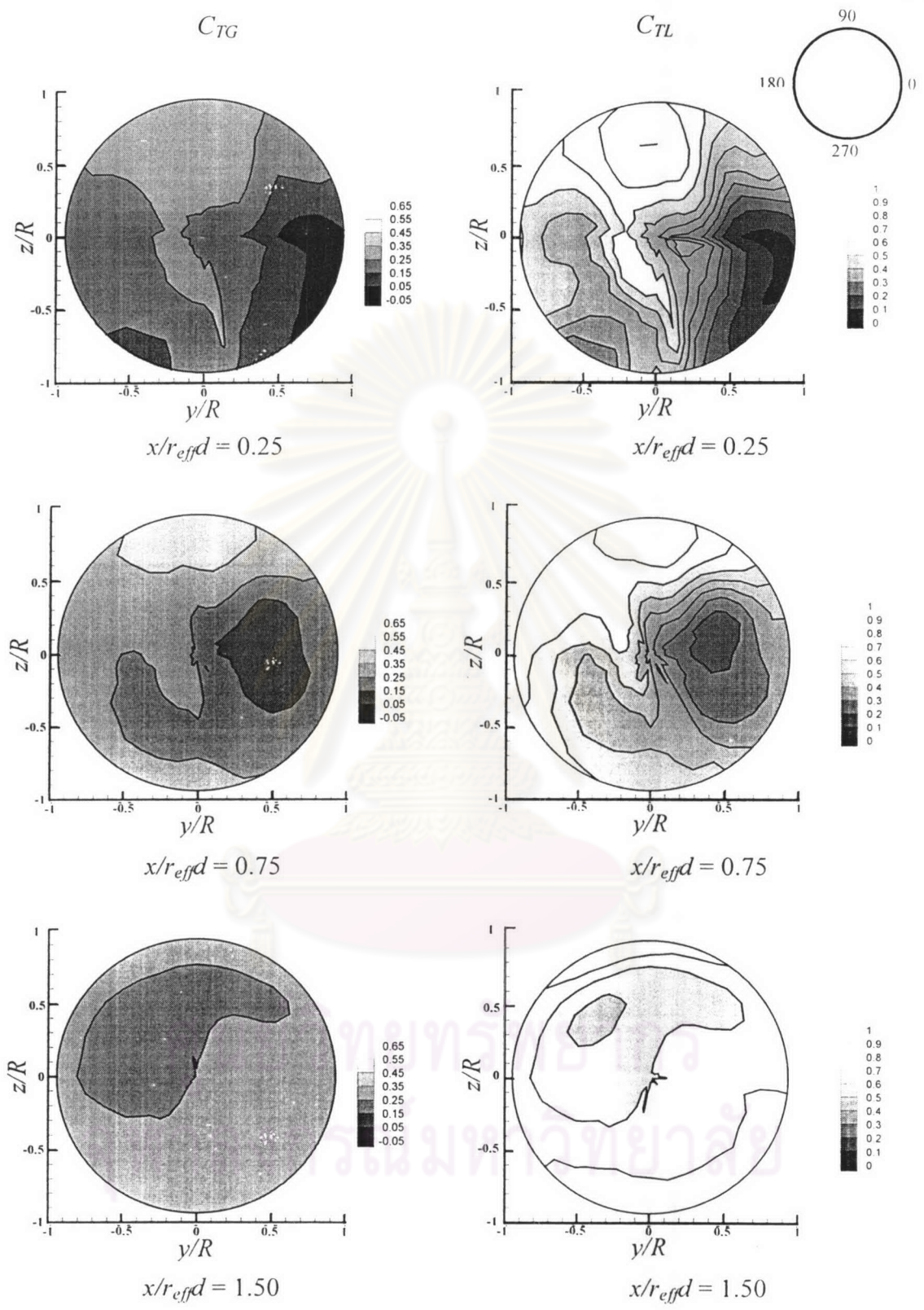
รูปที่ 3.11 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd00$ (ต่อ)



รูปที่ 3.11 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd00$ (ต่อ)

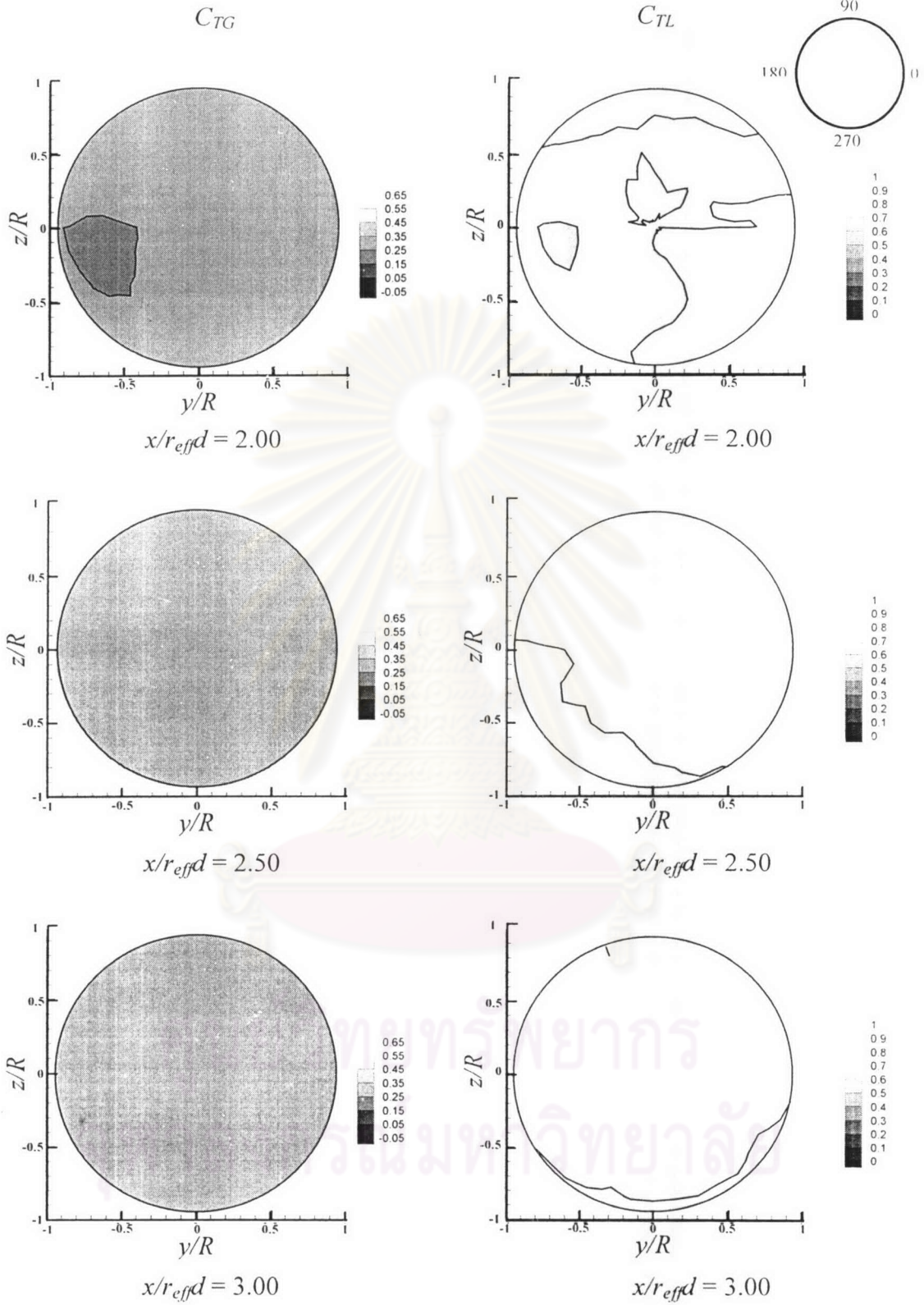
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Swirl direction

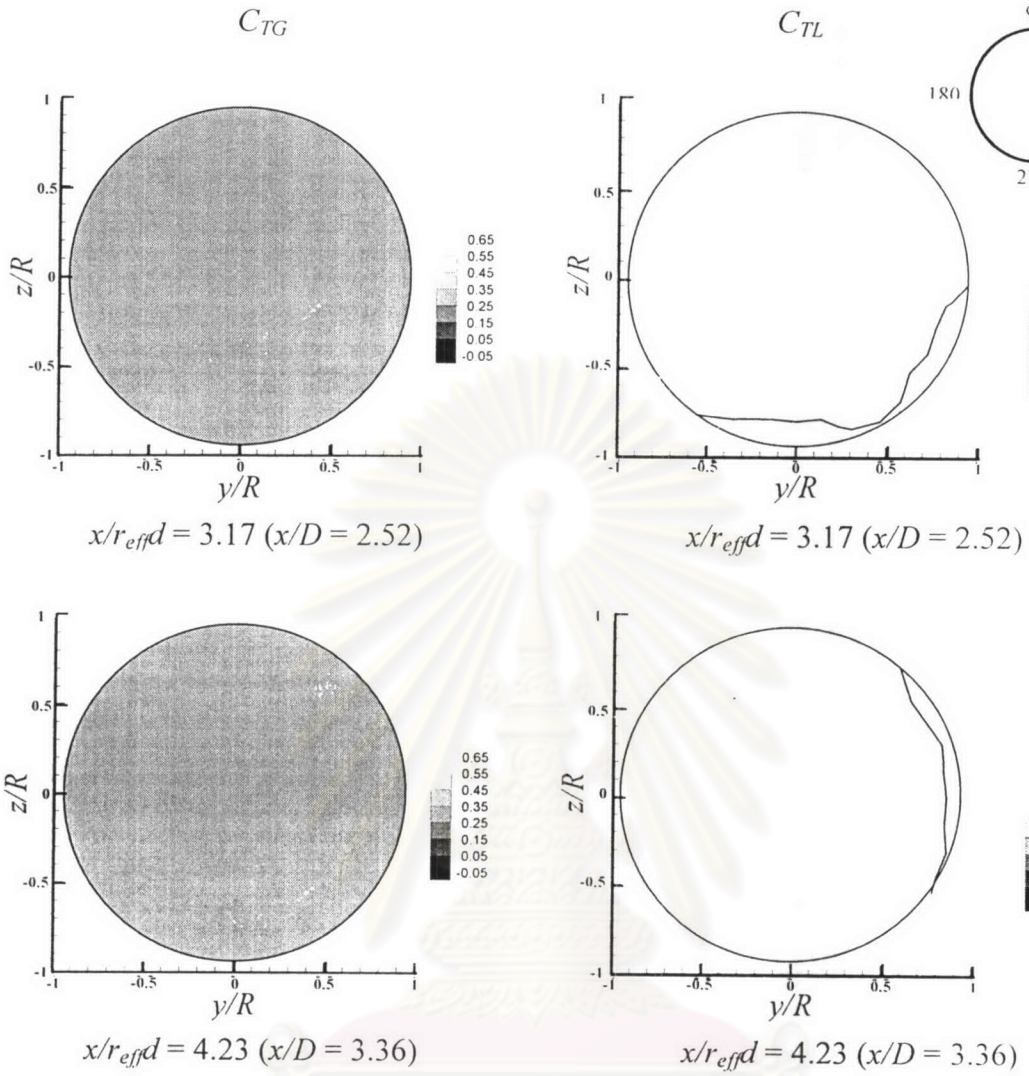


รูปที่ 3.12 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd05$

Swirl direction

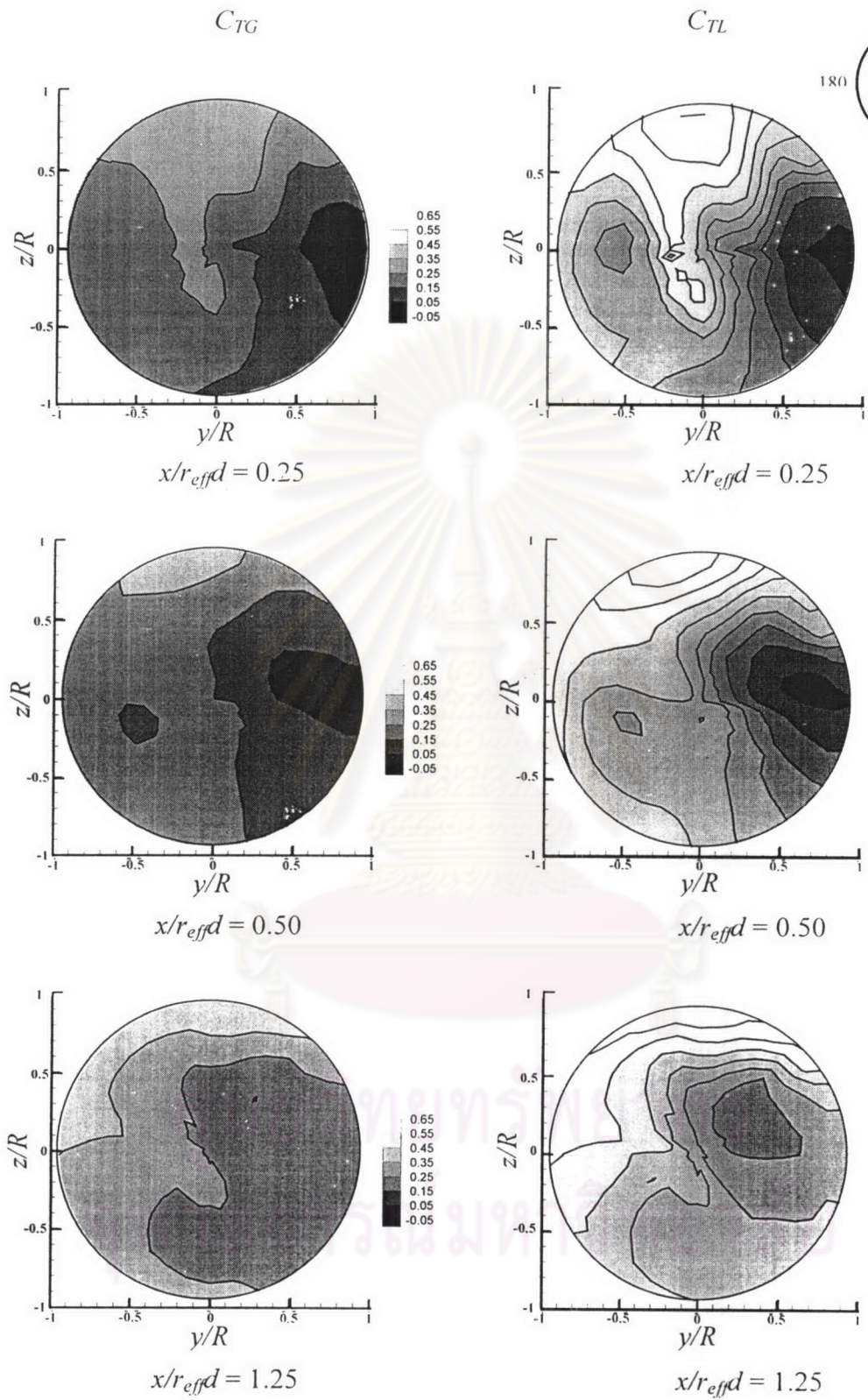


รูปที่ 3.12 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจำนวนรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd05$ (ต่อ)



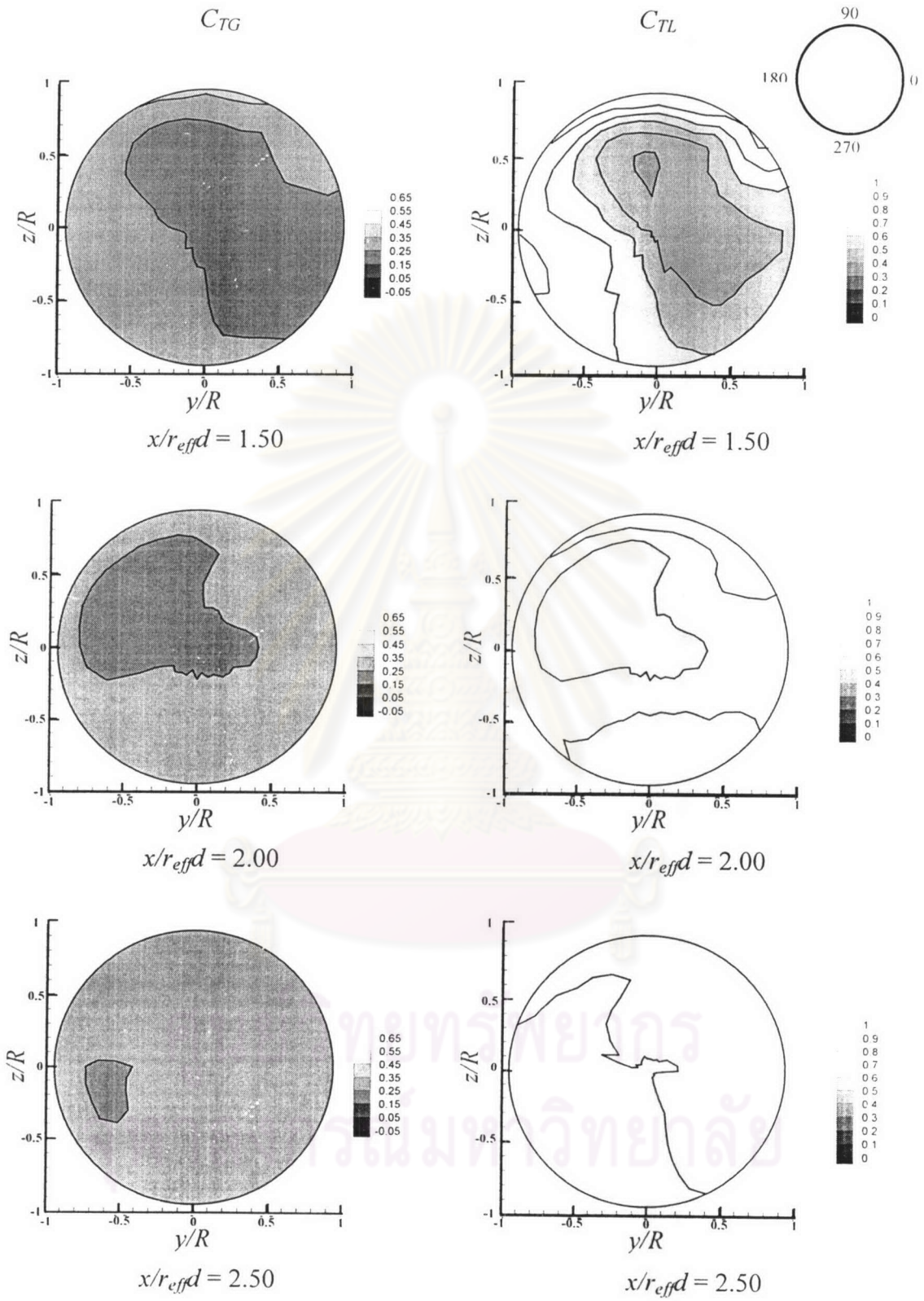
รูปที่ 3.12 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd05$ (ต่อ)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

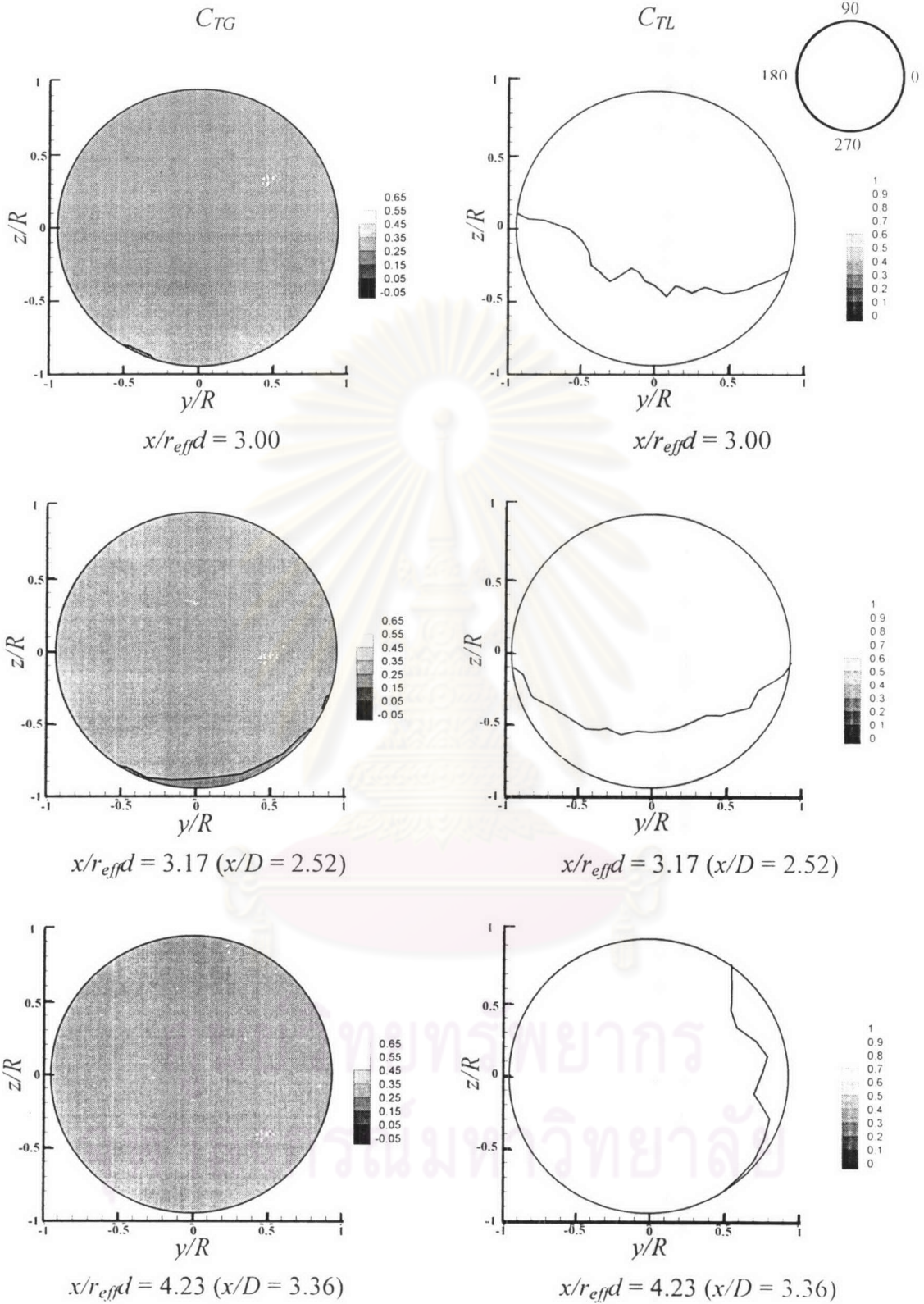


รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd10$

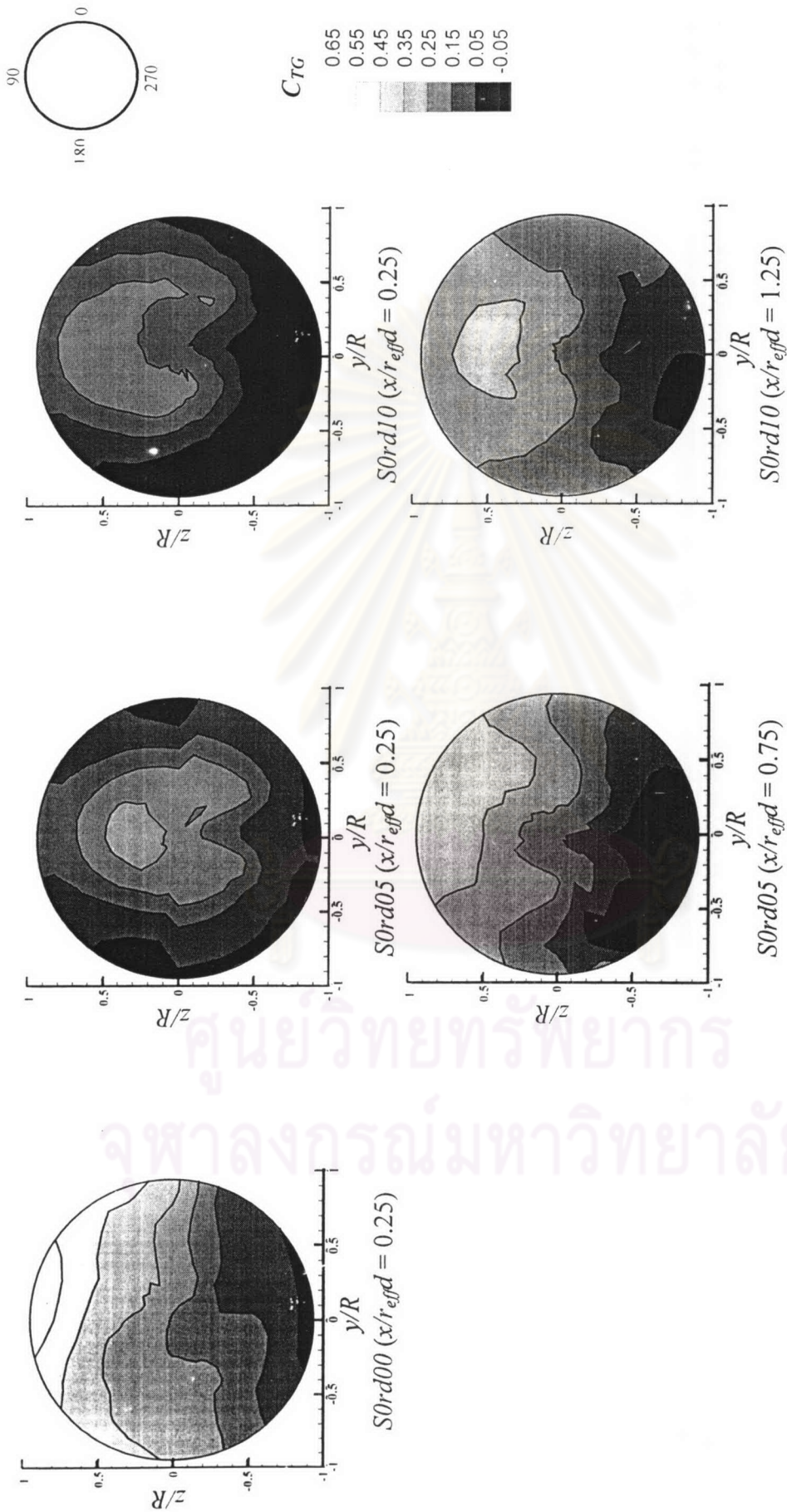
Swirl direction



รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd10$ (ต่อ)

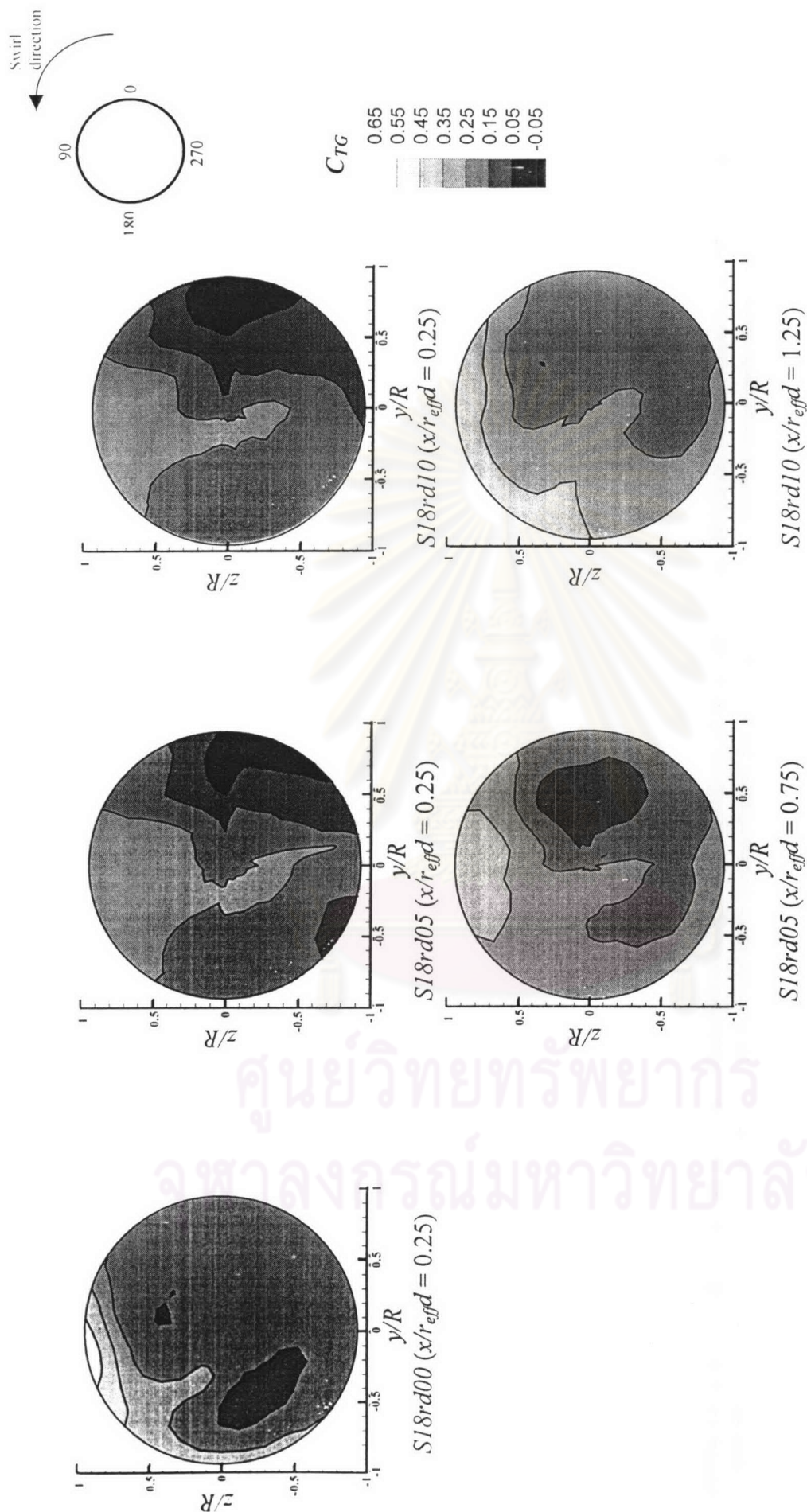


รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd10$ (ต่อ)

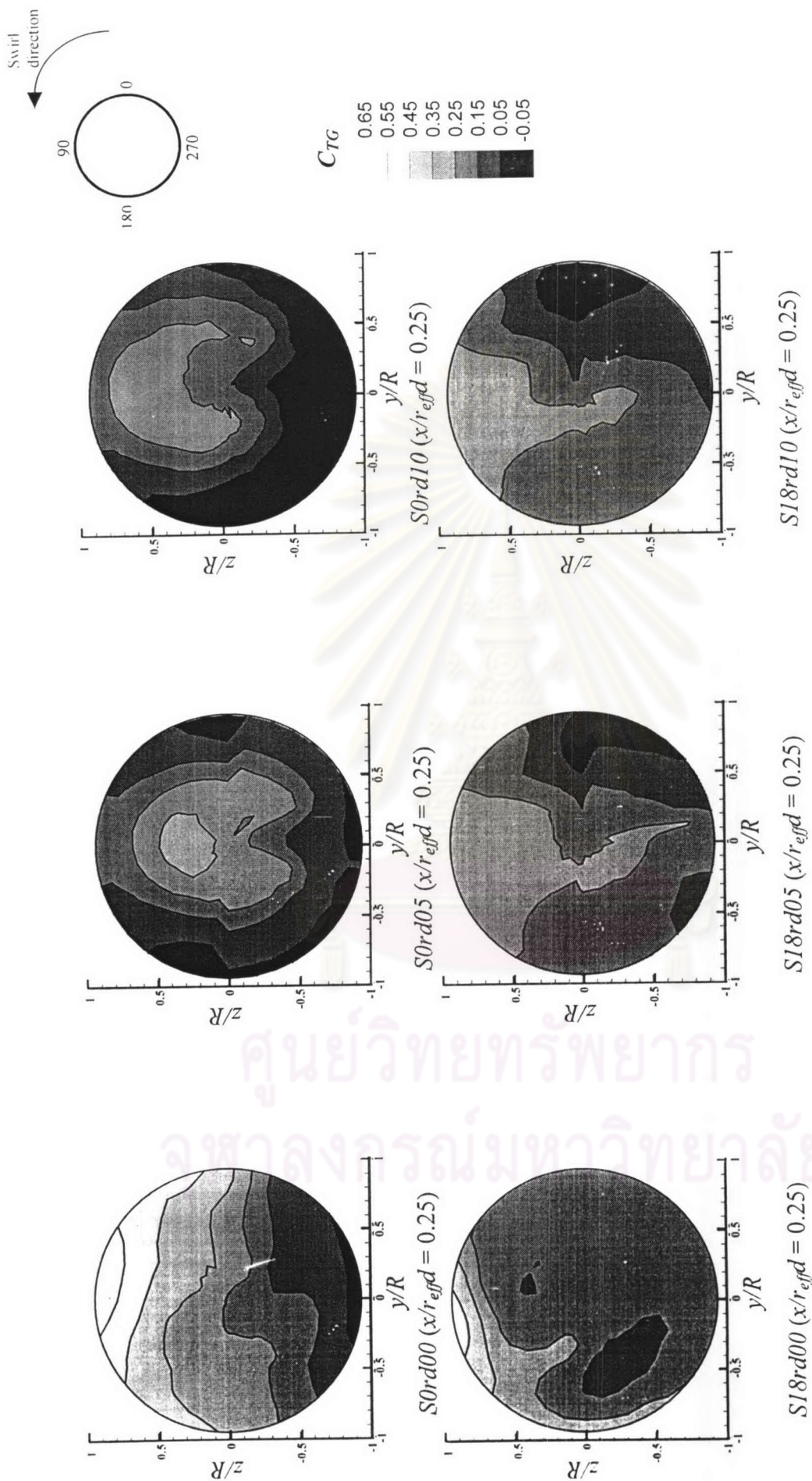


รูปที่ 3.14 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{7G}) เปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งหลังจัต $x/r_{effd} = 0.25$ ในแต่ละกรณีการไหล

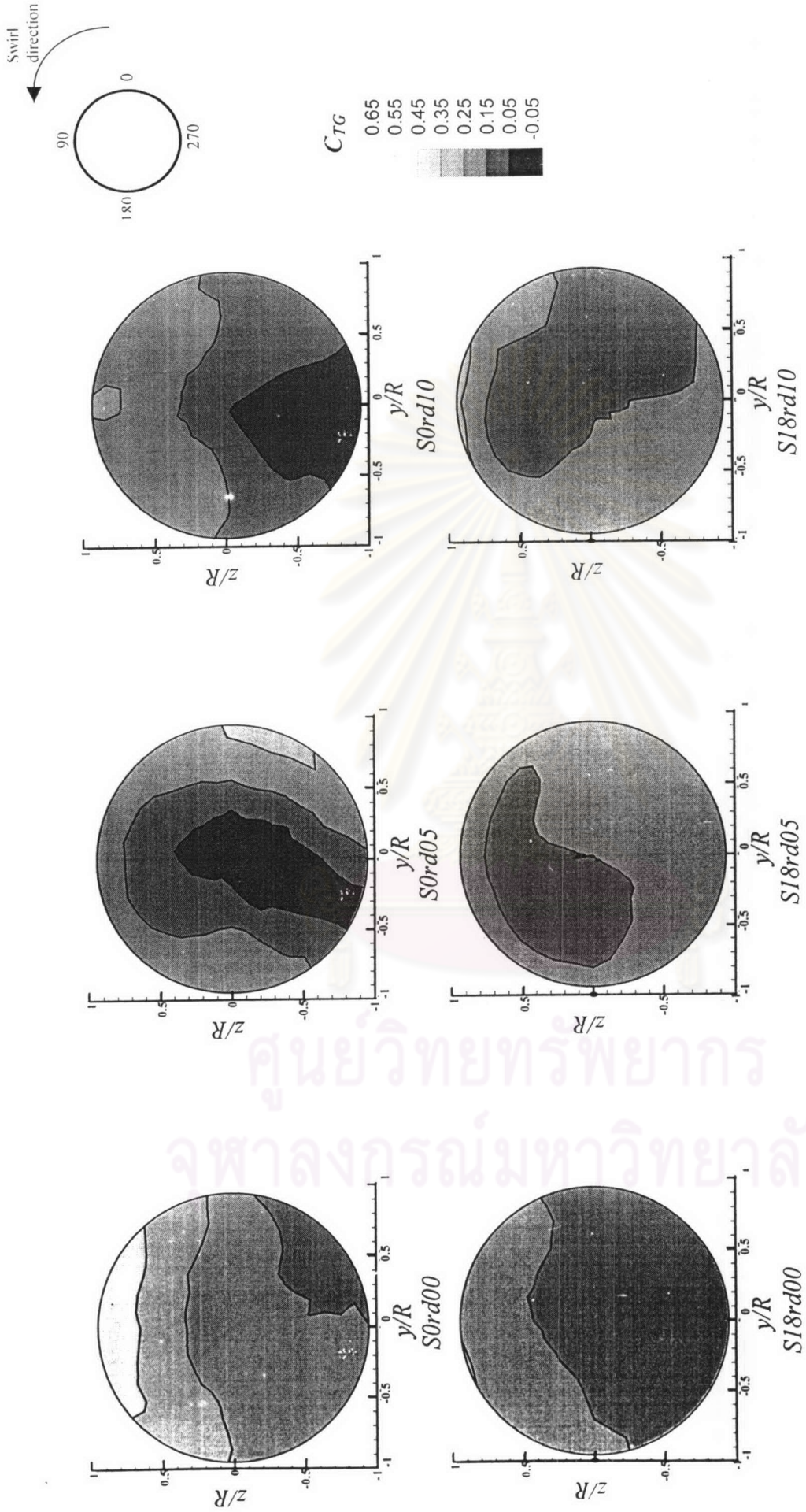
สำหรับกรณีที่มีการผสมขวางไม่มี การไหลแบบหมุนควง



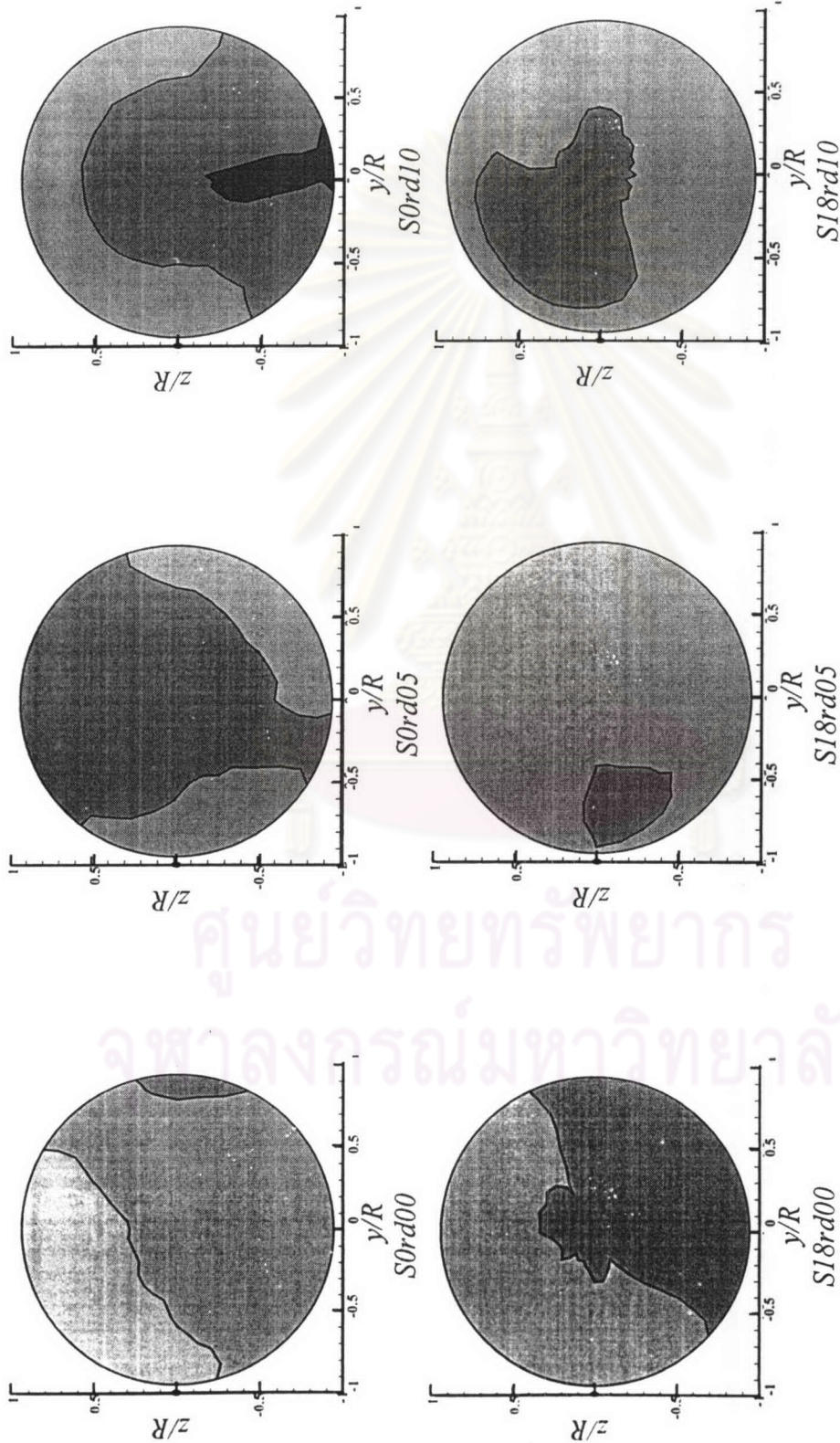
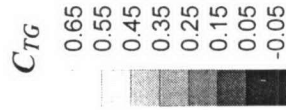
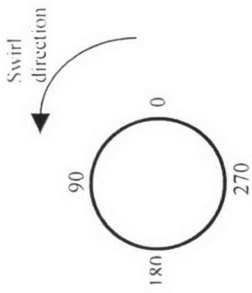
รูปที่ 3.15 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งหลังเจ็ต $x/r_{effd} = 0.25$ ในแต่ละกรณีการไหล สำหรับกรณีที่กระแสผสมขวางมีการไหลแบบหมุนควง



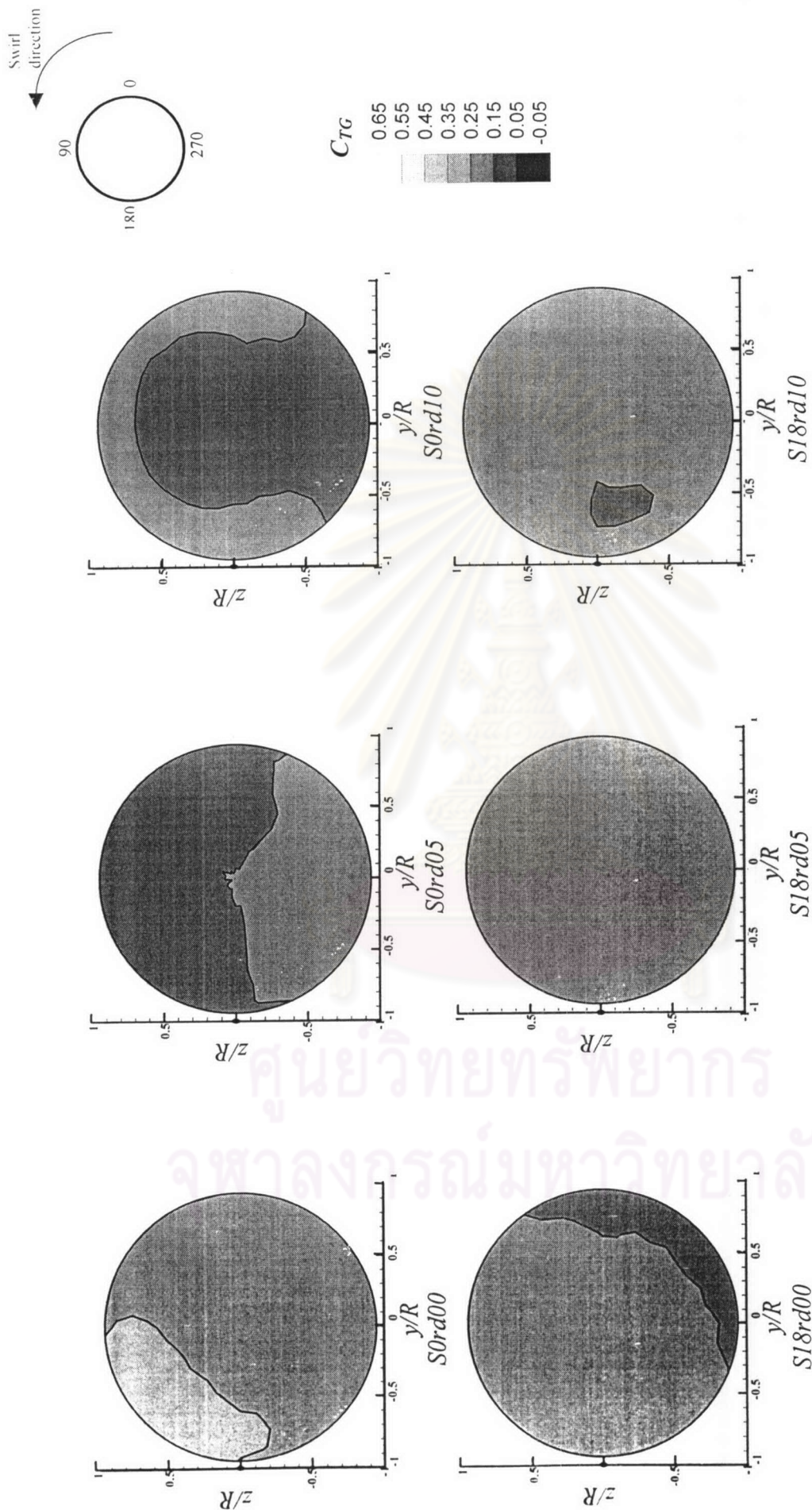
รูปที่ 3.16 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{7G}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่มี $x/r_{efd} = 0.25$



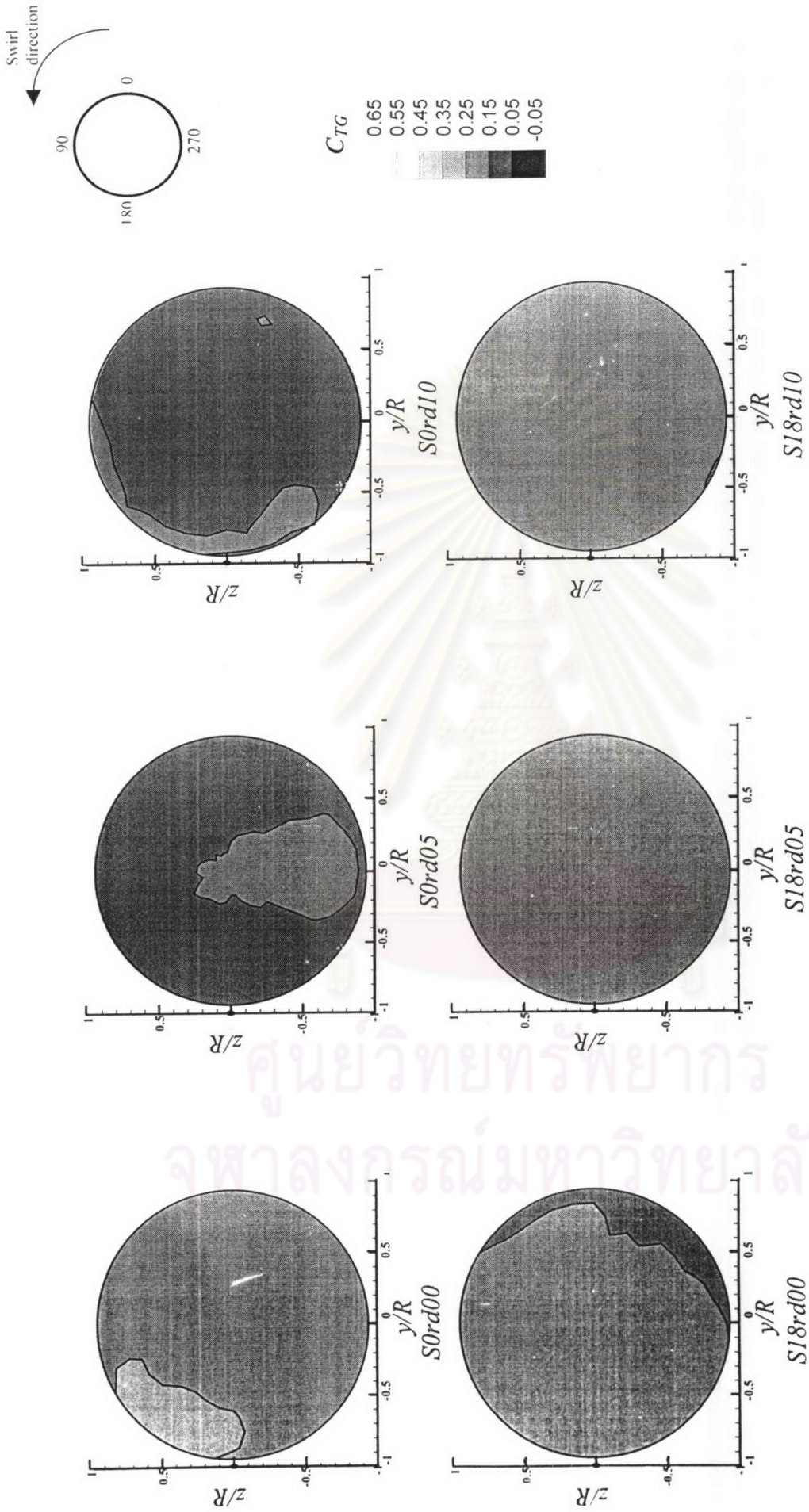
รูปที่ 3.17 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{7G}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ $x/r_{eff} = 1.50$



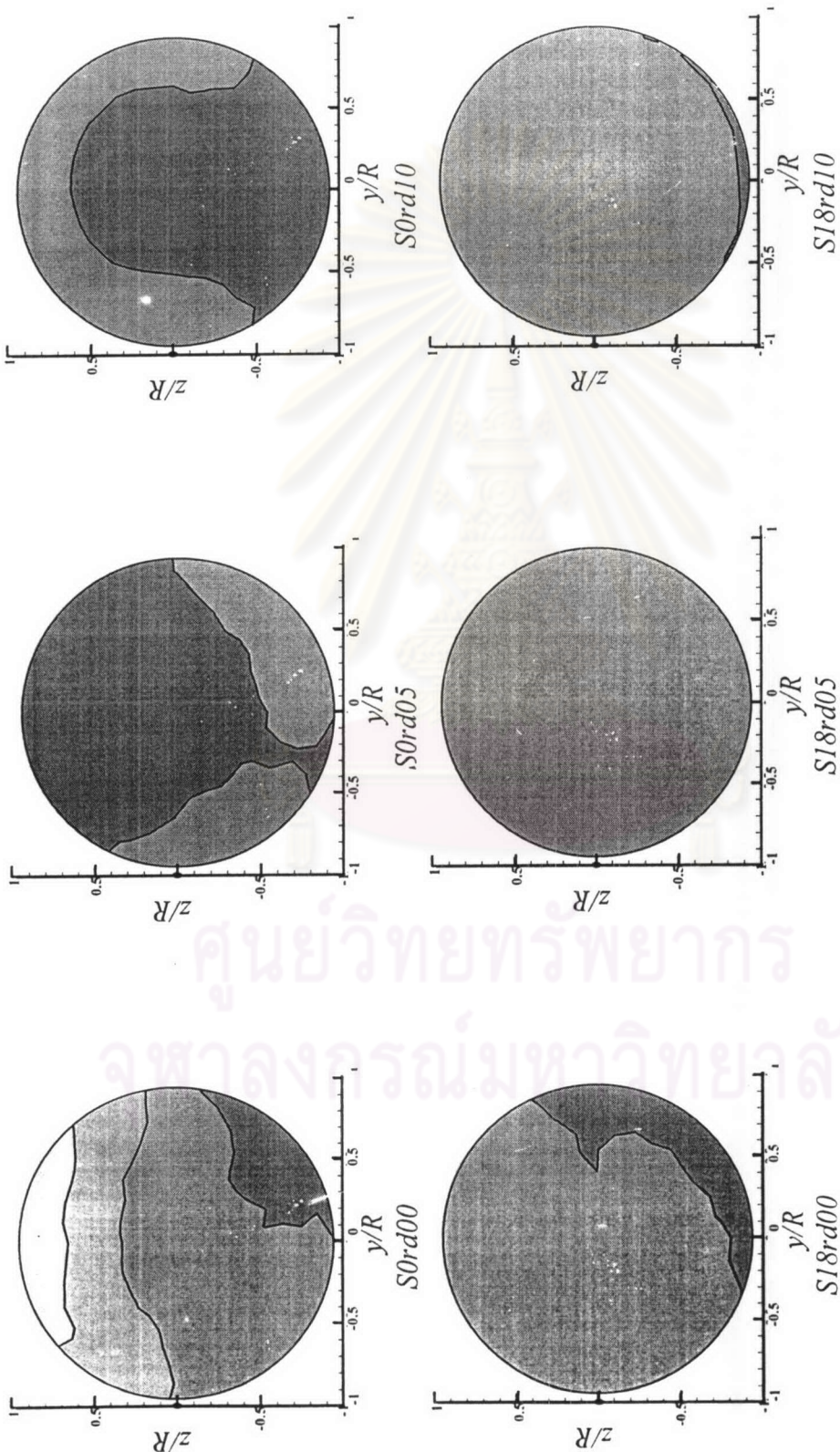
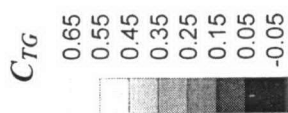
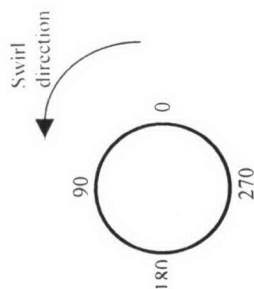
รูปที่ 3.18 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/r_{eff} = 2.00$



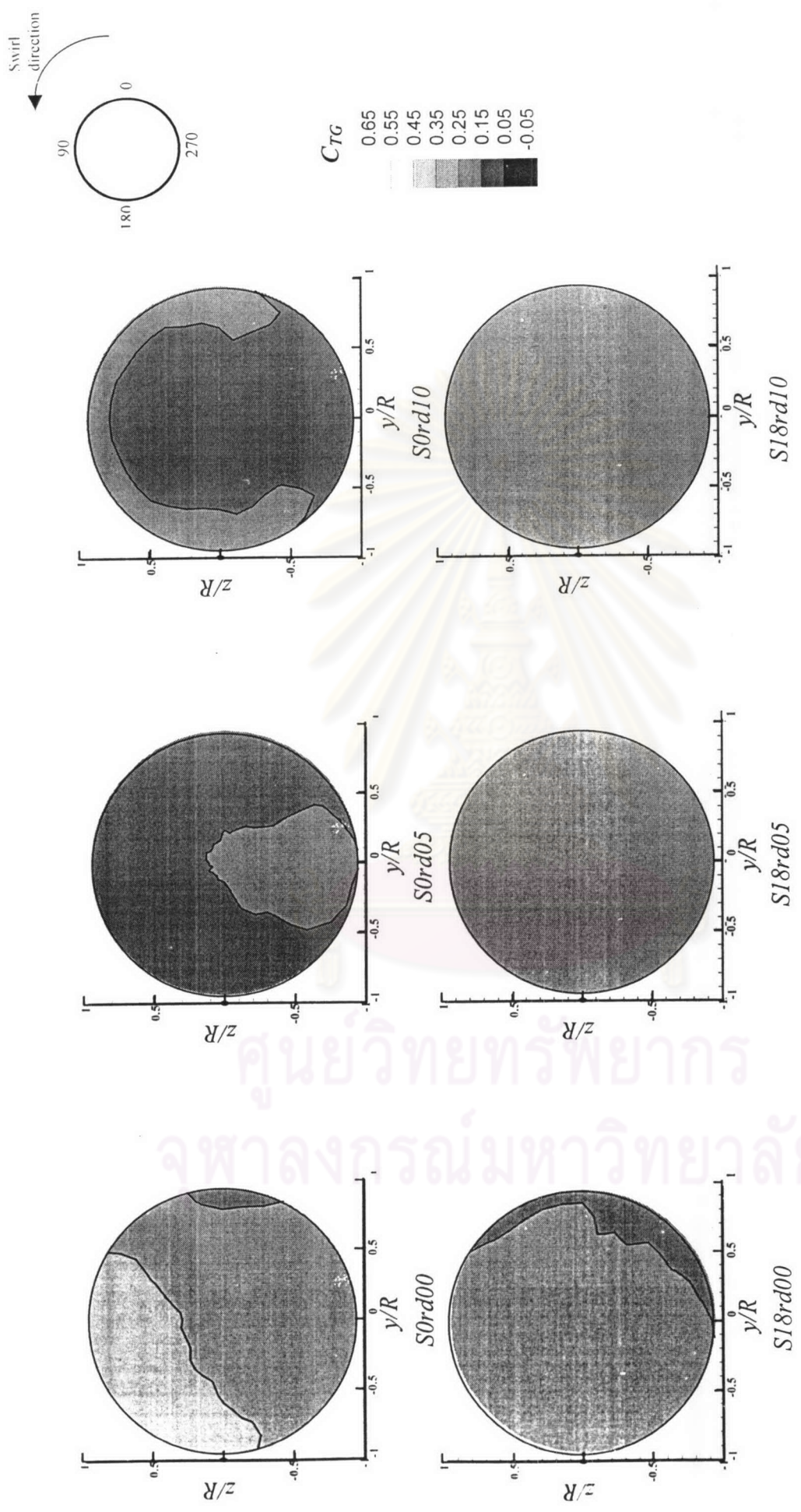
รูปที่ 3.19 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/r_{cfd} = 2.50$



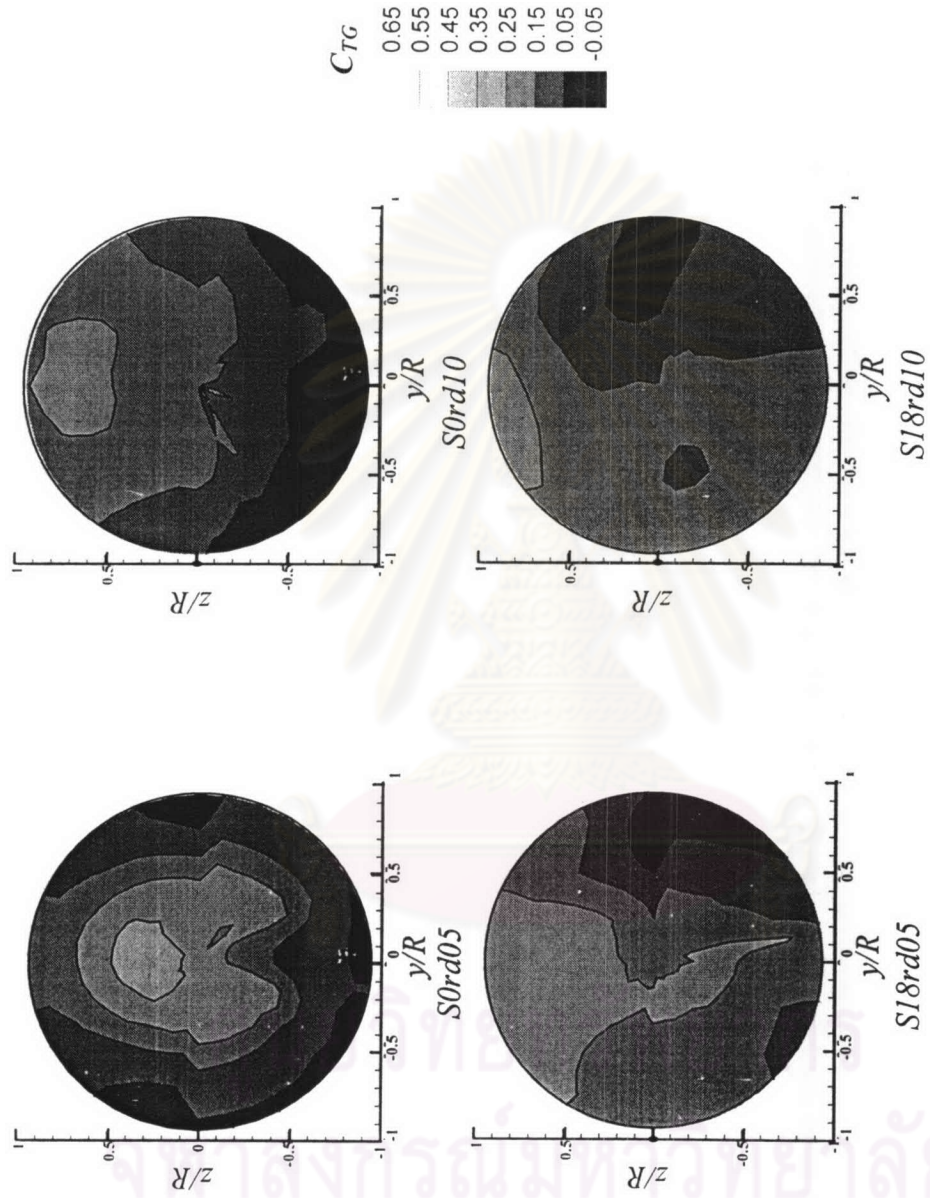
รูปที่ 3.20 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกับในแต่ละกรณีที่ $x/r_{eff} = 3.00$



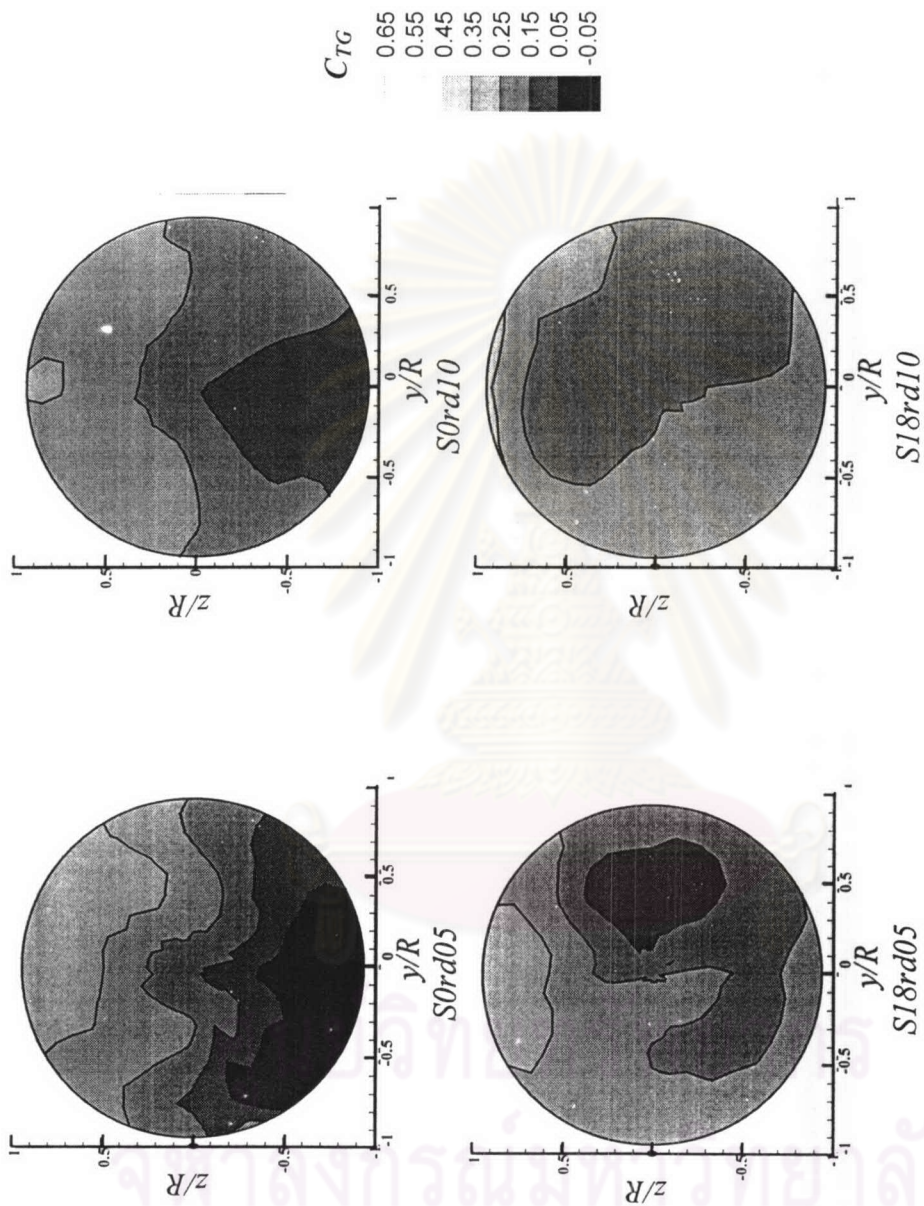
รูปที่ 3.21 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/D = 2.52$



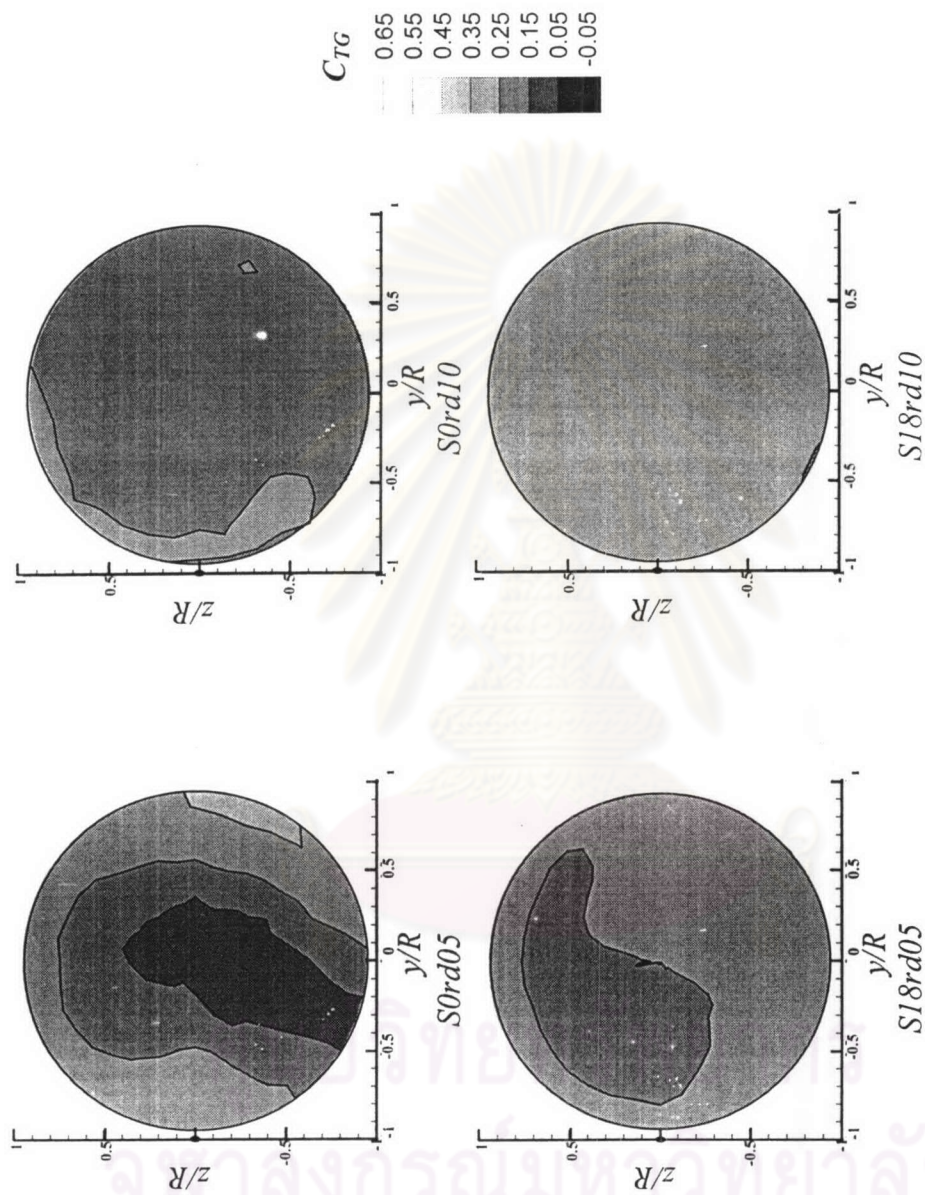
รูปที่ 3.22 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/D = 3.36$



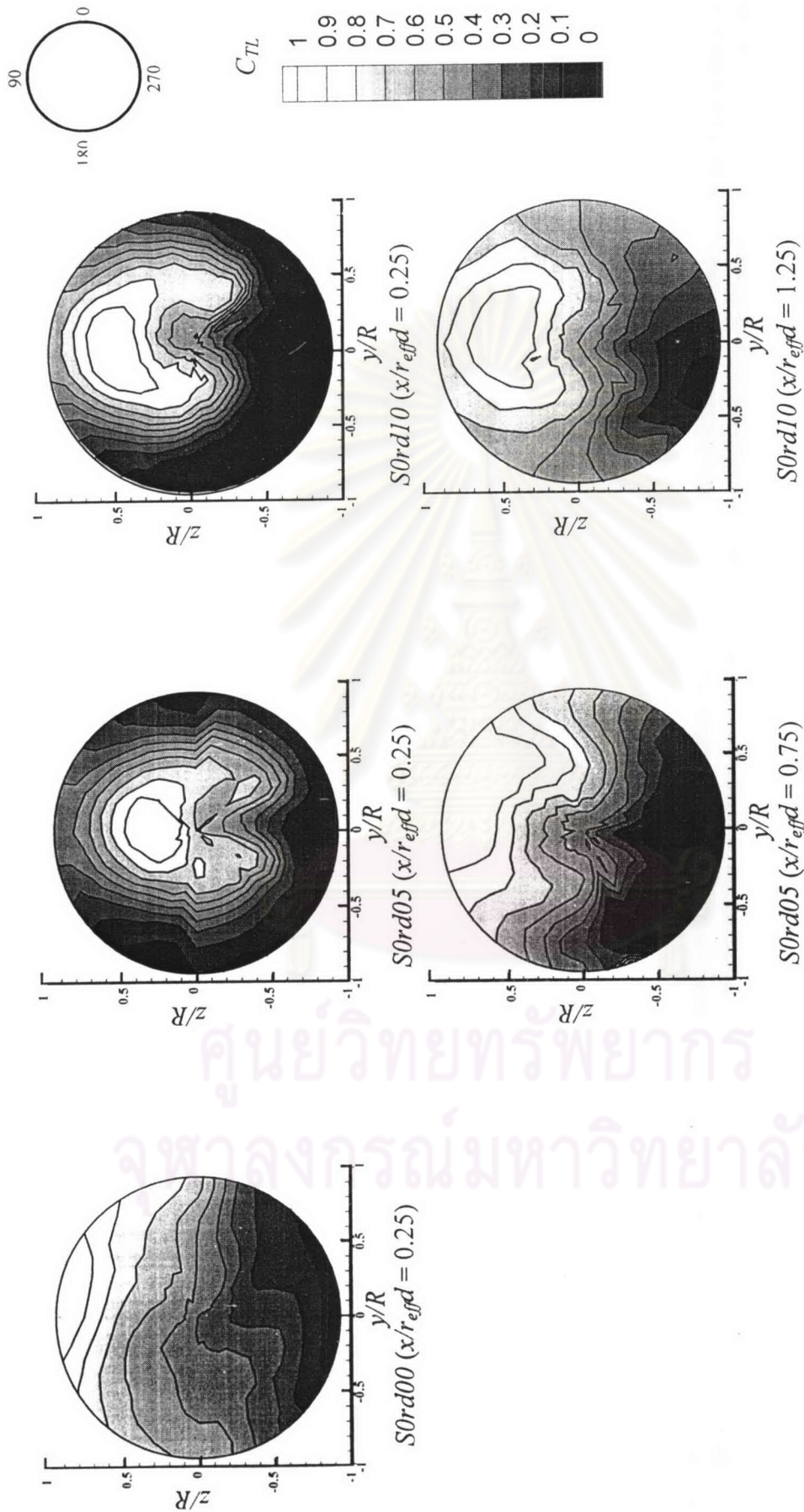
รูปที่ 3.22 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{7c}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ $x/S = 0.50$



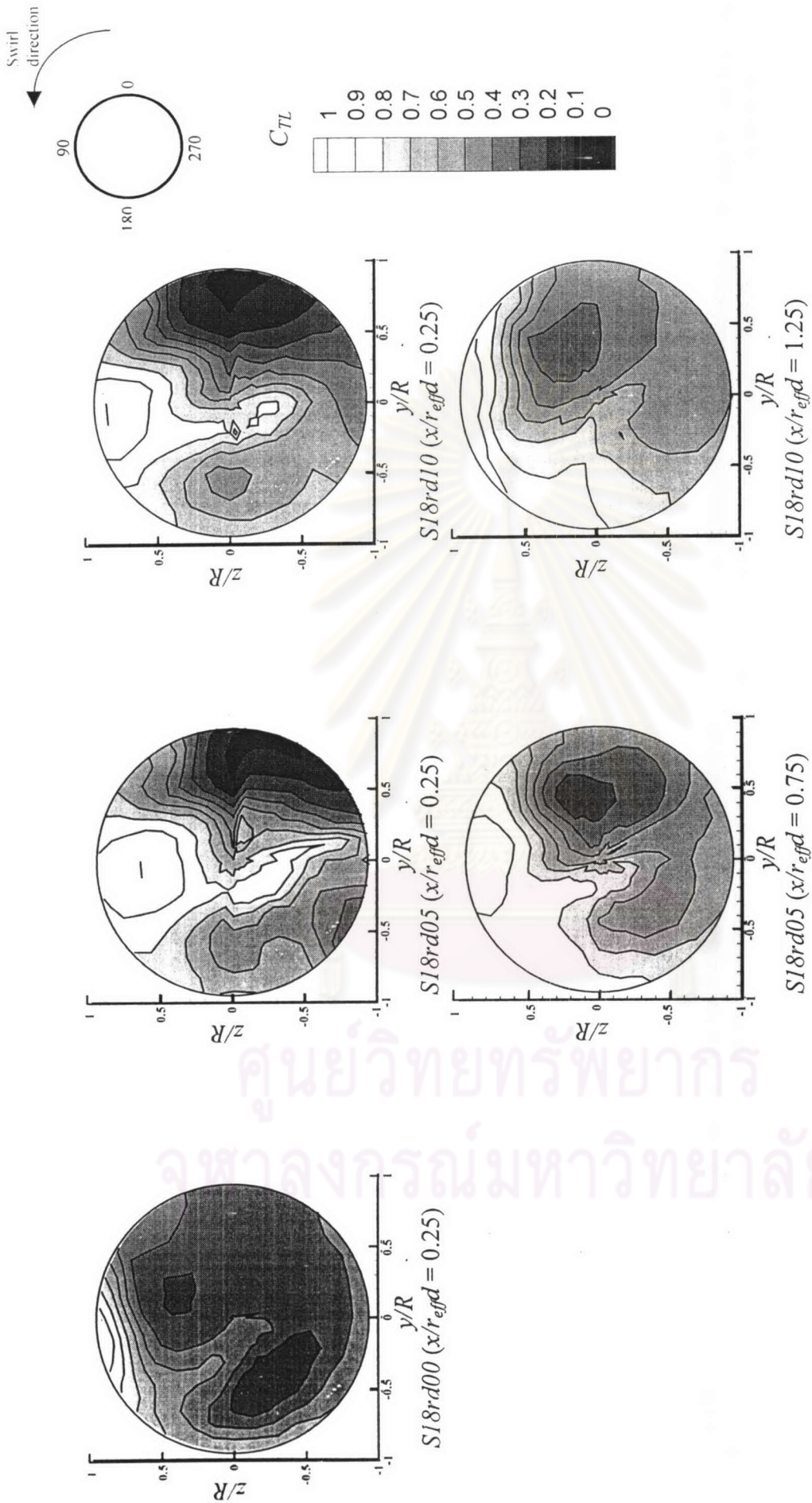
รูปที่ 3.23 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ $v/S = 1.50$



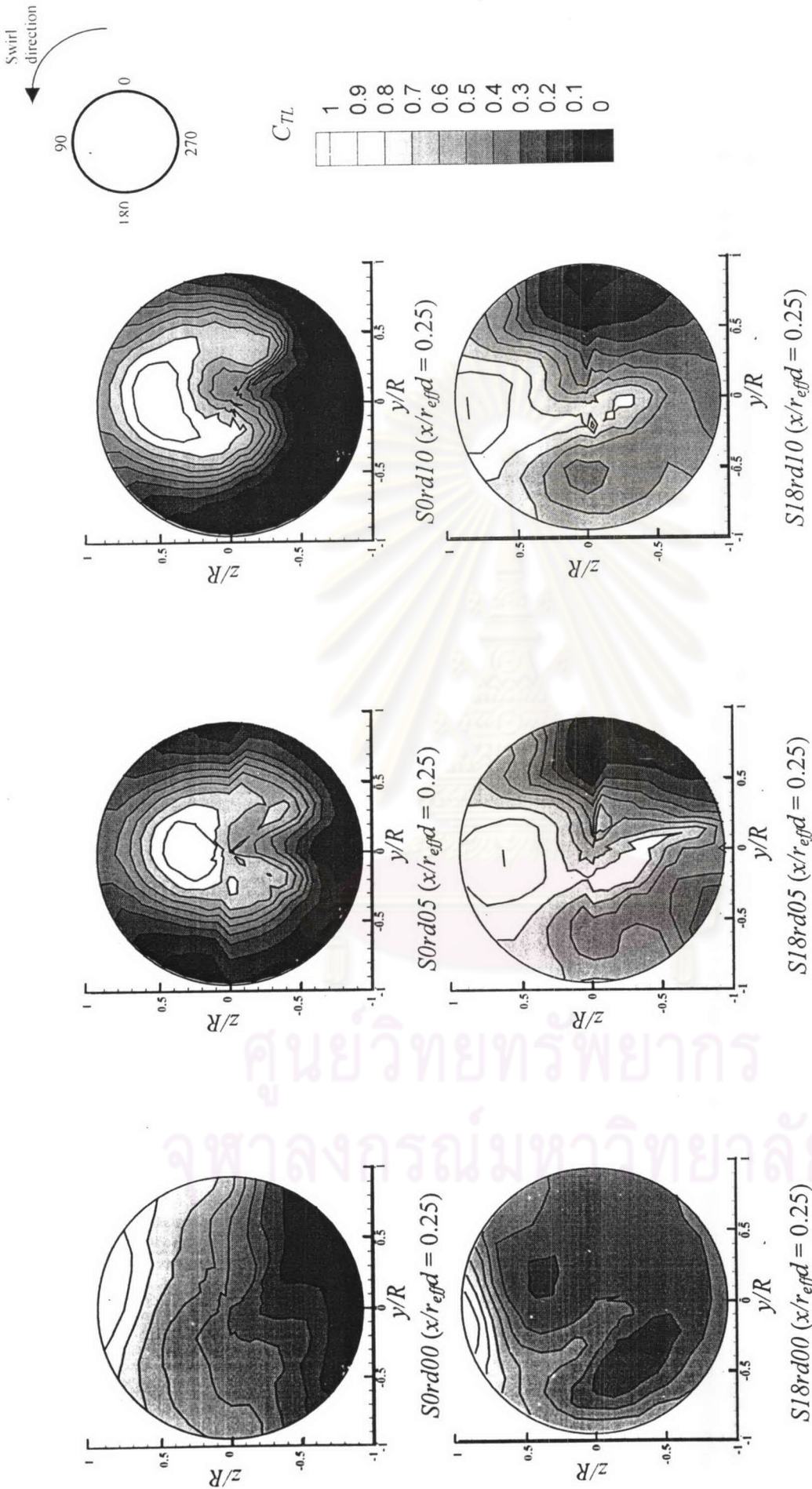
รูปที่ 3.24 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{7G}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ $x/S = 3.00$



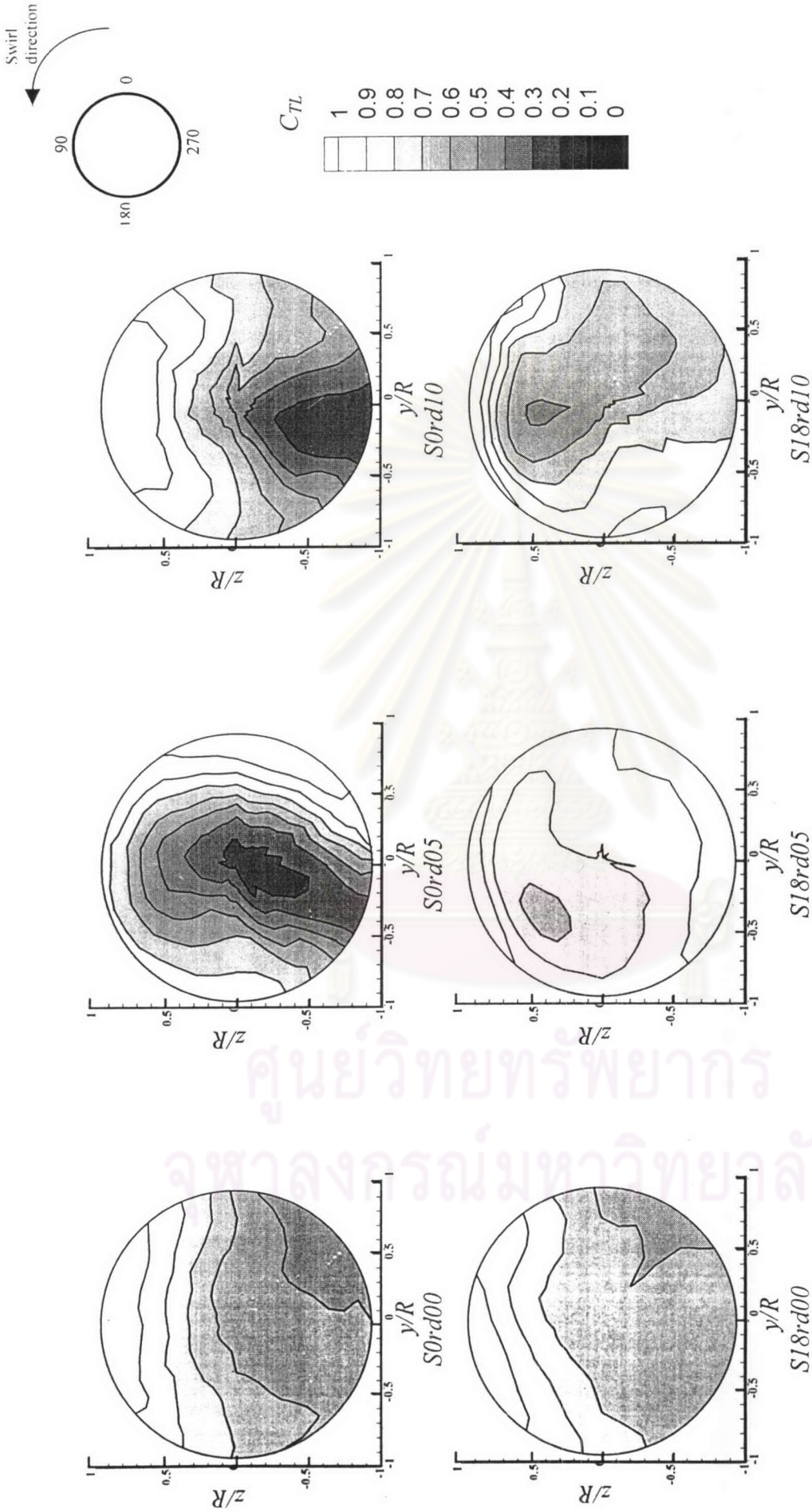
รูปที่ 3.26 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งหลังเจ็ต $x/r_{effd} = 0.25$ ในแต่ละกรณีการไหล สำหรับกรณีที่เกิดการผสมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง



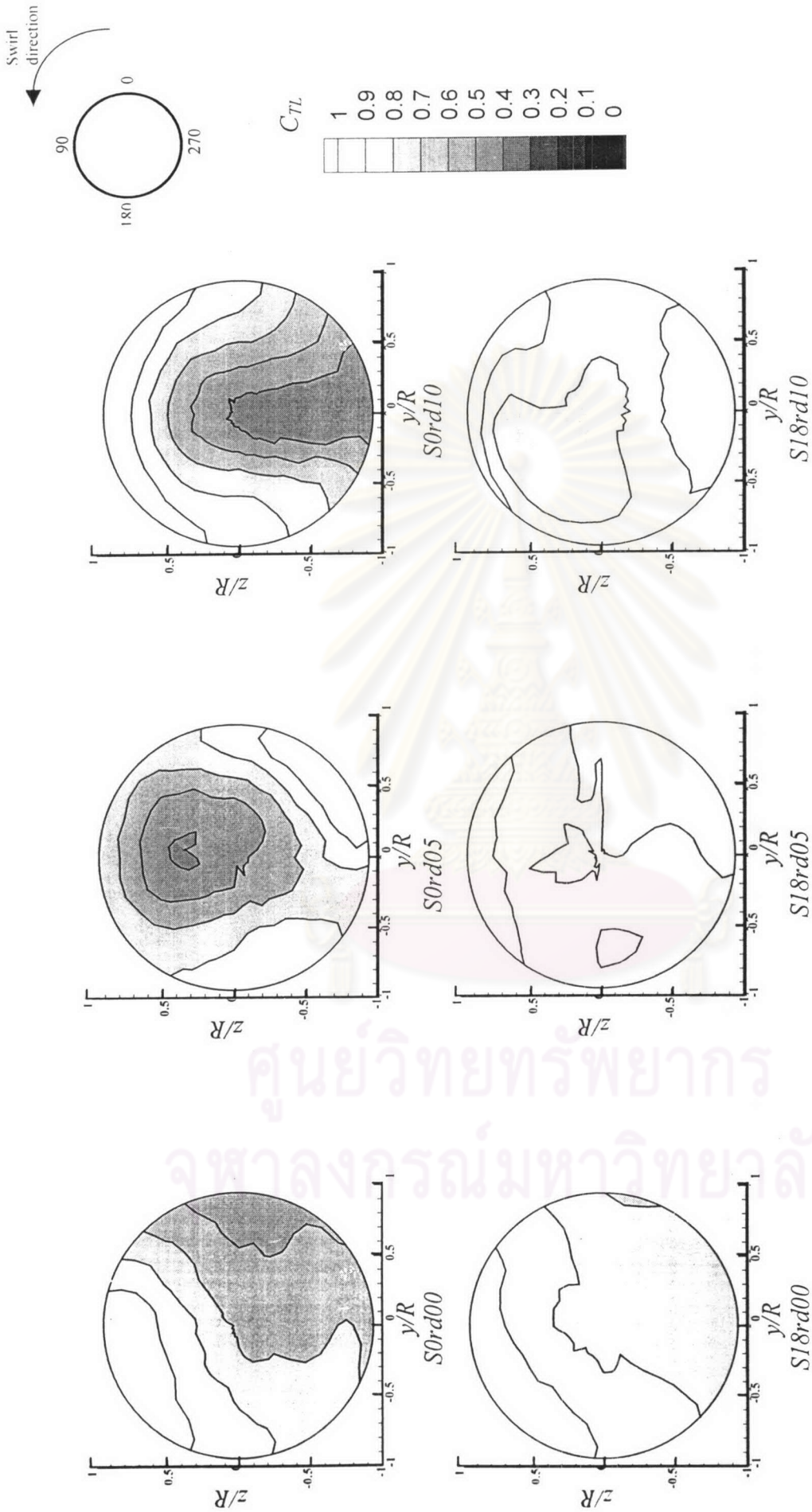
รูปที่ 3.27 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งหลังเจ็ต $x/r_{efgd} = 0.25$ ในแต่ละกรณีการไหล สำหรับกรณีที่แตกต่างกันการไหลแบบหมุนควง



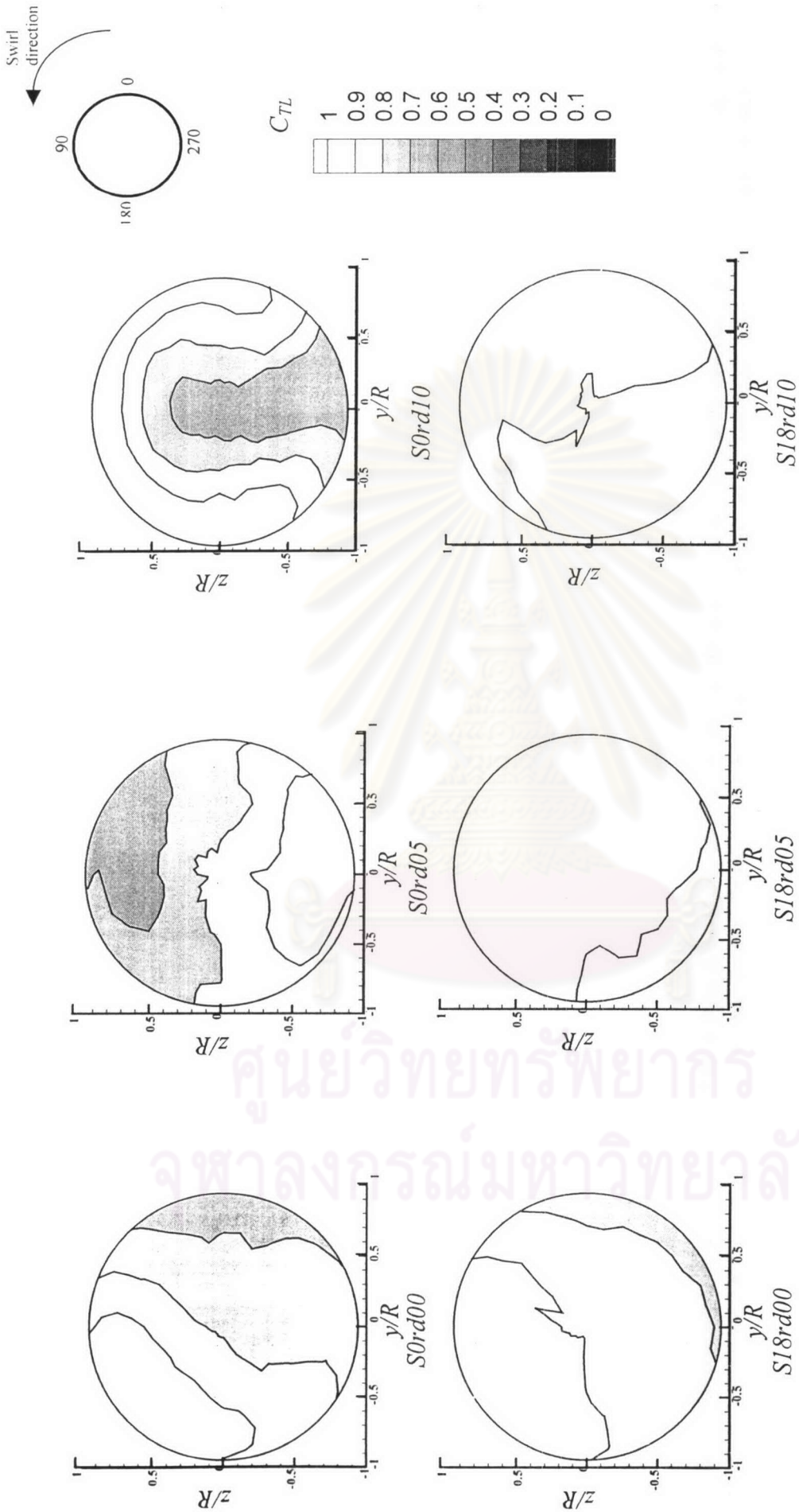
รูปที่ 3.28 การกระจายของสัมประสิทธิ์ความปั่นป่วน (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่มี $x/r_{effd} = 0.25$



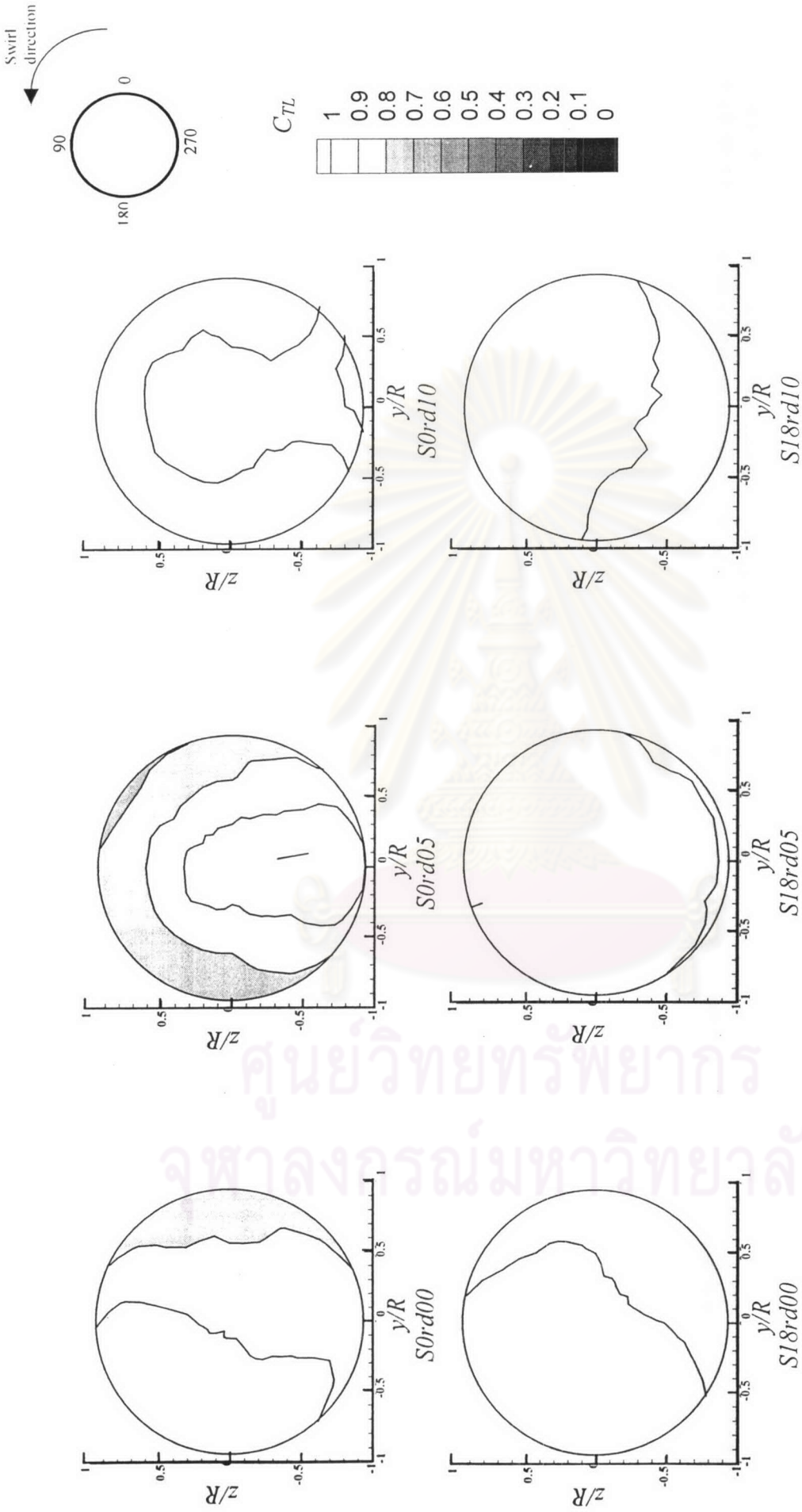
รูปที่ 3.29 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่มี $x/r_{eff} = 1.50$



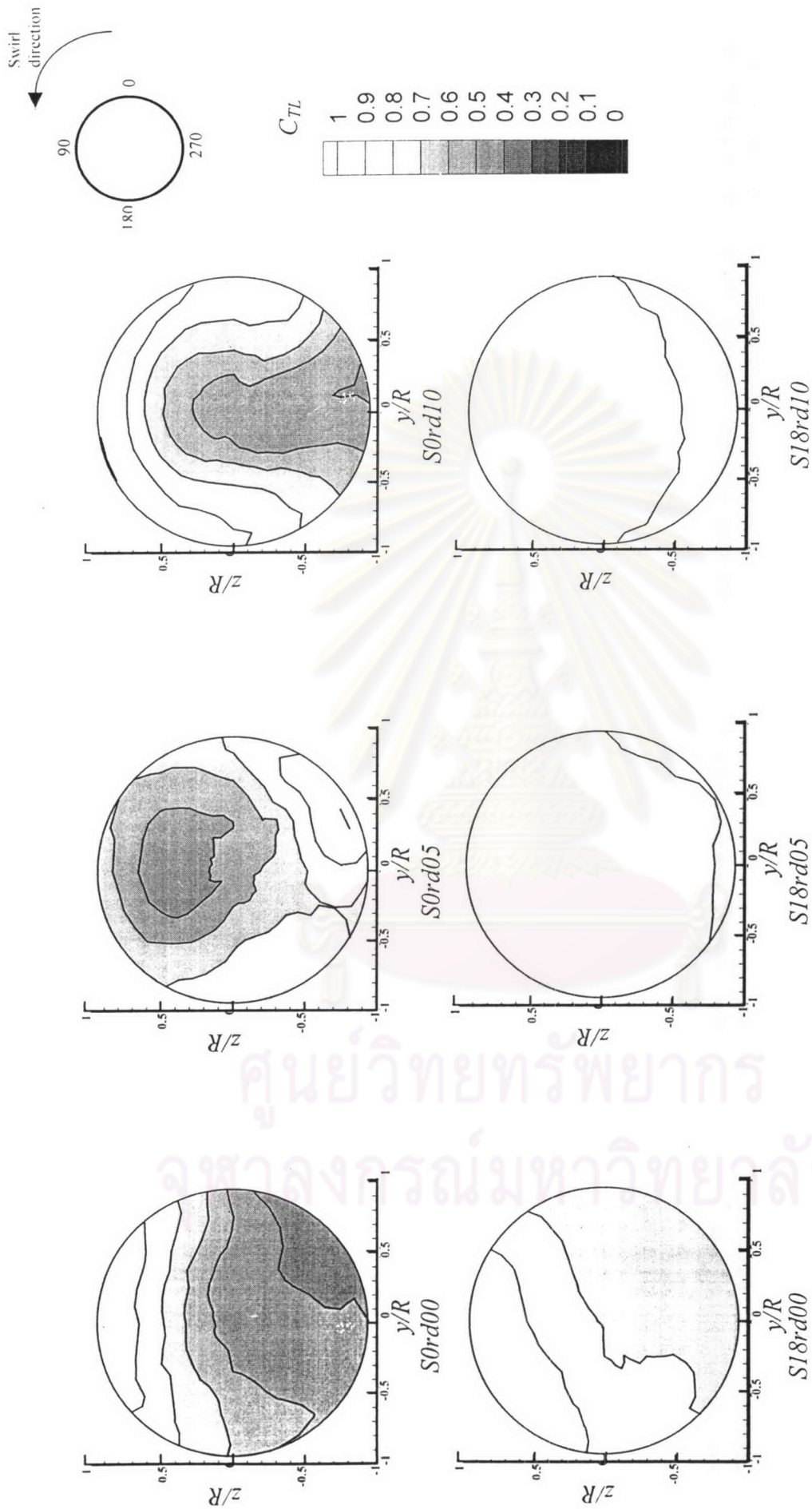
รูปที่ 3.30 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่มี $x/r_{c/d} = 2.00$



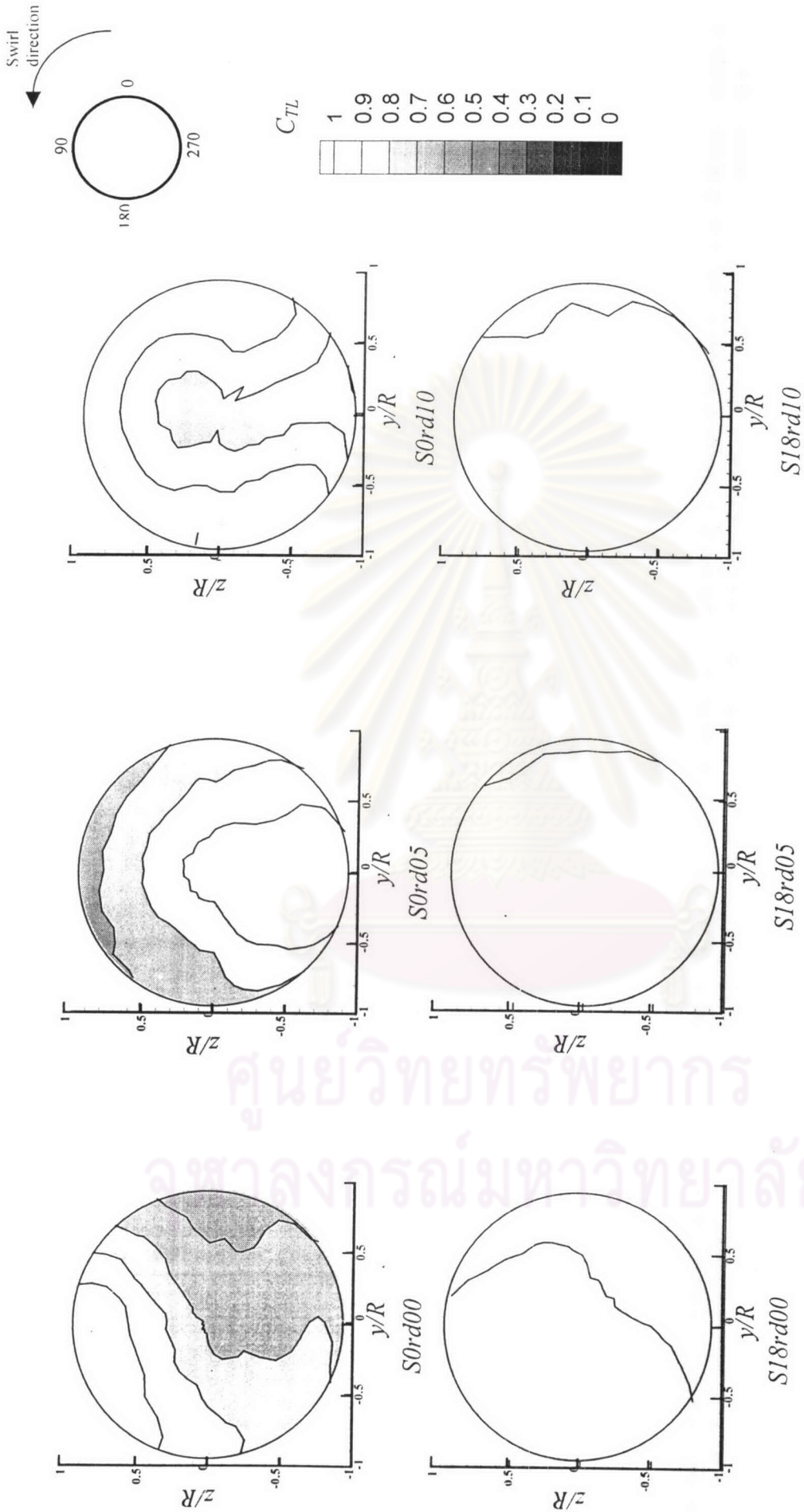
รูปที่ 3.31 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{7L}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่มี $x/r_{eff}d = 2.50$



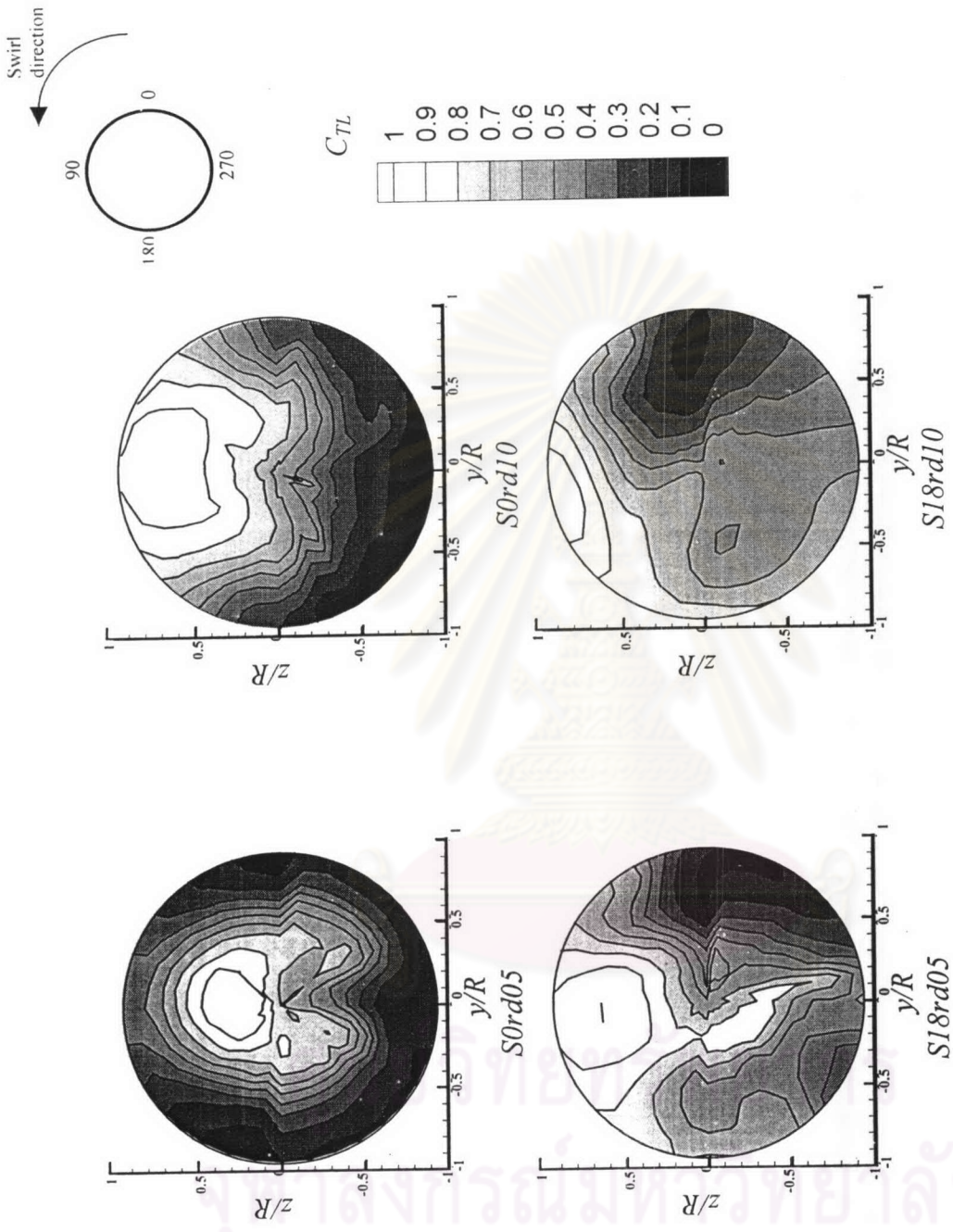
รูปที่ 3.32 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่มี $x/r_{eff} = 3.00$



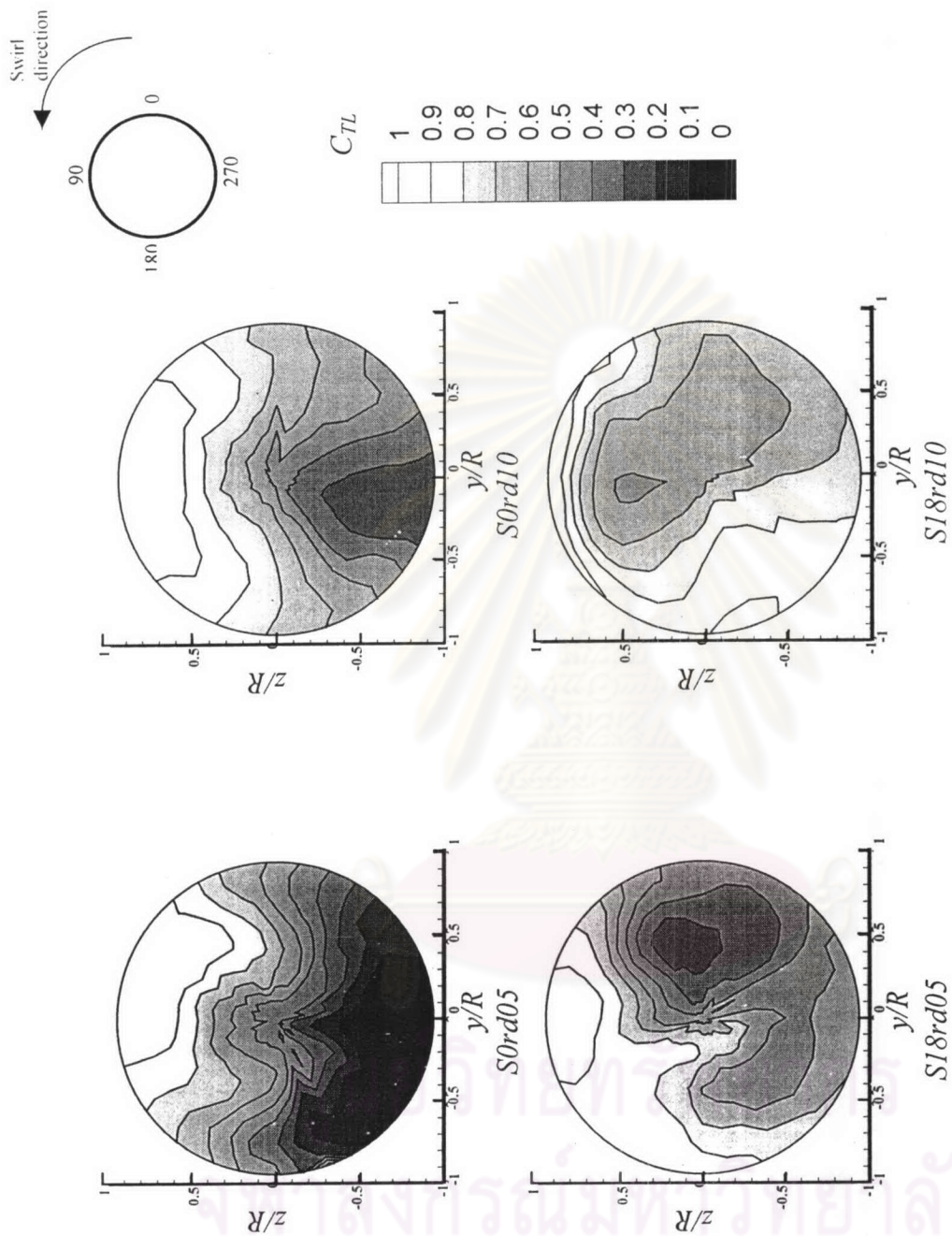
รูปที่ 3.33 การกระจายของสัมประสิทธิ์ทอร์ชันรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/D = 2.52$



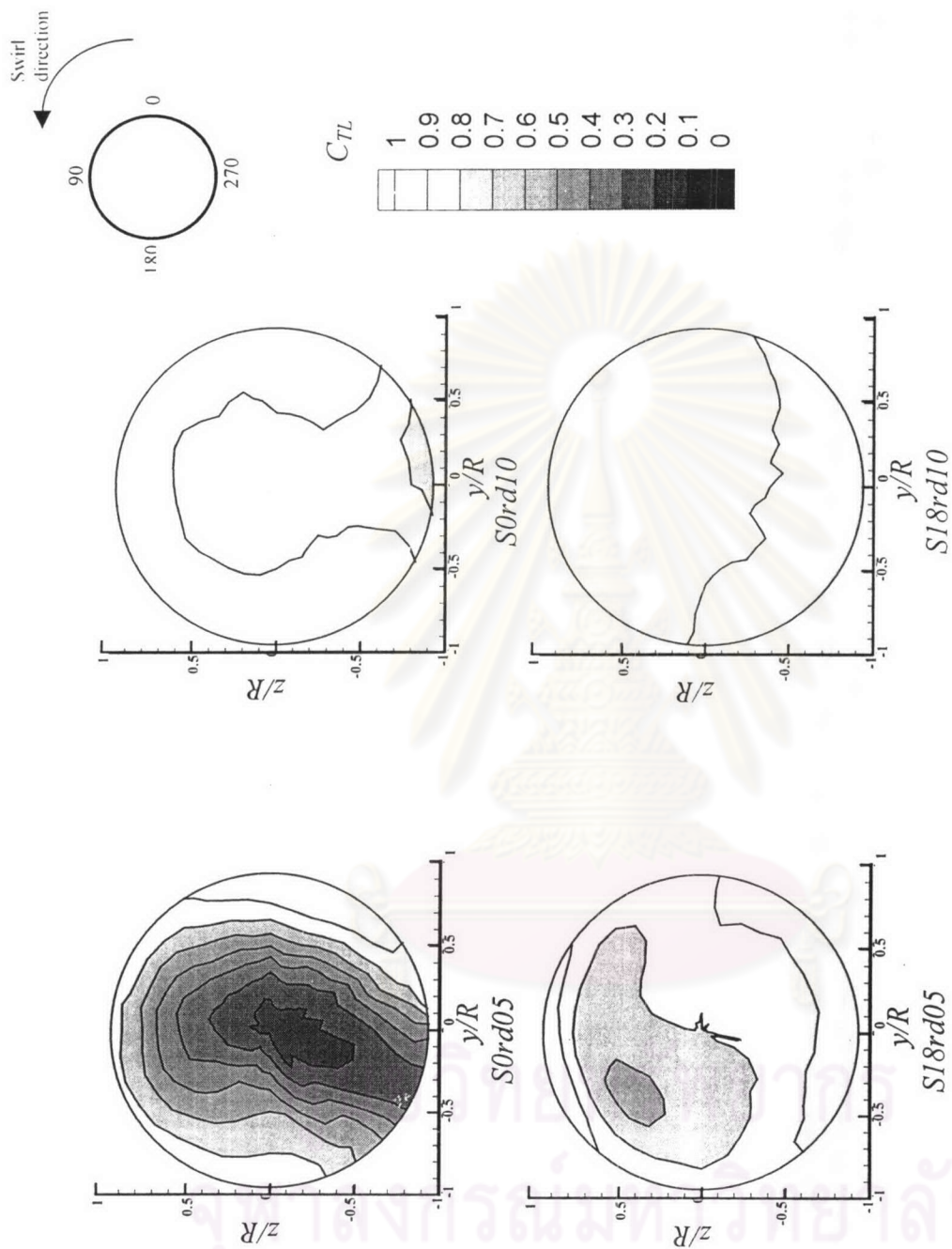
รูปที่ 3.34 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/D = 3.36$



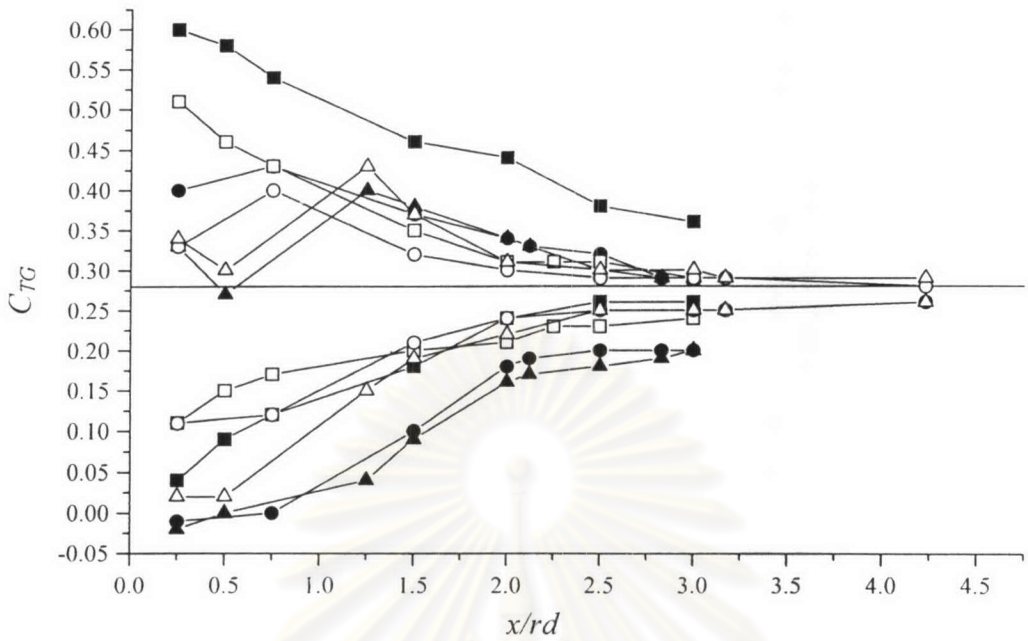
รูปที่ 3.35 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ $x/S = 0.50$



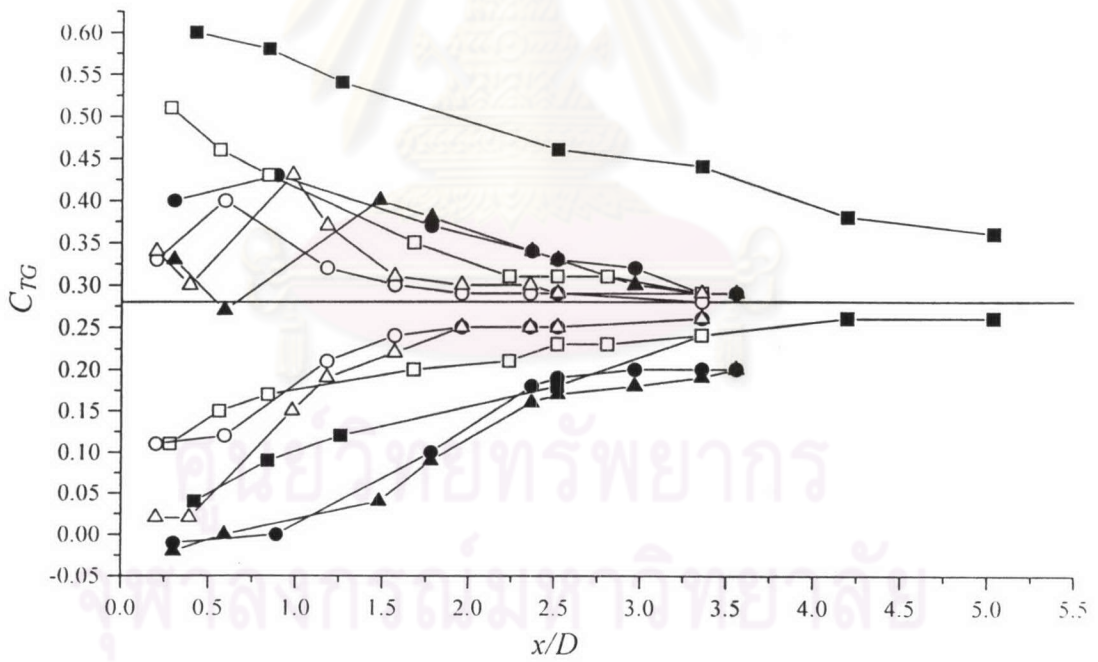
รูปที่ 3.36 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{7L}) เปรียบเทียบกับในแต่ละกรณี ที่ $v/S = 1.50$



รูปที่ 3.37 การกระจายของสัมประสิทธิ์อิทธิพลรวม (C_{7L}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ $x/S = 3.00$



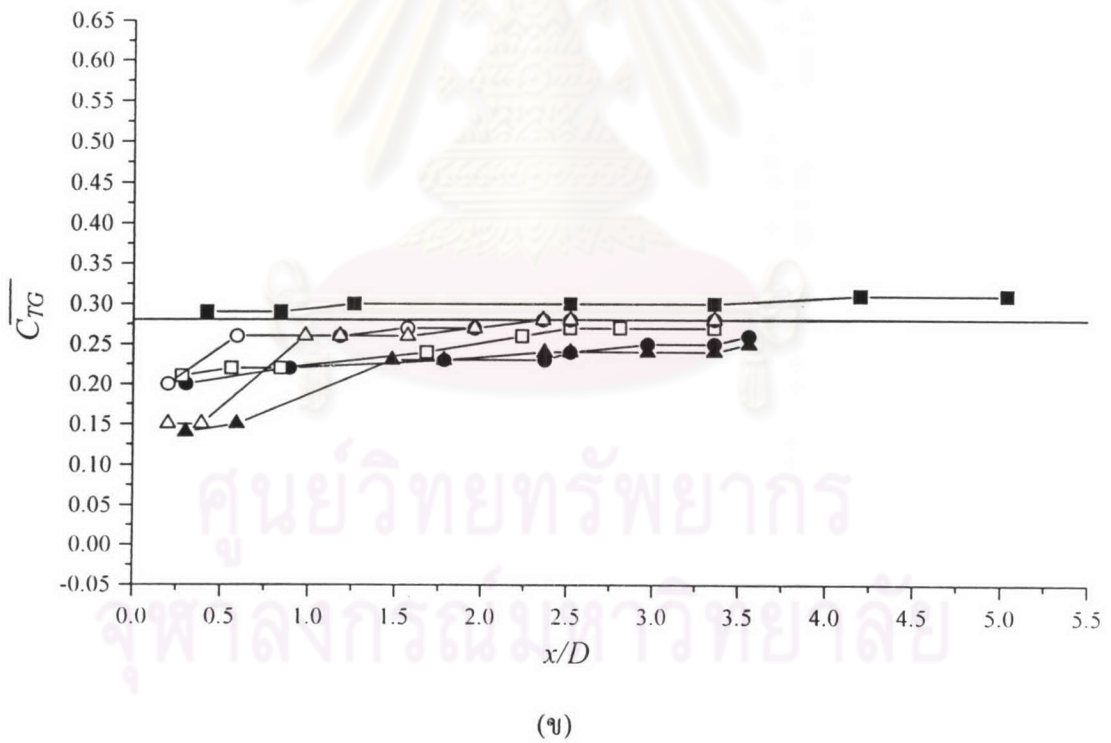
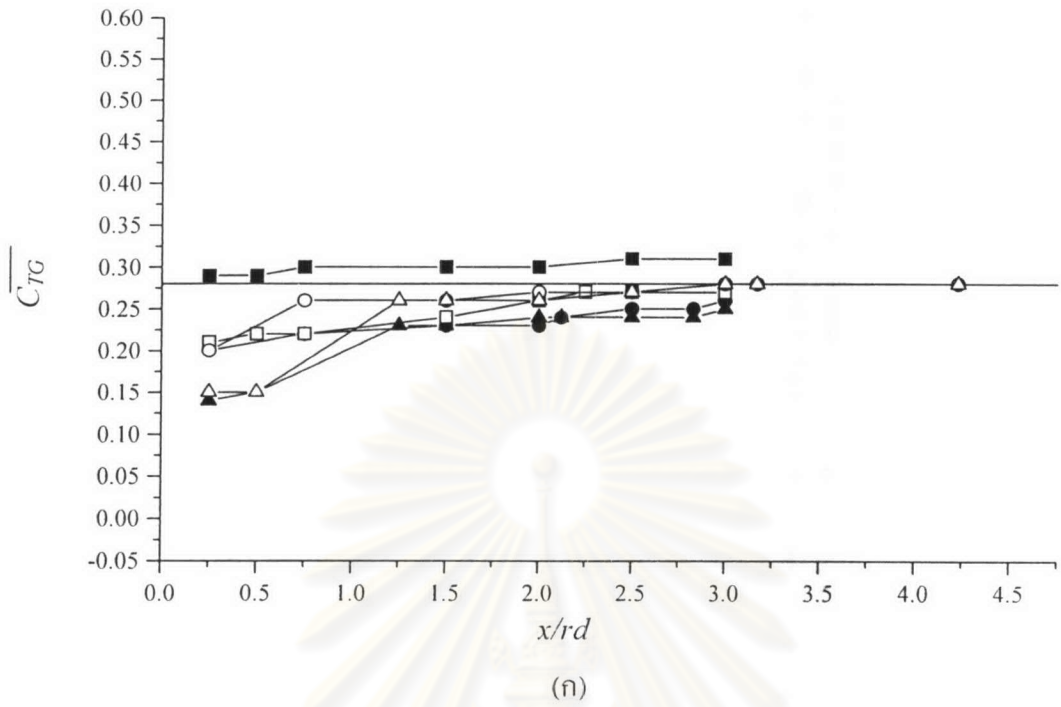
(ก)



(ข)

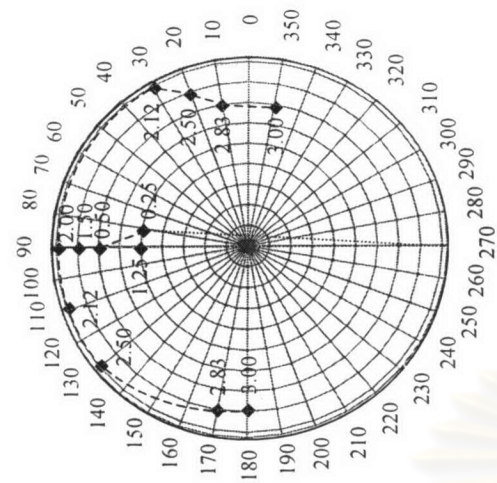
- *S0rd00* —●— *S0rd05* —▲— *S0rd10*
- *S18rd00* —○— *S18rd05* —△— *S18rd10*

รูปที่ 3.38 Maximum Decay – Minimum Increase ตามแนว Downstream (x)
 ในแต่ละกรณี (ก) บน rd -scale, (ข) บน D -scale

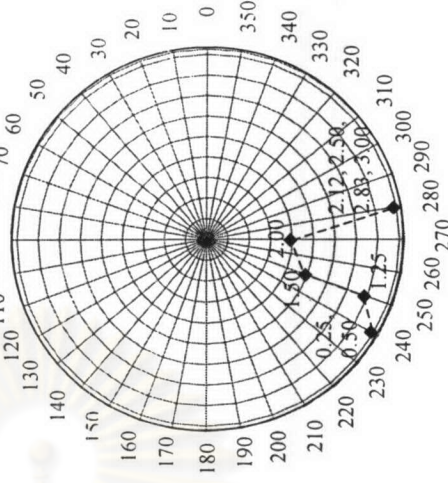


—■— *S0rd00* —●— *S0rd05* —▲— *S0rd10*
 —□— *S18rd00* —○— *S18rd05* —△— *S18rd10*

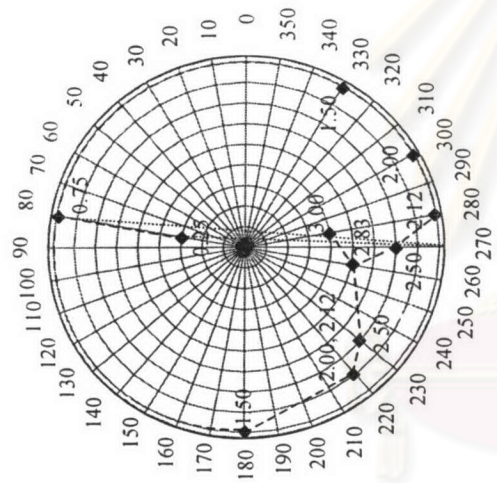
รูปที่ 3.39 การกระจายตัวเฉลี่ยแบบพื้นที่ตามแนว Downstream (x) ในแต่ละกรณี
 (ก) บน rd -scale, (ข) บน D -scale



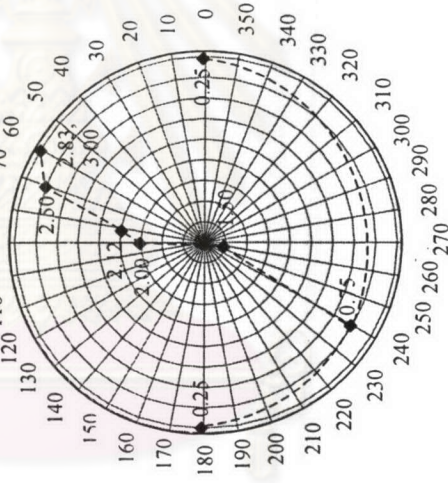
S0rd10 (Maximum)



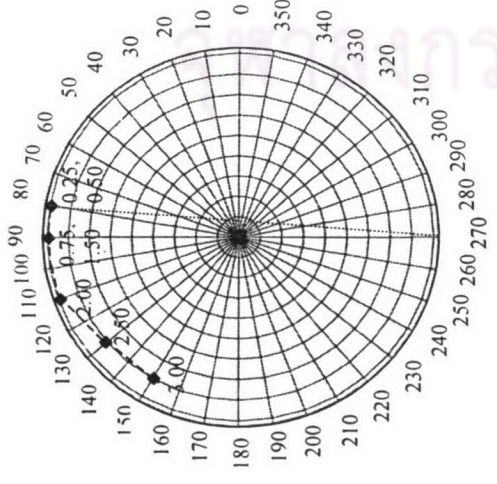
S0rd10 (Minimum)



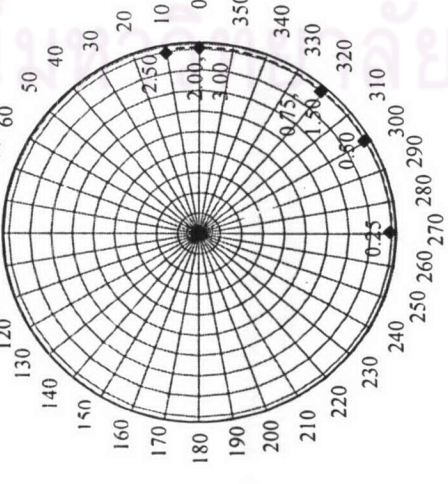
S0rd05 (Maximum)



S0rd05 (Minimum)

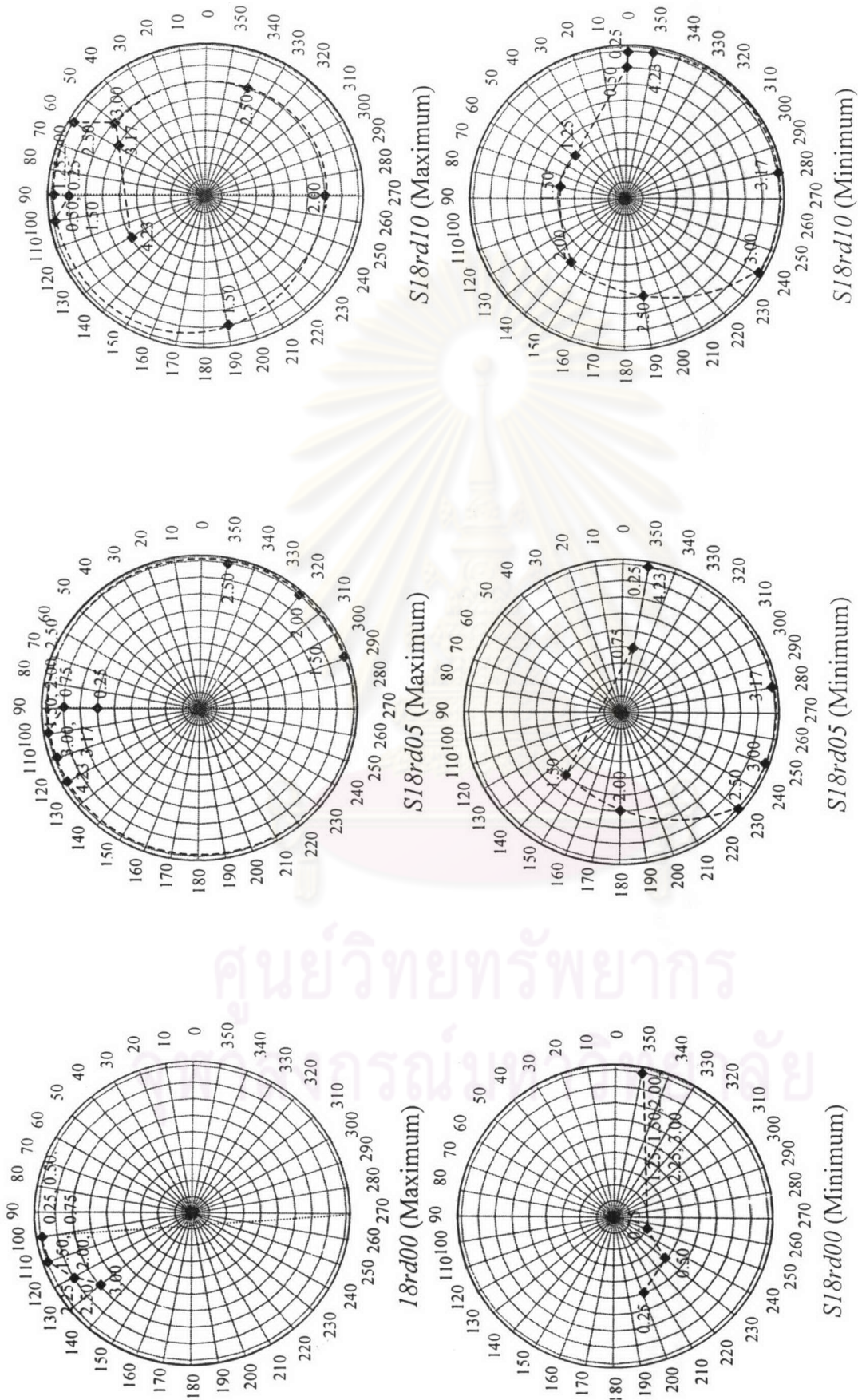


S0rd00 (Maximum)

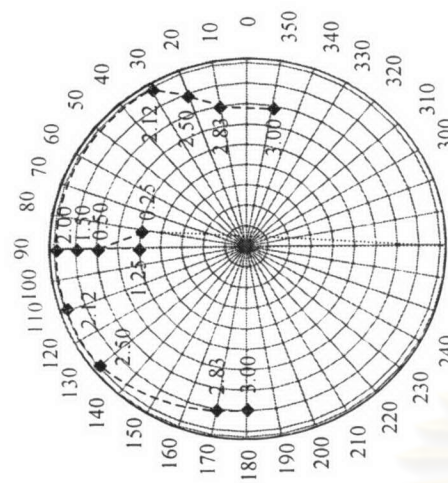


S0rd00 (Minimum)

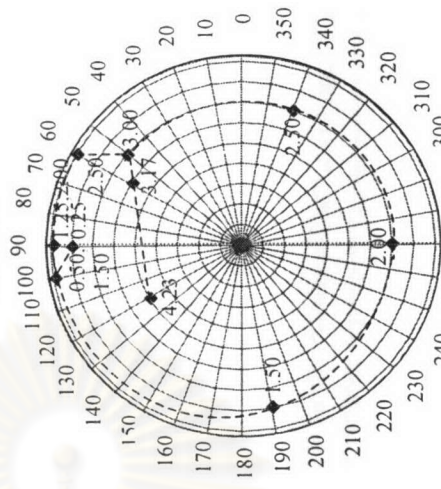
รูปที่ 3.40 แสดงลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด สำหรับบริเวณนี้ที่มีการไหลแบบหมุนควง ในแต่ละหน้าตัด rd-scale



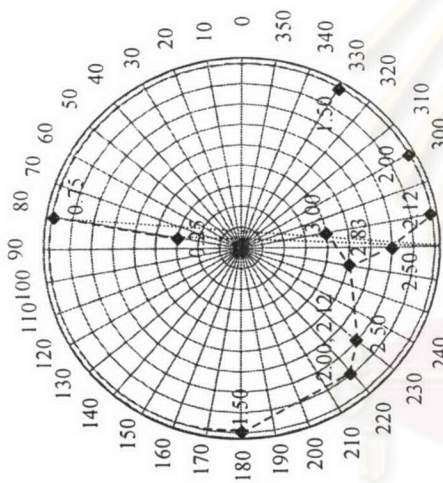
รูปที่ 3.41 แสดงลักษณะเส้นทางเคลื่อนที่ของอนุกรมสูงสุด-ต่ำสุด สำหรับกรณีการไหลแบบหมุนควง ในแต่ละหน้าตัด rd-scale



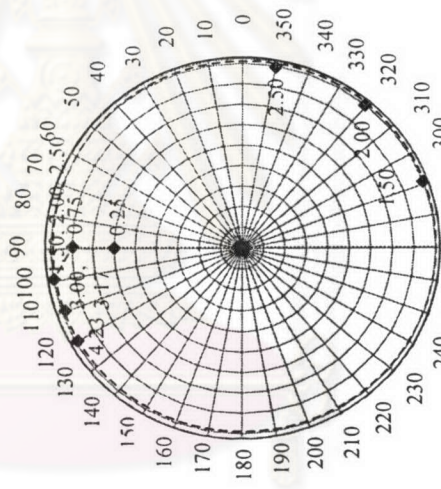
S0rd10



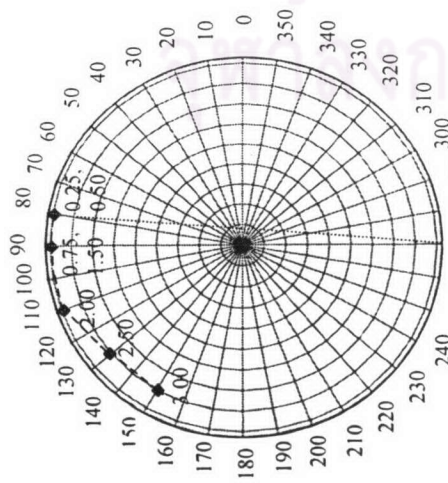
S18rd10



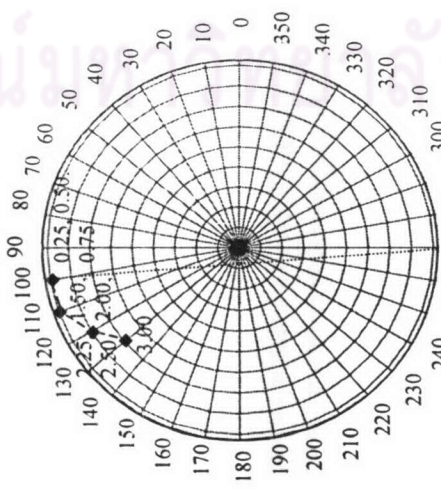
S0rd05



S18rd05

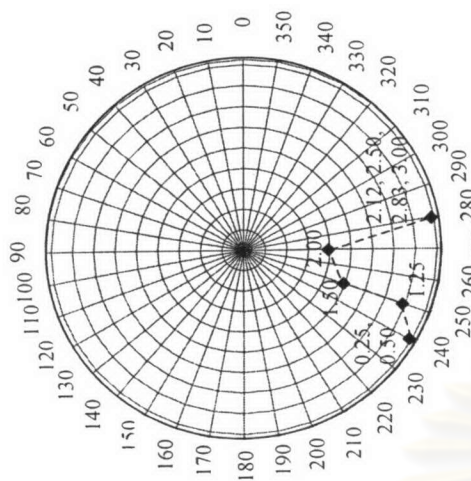


S0rd00

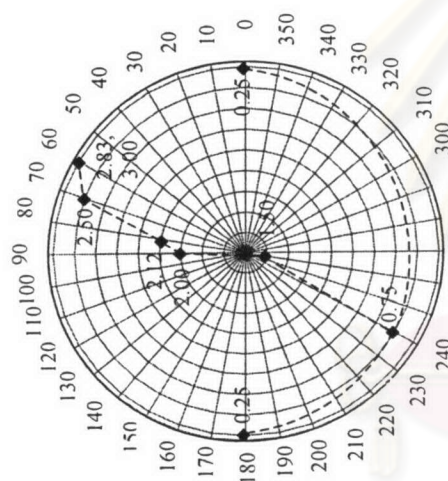


S18rd00

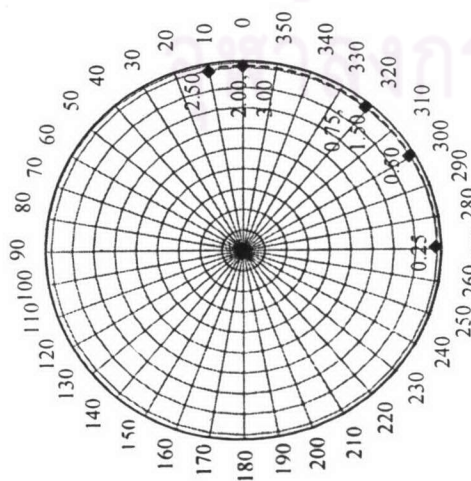
รูปที่ 3.42 แสดงลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในหน่วยมุมสูงสุดในแต่ละหน่วย rd-scale ในแต่ละกรณี



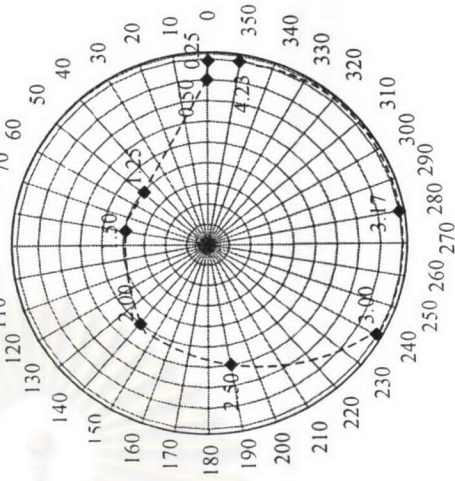
S0rd00



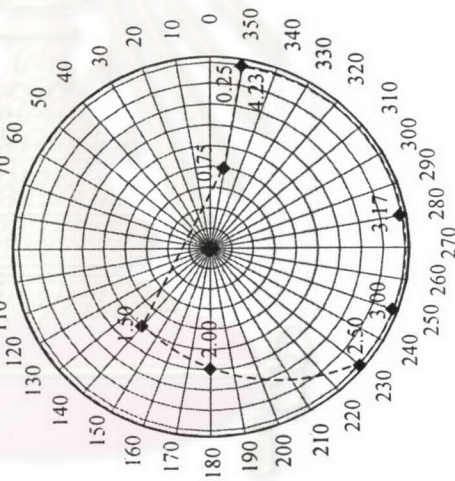
S0rd05



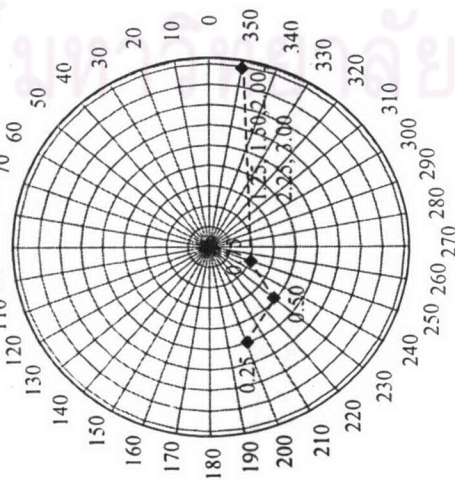
S0rd10



S18rd00

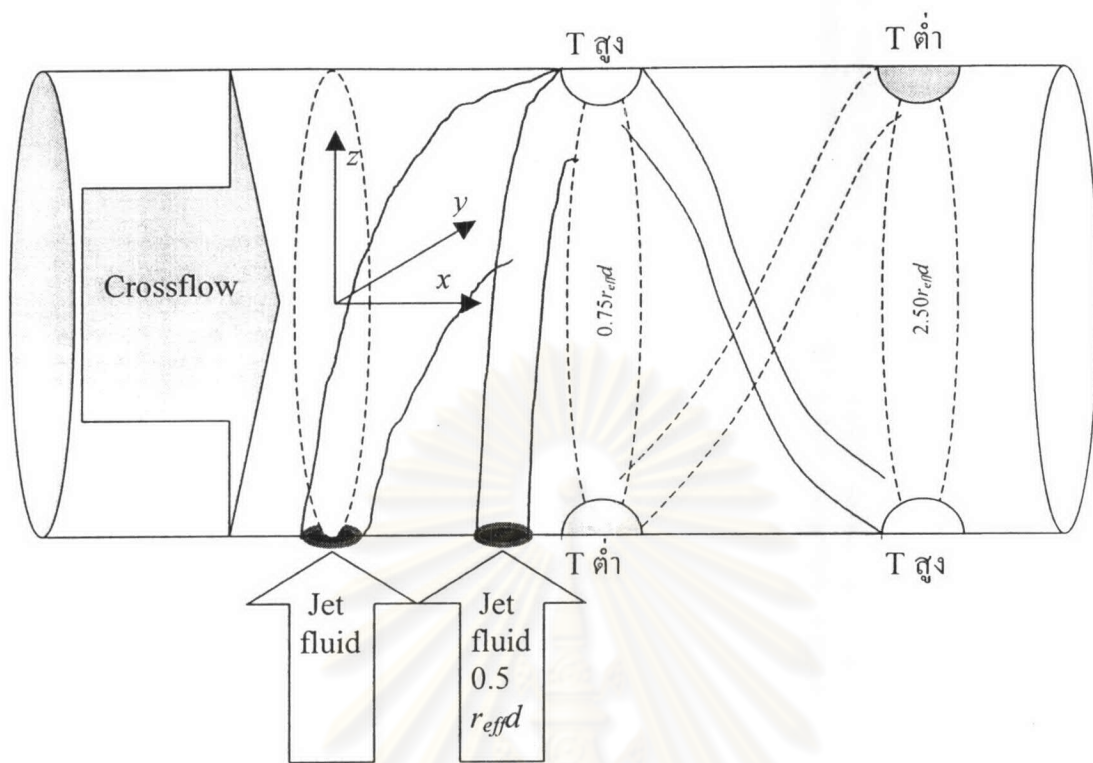


S18rd05



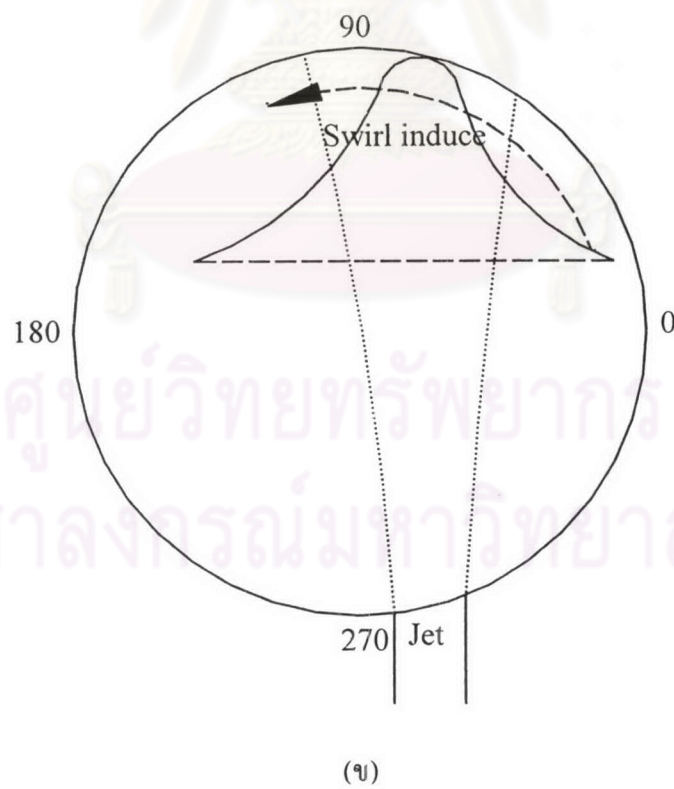
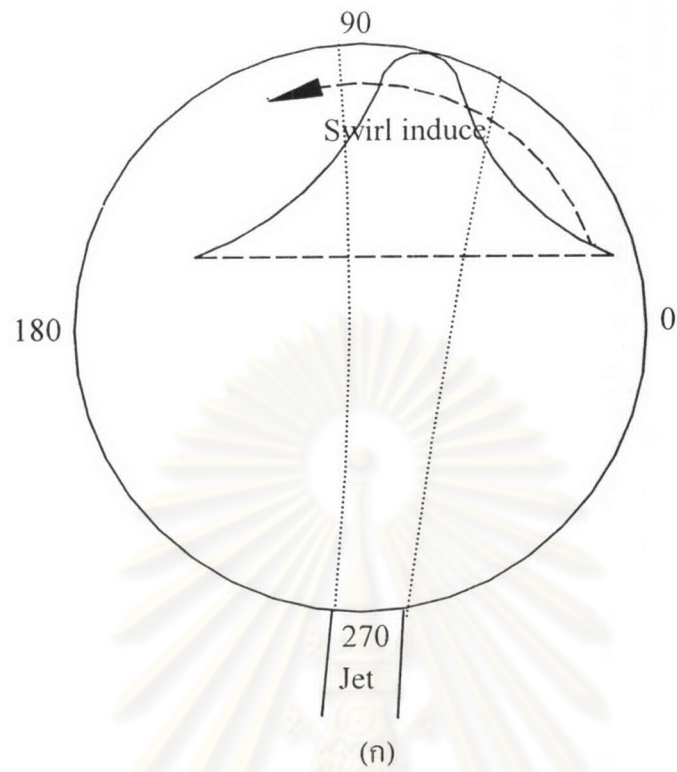
S18rd10

รูปที่ 3.43 แสดงลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดหมุ่มีค่าสุดในแต่ละหน้าตัด rd-scale ในแต่ละกรณี

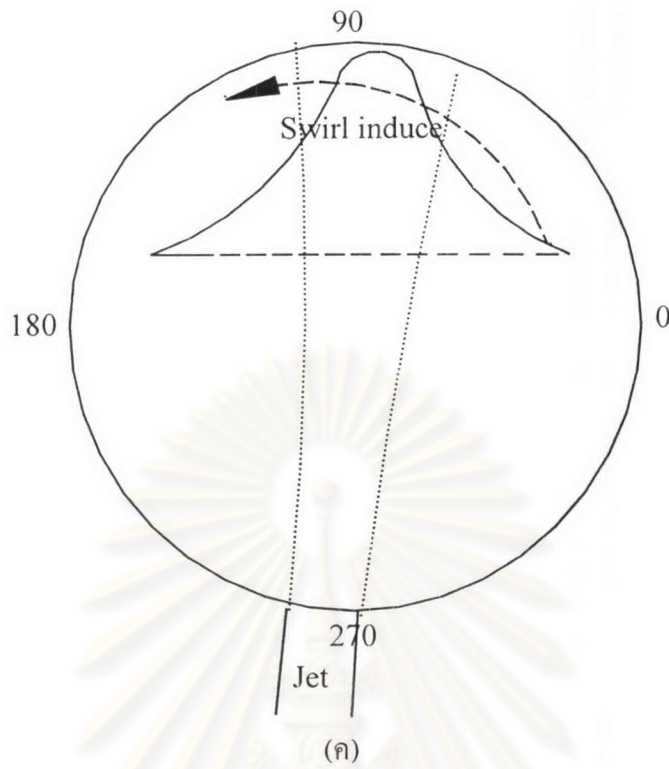


รูปที่ 3.44 ลักษณะการสลับด้านของอุณหภูมิ สูง-ต่ำ เป็น ต่ำ-สูง ในกรณี $S0rd05$

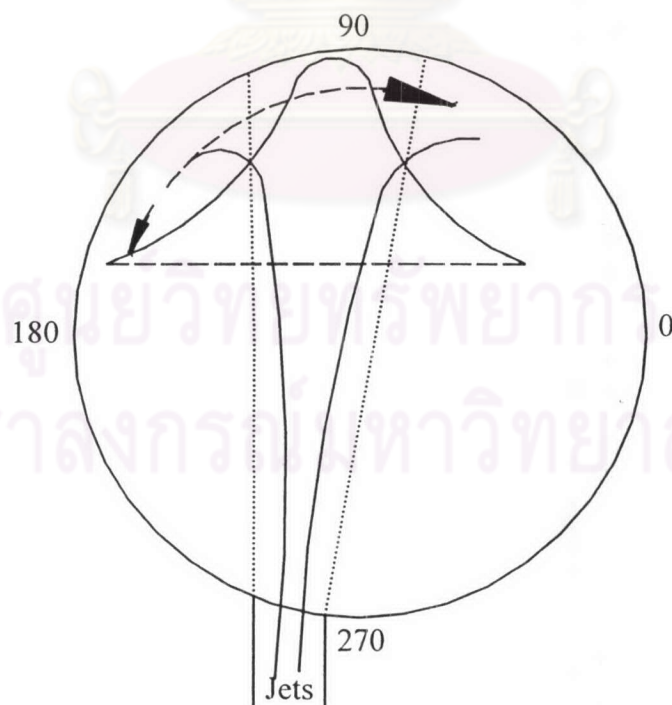
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



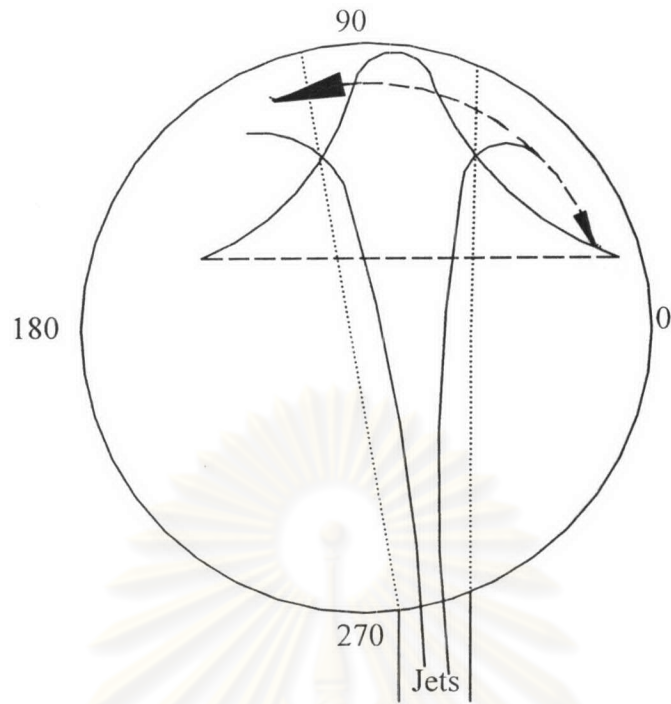
รูปที่ 4.1 การตั้งศูนย์ของเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลาง กรณี *SOrd00* โดยเจ็ตที่พุ่งขึ้นเอียงไปชนผนัง
 ด้านบนที่มุมน้อยกว่า 90 องศา (ก) ตั้งปากเจ็ตตรงศูนย์กลาง แต่เจ็ตไม่อยู่แนวตั้ง
 (ข) ตั้งปากเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลาง แต่เจ็ตพุ่งตรง



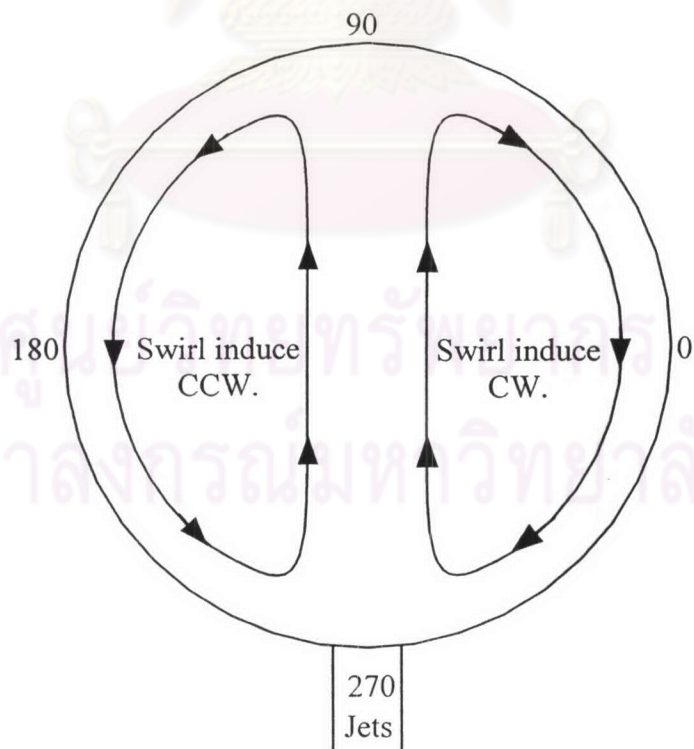
รูปที่ 4.1 การตั้งศูนย์ของเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลาง กรณี *S0rd00* โดยเจ็ตที่พุ่งขึ้นเอียงไปชนผนัง ด้านบนที่มุมน้อยกว่า 90 องศา (ค) ผลรวมของข้อ (ก) และ (ข)



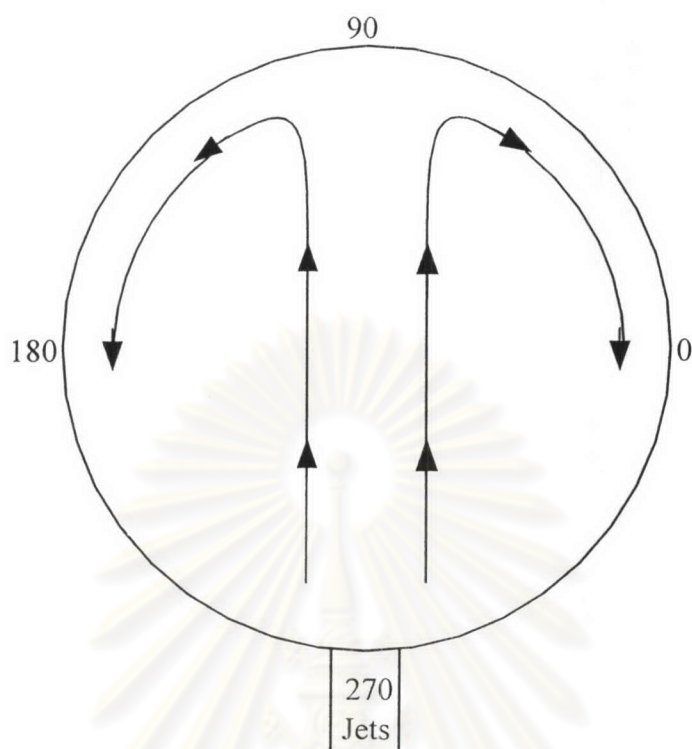
รูปที่ 4.2 การตั้งศูนย์ของเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลางกรณี *S0rd05* โดยเจ็ตที่พุ่งขึ้นเอียงไปชนผนังด้านบนที่มุมมากกว่า 90 องศา



รูปที่ 4.3 การตั้งศูนย์ของเจ็ตไม่ตรงศูนย์กลางกรณี *S0rd10* โดยเจ็ตที่พุ่งขึ้นเอียงไป
 หนึ่งด้านบนที่มุมมากกว่า 90 องศา



รูปที่ 4.4 การเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนในกรณี *S0rd05*



รูปที่ 4.5 การเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบมีเสถียรภาพในกรณี $S_{ord}10$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย