

การกระจายตัวของความดันสถิตของการไหลแบบหมุนวน
ที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนในท่อ



นาย เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนากร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

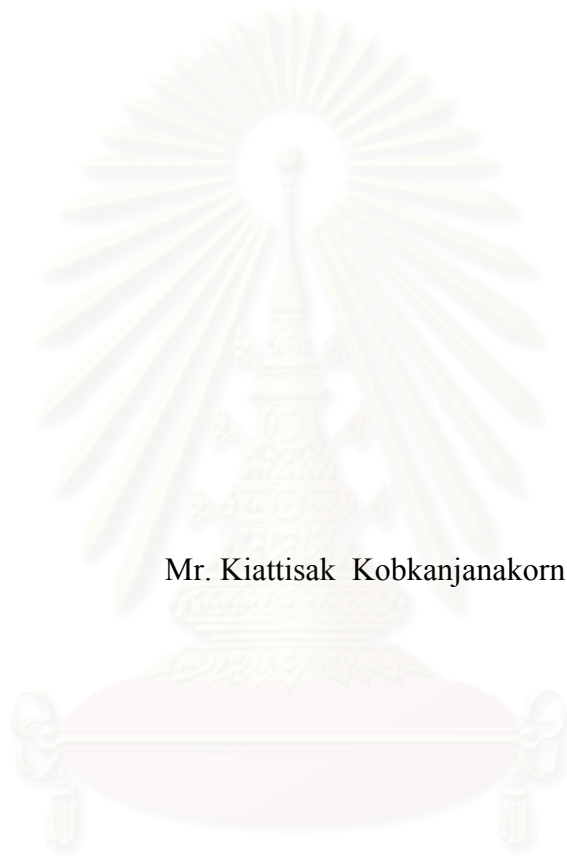
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0470-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STATIC PRESSURE DISTRIBUTION FOR
THE NON-AXISYMMETRIC SWIRLING PIPE FLOW



Mr. Kiattisak Kobkanjanakorn

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 2000
ISBN 974-13-0470-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกระจายตัวของความดันสถิตของการไหลแบบหมุนวนที่ไม่
สมมาตรตามแนวแกนในท่อ
โดย นาย เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนกร
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

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

เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนการ : การกระจายตัวของความดันสถิตของการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนในท่อ (STATIC PRESSURE DISTRIBUTION FOR THE NON-AXISYMMETRIC SWIRLING PIPE FLOW)

อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ ; 207 หน้า
ISBN 974-13-0470-6

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนของการไหลแบบหมุนวนในท่อตรงและผ่านท่อโค้ง 90 องศา โดยทำการสร้างการไหลแบบหมุนวนด้วยท่อหมุน และใช้ท่อโค้งที่มีอัตราส่วนรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งท่อโค้ง (α) เท่ากับ 1:3.1 ในการทดลองที่สภาวะการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนได้ติดแผ่นกีดขวาง มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมฐานโค้งกว้าง 90 องศา สูงครึ่งหนึ่งของรัศมีท่อและมีพื้นที่ขวางท่อประมาณ 19% ของพื้นที่หน้าตัดท่อ ในการศึกษาได้ทดลองที่ค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์ประมาณ 3.7×10^4 ที่ค่า Swirl Number (N_s) ของการไหลเท่ากับ 0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.8 ในกรณีการไหลแบบหมุนวนในท่อตรง และเท่ากับ 0.0, 0.9 และ 1.8 ในกรณีการไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้ง รูปร่างความเร็วเริ่มต้นที่วัดได้ในกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง มีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอสำหรับความเร็วในแนวแกนและมีลักษณะคล้ายการหมุนของของแข็งสำหรับความเร็วในแนวสัมผัส โดยมีชั้นขอบเขตการไหลไม่เกิน $0.3r$

จากผลการทดลองในกรณีการไหลในท่อตรง พบว่าสำหรับการไหลแบบหมุนวนที่สมมาตรตามแนวแกน สามารถแบ่งลักษณะการสูญเสียความดันสถิตตามระยะทางการไหลได้อย่างสังเขปเป็น 3 บริเวณ คือ 1) บริเวณที่ความดันสถิตมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วแบบไม่เป็นเชิงเส้น 2) บริเวณถัดไปที่มีอัตราการลดลงของความดันสถิตช้าลงและประมาณเป็นเชิงเส้น และ 3) บริเวณซึ่งมีการกระจายความดันสถิตเป็นเชิงเส้นแบบสภาวะ Fully Developed Flow โดยมีสัมประสิทธิ์การสูญเสียในรูปของ Minor Loss (K) แปรผันตามกำลังสองของค่า Swirl Number สำหรับกรณีการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนพบว่า บริเวณความดันสถิตต่ำด้านท้ายแผ่นกีดขวางจะถูกการไหลแบบหมุนวนพาให้หมุนวนไปตามการไหลในท่อ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น การไหลจะมีความเร็วปรากฏสูงขึ้นและส่งผลให้มีความแตกต่างความดันสถิตมากสุดในหน้าตัด ($\Delta C_{Pr ef max}$) สูงขึ้น ซึ่งความแตกต่างความดันสถิตที่พบนี้จะมีการปรับตัวลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้น และลดช้าลงในระยะการไหลถัดไปจนกระทั่งมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด ซึ่งสามารถประมาณการลดลงของความแตกต่างความดันสถิตมากสุดในหน้าตัดในรูปฟังก์ชันโพลีโนเมียลของระยะทางการไหลที่มีอัตราลดลงเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลของค่า Swirl Number โดยพบว่าค่า Swirl Number สูงกว่าสามารถพาความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดให้หมุนวนไปได้ไกลกว่า และในกรณี Swirl Number เท่ากับ 1.8 พบว่าคาบการหมุนวนของบริเวณความดันสถิตต่ำจะยาวขึ้นเป็นเชิงเส้นตามระยะทางการไหล

ในกรณีการไหลแบบสมมาตรตามแนวแกนผ่านท่อโค้ง 90 องศา พบว่าภายในช่วงท่อโค้ง ($\alpha = 1:3.1$) แรงสู่ศูนย์กลางการไหลจากความโค้งท่อจะมีผลเด่นชัดต่อลักษณะการกระจายความดันสถิต โดยในทุกกรณีจะมีค่าความดันสถิตที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าบริเวณผนังท่อโค้งด้านใน อย่างไรก็ตามสามารถพบผลของความเร็วหมุนวนต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้งได้ โดยในกรณีความเร็วหมุนวนสูงสุด ($N_s = 1.8$) พบว่ามีลักษณะการกระจายความดันสถิตแตกต่างจากกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนมากที่สุด และมีความแตกต่างความดันสถิตระหว่างผนังท่อโค้งด้านนอกกับผนังท่อโค้งด้านในต่ำกว่ากรณีการไหลแบบไม่หมุนวน ซึ่งอธิบายได้ด้วยผลจากความโค้งของการไหลแบบหมุนวน นอกจากนี้ในกรณี Swirl Number เท่ากับ 1.8 การไหลแบบหมุนวนสามารถพาความแตกต่างความดันสถิต ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นภายในท่อโค้งจากผลของความโค้งท่อ ออกไปที่ท่อตรงด้านทางออกและหมุนวนไปตามระยะทางการไหล โดยการไหลจะใช้ระยะทางประมาณ 33D จากทางออกท่อโค้งในการปรับตัวจนมีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัด ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนที่มีการกระจายความดันสถิตค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดตั้งแต่ทางออกท่อโค้ง นอกจากนี้พบว่าที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pr ef}}$, เฉลี่ยตามเส้นรอบวง) มีลักษณะการกระจายตัวตามระยะทางการไหลคล้ายกรณีการไหลในท่อตรง คือสามารถพบลักษณะการกระจายความดันสถิตเป็น 3 บริเวณ และมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตแปรผันตามขนาดความเร็วหมุนวน สำหรับกรณีการไหลแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนพบว่าภายในช่วงท่อโค้งความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตเนื่องจากแผ่นกีดขวางจะสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว และมีลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้งคล้ายกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง นอกจากนี้ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งพบว่าการไหลในทุกกรณีจะมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง และจะไม่พบบริเวณที่ 1 (บริเวณที่ความดันสถิตเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็วแบบไม่เป็นเชิงเส้น) แต่กลับพบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยที่ลดลงเป็นเชิงเส้นตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกันในแต่ละกรณี และใกล้เคียงกับกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง แสดงให้เห็นว่าแผ่นกีดขวางและความโค้งท่อมีผลควบคู่กันในการเร่งการสลายตัวการหมุนวนของการไหล

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2543 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070528721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD :

SWIRLING PIPE FLOW/ NON-AXISYMMETRIC/ STATIC
PRESSURE DISTRIBUTION/ 90° PIPE BEND/ TABKIATTISAK KOBKANJANAKORN: STATIC PRESSURE DISTRIBUTION FOR
THE NON-AXISYMMETRIC SWIRLING PIPE FLOW

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 207 pp.

ISBN 974-13-0470-6

Axisymmetric and non-axisymmetric static pressure distributions of swirling flows through a straight pipe and through a 90° pipe bend were investigated. The swirling flow was generated by a section of rotating pipe. The pipe bend had a pipe radius to a bend radius ratio (α) of 1:3.1. The non-axisymmetric pressure distribution was generated by a curved rectangular tab with 90° base width and $r/2$ height, which resulted in a blockage area ratio of 19%. The experiments were conducted at Reynolds Number of 3.7×10^4 and Swirl Numbers (N_s) of 0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, and 1.8 for flow in a straight pipe and 0.0, 0.9, and 1.8 for flow through a 90° pipe bend. The initial velocity profiles measured without tab were approximately uniform in the axial direction and rigid-body-like rotation in the tangential direction with the boundary layer thickness of less than $0.3r$.

In the case of axisymmetric swirling flow through a straight pipe, the flow could roughly be divided into three flow regimes according to the characteristics of pressure drop along the pipe: 1) the first regime exhibited fast and nonlinear drop in pressure, 2) the second regime, slower and approximately linear drop, and 3) the third regime, linear drop of fully-developed flow. It was found that the loss coefficient, correlated in the form of the minor loss (K), varied with the square of Swirl Number. In the case of non-axisymmetric swirling flow through a straight pipe, it was found that the low pressure region behind the tab was 'convected' downstream, resulting in the 'swirling' motion of low-pressure region along the pipe wall. In addition, owing to the increase in the effective velocity, the strength of the maximum pressure difference ($\Delta C_{p,ef,max}$) along the circumference generated by the tab increased with Swirl Number. For the first diameters downstream of the tab, this pressure difference decayed rapidly, then it started to decay more gradually until uniform pressure distribution along the circumference was achieved downstream. Higher Swirl Number required longer downstream distance before the pressure became uniform across the section. Furthermore, the decay of the maximum pressure difference was found to be fairly well approximated by a polynomial function of downstream distance, and the decay rate was found to be a function of Swirl Number. On the other hand, the period of the swirling motion of low pressure region in the case of Swirl Number of 1.8 was found to be stretched linearly as the flow developed in the downstream direction.

In the case of axisymmetric swirling flow through a 90° pipe bend ($\alpha = 1:3.1$), the effect of pipe curvature and the associated centrifugal force in the bend were pronounced. In all cases studied, with swirl or not, the static pressure along the outer bend was found to be larger than that along the inner bend. Nonetheless, in the bend, the effect of swirl could be observed; higher swirl caused larger deviation of static pressure distribution in the bend from that of the case without swirl. Specifically, in the case of Swirl Number of 1.8, it was found that the pressure difference between the outer and the inner bend was lower than that of the case without swirl. This could be explained by the effect of curvature of the swirling motion. More importantly, unlike the case without swirl, in this case it was found that the pressure difference owing to the pipe curvature generated in the bend was further convected from the bend exit and through the straight pipe section downstream of the bend; another 33 pipe diameters was required before the pressure difference decayed and the pressure distribution became uniform. This is in contrast from the case without swirl where the pressure distribution almost immediately became uniform at the bend exit. On the other hand, the *average* pressure distribution ($\overline{C_{p,ef}}$, average over the circumference) downstream of the bend exhibited similar characteristics as those found in the case of axisymmetric swirling flow through straight pipe, i.e., the three flow regimes were found and the pressure drop varied with Swirl Number. Finally, for the case of non-axisymmetric swirling flow through the bend, particularly the case of Swirl Number of 1.8, it was found that the non-uniform pressure distribution generated by the tab decayed rapidly in the bend and that the pressure distribution in the bend was quite similar in characteristics to that of the case without tab. On the other hand, in striking contrast to the case without tab, the pressure distribution in the straight pipe section downstream of the bend exit of the case with tab was uniform and the non-linear pressure drop flow regime (regime 1) could not be found. Instead, the average-pressure drop for the case with tab was linear right from the bend exit, similar to the case of non-swirling flow without tab. This indicated that the combined effect of the tab and the bend stimulated rapid decay of swirl.

Department..... Mechanical..... Student's signature.....
 Field of study..... Mechanical..... Advisor's signature.....
 Academic year..... 2000..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ ซึ่งได้คอยประสิทธิ์ประสาทความรู้ และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อการทำวิจัย อีกทั้งยังเป็นผู้มอบโอกาสที่ดีต่างๆ ในการเรียนรู้สิ่งที่เป็นประโยชน์ทั้งในการศึกษาและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ และ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เตชะอำไพ ที่ได้เอื้อเฟื้อและแนะนำสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ในเนื้อหามากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัย/วิทยานิพนธ์ จากกองทุนการศึกษาเซลล์ ๑๐๐ ปี และจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ณ เวลาที่ศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ผู้วิจัยได้รับกำลังใจ และความเอื้ออาทรจาก พี่ เพื่อน และน้อง ที่ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณ สุธรรม มาศศรี คุณ อลงกรณ์ พิมพ์พิณ และ คุณ ทศพล สถิตยส์สูงศ์กุล พี่และเพื่อน ที่ได้ช่วยกันฝ่าฟันอุปสรรคการทำงานต่างๆในช่วงเริ่มต้นของการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ คุณ สุทธิโชค นันทสุขเกษม ที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ อีกทั้งขอขอบพระคุณบุคลากรทุกคนที่ห้องปฏิบัติการวิจัย ซึ่งไม่สามารถยกมากล่าวได้หมดในที่นี้ ที่ได้ช่วยเหลืองานในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ นางสาว สุทธาทิพย์ เหลืองบูรณวัตร ที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงาน และไม่ทอดทิ้งต่อปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น

และในท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ของผู้วิจัยที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ มาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีแรงใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
รายการสัญลักษณ์.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	7
1.4 แนวทางการทำวิจัย.....	7
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 ชุดทดลองและการทดลอง.....	9
2.1 รายละเอียดชุดทดลอง.....	9
2.2 การกำหนดพิกัดตำแหน่งของการทดลอง.....	12
2.3 กรณีการทดลอง.....	13
2.4 อุปกรณ์การวัดและวิธีการทดลอง.....	13
บทที่ 3 ผลการทดลอง.....	17
การไหลในท่อตรง	17
3.1 รูปร่างความเร็วและรูปร่างความดันรวม.....	17
3.2 การกระจายความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิต แบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง).....	27
3.3 การกระจายความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิต แบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง).....	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref'}}$) ตามระยะทางการไหล ในกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล.....	47
	การไหลผ่านท่อโค้ง.....	48
3.5	รูปร่างความเร็วและรูปร่างความดันรวม.....	48
3.6	การกระจายความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง).....	54
3.7	การกระจายความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง).....	64
3.8	เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref'}}$) ตามระยะทางการไหลในกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล.....	74
3.9	เปรียบเทียบการกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง.....	76
3.10	เปรียบเทียบลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref'}}$) ตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง.....	76
บทที่ 4	อภิปรายและสรุปผลการทดลอง.....	80
4.1	อภิปรายผลการทดลอง.....	80
4.2	สรุปผลการทดลอง.....	82
	ประมวลตาราง.....	88
	ประมวลรูปภาพ.....	104
	รายการอ้างอิง.....	182

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	184
ภาคผนวก ก.....	185
ภาคผนวก ข.....	198
ภาคผนวก ค.....	202
 ประวัติผู้เขียน.....	 207



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การไหลที่มีการกระจายความดันสถิตและความเร็วแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน.....	89
ตารางที่ 1.2	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การไหลแบบหมุนวนในท่อ.....	90
ตารางที่ 1.3	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การไหลในท่อโค้ง.....	95
ตารางที่ 1.4	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง.....	98
ตารางที่ 2.1	กรณีการทดลองและคำย่อแทนกรณีการทดลอง.....	100
ตารางที่ 2.2	ตำแหน่งวัดความดันสถิต.....	100
ตารางที่ 3.1	ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (กรณีการไหลในท่อตรง).....	101
ตารางที่ 3.2	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของการหมุนวนของการไหล และความเร็วรอบต่อหมุน (กรณีการไหลในท่อตรง).....	101
ตารางที่ 3.3	มุมกวาด ($d\psi$) ของ Wake ด้านหลัง Tab ที่หมุนไปในช่วง $0.5D$	102
ตารางที่ 3.4	อัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะ X/D (กรณีการไหลในท่อตรง).....	102
ตารางที่ 3.5	ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง).....	103
ตารางที่ 3.6	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของการหมุนวนของการไหล และความเร็วรอบต่อหมุน (กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง).....	103
ตารางที่ 3.7	อัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะ S/D (กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง).....	103

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ภาพ Flow Visualization ของการไหลที่ทางออกของ Blower (Mehta 1977).....	105
รูปที่ 1.2	Secondary Flow ที่เกิดขึ้นภายในท่อโค้ง (Patankar et al. 1975).....	105
รูปที่ 2.1	Schematic Drawing ของชุดทดลอง	106
รูปที่ 2.2	ภาพถ่ายชุดทดลอง กรณีการไหลในท่อตรง.....	106
รูปที่ 2.3	รายละเอียดท่ออะครีลิกช่วงทางเข้าท่อหมุน.....	107
รูปที่ 2.4	รายละเอียดการต่อมอเตอร์ และ Inverter.....	107
รูปที่ 2.5	รายละเอียดชุดท่อหมุน.....	108
รูปที่ 2.6	ชุดท่อหมุนและระบบขับเคลื่อนด้วยสายพาน.....	108
รูปที่ 2.7	ท่ออะครีลิกด้านทางออกท่อหมุน และรายละเอียดการติดตั้ง Pressure Tap....	109
รูปที่ 2.8	ชุด Orifice และ Blower.....	109
รูปที่ 2.9	ภาพถ่ายชุดทดลองช่วง Orifice และ Blower.....	110
รูปที่ 2.10	ชุดท่อโค้ง 90 องศา.....	110
รูปที่ 2.11	ภาพถ่ายชุดท่อโค้ง 90 องศา.....	111
รูปที่ 2.12	พิกัดการทดลอง กรณีการไหลในท่อตรงและการไหลผ่านท่อโค้ง.....	111
รูปที่ 2.13	แผ่นกีดขวาง (Tab) และระบบแกนพิกัดที่ใช้.....	112
รูปที่ 2.14	รายละเอียด Pitot Probe และ Yaw Probe.....	112
รูปที่ 2.15	ภาพถ่าย Pitot Probe และ Yaw Probe ที่ใช้ในการทดลอง.....	113
รูปที่ 2.16	พิกัดการวัดความเร็ว และความดันรวมในแนว X-X และ Y-Y.....	113
รูปที่ 3.1	รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน หน้าตัด ($X/D = -31$).....	114
รูปที่ 3.2	รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน ($X/D = -31$) เมื่อ Normalized ด้วยความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางท่อ.....	114
รูปที่ 3.3	รูปร่างความเร็วด้านทางเข้า Orifice.....	115
รูปที่ 3.4	รูปร่างความเร็วด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$).....	116
รูปที่ 3.5	รูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$) เมื่อ Normalized ด้วยความเร็วผิวสัมผัสท่อหมุน.....	117
รูปที่ 3.6	สัมประสิทธิ์ความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$) กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง.....	117
รูปที่ 3.7	สัมประสิทธิ์ความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$) กรณีติดแผ่นกีดขวาง.....	118

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8	รูปแสดงการหมุนวนไปของ Wake ด้านหลังแผ่นกีดขวาง..... 119
รูปที่ 3.9	การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง).... 120
รูปที่ 3.10	การกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล..... 123
รูปที่ 3.11	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (K , Minor Loss) กรณีการไหลแบบหมุนวน ในท่อตรง 123
รูปที่ 3.12	การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีติดแผ่นกีดขวาง)..... 124
รูปที่ 3.13	การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีติดแผ่นกีดขวาง)..... 128
รูปที่ 3.14	ระยะทางปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด..... 137
รูปที่ 3.15	ตำแหน่งเชิงมุม (ψ_{min}) ของค่า C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัด ตามระยะทางการไหล 138
รูปที่ 3.16	ขนาดคาบการหมุนวนของบริเวณความดันสถิตต่ำตามระยะทางการไหล.... 139
รูปที่ 3.17	ความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุด ($\Delta C_{Pref max}$) ตามระยะทางการไหล... 140
รูปที่ 3.18	เลขชี้กำลังของอัตราการลดลงของค่าความแตกต่างความดันสถิต มากที่สุดในพื้นที่..... 141
รูปที่ 3.19	ความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณี $Ns = 0.0-0.6$).... 142
รูปที่ 3.20	ความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณี $Ns = 0.9-1.8$).... 143
รูปที่ 3.21	การกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล..... 144
รูปที่ 3.22	ลักษณะการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง (Tab)..... 146
รูปที่ 3.23	เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล (กรณีติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวาง)..... 147
รูปที่ 3.24	รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง ($S/D = -32.5$)..... 148
รูปที่ 3.25	รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน ($S/D = -32.5$) เมื่อ Normalized ด้วย ความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางท่อ..... 148
รูปที่ 3.26	รูปร่างความเร็วด้านทางเข้า Orifice (กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง)..... 149
รูปที่ 3.27	รูปร่างความเร็วด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = -1.0$) กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง 150
รูปที่ 3.28	รูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = -1.0$) เมื่อ Normalized ด้วยความเร็วผิวสัมผัสท่อหมุน..... 151

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.29	สัมประสิทธิ์ความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = 0.5$) กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง.....151
รูปที่ 3.30	สัมประสิทธิ์ความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = 0.5$) กรณีติดแผ่นกีดขวาง.....152
รูปที่ 3.31	การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง)....153
รูปที่ 3.32	ทิศทางแรงสู่ศูนย์กลางของการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง.....163
รูปที่ 3.33	การกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง).....164
รูปที่ 3.34	การกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง)....165
รูปที่ 3.35	การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีติดแผ่นกีดขวาง).....168
รูปที่ 3.36	เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีติด และไม่ติดแผ่นกีดขวาง).....173
รูปที่ 3.37	การกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณีติดแผ่นกีดขวาง).....176
รูปที่ 3.38	การกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณีติดแผ่นกีดขวาง).....177
รูปที่ 3.39	เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล (กรณีติด และไม่ติดแผ่นกีดขวาง).....179
รูปที่ 3.40	เปรียบเทียบการกระจายความแตกต่างความดันสถิต ในกรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง.....180
รูปที่ 3.41	เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล (กรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง ที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง).....181
รูปที่ 3.42	เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง ที่ติดแผ่นกีดขวาง).....181

รายการสัญลักษณ์

C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
C_p	สัมประสิทธิ์ความดันสถิต
C_{Pref}	สัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด
$\frac{C_{Pref}}{C_{Pref'}}$	สัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย
$C_{P\psi}$	สัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่มุม ψ
C_{P0-180}	สัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตที่มุม $\psi = 0^\circ$ กับมุม $\psi = 180^\circ$
$C_{P90-270}$	สัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตที่มุม $\psi = 90^\circ$ กับมุม $\psi = 270^\circ$
C_{PT}	สัมประสิทธิ์ความดันรวม
C_{PTC}	สัมประสิทธิ์ความดันรวมที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อ
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
De	Dean Number
k	Turbulent kinetic energy
K	Minor Loss
K_1, K_2, K_3, K_0	Calibration Function ของ Yaw Probe
L	ระยะทางปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด
n	เลขชี้กำลังของ Power-Law Equation เลขชี้กำลังอัตราการลดลงของความแตกต่างความดันสถิตมากสุดในหน้าตัด
N_s	Swirl Number
Nu	Nusselt Number
P	ความดันสถิต
P_{ref}	ความดันอ้างอิงเฉพาะหน้าตัด
$P_{ref'}$	ความดันอ้างอิงของการทดลอง
P_T	ความดันรวม
P_{TC}	ความดันรวมที่จุดศูนย์กลางท่อ
P_ψ	ความดันสถิตที่มุม ψ
r	ระยะทางตามแนวรัศมี
R	รัศมีท่อ
R^2	Correlation Coefficient
Ra	Rayleigh Number
Re	เรย์โนลด์ส นัมเบอร์ (Reynolds Number)
Ro	เรย์โนลด์ส นัมเบอร์ ของการหมุนวน (Rotational Reynolds Number)
S	ระยะทางตามทิศทางการไหลในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง
T	คาบการหมุนวนของบริเวณความดันต่ำ
Tw	อุณหภูมิที่ผนังท่อ (Pipe Wall Temperature)

u	ความเร็วตามแนวแกน
\bar{u}	ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (Bulk Mean Velocity) ซึ่งคำนวณจากรูปร่างความเร็วที่หน้าตัดหน้า Orifice
\bar{u}_1	ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (Bulk Mean Velocity) ซึ่งคำนวณจากรูปร่างความเร็วที่หน้าตัดด้านทางเข้าท่อหมุน
\bar{u}_2	ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (Bulk Mean Velocity) ซึ่งคำนวณจากรูปร่างความเร็วที่หน้าตัดด้านทางออกท่อหมุน
U	ความเร็วตามแนวแกนสูงสุดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อ
V	ความเร็วของการไหล
w	ความเร็วตามแนวสัมผัส
wC_{Pref}	ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด
$wC_{Pref'}$	ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิต
$\frac{wC_{Pref'}}{wC_{Pref}}$	ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย
wC_{PT}	ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความดันรวม
$wC_{P\psi}$	ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่มุม ψ
wC_{P0-180}	ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์สัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตที่มุม $\psi = 0^\circ$ กับมุม $\psi = 180^\circ$
$wC_{P90-270}$	ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์สัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตที่มุม $\psi = 90^\circ$ กับมุม $\psi = 270^\circ$
$w(K_1 - K_2)$	ความไม่แน่นอนของ Calibration Function
wu	ความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกน
wV	ความไม่แน่นอนของความเร็ว
ww	ความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวสัมผัส
W	ความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุด
X	ระยะทางตามทิศทางการไหลในกรณีการไหลในท่อตรง
$X-X$	แนววัดความเร็ว
$Y-Y$	แนววัดความเร็ว
อักษรกรีก	
$\Delta C_{Pref\ max}$	ความแตกต่างความดันสถิตมากสุดในหน้าตัด
ΔP	ความดันจลน์ของการปรับเทียบ Yaw Probe
a	อัตราส่วนรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งของท่อโค้ง
a_v	มุมปะทะของความเร็วการไหลกับ Yaw Probe
β	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัด Orifice

ε	Dissipation rate of turbulent kinetic energy
ε/D	Relative Pipe Surface Roughness
ρ	ค่าความหนาแน่น
ω	ความเร็วเชิงมุมของท่อหมุน หรือความเร็วหมุนควงของการไหล
θ	มุมโค้งท่อโค้ง
θ_p	มุมเอียงของเข็ม Yaw Probe
ψ	ตำแหน่งมุมวัดความดันสถิตตามทิศทางเส้นรอบวงท่อ
ψ_{min}	ตำแหน่งค่า C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัด
Λ	Angular Momentum Flux ในทิศทางรัศมีความโค้งท่อโค้ง
E	Angular Momentum Flux ในทิศทางรัศมีท่อ
Ω	Angular Momentum Flux ในทิศทางการไหล หรือ Swirl Intensity

ตัวห้อย

0	Pitot Probe ในกรณีการเปรียบเทียบ Yaw Probe
1	เข็มหมายเลข 1 ของ Yaw Probe
2	เข็มหมายเลข 2 ของ Yaw Probe
3	เข็มหมายเลข 3 ของ Yaw Probe

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็้หมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลแบบหมุนวน (Swirling Flow) เป็นรูปแบบการไหลที่พบเห็นได้ทั่วไปในงานทางวิศวกรรม ทั้งในรูปแบบที่เจตนาสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ และในรูปแบบที่ไม่ได้เจตนาสร้างขึ้นแต่เกิดขึ้นเองหรือเป็นผลพวงจากการไหลรูปแบบอื่น ตัวอย่างของการไหลแบบหมุนวนที่เจตนาสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ได้แก่ การไหลแบบหมุนวนที่ออกจากหัวฉีด ซึ่งใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของหัวฉีด และใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และการไหลแบบหมุนวนในไซโคลนซึ่งในการแยกอนุภาคออกจากของไหล ฯลฯ

สำหรับการไหลแบบหมุนวนในรูปแบบที่ไม่ได้เจตนาสร้างขึ้นนั้น มีตัวอย่างเช่น การไหลแบบหมุนวนที่ด้านทางออกของเครื่องจักรกลหมุน (Turbomachinery) ประเภทต่างๆ เช่น Pump, Blower หรือ กังหันน้ำ (Hydraulic Turbine) โดย Mehta (1977) กล่าวไว้ว่าใน Centrifugal Machines การไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นที่ด้านทางออกเกิดขึ้นเนื่องจากตำแหน่งของ Rotor ของเครื่องจักรที่วางตัวอยู่ในตำแหน่งที่ไม่สมมาตร ส่วนในกรณีของ Axial-Flow Machines การไหลแบบหมุนวนที่ทางออกเป็นการไหลที่หลงเหลืออยู่จากการหมุนของ Rotor ของเครื่องจักร รูปที่ 1.1 แสดงภาพถ่ายของการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นที่ด้านทางออกของ Centrifugal Blower โดยใช้ Flow Visualization Technique ด้วยการใช้ควันและใช้ Tuft

การไหลแบบหมุนวนภายในท่อยังสามารถเกิดขึ้นได้จากการไหลผ่านท่อโค้งในรูปแบบของ Secondary Flow ซึ่งมีลักษณะดังแสดงตามรูปที่ 1.2 โดย Dean (1928) ได้วิเคราะห์การไหลในท่อโค้ง และแสดงตัวแปรไร้มิติที่มีผลต่อ Dynamic Similarity ของการไหล เรียกว่า Dean Number, (De) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงสู่ศูนย์กลางของการไหล (Centrifugal Force) ต่อแรงเสียดทานของการไหลในท่อ (Viscous Force) โดยนิยามเป็น $De = \alpha^{1/2} Re$ เมื่อ α คืออัตราส่วนของรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งของท่อโค้ง และ Re คือ Reynolds Number ของการไหล

โดยทั่วไปการไหลในท่อ อาจจะมีการกระจายตัวของคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยมีสาเหตุจากการไหลผ่านท่อโค้ง การไหลผ่านท่อที่มีการเปลี่ยนหน้าตัด หรือการไหลผ่านอุปกรณ์ที่มีการขวางการไหล เช่น วาล์ว โดย Sparrow et al. (1979) ได้ทำการศึกษาการไหลในท่อที่มีการขวางหน้าตัดด้วย Segmental Orifice Plate ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ขวางท่อต่อพื้นที่หน้าตัดท่อต่างๆกัน พบว่าการกระจายความดันสถิตของการไหลที่ด้านท้ายแผ่นขวางจะไม่สมมาตรตามแนวแกนท่อ โดยในกรณีที่มีพื้นที่แผ่นขวางท่อเป็น 3/4 เท่า

ของพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ระยะทางในการปรับการกระจายความดันสถิตให้สม่ำเสมอทั้งหน้าตัด ประมาณ 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

สำหรับกรณีของการไหลที่มีการหมุนวน สามารถพบลักษณะของการไหลที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนได้ในการไหลผ่านท่อที่มีการเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัด โดย Miao et al. (1996) ได้ทำการศึกษาการไหลแบบหมุนวนในท่อที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดจากวงกลมเป็นสี่เหลี่ยม พบว่ารูปร่างการไหลแบบหมุนวนจะมีการบิดตัวไป ส่งผลให้มีการกระจายความดันสถิตที่ผนังท่อด้านทางออกไม่สมมาตรตามแนวกึ่งกลางผนังท่อ

นอกจากนี้การไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ต่างๆ เช่น Blower มักจะมีลักษณะการกระจายตัวของคุณสมบัติต่างๆของการไหลที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนเนื่องจากรูปร่างของอุปกรณ์เอง หรือเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลที่ด้านทางเข้ามีการกระจายความเร็วที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน ซึ่งความไม่สมมาตรของการกระจายความเร็วและความดันของการไหลที่เกิดขึ้น เป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนที่ระบบท่อ โดย Murakami (1961) พบว่าในสภาวะการทำงานของกังหันน้ำแบบ Partial Load การไหลแบบหมุนวนใน Draft Tube เป็นต้นเหตุหนึ่งของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

จะเห็นได้ว่า การไหลแบบหมุนวนที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนเป็นลักษณะการไหลที่สามารถพบได้ทั่วไปในระบบท่อต่างๆ ซึ่งความไม่สมมาตรของการกระจายความดันสถิตที่เกิดขึ้น จะเป็นผลทำให้ท่อต้องรับภาระแรงดันที่มีการกระจายแรงไม่สม่ำเสมอตามความยาวท่อ และเป็นต้นเหตุหนึ่งของการเกิดความเสียหาย การสั่นสะเทือน และเสียงรบกวนในระบบท่ออุตสาหกรรม ดังนั้นการศึกษาลักษณะการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนที่เกิดขึ้น สามารถนำไปใช้ช่วยในการออกแบบโครงสร้างรองรับท่อ และระบบท่อ เพื่อให้สามารถรองรับแรงดันของการไหลที่มีการกระจายแรงไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวท่อ และยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน เพื่อหลีกเลี่ยงหรือเพื่อประมาณความผิดพลาดจากการวัดเนื่องจากการกระจายความดันที่ไม่สม่ำเสมอในหน้าตัด

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาลักษณะการไหลแบบหมุนวนในท่อในหลายแง่มุม โดย Talbot (1954) ได้ศึกษาการไหลแบบหมุนวนในท่อในสภาวะการไหลแบบลามินาร์ โดยใช้ Linearized Theory และทำ Flow Visualization เพื่อดูการเกิดความไม่เสถียรภาพของการไหลที่ค่าความเร็วในการหมุนวนและค่า Reynolds Number ต่างๆ Kreith และ Sonju (1965) ได้ทำการวิเคราะห์การสลายตัวของการไหลแบบหมุนวนในสภาวะการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ โดยสมมติให้ค่า Eddy Viscosity มีค่าคงที่และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ พบว่าผลการวิเคราะห์สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองในช่วงระยะ 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อแรก โดยการไหลแบบหมุนวนจะสลายตัวจนเหลือค่าประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่ม

ต้นเมื่อไหลไปเป็นระยะทางประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ Weske และ Sturov (1974) ทดลองวัดความเร็ว และปริมาณเทอร์บูเลนซ์ของการไหลแบบหมุนวนในท่อ โดยใช้ท่อหมุนในการสร้างการไหลแบบหมุนวน (Rotating Pipe) พบว่าที่ระยะ 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากปากทางออกท่อหมุน ยังสามารถวัดความเร็วหมุนวนได้ และความเร็วหมุนวนจะสลายตัวจนไม่สามารถวัดค่าได้ที่ระยะถัดออกไป สำหรับปริมาณเทอร์บูเลนซ์พบว่าต้องใช้ระยะทางมากกว่า 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในการปรับตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะ Turbulent Fully Developed Flow Kitoh (1991) ได้ศึกษาการไหลแบบหมุนวนที่สภาวะการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ โดยใช้ Guide Vane ในการสร้างการไหลแบบหมุนวน พบว่าค่า Swirl Intensity, Ω ซึ่งนิยามเป็นตัวแปรไร้มิติของค่าโมเมนต์เชิงมุมจะสลายตัวไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากผลของแรงเสียดทานที่ผนังท่อ โดยมีลักษณะการสลายตัวเป็น Exponential ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นกับค่า Swirl Intensity

นอกจากนี้ยังได้มีผู้ศึกษาผลของความเร็วในการหมุนวนต่อคุณสมบัติอื่นของการไหล โดย Murakami และ Kikuyama (1980) ได้ทดลองวัดความเร็วของการไหลภายในท่อหมุน (Rotating Pipe) พบว่าการไหลแบบหมุนวนมีผลต่อการเพิ่มความเสถียรภาพ (Stabilize) ของการไหล ทำให้การไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ที่ด้านต้นท่อเปลี่ยนรูปร่างความเร็วจนมีรูปร่างคล้ายกรณีการไหลแบบลามินาร์ และมีการสูญเสียพลังงานในการไหลน้อยลง Kikuyama et al. (1983) พบว่าท่อหมุนจะส่งผลต่อการไหลสองลักษณะ คือลดความไม่เสถียรภาพในการไหล (Destabilize) ที่บริเวณผนังท่อเนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น และมีผลในการเพิ่มความเสถียรภาพของการไหล (Stabilize) ที่บริเวณกลางท่อ เนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางของการไหล Anwer และ So (1989) พบว่า Circumferential Strain ที่สูงขึ้นในชั้น Viscous Layer อันเนื่องมาจากการหมุนของการไหล มีผลทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของการไหล และเพิ่มความเป็นเทอร์บูเลนซ์ของการไหลตลอดหน้าตัด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (C_f) สูงขึ้นเมื่อมีค่า Swirl Number (N_s) สูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ค่า N_s เท่ากับ 0.5

สำหรับการคำนวณการไหลแบบหมุนวนในท่อ ได้มีผู้พัฒนาโมเดลต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ โดย Kobayashi และ Yoda (1987) ได้ใช้ k- ϵ model และ k- ϵ model ที่ดัดแปลง (modified k- ϵ model) ในการคำนวณการไหลแบบหมุนวนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ พบว่าเมื่อใช้ mk- ϵ model สามารถให้ผลการคำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าเมื่อใช้ k- ϵ model แบบมาตรฐาน Parchen และ Steenberg (1998) ได้ศึกษาผลของรูปร่างความเร็วของการไหล ต่อลักษณะการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวน โดยทำการคำนวณการไหลด้วยโมเดลที่อิง Reynolds Stress Transport Equation และ k- ϵ model พบว่าโมเดลที่อิง Reynolds Stress Transport Equation จะให้ผลการคำนวณที่ขึ้นกับรูปร่างความเร็วเริ่มต้นมากกว่าเมื่อใช้ k- ϵ model

จะเห็นได้ว่าที่ผ่านมา ได้มีผู้ทำการศึกษาการไหลแบบหมุนวนในท่อ โดยศึกษาลักษณะการสลายตัวของการหมุนวนของการไหล และผลของความเร็วหมุนวนที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ

ของการไหล ด้วยการทำการทดลองและการคำนวณด้วยโมเดลต่างๆที่พัฒนาขึ้น โดยการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นจะใช้ระยะทางมากกว่า 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในการปรับตัวและสลายตัวไปตามระยะทางการไหล โดยพบว่าความเร็วเฉลี่ยของการหมุนวนของการไหลสามารถไหลไปได้ไกลกว่า 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (50D) ก่อนที่จะสลายตัวจนหมดไป ส่วนปริมาณเทอร์บูเลนซ์จะใช้ระยะทางไกลกว่า 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในการปรับตัวเพื่อเข้าสู่ภาวะ Turbulent Fully Developed Flow ซึ่งไกลกว่าระยะทางปรับตัวของปริมาณเฉลี่ยของการไหล

สำหรับการไหลแบบหมุนวนในรูปของ Secondary Flow ซึ่งเกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อโค้ง ได้มีการศึกษาการพัฒนาตัวของ Secondary Flow ที่เกิดขึ้นในช่วงท่อโค้งและท่อด้านทางออกท่อโค้ง โดย Rowe (1970) ได้ทดลองวัดค่าความดันรวม และมุม Yaw ของการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อโค้ง 180 องศาและที่ท่อตรงด้านหลังท่อโค้ง โดยใช้ Pitot Probe และ Yaw Probe พบว่าค่า Secondary Flow ที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปากทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าสูงสุดที่มุมโค้งประมาณ 30 องศา ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งการไหลจะมีการปรับตัวจนกระทั่งไม่สามารถวัดค่า Secondary Flow ได้ตั้งแต่ระยะทางห่างจากท่อโค้งไปประมาณ 60D Patankar et al. (1975) ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) ในการคำนวณหาการพัฒนาตัวของความดันรวมของการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อโค้งโดยใช้ $k-\epsilon$ model และนำค่าที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rowe (1970) พบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน Agrawal et al. (1978) ได้ทำการวัดลักษณะการกระจายตัวความเร็วของการไหลแบบลามินาร์ในท่อโค้ง โดยให้การไหลที่ปากทางเข้าท่อโค้งมีลักษณะการกระจายตัวความเร็วแบบ Uniform Flow พบว่าเมื่อการไหลเริ่มต้นเข้ามาในท่อโค้งจะเกิดการปรับตัวและพัฒนาเป็นลักษณะการไหลแบบ Vortex โดยของไหลที่บริเวณกลางท่อจะเคลื่อนที่จากผนังท่อโค้งด้านในไปที่ผนังท่อโค้งด้านนอก ส่วนของไหลที่บริเวณผนังท่อจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามคือจากผนังท่อโค้งด้านนอกไปที่ผนังท่อโค้งด้านใน โดยมีตำแหน่งของการไหลที่มีความเร็วตามแนวแกนสูงสุดเคลื่อนจากจุดศูนย์กลางไปที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอก Fiedler (1997) พบว่า Secondary Flow ที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อโค้ง 2 ชุดที่ต่อเข้าด้วยกันเป็นรูปคล้ายตัว S จะปรับตัวจนเป็นการไหลแบบหมุนวน (Swirling Flow) ที่ด้านทางออก

นอกจากนี้ยังมีผู้ทำ Flow Visualization เพื่อศึกษาลักษณะของ Secondary Flow ที่เกิดขึ้น โดย Cheng และ Yuen (1987a) แสดงภาพถ่ายของ Secondary Flow ที่ปากทางออกท่อโค้ง 180 องศา ที่ค่า Dean Number ต่างๆของการไหล โดยใช้ควันในการแสดงภาพการไหล Cheng และ Yuen (1987b) ศึกษาผลของแรงหนีศูนย์กลางและแรงลอยตัวต่อรูปแบบของ Secondary Flow ที่เกิดขึ้น โดยแสดงภาพถ่ายการไหลที่ด้านทางออกของท่อโค้ง 180 องศาซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนให้แก่การไหล พบว่าในกรณีที่แรงสู่ศูนย์กลางและแรงลอยตัวกระทำตั้งฉากกันจะมีผลทำให้ Secondary Flow ที่เกิดขึ้นวางตัวเอียงไปจากแนวเดิม

สำหรับการศึกษาลักษณะการกระจายคุณสมบัติต่างๆของการไหลในช่วงท่อโค้ง พบว่าแรงสู่ศูนย์กลางของการไหลที่เกิดขึ้นมีผลต่อลักษณะการกระจายคุณสมบัติต่างๆ โดย Sparrow และ Chrysler (1986) และ Chrysler และ Sparrow (1986) ทำการวัดค่าความดันสถิตและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอกและผนังท่อโค้งด้านในของการไหลในท่อโค้ง 30 60 และ 90 องศา พบว่าที่ผนังท่อโค้งด้านนอกจะมีค่าความดันสถิต และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ผนังท่อโค้งด้านใน โดยความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผนังทั้งสองจะมีค่าลดลงเมื่อการไหลมีค่า Reynolds Number สูงขึ้น และพบว่าสภาวะการไหลด้านทางเข้าท่อโค้งมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของค่าความดันสถิตและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนผนังท่อ Baughn et al. (1987) ได้ทำการทดลองวัดค่าการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อโค้ง 180 องศา พบว่าค่า Nusselt Number, Nu ที่ผนังท่อโค้งด้านนอกมีค่ามากกว่าที่ผนังท่อโค้งด้านใน และมีค่าเฉลี่ยของ Nusselt Number ทั้งหมดสูงสุดที่หน้าตัดมุม 90 องศาจากทางเข้า ซึ่งมีอัตราส่วนของค่า Nu ที่ผนังท่อโค้งด้านนอกต่อผนังท่อโค้งด้านในอยู่ประมาณ 3 ต่อ 1 และยังสามารถพบความแตกต่างของค่า Nu ที่ผนังท่อทั้งสองด้าน ที่ทางด้านทางออกท่อโค้งไปเป็นระยะทางประมาณ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

จะเห็นได้ว่าที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการศึกษาถึงผลของ Secondary Flow ที่เกิดขึ้นในท่อโค้ง ในสภาวะการไหลเป็นทั้งแบบลามินาร์และเทอร์บูเลนซ์ และมีสภาวะของการไหลก่อนเข้าท่อโค้งในลักษณะต่างๆ พบว่า Secondary Flow ที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและความดันของการไหลตลอดทั้งหน้าตัด โดยของไหลที่มีความเร็วสูงจะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอก และความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกจะมีค่ามากกว่าที่ผนังท่อโค้งด้านใน โดย Secondary Flow ที่เกิดขึ้นจะยังปรากฏอยู่ที่ทางด้านทางออกของท่อโค้ง

นอกจากนี้ยังได้มีผู้ทำการศึกษาผลของความโค้งท่อต่อการไหลแบบหมุนวน โดย Shimizu และ Sugino (1980) ได้ทำการศึกษากการสูญเสียพลังงาน และรูปแบบการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง 180 องศา พบว่าการสูญเสียพลังงานการไหลในท่อโค้ง ขึ้นกับความเร็วในการหมุนวนด้านทางเข้า ความโค้งของท่อโค้งและความขรุขระของผนังท่อ

Kitoh (1987) ได้ทำการวิเคราะห์การไหลแบบไร้ความหนืดของการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้งโดยใช้กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of Angular Momentum) พบว่าผลเฉลยของการไหลขึ้นอยู่กับอัตราส่วนรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งท่อ (α) และสภาวะการไหลก่อนเข้าท่อโค้ง โดยเฉพาะค่า Initial Angular Momentum Flux ในทั้ง 3 แนว ได้แก่ Ω (ทิศตามทิศทางการไหล), A (ทิศทางในระนาบรัศมีความโค้งท่อโค้ง) และ E (ทิศทางในระนาบหน้าตัดท่อซึ่งตั้งฉากกับระนาบรัศมีความโค้งท่อโค้ง) โดยพบว่าการไหลแบบหมุนวนที่ด้านทางเข้าท่อโค้งซึ่งมีการกระจายความเร็วที่สมมาตรตามแนวแกน ($\Omega \neq 0, A = E = 0$) จะถูกผลของความโค้งท่อเปลี่ยนให้มีการกระจายความเร็วที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน ($\Omega, A, E \neq 0$) โดยแสดง

ผลในรูปของค่าโมเมนต์เชิงมุม ที่มีขนาดและทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามการไหลภายในท่อโค้ง Kitoh และ Yu (1995) ได้เพิ่มผลของแรงเสียดทานการไหลเข้ากับการวิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง โดยการประมาณผลของแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นจากผลการทดลองการไหลแบบหมุนวนในท่อตรง พบว่าแรงเสียดทานที่ผนังท่อมีผลในการสลายตัวการหมุนวนของการไหล โดยมีลักษณะการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวนแตกต่างกันขึ้นกับค่า Swirl Intensity ที่ด้านทางเข้าท่อโค้ง

Anwer และ So (1993) ได้ทำการทดลองการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง 180 องศา ที่มีอัตราส่วนรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งท่อ (α) เท่ากับ $1/13$ โดยทดลองที่ค่า Swirl Number, N_s เท่ากับ 1 พบว่าการหมุนวนมีผลต่อการไหลมากกว่าความโค้งของท่อ กล่าวคือในกรณีการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง ค่าความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกมีค่าน้อยกว่าที่ผนังท่อโค้งด้านใน ซึ่งตรงกันข้ามกับผลที่ได้ในกรณีที่ไม่มีการหมุนวน So และ Anwer (1993) ได้ศึกษาการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวนที่ด้านทางออกของท่อโค้ง พบว่าการสลายตัวของการหมุนวนของการไหลต้องใช้ระยะทางประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากทางออกของท่อโค้ง ส่วนการปรับตัวของปริมาณเทอร์บูเลนซ์เพื่อเข้าสู่สภาวะ Turbulent Fully Developed Flow ต้องใช้ระยะทางยาวเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 65 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากทางออกท่อโค้ง และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวนในท่อตรง So และ Anwer สรุปว่าความโค้งท่อมีผลในการเร่งการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวน ทำให้ระยะทางที่ใช้ในการสลายตัวสั้นลง

จะเห็นได้ว่าที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการศึกษาถึงการไหลแบบหมุนวนในท่อตรงและในท่อโค้ง และการไหลแบบไม่หมุนวนผ่านท่อโค้ง โดยศึกษาถึงผลต่อค่าความดันสถิต ความเร็วการไหลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และปริมาณเทอร์บูเลนซ์โดยมีรายละเอียดของพารามิเตอร์สภาวะการทดลอง และผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1-1.4 หนึ่งจะพบว่าการไหลแบบหมุนวนที่ทำการศึกษาร้อยใหญ่เป็นการไหลที่มีการกระจายตัวของคุณสมบัติต่างๆของการไหลที่สมมาตรตามแนวแกน (Axisymmetric Swirling Flows) อย่างไรก็ตามการไหลในระบบท่ออุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีการกระจายตัวของคุณสมบัติต่างๆของการไหล ที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนท่อดังที่ได้กล่าวแล้วในข้างต้น และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า คุณสมบัติของการไหลเฉลี่ย ได้แก่ ความดันสถิตและความเร็วเฉลี่ยสามารถปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium) ได้เร็วกว่าปริมาณทางเทอร์บูเลนซ์ โดยที่ความดันสถิตจะสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าความเร็วเฉลี่ยของการไหล ดังนั้นระยะทางการไหลที่ต้องใช้ในการปรับตัวของความดันสถิต จึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะทางการไหลที่สั้นที่สุดที่ต้องใช้ในการปรับตัวให้มีการกระจายคุณสมบัติต่างๆของการไหลที่สมมาตรตามแนวแกน

ดังนั้นในหัวข้องานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มุ่งเน้นทำการศึกษากการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนท่อ (Non-Axisymmetric Swirling Pipe Flows) ในท่อตรงและผ่านท่อโค้ง 90 องศาที่ค่า Swirl Number (N_s) ต่างๆ โดยดูผลของการหมุนวนของการไหล และแรงสู่

ศูนย์กลางที่เกิดขึ้นในท่อโค้งต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ผนังท่อตรง ท่อโค้ง และท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวความดันสถิตที่ผนังท่อที่ตำแหน่งต่างๆ ตามทิศทางตามเส้นรอบวงและทิศทางตามการไหล ของการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยทำการศึกษาการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง 90 องศา ที่ความเร็วในการหมุนวนของการไหลต่างๆ

1.4 แนวทางการทำวิจัย

ในขั้นต้นได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเพื่อพิจารณาพารามิเตอร์และข้อบกพร่องที่อาจมีผลต่อการทดลอง ดังแสดงในภาคผนวก ก และนำผลที่ได้ไปใช้ช่วยในการออกแบบชุดทดลองและการทดลอง ในการศึกษาวิจัยได้ทำการทดลองวัดค่าความดันสถิตของการไหลแบบหมุนวนที่มีความสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกนท่อ โดยสร้างสภาวะไม่สมมาตรตามแนวแกนด้วยการติดตั้งกีดขวาง (Tab) ขวางการไหลภายในหน้าตัดท่อ และทำการทดลองในกรณีการไหลในท่อตรงและการไหลผ่านท่อโค้ง 90 องศา ในการศึกษาได้สร้างการไหลแบบหมุนวนโดยใช้ท่อหมุน (Rotating Pipe) และทำการทดลองที่ความเร็วหมุนวนต่างๆ ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนของท่อหมุน

ในการแสดงค่าความเร็วหมุนวนของการไหล ได้แสดงผลในรูปแบบของค่า Swirl Number (N_s) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนของฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุม (Angular Momentum Flux) ต่อผลคูณของรัศมีท่อซึ่งเป็น Length Scale ของการไหลกับฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวแกน (Axial Momentum Flux) ดังแสดงตามสมการ (1.1)

$$N_s = \frac{\int_0^R uwr^2 dr}{R \int_0^R u^2 r dr} \quad (1.1)$$

เมื่อ	u	เป็นความเร็วตามแนวแกนที่ตำแหน่งรัศมี r ต่างๆ
	w	เป็นความเร็วตามแนวสัมผัสที่ตำแหน่งรัศมี r ต่างๆ
	R	รัศมีท่อ

Yajnik และ Subbaiah (1973) ได้นิยาม Axial Velocity Scale (U_a) และ Angular Velocity Scale (Ω) เพื่อใช้คำนวณค่าโมเมนต์ตามแนวแกน และโมเมนต์เชิงมุมตามสมการ (1.2)

$$\begin{aligned}\pi\rho U_a^2 R^2 &= 2\pi \int_0^R \rho u^2 r dr \\ \pi\rho U_a \Omega R^4 &= 2\pi \int_0^R \rho u w r^2 dr\end{aligned}\quad (1.2)$$

และได้ความสัมพันธ์ของค่า Swirl Number ในรูปของ Axial Velocity Scale (U_a) และ Angular Velocity Scale (Ω) ตามสมการ (1.3)

$$Ns = \frac{\Omega R}{U_a} \quad (1.3)$$

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้นิยามค่า Swirl Number ตามสมการ 1.3 โดยเมื่อประมาณให้การไหลมีการกระจายความเร็วที่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดจะได้ค่า Axial Velocity Scale (U_a) เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (\bar{u}) และใช้ค่า Angular Velocity Scale (Ω) เป็นค่าความเร็วหมุนของการไหล (ω) จะได้ค่า Swirl Number ตามสมการ (1.4)

$$Ns = \frac{\omega R}{u} \quad (1.4)$$

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ในเชิงวิชาการ ผลงานวิจัยที่ได้จะช่วยขยายความรู้ความเข้าใจ และให้ได้มาซึ่งข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะการกระจายความดันสถิต และการปรับตัวหรือสลายตัวของการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอในหน้าตัดท่อ ในกรณีการไหลแบบหมุนวนในท่อตรงและการไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้ง

ในเชิงประยุกต์ ความรู้ความเข้าใจและข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะและการสลายตัวของการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอในหน้าตัดท่อที่ได้มา สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างรองรับท่อ และระบบท่อ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการประมาณหรือลดความผิดพลาดจากการวัดค่าความดันสถิตในการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนได้

บทที่ 2

ชุดทดลองและการทดลอง

ในงานวิทยานิพนธ์ ได้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวความดันสถิตของการไหลแบบหมุนวนในท่อตรง และการไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้ง โดยชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะเป็นชุดทดลองแบบดูดอากาศ ประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ได้แก่ ท่อตรงด้านทางเข้าท่อหมุน ท่อหมุน (Rotating Pipe) ซึ่งใช้ในการสร้างการไหลแบบหมุนวน ท่อโค้ง (ในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง) ท่อตรงด้านทางออกท่อหมุน และชุด Orifice และ Blower รูปที่ 2.1 แสดง Schematic Drawing ของชุดทดลองในกรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง

ในการทดลองกรณีการไหลในท่อตรง อากาศจะถูกดูดโดย Blower ขนาด 2 แรงม้า ผ่านท่อตรงด้านทางเข้าท่อหมุนและไหลเข้าท่อหมุน จากนั้นจะไหลออกไปที่ท่อตรงด้านทางออกท่อหมุนซึ่งเป็นส่วนที่ใช้วัดลักษณะการกระจายตัวความดันสถิต และไหลผ่านท่ออย่างซึ่งใช้กันการสันสะเทือนจาก Blower สู่อุปกรณ์ชุดทดลอง ก่อนไหลไปเข้าชุด Orifice และ Blower ที่ด้านทางดูด รูปที่ 2.2 แสดงภาพถ่ายของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับชุดทดลองในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง อากาศจะถูกดูดผ่านท่อตรงและไหลเข้าท่อหมุนเหมือนในกรณีการไหลในท่อตรง จากนั้นอากาศจะไหลไปเข้าชุดท่อโค้ง 90 องศา และไหลออกไปที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งก่อนที่จะไหลไปที่ Orifice และ Blower

ในการศึกษาได้ทำการทดลองในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยสร้างการกระจายความดันสถิตที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนด้วยการติดแผ่นกีดขวาง (Tab) รูปสี่เหลี่ยมฐานโค้งขวางการไหลที่หน้าตัดทางออกท่อหมุน สำหรับรายละเอียดของชุดทดลองในแต่ละส่วน อุปกรณ์การวัด กรณีการทดลอง และวิธีการทดลองมีดังต่อไปนี้

2.1 รายละเอียดชุดทดลอง

2.1.1 ท่อตรงด้านทางเข้าท่อหมุน

ท่อตรงด้านทางเข้าท่อหมุน ประกอบขึ้นจากท่ออะครีลิกจำนวน 3 ท่อนต่อเข้าด้วยกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 80 mm เส้นผ่านศูนย์กลางใน 74 mm และมีความยาวรวมของท่อตรงช่วงทางเข้าท่อหมุนยาว 2886 mm หรือยาวเป็น 39 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ (39D) ท่ออะครีลิกแต่ละท่อนยาว 962 mm ถูกต่อเข้าด้วยกันด้วย Coupling ซึ่งทำขึ้นจากท่ออะครีลิก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 90 mm เส้นผ่านศูนย์กลางใน 80 mm ยาว 30 mm โดยเจาะรูติด Set Screw เพื่อยึดท่ออะครีลิกเข้าด้วยกันและใช้ซิลิโคนอุดรอยต่อเพื่อกันการรั่ว

ของอากาศ บนท่ออะครีลิกทำการเจาะรูติด Pressure Tap ซึ่งทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1/8 นิ้ว หนา 0.5 mm โดยติด Pressure Tap บนท่อทุก ๆ ระยะ 74 mm หรือห่างกันเป็นระยะ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ (1D) รายละเอียดท่ออะครีลิกช่วงก่อนทางเข้าท่อหมุน แสดงดังรูปที่ 2.3

2.1.2 ท่อหมุน (Rotating Pipe)

ท่อหมุนทำขึ้นจากท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 74 mm ยาว 888 mm หรือ ยาวเป็น 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ ซึ่งความยาวของท่อหมุนที่ใช้คิดเป็นจำนวนรอบการหมุนวนในกรณีความเร็วหมุนวนต่ำสุด (NS03) ได้ 1.1 รอบ และ กรณีความเร็วหมุนวนสูงสุด (NS18) ได้ 6.9 รอบ ด้านปลายทั้งสองของท่อสวมอยู่กับตลับลูกปืนชนิดลูกบอลร่องลึก (Deep Groove Ball Bearing) ของ SKF รุ่น 6017-2Z ขนาดรูสวม 85 mm กึ่งกลางท่อหมุนติดกับ Pulley สายพานแบบวี (V-Belt Pulley) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 136 mm ในการสร้างการไหลแบบหมุนวน ท่อหมุนจะถูกขับให้หมุนด้วยสายพานโดยต่อเข้ากับ Pulley ที่เพลลาของมอเตอร์ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Pulley 242 mm และมีอัตราทดความเร็วรอบมอเตอร์ต่อความเร็วรอบท่อหมุนเท่ากับ 1:1.8

มอเตอร์ที่ใช้เป็นของ Crompton Greaves MODEL AD90S ขนาด 1.5 KW (2 hp) มีความเร็วรอบ 2830 rpm ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz และปรับความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยการต่อเข้ากับ Inverter (T-VERETR MODEL N1-202-M) ขนาด 1.5 KW (2 hp) รายละเอียดของการต่อมอเตอร์และ Inverter แสดงในรูปที่ 2.4

ภายในท่อหมุนได้ทำการติดตั้ง Honeycomb และตาข่าย (Screen) เพื่อใช้ปรับสภาวะการไหลที่ออกจากท่อหมุนให้มีลักษณะการกระจายตัวความเร็วในแนวสัมผัสเป็น Solid Body Rotation และมีการกระจายตัวความเร็วตามแนวแกนที่สม่ำเสมอ (รายละเอียดแสดงตามรูปที่ 2.5) ชุด Honeycomb ทำขึ้นจากหลอดพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 6 mm ยาว 148 mm บรรจุอยู่ในท่อ PVC หนา 2 mm ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกเท่ากับขนาดรูในท่อหมุน และมีความยาวเท่ากับความยาวหลอดพลาสติก ภายในท่อหมุนได้ติดตั้งชุด Honeycomb ไว้จำนวน 2 ชุด เพื่อใช้บังคับการไหลให้หมุนไปตามการหมุนของท่อ โดยมีตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh 16 ปิดไว้ที่ด้านหัวและท้าย Honeycomb แต่ละชุด และใช้ตาข่ายสแตนเลสขนาด Mesh 30 ปิดที่ด้านท้ายของ Honeycomb ชุดที่สอง ภายในท่อหมุนด้านท้าย Honeycomb ติดตาข่ายสแตนเลสขนาด Mesh 30 จำนวน 4 อัน เพื่อใช้ในการปรับสภาวะการไหลให้มีการกระจายความเร็วตามแนวแกนที่สม่ำเสมอ โดยมีระยะห่างระหว่างตาข่ายแต่ละอันเท่ากับ 100 mm และมีระยะห่างจากตาข่ายอันสุดท้ายถึงปลายทางออกท่อหมุนเท่ากับ 128 mm รูปที่ 2.6 แสดงภาพถ่ายของท่อหมุนที่ใช้ในการทดลอง

2.1.3 ท่อตรงด้านทางออกท่อหมุน

ท่อตรงด้านทางออกท่อหมุนทำขึ้นจากท่ออะครีลิกจำนวน 9 ท่อน ยาวท่อนละ 962 mm ต่อเข้าด้วยกันด้วย Coupling มีความยาวรวม 8658 mm หรือยาวเป็น 117 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ ที่ท่ออะครีลิกทำการเจาะรูเพื่อติด Pressure Tap ซึ่งทำจากท่อทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1/8 นิ้ว หนา 0.5 mm สำหรับใช้วัดความดันสถิตที่ผนังท่อ โดยท่อท่อนที่ 1 ในช่วง 6D แรกที่ออกจากท่อหมุน ทำการเจาะรูทุกระยะครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ (0.5D) ที่ทุกมุมทาง $d\psi = 15$ องศา ส่วนท่อในช่วงความยาวที่เหลือทำการเจาะรูทุกระยะ 1D ที่ทุกมุมทาง $d\psi = 30$ องศา ท่อท่อนที่ 2 และ 3 ทำการเจาะรูทุกระยะ 1D ที่ทุกมุมทาง $d\psi = 30$ องศา และท่อในช่วงที่เหลือ (ท่อนที่ 4-9) ทำการเจาะรูทุกระยะ 2D ที่ทุกมุมทาง $d\psi = 45$ องศา รายละเอียดของการกำหนดมุม ψ และระยะต่างๆของการเจาะรูติด Pressure Tap แสดงไว้ในรูปที่ 2.7

2.1.4 ชุด Orifice และ Blower

อากาศเมื่อไหลผ่านท่ออะครีลิกด้านทางออกของท่อหมุน จะไหลผ่านไปยังท่อยางและไหลไปที่ท่อ PVC ด้านทางเข้า Orifice ซึ่งมีการติดตั้ง Honeycomb และตาข่ายเพื่อใช้ปรับสภาวะการไหลก่อนเข้า Orifice จากนั้นอากาศจะไหลไปเข้า Blower ที่ด้านทางดูด ซึ่งมีตาข่ายขนาด Mesh 4 และ Mesh 16 ติดไว้ รายละเอียดชุด Orifice และ Blower แสดงไว้ดังรูปที่ 2.8

ท่อ PVC ด้านทางเข้า Orifice ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 76 mm เส้นผ่านศูนย์กลางใน 72 mm ที่ด้านต้นท่อได้ติดตั้งชุด Honeycomb ซึ่งทำจากหลอดพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 6 mm ยาว 148 mm และมีตาข่ายขนาด Mesh 16 ปิดที่ด้านหัวและท้าย ด้านท้าย Honeycomb ติดตาข่ายสแตนเลสขนาด Mesh 30 จำนวน 2 อัน ห่างกันเป็นระยะ 72 mm และมีระยะห่างจากตาข่ายสุดท้ายถึง Orifice เท่ากับ 360 mm (5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ PVC)

Orifice ที่ใช้ทำขึ้นจากแผ่นอลูมิเนียมหนา 1/8 นิ้ว มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดทางเข้า (β) เท่ากับ 0.75 โดยมีหน้าแปลน PVC ประกอบอยู่และเจาะรูติด Pressure Tap บนหน้าแปลนเพื่อใช้วัดค่าความดันแตกต่างในการทดลอง โดยเจาะรูห่างจากแผ่น Orifice มาทางด้านหน้าเป็นระยะ 1 เท่าของขนาดหน้าตัด Orifice (69 mm) และเจาะรูห่างจาก Orifice ไปทางด้านหลังเป็นระยะครึ่งหนึ่งของขนาดหน้าตัด Orifice (34.5 mm) ภายในท่อด้านท้าย Orifice ติดตาข่ายขนาด Mesh 16 ที่ระยะห่างจาก Orifice เป็นระยะทางประมาณ 5.4D และห่างจากปากทางเข้า Blower เป็นระยะ 2D เพื่อใช้กันการไหลแบบ

หมุนวนที่อาจถูกเหนี่ยวทำให้เกิดขึ้นที่ด้านทางดูดของ Blower เข้าไปบริเวณการวัดที่บริเวณ Orifice รูปที่ 2.9 แสดงภาพถ่ายของชุด Orifice และ Blower ที่ใช้ในการทดลอง

2.1.5 ชุดท่อโค้ง

สำหรับกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง ได้ต่อชุดท่อโค้งเข้าที่ด้านทางออกท่อหมุนดังแสดงรายละเอียดตามรูปที่ 2.10 โดยติดตั้งชุดท่อโค้งตั้งแต่ระยะ $S/D = -1.5$ ถึงระยะ $S/D = 3.9$ มีความยาวรวมทั้งช่วงของชุดท่อโค้งประมาณ 5.4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (5.4D) (รายละเอียดการกำหนดพิกัด S/D แสดงในหัวข้อ 2.2) โดยอากาศเมื่อไหลออกจากท่อหมุน จะไหลผ่านท่อตรงจำนวน 2 ท่อน ซึ่งต่อเข้าด้วยกันด้วยหน้าแปลน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 74 mm ยาวท่อนละ 111 mm (1.5D) และเจาะรูติด Pressure Tap เพื่อใช้วัดความดันสถิตทุกระยะ 0.5D และทุกมุมทาง $d/\psi = 15$ องศา ท่อตรงท่อนที่สองมีขนาดเท่ากับท่อตรงท่อนแรกและเชื่อมอยู่กับท่อโค้งเหล็ก 90 องศา

ท่อโค้งที่ใช้เป็นท่อขนาด Nominal Diameter 3 นิ้ว Schedule 80 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.5 นิ้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 74 mm โดยมีรัศมีความโค้ง (R) 114.3 mm และมีอัตราส่วนรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งท่อโค้ง (α) เท่ากับ 1/3.1 บนท่อโค้งทำการเจาะรูเพื่อติด Pressure Tap ทุกมุมโค้ง ($d\theta$) 15 องศา ตั้งแต่มุม $\theta = 15-75$ องศา ที่ทุกมุมทาง $d/\psi = 15$ องศา ด้านปลายทางออกท่อโค้งเชื่อมอยู่กับหน้าแปลนและประกบเข้ากับหน้าแปลนของท่ออะคริลิก รูปที่ 2.11 แสดงภาพถ่ายชุดท่อโค้งที่ใช้ในการทดลอง

2.2 การกำหนดพิกัดตำแหน่งของการทดลอง

ในการทดลองได้กำหนดให้ตำแหน่งของแผ่นกีดขวางที่ใช้ในการสร้างความไม่สมมาตรของการกระจายความดันสถิตของการไหลอยู่ที่ตำแหน่ง $X = 0$ (ในกรณีการไหลในท่อตรง) และ $S = 0$ (ในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง) โดยกำหนดให้ค่า X และ S มีค่าเป็นบวกตามทิศทางการไหล และมีค่าเป็นลบในทิศทางตรงกันข้าม ที่ท่อโค้งกำหนดให้ปากทางเข้าท่อโค้งเป็นตำแหน่งมุมโค้ง $\theta = 0$ องศา และด้านปากทางออกท่อโค้งมีค่า $\theta = 90$ องศา สำหรับตำแหน่งมุม ψ ของตำแหน่งวัดความดันสถิตรอบผนังท่อ กำหนดให้มุม $\psi = 0$ ที่ตำแหน่งบนสุดของท่อและมีทิศเป็นบวกตามทิศทางการหมุนวนของการไหล โดยมีทิศทาง Vector ของแกนการหมุนวนตามกฎมือขวาในทิศทางเดียวกับการไหลตามความยาวท่อ รายละเอียดของการกำหนดพิกัดการทดลองแสดงตามรูปที่ 2.12

แผ่นกีดขวางที่ใช้สร้างความแตกต่างความดันทำขึ้นจากแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.4 mm มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมฐานโค้ง มีอัตราส่วนพื้นที่ขวางท่อต่อพื้นที่หน้าตัดท่อ (Blockage Area Ratio) เท่ากับ 0.188 ดังแสดงตามรูปที่ 2.13 แผ่นกีดขวางมีมุมทางของฐานวัดจากจุดศูนย์กลาง

กลางท่อ 90 องศา และมีความสูงระหว่างด้านบนและล่างของสี่เหลี่ยมเท่ากับครึ่งหนึ่งของรัศมีในท่อ ($r/2$) ในการทดลองได้นำแผ่นกีดขวางไปติดกับวงแหวนอะคริลิกขนาดเดียวกับท่อที่ใช้ในการทดลอง มีความหนาของวงแหวน 3 mm และติดตั้งแผ่นกีดขวางเข้ากับท่อโดยให้กึ่งกลางฐานโค้งของแผ่นกีดขวางอยู่ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 180$ องศา

2.3 กรณีการทดลอง

ในงานวิทยานิพนธ์ ได้ทำการทดลองในกรณีการไหลในท่อตรง ที่มีค่า Swirl Number (N_s) เท่ากับ 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.8 และการไหลผ่านท่อโค้งที่มีค่า Swirl Number เท่ากับ 0.0, 0.9 และ 1.8 ซึ่งกรณีที่ $N_s = 0$ หมายถึงกรณีที่การไหลไม่มีความเร็วหมุนวน โดยทำการทดลองในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง) และกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง) ตารางที่ 2.1 แสดงกรณีการทดลอง และคำย่อแทนกรณีการทดลอง

สำหรับค่า Swirl Number ของการทดลองนิยามตามสมการ 2.1

$$\text{Swirl Number } (N_s) = \frac{\omega R}{\bar{u}} \quad (2.1)$$

เมื่อ	ω	เป็นความเร็วเชิงมุมของท่อหมุน (rad/s)
	R	เป็นรัศมีของท่อหมุน (m)
	\bar{u}	เป็นความเร็วเฉลี่ยของการไหลตลอดหน้าตัด (Bulk Mean Velocity, m/s) ซึ่งคำนวณจากรูปร่างความเร็วที่วัดที่ตำแหน่งหน้า Orifice

2.4 อุปกรณ์การวัดและวิธีการทดลอง

2.4.1 อุปกรณ์วัดความเร็วและความดันรวม

ในการวิจัย ได้ใช้อุปกรณ์วัดความเร็ว 2 ชนิด คือ Pitot Probe เพื่อใช้วัดความเร็วตามแนวแกน (Axial Velocity, u) และความดันรวมของการไหล (Total Pressure) และ Yaw Probe สำหรับวัดความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential Velocity, w) และความเร็วในแนวแกน

รูปที่ 2.14 แสดงรายละเอียด Pitot Probe และ Yaw Probe โดย Pitot Probe ทำขึ้นจากเข็มฉีดยาสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.25 mm เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 mm งอโค้งเป็นมุมฉาก มีปลายเข็มยื่นออกไปจากแนวก้าน 31 mm หรือประมาณ 25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเข็มฉีดยา ก้านเข็มสแตนเลสต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1/8 นิ้ว หนา 0.5 mm ที่บริเวณกึ่งกลางก้าน Probe ถูกครอบด้วย

ท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3/16 นิ้ว หนา 0.5 mm ยาว 65 mm สำหรับใช้ยึดเข้ากับตัวเลื่อน Probe โดย Pitot Probe ที่ทำขึ้นได้นำไปเปรียบเทียบกับ Pitot-Static Probe แบบมาตรฐานในช่วงความเร็วที่ทำการทดลอง พบว่าความดันที่วัดได้จาก Probe ทั้งสองมีค่าเท่ากัน

สำหรับ Yaw Probe ทำจากเข็มฉีดยาขนาดเดียวกัน จำนวน 3 อัน เรียงติดกัน โดยเข็มอันที่ 1 และ 3 (ดังแสดงในรูปที่ 2.14) ถูกฝนให้มีมุมเอียง θ_p เท่ากับ 18.5 องศา และติดเข้ากับเข็มอันที่ 2 ซึ่งอยู่ตรงกลาง มีรายละเอียดตาม Chue (1975) เข็มทั้ง 3 เชื่อมติดกันและงอโค้งเป็นมุมฉาก โดยมีระยะปลายเข็มถึงก้านเข็ม 35 mm เข็มแต่ละอันต่อเข้ากับท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1/8 นิ้ว หนา 0.5 mm และเชื่อมท่อทองเหลืองทั้ง 3 เข้าไว้ด้วยกัน โดยปลายท่อทองเหลืองแต่ละอันจะต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดความดันเพื่อใช้วัดความดันแตกต่างระหว่างเข็มแต่ละอัน Yaw Probe ที่ได้ นำไปปรับเทียบ (Calibrate) ในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด $30 \times 30 \text{ cm}^2$ ที่ความเร็วการไหล 10 และ 15 m/s เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันแตกต่างที่วัดกับความเร็วในแนวสัมผัส และความเร็วตามแนวแกน รายละเอียดของการแปลงความสัมพันธ์ของความแตกต่างความดันที่วัดได้ไปเป็นความเร็วแสดงไว้ในภาคผนวก ข รูปที่ 2.15 แสดงภาพถ่ายของ Pitot Probe และ Yaw Probe ที่ทำขึ้นมาใช้ในงานวิจัย

2.4.2 การวัดรูปร่างความเร็วและความดันรวม

ในการทดลองได้ทำการวัดความเร็วตามแนวแกน (u) ความเร็วตามแนวสัมผัส (w) และความดันรวม (Total Pressure) ในแนววัด X-X และ Y-Y โดยมีรายละเอียดการกำหนดพิิกัดการวัดความเร็วแสดงดังรูปที่ 2.16 ในกรณีการไหลในท่อตรงทำการวัดความเร็วและความดันรวมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้

- วัดความเร็วตามแนวแกนที่หน้าตัดด้านทางเข้าท่อหมุน ($X/D = -31$) เพื่อแสดงรูปร่างความเร็ว และสภาวะของการไหลก่อนเข้าท่อหมุน โดยทำการวัดความเร็วในแนววัด X-X ที่หน้าตัดห่างจากปากทางเข้าท่อหมุนเป็นระยะ $19D$ และอยู่ห่างจากปากทางเข้าชุดทดลองเป็นระยะ $20D$ โดยทำการวัดความเร็วในทุกกรณีการทดลอง (กรณีติดแผ่นกีดขวางและไม่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล)
- วัดความเร็วตามแนวแกน ความเร็วตามแนวสัมผัสที่หน้าตัดห่างจากปากทางออกท่อหมุน $0.5D$ ($X/D = 0.5$) ในแนววัด X-X และ Y-Y เพื่อแสดงรูปร่างความเร็วตามแนวแกน และความเร็วตามแนวสัมผัสที่ออกจากท่อหมุน ซึ่งใช้เป็นสภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) ด้านต้นท่อในช่วงการไหลที่วัดการกระจายความดันสถิต โดยทำการวัดความเร็วเฉพาะในกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง (NS00-NS18)
- วัดความดันรวมที่หน้าตัดทางออกท่อหมุน หลังตำแหน่งติดแผ่นกีดขวางเป็นระยะ $0.5D$ ($X/D = 0.5$) ในแนววัด X-X และ Y-Y โดยทดลองวัดในทุกกรณีการทดลอง (กรณีติดแผ่นกีดขวางและไม่ติดแผ่นกีดขวาง) เพื่อแสดงรูปร่างความดันรวมที่ด้านต้นท่อในกรณีนี้

ไม่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล และรูปร่างความดันรวมด้านหลังแผ่นกีดขวาง ซึ่งเป็นสถานะเริ่มต้นของการไหลในแต่ละกรณี

- วัดความเร็วตามแนวแกนที่หน้าตัดก่อนทางเข้า Orifice เป็นระยะ 2D ในแนววัด X-X และ Y-Y โดยทำการวัดความเร็วในทุกกรณีการทดลอง และนำรูปร่างความเร็วที่ได้ไปคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (Bulk Mean Velocity, \bar{u}) ในแต่ละกรณี

ในกรณีการไหลผ่านท่อโค้งทำการวัดความเร็วและความดันรวมที่หน้าตัดด้านทางเข้า ท่อหมุน ทางออกท่อหมุน และหน้าตัดทางเข้า Orifice เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่นเดียวกับกรณีการไหลในท่อตรง โดยมีตำแหน่งวัดต่างๆ ดังนี้

- วัดความเร็วตามแนวแกนที่หน้าตัดด้านทางเข้าท่อหมุน ($S/D = -32.5$) ซึ่งเป็นหน้าตัดห่างจากปากทางเข้าท่อหมุนเป็นระยะ 19D (20D ห่างจากปากทางเข้าชุดทดลอง) เพื่อแสดงสถานะของการไหลด้านทางเข้าท่อหมุน โดยทำการวัดความเร็วในแนววัด X-X ของการไหลในทุกกรณี (กรณีติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวาง)
- วัดความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัส ที่หน้าตัดห่างจากปากทางออกท่อหมุน 0.5D ($S/D = -1.0$) ในแนววัด X-X และ Y-Y เพื่อแสดงรูปร่างความเร็วซึ่งเป็นสถานะเริ่มต้นของการไหลก่อนไหลเข้าท่อโค้ง โดยทำการวัดความเร็วในทุกกรณีการทดลอง (กรณีติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวาง)
- วัดความดันรวมที่หน้าตัดหลังตำแหน่งติดแผ่นกีดขวางเป็นระยะ 0.5D ($S/D = 0.5$) ในแนววัด X-X และ Y-Y ของทุกกรณีการทดลอง เพื่อแสดงรูปร่างความดันรวมในกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง และรูปร่างความดันรวมของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง
- วัดความเร็วตามแนวแกนที่หน้าตัดก่อนทางเข้า Orifice เป็นระยะ 2D ในแนววัด X-X และ Y-Y โดยทดลองในทุกกรณีเพื่อนำรูปร่างความเร็วที่ได้ไปคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดในแต่ละกรณี

ในการวัดความเร็วที่หน้าตัดก่อนทางเข้าท่อหมุน และ Orifice ใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัด โดยวัดความแตกต่างความดันที่อ่านได้จาก Probe เทียบกับความดันสถิตที่ผนังท่อที่หน้าตัดเดียวกับตำแหน่งวัด สำหรับการวัดรูปร่างความเร็วที่หน้าตัดทางออกท่อหมุน ได้ใช้ Pitot Probe วัดความเร็วตามแนวแกนในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน และใช้ Yaw Probe วัดความเร็วตามแนวแกน และความเร็วตามแนวสัมผัสในกรณีการไหลแบบหมุนวน

สำหรับการวัดความดันรวม ใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์การวัด โดยวัดความแตกต่างความดันจาก Probe เทียบกับความดันอ้างอิง (P_{ref}) ซึ่งในกรณีการไหลในท่อตรงใช้ความดันอ้างอิงเป็นความดันสถิตที่ตำแหน่ง $X/D = 0.5$ ที่มุม $\psi = 0$ องศา และในกรณีการไหลผ่านท่อโค้งใช้ความดันอ้างอิงเป็นความดันสถิตที่ตำแหน่ง $S/D = -1.0$ ที่มุม $\psi = 0$ องศา

ในการอ่านค่าความดันที่วัดได้จาก Pitot Probe และ Yaw Probe ใช้మాโนมิเตอร์แบบเอียง (Inclined Manometer) มีช่วงในการอ่านค่าความดัน 0-50 mmH₂O และมีความละเอียดในการอ่านค่าเท่ากับ ± 0.2 mmH₂O

2.4.3 การวัดลักษณะการกระจายตัวความดันสถิต

ในการวัดลักษณะการกระจายตัวความดันสถิตได้ใช้มาโนมิเตอร์แบบเอียง (Inclined Manometer) เป็นอุปกรณ์อ่านค่าความดันเช่นเดียวกับกรณีการวัดความเร็ว โดยทำการวัดค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม ψ ต่าง ๆ ตาม Pressure Tap ที่ติดตั้งไว้เทียบกับความดันที่ตำแหน่งอ้างอิง ($P_{ref.}$) ซึ่งในกรณีการไหลในท่อตรง ให้เป็นความดันสถิตที่ตำแหน่ง $X/D = 0.5$ มุม $\psi = 0$ องศา และในกรณีการไหลผ่านท่อโค้งให้เป็นความดันสถิตที่ตำแหน่ง $S/D = -1.0$ มุม $\psi = 0$ องศา

ในกรณีการไหลในท่อตรง ทำการวัดความดันตั้งแต่หน้าตัด $X/D = 0.5-76$ โดยที่หน้าตัด $X/D = 0.5-6.0$ ทำการวัดทุกระยะห่างหน้าตัด $0.5D$ และวัดความดันสถิตทุกช่วงมุม $d\psi = 15$ องศา ที่หน้าตัด $X/D = 7-38$ ทำการวัดทุกระยะห่างหน้าตัด $1D$ และวัดความดันสถิตทุกช่วงมุม $d\psi = 30$ องศา และที่หน้าตัด $X/D = 41-76$ ทำการวัดทุกระยะห่างหน้าตัด $2D$ และวัดความดันสถิตทุกช่วงมุม $d\psi = 45$ องศา

ในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง ทำการวัดความดันตั้งแต่หน้าตัด $S/D = -1.0-80.1$ โดยที่หน้าตัด $S/D = -1.0, -0.5, 0.5$ และ 1.0 เป็นหน้าตัดที่ตรงช่วงก่อนเข้าท่อโค้ง ซึ่งทำการวัดความดันสถิตทุกช่วงมุม $d\psi = 15$ องศา ในช่วงท่อโค้งทำการวัดที่หน้าตัดมุมโค้ง $\theta = 15, 30, 45, 60$ และ 75 องศา และวัดความดันสถิตทุกช่วงมุม $d\psi = 15$ องศา สำหรับท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งที่ระยะ $S/D = 4.6-10.1$ ทำการวัดทุกระยะห่างหน้าตัด $0.5D$ และวัดความดันสถิตทุกช่วงมุม $d\psi = 15$ องศา ที่หน้าตัด $S/D = 11.1-42.1$ ทำการวัดทุกระยะห่างหน้าตัด $1D$ และวัดความดันสถิตทุกช่วงมุม $d\psi = 30$ องศา และที่หน้าตัด $S/D = 45.1-80.1$ ทำการวัดทุกระยะห่างหน้าตัด $2D$ และวัดความดันสถิตทุกช่วงมุม $d\psi = 45$ องศา รายละเอียดของตำแหน่งวัดความดันสถิตในกรณีต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

บทที่ 3

ผลการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการวัดรูปร่างความเร็วและรูปร่างความดันรวมของการไหลในท่อที่หน้าตัดต่างๆ เพื่อแสดงสภาวะการทดลอง และทำการวัดลักษณะการกระจายความดันสถิตของการไหลในท่อ โดยทำการทดลองในการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง 90 องศา ที่ค่า Swirl Number ต่างๆ ในสภาวะการไหลที่มีลักษณะการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยมีกรณีการทดลองและสัญลักษณ์แทนกรณีการทดลองต่างๆ แสดงในตาราง 2.1

การไหลในท่อตรง

ในการไหลในท่อตรง ได้ทำการทดลองในการไหลแบบไม่หมุนวน และการไหลแบบหมุนวน ที่มีค่า Swirl Number เท่ากับ 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.8 โดยในการทดลองที่สภาวะการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน ได้ทำการติดแผ่นกีดขวาง (Tab) ขวางการไหลที่บริเวณหน้าตัดด้านทางออกท่อหมุนวน ($X/D = 0$) โดยมีตำแหน่งติดแผ่นกีดขวาง และลักษณะของแผ่นกีดขวางที่ใช้แสดงดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ผลการทดลองต่างๆ แสดงดังต่อไปนี้

3.1. รูปร่างความเร็วและรูปร่างความดันรวม

3.1.1 รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน

ในการทดลองได้ทำการวัดความเร็วที่หน้าตัดท่อตรงด้านก่อนทางเข้าท่อหมุน เพื่อแสดงสภาวะของการไหลก่อนเข้าท่อหมุน โดยทำการวัดความเร็วที่หน้าตัด $X/D = -31$ ซึ่งเป็นหน้าตัดที่ระยะ $20D$ จากปากทางเข้าชุดทดลองและห่างจากปากทางเข้าท่อหมุนเป็นระยะ $19D$ โดยใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วและทำการวัดความเร็วตามแนว X-X ซึ่งมีรายละเอียดการกำหนดพิกัดการวัดความเร็วแสดงตามรูปที่ 2.16 ในการทดลองมีค่าความไม่แน่นอนของความเร็วที่วัดได้ประมาณ ± 0.2 m/s หรือคิดเป็นประมาณ $\pm 3\%$ ของค่าความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ โดยมีรายละเอียดการคำนวณค่าความไม่แน่นอนดังแสดงในภาคผนวก ค

รูปที่ 3.1 แสดงรูปร่างความเร็วของการไหลที่หน้าตัดก่อนทางเข้าท่อหมุนในการไหลที่มีลักษณะการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยแสดงค่าความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมีท่อ (r/R) ในรูปของความเร็วที่ Normalized ด้วย

ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (Bulk Mean Velocity, \bar{u}) ซึ่งคำนวณจากรูปร่างความเร็วที่ตำแหน่งหน้า Orifice จากรูปที่ 3.1 พบว่ารูปร่างความเร็วในทุกกรณีมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความเร็วต่ำที่บริเวณผนังท่อ และมีค่าสูงขึ้นที่ระยะห่างจากผนังเข้ามาบริเวณกึ่งกลางท่อ โดยที่บริเวณใกล้ผนัง ($|r/R| > 0.5$) จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวรัศมีที่สูงกว่าที่บริเวณกึ่งกลางท่อ ($|r/R| < 0.5$) และมีความเร็วสูงสุดที่บริเวณจุดศูนย์กลางท่อ มีค่าประมาณ 1.2 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง ซึ่งรูปร่างความเร็วที่ได้มีลักษณะคล้ายกับรูปร่างความเร็วแบบ Fully Developed Turbulent Pipe Flows

จากกราฟในรูปที่ 3.1 พบว่าในกรณี NS18 รูปร่างความเร็วที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วในกรณีอื่นตลอดทั้งหน้าตัด มีความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางท่อประมาณ 1.1 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง โดยคาดว่าสาเหตุมาจากการรั่วเข้าของอากาศในช่วงรอยต่อของท่อหมุนและท่อตรง ซึ่งในการทดลองได้ควบคุมให้อัตราการไหลที่ Orifice ที่ด้านท้ายของท่อหมุนมีค่าคงที่ ทำให้ปริมาณของอากาศที่ไหลเข้าสู่จุดทดลองด้านก่อนทางเข้าท่อหมุนมีค่าน้อยลง

รูปร่างความเร็วที่ด้านทางเข้าท่อหมุนนำมาคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}_i) ที่ตำแหน่ง $X/D = -31$ ได้ตามตาราง 3.1 พบว่าในกรณี NS18 มีความเร็วเฉลี่ยน้อยกว่ากรณีอื่นมากที่สุดประมาณ 9% ส่วนการไหลในกรณีอื่นมีความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดใกล้เคียงกันประมาณ 8 m/s และมีค่า Reynolds Number (Re_D) ของการไหลด้านก่อนทางเข้าท่อหมุนประมาณ 3.7×10^4 ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อ และสอดคล้องกับรูปร่างความเร็วที่วัดได้

รูปที่ 3.2 แสดงรูปร่างความเร็วการไหลด้านทางเข้าท่อหมุนซึ่ง Normalized ค่าความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางท่อ จากกราฟพบว่ารูปร่างความเร็วที่ได้ในทุกกรณีมีลักษณะคล้ายกัน และเมื่อ Fit สมการของกราฟในรูปของ Power-Law Equation ตามสมการ (3.1) ในช่วง $|r/R| < 0.93$

$$\frac{u}{U} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.1)$$

พบว่าค่า n ที่ได้จากการ Fit สมการรูปร่างความเร็วในแต่ละกรณีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.36 และมีค่า R^2 ของการ Fit สมการทุกกรณีอยู่ในช่วง 0.88-0.97 ซึ่งในกรณี Fully Developed Turbulent Pipe Flows ในท่อแบบผิวสัมผัสเรียบ (Fox และ McDonald, 1994) พบว่ามีค่า n ประมาณ 6-7 ในช่วง Reynolds Number ที่ทำการทดลอง ซึ่งมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองประมาณ 30%

3.1.2 รูปร่างความเร็วด้านหน้า Orifice

ในการทดลองได้ทำการวัดความเร็วที่หน้าตัดก่อนทางเข้า Orifice เป็นระยะ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เพื่อใช้คำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (Bulk Mean Velocity, \bar{u}) และค่าความดันจลน์เฉลี่ยในแต่ละกรณี โดยใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัด และวัดความเร็วตามแนวการวัด X-X และ Y-Y ตามพิกัดแนววัดที่ตั้งแสดงในรูปที่ 2.16 โดยมีความไม่แน่นอนของค่าความเร็วที่วัดได้ประมาณ $\pm 3\%$ รูปที่ 3.3 (ก) แสดงรูปร่างความเร็วการไหลที่บริเวณหน้า Orifice ในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง) โดยแสดงผลในรูปของความเร็วที่ Normalized ด้วยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}) ซึ่งคำนวณจากรูปร่างความเร็วที่หน้าตัดนี้

จากรูปที่ 3.3 (ก) รูปร่างความเร็วที่ได้ในแต่ละกรณีในแนววัด X-X และ Y-Y (ยกเว้นกรณี NS00 และ NS03) มีลักษณะการกระจายความเร็วที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดท่อ มีค่าความเร็วประมาณ 1.1 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด โดยมีชั้นขอบเขตการไหล (Boundary Layer) ห่างจากผนังท่อประมาณ 15% ของรัศมี ($|r/R| > 0.85$) สำหรับกรณี NS00 และ NS03 พบว่าความเร็วที่วัดได้ในแนว Y-Y ในช่วง $-1 < r/R < -0.6$ มีค่าต่ำกว่ากรณีอื่น แต่อย่างไรก็ตามค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}) ของการไหลในทุกกรณี ซึ่งคำนวณได้จากการอินทิเกรตรูปร่างความเร็วการไหล มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 7.8–8.1 m/s มีค่าแตกต่างกันในแต่ละกรณีไม่เกิน 4% ตาราง 3.1 แสดงค่า \bar{u} ในกรณีต่างๆ

รูปที่ 3.3 (ข) แสดงรูปร่างความเร็วการไหลที่บริเวณด้านหน้า Orifice ในกรณีการไหลที่มีลักษณะการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง) ซึ่งแสดงผลในรูปของความเร็วที่ Normalized ด้วยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}) เช่นเดียวกับรูปที่ 3.3 (ก) จากกราฟพบว่า รูปร่างความเร็วในทุกกรณีมีลักษณะใกล้เคียงกัน มีชั้นขอบเขตการไหลห่างจากผนังท่อทั้งสองด้านประมาณ 20-25% ของรัศมีท่อ ($|r/R| > 0.75-0.8$) ในช่วงนอกชั้นขอบเขตการไหลพบว่าการกระจายความเร็วค่อนข้างสม่ำเสมอ มีค่าความเร็วประมาณ 1.1 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด รูปร่างความเร็วในแต่ละกรณีนำมาคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดพบว่า มีค่าประมาณ 8 m/s มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 3% ในแต่ละกรณี

ในการทดลองได้ควบคุมให้สภาวะการทดลองในแต่ละกรณีมีอัตราการไหลคงที่ ซึ่งจากรูปร่างความเร็วของการไหลด้านหน้า Orifice จะได้ว่า การไหลในทุกกรณีมีความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}) ของการทดลองใกล้เคียงกันประมาณ 8 m/s มีค่าแตกต่างกันในแต่ละกรณีไม่เกิน 4% และค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้สามารถคำนวณหาค่า Reynolds Number (Re_D) ของการทดลองได้เท่ากับ 3.7×10^4 ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อ

3.1.3 รูปร่างความเร็วด้านทางออกท่อหมุน

ในการทดลองกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง) ได้ทำการวัดรูปร่างความเร็วที่ด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$) เพื่อแสดงสภาวะเริ่มต้นของการไหลที่ด้านต้นท่อ (Initial Condition) โดยทำการวัดลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวแกน (u) และความเร็วตามแนวสัมผัส (w) ของการไหลในกรณีต่างๆ ซึ่งในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัดความเร็ว และในกรณีการไหลแบบหมุนวนใช้ Yaw Probe เป็นอุปกรณ์วัดความเร็ว โดยทำการวัดความเร็วในแนว X-X และ Y-Y เช่นเดียวกับการวัดรูปร่างความเร็วที่หน้าตัดหน้า Orifice ในการทดลองมีค่าความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกนที่วัดโดยใช้ Pitot Probe ประมาณ ± 0.2 m/s ($\pm 3\%$) และมีความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกนที่วัดโดยใช้ Yaw Probe ประมาณ ± 0.3 m/s ($\pm 4\%$) และค่าความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวสัมผัสประมาณ ± 0.3 m/s ($\pm 9\%$) โดยมีรายละเอียดการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความเร็วดังแสดงในภาคผนวก ค

รูปที่ 3.4 (ก) แสดงรูปร่างความเร็วตามแนวแกน ซึ่ง Normalized ด้วยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (u/\bar{u}) ที่ค่า Swirl Number ต่างๆ จากรูปพบว่าความเร็วตามแนวแกนที่วัดได้ในกรณีต่างๆ มีลักษณะคล้ายกันในทุก 2 แนววัด (X-X และ Y-Y) มีความหนาของชั้นขอบเขตการไหลห่างจากผนังท่อทั้งสองด้านประมาณ 30-35% ของรัศมีท่อ ($|r/R| > 0.65-0.7$) และมีการกระจายความเร็วที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหลค่อนข้างสม่ำเสมอมีค่าประมาณ 1.1 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด โดยในกรณี NS00, NS03, NS06 และ NS09 มีรูปร่างความเร็วตามแนวแกนที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหลในแต่ละแนววัด (X-X และ Y-Y) ของการไหลแต่ละกรณี แตกต่างกันในแนวรัศมีมากที่สุดไม่เกิน $\pm 9\%$ (ความไม่สม่ำเสมอของรูปร่างความเร็วที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหลในแต่ละกรณีประมาณ $\pm 9\%$) และในกรณี NS12 และ NS18 จะมีรูปร่างความเร็วที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหลในแต่ละแนววัด (X-X และ Y-Y) ของการไหลในแต่ละกรณี แตกต่างกันในแนวรัศมีมากที่สุดประมาณ $\pm 13\%$ (ความไม่สม่ำเสมอของรูปร่างความเร็วประมาณ $\pm 13\%$)

รูปร่างความเร็วตามแนวแกนในแต่ละกรณี นำมาคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดที่ด้านทางออกท่อหมุน (\bar{u}_2) มีค่าในช่วง 7.7-7.8 m/s มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2% ในแต่ละกรณี และมีค่าแตกต่างจากความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลองซึ่งคำนวณจากรูปร่างความเร็วที่ด้านหน้า Orifice (\bar{u}) ไม่เกิน 4% แสดงให้เห็นว่าในการทดลองสามารถควบคุมให้มีอัตราการไหลในแต่ละกรณีใกล้เคียงกันและมีอัตราการไหลคงที่ตลอดช่วงท่อที่ทำการทดลอง (จากหน้าตัดด้านทางออกท่อหมุนจนถึง Orifice)

รูปที่ 3.4 (ข) แสดงรูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัส (w) ในกรณีการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number ต่างๆ จากกราฟพบว่าการไหลในกรณีต่างๆ ที่บริเวณใกล้ผนัง ($|r/R| > 0.8$) มีลักษณะเป็นชั้นขอบเขตการไหล โดยมีค่าความเร็วตามแนวสัมผัสต่ำที่ผนังและมีค่าสูงขึ้นที่

ระยะถัดเข้ามาภายในท่อ ในช่วง $|r/R| < 0.8$ พบว่าความเร็วตามแนวสัมผัสในทุกกรณีมีลักษณะการกระจายตัวเป็นเส้นตรง คล้ายการหมุนของของแข็งรอบแกนท่อ (Solid Body Rotation) โดยมีค่าความเร็วตามแนวสัมผัสสูงที่บริเวณใกล้ผนังและมีความเร็วลดลงที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อตามแนวรัศมี จนมีค่าความเร็วตามแนวสัมผัสประมาณศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อ โดยการไหลในกรณีที่มีค่า Swirl Number สูงกว่าจะมีความชันของกราฟมากกว่ากรณีที่มีค่า Swirl Number ต่ำกว่า

รูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสในแต่ละกรณีนำมาคำนวณความเร็วเชิงมุมของการหมุนวนของการไหลได้จากการ Fit สมการเส้นตรง เพื่อหาความชันของกราฟในช่วง $|r/R| < 0.5$ ได้ค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุมของรูปร่างความเร็วในแนว X-X และ Y-Y แสดงดังตาราง 3.2 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความเร็วเชิงมุมของท่อหมุน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 7%

รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสที่ Normalized ด้วยความเร็วที่ผิวสัมผัสของท่อหมุนในแต่ละกรณี (w/W_R) จากรูปพบว่าค่า w/W_R ที่แต่ละ Swirl Number มีค่าใกล้เคียงกัน มีลักษณะการกระจายความเร็วเป็นเส้นตรงตามแนวรัศมี โดยที่บริเวณผนังทั้งสองด้านพบว่ามีค่าความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุดประมาณ 0.8-1.1 เท่าของความเร็วที่ผิวสัมผัสท่อหมุน และที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อตามแนวรัศมี w/W_R จะมีค่าลดลงจนมีค่าประมาณศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อ จากกราฟพบว่าค่า w/W_R ในแต่ละกรณีมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของท่อหมุน ซึ่ง Normalized ด้วยความเร็วผิวสัมผัสท่อ แสดงให้เห็นว่าการไหลในทุกกรณีมีลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสใกล้เคียงกับความเร็วในการหมุนของท่อหมุน และมีลักษณะการกระจายความเร็วเป็น Solid Body Rotation

จากผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของการไหล (Initial Condition) พบว่าการไหลในแต่ละกรณีมีลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวแกนใกล้เคียงกัน คือมีชั้นขอบเขตการไหลที่บริเวณผนังท่อแต่ละด้านหนาประมาณ 30-35% ของรัศมีท่อ และมีการกระจายความเร็วที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหลค่อนข้างสม่ำเสมอ สำหรับลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวสัมผัส พบว่าการไหลในทุกกรณีมีการกระจายความเร็วเป็นเส้นตรงแบบ Solid Body Rotation โดยมีความชันของกราฟแตกต่างกันตามค่า Swirl Number ของการไหลและมีการกระจายความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของท่อหมุน

3.1.4 รูปร่างความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน

ในการทดลองได้ทำการวัดรูปร่างความดันรวมของการไหล ที่หน้าตัดหลังตำแหน่งติดแผ่นกีดขวางเป็นระยะ $0.5D$ ($X/D = 0.5$) เพื่อแสดงสภาวะเริ่มต้นของการไหลที่ด้านต้นท่อ ในกรณีติดและไม่ติดแผ่นกีดขวางการไหล โดยใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัด และทดลองวัดค่าความดันแตกต่างระหว่างค่าความดันที่ Probe เทียบกับความดันอ้างอิง (P_{ref} , ค่าความดันสถิต

ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ ที่หน้าตัด $X/D = 0.5$) โดยทำการวัดค่าความดันรวมในแนววัด X-X และ Y-Y ผลการทดลองได้แสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความดันรวม C_{PT} ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{PT} = \frac{P_T - P_{ref'}}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ P_T เป็นค่าความดันรวมที่อ่านจาก Pitot Probe
 $P_{ref'}$ เป็นค่าความดันอ้างอิงซึ่งเป็นความดันสถิตที่ตำแหน่ง $X/D = 0.5$, มุม $\psi = 0^\circ$
 $\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$ เป็นความดันจลน์เฉลี่ยของการทดลอง ซึ่งคำนวณจากความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (\bar{u})

รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการกระจายความดันรวมของการไหล ในกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวางที่ด้านต้นท่อก จากรูปพบว่าในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00) ที่บริเวณใกล้ผนัง ($|r/R| > 0.7$) ความดันรวมมีค่าต่ำที่ผนังเนื่องจากเป็นบริเวณชั้นขอบเขตการไหล และมีค่าสูงขึ้นที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อ ในช่วง $|r/R| < 0.7$ พบว่าการไหลมีความดันรวมสม่ำเสมอโดยมีค่า C_{PT} ประมาณ 1.2 ตลอดความยาวช่วง โดยค่า C_{PT} ที่มีค่ามากกว่า 1 เป็นผลจากการใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดในการ Normalized ค่าความดันรวมแทนการใช้ค่าความเร็วที่แต่ละตำแหน่ง ซึ่งความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการไหลจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วในบริเวณกลางท่อเนื่องจากมีชั้นขอบเขตการไหล

ในกรณี NS03 ที่บริเวณใกล้ผนัง ($|r/R| > 0.7$) พบว่า C_{PT} มีค่าต่ำสุดที่ผนังและมีค่าสูงขึ้นที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อตามแนวรัศมี ในช่วง $|r/R| < 0.7$ พบว่า C_{PT} มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยมีค่าประมาณ 1.2 ตลอดช่วง ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการไหลมีลักษณะการกระจาย C_{PT} ใกล้เคียงกับกรณี NS00 แสดงให้เห็นว่าสำหรับการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 0.3 ความเร็วหมุนวนมีผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายความดันรวมของการไหล

กรณี NS06 พบว่าที่บริเวณใกล้ผนัง ($|r/R| > 0.7$) ค่า C_{PT} จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่ผนังจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง r/R ประมาณ ± 0.7 จากนั้นที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อตามแนวรัศมี C_{PT} จะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่บริเวณจุดศูนย์กลางท่อ มีค่า C_{PT} ประมาณ 0.9 โดยในกรณีนี้จะเริ่มเห็นผลของการไหลแบบหมุนวนต่อลักษณะการกระจายค่า C_{PT} ชัดเจนขึ้น

สำหรับการไหลที่ค่าความเร็วหมุนวนอื่น (NS09, NS12 และ NS18) พบว่ามีลักษณะการกระจายความดันรวมนอกชั้นขอบเขตการไหลคล้ายกรณี NS06 โดยมีค่า C_{PT} ลดลงตั้งแต่ระยะ r/R ประมาณ $\pm 0.75-0.8$ จนมีค่า C_{PT} ต่ำสุดที่บริเวณจุดศูนย์กลางท่อ โดยเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้นพบว่า ค่า C_{PT} ต่ำสุดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อจะมีค่าลดลง อัตรา

การเพิ่มขึ้นของค่า C_{PT} ตามแนวรัศมีจะมีค่าสูงขึ้น และตำแหน่งของค่า C_{PT} ต่ำสุดในแต่ละกรณีจะเลื่อนเข้าไปใกล้ผนังท่อมากขึ้น ซึ่งในกรณี NS18 จะมีค่า C_{PT} ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อต่ำกว่าทุกกรณี โดยมีค่าประมาณ -1.5

จากการกระจายตัวของความดันรวมซึ่งแสดงด้วยค่า C_{PT} นี้ เมื่อนำมาพิจารณาวิเคราะห์การไหลแบบหมุนวน โดยสมมติให้การไหลเป็นการไหลแบบหมุนวนแบบสมมาตรตามแนวแกนที่มีความเร็วตามแนวแกน (u) สม่่าเสมอเท่ากับ U_C ($u = U_C$) และมีความเร็วตามแนวสัมผัสเป็นแบบ Solid Body Rotation ($w = \omega r$) (ดังแสดงผลในรูปที่ 3.4 และ 3.5) จะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันสถิตตามแนวรัศมีท่อ มีความสัมพันธ์กับความเร็วมุมตามแนวสัมผัสและระยะทางตามแนวรัศมีท่อตามสมการ 3.3

$$\frac{dP}{dr} = \rho \frac{w^2}{r} = \rho \omega^2 r \quad (3.3)$$

ซึ่งสามารถนำมาอินทิเกรตเพื่อหาค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมีท่อ ได้คือ

$$P(r) = P_C + \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \quad (3.4)$$

- เมื่อ $P(r)$ เป็นความดันสถิตที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมีท่อ
 P_C เป็นความดันสถิตที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อ
 r เป็นตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีท่อ
 ρ เป็นความหนาแน่นของของไหล
 ω เป็นความเร็วเชิงมุมของการหมุนวนของการไหล

จากสมการ (3.4) พบว่าความดันสถิตจะมีค่าต่ำสุดที่จุดศูนย์กลางท่อ และมีค่าเพิ่มขึ้นที่ระยะห่างออกจากจุดศูนย์กลางท่อไปตามแนวรัศมี โดยมีค่าแปรผันตามกำลังสองของระยะทางตามแนวรัศมี (r^2) และเมื่อนำสมการนี้มาจัดรูปใหม่โดยพยายามจัดให้อยู่ในรูปของค่าความดันรวม $P_T(r)$ ที่ตำแหน่ง r ใดๆ จะได้ว่า

$$P_T(r) = P(r) + \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) = P_C + \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 + \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2)$$

หรือ

$$P_T(r) = P_C + \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho \omega^2 r^2 \quad (3.5)$$

โดยความดันรวมที่จุดศูนย์กลางท่อ $P_{TC} = P_T(r=0)$ จะมีค่าเป็น

$$P_{TC} = P_C + \frac{1}{2} \rho U_C^2$$

ดังนั้นจากสมการ (3.5) เมื่อ $u = U_C$ จะได้ว่า

$$P_T(r) = P_{TC} + \rho \omega^2 r^2 \quad (3.6)$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปของค่า C_{PT} เมื่อนิยาม $C_{PT} = \frac{P_T - P_{ref}}{1/2 \rho u^2}$ ได้เป็น

$$C_{PT}(r) = C_{PTC} + 2 \left(\frac{\omega r}{u} \right)^2 \quad (3.7)$$

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการวัดความดันรวม โดย Pitot Probe จะพบว่าในการประมาณขั้นต้น (First-Order Approximation) ถ้าสมมติให้ความดันรวมที่อ่านค่าได้ที่ Pitot Probe ตอบสนองต่อองค์ประกอบของความดันจลน์ที่เกิดจากความเร็วดำเนินตามแนวแกน (u) เท่านั้น ดังนั้นจะได้ค่าความดันรวมที่อ่านจาก Pitot Probe $P_T(r)$ มีค่าเท่ากับ $P_T'(r)$ โดย

$$P_T'(r) = P(r) + \frac{1}{2} \rho u^2 = P(r) + \frac{1}{2} \rho U_C^2 \quad (3.8)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.4) จะได้ว่า

$$P_T'(r) = P_{TC} + \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปของค่า C_{PT}' ได้เป็น

$$C_{PT}'(r) = C_{PTC} + \left(\frac{\omega r}{u} \right)^2 \quad (3.9)$$

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า C_{PT}' ที่อ่านได้จาก Probe ตามสมการ (3.9) กับค่า C_{PT} ของความดันรวมจริงตามสมการ (3.7) พบว่าค่า C_{PT}' ที่อ่านได้จาก Probe จะมีค่าน้อยกว่าค่า C_{PT} จริงอยู่เท่ากับ $\left(\frac{\omega r}{u} \right)^2$

ดังนั้นถ้านำสมการ (3.9) มาคำนวณหาค่า C_{PT}' ที่อ่านได้จาก Probe ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยแทนค่าความดันรวมที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อ (C_{PTC}) ที่ได้จากการวัด และใช้ค่าความเร็วเชิงมุมของการหมุนวนของการไหลที่คำนวณจากรูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัส และค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}) จากแต่ละกรณี จะได้ค่า C_{PT}' จากสมการ (3.9) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.6 จากกราฟพบว่าที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหลในช่วง $|r/R| < 0.7$ ค่า C_{PT}' ที่คำนวณได้จากสมการ (3.9) จะมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการวัด อย่างไรก็ตามการประมาณให้ Pitot Probe ตอบสนองต่อความดันจลน์เฉพาะในทิศทางของความเร็วตามแนวแกน (u) เท่านั้นจะทำให้มีความคลาดเคลื่อนไปได้เล็กน้อยดังแสดงในกราฟ

รูปที่ 3.7 แสดงรูปร่างความดันรวมของการไหลที่หน้าตัดหลังแผ่นกีดขวาง เป็นระยะ 0.5D รูปที่ 3.7 (ก) แสดงรูปร่างความดันรวมในแนวการวัด X-X ที่ค่า Swirl Number ต่างๆ จากกราฟในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00T) ที่บริเวณใกล้ผนัง ($|(r/R)_{X-X}| > 0.8$) ค่า C_{PT} มีค่าต่ำเนื่องจากเป็นชั้นขอบเขตการไหล และมีค่า C_{PT} สูงขึ้นที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อ โดยในช่วง $|(r/R)_{X-X}| < 0.8$ พบว่ามีการกระจายค่า C_{PT} แตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีค่า C_{PT} อยู่ในช่วง 2.1-2.5 ซึ่งค่า $P_T - P_{ref'}$ ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าความดันจลน์เฉลี่ยของการไหลถึงประมาณ 2.1-2.5 เท่านั้น สันนิษฐานว่าเป็นผลจากการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง ที่เร่งความเร็วสูงขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดการไหลน้อยลง ทำให้ความดันอ้างอิง ($P_{ref'}$) ของการวัดความดันรวมซึ่งเป็นความดันสถิตที่หน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวางมีค่าลดลง และทำให้ค่าความดันรวม ($P_T - P_{ref'}$) ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่ากรณีการไหลที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง

สำหรับการไหลที่มีการหมุนวน กรณี NS03T ที่บริเวณใกล้ผนัง ($|r/R| > 0.8$) ค่า C_{PT} มีค่าต่ำเนื่องจากผลของชั้นขอบเขตการไหล และมีค่าสูงขึ้นที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อ โดยในช่วง $0.25 < (r/R)_{X-X} < 0.75$ พบว่ามีค่า C_{PT} ต่ำกว่าค่าในช่วงที่เหลือ ($-0.8 < (r/R)_{X-X} < -0.25$) โดยมีค่า C_{PT} ต่ำสุดที่ระยะ $(r/R)_{X-X}$ ประมาณ 0.3 และมีค่า C_{PT} ต่ำสุดแตกต่างจากค่าในแนววัดเดียวกันประมาณ 1

สำหรับกรณีการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number อื่นๆ จะมีลักษณะการกระจายความดันรวมคล้ายกับกรณี NS03T โดยในบริเวณครึ่งด้านหนึ่งของหน้าตัดท่อ ($(r/R)_{X-X} > 0$) จะมีค่า C_{PT} ลดลงต่ำกว่าค่าในครึ่งด้านที่เหลือ โดยเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น พบค่า C_{PT} ต่ำสุดจะมีค่าลดลง มีความแตกต่างค่า C_{PT} ในแนววัดเดียวกันเพิ่มขึ้น และมีตำแหน่ง C_{PT} ต่ำสุดเลื่อนมาทางผนังท่อมากขึ้น โดยในกรณี NS18T พบว่ามีตำแหน่ง C_{PT} ต่ำสุดที่ระยะ $(r/R)_{X-X}$ ประมาณ 0.8 และมีค่า C_{PT} ต่ำสุดแตกต่างจากค่าในแนววัดเดียวกันมากกว่าทุกกรณี โดยมีค่าแตกต่างประมาณ 8 ซึ่งความแตกต่างของค่า C_{PT} ในแนววัดเดียวกันที่มีค่าเพิ่มขึ้นนี้ เป็นผลจากการสูญเสียความดันรวมจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่มีค่ามากขึ้น เนื่องจากความเร็วปะทะแผ่นกีดขวาง ($\bar{u} + \bar{w}$) ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น

การที่ C_{PT} มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่า Swirl Number ดังกล่าวข้างต้น สามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาการไหลดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยเมื่อมีแผ่นกีดขวางขวางการไหล จะเกิด

Wake ขึ้นที่บริเวณด้านหลังแผ่นกีดขวางที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดท่อ ($\psi = 180^\circ$) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความดันรวมต่ำ โดย Wake นี้จะถูกพา (Convect) ไปตามการไหลในแนวแกนท่อ และหมุนไปตามการหมุนวนของการไหล ซึ่งเมื่อประมาณมุมกวาด ($d\psi$) ที่หมุนไปในระยะทางการไหล $0.5D$ ด้วยการสมมติให้ Wake ของการไหลหมุนไปด้วยความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุดที่บริเวณผนังท่อ จะได้มุมกวาดของการไหลที่ค่า Swirl Number ต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 3.3 และแสดงตำแหน่งด้วยเส้นประในรูป 3.8 ซึ่งพบว่าเมื่อมีการไหลจากตำแหน่งติดแผ่นกีดขวางมาที่ตำแหน่งการวัด ($X/D = 0.5$) บริเวณความดันรวมต่ำนี้จะเคลื่อนที่เข้ามาสู่ตำแหน่งของ Probe ตามแนวแกน X-X มากขึ้น โดยในกรณี NS18T ของไหลความดันรวมต่ำที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดท่อ จะสามารถหมุนไปได้เป็นมุมประมาณ 100 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับตำแหน่งของ Pitot Probe ในแนวการวัด X-X ส่งผลให้ค่าความดันรวมที่วัดได้มีค่าต่ำในช่วง $(r/R)_{X-X} > 0$

รูปที่ 3.7 (ข) แสดงรูปร่าง C_{PT} ในแนววัด Y-Y พิจารณากรณี NS00T พบว่าที่ด้านล่างของหน้าตัดท่อในช่วง $(r/R)_{Y-Y} < -0.25$ ค่า C_{PT} จะมีค่าต่ำสุด เนื่องจากความดันลดที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง ถัดมาในช่วง $-0.25 < (r/R)_{Y-Y} < 0.1$ ค่า C_{PT} จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในช่วงที่เหลือ ($(r/R)_{Y-Y} > 0.1$) C_{PT} จะมีค่าประมาณคงที่ตลอดแนววัด ซึ่งเมื่อพิจารณาบริเวณที่มีความดันรวมต่ำที่สุดในกรณี NS00T พบว่าบริเวณ C_{PT} ต่ำสุดมีค่า C_{PT} แตกต่างจากค่าในแนววัดเดียวกันประมาณ 3.3 และมีบริเวณความดันรวมต่ำสูงจากผนังท่อด้านล่างประมาณ $3/4$ เท่าของรัศมีท่อ ซึ่งมากกว่าความสูงของแผ่นกีดขวางที่มีค่า 0.5 เท่าของรัศมีท่อ แสดงให้เห็นว่า Wake มีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็วตามระยะทางการไหลในท่อ ($0.5D$ จากแผ่นกีดขวาง)

สำหรับกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวน กรณี NS03T พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{PT} ใกล้เคียงกับกรณี NS00T แสดงให้เห็นว่าขนาดความเร็วหมุนวนที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 0.3 มีผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายความดันรวมที่ด้านหลังแผ่นกีดขวาง ดังเช่นปรากฏผลคล้ายกันในกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวางในรูป 3.6 อย่างไรก็ตามผลของแผ่นกีดขวางและการหมุนวนนี้จะปรากฏเด่นชัดขึ้นเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number ≥ 0.6 โดยกรณี NS06T ในช่วง $(r/R)_{Y-Y} = 0.1-0.75$ ค่า C_{PT} จะมีค่าลดลงจากค่าในกรณี NS00T และจะมีค่า C_{PT} ที่บริเวณนี้ลดลงมากขึ้นเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงทิศทางการหมุนวนไปของ Wake ด้านหลังแผ่นกีดขวางจากบริเวณด้านล่างของหน้าตัดท่อสู่บริเวณด้านบน ทำให้ความดันรวมที่วัดได้ที่บริเวณด้านบนของหน้าตัดท่อมียค่าลดลง

รูปร่างความดันรวมที่วัดได้ที่หน้าตัดหลังตำแหน่งติดแผ่นกีดขวางแสดงถึงสภาวะเริ่มต้นของการทดลอง (Initial Condition) โดยในกรณีที่ไม่มีติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล การกระจายความดันรวมมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน และมีค่าความดันรวมในแต่ละกรณีแตกต่างกันขึ้นกับความเร็วหมุนวนของการไหล ส่วนในกรณีที่ติดแผ่นกีดขวาง การกระจายความดันรวมในแต่ละครั้งด้านของแนว X-X และ Y-Y มีรูปร่างแตกต่างกันแสดงถึงการกระจายความดันรวมที่มีลักษณะไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยพบบริเวณความดันรวมต่ำในบริเวณที่เป็น Wake ซึ่งเกิด

ขึ้นที่ด้านหลังแผ่นกีดขวางที่มีแนวโน้มที่จะถูกพาให้หมุนวนไปตามการหมุนวนของการไหล ทำให้รูปร่างความดันรวมที่วัดได้ในการไหลแต่ละกรณีมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่า Swirl Number

3.2. การกระจายความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง)

ในการแสดงผลของลักษณะการกระจายความดันสถิตของการไหลที่แต่ละหน้าตัด จะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{Pref} = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2} \quad (3.10)$$

เมื่อ P เป็นความดันสถิตที่ตำแหน่งวัดต่างๆ
 P_{ref} เป็นความดันสถิตอ้างอิงเฉพาะหน้าตัด ซึ่งเป็นค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ ของแต่ละหน้าตัด
 $\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$ เป็นความดันจลน์เฉลี่ยของการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) นี้เป็นปริมาณไร้มิติที่แสดงถึงความแตกต่างของความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม ψ ต่างๆกับค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ ในหน้าตัดเดียวกัน ดังนั้นค่า C_{Pref} จึงบ่งชี้ถึงค่าความเบี่ยงเบนของความดันสถิตที่ตำแหน่งนั้นจากค่าความดันสถิตอ้างอิงโดยแสดงค่าเป็นอัตราส่วนของความดันจลน์เฉลี่ยของการไหล

3.2.1 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref})

รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{Pref} ที่ตำแหน่งมุม ψ ต่างๆ โดยแสดงผลในรูป Polar Plot ที่หน้าตัด X/D ต่างๆ ตามระยะทางการไหล ผลการทดลองมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของการวัดไม่เกิน ± 0.05 ในทุกกรณีของการไหล (Swirl Number = 0.0-1.8) ดังนั้นจึงกำหนดให้การไหลในหน้าตัดใดๆมีการกระจายตัวของความดันสถิตสม่ำเสมอ เมื่อในหน้าตัดนั้นมีการกระจายค่า C_{Pref} อยู่ภายในช่วง ± 0.05

จากกราฟพบว่าที่หน้าตัดแรก ($X/D = 0.5$) การไหลในทุกกรณี (ยกเว้นกรณี NS09) มีค่า C_{Pref} ที่ตำแหน่งมุม ψ ต่างๆ อยู่ภายใน ± 0.05 แสดงให้เห็นว่าการไหลที่ออกจากท่อหมุนมีลักษณะการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด สำหรับกรณี NS09 พบว่ามี

ความไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยมีค่า C_{Pref} น้อยที่สุดประมาณ -0.18 ซึ่งคาดว่าเกิดจากการสะดุดของการไหลในท่อ อย่างไรก็ตามความไม่สม่ำเสมอนี้จะสลายตัวไปภายใน 2.5D ดังจะเห็นได้ว่าตั้งแต่ระยะ $X/D = 2.5$ เป็นต้นไป การไหลในทุกกรณีจะมีค่าความผันผวนที่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด โดยมีค่า C_{Pref} อยู่ในช่วง ± 0.05 และในการทดลองเมื่อการไหลมีการกระจายความผันผวนที่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด ได้ทำการวัดค่าความผันผวนที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ เพียงตำแหน่งเดียวเพื่อใช้แทนค่าความผันผวนที่หน้าตัด โดยใช้เส้นทึบแสดงการกระจายความผันผวนแทนการใช้สัญลักษณ์บนกราฟ ดังแสดงในกราฟตั้งแต่หน้าตัด $X/D = 5.5$ เป็นต้นไป

3.2.2 การกระจายความผันผวนเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref'}}$) ตามระยะทางการไหล

ในการพิจารณาลักษณะการกระจายความผันผวนตามระยะทางการไหลของการไหลที่ค่า Swirl Number ต่างๆ ได้นิยามสัมประสิทธิ์ความผันผวนเฉลี่ยที่หน้าตัดต่างๆ ($\overline{C_{Pref'}}$) โดยทำการเฉลี่ยค่าความผันผวนทุกๆตำแหน่งวัดในหน้าตัดเดียวกัน ดังแสดงตามสมการ (3.11) และพล็อตค่าความผันผวนเฉลี่ยที่หน้าตัดต่างๆ ตามระยะทางการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.10

$$\overline{C_{Pref'}} = \frac{\sum \frac{(P - P_{ref'})}{1/2\rho u^2}}{N} \quad (3.11)$$

เมื่อ $P_{ref'}$ เป็นความดันอ้างอิงซึ่งให้เป็นค่าความผันผวนที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ ที่หน้าตัด $X/D = 0.5$
 N เป็นจำนวนจุดวัดความผันผวนที่แต่ละหน้าตัด

จากรูปที่ 3.10 พบว่าค่า $\overline{C_{Pref'}}$ ในทุกกรณีมีค่าลดลงตามระยะทางการไหลเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลที่ผนังท่อ โดยในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00) พบว่าความผันผวนเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref'}}$) มีค่าลดลงตามระยะทางการไหลอย่างเป็นเชิงเส้น สำหรับกรณี NS03 และ NS06 พบว่ามีการกระจายความผันผวนเฉลี่ยตามระยะทางการไหลคล้ายกับกรณี NS00 โดยในช่วงต้นของการไหล ($X/D < 40$) พบว่าความชันของกราฟซึ่งแสดงถึงอัตราการสูญเสียความผันผวนต่อระยะทางการไหลในกรณี NS06 จะมีค่ามากกว่ากรณี NS03 และมากกว่ากรณี NS00 ตามลำดับ และในระยะถัดออกไป ($X/D > 40$) การไหลในกรณี NS00, NS03 และ NS06 จะมีความชันของกราฟหรือมีอัตราการสูญเสียความผันผวนต่อระยะทางการไหลใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอัตราการสูญเสียความผันผวนของการไหลขึ้นอยู่กับขนาดของความเร็วหมุนวน โดยการไหลที่มีความเร็วในการหมุนวนสูงกว่าจะมีอัตราการสูญเสียความผันผวนตามระยะทางการไหลในท่อมักกว่ากรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า ซึ่ง

จากกราฟในกรณี NS03 และ NS06 พบว่าในช่วงต้นของการไหลซึ่งยังมีความเร็วหมุนวนในแต่ละกรณีสูงอยู่ จะมีอัตราการลดลงของความดันสถิตต่อระยะทางการไหลในกรณี NS06 มากกว่ากรณี NS03 และมากกว่ากรณี NS00 ตามลำดับ และในช่วงท้ายของการไหลซึ่งความเร็วหมุนวนของการไหลได้ปรับตัวและสลายตัวไปจนเหลือค่าน้อยแล้วนั้น การไหลในกรณี NS00, NS03 และ NS06 จะมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากันในแต่ละกรณี แสดงให้เห็นว่าการไหลได้มีการปรับตัวจนเข้าสู่ภาวะ Fully Developed Pipe Flows

สำหรับการไหลในกรณี NS09, NS12 และ NS18 พบว่าในช่วงต้นของการไหลที่ออกจากร่องท่อ ($X/D < 10$) ซึ่งยังคงมีความเร็วหมุนวนสูงอยู่ จะมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลสูงกว่าบริเวณอื่น และในช่วงการไหลถัดไปจะมีอัตราการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยต่ำลง เนื่องจากการไหลมีการสลายตัวไปของความเร็วหมุนวนไปตามระยะทางการไหล ดังจะเห็นได้ว่ากราฟมีความชันลดลงจนมีค่าน้อยกว่าความชันของกราฟในช่วงต้น และในช่วงท้ายของการไหลตั้งแต่ระยะ X/D ประมาณ 30-40 เป็นต้นไปการไหลในทุกกรณีจะมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลค่อนข้างเป็นเชิงเส้น โดยในกรณี NS18 จะมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะทางการไหลมากที่สุด และมากกว่ากรณี NS12 และ NS09 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.10 เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันสถิตเฉลี่ยตามทิศทางการไหล พบว่าในกรณีการไหลแบบหมุนวน การพัฒนาการไหลอาจแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณ (1) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยอย่างรวดเร็วและลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถพบได้ในช่วงต้นของการไหล (ประมาณ 10 D แรก) ที่ออกจากร่องท่อนวนในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวนสูง (NS09, NS12 และ NS18) ถัดมาที่บริเวณ (2) เป็นบริเวณที่การไหลมีอัตราการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยลดลง และมีการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยลดลงตามระยะทางการไหลประมาณเป็นเชิงเส้น โดยพบว่าในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวนสูงกว่าจะมีอัตราการลดลงของค่าความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลสูงกว่ากรณีที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า และระยะถัดออกไปเป็นบริเวณ (3) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วหมุนวนของการไหลสลายตัวจนหมดไป และการไหลมีการปรับตัวจนเข้าสู่ภาวะ Fully Developed Pipe Flow โดยเป็นบริเวณซึ่งมีการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลเป็นเส้นตรง และมีอัตราการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลเท่ากันในแต่ละกรณี ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า การสลายตัวของความเร็วหมุนวนของการไหลน่าจะเป็นไปอย่างรวดเร็วในบริเวณ (1) แต่ยังคงมีค่าแต่ต่ำอยู่ในบริเวณ (2)

เมื่อ Fit สมการเส้นตรงในช่วง $X/D = 41-76$ จะได้ความชันของกราฟหรืออัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะ X/D ($\frac{\Delta \overline{C_{Pref}}}{\Delta(X/D)}$) ดังแสดงตามตาราง 3.4 พบว่าการไหลในทุกกรณีสามารถ Fit สมการเส้นตรงได้ค่อนข้างดี และมีค่า R^2 ของการ Fit สมการในทุกกรณี

ประมาณ 0.998–0.999 โดยค่าความชันของกราฟที่ได้จะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหล (Friction Factor, f) ดังแสดงตามสมการ (3.12)

$$\begin{aligned} \frac{\overline{\Delta C_{Pref'}}}{\Delta(X/D)} &= \Delta \frac{(P - P_{ref'})}{\frac{1}{2} \rho u^2} \times \frac{1}{L/D} \\ &= \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right) \frac{2}{u^2} \times \frac{1}{L/D} \\ &= h_l \frac{2}{u^2} \times \frac{1}{L/D} \\ &= f \quad \left(\text{from } h_l = f \frac{L}{D} \frac{u^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

จากตาราง 3.4 พบว่าในกรณี NS00, NS03 และ NS06 ในช่วง $X/D = 41-76$ จะมีค่า Friction Factor (f) ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าในช่วง 0.0236-0.0247 แตกต่างกันไม่เกิน 5% ในแต่ละกรณี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการไหลมีสลายตัวไปของความเร็วหมุนวนและมีการปรับตัวจนเข้าสู่สภาวะ Fully Developed Pipe Flow สำหรับการไหลในกรณีที่มีค่า Swirl Number สูงกว่า (NS09, NS12 และ NS18) พบว่าในช่วง $X/D = 41-76$ ยังสามารถพบผลของการไหลแบบหมุนวนต่อลักษณะการสูญเสียความดันสถิตตามระยะทางการไหลอยู่ โดยมีค่า f ในกรณี NS18 มากกว่ากรณี NS12 และมากกว่ากรณี NS09 ตามลำดับ และในกรณี NS18 ซึ่งมีค่า f มากกว่าทุกกรณี จะมีค่า f มากกว่ากรณี NS00 ประมาณ 44%

อย่างไรก็ตามที่ระยะทางยาวพอ การไหลในทุกกรณีจะปรับตัวจนความเร็วหมุนวนของการไหลสลายตัวจนหมดไป และเข้าสู่สภาวะ Fully Developed Flow ในท่อ โดยการไหลจะมีลักษณะการกระจายความดันสถิตเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากันในแต่ละกรณี ซึ่งพบว่าในกรณี NS18 ต้องใช้ระยะทางมากกว่า $70D$ ในการสลายตัวความเร็วหมุนวนและปรับสภาวะการไหลให้เข้าสู่สภาวะ Fully Developed Flow นอกจากนี้ในช่วงท้ายของการไหล ผลของสภาวะเริ่มต้นของการไหล (Initial Condition) ซึ่งมีขนาดความเร็วหมุนวนต่างกันจะยังมีผลตกค้างอยู่ โดยการไหลในกรณีที่มีค่า Swirl Number สูงกว่าจะมีค่า $\overline{C_{Pref'}}$ ต่ำกว่ากรณีที่มีค่า Swirl Number ต่ำกว่า โดยที่ระยะ X/D เท่ากับ 76 พบว่าในกรณี NS18 มีค่า $\overline{C_{Pref'}}$ ต่ำกว่ากรณี NS00 ประมาณ 2 ซึ่งความแตกต่างของค่า $\overline{C_{Pref'}}$ นี้จะแสดงถึงผลของการสูญเสียความดันสถิตตามระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วหมุนวนของการไหล

โดยเมื่อหาผลต่างของค่าความดันสถิตเฉลี่ยที่ตำแหน่ง X/D เท่ากับ 76 ระหว่างกรณีต่างๆกับการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00) และกำหนดให้ผลต่างนี้แสดงถึง Minor Loss ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วหมุนวนของการไหล จะได้สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (K , Minor Loss) แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งสามารถ Fit สมการโพลีโนเมียลกำลังสองได้ตามสมการ

$K = 0.628Ns^2 - 0.0965Ns + 0.166$ โดยมีค่า R^2 ของการ Fit สมการเท่ากับ 0.999 ซึ่งเมื่อพิจารณาว่าในการหาค่า K นี้ได้ทำการหาผลต่างของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ระหว่างกรณีการไหลแบบหมุนวนจากกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00) ซึ่งจากรูปร่างความเร็วในกรณี NS00 ที่วัดได้ที่ด้านต้นท่อ $X/D = 0.5$ (รูปที่ 3.4) จะเห็นได้ว่าการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุนวนมีลักษณะการกระจายความเร็วที่ค่อนข้างสม่ำเสมอที่บริเวณกลางท่อ แสดงให้เห็นว่าที่ด้านต้นท่อการไหลในกรณี NS00 จะยังไม่เข้าสู่สภาวะ Fully Developed Pipe Flow และจะมีการสูญเสียความดันสถิตที่เพิ่มขึ้นในช่วง Entrance Length ของการไหลที่มีการปรับตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะ Fully Developed Pipe Flow ดังนั้นค่าคงที่เท่ากับ 0.166 ที่ได้จากการ Fit สมการค่า K จึงน่าจะเป็นผลของ Entrance Length ของการไหล ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่า Minor Loss ของการไหลแบบหมุนวนที่เพิ่มขึ้นจากกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนที่สภาวะ Fully Developed Pipe Flow จะได้ความสัมพันธ์ของค่า Minor Loss (K) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองของค่า Swirl Number (Ns) ตามสมการ (3.13)

$$K = 0.628Ns^2 - 0.0965Ns \quad (3.13)$$

3.3. การกระจายความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง)

ในกรณีการไหลที่มีลักษณะการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนได้ทำการติดแผ่นกีดขวาง ขวางการไหลที่หน้าตัด $X/D = 0$ และทำการวัดลักษณะการกระจายความดันสถิตของการไหลด้วยแผ่นกีดขวาง ในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวนต่างๆ โดย มีผลทดลองแสดงดังต่อไปนี้

3.3.1 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) กรณี NS00T, NS03T และ NS06T

รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะการกระจาย C_{Pref} ที่หน้าตัดต่างๆ ในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00T) และการไหลแบบหมุนวนที่มีค่า Swirl Number เท่ากับ 0.3 (NS03T) และ 0.6 (NS06T) จากรูปที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($X/D = 0.5$) ในกรณี NS00T พบว่าค่า C_{Pref} ที่ตำแหน่งมุม ψ ต่างๆ มีค่าต่ำกว่าค่าที่ตำแหน่งบนสุดของหน้าตัดท่อ ($\psi = 0^\circ$) โดยมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่บริเวณด้านบนของหน้าตัดท่อจนมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งหลังแผ่นกีดขวางที่บริเวณมุม $\psi = 180^\circ$ โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.7 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า C_{Pref} ต่ำสุดในกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง (NS00) อย่างชัดเจน ซึ่งมีค่าประมาณ -0.05 แสดงให้เห็นว่า

ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตที่เกิดขึ้นในกรณี NS00T เป็นผลจากแผ่นกีดขวางที่ติดขวางการไหล

ที่หน้าตัดเดียวกัน ($X/D = 0.5$) ในกรณี NS03T รูปร่างการกระจายความดันสถิตมีลักษณะแตกต่างไปจากกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00T) โดย Wake ที่เกิดขึ้นด้านหลังแผ่นกีดขวางจะหมุนไปตามการหมุนวนของการไหล ทำให้มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 210^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.8 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า C_{Pref} ในกรณี NS00T เล็กน้อย สำหรับกรณี NS06T มีการกระจายความดันสถิตคล้ายกับกรณี NS03T โดยมีตำแหน่งมุม ψ ที่มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณเท่ากัน และมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดใกล้เคียงกัน

ที่หน้าตัดถัดไป ($X/D = 1.0$) ในกรณี NS00T การไหลจะมีการปรับตัวลักษณะการกระจายความดันสถิตให้มีความสม่ำเสมอในหน้าตัดมากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยค่า C_{Pref} ต่ำสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ -0.3 และจะมีการปรับตัวการกระจายความดันสถิตไปตามระยะทางการไหลจนมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดตั้งแต่ระยะ $X/D = 3.0$ เป็นต้นไป โดยมีค่า $C_{Pref} \leq 0.05$

ส่วนการไหลในกรณี NS03T ตั้งแต่หน้าตัด $X/D = 1.0$ ไม่สามารถสังเกตการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำได้ชัดเจน เนื่องจากการไหลมีการปรับตัวทำให้ลักษณะการกระจายความดันสถิตมีความสม่ำเสมอในหน้าตัดมากขึ้น โดยจะมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดตั้งแต่ระยะ $X/D = 5.0$ เป็นต้นไป

อย่างไรก็ตามกรณี NS06T จะยังสามารถพบการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวาง โดยที่หน้าตัด $X/D = 1.5$ สามารถพบการหมุนวนไปของค่า C_{Pref} ต่ำสุดไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 225^\circ$ และที่หน้าตัด $X/D = 2.0$ ค่า C_{Pref} ต่ำสุดจะหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 255^\circ$ โดยการไหลจะมีการปรับตัวให้มีขนาดความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดลดลง จนมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดตั้งแต่ระยะ $X/D = 5.5$ เป็นต้นไป

จะเห็นได้ว่าความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดซึ่งเกิดจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง จะมีการปรับตัวโดยมีความแตกต่างของค่า C_{Pref} ในหน้าตัดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการไหล (ประมาณ $2D$ แรก) และจะปรับตัวช้าลงจนมีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอในช่วงการไหลถัดไป โดยในกรณี NS06T จะใช้ระยะทางในการปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดมากกว่ากรณี NS00T และ NS03T เล็กน้อย และพบการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวางไปตามระยะทางการไหล

3.3.2 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) กรณี NS09T, NS12T และ NS18T

รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการกระจายสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัดในกรณีการไหลแบบหมุนวนที่มีค่า Swirl Number สูงขึ้นเท่ากับ 0.9 (NS09T), 1.2 (NS12T) และ 1.8 (NS18T) เปรียบเทียบกับกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00T)

ที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($X/D = 0.5$) การไหลในกรณี NS09T, NS12T และ NS18T จะพบลักษณะการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำจากตำแหน่งด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($\psi = 180^\circ$) เช่นเดียวกับที่พบในกรณี NS03T และ NS06T (รูปที่ 3.12) โดยในกรณี NS09T มีตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัดอยู่ที่มุม $\psi = 210^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -1.1 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า C_{Pref} ต่ำสุดในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NS00T) ที่มีค่าประมาณ -0.7 สำหรับกรณี NS12T พบว่าตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดจะอยู่ที่มุม $\psi = 225^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -1.5 และกรณี NS18T มีตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดที่มุม $\psi = 255^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -2.7

โดยเมื่อพิจารณาค่า C_{Pref} ต่ำสุดของการไหลในกรณีต่างๆ พบว่า การไหลที่มีค่า Swirl Number สูงกว่าจะมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดต่ำกว่ากรณีที่มีค่า Swirl Number ต่ำกว่า เนื่องจากการไหลมีความเร็วปะทะแผ่นกีดขวาง เพิ่มขึ้น ($\bar{u} + \bar{w}$) ทำให้ความดันตกคร่อมแผ่นกีดขวางของการไหลซึ่งแปรผันตามกำลังสองของความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้มีความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ในกรณีการไหลที่มีค่า Swirl Number สูง พบว่า บริเวณความดันต่ำจะหมุนวนไปจากตำแหน่งด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($\psi = 180^\circ$) ไปเป็นมุม $d\psi$ ได้ไกลกว่ากรณีที่มีค่า Swirl Number ต่ำกว่า โดยเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวาง เมื่อประมาณให้หมุนไปตามความเร็วหมุนวนของการไหลที่หน้าตัดทางออกท่อหมุนและไหลไปตามความยาวท่อด้วยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}) ดังแสดงเป็นเส้นประในรูป พบว่าในทุกกรณีตำแหน่งค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ได้จากการทดลอง จะอยู่ตามหลัง (Lag) ตำแหน่งค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ได้จากการคำนวณประมาณ 20° - 25° ในแต่ละกรณี แสดงให้เห็นว่าบริเวณความดันต่ำจะหมุนวนไปด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วหมุนวนของการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุน

ที่หน้าตัด $X/D = 1.0$ พบว่าบริเวณความดันต่ำของการไหลในแต่ละกรณีจะหมุนไปตามการหมุนวนของการไหล และมีความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดเดียวกันลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการไหลมีการปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอมากขึ้น โดยในกรณี NS09T พบว่าตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดจะหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่ง $\psi = 240^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.4 กรณี NS12T ตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดจะหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่ง $\psi = 270^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.6 และกรณี NS18T ตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดจะหมุนไปอยู่ที่มุม $\psi = 315^\circ$ และมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -1.6 โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีการหมุนวนไปของค่า

C_{Pref} ต่ำสุดที่คำนวณด้วยความเร็วหมุนวนของการไหลซึ่งแสดงเป็นเส้นประในกราฟ พบว่าในทุกกรณีตำแหน่งของค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่วัดได้จะอยู่ตามหลังตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ โดยมีมุม Lag ในกรณี NS18T มากกว่ากรณี NS12T และ NS09T

ในช่วงการไหลถัดออกไป ($X/D > 1.5$) ของการไหลในแต่ละกรณีจะพบการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำ และมีการปรับตัวให้มีขนาดความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดลดลงไปตามระยะทางการไหล โดยในกรณี NS09T จะเริ่มมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดตั้งแต่ว่าระยะ $X/D = 14$ โดยมีค่า C_{Pref} ไม่เกิน 0.05 (มีค่าในช่วงความไม่แน่นอนของการทดลอง) ส่วนกรณี NS12T จะใช้ระยะทางในการปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดยาวขึ้นเป็นประมาณ 25D และในกรณี NS18T จะใช้ระยะทางไกลสุดในการปรับตัวประมาณ 50D จากตำแหน่งแผ่นกีดขวาง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาระยะทางในการปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด ($C_{Pref} \leq 0.05$) ของการไหลในกรณีต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 พบว่าการไหลต้องใช้ระยะทางในการปรับตัวยาวขึ้นเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น และในกรณีการทดลองนี้ซึ่งใช้แผ่นกีดขวางสร้างความไม่สมมาตรของการกระจายความดันสถิตที่มีอัตราส่วนพื้นที่ขวางต่อเป็น 19% ของพื้นที่หน้าตัดท่อ จะสามารถหาความสัมพันธ์ของระยะทางปรับตัวในรูปตัวแปรไร้มิติที่เป็นจำนวนเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (L/D) แปรผันตามกำลังสองของค่า Swirl Number (N_s) ตามสมการ (3.14)

$$\frac{L}{D} = 15.5N_s^2 - 1.60N_s + 2.97 \quad (3.14)$$

อนึ่งเมื่อถึงจุดนี้จำเป็นต้องบ่งชี้ถึงข้อแตกต่างของการหมุนวนของบริเวณความดันสถิตต่ำบนผนัง และการหมุนวนของความเร็วของการไหลดังนี้ บริเวณความดันสถิตต่ำสุดในหน้าตัด (C_{Pref} ต่ำสุด) ที่สังเกตได้ เป็นผลของ Wake ที่เกิดขึ้นที่ด้านหลังแผ่นกีดขวาง ซึ่งมีความดันรวมลดลงจากการสูญเสียพลังงานเมื่อไหลผ่านแผ่นกีดขวาง ซึ่ง Wake ที่เกิดขึ้นอาจประมาณได้ว่าจะหมุนวนไปพร้อมกับการหมุนวนหรือความเร็วของการไหล เป็นผลให้สามารถสังเกตการหมุนวนไปของบริเวณ C_{Pref} ต่ำสุดได้ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องเน้นในที่นี้ว่าในการทดลองนี้ได้แสดงการหมุนวนไปของบริเวณความดันสถิตบนผนังต่ำสุด (C_{Pref} ต่ำสุด) ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วไม่จำเป็นต้องหมุนไปอย่างแม่นยำพร้อมกับการหมุนวนของความเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วเป็นตัวบ่งชี้ถึงโมเมนตัม ซึ่งอาจมีการถ่ายเทกับบริเวณรอบข้างได้ด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion) และกระบวนการพา (Convection) ดังนั้นความเร็วในการหมุนวนไปของบริเวณ C_{Pref} ต่ำสุด อาจจะไม่เท่ากับความเร็วหมุนวนของการไหลอย่างพอดี อย่างไรก็ตามถ้าสันนิษฐานให้บริเวณของ Wake เป็นบริเวณที่มีความดันสถิตต่ำกว่าบริเวณอื่น การหมุนวนของความดันสถิตนี้อาจไปประมาณการหมุนวนของความเร็วได้ในระดับหนึ่ง

3.3.3 ตำแหน่งเชิงมุม (ψ_{min}) ของค่า C_{Pref} ต่ำสุดตามระยะทางการไหล

รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุม (ψ_{min}) ของจุดที่มีความดันต่ำสุดในหน้าตัด (C_{Pref} ต่ำสุด) กับระยะทางตามทิศทางไหล (X/D) และเปรียบเทียบกับตำแหน่งเชิงมุมของการเคลื่อนที่ไปของความเร็วหมุนวน โดยให้ความเร็วหมุนวนมีค่าเท่ากับความเร็วหมุนวนที่ด้านทางออกท่อหมุนตลอดแนวท่อ กล่าวคือไม่มีการสูญเสียความเร็วตามแนวสัมผัส และแสดงตำแหน่งเชิงมุมที่ได้จากการคำนวณเป็นเส้นประในกราฟ จากผลการทดลองพบว่ากรณี NS03T ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดจะสลายตัวอย่างรวดเร็ว จนไม่สามารถสังเกตการหมุนวนไปของตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดได้ ดังนั้นจึงไม่นำมาแสดงผลในกราฟนี้

รูปที่ 3.15 (ก) แสดงตำแหน่งเชิงมุมของค่า C_{Pref} ต่ำสุด (ψ_{min}) ในกรณี NS06T พบว่าที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($X/D = 0.5$) มีค่า ψ_{min} ประมาณ 210° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่การหมุนวนของการไหลพาบริเวณความดันต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวางมาที่หน้าตัดวัด ($X/D = 0.5$) ที่ระยะถัดออกไป ($X/D > 0.5$) ค่า ψ_{min} จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนวนของบริเวณความดันต่ำ และมีลักษณะการกระจายตัวของค่า ψ_{min} เป็นคาบไปตามระยะทางการไหล โดยพบว่าในกรณี NS06T สามารถพบคาบของค่า ψ_{min} ได้ประมาณ 1 คาบ

เนื่องจากตำแหน่งเชิงมุม (ψ_{min}) นี้แสดงถึงการหมุนวนไปตามทิศทางตามเส้นรอบวง ดังนั้นระยะ 1 คาบที่ปรากฏในกราฟจะแสดงถึงการหมุนวนไปของตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดตามแนวเส้นรอบวงครบ 1 รอบ และเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งเชิงมุม (ψ_{min}) ที่ได้จากการคำนวณพบว่าตำแหน่งของค่า ψ_{min} จากการทดลองจะอยู่ตามหลังค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยมีมุม Lag ของค่าจากการทดลองห่างจากค่าจากการคำนวณมากขึ้นตามระยะทางการไหล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำจะมีความเร็วหมุนวนช้ากว่าความเร็วหมุนวนของการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุน และมีความเร็วหมุนวนช้าลงไปตามระยะทางการไหล

รูปที่ 3.15 (ข) แสดงการกระจายค่า ψ_{min} ตามระยะทางการไหลในกรณี NS09T พบว่าค่า ψ_{min} มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางการไหลเนื่องจากการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำในหน้าตัดเช่นเดียวกับกรณี NS06T โดยในช่วง $X/D = 0.5-14$ สามารถพบคาบของค่า ψ_{min} ได้ประมาณ 2 คาบ และในช่วงการไหลถัดไป ($X/D > 14$) จะไม่พบตำแหน่งเชิงมุม (ψ_{min}) ของค่า C_{Pref} ต่ำสุดได้ เนื่องจากการไหลมีการปรับตัวจนมีการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอมากขึ้น

พิจารณาเปรียบเทียบคาบของค่า ψ_{min} ในกรณี NS09T กับคาบที่ได้จากการคำนวณพบว่าคาบของค่า ψ_{min} ที่ได้จากการทดลองจะมีความยาวคาบมากกว่าความยาวคาบที่ได้จากการคำนวณ (ดังแสดงเป็นเส้นประ) ประมาณ 2 เท่า แสดงให้เห็นว่าการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำจะหมุนวนไปด้วยความเร็วที่ช้ากว่าความเร็วหมุนวนที่ออกจากท่อหมุน

รูปที่ 3.15 (ค) แสดงการกระจายค่า ψ_{min} ตามระยะทางการไหลในกรณี NS12T พบว่ามีการกระจายค่า ψ_{min} ตามระยะทางการไหลเป็นคาบเช่นเดียวกับที่พบในกรณีอื่น โดยสามารถพบจำนวนคาบของค่า ψ_{min} ได้ประมาณ 4 คาบซึ่งมากกว่าจำนวนคาบที่พบในกรณี NS06T และ NS09T และพบตำแหน่ง ψ_{min} ของบริเวณที่มีความดันต่ำสุดในหน้าตัดไปได้ไกลถึงระยะ X/D ประมาณ 30 ซึ่งมากกว่ากรณี NS06T และ NS09T เช่นกัน แสดงให้เห็นว่าในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวนสูงขึ้น จะสามารถพบจำนวนคาบการหมุนวนไปของตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัดได้มากขึ้น และพบการหมุนวนไปตามระยะทางการไหลได้ไกลขึ้นกว่ากรณีที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบคาบของค่า ψ_{min} ที่ได้จากการทดลองกับคาบที่ได้จากการคำนวณพบว่าในช่วง X/D ประมาณ 0.5D-12D มีคาบของค่า ψ_{min} ซึ่งได้จากการทดลองยาวกว่าคาบที่ได้จากการคำนวณประมาณ 2 เท่า และในช่วงการไหลถัดไป (X/D ประมาณ 12D-27D) มีคาบจากการทดลองยาวกว่าคาบที่ได้จากการคำนวณมากขึ้นเป็นประมาณ 3 เท่า แสดงให้เห็นว่าการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำสุดในหน้าตัดจะมีความเร็วช้าลงไปตามระยะทางการไหลในท่อ ซึ่งเป็นเครื่องบ่งชี้อย่างหนึ่งถึงความเร็วหมุนวนของการไหล (w) ที่มีการสลายตัวไปตามความยาวท่อ

รูปที่ 3.15 (ง) แสดงลักษณะการกระจายค่า ψ_{min} ตามระยะทางการไหลในกรณี NS18T พบว่าค่า ψ_{min} มีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบไปตามระยะทางการไหลในลักษณะเดียวกับกรณีอื่น โดยสามารถพบจำนวนคาบของค่า ψ_{min} ได้มากกว่าและไกลกว่าทุกกรณี โดยพบคาบของค่า ψ_{min} ได้ประมาณ 6 คาบ และไปได้ไกลประมาณ 50D

รูปที่ 3.15 (จ) เปรียบเทียบการกระจายค่า ψ_{min} ตามระยะทางการไหลในกรณี NS12T และ NS18T พบว่าในช่วง 30D แรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง มีค่า ψ_{min} และคาบของค่า ψ_{min} ในกรณี NS12T และ NS18T ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความเร็วของการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำสุดในทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงถัดไป (X/D > 30) กรณี NS12T จะไม่สามารถสังเกตค่า ψ_{min} ได้ เนื่องจากการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอมากขึ้นในหน้าตัด ส่วนในกรณี NS18T สามารถพบตำแหน่งค่า ψ_{min} ไปตามระยะทางการไหลได้จนถึงที่ระยะ X/D ประมาณ 50

รูปที่ 3.16 แสดงความยาวคาบของค่า ψ_{min} ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามระยะทางการไหลในกรณี NS18T โดยทำการหาความยาวคาบด้วยการคำนวณระยะห่างระหว่างค่า ψ_{min} สูงสุดของคาบที่ติดกัน ระยะห่างระหว่างค่า ψ_{min} ต่ำสุดของคาบที่ติดกัน และระยะห่างระหว่างค่า $\psi_{min} = 120^\circ$ และ 240° ของคาบที่ติดกัน โดยให้ตำแหน่ง (X/D) ของคาบที่ทำการหาความยาวคาบนี้ อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคู่ตำแหน่ง ψ_{min} ที่ใช้ในการหาความยาวคาบ จากรูปแสดงขนาดคาบการไหลเป็นจำนวนเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในรูปของตัวแปรไร้มิติ (T/D) ที่ตำแหน่ง X/D ต่าง ๆ พบว่าคาบการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำจะมีขนาดยาวขึ้นประมาณเป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล โดยในกรณี NS18T พบว่าสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวคาบตามระยะทางการไหลได้ตามสมการ (3.15)

$$\frac{T}{D} = 0.104(X/D) + 5.37 \quad (3.15)$$

และเมื่อประมาณให้ค่าการหมุนวนของบริเวณความดันต่ำนี้ประมาณเป็นค่าของการหมุนวนของการไหลครบ 1 รอบ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า Swirl Number ของการไหลตามสมการ $N_s = \frac{\pi D}{T}$ ดังนั้นจากสมการ (3.15) จะสามารถประมาณได้ว่าค่า Swirl Number ของการไหลจะลดลงเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางการไหล ($N_s \propto X^{-1}$)

3.3.4 การกระจายขนาดความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัด ($\Delta C_{P_{ref}} \max$) ตามระยะทางการไหล

ในการพิจารณาอัตราการปรับตัวของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวางที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้นไปตามระยะทางการไหล ได้พิจารณาลักษณะการกระจายขนาดความแตกต่างความดันสถิตมากสุดในหน้าตัดตามระยะทางการไหล โดยแสดงผลในรูปของค่า $\Delta C_{P_{ref}} \max$ ซึ่งนิยามตามสมการ (3.16)

$$\Delta C_{P_{ref}} \max = C_{P_{ref}}(\max) - C_{P_{ref}}(\min) \quad (3.16)$$

เมื่อ $C_{P_{ref}}(\max)$ เป็นค่า $C_{P_{ref}}$ ที่มีค่าสูงที่สุดในหน้าตัดต่างๆ
 $C_{P_{ref}}(\min)$ เป็นค่า $C_{P_{ref}}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดในหน้าตัดต่างๆ

ในการทดลองมีค่าความไม่แน่นอนของ $\Delta C_{P_{ref}} \max$ ประมาณ ± 0.1 และพิจารณาการกระจายความแตกต่างความดันสถิตมากสุดในหน้าตัดไปตามระยะทางการไหลจนกระทั่งมีค่า $\Delta C_{P_{ref}} \max \leq \pm 0.1$

รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะการกระจายความแตกต่างความดันสถิตมากสุดในหน้าตัดตามระยะทางการไหล รูปที่ 3.17 (ก) แสดงลักษณะการลดลงของค่า $\Delta C_{P_{ref}} \max$ ตามระยะทางการไหลในรูป Linear Scale จากรูปในกรณี NS00T ที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($X/D = 0.5$) พบว่ามีขนาด $\Delta C_{P_{ref}} \max$ สูงสุดและสูงกว่าบริเวณอื่น โดยมีค่าประมาณ 0.7 และในระยะถัดไป $\Delta C_{P_{ref}} \max$ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วโดยที่ระยะ $X/D = 2.5$ จะมีค่า $\Delta C_{P_{ref}} \max$ ลดลงเหลือประมาณ 0.1

สำหรับกรณี NS03T พบว่ามีลักษณะการกระจาย $\Delta C_{P_{ref}} \max$ ตามระยะทางการไหลคล้ายกับกรณี NS00T โดยที่หน้าตัดแรกการไหลจะมีค่า $\Delta C_{P_{ref}} \max$ มากสุดและมีค่ามากกว่ากรณี NS00T เนื่องจากการไหลมีการสูญเสียความดันจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางมากขึ้นตาม

ขนาดความเร็ว ($\bar{u} + \bar{w}$) ที่มีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นที่ระยะถัดไปการไหลจะมีค่า $\Delta C_{Pref} max$ ลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางการไหล

สำหรับการไหลแบบหมุนวนในกรณี NS06T, NS09T, NS12T และ NS18T พบว่ามีลักษณะการกระจายค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลคล้ายกับกรณี NS03T โดยที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวางของการไหลในแต่ละกรณีพบว่าจะมีค่า $\Delta C_{Pref} max$ สูงที่สุด และมีค่า $\Delta C_{Pref} max$ เพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น เนื่องจากการไหลมีการสูญเสียความดันเมื่อไหลผ่านแผ่นกีดขวางเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณากรณี NS18T พบว่าที่หน้าตัดแรก ค่า $\Delta C_{Pref} max$ จะมีค่าสูงที่สุดโดยมีค่าประมาณ 3 ในช่วงถัดไป (X/D ประมาณ 0.5-2) พบว่า $\Delta C_{Pref} max$ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วโดยที่ระยะ $X/D = 2$ พบว่าการไหลจะมีค่า $\Delta C_{Pref} max$ ลดลงเหลือประมาณ 0.8 และในช่วงท้ายของการไหลจะมีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลน้อยลง โดยที่ระยะ X/D ประมาณ 40 จะมีค่า $\Delta C_{Pref} max$ ลดลงเหลือประมาณ 0.1 จากกราฟจะเห็นได้ว่าการไหลในกรณีต่างๆมีอัตราการลดลงของความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดที่หน้าตัดไม่คงที่ไปตามระยะทางการไหล โดยในช่วงต้นของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง (ประมาณ 2D แรก) พบว่า $\Delta C_{Pref} max$ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งแสดงถึงการไหลมีการปรับตัวการกระจายความดันสถิตให้สม่ำเสมอขึ้นอย่างรวดเร็ว และในช่วงการไหลถัดไปจะมีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลต่ำลงไปตามการไหลในท่อ

รูปที่ 3.17 (ข) แสดงลักษณะการกระจาย $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลในรูปของ Semi-Log Scale จากรูปพบว่าสำหรับกรณี NS09T และ NS12T จะมีลักษณะการกระจายค่า $\Delta C_{Pref} max$ ค่อนข้างเป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล ซึ่งจะแสดงถึงการไหลมีลักษณะการลดลงของค่าความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัดเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทางการไหล โดยเมื่อทำการ Fit สมการเส้นตรงในกรณี NS09T ในช่วง $X/D = 0.5-5.5$ และกรณี NS12T ในช่วง $X/D = 0.5-7$ พบว่าสามารถ Fit สมการเส้นตรงได้ค่อนข้างดี มีค่า R^2 ในช่วง 0.938-0.958 โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลในกรณี NS09T สูงกว่ากรณี NS12T นอกจากนี้พบว่า กรณี NS18T จะมีลักษณะการกระจายค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลแตกต่างจากกรณีอื่น โดยมีลักษณะการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลแบ่งได้เป็นสองบริเวณ คือในช่วงต้นของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($X/D = 0.5-2.0$) ที่มีการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ อย่างรวดเร็ว และในช่วงถัดไป ($X/D > 2.0$) ที่มีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลต่ำลง โดยเมื่อ Fit สมการเส้นตรงในทั้งสองบริเวณพบว่าสามารถ Fit สมการเส้นตรงได้ค่อนข้างดีมีค่า R^2 ในช่วง 0.924-0.969 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการไหลในกรณี NS18T ในช่วงต้นของการไหลจะมีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลสูงกว่าทุกกรณี และในช่วงถัดไปจะมีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลต่ำกว่ากรณี NS12T และกรณี

NS09T ความสัมพันธ์ของการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลในแต่ละกรณี แสดงดังสมการ (3.17)

$$\begin{aligned}
 \Delta C_{Pref} max &= 1.02e^{-0.366(X/D)} && \text{(NS09T)} \\
 \Delta C_{Pref} max &= 1.34e^{-0.322(X/D)} && \text{(NS12T)} \\
 \Delta C_{Pref} max &= 4.76e^{-0.917(X/D)} && \text{(NS18T_1st range)} \\
 \Delta C_{Pref} max &= 1.58e^{-0.042(X/D)} && \text{(NS18T_2nd range)}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

รูปที่ 3.17 (ค) แสดงลักษณะการกระจาย $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลในรูปของ Log-Log Scale จากรูปพบว่า การไหลในทุกกรณีมีลักษณะการกระจาย $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลค่อนข้างเป็นเส้นตรงบน Log-Log Scale ซึ่งแสดงถึงการไหลมีลักษณะการลดลงของค่าความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุด ในหน้าตัดเป็นฟังก์ชันแบบพหุนามตามระยะทางการไหล โดยเมื่อ Fit สมการเส้นตรงจะได้ค่า R^2 จากการ Fit สมการในช่วง 0.772-0.967 โดยพบว่าในกรณีการไหลที่ไม่มีความเร็วหมุนวน (NS00T) จะมีความชันของกราฟหรือมีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลสูงที่สุด และเมื่อการไหลมีความเร็วหมุนวนสูงขึ้น จะมีความชันของกราฟหรือมีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลต่ำลง โดยมีความสัมพันธ์ของการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลในแต่ละกรณี แสดงดังสมการ (3.18)

$$\begin{aligned}
 \Delta C_{Pref} max &= 0.272(X/D)^{-1.24} && \text{(NS00T)} \\
 \Delta C_{Pref} max &= 0.332(X/D)^{-1.10} && \text{(NS03T)} \\
 \Delta C_{Pref} max &= 0.426(X/D)^{-0.825} && \text{(NS06T)} \\
 \Delta C_{Pref} max &= 0.720(X/D)^{-0.876} && \text{(NS09T)} \\
 \Delta C_{Pref} max &= 1.02(X/D)^{-0.805} && \text{(NS12T)} \\
 \Delta C_{Pref} max &= 1.57(X/D)^{-0.635} && \text{(NS18T)}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

จากกราฟในรูปที่ 3.17 (ข) และ 3.17 (ค) จะเห็นได้ว่าการลดลงของค่าความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัดสามารถหาความสัมพันธ์ได้ทั้งในรูปของฟังก์ชันพหุนามและเอ็กซ์โปเนนเชียล จึงเป็นการยากที่จะสรุปได้ในขณะนี้ว่าการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ มีลักษณะการลดลงเป็นฟังก์ชันแบบใด แต่เมื่อพิจารณาเลือกฟังก์ชันพหุนามซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์การลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลในทุกกรณีได้ค่อนข้างดีกว่าฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลดังแสดงตามสมการ (3.19)

$$\Delta C_{Pref} \max = C(X/D)^{-n} \quad (3.19)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่ของแต่ละกรณีตามสมการ (3.18)

และได้ค่า n ซึ่งเป็นเลขชี้กำลังที่ค่า Swirl Number ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 พบว่าค่า n จะมีค่าลดลงเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น จะมีอัตราการลดลงของความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัดน้อยลง หรือมีการปรับตัวการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดให้สม่ำเสมอขึ้น และเมื่อพิจารณาเลขชี้กำลัง n ว่า ถ้าในกรณีที่มีการไหลมีค่า Swirl Number สูงมากจนเข้าใกล้อนันต์ การไหลยังคงควรมีค่า n ซึ่งแสดงถึงอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} \max$ ตามระยะทางการไหลอยู่ ดังนั้นจึงเลือก Fit ความสัมพันธ์ของค่า n ที่ค่า Swirl Number ต่างๆ ด้วยฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล พบว่าสามารถ Fit ได้ค่อนข้างดีมีค่า R^2 ประมาณ 0.904 ดังแสดงตามสมการ (3.20)

$$n = 1.18e^{-0.352Ns} \quad (3.20)$$

3.3.5 การกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล

ในการพิจารณาขนาดความแตกต่างความดันสถิตของการไหลที่หน้าตัดต่างๆ ในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน ได้พิจารณาค่าความแตกต่างความดันสถิตที่ผนังท่อที่ตำแหน่งมุมตรงกันข้าม ได้แก่ ที่ มุม $\psi = 0^\circ$ และ $\psi = 180^\circ$ ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$) และที่ตำแหน่งมุม $\psi = 90^\circ$ และ $\psi = 270^\circ$ ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ว่ามีการกระจายตัวเป็นลักษณะใดไปตามระยะทางการไหล โดยได้นิยามสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตตามสมการ (3.21) และ (3.22)

$$C_{P_{0-180}} = \frac{P_{0^\circ} - P_{180^\circ}}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (3.21)$$

$$C_{P_{90-270}} = \frac{P_{90^\circ} - P_{270^\circ}}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (3.22)$$

เมื่อ P_{0° , P_{90° , P_{180° และ P_{270° เป็นความดันสถิตที่ตำแหน่ง $\psi = 0^\circ$, 90° , 180° และ 270°
 $\frac{1}{2} \rho u^2$ เป็นความดันจลน์เฉลี่ยของการทดลอง

โดยค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตที่ได้จะแสดงถึงขนาดของแรงดันของไหลที่กระทำต่อผนังท่อในทิศทางตามแนว X-X ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) และ Y-Y ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$) ซึ่งมีขนาดแสดงเป็นอัตราส่วนของความดันจลน์เฉลี่ยของการไหล

ในการทดลองมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตประมาณ ± 0.05 และกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิต ($C_{P_{0-180}}$ หรือ $C_{P_{90-270}}$) ที่มีค่าไม่เกิน 0.05 ว่ามีสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตประมาณศูนย์ หรือไม่มีความแตกต่างความดันสถิตที่ผนังท่อด้านตรงกันข้าม

รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะการกระจายความแตกต่างความดันสถิต $P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$ และ $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ตามระยะทางการไหลในท่อ ในกรณีการไหลที่มีค่า Swirl Number = 0.0-0.6 รูปที่ 3.19 (ก) แสดงการกระจาย $P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$ จากกราฟพบว่าในกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล (กรณี NS00, NS03 และ NS06) จะมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณศูนย์ไปตลอดระยะทางการไหล เนื่องจากการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุนมีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด

สำหรับกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง พบว่าการกระจายตัวของค่าความแตกต่างความดันสถิตในกรณี NS00T, NS03T และ NS06T มีลักษณะคล้ายกัน โดยในกรณี NS00T ที่หน้าตัด $X/D = 0.5$ พบว่า $C_{P_{0-180}}$ มีค่าประมาณ 0.7 ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$ ประมาณ 70% ของความดันจลน์เฉลี่ย) เนื่องจากการไหลมีการสูญเสียความดัน (P_{180°) จากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง ทำให้มีค่า P_{180° ต่ำกว่า P_{0°

ที่ระยะการไหลถัดไป ($X/D = 0.5-2$) พบว่าในกรณี NS00T ค่า $C_{P_{0-180}}$ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการปรับตัวของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัด จนกระทั่งที่หน้าตัด X/D ประมาณ 2 จะมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ต่ำสุดมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณ -0.2 จากนั้น $C_{P_{0-180}}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหลจนถึงระยะ X/D ประมาณ 5 เป็นต้นไปจะมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณศูนย์ไปตลอดระยะทางการไหล

รูปที่ 3.19 (ข) แสดงลักษณะการกระจายความแตกต่างความดันสถิต $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ พบว่าในกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง จะไม่พบความแตกต่างความดันสถิต $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ไปตลอดระยะทางการไหลเนื่องจากการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด สำหรับกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวางพบว่าในกรณี NS00T ค่า $C_{P_{90-270}}$ มีค่าประมาณศูนย์ แสดงให้เห็นว่าแผ่นกีดขวางมีผลน้อยต่อการสร้างความแตกต่างความดันระหว่างมุม $\psi = 90^\circ$ และมุม $\psi = 270^\circ$ ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$)

สำหรับกรณี NS03T ในช่วงประมาณ 2.5D แรกหลังแผ่นกีดขวางจะพบความแตกต่างความดันสถิต $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ได้เล็กน้อยโดยมีค่า $C_{P_{90-270}}$ ประมาณ $\pm 0.1-0.15$ และตั้งแต่ระยะ X/D ประมาณ 3 เป็นต้นไปจะไม่พบความแตกต่างความดันสถิต ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) สำหรับกรณี NS06T พบว่ามีลักษณะการกระจายค่า $C_{P_{90-270}}$ ใกล้เคียงกรณี NS03T

จะเห็นได้ว่าในกรณีการไหลที่มีค่า Swirl Number ≤ 0.6 การไหลแบบหมุนวนมีผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะความแตกต่างความดันสถิตที่หน้าตัดต่าง ๆ โดยมีลักษณะความแตกต่างความดันสถิตที่เกิดขึ้นในกรณี NS00T, NS03T และ NS06T คล้ายกันและการไหลจะมีการปรับตัวจนไม่พบความแตกต่างความดันสถิต ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$ และ $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ตั้งแต่ระยะ X/D ประมาณ 5-6 เป็นต้นไป

รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะการกระจายความแตกต่างความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีค่า Swirl Number สูงขึ้น (0.9-1.8) รูปที่ 3.20 (ก) แสดงการกระจายค่า $C_{P_{0-180}}$ ตามระยะทางการไหล พบว่าในกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง ค่า $C_{P_{0-180}}$ มีค่าประมาณศูนย์ตลอดช่วงการไหล เนื่องจากมีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัด

สำหรับกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวางช่วงการไหล ในกรณี NS09T พบว่าค่า $C_{P_{0-180}}$ มีการกระจายตัวเป็นบวกและลบในลักษณะของการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ ไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวาง โดยเมื่อบริเวณความดันต่ำหมุนมาอยู่ที่ด้านบนของหน้าตัดจะทำให้ได้ค่า $C_{P_{0-180}}$ มีค่าเป็นลบ และเมื่อบริเวณความดันต่ำหมุนมาอยู่ที่ด้านล่างจะได้ค่า $C_{P_{0-180}}$ เป็นบวก เมื่อพิจารณาการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ จะเห็นได้ว่าขนาดการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันจะมีค่าลดลงไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากการไหลมีการปรับตัวจนมีการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอมากขึ้น และตั้งแต่วระยะ X/D ประมาณ 14 เป็นต้นไปจะไม่พบความแตกต่างความดันสถิต ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$)

สำหรับกรณี NS12T สามารถพบลักษณะการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ ได้เช่นเดียวกับกรณี NS09T โดยพบว่าขนาดของความแตกต่างความดันสถิตในกรณี NS12T จะมีขนาดมากกว่ากรณี NS09T และสามารถพบการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ ไปตามระยะทางการไหลได้ไกลกว่ากรณี NS09T เล็กน้อย โดยความแตกต่างความดันสถิต ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$) จะมีขนาดลดลงไปตามระยะทางการไหลเนื่องจากการปรับตัวของการไหลให้มีการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอมากขึ้น จนตั้งแต่วระยะ X/D ประมาณ 18 เป็นต้นไปจะมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณศูนย์ไปตามระยะทางการไหล

สำหรับกรณี NS18T พบว่ามีลักษณะการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ คล้ายกับกรณี NS09T และ NS12T โดยมีขนาดของค่า $C_{P_{0-180}}$ มากกว่าทุกกรณี และพบคาบการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ ไปได้ไกลที่สุดประมาณ 45D

เมื่อพิจารณาระยะทางที่ต้องใช้ในการปรับตัวของค่า $C_{P_{0-180}}$ จนมีค่าประมาณศูนย์ไปตามระยะทางการไหล กับระยะทางที่ใช้ในการปรับตัวการกระจาย $C_{P_{pref}}$ ให้มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด (ดังแสดงในรูปที่ 3.14) พบว่าระยะทางที่ใช้ของค่า $C_{P_{0-180}}$ จะสั้นกว่าระยะทางในการปรับตัวของการกระจาย $C_{P_{pref}}$ เล็กน้อย เนื่องจากการพิจารณาระยะทางปรับตัวของค่า $C_{P_{0-180}}$ ได้พิจารณาเฉพาะขนาดของ $P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$ ว่าต้องใช้ระยะทางเท่าใดในการปรับตัวจนมีค่าในช่วงความไม่แน่นอนของการวัด ซึ่งแตกต่างจากกรณี $C_{P_{pref}}$ ซึ่งพิจารณาความดัน

ทั้งหน้าตัด อย่างไรก็ตามระยะทางในการปรับตัวของค่า C_{P0-180} ที่ได้จะแสดงถึงช่วงความยาวท่อซึ่งสามารถพบแรงดันกระทำที่ผนังท่อในแนว Y-Y เนื่องจากความไม่สมมาตรของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดได้

รูปที่ 3.20 (ข) แสดงลักษณะการกระจายความแตกต่างความดันสถิต $C_{P90-270}$ จากกราฟพบว่าการกระจายค่า $C_{P90-270}$ ของการไหลในกรณีต่างๆมีลักษณะคล้ายกับการกระจายค่า C_{P0-180} โดยในกรณีการไหลที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง ค่า $C_{P90-270}$ จะมีค่าประมาณศูนย์ตลอดระยะทางการไหลเนื่องจากกระจายความดันที่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด สำหรับกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล จะสามารถพบการแกว่งของค่า $C_{P90-270}$ ไปตามระยะทางการไหลได้ในลักษณะเดียวกับการแกว่งของค่า C_{P0-180}

จะเห็นได้ว่า ในกรณีการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง การไหลที่มีค่า Swirl Number สูง จะมีขนาดความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดเดียวกัน ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$ และ $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) สูงกว่ากรณีที่มีค่า Swirl Number ต่ำกว่า โดยความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงในลักษณะการแกว่งไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำที่ตำแหน่งด้านหลังแผ่นกีดขวาง โดยมีขนาดความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดลดลงตามระยะทางการไหลในท่อ ซึ่งในกรณี NS18T จะสามารถพบการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันสถิตไปได้ไกลที่สุด

3.3.6 การกระจายความดันสถิต ($C_{P\psi}$ และ $\overline{C_{P_{ref}'}}$) ตามระยะทางการไหล

ในการพิจารณาลักษณะการกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง) ได้พิจารณาการกระจายความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270° ตามระยะทางการไหล โดยแสดงผลในรูปของสัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่มุม ψ ($C_{P\psi}$) เมื่อนิยาม $C_{P\psi}$ เป็น

$$C_{P\psi} = \frac{P_\psi - P_{ref'}}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2} \quad (3.23)$$

เมื่อ P_ψ เป็นค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270°
 $P_{ref'}$ เป็นความดันอ้างอิงของการทดลองซึ่งเป็นค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ หน้าตัด $X/D = 0.5$
 $\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$ เป็นความดันจลน์เฉลี่ยของการทดลอง

นอกจากนี้ยังได้พิจารณาลักษณะการกระจายตัวความดันสถิตเฉลี่ยแต่ละหน้าตัดตามระยะทางการไหล โดยแสดงผลในรูปของสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ซึ่งนิยามตามสมการ (3.11)

รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะการกระจายตัวของค่า $C_{p\psi}$ ที่มุม $\psi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270° และการกระจายตัวของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหล รูปที่ 3.21 (ก) แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ (C_{p0}) จากรูปในกรณี NS00T ในช่วงต้นของการไหล ประมาณ 4D จากตำแหน่งแผ่นกีดขวาง พบว่าค่า C_{p0} มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่หน้าตัดแรกจนมีค่าสูงสุด จากนั้นที่ระยะถัดไปค่า C_{p0} จะมีค่าประมาณคงที่ และตั้งแต่วระยะ X/D ประมาณ 6 เป็นต้นไปค่า C_{p0} จะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล

สำหรับกรณี NS03T และ NS06T พบว่ามีลักษณะการกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหลคล้ายกับกรณี NS00T คือมีค่า C_{p0} เพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนมีค่าสูงสุดและมีค่าคงที่ไปตามการไหล จากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหลในท่อ โดยเมื่อพิจารณาในช่วงต้นของการไหลในช่วง X/D ประมาณ 10–40 ในกรณี NS00T, NS03T และ NS06T พบว่าการลดลงของค่า C_{p0} ในกรณี NS06T จะลดลงเร็วกว่ากรณี NS03T และเร็วกว่ากรณี NS00T ตามลำดับ และในช่วงการไหลถัดไป ($X/D > 40$) พบว่าอัตราการลดลงของค่า C_{p0} ตามระยะทางการไหลในกรณี NS00T, NS03T และ NS06T จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในช่วงต้นของการไหลซึ่งยังมีความเร็วหมุนวนในแต่ละกรณีสูงอยู่ การไหลจะมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตแตกต่างกันตามขนาดของความเร็วหมุนวน โดยในกรณีที่มีความเร็วหมุนวนสูงกว่าจะมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตมากกว่ากรณีที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า และในช่วงท้ายของการไหลซึ่งความเร็วหมุนวนของการไหลได้สลายตัวไปจนเหลือค่าน้อยแล้ว การไหลในแต่ละกรณีจะมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกัน

ในทางตรงกันข้าม สำหรับการไหลที่มีค่า Swirl Number สูงขึ้น (กรณี NS09T, NS12T และ NS18T) พบว่าการกระจาย C_{p0} ตามระยะทางการไหลมีลักษณะแตกต่างจากกรณีที่มีค่า Swirl Number ต่ำกว่า (NS00T, NS03T และ NS06T) โดยในกรณี NS09T พบว่าในช่วงต้นของการไหล (ประมาณ 10D-20D แรก) ค่า C_{p0} จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงในลักษณะของการแกว่งของค่า C_{p0} ไปตามระยะทางการไหล และในระยะถัดออกไป ($X/D > 20$) จะมีการกระจาย C_{p0} เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{p0} ตามระยะทางการไหลสูงกว่ากรณีที่มีค่า Swirl Number ต่ำกว่า

สำหรับกรณี NS12T และ NS18T พบลักษณะการแกว่งของค่าความดันสถิตตามระยะทางการไหล เช่นเดียวกับกรณี NS09T โดยในกรณี NS12T สามารถพบการแกว่งของค่า C_{p0} ได้ถี่กว่ากรณี NS09T และมีขนาดการแกว่งของค่า C_{p0} สูงกว่ากรณี NS09T ส่วนในกรณี NS18T สามารถพบการแกว่งของค่า C_{p0} ได้ถี่ที่สุดและมีขนาดของการแกว่งสูงที่สุด โดยในช่วงท้ายของการไหล ($X/D > 40$) ซึ่งการไหลในทุกกรณีมีการกระจาย C_{p0} ตาม

ระยะทางการไหลเป็นเส้นตรงแล้วนั้น พบว่าอัตราการลดลงของค่า C_{p0} ตามระยะทางการไหล ในกรณี NS18T จะมีค่ามากกว่ากรณี NS12T และมากกว่ากรณี NS09T ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าการไหลแบบหมุนวนที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน ในกรณีที่มีค่า Swirl Number ≥ 0.9 การหมุนวนไปของความไม่สมมาตรของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดจะทำให้มีการกระจายค่า C_{p0} ในลักษณะการแกว่งของค่า C_{p0} ไปตามระยะทางการไหล โดยพบว่าในกรณีการไหลที่มีค่า Swirl Number สูงกว่าสามารถพบการแกว่งของค่า C_{p0} ไปได้ไกลกว่า และมีขนาดของการแกว่งของค่า C_{p0} สูงกว่ากรณีที่มีค่า Swirl Number ต่ำกว่า และในช่วงท้ายซึ่งการไหลในทุกกรณีมีการปรับตัวจนมีการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอแล้วนั้นจะมีการกระจาย C_{p0} ก่อนข้างเป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตขึ้นกับขนาดของความเร็วหมุนวน โดยในกรณีที่มีความเร็วหมุนวนสูงกว่าจะมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตตามระยะทางการไหลมากกว่ากรณีที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า

สำหรับการกระจายความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม ψ อื่นๆ (C_{p90} , C_{p180} และ C_{p270}) แสดงผลดังรูปที่ 3.21 (ข) 3.21 (ค) และ 3.21 (ง) ตามลำดับ พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะการกระจายค่า C_{p0} ตามระยะทางการไหล

รูปที่ 3.21 (จ) แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหล จากรูปในกรณี NS00T ในช่วงแรกของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($X/D = 0-4$) ความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหลจนมีค่าประมาณคงที่ จากนั้นตั้งแต่ระยะ X/D ประมาณ 6 เป็นต้นไป การไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงไปตามการไหลในท่อโดยมีลักษณะการกระจายค่า $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงตามระยะทางการไหล สำหรับกรณี NS03T และ NS06T พบว่ามีลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลคล้ายกับกรณี NS00T โดยในช่วงแรกของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($X/D = 0-4$) จะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหลจนมีค่าประมาณคงที่จากนั้นจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงไปตามระยะทางการไหลในลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลในกรณี NS06T สูงกว่ากรณี NS03T และสูงกว่ากรณี NS00T ตามลำดับ

สำหรับกรณี NS09T ในช่วงต้นของการไหลประมาณ 2D แรก $\overline{C_{Pref}}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหลเหมือนกับกรณี NS00T-NS06T จากนั้นที่ระยะถัดไปจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงไปตามระยะทางการไหล โดยขนาดของความเร็วหมุนวนที่มีค่าสูงขึ้นไปจะทำให้มีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ไม่คงที่ตามระยะทางการไหล ซึ่งแตกต่างจากกรณี NS00T-NS06T โดยในช่วงต้นของการไหลซึ่งยังคงมีความเร็วหมุนวนสูงอยู่ จะมีอัตราการสูญเสีย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลสูงกว่าบริเวณอื่น ในช่วงถัดไปการไหลจะมีอัตราการสูญเสีย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางลดลงจนกระทั่งมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล โดยมีความชันของกราฟหรืออัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลสูงกว่ากรณีที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า

สำหรับกรณี NS12T พบว่ามีลักษณะการกระจายค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหล คล้ายกรณี NS09T โดยในช่วงท้ายของการไหลซึ่งมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเชิงเส้นไปตาม ระยะทางการไหล พบว่ามีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลสูงกว่ากรณี NS09T

อย่างไรก็ตามพบว่ากรณี NS18T จะมีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหล แตกต่างจากกรณีอื่น กล่าวคือในกรณีอื่นในช่วงต้นของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง จะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหลจนมีค่าประมาณคงที่แล้วมีค่าลดลงไปตามระยะทาง การไหล ในขณะที่กรณี NS18T ค่า $\overline{C_{Pref}}$ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่หน้าตัดแรก และมี ค่าลดลงอย่างต่อเนื่องไปตามระยะทางการไหลในท่อ โดยในช่วง X/D ประมาณ 0.5-2 พบว่ามี อัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลสูงกว่าบริเวณอื่น และที่ระยะถัดไปจะมี อัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลน้อยลงไปตามความเร็วหมุนวนของการ ไหลที่ลดลงไปตามความยาวท่อ จนกระทั่งมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลค่อนข้าง เป็นเส้นตรง โดยมีความชันของกราฟหรืออัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ มากกว่าทุกกรณี

พิจารณาช่วงต้นของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง (X/D ประมาณ 0.5-4) ของการไหล ในกรณี NS00T-NS12T พบว่ามีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล ซึ่งเป็นลักษณะ ของการคืนตัวของค่าความดันสถิต โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 3.22 ประกอบ จะเห็นได้ว่าการไหล ด้านหลังแผ่นกีดขวาง จะมี Effective Area เพิ่มขึ้นไปตามความยาวท่อคล้ายกับลักษณะของ Diffuser เป็นผลให้การไหลมีค่าความดันสถิตเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล และที่ระยะถัดไป เมื่อมีการปรับตัวจนมีการไหลเต็มหน้าตัดท่อหรือมี Effective Area ของการไหลคงที่ ความดัน สถิตของการไหลในแต่ละกรณีจะเริ่มมีค่าลดลงไปตามระยะทางการไหลเนื่องจากแรงเสียดทาน การไหลที่ผนังท่อ อย่างไรก็ตามสำหรับกรณี NS18T ซึ่งมีลักษณะการกระจายค่า $\overline{C_{Pref}}$ แตก ต่างจากกรณีอื่น คือมีค่าลดลงในช่วงต้นด้านหลังแผ่นกีดขวางนั้นยังไม่ทราบสาเหตุแน่ชัด โดย อาจเป็นเพราะความเร็วหมุนวนที่สูง จะทำให้มีขนาดของบริเวณของ Wake ไม่มาก และทำให้ ไม่พบลักษณะของการคืนตัวของความดันสถิตไปตามระยะทางการไหล

เมื่อพิจารณาช่วงท้ายของการไหล (X/D > 40) พบว่าการไหลในทุกกรณีมีลักษณะการ กระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลค่อนข้างเป็นเส้นตรง โดยเมื่อ Fit สมการเส้น ตรงของการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลในช่วง X/D = 41-76 พบว่าสามารถ Fit สม การเส้นตรงได้ดี โดยมีค่า R^2 ของการ Fit สมการในทุกกรณีประมาณ 0.997-0.999 และได้ค่า ความชันของกราฟ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหล (f) ดังแสดงในตาราง 3.4 พบว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหลมีค่าแตกต่างกันตามค่า Swirl Number โดยมีค่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วหมุนวนของการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น โดย พบว่าการไหลในกรณี NS18T จะมีค่า f มากกว่าทุกกรณี และมีค่ามากกว่ากรณี NS00T ประมาณ 38%

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายความดันสถิตที่แต่ละหน้าตัดประกอบ (รูปที่ 3.12 และ 3.13) ที่ระยะ $X/D > 50$ ซึ่งการไหลในทุกกรณีมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด จะเห็นได้ว่าผลของแผ่นกีดขวางที่ด้านต้นต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตจะหมดไป และการไหลจะมีลักษณะการกระจายความดันสถิตขึ้นกับความเร็วหมุนวนของการไหล อย่างไรก็ตามที่ระยะทางการไหลยาวพอ ความเร็วหมุนวนของการไหลในแต่ละกรณีจะสลายตัวจนหมดไป และการไหลในทุกกรณีจะปรับตัวจนเข้าสู่สภาวะ Fully Developed Flow โดยมีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงตามระยะทางการไหล ที่มีความชันเท่ากันในแต่ละกรณี ซึ่งสำหรับกรณี NS18T พบว่าต้องใช้ระยะทางในการสลายตัวความเร็วหมุนวนมากกว่า 70D

3.4. เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหล ในกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล

รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหล เปรียบเทียบในกรณีที่มีการติดและไม่ติดแผ่นกีดขวางที่หน้าตัดทางออกท่อหมุน จากรูปพบว่าในกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง การไหลในทุกกรณี (NS00-NS18) มีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหล โดยในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวนสูงกว่าจะมีอัตราการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลสูงกว่ากรณีที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า สำหรับกรณีการไหลที่มีแผ่นกีดขวาง พบว่าในช่วงแรกของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง (NS00T-NS12T) มีลักษณะของการคืนตัวของความดันตามระยะทางการไหล ทำให้มีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นจากค่าในหน้าตัดแรกจนมีค่าสูงสุด จากนั้นจึงมีค่าลดลงไปตามระยะทางการไหล ส่วนกรณี NS18T ในช่วงแรกของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($X/D = 0-2$) ค่า $\overline{C_{Pref}}$ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ น้อยลงตามระยะทางการไหลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลในกรณีที่มีการติดและไม่ติดแผ่นกีดขวาง ที่ค่า Swirl Number ต่างๆ พบว่าตั้งแต่ระยะ $X/D > 5$ เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงที่การไหลไม่มีลักษณะการคืนตัวของความดันสถิตจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง และมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงไปตามระยะทางการไหลเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผนังท่อ พบว่าอัตราการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลที่มีค่า Swirl Number เท่ากันจะมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าความเร็วหมุนวนของการไหลจะมีผลสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงนี้ และการไหลจะมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตเฉลี่ยขึ้นกับความเร็วหมุนวนของการไหล โดยเมื่อ Fit การกระจายความดันสถิตเฉลี่ยด้วยสมการเส้นตรงในช่วง $X/D = 41-76$ จะได้ว่าค่าอัตราการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยต่อระยะทางการไหล หรือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหล (f) ในกรณีต่างๆดังแสดงในตาราง 3.4 พบว่าในกรณีการไหลที่มีค่า Swirl Number เท่ากันจะมีค่า f ใกล้เคียงกัน และมีค่าแตกต่างกันมากที่สุดไม่เกิน 6%

การไหลผ่านท่อโค้ง

ในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง ได้ทำการทดลองกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน และการไหลแบบหมุนวนที่มีค่า Swirl Number เท่ากับ 0.9 และ 1.8 โดยใช้ท่อหมุนวนในการสร้างความเร็วหมุนวนของการไหลเช่นเดียวกับกรณีการไหลในท่อตรง และทำการทดลองในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน การไหลที่ออกจากท่อหมุนวนจะไหลผ่านท่อตรงช่วงก่อนทางเข้าท่อโค้งเป็นระยะทาง 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ (3D) ก่อนไหลไปที่ท่อโค้งและท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง โดยท่อโค้งที่ใช้มีอัตราส่วนรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งท่อ (α) เท่ากับ 1/3.1

ส่วนในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน ได้ทำการติดแผ่นกีดขวาง มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมฐานโค้งเช่นเดียวกับกรณีการไหลในท่อตรง โดยการไหลที่ออกจากท่อหมุนวนจะไหลผ่านท่อตรงไปเป็นระยะทาง 1.5D และไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ตำแหน่ง $S/D = 0$ จากนั้นจะไหลผ่านท่อตรงเป็นระยะทาง 1.5D ก่อนไหลไปเข้าท่อโค้งและท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง โดยมีรายละเอียดของตำแหน่งติดแผ่นกีดขวาง และพิกัดการทดลองในกรณีการไหลผ่านท่อโค้งดังแสดงตามรูปที่ 2.12

3.5. รูปร่างความเร็วและรูปร่างความดันรวม

3.5.1 รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน

ในการทดลองได้ทำการวัดความเร็วในช่วงท่อตรงด้านทางเข้าท่อหมุนที่ระยะ $S/D = -32.5$ ซึ่งเป็นหน้าตัดที่ระยะ 20D ถัดจากปากทางเข้าชุดทดลองและห่างจากทางเข้าท่อหมุนเป็นระยะ 19D เพื่อแสดงสภาวะของการไหลก่อนเข้าท่อหมุน โดยใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัดความเร็ว และทำการวัดความเร็วตามแนว X-X เช่นเดียวกับกรณีการไหลในท่อตรง โดยมีความไม่แน่นอนของค่าความเร็วที่วัดได้ประมาณ ± 0.2 m/s หรือคิดเป็นประมาณ $\pm 3\%$ ของความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ค

รูปที่ 3.24 แสดงรูปร่างความเร็วของการไหลที่หน้าตัดก่อนทางเข้าท่อหมุนในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยแสดงผลในรูปของความเร็วที่ Normalized ด้วยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (\bar{u}) ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีท่อ (r/R) จากกราฟพบว่ารูปร่างความเร็วในทุกกรณีมีค่าใกล้เคียงกันและมีรูปร่างความเร็วคล้ายกับกรณีการไหลในท่อตรง โดยที่บริเวณผนังท่อความเร็วมีค่าต่ำ และที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อตามแนวรัศมีความเร็วจะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางท่อมีค่าประมาณ 1.2 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด ที่บริเวณใกล้

ผนังท่อ ($|r/R| > 0.5$) พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวรัศมีสูงกว่าบริเวณใกล้กึ่งกลางท่อ ($|r/R| < 0.5$) และรูปร่างความเร็วที่ได้มีลักษณะคล้ายกับรูปร่างความเร็วของ Fully Developed Turbulent Pipe Flows

รูปร่างความเร็วในแต่ละกรณีนำมาคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}_1) ของการไหลด้านก่อนทางเข้าท่อหมุนได้ดังแสดงในตาราง 3.5 พบว่าความเร็วเฉลี่ยในแต่ละกรณีมีค่าอยู่ในช่วง 7.8-8.0 m/s มีค่าแตกต่างกันในแต่ละกรณีไม่เกิน 3% และมีค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}_1) ที่ได้ใกล้เคียงกับกรณีการไหลในท่อตรง โดยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดที่ได้ให้นำมาคำนวณค่า Reynolds Number ของการไหลด้านก่อนทางเข้าท่อหมุนมีค่าประมาณ 3.7×10^4 ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ที่ในท่อ และสอดคล้องกับรูปร่างความเร็วที่วัดได้

รูปที่ 3.25 แสดงรูปร่างความเร็วการไหลด้านก่อนทางเข้าท่อหมุนที่ Normalized ด้วยค่าความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางท่อ จากกราฟพบว่ารูปร่างความเร็วที่ได้ในทุกกรณีมีลักษณะคล้ายกัน และเมื่อ Fit สมการของกราฟในรูปของ Power-Law Equation (ตามสมการ 3.1) ในช่วง $|r/R| < 0.93$ ได้ค่าเฉลี่ยของค่า n ของการ Fit สมการในทุกกรณีมีค่าเท่ากับ 9.36 ซึ่งมีค่าเท่ากับกรณีการไหลในท่อตรง โดยมีค่า R^2 จากการ Fit สมการในช่วง 0.87-0.95

3.5.2 รูปร่างความเร็วด้านหน้า Orifice

รูปที่ 3.26 แสดงรูปร่างความเร็วที่ด้านหน้า Orifice ในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง และติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล) โดยแสดงผลในรูปความเร็วที่ Normalized ด้วยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด ในการทดลองใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัด และทำการวัดความเร็วตามแนววัด X-X และ Y-Y โดยมีความไม่แน่นอนของค่าความเร็วที่วัดได้ประมาณ $\pm 3\%$

จากกราฟพบว่า รูปร่างความเร็วในกรณีต่างๆในแนววัด X-X และรูปร่างความเร็วในกรณี NS18T ในแนววัด Y-Y มีการกระจายความเร็วค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดท่อ มีค่าความเร็วประมาณ 1.1 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด และมีชั้นขอบเขตการไหลห่างจากผนังท่อแต่ละด้านประมาณ 20% ของรัศมีท่อ ($|r/R| > 0.8$) สำหรับรูปร่างความเร็วในกรณีที่เหลือ (แนววัด Y-Y ในกรณี NC00, NC09, NC18, NC00T และ NC09T) พบว่าในช่วง $-1 < (r/R)_{Y-Y} < -0.5$ จะมีความเร็วต่ำกว่าที่บริเวณอื่น ที่ระยะถัดไป $-0.5 < (r/R)_{Y-Y} < 0.8$ มีการกระจายความเร็วที่ค่อนข้างสม่ำเสมอโดยมีค่าความเร็วประมาณ 1.1 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด และที่บริเวณใกล้ผนังท่อ ($(r/R)_{Y-Y} > 0.8$) ความเร็วจะมีค่าลดลงเนื่องจากเป็นชั้นขอบเขตการไหล

รูปร่างความเร็วในแต่ละกรณีนำมาคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (\bar{u}) พบว่ามีค่าเท่ากันประมาณ 8 m/s ดังแสดงในตาราง 3.5 โดยมีค่าความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดในกรณีการไหลผ่านท่อโค้งแตกต่างจากกรณีการไหลในท่อตรงไม่เกิน 3% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการทดลองสามารถควบคุมสภาวะการทดลองให้มีอัตราการไหลใกล้เคียงกัน

ในแต่ละกรณี ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดที่ได้นำมาคำนวณค่า Reynolds Number (Re_D) ของการทดลองได้เท่ากับ 3.7×10^4 ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อ

3.5.3 รูปร่างความเร็วด้านทางออกท่อหมุน

ในการทดลอง ได้ทำการวัดรูปร่างความเร็วที่ด้านทางออกท่อหมุนที่หน้าตัด $S/D = -1.0$ (ห่างจากปากทางออกท่อหมุน $0.5D$) เพื่อแสดงสภาวะเริ่มต้นของการไหล (Initial Condition) ที่ด้านต้นท่อน้ำไหลเข้าท่อโค้ง โดยในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00 และ NC00T) ใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัดความเร็ว และในกรณีการไหลแบบหมุนวน (NC09, NC09T, NC18 และ NC18T) ใช้ Yaw Probe เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วโดยทำการวัดความเร็วในแนว X-X และ Y-Y ในการทดลองมีความไม่แน่นอนของค่าความเร็วตามแนวแกนที่วัดโดยใช้ Pitot Probe ประมาณ ± 0.2 m/s ($\pm 3\%$) และมีความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกนที่วัดโดยใช้ Yaw Probe ประมาณ ± 0.3 m/s ($\pm 4\%$) และความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวสัมผัสประมาณ ± 0.3 m/s ($\pm 9\%$) โดยมีรายละเอียดการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความเร็วดังแสดงในภาคผนวก ค

รูปที่ 3.27 (ก) แสดงลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวแกนของการไหลในกรณีต่างๆ โดยแสดงผลในรูปของความเร็วที่ Normalized ด้วยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง จากรูปในกรณี NC00 ความเร็วตามแนวแกนในแนววัด X-X และ Y-Y มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยในช่วง 20-25% ของรัศมีท่อห่างจากผนัง ($|r/R| > 0.75-0.8$) มีลักษณะเป็นชั้นขอบเขตการไหล ที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหล ($|r/R| < 0.75$) พบว่ามีการกระจายความเร็วค่อนข้างสม่ำเสมอ มีค่าความเร็วประมาณ 1.0-1.1 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการไหล

สำหรับกรณี NC00T, NC09 และ NC09T พบว่ารูปร่างความเร็วตามแนวแกนในแนววัด X-X และ Y-Y มีลักษณะใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับกรณี NC00 โดยมีชั้นขอบเขตการไหลห่างจากผนังท่อแต่ละด้านประมาณ 20-25% ของรัศมีท่อ และมีความเร็วที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหลค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยมีความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความเร็วที่บริเวณนอกชั้นขอบเขตการไหลในแต่ละกรณีมากที่สุดประมาณ $\pm 8\%$

สำหรับรูปร่างความเร็วตามแนวแกนในกรณี NC18 และ NC18T มีความเร็วตามแนวแกนในแนววัด X-X และ Y-Y ใกล้เคียงกัน และมีรูปร่างความเร็วแตกต่างจากกรณีอื่นเล็กน้อย โดยเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วในกรณีอื่น พบว่าการไหลในกรณี NC18 และ NC18T ที่บริเวณใกล้ผนังท่อ ($|r/R| > 0.6$) มีความเร็วต่ำกว่ากรณีอื่น และที่บริเวณกลางท่อ ($|r/R| < 0.6$) จะมีความเร็วสูงกว่า โดยมีความเร็วตามแนวแกนในช่วงกลางท่อประมาณ 1.2 เท่าของความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด และมีความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความเร็วมากที่สุดประมาณ $\pm 13\%$

รูปร่างความเร็วตามแนวแกนในแต่ละกรณี นำมาคำนวณความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการไหล (\bar{u}_2) ที่หน้าตัดทางออกท่อหมุนมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 7.5-8.2 m/s มีค่าแตกต่างกันในแต่ละกรณีไม่เกิน 9% และมีค่าแตกต่างจากความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของการทดลอง (\bar{u}) ซึ่งคำนวณจากรูปร่างความเร็วที่หน้า Orifice ไม่เกิน 7% แสดงให้เห็นว่าในการทดลองสามารถควบคุมให้มีอัตราการไหลในแต่ละกรณีใกล้เคียงกันและมีอัตราการไหลคงที่ตลอดช่วงท่อที่ทำการวัดการกระจายความดันสถิต (จากหน้าตัดด้านทางออกท่อหมุนจนถึง Orifice)

รูปที่ 3.27 (ข) แสดงรูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัส (w) ในกรณีการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 0.9 (NS09 และ NS09T) และ 1.8 (NS18 และ NS18T) จากกราฟพบว่ารูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสในแนววัด X-X และ Y-Y ในกรณีการไหลที่ค่า Swirl Number เดียวกัน มีลักษณะการกระจายความเร็วใกล้เคียงกัน โดยในทุกกรณีที่บริเวณผนังท่อ ($|r/R| > 0.8$) มีลักษณะเป็นชั้นขอบเขตการไหลโดยมีค่าความเร็วตามแนวสัมผัสต่ำที่ผนังและมีค่าสูงขึ้นที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อ ในช่วง $|r/R| < 0.8$ พบว่าความเร็วตามแนวสัมผัสในทุกกรณีมีลักษณะการกระจายตัวเป็นเส้นตรงแบบ Solid Body Rotation เหมือนในกรณีการไหลในท่อตรง โดยเมื่อ Fit สมการเส้นตรงในช่วง $|r/R| < 0.5$ เพื่อหาความเร็วเชิงมุมของการหมุนวนของการไหล จะได้ค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุมของรูปร่างความเร็วในแนว X-X และ Y-Y ในกรณีการทดลองต่างๆ แสดงดังตาราง 3.6 พบว่ามีค่าแตกต่างจากความเร็วรอบท่อหมุนไม่เกิน 9.5%

รูปที่ 3.28 แสดงรูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสที่ Normalized ด้วยความเร็วที่ผิวสัมผัสของท่อหมุนในแต่ละกรณี (w/W_R) จากรูปการกระจายค่า w/W_R ในทุกกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน มีการกระจายความเร็วเป็นเส้นตรงตามแนวรัศมีในลักษณะ Solid Body Rotation โดยที่บริเวณใกล้ผนังท่อมีความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุดประมาณ 0.7-0.9 เท่าของความเร็วผิวสัมผัสท่อหมุน และในระยะถัดเข้ามาภายในท่อความเร็วจะมีค่าลดลงตามแนวรัศมี จนมีค่าความเร็วประมาณศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางท่อ โดยค่า (w/W_R) ในแต่ละกรณีมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของท่อหมุนที่ Normalized ด้วยความเร็วผิวสัมผัสท่อ แสดงให้เห็นว่าการไหลในทุกกรณีมีลักษณะการกระจายความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วในการหมุนของท่อหมุน

3.5.4 รูปร่างความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน

ในงานวิจัยได้ทำการวัดค่าความดันรวมของการไหล ที่หน้าตัดหลังตำแหน่งติดตั้งกีดขวางเป็นระยะ 0.5D ($S/D = 0.5$) เพื่อแสดงรูปร่างเริ่มต้นของความดันรวมของการไหลในกรณีที่ดีและไม่ดีติดตั้งกีดขวางการไหล โดยใช้ Pitot Probe เป็นอุปกรณ์วัด และทำการทดลองวัดค่าความดันแตกต่างระหว่างความดันที่ Probe เทียบกับความดันอ้างอิง ($P_{ref'}$) ซึ่งให้

เป็นค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ ที่ระยะ $S/D = -1.0$ โดยทำการทดลองวัดค่าความดันรวมในแนว X-X และ Y-Y เช่นเดียวกับกรณีการไหลในท่อตรง

ผลการทดลองแสดงในรูปค่าสัมประสิทธิ์ความดันรวม C_{PT} ซึ่งนิยามตามสมการ (3.2) โดยใช้ความดันอ้างอิง (P_{ref}) เป็นความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ ระยะ $S/D = -1.0$

รูปที่ 3.29 แสดงลักษณะการกระจายความดันรวมในกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง ของการไหลที่ค่า Swirl Number ต่างๆ จากรูปในกรณี NC00 รูปร่างความดันรวมของการวัดในแนว X-X และ Y-Y มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยที่บริเวณชั้นขอบเขตการไหล ($|r/R| > 0.75$) C_{PT} จะมีค่าต่ำที่บริเวณผนังท่อและมีค่าสูงขึ้นตามระยะห่างจากผนังเข้ามาภายในท่อ ในช่วง $|r/R| < 0.75$ พบว่าการไหลมีการกระจายตัวความดันรวมค่อนข้างสม่ำเสมอ มีค่า C_{PT} ประมาณ 1.1 ตลอดช่วงการไหล

ในกรณี NC09 ที่บริเวณชั้นขอบเขตการไหล ($|r/R| > 0.75$) C_{PT} จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่ผนังจนมีค่าสูงสุดที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางท่อประมาณ 0.75 เท่าของรัศมีท่อ ($r/R \sim \pm 0.75$) จากนั้นการไหลจะมีค่า C_{PT} ลดลงที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อตามแนวรัศมีจนมีค่า C_{PT} ต่ำสุดที่บริเวณจุดศูนย์กลางท่อ โดยมีค่า C_{PT} ประมาณ 0.5

สำหรับกรณี NC18 มีลักษณะการกระจายความดันรวมคล้ายกรณี NC09 โดยมีค่า C_{PT} ลดลงตั้งแต่ระยะ r/R ประมาณ ± 0.9 จนมีค่า C_{PT} ต่ำสุดที่บริเวณจุดศูนย์กลางท่อ โดยมีค่า C_{PT} ต่ำสุดประมาณ -1.5 ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากรณี NC09 และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า C_{PT} ตามแนวรัศมีในกรณี NC18 สูงกว่ากรณี NC09

จากกราฟการกระจาย C_{PT} ในกรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง ที่ค่า Swirl Number ต่างๆ พบว่ารูปร่างความดันรวมมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน โดยมีลักษณะการกระจายค่า C_{PT} ในแนววัด X-X และ Y-Y คล้ายกัน และมีรูปร่าง C_{PT} แตกต่างกันตามขนาดความเร็วหมุนวนของการไหล โดยเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number เพิ่มขึ้น ค่า C_{PT} ที่วัดได้ที่บริเวณกลางท่อจะมีค่าลดลง และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า C_{PT} ตามแนวรัศมีที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า C_{PT} ที่วัดได้จาก Pitot Probe และค่าที่คำนวณได้ตามสมการ (3.9) ซึ่งแสดงเป็นเส้นประในรูป พบว่าในช่วง $|r/R| < 0.7$ ค่าที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณจะมีค่าสอดคล้องกันเหมือนในกรณีการไหลในท่อตรง

รูปที่ 3.30 แสดงรูปร่างความดันรวมของการไหลในกรณีติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล รูปที่ 3.30 (ก) แสดงลักษณะการกระจายความดันรวมของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง ในแนวการวัด X-X จากกราฟพบว่า ในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00T) ที่บริเวณชั้นขอบเขตการไหล ($|r/R| > 0.7$) ค่า C_{PT} มีค่าต่ำที่บริเวณใกล้ผนังและมีค่าสูงขึ้นที่ระยะถัดเข้ามาภายในท่อตามแนวรัศมี ในช่วง ($|r/R| < 0.7$) พบว่าการไหลมีการกระจายค่า C_{PT} ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดช่วงโดยมีค่า C_{PT} ประมาณ 1.1

สำหรับกรณี NC09T ในช่วง $0.25 < (r/R)_{X-X} < 0.8$ จะมีค่า C_{PT} ต่ำกว่าค่าที่ตำแหน่งอื่นในแนวการวัดเดียวกัน โดยมีค่า C_{PT} แตกต่างจากค่าในแนววัดเดียวกันมากที่สุดประมาณ 2

ส่วนในกรณี NC18T พบว่า C_{PT} จะมีค่าต่ำกว่าค่าในกรณี NC09T และ NC00T ตลอดแนววัด โดยในช่วง $0.25 < (r/R)_{X-X} < 1$ จะมีค่า C_{PT} ต่ำกว่าค่าที่ตำแหน่งอื่นในแนววัดเดียวกัน มีค่า C_{PT} แตกต่างจากค่าในแนววัดเดียวกันมากที่สุดประมาณ 8

รูปร่างความดันรวมที่มีลักษณะไม่สมมาตรตามแนวแกน ซึ่งมีบริเวณครึ่งหน้าตัดต่อที่มีค่า C_{PT} ต่ำกว่าค่าในครึ่งหน้าตัดต่อที่เหลือเป็นผลมาจากการหมุนวนไปของ Wake ที่เกิดขึ้นด้านหลังแผ่นกีดขวางที่ขวางการไหล พิจารณารูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงการหมุนวนไปของ Wake ด้านหลังแผ่นกีดขวาง เมื่อสมมติให้ Wake ของการไหลหมุนไปด้วยความเร็วตามแนวสัมผัสที่บริเวณผนังท่อและไหลไปตามความยาวท่อด้วยความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (\bar{u}) จะสามารถคำนวณมุมกวาด ($d\psi$) ของ Wake ที่หมุนไปในระยะ 0.5D ได้ดังแสดงในตาราง 3.3 โดยในกรณี NC18T พบว่า Wake ของการไหลซึ่งมีความดันรวมต่ำที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดต่อจะสามารถหมุนไปได้เป็นมุมประมาณ 103° ไปอยู่ที่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งของ Pitot Probe ในแนวการวัด X-X ส่งผลให้ค่า C_{PT} ในช่วง $0.25 < (r/R)_{X-X} < 1$ มีค่าต่ำกว่าค่าในแนววัดเดียวกัน โดยความเร็วหมุนวนของการไหลที่ต่างกันสามารถพาของไหลความดันรวมต่ำให้หมุนไปได้ไม่เท่ากัน และเป็นผลให้มีรูปร่างความดันรวมแตกต่างกันในแต่ละกรณี

รูปที่ 3.30 (ข) แสดงรูปร่าง C_{PT} ในแนวการวัด Y-Y ที่ความเร็วหมุนวนต่างๆ พบว่าในกรณี NC00T ในช่วง $-1 < (r/R)_{Y-Y} < -0.4$ ค่า C_{PT} มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำสุดในแนวการวัดเดียวกัน โดยมีค่า C_{PT} ประมาณ -2.1 ถัดมาในช่วง $-0.4 < (r/R)_{Y-Y} < 0$ ค่า C_{PT} จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในช่วงที่เหลือ ($(r/R)_{Y-Y} > 0$) จะมีการกระจายค่า C_{PT} ค่อนข้างสม่ำเสมอมีค่าประมาณ 1.2 จากกราฟพบว่าบริเวณความดันรวมต่ำสุดในหน้าตัด ($-1 < (r/R)_{Y-Y} < -0.4$) จะมีระยะสูงจากผนังท่อกว่าความสูงของแผ่นกีดขวาง แสดงให้เห็นถึงบริเวณของ Wake ที่มีขนาดโตขึ้นไปตามระยะทางการไหลในท่อ

สำหรับการไหลในกรณี NC09T และ NC18T มีรูปร่างการกระจาย C_{PT} เปลี่ยนแปลงไปจากกรณี NC00T โดยในช่วง $0 < (r/R)_{Y-Y} < 0.75$ ซึ่งเป็นบริเวณครึ่งด้านบนของหน้าตัดต่อ กรณี NC09T จะมีค่า C_{PT} ลดลงจากค่าในกรณี NC00T มีค่า C_{PT} ประมาณ 0.5 ส่วนกรณี NC18T ที่บริเวณเดียวกันมีค่า C_{PT} ลดลงจากค่าในกรณี NC00T มากที่สุด มีค่าประมาณ -1.5 ซึ่งความดันรวมที่มีค่าต่ำลงที่บริเวณด้านบนของหน้าตัดต่อในกรณีการไหลที่มีการหมุนวน จะแสดงถึงการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวาง ที่อยู่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดต่อ ไปที่บริเวณด้านบนของหน้าตัดต่อ

รูปร่างความดันรวมที่วัดได้ที่หน้าตัดหลังแผ่นกีดขวาง แสดงถึงสภาวะเริ่มต้นของการทดลองที่หน้าตัดก่อนไหลเข้าท่อโค้ง โดยพบว่าการกระจายความดันรวมในแนววัด X-X และ Y-Y มีรูปร่างแตกต่างกัน และมีลักษณะการกระจายตัวไม่สมมาตรตามแนวแกนเนื่องจาก Wake ที่เกิดขึ้นที่ด้านหลังแผ่นกีดขวาง โดยพบว่า Wake ที่เกิดขึ้นสามารถหมุนวนไปตามการหมุนวนของการไหล โดยหมุนวนเป็นขนาดมุมกวาด ($d\psi$) ต่างๆกันตามขนาดความเร็วหมุนวนเป็นผลให้รูปร่างความดันรวมที่วัดได้ของการไหลในแต่ละกรณีมีลักษณะแตกต่างกัน

3.6. การกระจายความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง)

3.6.1 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref})

รูปที่ 3.31 แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) ในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง โดยแสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตที่หน้าตัดที่ตรงช่วงก่อนเข้าท่อโค้ง หน้าตัดที่โค้ง และหน้าตัดที่ตรงด้านทางออกท่อโค้ง ในการทดลองมีความไม่แน่นอนของค่า C_{Pref} ประมาณ ± 0.05 และกำหนดให้การไหลที่มีการกระจายค่า C_{Pref} อยู่ภายในช่วง ± 0.05 ว่ามีลักษณะการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด

จากรูปที่หน้าตัดแรกด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = -1.0$) พบว่าการกระจายความดันสถิตของการไหลในกรณี NC00 และ NC09 มีลักษณะสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดท่อ โดยมีค่า C_{Pref} อยู่ภายในช่วง ± 0.05 สำหรับกรณี NC18 มีลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยมีค่า C_{Pref} มากที่สุดประมาณ 0.08 จากกราฟจะเห็นได้ว่าในทุกกรณีการไหลที่ออกจากท่อหมุนมีลักษณะการกระจายความดันสถิตค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดท่อ

ในช่วงการไหลถัดไปก่อนเข้าท่อโค้ง ($S/D = -0.5$ ถึง 1.0) พบว่าการไหลในกรณีต่างๆ มีลักษณะการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยมีค่า C_{Pref} กระจายค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 0.1

ในช่วงท่อโค้งที่หน้าตัด $\theta = 15^\circ$ ในกรณี NC00 พบว่า C_{Pref} มีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม $\psi = 270^\circ$ ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางผนังท่อโค้งด้านใน โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.9 ที่ตำแหน่งมุม ψ อื่นการไหลจะมีค่าความดันสถิตเพิ่มขึ้นและมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 90° ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของผนังท่อโค้งด้านนอก โดยมีค่า C_{Pref} สูงสุดประมาณ 0.4 และมีผลต่างของค่า C_{Pref} ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 90^\circ$ และ $\psi = 270^\circ$ ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างความดันสถิต ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) มากที่สุด มีค่าประมาณ 1.3 เท่าของความดันจลน์เฉลี่ย

ที่หน้าตัด $\theta = 15^\circ$ ในกรณี NC09 พบว่ามีลักษณะการกระจายความดันสถิตแตกต่างจากกรณี NC00 เล็กน้อย โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่มุม $\psi = 270^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.7 ซึ่งมีค่ามากกว่ากรณี NC00 เล็กน้อย และมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่มุม ψ ประมาณ 90° - 120° มีค่าประมาณ 0.5 โดยมีความแตกต่างความดันสถิต ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ประมาณ 1.2 เท่าของความดันจลน์เฉลี่ย ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรณี NC00 เล็กน้อย

สำหรับกรณี NC18 พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{Pref} แตกต่างจากทั้งสองกรณี โดยมี C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 255° - 270° มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.4 ซึ่งมีค่ามากกว่าทุกกรณี และมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 90° - 120° มีค่าประมาณ 0.6

โดยมีความแตกต่างความดันสถิต ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ประมาณ 1 เท่าของความดันจลน์เฉลี่ย ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรณี NC00 และ NC09

จากกราฟจะเห็นได้ว่าแรงสู่ศูนย์กลางการไหลจะส่งผลอย่างสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้ง ทำให้การไหลมีการกระจายความดันสถิตไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด โดยมีความดันสถิตต่ำสุดในหน้าตัดที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านใน และมีความดันสถิตสูงสุดที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอก อย่างไรก็ตามพบว่าความเร็วหมุนวนมีผลทำให้มีลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้งเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า C_{Pref} ระหว่างกรณีต่างๆพบว่า ประการที่หนึ่ง ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 270^\circ$ ค่า C_{Pref} ในกรณี NC18 จะมีค่ามากกว่ากรณี NC09 และมากกว่ากรณี NC00 ตามลำดับ ประการที่สองที่ตำแหน่งมุม $\psi = 90^\circ$ ค่า C_{Pref} ในกรณี NC18 จะมีค่ามากกว่ากรณี NC09 และมากกว่ากรณี NC00 เล็กน้อยตามลำดับ และประการที่สามเมื่อพิจารณาขนาดความแตกต่างความดันสถิตในแนวรัศมีมีความโค้งท่อ $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ พบว่าในกรณี NC18 จะมีค่าน้อยกว่ากรณี NC09 และน้อยกว่ากรณี NC00 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการกระจายความดันสถิตที่พบในท่อโค้งนี้อาจจะอธิบายด้วย ลักษณะการเกิดแรงสู่ศูนย์กลางเนื่องจากการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งได้ดังนี้

พิจารณาแรงสู่ศูนย์กลางเนื่องจากการไหลในท่อโค้ง และการไหลแบบหมุนวนดังแสดงตามรูปที่ 3.32 พบว่าที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านในแรงสู่ศูนย์กลางเนื่องจากผลของความโค้งท่อจะมีทิศทางตรงกันข้ามและหักล้างกับแรงสู่ศูนย์กลางเนื่องจากความโค้งของการไหลแบบหมุนวนเป็นผลทำให้ค่า C_{Pref} ที่ผนังท่อโค้งด้านใน ($\psi = 270^\circ$) ซึ่งเป็นค่าความดันสถิตสัมพัทธ์ที่เทียบกับความดันที่ตำแหน่ง $\psi = 0^\circ$ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามที่ผนังท่อโค้งด้านนอก แรงสู่ศูนย์กลางเนื่องจากความโค้งของการไหลทั้งสองจะมีทิศทางเดียวกัน และเสริมกันเป็นผลทำให้ค่า C_{Pref} ซึ่งเป็นค่าความดันสถิตสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งผนังท่อโค้งด้านนอก ($\psi = 90^\circ$) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ผนังท่อโค้งด้านใน และเป็นผลทำให้ขนาดความแตกต่างความดันสถิตในแนวรัศมีมีความโค้งท่อ ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ในกรณี NC18 มีค่าน้อยกว่ากรณี NC09 และน้อยกว่ากรณี NC00 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม พบว่าที่ระยะการไหลถัดไปตามท่อโค้ง $\theta = 30^\circ - 90^\circ$ แนวโน้มของค่า C_{Pref} ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 270^\circ$ และ 90° ของกรณีต่างๆ จะมีแนวโน้มไปในทางตรงกันข้ามกับหน้าตัดแรก ($\theta = 30^\circ$) กล่าวคือที่ตำแหน่ง $\psi = 270^\circ$ ค่า C_{Pref} ของกรณี NC00 จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณี NC09 และ NC18 จนมีค่ามากที่สุดและมากกว่าทั้งสองกรณีที่หน้าตัด $\theta = 60^\circ$ เป็นต้นไป ในขณะที่ตำแหน่ง $\psi = 90^\circ$ ค่า C_{Pref} ของกรณี NC00 จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณี NC09 และ NC18 เช่นเดียวกันจนมีค่ามากที่สุดและมากกว่าทั้งสองกรณีตั้งแต่หน้าตัด $\theta = 45^\circ$ เป็นต้นไป โดยสาเหตุของค่า C_{Pref} ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 270^\circ$ และ 90° ภายในช่วงท่อโค้ง ($\theta = 30^\circ - 75^\circ$) ที่มีแนวโน้มไปในทางตรงกันข้ามกับค่า C_{Pref} ที่หน้าตัดแรก ($\theta = 15^\circ$) นั้น ยังไม่ทราบสาเหตุแน่ชัด และต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสาเหตุที่ชัดเจน

อีกต่อไป สำหรับรายละเอียดของการกระจายความดันสถิตภายในช่วงท่อโค้ง ($\theta = 30^\circ - 75^\circ$) มีดังนี้

ที่หน้าตัด $\theta = 30^\circ$ พบว่าการไหลในกรณี NC00 มีลักษณะการกระจาย C_{Pref} คล้ายกับลักษณะการกระจาย C_{Pref} ที่หน้าตัด $\theta = 15^\circ$ โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 270° และมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่มุม ψ ประมาณ 90° เนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางของการไหลในท่อโค้ง สำหรับกรณี NC09 พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{Pref} คล้ายกับกรณี NC00 โดยมีค่า C_{Pref} ในกรณี NC00 และ NC09 ที่มุม ψ ต่างๆ แตกต่างกันไปไม่เกิน ± 0.2 และมีค่า $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ในกรณี NC00 และ NC09 แตกต่างกันไปประมาณ 0.1 เท่าของความดันจลน์เฉลี่ย อย่างไรก็ตามพบว่าการไหลในกรณี NC18 จะมีลักษณะการกระจาย C_{Pref} แตกต่างจากกรณีอื่น โดยพบว่าค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม $\psi = 270^\circ$ จะมีค่ามากกว่าค่า C_{Pref} ที่ตำแหน่งเดียวกันในกรณี NC00 และมีค่า $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ในกรณี NC18 น้อยกว่ากรณี NC00 ประมาณ 0.4 เท่าของความดันจลน์เฉลี่ย

ที่หน้าตัดถัดไปในช่วงท่อโค้ง ($\theta = 45^\circ - 75^\circ$) พบว่าการไหลในกรณี NC00 มีลักษณะการกระจาย C_{Pref} คล้ายกับลักษณะการกระจายความดันสถิตที่หน้าตัด $\theta = 15^\circ$ และ 30° โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 270° และมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 90° สำหรับกรณี NC09 พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{Pref} คล้ายกับกรณี NC00 โดยมีตำแหน่งของค่า C_{Pref} ต่ำสุดและสูงสุดในหน้าตัดเหมือนกับกรณี NC00 และมีค่า C_{Pref} ที่มุม ψ ต่างๆ แตกต่างจากกรณี NC00 ประมาณไม่เกิน ± 0.3 และเมื่อพิจารณาขนาดความแตกต่างความดันสถิต $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ระหว่างกรณี NC00 และ NC09 ที่หน้าตัดต่างๆ พบว่ามีขนาดใกล้เคียงกัน มีค่า $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ในกรณี NC09 แตกต่างจากกรณี NC00 มากที่สุดประมาณ 15% ของความดันจลน์เฉลี่ย ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ในช่วงมุมโค้ง $\theta = 15^\circ - 75^\circ$ การไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number = 0.9 มีผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดท่อโค้ง และการไหลในกรณี NC00 และ NC09 จะมีลักษณะการกระจายความดันสถิตคล้ายกัน

อย่างไรก็ตามในช่วงหน้าตัด $\theta = 45^\circ - 75^\circ$ พบว่าการไหลในกรณี NC18 มีลักษณะการกระจายความดันสถิตแตกต่างจากกรณีอื่น โดยพบว่าการไหลมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 270° และมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ $120^\circ - 150^\circ$ โดยตำแหน่งค่า C_{Pref} สูงสุดที่สังเกตพบจะหมุนไปจากตำแหน่งค่า C_{Pref} สูงสุดของกรณีอื่นซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $\psi = 90^\circ$ และพบว่าค่า C_{Pref} ที่ตำแหน่งมุม ψ ต่างๆ ในกรณี NC18 จะมีค่าแตกต่างจากค่า C_{Pref} ในกรณี NC00 โดยมีค่า C_{Pref} แตกต่างกันไปมากที่สุดประมาณ ± 0.6 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขนาดความแตกต่างความดันสถิต ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ระหว่างกรณี NC18 และ NC00 พบว่าในกรณี NC18 มีค่า $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ที่หน้าตัดต่างๆ น้อยกว่ากรณี NC00 ประมาณ 20-40% ของความดันจลน์เฉลี่ย ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดความเร็วหมุนวนที่สูงขึ้น (กรณี NC18)

มีผลต่อการกระจายความดันสถิตตลอดช่วงท่อโค้ง โดยแรงสู่ศูนย์กลางจากการหมุนวนของการไหลมีผลต่อการลดแรงสู่ศูนย์กลางที่เกิดขึ้นของการไหลในท่อโค้ง ทำให้ความแตกต่างความดันสถิต $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ในกรณี NC18 มีค่าน้อยกว่ากรณี NC00

จะเห็นได้ว่าสำหรับท่อโค้งที่มีอัตราส่วนรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งท่อ (α) เท่ากับ 1/3.1 การไหลแบบหมุนวนที่มีค่า Swirl Number ในช่วง 0.9-1.8 สามารถส่งผลต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตภายในท่อโค้ง โดยพบว่าในช่วงหน้าตัดประมาณ 15° แรกจากปากทางเข้าท่อโค้ง การไหลในกรณี NC00, NC09 และ NC18 มีลักษณะการกระจาย C_{Pref} แตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัดในกรณี NC18 มากกว่ากรณี NC09 และมากกว่ากรณี NC00 ตามลำดับ และมีความแตกต่างความดันสถิต $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ในกรณี NC18 น้อยกว่ากรณี NC09 และน้อยกว่ากรณี NC00 ตามลำดับ เนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางของการหมุนวนของการไหลที่หักล้างกับแรงสู่ศูนย์กลางในท่อโค้ง และตั้งแต่น้ำตัด $\theta = 30^\circ$ เป็นต้นไป การไหลแบบหมุนวนที่มีค่า Swirl Number = 0.9 (NC09) จะมีผลน้อยลงต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายความดันสถิตในหน้าตัด โดยมีลักษณะการกระจายค่า C_{Pref} ในกรณี NC09 คล้ายกับกรณี NC00 ในทางตรงกันข้ามสำหรับกรณี NC18 ซึ่งมีความเร็วหมุนวนสูงขึ้น พบว่าขนาดความเร็วหมุนวนที่เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลต่อการกระจายความดันสถิตตลอดช่วงการไหลในท่อโค้ง โดยพบว่าการไหลในกรณี NC18 จะมีตำแหน่งของค่า C_{Pref} สูงสุดในหน้าตัดอยู่ที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 120° - 150° ซึ่งแตกต่างจากกรณีอื่นซึ่งมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่มุม ψ ประมาณ 90° และพบว่าค่า $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ในกรณี NC18 จะมีค่าน้อยกว่ากรณีอื่นตลอดช่วงท่อโค้ง

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า C_{Pref} ต่ำสุดของการไหลในทุกกรณีพบว่าที่หน้าตัดต่างๆภายในช่วงท่อโค้งค่า C_{Pref} ต่ำสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 270° และไม่หมุนวนไปตามความเร็วหมุนวนของการไหล แสดงให้เห็นว่าภายในช่วงท่อโค้งความโค้งของท่อมีผลเด่นชัดมากกว่าผลของการไหลแบบหมุนวนต่อลักษณะการกระจายความดันสถิต โดยพบว่าบริเวณความดันต่ำของการไหลในท่อโค้งจะไม่หมุนวนไปตามการหมุนวนของการไหล ซึ่งแตกต่างจากลักษณะการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวาง ที่พบในกรณีการไหลในท่อตรง

ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง พบว่าที่หน้าตัดแรก ($S/D = 4.6$) ในกรณี NC00 และ NC09 การไหลมีลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดโดยมีการกระจายค่า C_{Pref} ในช่วง ± 0.1 แสดงให้เห็นถึงการปรับตัวอย่างรวดเร็วจากการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอในหน้าตัดช่วงท่อโค้ง จนมีการกระจายความดันสถิตที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในหน้าตัดต่อตรงด้านทางออก (ประมาณ $0.5D$ จากปากทางออกท่อโค้ง) สำหรับกรณี NC18 พบว่ามีการกระจายความดันสถิตที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งแตกต่างจากกรณีอื่น โดยพบว่าความดันสถิตแตกต่างกันที่เกิดจากการไหลผ่านท่อโค้ง จะถูกผลของการหมุนวนของการไหลทำให้สามารถคงความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดได้เมื่อไหลออกไปที่ท่อตรงด้านทางออก

และทำให้มีลักษณะการกระจาย C_{Pref} ที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าทุกกรณี โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 165° มีค่าประมาณ -0.5

ที่หน้าตัด $S/D = 5.1$ การไหลในกรณี NC00 และ NC09 มีลักษณะการกระจาย C_{Pref} คล้ายกันและมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด ส่วนการไหลในกรณี NC18 พบว่าบริเวณ C_{Pref} ต่ำสุดจะหมุนไปตามการหมุนวนของการไหล โดยมีตำแหน่งของค่า C_{Pref} ต่ำสุดหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 195° และมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.4 ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ การหมุนวนไปของตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุด เมื่อประมาณให้หมุนวนไปด้วยความเร็วหมุนวนของการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุน โดยให้จุดเริ่มต้นของการหมุนวนอยู่ที่ตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุด ที่หน้าตัด $S/D = 4.6$ ดังแสดงเป็นเส้นประในรูป จากกราฟพบว่าตำแหน่งของค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ได้จากการทดลองที่หน้าตัด $S/D = 5.1$ จะอยู่ตามหลังตำแหน่งของค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ได้จากการคำนวณซึ่งแสดงเป็นเส้นประในกราฟ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำ จะหมุนวนไปด้วยความเร็วที่ช้ากว่าความเร็วหมุนวนของการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุน

ตั้งแต่หน้าตัด $S/D = 5.6$ เป็นต้นไปพบว่า การไหลในกรณี NC00 และ NC09 มีลักษณะการกระจาย C_{Pref} สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด สำหรับกรณี NC18 พบว่าความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่พบจะหมุนวนไป และมีการปรับตัวการกระจายความดันสถิตให้สม่ำเสมอมากขึ้นไปตามระยะทางการไหล โดยการไหลจะมีการปรับตัวจนมีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัดตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 37 เป็นต้นไป (ประมาณ 33D จากปากทางออกท่อโค้ง)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการไหลในช่วงท่อโค้ง และท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งจะเห็นได้ว่า ในช่วงท่อโค้งความโค้งท่อจะมีผลต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตมากกว่าการหมุนวนของการไหลในทุกกรณี โดยพบว่าการไหลจะมีค่า C_{Pref} ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าบริเวณผนังท่อโค้งด้านใน และมีตำแหน่งของค่า C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัดอยู่ที่ตำแหน่ง ψ ประมาณ 270° ตลอดช่วงการไหลในท่อโค้ง และเมื่อไหลออกจากท่อโค้งแล้ว พบว่าในกรณี NC00 และ NC09 ผลของความโค้งท่อจะสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว สำหรับกรณี NC18 พบว่าความแตกต่างความดันสถิตในช่วงท่อโค้งที่เกิดขึ้นจะถูกพาออกมาที่ท่อตรงด้านทางออกได้ และการหมุนวนของการไหลจะมีผลต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อตรงด้านทางออกมากกว่าผลของความโค้งท่อ โดยสามารถสังเกตการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำในหน้าตัดไปตามระยะทางการไหลได้

3.6.2 การกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล

รูปที่ 3.33 แสดงลักษณะการกระจายความแตกต่างความดันสถิตที่ผนังท่อด้านตรงกันข้าม ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ และ $\psi = 180^\circ$ ($P_0 - P_{180}$) และความแตกต่างความดันสถิตที่มุม $\psi = 90^\circ$ และ $\psi = 270^\circ$ ($P_{90} - P_{270}$) ตามระยะทางการไหลในท่อ ในกรณีที่ไม่มีตีแผ่ผนังท่อด้าน

ขบวนการไหลที่หน้าตัดก่อนเข้าท่อโค้ง ($S/D = 0$) โดยแสดงผลในรูปสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิต $C_{P_{0-180}}$ สำหรับความแตกต่างความดันสถิต ($P_{P_{0-180}}$) และสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิต $C_{P_{90-270}}$ สำหรับความแตกต่างความดันสถิต ($P_{90} - P_{270}$) ซึ่งนิยามตามสมการ (3.21) และ (3.22) ในการทดลองมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตประมาณ ± 0.05 และกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิตที่มีค่าในช่วง ± 0.05 ว่ามีค่า $C_{P_{0-180}}$ และ $C_{P_{90-270}}$ ประมาณศูนย์ หรือไม่มีความแตกต่างความดันสถิตที่ผนังท่อด้านตรงกันข้าม

รูปที่ 3.33 (ก) แสดงลักษณะการกระจาย $C_{P_{0-180}}$ ตามระยะทางการไหล จากรูปในช่วงท่อตรงก่อนทางเข้าท่อโค้ง ($S/D = -1.0-1.0$) การไหลในทุกกรณีมีลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในหน้าตัด โดยมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณไม่เกิน ± 0.08

ในช่วงท่อโค้ง ($S/D = 1.5-3.9$) กรณี NC00 พบว่า $C_{P_{0-180}}$ มีค่าประมาณศูนย์ไปตลอดช่วงการไหล แสดงให้เห็นว่าแรงสู่ศูนย์กลางการไหลที่เกิดขึ้นในท่อโค้งจะไม่มีผลต่อการสร้างความแตกต่างความดันสถิตที่บริเวณผนังด้านบนและล่างของท่อโค้ง ส่วนในกรณี NC09 พบว่ามีค่า $C_{P_{0-180}}$ ต่ำสุดประมาณ -0.1 และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการไหลในท่อโค้ง ส่วนในกรณี NC18 มีค่า $C_{P_{0-180}}$ ต่ำสุดประมาณ -0.2 และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการไหลในท่อโค้งเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าในกรณีการไหลแบบหมุนวน ความเร็วหมุนวนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้ง ทำให้มีความดันสถิตที่ผนังด้านบนและด้านล่างของท่อโค้งแตกต่างกัน

ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง ($S/D > 4$) ในกรณี NC00 พบว่ามีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณศูนย์ไปตลอดช่วงการไหล และกรณี NC09 ไม่พบค่า $C_{P_{0-180}}$ ไปตามระยะทางการไหลเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดในช่วงท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง อย่างไรก็ตามพบว่าการไหลในกรณี NC18 มีลักษณะแตกต่างจากกรณีอื่นโดยพบลักษณะของการแกว่งของค่าความแตกต่างความดัน ($C_{P_{0-180}}$) ไปตามระยะทางการไหล

การแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการหมุนวนไปของความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัด ซึ่งถูกพาออกมาจากการไหลในช่วงท่อโค้ง โดยพบว่าขนาดการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ จะมีขนาดสูงสุดในคาบแรก และมีค่าลดลงไปตามระยะทางการไหลเนื่องจากการปรับตัวของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอมากขึ้น และการไหลจะมีคาบการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ ยาวขึ้นไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากการหมุนวนไปของความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่ช้าลงไปตามการไหลในท่อ โดยสามารถพบการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$ ไปได้ไกลถึงระยะ S/D ประมาณ 35 (ประมาณ 30D จากทางออกท่อโค้ง) ก่อนจะไม่สามารถสังเกตความแตกต่างความดันได้

รูปที่ 3.33 (ข) แสดงลักษณะการกระจายค่า $C_{P_{90-270}}$ ตามระยะทางการไหล พบว่าในช่วงหน้าตัดก่อนเข้าท่อโค้ง ($S/D = -1.0-1.0$) การไหลในทุกกรณีมีค่า $C_{P_{90-270}}$ ไม่เกิน ± 0.08

แสดงให้เห็นว่าการไหลที่ออกจากท่อหมุนมีลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ค่อนข้างสมมาตรในหน้าตัด

ในช่วงท่อโค้ง พบว่าการไหลในกรณีต่างๆ มีความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอก (P_{90}) มากกว่าความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านใน (P_{270}) ($C_{P_{90-270}}$ เป็นบวก) เนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางของการไหล โดยในกรณี NC00 พบว่า $C_{P_{90-270}}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ปากทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งมุม θ ประมาณ $30^\circ-45^\circ$ โดยมีค่า $C_{P_{90-270}}$ สูงสุดประมาณ 1.4 จากนั้นจะมีค่า $C_{P_{90-270}}$ ลดลงในช่วงท่อโค้งที่เหลือ สำหรับกรณี NC09 พบว่ามีลักษณะการกระจาย $C_{P_{90-270}}$ ในช่วงท่อโค้งคล้ายกับกรณี NC00 และกรณี NC18 จะมีลักษณะการกระจายค่า $C_{P_{90-270}}$ แตกต่างจากกรณีอื่น โดยมีค่า $C_{P_{90-270}}$ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง θ ประมาณ 30° โดยมีค่า $C_{P_{90-270}}$ สูงสุดประมาณ 1 ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรณีอื่นเล็กน้อย

ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้ง พบว่าการไหลในแต่ละกรณีมีลักษณะการกระจาย $C_{P_{90-270}}$ ตามระยะทางการไหลคล้ายกับการกระจาย $C_{P_{0-180}}$ โดยในกรณี NC00 และ NC09 มีลักษณะการกระจาย $C_{P_{90-270}}$ ประมาณศูนย์ไปตามระยะทางการไหล ส่วนกรณี NC18 จะพบการแกว่งของค่า $C_{P_{90-270}}$ ในลักษณะเดียวกับการแกว่งของค่า $C_{P_{0-180}}$

จะเห็นได้ว่าในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง ($\alpha = 1/3.1$) ความโค้งท่อมีผลสูงต่อการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้ง โดยการไหลในทุกกรณีมีค่าความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าผนังท่อโค้งด้านในเนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางของการไหล อย่างไรก็ตามยังสามารถพบผลของการไหลแบบหมุนวนต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้ง โดยพบว่าในกรณี NC18 มีการกระจายค่า $C_{P_{0-180}}$ และ $C_{P_{90-270}}$ แตกต่างจากกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนเล็กน้อย นอกจากนี้ผลของการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number = 1.8 สามารถพาความแตกต่างความดันสถิตของการไหลในช่วงท่อโค้งให้หมุนวนไปที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งได้ โดยพบลักษณะการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันสถิตไปตามระยะทางการไหลได้ไกลประมาณ 30D จากทางออกท่อโค้ง

3.6.3 การกระจายความดันสถิต ($C_{P_{\psi}}$ และ $\overline{C_{P_{ref'}}$) ตามระยะทางการไหล

ในการพิจารณาลักษณะการกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล ในกรณีการไหลผ่านท่อโค้งที่ไม่มีการติดแผ่นกีดขวาง ได้พิจารณาในช่วงการไหลตั้งแต่ท่อตรงด้านหน้าท่อโค้งท่อโค้งและท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง โดยแสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตที่มุม ψ ต่างๆ ตามระยะทางการไหลในรูปสัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่มุม ψ ($C_{P_{\psi}}$) ซึ่งนิยามตามสมการ (3.23) และแสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลในรูปของสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ยตลอดหน้าตัด ($\overline{C_{P_{ref'}}$) ซึ่งนิยามตามสมการ (3.11) โดยใช้

ตำแหน่งความดันอ้างอิงเป็นตำแหน่งความดันสถิตที่ตำแหน่ง มุม $\psi = 0^\circ$ ที่หน้าตัด $S/D = -1.0$

รูปที่ 3.34 แสดงลักษณะการกระจายค่า $C_{p\psi}$ ที่มุม $\psi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270° และการกระจายค่า $\overline{C_{p_{ref}}}$ ตามระยะทางการไหล รูปที่ 3.34 (ก) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{p0} ตามระยะทางการไหลในท่อ โดยท่อโค้งจะวางตัวอยู่ในช่วงระยะ $S/D = 1.5-3.9$ จากรูปพบว่าในกรณี NC00 ในช่วงท่อตรงด้านก่อนเข้าท่อโค้ง การไหลมีค่า C_{p0} ลดลงตามระยะทางการไหล ภายในช่วงท่อโค้ง C_{p0} จะมีค่าประมาณคงที่ และเมื่อไหลออกจากท่อโค้งไปประมาณ $5D-6D$ (S/D ประมาณ 5-10) จะมีการปรับลักษณะการกระจาย C_{p0} เล็กน้อยไปตามระยะทางการไหล และตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 เป็นต้นไป C_{p0} จะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล

ส่วนในกรณี NC09 พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{p0} ในช่วงแรกก่อนเข้าท่อโค้ง และในช่วงท่อโค้งคล้ายกับกรณี NC00 ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 เป็นต้นไปจะมีค่า C_{p0} ลดลงตามระยะทางการไหลอย่างเป็นเส้นตรง โดยมีอัตราการลดลงของความดันสถิตตามระยะทางการไหลสูงกว่ากรณี NC00

สำหรับกรณี NC18 พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{p0} แตกต่างจากกรณีอื่น โดยการไหลจะมีค่า C_{p0} ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อไหลเข้าท่อโค้ง ภายในช่วงท่อโค้ง C_{p0} มีค่าค่อนข้างคงที่ตามระยะทางการไหล และที่ท่อด้านทางออกท่อโค้ง ($S/D > 4$) พบลักษณะการแกว่งของค่า C_{p0} ตามระยะทางการไหลเช่นเดียวกับกรณีการไหลแบบหมุนวนในท่อตรงที่ติดแผ่นกีดขวาง แสดงให้เห็นว่าการกระจายความดันสถิตที่ไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อโค้งจะถูกผลของการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number = 1.8 (NC18) พาคความแตกต่างความดันให้หมุนวนไปตามความยาวท่อ ทำให้ค่า C_{p0} มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงในลักษณะของการแกว่งของค่า C_{p0} ไปตามระยะทางการไหล โดยมีขนาดการแกว่งของค่า C_{p0} ลดลงไปตามระยะทางการไหลเนื่องจากการปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอมากขึ้น และตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 35-40 เป็นต้นไปจะไม่พบลักษณะการแกว่งของค่า C_{p0} ตามระยะทางการไหล โดยมีการกระจายค่า C_{p0} ค่อนข้างเป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล และมีอัตราการลดลงของค่า C_{p0} ตามระยะทางการไหลมากกว่าทุกกรณี

รูปที่ 3.34 (ข) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{p90} ตามระยะทางการไหล ในช่วงท่อโค้งในกรณี NC00 พบว่า C_{p90} ซึ่งเป็นค่าความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่หน้าตัดทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าสูงสุดที่หน้าตัด θ ประมาณ 45° เนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางของการไหลในท่อโค้ง และจะมีค่าลดลงไปตามการไหลในช่วงท่อโค้งที่เหลือ ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งในช่วง S/D ประมาณ 5-10 การไหลจะมีการปรับตัวลักษณะการกระจายค่า C_{p90} เล็กน้อย และตั้งแต่ระยะ $S/D > 10$ เป็นต้นไป (ห่างจากปากทางออกท่อโค้ง $6D$) จะมีการกระจาย C_{p90} เป็นเส้นตรงลดลงไปตามระยะทางการไหล

กรณี NC09 มีลักษณะการกระจายค่า C_{p90} ในช่วงท่อโค้งคล้ายกับกรณี NC00 ที่ต่อต้านทางออกท่อโค้งตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 เป็นต้นไปจะมีการกระจายค่า C_{p90} เป็นเส้นตรงลดลงตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{p90} มากกว่ากรณี NC00

อย่างไรก็ตามพบว่า สำหรับกรณี NC18 มีการกระจายค่า C_{p90} ในช่วงท่อโค้งแตกต่างจากกรณีอื่น โดยค่า C_{p90} สูงสุดจะอยู่ที่หน้าตัด $\theta = 15^\circ$ แทนที่จะเป็นที่หน้าตัด $\theta = 45^\circ$ ดังกรณีอื่น จากนั้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือ C_{p90} มีค่าลดลงไปตามการไหลในท่อโค้ง แสดงให้เห็นว่าการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number = 1.8 มีผลต่อลักษณะการกระจาย C_{p90} ในช่วงท่อโค้ง ทำให้มีการกระจายค่า C_{p90} ในช่วงท่อโค้งต่างจากกรณี NC09 และ NC00 ในช่วงท่อตรง ด้านทางออกท่อโค้งพบลักษณะการแกว่งของค่า C_{p90} ตามระยะทางการไหลเช่นเดียวกับการกระจายค่า C_{p0} และตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 40 เป็นต้นไป จะมีการกระจายค่า C_{p90} เป็นเส้นตรงลดลงไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{p90} มากกว่ากรณี NC09 และมากกว่ากรณี NC00 ตามลำดับ

รูปที่ 3.34 (ค) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{p180} ตามระยะทางการไหลพบว่าการไหลในทุกกรณีมีลักษณะการกระจายค่า C_{p180} คล้ายกับลักษณะการกระจายค่า C_{p0} ยกเว้นบริเวณช่วงท่อโค้งที่แตกต่างกันเล็กน้อย

รูปที่ 3.34 (ง) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{p270} ตามระยะทางการไหล ในช่วงท่อโค้งพบว่าการไหลในกรณี NC00 มีค่า C_{p270} ซึ่งเป็นความดันสถิตที่ตำแหน่งผนังท่อโค้งด้านในลดลงตามการไหลในช่วงท่อโค้งจนมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง θ ประมาณ 45° เนื่องจากผลของแรงศูนย์กลางการไหลที่เกิดขึ้น จากนั้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือจะมีค่า C_{p270} เพิ่มขึ้นจนถึงปากทางออกท่อโค้ง และที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งจะมีการกระจาย C_{p270} เป็นเส้นตรงลดลงไปตามระยะทางการไหล สำหรับกรณี NC09 ในช่วงท่อโค้งจะมีการกระจาย C_{p270} คล้ายกับกรณี NC00 และที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งจะมีการกระจาย C_{p270} เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหลโดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{p270} ตามระยะทางการไหลมากกว่ากรณี NC00

ในทางตรงกันข้ามสำหรับกรณี NC18 พบว่าในช่วงท่อโค้งมีลักษณะการกระจาย C_{p270} แตกต่างจากกรณีอื่นเล็กน้อย โดยมีค่า C_{p270} ลดลงในช่วงท่อโค้งอย่างต่อเนื่องจนมีค่า C_{p270} ต่ำสุดที่ตำแหน่ง θ ประมาณ 75° แทนที่จะเป็นที่ตำแหน่ง θ ประมาณ 45° ดังเช่นกรณีอื่น และที่ต่อต้านทางออกท่อโค้งจะพบลักษณะการแกว่งของค่า C_{p270} ไปตามระยะทางการไหลคล้ายกับการกระจาย C_{p0}

จากกราฟการกระจาย $C_{p\psi}$ ตามระยะทางการไหล จะเห็นได้ว่าในช่วงท่อโค้ง ความโค้งท่อและแรงศูนย์กลางอันเกิดจากความโค้งท่อจะมีผลสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในการไหลทุกกรณี โดยพบว่าในช่วงท่อโค้งค่า C_{p90} ซึ่งเป็นความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกในกรณี NC00 และ NC09 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าก่อนเข้าท่อโค้งไปตามระยะทางการไหลในช่วงต้นของท่อโค้ง และต่อมาจะมีค่าลดลงจนคืนสภาพมีค่า C_{p90} ที่ด้านทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่ด้านทางเข้าท่อโค้งเล็กน้อย ส่วนค่า C_{p90} ในกรณี NC18 ก็จะมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันแต่

จะมีค่า C_{P90} ที่ด้านทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่ด้านทางเข้าท่อโค้งอย่างเห็นได้ชัด ส่วนค่า C_{P270} ซึ่งเป็นความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านในก็จะมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน โดยในกรณี NC00 และ NC09 จะมีค่า C_{P270} ลดลงจากค่าก่อนเข้าท่อโค้งในช่วงต้นของท่อโค้ง และมีค่าเพิ่มขึ้นคืนสภาพเข้าสู่ค่าก่อนเข้าท่อโค้งในช่วงท้าย โดยมีค่า C_{P270} ที่ด้านทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่ด้านทางเข้าเล็กน้อย ส่วนในกรณี NC18 ก็จะมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันแต่จะมีค่า C_{P270} ที่ด้านทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่ด้านทางเข้าอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามความเร็วหมุนวนสามารถส่งผลเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้งได้ โดยพบว่าการไหลในกรณี NC18 ซึ่งมีความเร็วหมุนวนสูงที่สุดจะมีลักษณะการกระจาย $C_{P\psi}$ ในช่วงท่อโค้งแตกต่างจากกรณีอื่นมากที่สุด โดยเฉพาะที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งความเร็วหมุนวนจะมีผลสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิต โดยในกรณี NC00 และ NC09 พบว่ามีลักษณะการกระจาย $C_{P\psi}$ เป็นเส้นตรงตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า $C_{P\psi}$ ตามระยะทางการไหลในกรณี NC09 มากกว่ากรณี NC00 ในขณะที่กรณี NC18 จะพบลักษณะของการแกว่งของค่า $C_{P\psi}$ ไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากการหมุนวนไปของการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นภายในท่อโค้ง

รูปที่ 3.34 (จ) แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหล จากรูปในกรณี NC00 ในช่วงท่อตรงด้านทางเข้าท่อโค้ง ความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) มีค่าลดลงไปตามระยะทางการไหล จากนั้นเมื่อไหลเข้าท่อโค้งจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ประมาณคงที่ และที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งค่า $\overline{C_{Pref}}$ จะมีค่าลดลง โดยมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่หน้าตัดทางเข้าท่อโค้งเล็กน้อย และตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 เป็นต้นไป จะมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล สำหรับกรณี NC09 มีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ คล้ายกรณี NC00 โดยในช่วงท่อโค้งจะมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ แตกต่างจากบริเวณอื่นเล็กน้อย และมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่หน้าตัดทางเข้าเล็กน้อยเช่นเดียวกับกรณี NC00 ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 จะมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลมากกว่ากรณี NC00

สำหรับกรณี NC18 พบว่ามีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ แตกต่างจากกรณีอื่นมากที่สุด โดยเมื่อไหลเข้าท่อโค้ง $\overline{C_{Pref}}$ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าต่ำสุดที่หน้าตัด θ ประมาณ 75° และมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ด้านทางออกท่อโค้ง โดยมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่หน้าตัดทางเข้ามากกว่ากรณีอื่นอย่างเห็นได้ชัด ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงไปตามระยะทางการไหล โดยในช่วงแรก (S/D ประมาณ 5-20) ซึ่งการไหลยังมีความเร็วหมุนวนสูงอยู่การไหลจะมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ สูงสุด และที่ระยะการไหลถัดไปอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลจะมีค่าลดลง จนมีการกระจายค่า $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลมากกว่าทุกกรณี

จะเห็นได้ว่าขนาดความเร็วหมุนของการไหล มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามทิศทางการไหลในช่วงท่อโค้งและด้านทางออกท่อโค้ง โดยพบว่าในกรณี NC18 ซึ่งมีขนาดของความเร็วหมุนสูงสุด จะมีลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยในช่วงท่อโค้งแตกต่างจากกรณีอื่นมากที่สุด และมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ที่ด้านทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่ด้านทางเข้าอย่างเห็นได้ชัดมากกว่ากรณีอื่น ที่ด้านทางออกท่อโค้งพบว่าการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลเพิ่มขึ้น เมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้น ซึ่งเมื่อ Fit สมการเส้นตรงกับกราฟการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยในช่วง $S/D = 41-80$ ของการไหลในทุกกรณีพบว่าสามารถ Fit สมการได้ค่อนข้างดีมีค่า R^2 ในช่วง 0.998-0.999 และมีอัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะทางการไหล (S/D) ซึ่งแสดงถึงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหล (Friction Factor, f) แสดงตามตาราง 3.7 พบว่าในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนสูงกว่าจะมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหลสูงกว่ากรณีที่มีความเร็วหมุนต่ำกว่า โดยในกรณี NC09 มีค่า f เพิ่มขึ้นจากกรณี NC00 คิดเป็น 10% และกรณี NC18 มีค่า f เพิ่มขึ้นจากกรณี NC00 ประมาณ 20%

3.7. การกระจายความดันสถิตในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง)

3.7.1 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref})

รูปที่ 3.35 แสดงการกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) ในกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวางการไหลที่ระยะ $S/D = 0$ (กรณี NC00T, NC09T และ NC18T) โดยในการทดลองมีความไม่แน่นอนของค่า C_{Pref} ในช่วง ± 0.05 และกำหนดให้การไหลที่มีการกระจายค่า $C_{Pref} \leq \pm 0.05$ ว่ามีลักษณะการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด

จากรูปที่หน้าตัดแรกด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = -1.0$) พบว่าการไหลที่ออกจากท่อหมุนในทุกกรณีมีลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยมีการกระจายค่า C_{Pref} ในช่วง ± 0.08

ที่หน้าตัดถัดไป $S/D = -0.5$ ในกรณี NC00T พบว่าค่า C_{Pref} ที่บริเวณผนังด้านล่างของหน้าตัดท่อจะมีค่ามากกว่าที่บริเวณผนังด้านบน โดยมีความ C_{Pref} สูงสุดที่ตำแหน่งมุม φ ประมาณ 180° มีค่า C_{Pref} ประมาณ 0.5 และมีค่ามากกว่าความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตที่ด้านหน้า ($S/D = -1.0$) ซึ่งมีค่าในช่วง ± 0.08 โดยค่า C_{Pref} ที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดท่อที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการขวางของแผ่นกีดขวางที่อยู่ถัดไปด้านหลังเป็นระยะ 0.5D

สำหรับกรณีการไหลที่มีการหมุนพบว่าความเร็วหมุนมีผลต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ด้านหน้าแผ่นกีดขวาง โดยกรณี NC09T พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{Pref} แตกต่างจากกรณี NC09T เล็กน้อย โดยมีค่า C_{Pref} สูงสุดอยู่ในช่วงมุม ψ ประมาณ 180° - 210° และมีค่า C_{Pref} สูงสุดต่ำกว่ากรณี NC00T เล็กน้อย สำหรับกรณี NC18T ซึ่งมีขนาดความเร็วหมุนสูงสุดจะมีลักษณะการกระจาย C_{Pref} แตกต่างจากกรณีอื่นมากที่สุด โดยมีตำแหน่ง C_{Pref} สูงสุดอยู่ที่มุม ψ ประมาณ 225° และมีค่า C_{Pref} สูงสุดน้อยกว่ากรณี NC09T และ NC00T แสดงให้เห็นว่าแผ่นกีดขวาง ที่อยู่ด้านหลังจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างความดันสถิตที่หน้าตัดด้านหน้าแผ่นกีดขวาง ในกรณีการไหลที่มีการหมุนน้อยกว่ากรณีการไหลที่ไม่มี การหมุน

ที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($S/D = 0.5$) ในกรณีการไหลแบบไม่หมุน (NC00T) การไหลมีความดันสถิตที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดที่ต่ำกว่าบริเวณด้านบน เนื่องจากการสูญเสียความดันจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่มุม ψ ประมาณ 180° มีค่า C_{Pref} ประมาณ -0.6 สำหรับกรณี NC09T พบว่าบริเวณที่มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดจะ หมุนไปอยู่ที่มุม ψ ประมาณ 210° มีค่า C_{Pref} ประมาณ -1.1 และในกรณี NC18T มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่มุม $\psi = 255^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -2.5

พิจารณาขนาดของค่า C_{Pref} ต่ำสุดพบว่าในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนสูงจะมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดต่ำกว่ากรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนน้อยกว่า เนื่องจากในกรณีการไหลที่มีการ หมุนจะมีความเร็วของการไหล ($\vec{u} + \vec{w}$) ปะทะแผ่นกีดขวางเพิ่มขึ้น ทำให้มีความดันตกคร่อม แผ่นกีดขวางเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาตำแหน่งค่า C_{Pref} ต่ำสุดเปรียบเทียบกับตำแหน่งมุม ψ ที่คำนวณให้ Wake ด้านหลังแผ่นกีดขวาง หมุนไปตามความเร็วหมุนที่ด้านทางออกท่อ หมุนซึ่งแสดงเป็นเส้นประในรูป พบว่าในกรณี NC09T และกรณี NC18T มีตำแหน่งค่า C_{Pref} ต่ำสุดตามหลังตำแหน่งที่คำนวณได้ประมาณ 15° - 30° แสดงให้เห็นว่าการหมุนไปของค่า C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวาง จะมีความเร็วในการหมุนช้ากว่าความเร็วหมุน ของการไหลที่ออกจากท่อหมุน

ที่หน้าตัดถัดไป ($S/D = 1.0$) พบว่าการไหลในกรณีต่างๆ จะมีการหมุนไปของค่า C_{Pref} ต่ำสุด และมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการปรับตัวการกระจายความดันสถิตใน หน้าตัดที่สม่ำเสมอมากขึ้น โดยในกรณี NC00T มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดหมุนไปที่ตำแหน่ง ψ ประมาณ 180° มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -0.3 กรณี NC09T ค่า C_{Pref} ต่ำสุดจะหมุนไปอยู่ที่ มุม ψ ประมาณ 240° มีค่า C_{Pref} ประมาณ -0.4 และในกรณี NC18T มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่มุม $\psi = 315^\circ$ มีค่า C_{Pref} ต่ำสุดประมาณ -1.2

เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งค่า C_{Pref} ต่ำสุดกับตำแหน่งที่คำนวณให้ Wake ด้านหลังแผ่น กีดขวางหมุนไปตามความเร็วหมุนที่ด้านทางออกท่อหมุน (ดังแสดงเป็นเส้นประในรูป) พบว่าในกรณี NC09T ค่า C_{Pref} ต่ำสุดจะอยู่ตามหลังตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณประมาณ

30° และกรณี NC18T มีตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดตามหลังประมาณ 70° โดยมีมุมแตกต่างระหว่างตำแหน่ง C_{Pref} ต่ำสุดที่ได้จากการทดลองที่ตามหลังตำแหน่งจากการคำนวณเพิ่มขึ้นจากหน้าตัดแรก ($S/D = 0.5$) แสดงให้เห็นถึงการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำซึ่งหมุนช้าลงไปตามระยะทางการไหลในท่อ

ในช่วงท่อโค้ง ที่หน้าตัด $\theta = 15^\circ$ ในกรณี NC00T พบว่ามีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่มุม ψ ประมาณ 285° ซึ่งเป็นบริเวณผนังท่อโค้งด้านใน และมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่มุม ψ ประมาณ 90° ซึ่งเป็นบริเวณผนังท่อโค้งด้านนอก สำหรับกรณี NC09T พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{Pref} คล้ายกับกรณี NC00T โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่มุม ψ ประมาณ 255° และมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่มุม ψ ประมาณ 90°-120° จากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงท่อโค้งการไหลในกรณี NC00T และ NC09T มีการกระจายความดันสถิตคล้ายกันและมีลักษณะการกระจายความดันสถิตแบบการไหลในท่อโค้ง โดยมีค่า C_{Pref} ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าค่า C_{Pref} ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านใน และจากรูปการกระจาย C_{Pref} ที่ได้ไม่พบบริเวณความดันต่ำซึ่งเกิดจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้ง แสดงให้เห็นว่าในช่วงท่อโค้ง ความโค้งท่อมีผลสูงต่อการกระจายความดันสถิต ทำให้มีการกระจายความดันสถิตในกรณี NC00T และ NC09T คล้ายกันและมีลักษณะแบบการไหลในท่อโค้ง

อย่างไรก็ตามพบว่าในกรณี NC18T จะสามารถพบบริเวณความดันต่ำที่เกิดจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้ง และมีลักษณะการกระจาย C_{Pref} แตกต่างจากกรณีอื่น โดยพบบริเวณค่า C_{Pref} ต่ำที่เกิดจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 15°-75° ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งการหมุนวนไปของ Wake ด้านหลังแผ่นกีดขวาง ที่คำนวณโดยใช้ความเร็วหมุนวนที่ด้านทางออกท่อหมุนดังแสดงเป็นเส้นประในรูป พบว่าบริเวณความดันต่ำจะอยู่ตามหลังตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณประมาณ 180° แสดงให้เห็นถึงการหมุนวนไปของบริเวณความดันต่ำที่หมุนช้ากว่าความเร็วหมุนวนของการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุน

ที่หน้าตัด $\theta = 30^\circ$ การไหลในกรณี NC00T และ NC09T มีการกระจายความดันสถิตคล้ายกับที่หน้าตัด $\theta = 15^\circ$ โดยมีค่า C_{Pref} ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าค่า C_{Pref} ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านใน ส่วนกรณี NC18T ยังสามารถพบบริเวณค่า C_{Pref} ต่ำ ซึ่งเกิดจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าทางเข้าท่อโค้งที่บริเวณมุม ψ ประมาณ 30°-90°

ในช่วงมุม $\theta = 45^\circ$ -75° พบว่าการไหลในทุกกรณีมีการปรับตัวจนไม่พบบริเวณความดันต่ำเนื่องจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้า และความโค้งท่อมีผลสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิต โดยในทุกกรณีพบว่ามีค่า C_{Pref} ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าค่า C_{Pref} ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านในเนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางการไหลที่เกิดขึ้น และพบว่าที่แต่ละหน้าตัดที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านใน กรณี NC00T จะมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดมากกว่าค่า C_{Pref} ต่ำสุดในกรณี NC09T และมากกว่ากรณี NC18T ตามลำดับ

ในช่วงท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง ที่หน้าตัดแรก ($S/D = 4.6$) พบว่าในทุกกรณีการไหลจะมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 270° และมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่ตำแหน่งมุม ψ

ประมาณ 90° และมีความแตกต่างความดันสถิต ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ประมาณ 10-20% ของความดันจลน์เฉลี่ย ซึ่งความแตกต่างความดันสถิต $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$ ที่พบเป็นผลตกค้างของการไหลในช่วงท่อโค้งซึ่งไหลออกมาที่ท่อตรงด้านทางออก และตั้งแต่หน้าตัดถัดไป $S/D = 5.1$ เป็นต้นไป การไหลในทุกกรณีจะมีการปรับตัวจนมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด โดยมี C_{Pref} กระจายค่าอยู่ภายในช่วง ± 0.05

3.7.2 เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) ในกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล

รูปที่ 3.36 แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง และกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวางขวางการไหลที่หน้าตัดก่อนเข้าท่อโค้ง ($S/D = 0$) โดยแสดงผลในกรณี Swirl Number = 1.8 (NC18 และ NC18T) ซึ่งเป็นกรณีที่สามารถพบลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางได้ไกลที่สุดในช่วงท่อโค้ง และแสดงผลในกรณี NC00 และ NC00T เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีการไหลที่ไม่มีความเร็วหมุนวน จากรูปพบว่าที่หน้าตัดทางออกท่อหมุนวน ($S/D = -1.0$) การไหลในแต่ละกรณีมีความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตเล็กน้อย โดยมีค่า C_{Pref} ในช่วง ± 0.08

ที่หน้าตัด $S/D = -0.5$ พบว่าในกรณีการไหลที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง (NC00 และ NC18) มีการกระจายความดันสถิตไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยมีค่า $C_{Pref} \leq \pm 0.08$ สำหรับกรณีที่ติดแผ่นกีดขวาง พบลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอในหน้าตัดเนื่องจากแผ่นกีดขวางที่อยู่ด้านหลัง โดยกรณี NC00T มีค่า C_{Pref} ที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดที่มากกว่าที่บริเวณด้านบน มีค่า C_{Pref} สูงสุดที่ตำแหน่ง $\psi = 180^\circ$ และพบว่าในกรณีการไหลที่มีการหมุนวน (NC18T) ความเร็วหมุนวน จะส่งผลให้มีการกระจาย C_{Pref} ในหน้าตัดแตกต่างไปจากกรณีที่ไม่มีความเร็วหมุนวน โดยมีตำแหน่ง C_{Pref} สูงสุดหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่ง $\psi = 225^\circ$ และมีค่า C_{Pref} สูงสุดต่ำกว่าค่า C_{Pref} สูงสุดในกรณี NC00T

ที่หน้าตัด $S/D = 0.5$ ในกรณีการไหลที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง การไหลในกรณี NC00 และ NC18 มีการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยมีค่า C_{Pref} ภายในช่วง ± 0.1 สำหรับกรณีติดแผ่นกีดขวาง การไหลในกรณี NC00T พบบริเวณ C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัดเนื่องจากมีความดันตกคร่อมแผ่นกีดขวาง โดยมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 180° มีค่าประมาณ -0.6 ส่วนกรณี NC18T พบว่าบริเวณ C_{Pref} จะหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 255° และมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดต่ำกว่ากรณี NC00T โดยมีค่าประมาณ -2.5

ที่หน้าตัดก่อนเข้าท่อโค้ง ($S/D = 1.0$) การไหลในกรณี NC00 และ NC18 มีการกระจาย C_{Pref} ค่อนข้างสม่ำเสมอภายในช่วง ± 0.08 ส่วนกรณี NC00T และ NC18T พบว่า

บริเวณความดันต่ำที่เกิดจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง จะหมุนวนไปตามการหมุนวนของการไหล และมีการปรับตัวให้มีค่า C_{Pref} เพิ่มมากขึ้น

ในช่วงท่อโค้งที่หน้าตัด $\theta = 15^\circ$ พบว่าในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนที่มีการติดและไม่ติดแผ่นกีดขวาง (NC00 และ NC00T) มีลักษณะการกระจาย C_{Pref} ใกล้เคียงกัน มีค่า C_{Pref} ที่แต่ละตำแหน่งแตกต่างกันไม่เกิน ± 0.3 แสดงให้เห็นว่าความไม่สมมาตรของการกระจายความดันสถิตเนื่องจากแผ่นกีดขวางที่ขวางการไหลได้สลายตัวไปจนหมดในช่วงท่อโค้ง และท่อโค้งจะมีผลสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตโดยมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 90° ซึ่งเป็นตำแหน่งผนังท่อโค้งด้านนอก และมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 270° ซึ่งเป็นตำแหน่งผนังท่อโค้งด้านใน สำหรับกรณี NC18T พบว่ามีลักษณะการกระจายความดันสถิตแตกต่างจากกรณี NC18 และแตกต่างจากกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00 และ NC00T) โดยสังเกตพบบริเวณ C_{Pref} ต่ำในช่วงมุม ψ ประมาณ $15^\circ-75^\circ$ ซึ่งเป็นบริเวณความดันต่ำที่เกิดจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้ง

ที่หน้าตัดถัดไป ($\theta = 30^\circ$) พบว่าการไหลในกรณี NC00, NC00T และ NC18 มีลักษณะการกระจายความดันสถิตคล้ายกัน โดยมีค่า C_{Pref} สูงสุดที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอก และมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านใน เนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางของการไหลในท่อโค้ง และไม่พบความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตเนื่องจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้ง ส่วนกรณี NC18T ยังสามารถพบบริเวณความดันต่ำเนื่องจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางหมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ $30^\circ-90^\circ$ และตั้งแต่น้ำตัด $\theta = 45^\circ$ เป็นต้นไป พบว่าการไหลในกรณี NC18 และ NC18T มีลักษณะการกระจายความดันสถิตคล้ายกัน แสดงให้เห็นว่าบริเวณความดันต่ำที่เกิดจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางได้สลายตัวไปจนหมดและมีลักษณะการกระจายความดันสถิตแบบการไหลในท่อโค้ง โดยมีความดันสถิตที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านใน

ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง หน้าตัด $S/D = 4.6$ ในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00 และ NC00T) และกรณีการไหลแบบหมุนวนที่มีการติดแผ่นกีดขวาง (NC18T) พบว่ามี การกระจายความดันสถิตที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยมีค่า C_{Pref} ในช่วง ± 0.1

อย่างไรก็ตามพบว่ากรณี NC18 จะมีลักษณะการกระจาย C_{Pref} ต่างจากกรณีอื่น โดยพบว่าความดันสถิตแตกต่างที่เกิดจากการไหลผ่านท่อโค้ง จะยังคงความแตกต่างในหน้าตัด อยู่เมื่อไหลออกไปที่ท่อตรงด้านทางออก และทำให้มีความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดมากกว่าทุกกรณี โดยพบว่าการไหลจะมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม ψ ประมาณ 165° และมีค่าประมาณ -0.5

ตั้งแต่น้ำตัด $S/D = 5.1$ เป็นต้นไปการไหลในกรณี NC00, NC00T และกรณี NC18T จะมีการปรับตัวการกระจายความดันสถิตให้มีลักษณะสม่ำเสมอมากขึ้น และมีความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 5.6 สำหรับกรณี NC18 พบว่าความแตกต่าง

ความดันสถิตในหน้าตัดที่เกิดขึ้นจะหมุนวนไปตามการหมุนวนของการไหล และสามารถพบความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดไปได้ไกลกว่ากรณีอื่น

จากกราฟจะเห็นได้ว่าในกรณีการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 ในกรณีที่ไม้ติดแผ่นกีดขวาง (NC18) ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตที่เกิดขึ้นในช่วงท่อโค้งจะยังคงอยู่ที่ท่อตรงด้านทางออก ในขณะที่กรณีติดแผ่นกีดขวาง (NC18T) ความไม่สม่ำเสมอของความดันสถิตในหน้าตัดท่อโค้งจะสลายตัวไปอย่างรวดเร็วที่ท่อตรงด้านทางออก

3.7.3 การกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล

รูปที่ 3.37 แสดงลักษณะการกระจายความแตกต่างความดันสถิต ($P_0 - P_{180}$ และ $P_{90} - P_{270}$) ตามระยะทางการไหลในท่อ ในกรณีที่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหลที่หน้าตัดก่อนเข้าท่อโค้ง ($S/D = 0$) โดยแสดงผลในรูปของค่า $C_{P_{0-180}}$ และ $C_{P_{90-270}}$ รูปที่ 3.37 (ก) แสดงลักษณะการกระจาย $C_{P_{0-180}}$ จากรูปที่หน้าตัดแรกด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = -1.0$) ในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00T) การไหลมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณ -0.08 แสดงให้เห็นว่าการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุนมีการกระจายความดันสถิตที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในหน้าตัด และที่หน้าตัดถัดไป ($S/D = -0.5$) $C_{P_{0-180}}$ จะมีค่าลดลงจนมีค่าประมาณ -0.5 เนื่องจากผลของแผ่นกีดขวางที่ขวางการไหลอยู่ที่ด้านหลัง ทำให้ความดันสถิตที่ตำแหน่งด้านล่างของหน้าตัดท่อมี่ค่าสูงกว่าความดันสถิตที่ด้านบนของหน้าตัดท่อ

ที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($S/D = 0.5$) ในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00T) พบว่า $C_{P_{0-180}}$ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าประมาณ 0.6 เนื่องจากมีการสูญเสียความดันสถิตจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง ทำให้ความดันสถิตที่ด้านล่างของหน้าตัดท่อ (P_{180}) มีค่าน้อยกว่าความดันสถิตที่ด้านบนของหน้าตัดท่อ (P_0) และที่หน้าตัดถัดไป ($S/D = 1.0$) ค่า $C_{P_{0-180}}$ จะมีค่าลดลงเนื่องจากการไหลมีการปรับตัวให้มีความสม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดมากขึ้น ในช่วงท่อโค้ง ($S/D = 1.5-3.9$) พบว่าการไหลมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณคงที่ และที่ท่อด้านทางออกท่อโค้ง ($S/D > 4$) จะมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณศูนย์ไปตลอดระยะทางการไหล

สำหรับกรณี NC09T พบว่ามีลักษณะการกระจายค่า $C_{P_{0-180}}$ คล้ายกรณี NC00T โดยที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง จะมีค่า $C_{P_{0-180}}$ เป็นบวกเนื่องจากการสูญเสียความดันสถิตจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง โดยมีค่า $C_{P_{0-180}}$ สูงกว่ากรณี NC00T และที่หน้าตัดถัดไป $C_{P_{0-180}}$ จะมีค่าลดลงตามการไหลที่มีการปรับตัวการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอมากขึ้นในหน้าตัด ในช่วงท่อโค้งมีค่า $C_{P_{0-180}}$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะทางการไหล และที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งจะมีค่า $C_{P_{0-180}}$ ประมาณศูนย์ไปตลอดความยาวท่อ

สำหรับกรณี NC18T พบว่าที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง จะมีค่า $C_{P_{0-180}}$ แตกต่างจากกรณีอื่นเล็กน้อยโดยมีค่า $C_{P_{0-180}}$ เป็นลบและมีค่าประมาณ -0.3 เนื่องจากบริเวณ

ความดันต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวางได้หมุนออกไปจากตำแหน่งมุม $\psi = 180^\circ$ ทำให้ความดันสถิตที่ด้านล่างของหน้าตัดท่อ (P_{180}) มีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าความดันสถิตที่ด้านบน (P_0) และทำให้ได้ค่า $C_{P_{0-180}}$ เป็นลบ ในช่วงท่อโค้งพบว่าค่า $C_{P_{0-180}}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และในช่วงทางออกท่อโค้งจะไม่พบความแตกต่างความดันสถิต ($C_{P_{0-180}}$) ไปตามระยะทางการไหลเหมือนในกรณี NC00T และ NC09T

รูปที่ 3.37 (ข) แสดงลักษณะการกระจายค่า $C_{P_{90-270}}$ ตามระยะทางการไหล จากรูปในกรณี NC00T พบว่าที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($S/D = 0.5$) $C_{P_{90-270}}$ มีค่าประมาณ -0.08 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า $C_{P_{0-180}}$ ที่หน้าตัดเดียวกันแสดงให้เห็นว่าแผ่นกีดขวางซึ่งติดอยู่ที่ตำแหน่งมุม $\psi = 180^\circ$ มีผลน้อยต่อการสร้างความแตกต่างความดันสถิต ($P_{90} - P_{270}$)

ในช่วงท่อโค้งในกรณี NC00T ($S/D = 1.5-3.9$) พบว่ามีความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าผนังท่อโค้งด้านในเนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางของการไหล โดยมีค่า $C_{P_{90-270}}$ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ด้านทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าสูงสุดที่หน้าตัดมุม θ ประมาณ 45° โดยมีค่า $C_{P_{90-270}}$ สูงสุดประมาณ 1.6 จากนั้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือจะมีค่า $C_{P_{90-270}}$ ลดลงไปถึงด้านทางออกท่อโค้ง

ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งหน้าตัดแรก ($S/D = 4.6$) การไหลมีความแตกต่างความดัน ($C_{P_{90-270}}$) ลดลงจนมีค่าน้อยประมาณ 0.15 และตั้งแต่หน้าตัด S/D ประมาณ 5 เป็นต้นไป (1D จากทางออกท่อโค้ง) จะไม่พบความแตกต่างความดันสถิต ($C_{P_{90-270}}$) ไปตลอดระยะทางการไหล

สำหรับกรณี NC09T ที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($S/D = 0.5$) พบว่ามีค่า $C_{P_{90-270}}$ มากกว่ากรณี NC00T เล็กน้อย เนื่องจากมีการหมุนวนไปของบริเวณความดันสถิตต่ำด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($\psi = 180^\circ$) มาใกล้บริเวณมุม ψ ประมาณ 270° ทำให้มีความดันสถิตที่มุม $\psi = 270^\circ$ ลดลง

ในช่วงท่อโค้งพบว่ามีลักษณะการกระจายค่า $C_{P_{90-270}}$ คล้ายกับกรณี NC00T โดยมีค่า $C_{P_{90-270}}$ เพิ่มขึ้นตั้งแต่หน้าตัดทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าสูงสุดที่หน้าตัด θ ประมาณ $30^\circ-45^\circ$ จากนั้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือจะมีค่า $C_{P_{90-270}}$ ลดลงไปถึงหน้าตัดทางออกท่อโค้ง และที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 5 (1D จากทางออกท่อโค้ง) จะมีค่า $C_{P_{90-270}}$ ประมาณศูนย์ไปตลอดช่วงการไหล

สำหรับกรณี NC18T พบว่าที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($S/D = 0.5$) มีค่า $C_{P_{90-270}}$ มากกว่ากรณีอื่น เนื่องจากมีการหมุนวนของบริเวณความดันต่ำที่ตำแหน่งหลังแผ่นกีดขวางมาที่บริเวณมุม ψ ประมาณ 270° ทำให้มีความแตกต่างความดันสถิต ($C_{P_{90-270}}$) เพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีอื่น ในช่วงท่อโค้งพบว่ามีลักษณะการกระจาย $C_{P_{90-270}}$ คล้ายกับกรณีอื่น โดยมีค่า $C_{P_{90-270}}$ เพิ่มขึ้นไปตามการไหลในช่วงท่อโค้งเนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางการไหล จนมีค่า $C_{P_{90-270}}$ สูงสุดที่หน้าตัด θ ประมาณ 60° ในช่วงถัดไป $C_{P_{90-270}}$ จะมีค่าลดลง และตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 5 เป็นต้นไป (1D จากทางออกท่อโค้ง) จะไม่พบความแตกต่างความดันสถิต ($C_{P_{90-270}}$)

จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ติดตั้งแผ่นกีดขวางขวางการไหลที่ด้านหน้าท่อโค้ง ในช่วงท่อโค้งไม่สามารถสังเกตความแตกต่างความดันสถิตเนื่องจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางได้ และความโค้งท่อจะมีผลสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้ง โดยมีความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านใน ($C_{P90-270}$ เป็นบวก) เนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางของการไหล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณี NC18T เปรียบเทียบกับกรณี NC18 (รูปที่ 3.33 และ รูปที่ 3.37) จะเห็นได้ว่าแผ่นกีดขวางที่ขวางการไหลที่ด้านหน้าท่อโค้ง มีผลทำให้การไหลแบบหมุนวนไม่สามารถพาความแตกต่างความดันในช่วงท่อโค้ง ออกไปที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งได้ โดยไม่พบความแตกต่างความดันสถิตตั้งแต่ระยะประมาณ 1D จากทางออกท่อโค้ง

3.7.4 การกระจายความดันสถิต ($C_{P\psi}$ และ $\overline{C_{P_{ref}'}}$) ตามระยะทางการไหล

รูปที่ 3.38 แสดงลักษณะการกระจายค่า $C_{P\psi}$ และ $\overline{C_{P_{ref}'}}$ ตามระยะทางการไหล ในกรณีที่มีการติดตั้งแผ่นกีดขวางขวางการไหลที่ตำแหน่ง $S/D = 0$ โดยนิยาม $C_{P\psi}$ ตามสมการ (3.23) และนิยาม $\overline{C_{P_{ref}'}}$ ตามสมการ (3.11) โดยใช้ความดันอ้างอิงเป็นค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ ที่หน้าตัด $S/D = -1.0$

รูปที่ 3.38 (ก) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{P0} ตามระยะทางการไหล จากรูปท่อโค้งวางตัวอยู่ในช่วง $S/D = 1.5-3.9$ ในกรณี NC00T พบว่าที่หน้าตัดหลังแผ่นกีดขวาง ($S/D = 0.5-1.0$) การไหลมีค่า C_{P0} ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการสูญเสียความดันสถิตจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง และมีค่า C_{P0} เพิ่มขึ้นเมื่อไหลเข้าท่อโค้งเนื่องจากการคืนตัวของค่าความดันสถิต ในช่วงท่อโค้ง ($S/D = 1.5-3.9$) พบว่ามีการกระจายค่า C_{P0} ใกล้เคียงกันตลอดช่วง และที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งพบว่าในช่วงแรก (S/D ประมาณ 5-10) การไหลจะมีการปรับตัวลักษณะการกระจายความดันสถิตเล็กน้อย และในช่วงถัดไปจะมีการกระจายค่า C_{P0} เป็นเชิงเส้นลดลงไปตามระยะทางการไหล

สำหรับกรณี NC09T มีลักษณะการกระจายค่า C_{P0} คล้ายกับกรณี NC00T โดยที่หน้าตัดหลังแผ่นกีดขวางมีค่า C_{P0} ลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่าเพิ่มขึ้นที่หน้าตัดถัดไปเนื่องจากผลของการคืนตัวของความดันสถิต ในช่วงท่อโค้งมีการกระจายค่า C_{P0} แตกต่างกันเล็กน้อย และที่ท่อตรงด้านทางออกตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 จะมีการกระจาย C_{P0} ตามระยะทางการไหลลดลงเป็นเส้นตรง โดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{P0} ตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกรณี NC00T

อย่างไรก็ตามพบว่ากรไหลในกรณี NC18T มีลักษณะการกระจาย C_{P0} แตกต่างจากกรณีอื่น โดยในช่วงต้นด้านหลังแผ่นกีดขวางจะมีค่า C_{P0} ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสูญเสียความดันสถิตจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง เมื่อไหลเข้าท่อโค้ง C_{P0} จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากกรณี NC00T และ NC09T ซึ่งมีค่า C_{P0} เพิ่มขึ้นเมื่อไหลเข้าท่อโค้งเนื่องจากผลของการคืนตัวของค่าความดันสถิต ในช่วงท่อโค้งการไหลมีการกระจาย C_{P0} ก่อนข้าง

เป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล และที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งจะมีค่า C_{P0} ลดลงตามระยะทางการไหลอย่างเป็นเชิงเส้น โดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{P0} ตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกับกรณี NC00T และ NC09T

รูปที่ 3.38 (ข) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{P90} ตามระยะทางการไหล ในกรณี NC00T พบว่าที่หน้าตัดหลังแผ่นกีดขวางจะมีค่า C_{P90} ลดลง และเมื่อไหลเข้าท่อโค้งจะมีค่า C_{P90} เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการคืนตัวของค่าความดันสถิต ในช่วงท่อโค้ง ค่า C_{P90} ซึ่งเป็นความดันสถิตที่ตำแหน่งผนังท่อโค้งด้านนอก จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่า C_{P90} สูงสุดที่ตำแหน่งหน้าตัด θ ประมาณ $45^\circ-60^\circ$ เนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางของการไหลในท่อโค้ง จากนั้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือจะมีค่า C_{P90} ลดลงไปตามระยะทางการไหล ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งการไหลจะมีการปรับตัวของการกระจายความดันสถิตเล็กน้อย และตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 จะมีการกระจาย C_{P90} เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล

กรณี NC09T มีลักษณะการกระจาย C_{P90} คล้ายกรณี NC00T โดยที่หน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวาง จะมีค่า C_{P90} ลดลงจนถึงทางเข้าท่อโค้ง ในช่วงท่อโค้งการไหลในกรณี NC09T จะมีลักษณะการกระจายค่า C_{P90} แตกต่างจากกรณี NC00T เล็กน้อย โดยมีค่า C_{P90} เพิ่มขึ้นเมื่อไหลเข้าท่อโค้งจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งมุม θ ประมาณ 15° จากนั้นจะมีค่า C_{P90} ลดลงไปตามช่วงท่อโค้งที่เหลือ ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งการไหลจะมีการปรับตัวเล็กน้อย และตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 จะมีการกระจาย C_{P90} ตามระยะทางการไหลเป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{P90} ตามระยะทางการไหลในกรณี NC00T และ NC09T ใกล้เคียงกัน

สำหรับกรณี NC18T มีการกระจายค่า C_{P90} ในช่วงท่อโค้งแตกต่างจากกรณีอื่น โดยที่หน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวาง ค่า C_{P90} จะมีค่าลดลง และเมื่อไหลเข้าท่อโค้งแล้ว C_{P90} จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง $\theta = 45^\circ$ ในช่วงท่อโค้งที่เหลือ C_{P90} จะมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งจะมีค่า C_{P90} ลดลงอย่างเป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{P90} ตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกับกรณี NC00T และ NC09T

รูปที่ 3.38 (ค) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{P180} ตามระยะทางการไหลพบว่ามีลักษณะการกระจายค่า C_{P180} คล้ายกับการกระจายค่า C_{P0} ตามระยะทางการไหล

รูปที่ 3.38 (ง) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{P270} ตามระยะทางการไหล ในกรณี NC00T พบว่าในช่วงท่อโค้งจะมีค่า C_{P270} ซึ่งเป็นค่าความดันสถิตที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านใน ลดลงตั้งแต่ปากทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม θ ประมาณ $30^\circ-45^\circ$ เนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางของการไหล จากนั้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือจะมีค่า C_{P270} เพิ่มขึ้นไปจนถึงปากทางออกท่อโค้ง ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งการไหลจะมีค่า C_{P270} ลดลงอย่างเป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล สำหรับกรณี NC09T และ NC18T พบว่ามีลักษณะการกระจาย C_{P270} ตามระยะทางการไหลคล้ายกับกรณี NC00T โดยเมื่อไหลเข้าท่อโค้งจะมีค่า C_{P270} ลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งมุม θ ประมาณ $30^\circ-45^\circ$ และมีค่า C_{P270} เพิ่มขึ้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือ ที่ท่อ

ตรงด้านทางออกท่อโค้งพบว่ามีการกระจาย C_{P270} เป็นเส้นตรงตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า C_{P270} ตามระยะทางการไหลในกรณี NC09T และ NC18T ใกล้เคียงกับกรณี NC00T

จากกราฟการกระจาย $C_{P\psi}$ ตามระยะทางการไหล จะเห็นได้ว่าการไหลในแต่ละกรณีจะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่หน้าตัดทางเข้าท่อโค้งแตกต่างกัน โดยในกรณี NC00T จะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดด้านทางออกท่อโค้งเพิ่มขึ้นจากค่าที่หน้าตัดทางเข้ากรณี NC09T จะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดด้านทางออกท่อโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่หน้าตัดทางเข้า และกรณี NC18T จะมีลักษณะแตกต่างจากกรณีอื่นมากที่สุด โดยมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งลดลงจากค่าที่หน้าตัดทางเข้า

รูปที่ 3.38 (จ) แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหล จากรูปในกรณี NC00T ที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง ($S/D = 0.5$) ค่า $\overline{C_{Pref}}$ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสูญเสียความดันจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง ที่หน้าตัดถัดไปพบว่า $\overline{C_{Pref}}$ มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการคืนตัวของความดันสถิต และมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหลจนไหลเข้าท่อโค้ง ในช่วงท่อโค้งพบว่ามีการไหลมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนมีค่าสูงสุดที่หน้าตัด θ ประมาณ 45° จากนั้นจะมีค่าลดลงตามการไหลในช่วงท่อโค้งที่เหลือ ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งในช่วงแรก (S/D ประมาณ 5-10) การไหลมีการปรับตัวลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ เล็กน้อยและตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 10 จะมีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล

สำหรับกรณี NC09T พบว่ามีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ คล้ายกับกรณี NC00T โดยที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง พบว่า $\overline{C_{Pref}}$ มีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียความดันสถิตจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง และที่หน้าตัดถัดไป $\overline{C_{Pref}}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการคืนตัวของค่าความดันสถิต ในช่วงท่อโค้งพบว่ามีการไหลในกรณี NC09T มีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ต่างจากกรณี NC00T เล็กน้อย โดยมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตั้งแต่ด้านทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าต่ำสุดที่หน้าตัด θ ประมาณ 45° ในช่วงท่อโค้งที่เหลือ $\overline{C_{Pref}}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหลจนถึงด้านทางออกท่อโค้ง ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งพบว่ามีการกระจายค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลคล้ายกับกรณี NC00T และมีอัตราการลดลงของค่าความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกัน

สำหรับกรณี NC18T พบว่ามีลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยแตกต่างจากกรณีอื่นมากที่สุด ที่หน้าตัดหลังแผ่นกีดขวางพบว่า $\overline{C_{Pref}}$ มีค่าลดลงจากการสูญเสียความดันสถิตเมื่อไหลผ่านแผ่นกีดขวาง และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งไหลเข้าท่อโค้ง ในช่วงท่อโค้งพบว่ามีการไหลมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตั้งแต่หน้าตัดทางเข้าจนมีค่าต่ำสุดที่หน้าตัด θ ประมาณ 45° จากนั้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือ $\overline{C_{Pref}}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นไปจนถึงด้านทางออก ที่ท่อตรงด้านทางออก

ท่อโค้งการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกับกรณี NC09T และ NC00T

จะเห็นได้ว่าขนาดของความเร็วหมุนวนที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 (NC18T) มีผลทำให้มีลักษณะการกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล ที่ด้านท้ายแผ่นกีดขวาง และในช่วงท่อโค้ง แตกต่างจากกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า (NC09T) และกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00T) โดยพบว่าในช่วงต้นของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวางก่อนไหลเข้าท่อโค้ง การไหลในกรณี NC00T และ NC09T จะมีความดันสถิตเฉลี่ยลดลงจากผลของการสูญเสียความดันด้านหลังแผ่นกีดขวาง และมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นที่ระยะถัดไปเนื่องจากการคืนตัวของความดันสถิต ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณี NC18T ที่มีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่หน้าตัดหลังแผ่นกีดขวาง

อย่างไรก็ตามที่ด้านทางออกท่อโค้งพบว่าการไหลในทุกกรณีมีลักษณะการกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกัน โดยเมื่อ Fit สมการเส้นตรงกับลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยในช่วง $S/D = 41-80$ พบว่าการไหลในทุกกรณีสามารถ Fit สมการเส้นตรงได้ค่อนข้างดีมีค่า R^2 ในช่วง 0.998-0.999 และมีสัมประสิทธิ์ความเสียหายของการไหล (Friction Factor, f) ในแต่ละกรณีใกล้เคียงกัน ดังแสดงตามตาราง 3.7 แสดงให้เห็นว่าที่ด้านทางออกท่อโค้ง การไหลในแต่ละกรณีจะมีการปรับตัวจนไม่มีความเร็วหมุนวน และมีลักษณะการกระจายความดันสถิตแบบ Fully Developed Flow

เมื่อพิจารณาในช่วงท้ายของการไหล ($S/D > 40$) ซึ่งการไหลในแต่ละกรณีมีการกระจายค่า $\overline{C_{Pref}}$ เป็นตรงตามระยะทางการไหลที่มีความชันเท่ากัน พบว่าที่ตำแหน่งเดียวกันกรณี NC00T มีค่า $\overline{C_{Pref}}$ สูงกว่ากรณี NC09T และสูงกว่ากรณี NC18T ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างความดันสถิตเฉลี่ยระหว่างกรณี NC00T กับกรณี NC09T ประมาณ 20% ของความดันจลน์เฉลี่ย และมีความแตกต่างความดันสถิตเฉลี่ยระหว่างกรณี NC00T กับกรณี NC18T ประมาณ 220% ของความดันจลน์เฉลี่ย ซึ่งความแตกต่างความดันสถิตที่ได้แสดงถึงการสูญเสียความดันสถิตที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อโค้งที่มีการติดแผ่นกีดขวางขวางการไหลที่ด้านหน้า ซึ่งพบว่ากรณี NC18T มีความดันตกคร่อมแผ่นกีดขวางและท่อโค้งสูงกว่ากรณี NC09T และสูงกว่ากรณี NC00T ตามลำดับ

3.8. เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหลในกรณีที่มีการติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวางขวางการไหล

รูปที่ 3.39 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหล ในกรณีการไหลที่มีการติดและไม่ติดแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าทางเข้าท่อโค้ง ($S/D = 0$) จากรูปในกรณีการไหลที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง (NC00, NC09 และ NC18) พบว่าในช่วงท่อโค้งการไหลในกรณี NC00 และ NC09 มีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ คล้ายกันคือมี

ค่า $\overline{C_{Pref}}$ ประมาณคงที่ในช่วงท่อโค้ง และแตกต่างจากกรณี NC18 ซึ่งมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท่อโค้ง แสดงให้เห็นว่าขนาดความเร็วหมุนวนของการไหลที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 จะส่งผลทำให้มีลักษณะการกระจายความดันสถิตในช่วงท่อโค้งแตกต่างจากกรณีอื่น ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหล โดยกรณี NC18 จะมีอัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลสูงที่สุด กรณี NC09 มีค่ารองลงมา และกรณี NC00 มีอัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าลักษณะการสูญเสียความดันสถิตที่ด้านทางออกท่อโค้งจะขึ้นอยู่กับความเร็วหมุนวนของการไหล โดยการไหลจะมีอัตราการลดลงของค่าความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเร็วหมุนวนของการไหลเพิ่มขึ้น

สำหรับกรณีที่มีแผ่นกีดขวางขวางการไหล (NC00T, NC09T และ NC18T) พบว่าที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง การไหลในทุกกรณีจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสูญเสียความดันสถิตเมื่อไหลผ่านแผ่นกีดขวาง ที่หน้าตัดถัดไปพบว่าการไหลในกรณี NC00T และ NC09T จะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการคืนตัวของค่าความดันสถิต ในขณะที่กรณี NC18T จะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างต่อเนื่องไปตามระยะทางการไหลจนกระทั่งไหลเข้าท่อโค้ง ในช่วงท่อโค้งจะมีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ในช่วงท่อโค้งแตกต่างกันในแต่ละกรณี และที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งการไหลในทุกกรณีมีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงตามระยะทางการไหลโดยมีอัตราการลดลงของค่าความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกัน

เปรียบเทียบอัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหล (หรือ Friction Factor, f) ในช่วงการไหลด้านทางออกท่อโค้งในแต่ละกรณี โดยในกรณีที่ติดแผ่นกีดขวางการไหล จะไม่พบบริเวณที่มีความดันสถิตเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็วและไม่เป็นเชิงเส้นที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งเหมือนในกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวางการไหล และพบว่าการไหลในกรณี NC00T จะมีอัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกับกรณี NC09T และ NC18T และใกล้เคียงกับกรณี NC00 แต่จะแตกต่างจากกรณี NC09 และ NC18 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีการไหลที่มีการติดแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้ง ผลของความโค้งท่อและแผ่นกีดขวางมีผลในการเร่งการสลายตัวของความเร็วหมุนวน ทำให้การไหลที่ด้านทางออกท่อโค้งมีลักษณะการกระจายความดันสถิตใกล้เคียงกับกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน โดยมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหลเป็นเส้นตรง และมีอัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหล (S/D) ที่ได้จากการ Fit สมการเส้นตรงดังแสดงตามตาราง 3.7 พบว่าในกรณี NC00, NC00T, NC09T และ NC18T มีค่าอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน $\pm 4\%$

3.9. เปรียบเทียบการกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง

รูปที่ 3.40 แสดงลักษณะการกระจายความแตกต่างความดันสถิตที่ผนังท่อด้านตรงกันข้าม (C_{P0-180} และ $C_{P90-270}$) ในกรณีการไหลในท่อตรงที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 ที่มีการติดและไม่ติดแผ่นกีดขวาง (NS18T และ NS18) เปรียบเทียบกับกรณีการไหลผ่านท่อโค้งที่มีค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 เช่นกัน ในกรณีที่มีการติด และไม่ติดแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้ง (NC18T และ NC18) รูป 3.40 (ก) แสดงลักษณะการกระจายค่า C_{P0-180} ตามระยะทางการไหล จากกราฟพบว่าในกรณี NS18 และกรณี NC18T ที่บริเวณท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง จะมีค่า C_{P0-180} ประมาณศูนย์ไปตลอดระยะทางการไหล แสดงว่าการไหลมีการกระจายความดันสถิตที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในหน้าตัด สำหรับกรณี NS18T พบว่ามีลักษณะของการแกว่งของค่า C_{P0-180} ไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากการหมุนวนไปของความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัด และจะมีขนาดการแกว่งของค่า C_{P0-180} ลดลงไปตามระยะทางการไหลจนกระทั่งไม่สามารถพบความแตกต่างความดันสถิต C_{P0-180} ได้ที่ระยะ X/D ประมาณ 45 สำหรับกรณี NC18 พบว่ามีลักษณะการแกว่งของค่า C_{P0-180} ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งเช่นเดียวกัน เนื่องจากการหมุนวนของการไหลสามารถพาความแตกต่างความดันสถิตที่เกิดขึ้นในหน้าตัดท่อโค้งออกมาที่ท่อตรงด้านทางออกได้ โดยสามารถพบการแกว่งของค่า C_{P0-180} ไปได้ถึงระยะ S/D ประมาณ 35 ซึ่งไหลไปเป็นระยะทางสั้นกว่ากรณีการไหลในท่อตรงที่ติดแผ่นกีดขวาง เนื่องจากความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดของกรณีการไหลในท่อตรงที่ติดแผ่นกีดขวางนั้นมีขนาดมากกว่าความแตกต่างความดันสถิตที่เกิดขึ้นในช่วงท่อโค้ง ดังนั้นในกรณีการไหลในท่อตรงจึงต้องใช้ระยะทางในการสลายตัวความแตกต่างความดันสถิตไกลกว่า

รูป 3.40 (ข) แสดงลักษณะการกระจายค่า $C_{P90-270}$ พบว่าในกรณีการไหลในท่อตรงและกรณีการไหลผ่านท่อโค้งในช่วงท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง การไหลทุกกรณีจะมีลักษณะการกระจาย $C_{P90-270}$ เหมือนกับลักษณะการกระจาย C_{P0-180} ตามระยะทางการไหล โดยสามารถพบการแกว่งของค่า $C_{P90-270}$ ในกรณี NS18T ไปได้ไกลกว่ากรณี NC18

3.10. เปรียบเทียบลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref'}}$) ตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง

รูปที่ 3.41 แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref'}}$) ตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลในท่อตรงและการไหลผ่านท่อโค้ง ที่มีสภาวะการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง) โดยนิยามค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref'}}$) ตามสมการ (3.11) โดยใช้ค่าความดันอ้างอิง ($P_{ref'}$) ในการทดลองกรณีการไหลในท่อ

ตรงเป็นค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ ที่หน้าตัด $X/D = 0.5$ และในกรณีการไหลผ่านท่อโค้งเป็นค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ ที่หน้าตัด $S/D = -1.0$ ซึ่งเป็นหน้าตัดที่ระยะ $0.5D$ จากทางออกท่อหมุน

จากรูปพบว่า ในกรณีการไหลในท่อตรงแบบไม่หมุนวน (NS00) การไหลมีค่าความดันสถิตเฉลี่ยลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามระยะทางการไหล สำหรับกรณี NS09 พบว่าในช่วงต้นของการไหลซึ่งยังมีค่าความเร็วหมุนวนสูงอยู่ การไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงถัดไปอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลจะมีค่าน้อยลงไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากมีการสลายตัวไปของความเร็วหมุนวนของการไหลในท่อ จนกระทั่งมีการกระจายค่า $\overline{C_{Pref}}$ เป็นเส้นตรงไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลมากกว่ากรณี NS00

สำหรับกรณี NS18 พบว่ามีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ คล้ายกรณี NS09 โดยในช่วงต้นของการไหลเมื่อการไหลยังมีความเร็วหมุนวนสูงอยู่ จะมีการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลอย่างรวดเร็ว ในช่วงถัดไปการไหลจะมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ต่ำลงไปตามระยะทางการไหลในท่อ และตั้งแต่ระยะ X/D ประมาณ 30-40 เป็นต้นไปการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลมากกว่ากรณี NS09 และ NS00

สำหรับกรณีการไหลผ่านท่อโค้งพบว่า ในช่วงท่อโค้งการไหลในแต่ละกรณีจะมีลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยแตกต่างจากบริเวณด้านทางออกท่อโค้ง และที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งการไหลในทุกกรณีจะมีความดันสถิตเฉลี่ยลดลงตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวนสูงกว่ามากกว่ากรณีที่มีความเร็วหมุนวนต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ในกรณีการไหลผ่านท่อตรงและการไหลผ่านท่อโค้งที่ค่าความเร็วหมุนวนการไหลเท่ากัน พบว่าในช่วงท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งตั้งแต่ระยะ S/D ประมาณ 20 เป็นต้นไป พบว่าการไหลที่ค่า Swirl Number เท่ากัน (NS00 กับ NC00, NS09 กับ NC09 และ NS18 กับ NC18) มีลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยคล้ายกัน และมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าในกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง ในช่วงท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งซึ่งความโค้งที่มีผลน้อยลงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิต พบว่าการไหลจะมีลักษณะการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลขึ้นกับค่าความเร็วหมุนวน แสดงให้เห็นว่าผลของการหมุนวนของการไหลสามารถส่งผลต่อการไหลได้ไกลกว่าความโค้งของท่อ โดยการไหลจะมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีความเร็วหมุนวนสูงขึ้น

รูปที่ 3.42 แสดงลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลในท่อตรงและการไหลผ่านท่อโค้งที่มีสภาวะการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง) จากรูปพบว่าในกรณีการไหลในท่อตรง ในช่วง

ต้นของการไหล (X/D ประมาณ 0.5-5) ในกรณี NS00T จะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหลเนื่องจากผลของการคืนตัวของความดันสถิต ที่ระยะถัดไปการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ประมาณคงที่และตั้งแต่ระยะ X/D ประมาณ 6 เป็นต้นไปการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหลอย่างเป็นเชิงเส้น

สำหรับกรณี NS09T พบว่ามีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ คล้ายกับกรณี NS00T โดยในช่วงแรกของการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง จะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหลเนื่องจากการคืนตัวของความดันสถิต และในช่วงถัดไปจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลมากกว่ากรณี NS00T

สำหรับกรณี NS18T มีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ แตกต่างจากกรณี NS00T และ NS09T โดยพบว่าการไหลมีความดันสถิตเฉลี่ยลดลงตั้งแต่หน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวาง และไม่พบลักษณะการคืนตัวของค่า $\overline{C_{Pref}}$ เหมือนในกรณีอื่น โดยพบว่าในช่วงต้นของการไหล (X/D ประมาณ 0.5-5) การไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างรวดเร็วและในช่วงการไหลถัดไปจะมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ น้อยลงไปตามระยะทางการไหล จนมีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลเป็นเส้นตรง โดยมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลมากกว่ากรณี NS09T และ NS00T

สำหรับกรณีการไหลผ่านท่อโค้งพบว่า ในกรณี NC00T ที่หน้าตัดแรกด้านหลังแผ่นกีดขวาง จะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงเนื่องจากการสูญเสียความดันจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวาง และที่ระยะถัดไปจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหลเนื่องจากการคืนตัวของความดันสถิต ในช่วงท่อโค้งพบว่าการไหลในกรณี NC00T มีค่า $\overline{C_{Pref}}$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง θ ประมาณ 45° และมีค่าลดลงตามการไหลในท่อโค้ง ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งพบว่าการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหลแบบเป็นเชิงเส้น

สำหรับกรณี NC09T พบว่ามีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ คล้ายกรณี NC00T โดยพบลักษณะการคืนตัวของความดันสถิตที่หน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวางก่อนไหลเข้าท่อโค้ง ในช่วงท่อโค้งการไหลในกรณี NC09T จะมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ แตกต่างจากกรณี NC00T โดยมีค่าลดลงจากปากทางเข้าท่อโค้งตามการไหลในช่วงท่อโค้งจนมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง θ ประมาณ 60° และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือ ที่ด้านทางออกท่อโค้งพบว่าการไหลมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหลแบบเป็นเชิงเส้น และมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ใกล้เคียงกรณี NC00T

สำหรับกรณี NC18T มีลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยแตกต่างจากกรณี NC00T และ NC09T โดยมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงที่หน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวาง และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องก่อนไหลเข้าท่อโค้ง ในช่วงท่อโค้งการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงตามระยะทางการไหลจนมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ต่ำสุดที่หน้าตัด θ ประมาณ 45° และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงท่อโค้งที่เหลือ ที่ท่อด้านทาง

ออกท่อโค้งการไหลมีการกระจาย $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลแบบเป็นเชิงเส้น และมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ใกล้เคียงกรณี NC00T และ NC09T

เปรียบเทียบการไหลในกรณี NS00T กับกรณี NC00T และกรณี NS09T กับกรณี NC09T พบว่าที่ด้านหลังแผ่นกีดขวาง พบการเพิ่มขึ้นของค่าความดันสถิตตามระยะทางการไหลคล้ายกัน ซึ่งเป็นลักษณะการคืนตัวของค่าความดันสถิต สำหรับกรณี NS18T กับกรณี NC18T จะไม่พบลักษณะการคืนตัวของความดันสถิต โดยการไหลจะมีค่า $\overline{C_{Pref}}$ ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่หน้าตัดด้านหลังแผ่นกีดขวาง

พิจารณาอัตราการลดลงของค่าความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหลในกรณีการไหลในท่อตรง พบว่า การไหลในแต่ละกรณีมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ แตกต่างกันที่แต่ละค่า Swirl Number โดยพบว่าการไหลจะมีอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ตามระยะทางการไหลมากขึ้นเมื่อการไหลมีความเร็วหมุนวนเพิ่มมากขึ้น สำหรับกรณีการไหลผ่านท่อโค้งจะได้ว่าอัตราการลดลงของค่า $\overline{C_{Pref}}$ ที่ท่อด้านทางออกท่อโค้งในแต่ละกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าใกล้เคียงกับกรณีการไหลในท่อตรงแบบไม่หมุนวน (NS00T) แสดงให้เห็นว่าผลของแผ่นกีดขวางและความโค้งท่อ มีผลเร่งให้การไหลที่ด้านทางออกท่อโค้งมีการสลายตัวของความเร็วหมุนวนอย่างรวดเร็ว จนทำให้มีลักษณะการกระจายความดันสถิต เหมือนในกรณีการไหลที่ไม่มีการหมุนวน

บทที่ 4

อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

6.1 อภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการไหลแบบหมุนวนในระบบท่อที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกน ในการไหลผ่านท่อตรงและท่อโค้ง 90 องศา โดยสร้างสภาวะการกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอในหน้าตัดด้วยการติดแผ่นกีดขวาง (Tab) ขวางการไหลในท่อ

จากผลการทดลองพบว่า การไหลแบบหมุนวนในท่อตรงที่ติดแผ่นกีดขวางและการไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้ง สามารถก่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดได้สูง ซึ่งความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่เกิดขึ้นอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆในงานระบบท่อทั่วไปทางด้านวิศวกรรม ยกตัวอย่างเช่น การเสียหายของระบบท่อ การสั่นสะเทือน เสียงรบกวน และความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าความดันสถิต เป็นต้น ฯลฯ

ในกรณีการไหลในท่อตรง พบว่าแผ่นกีดขวางการไหลที่มีอัตราส่วนพื้นที่ขวางท่อประมาณ 19% ของพื้นที่หน้าตัดท่อ สามารถสร้างขนาดความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดได้แตกต่างกันตามขนาดของความเร็วหมุนวน ซึ่งแผ่นกีดขวางที่ใช้สามารถเทียบได้กับการกีดขวางการไหลที่เกิดขึ้นจริงในระบบท่อในงานด้านวิศวกรรม ยกตัวอย่างเช่นการติดตั้งวาล์วประเภท Gate Valve เพื่อควบคุมอัตราการไหลเป็นต้น และจะเห็นได้ว่าขนาดอัตราส่วนพื้นที่ขวางท่อของแผ่นกีดขวางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ประมาณ 19%) จะสามารถถือได้ว่ามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับขนาดสิ่งกีดขวางที่อาจพบได้ในการใช้งานจริงทั่วไป ดังนั้นขนาดความแตกต่างความดันสถิตที่วัดได้จึงสามารถใช้เป็นค่าประมาณขั้นต่ำของความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดท่อในงานระบบท่อทั่วไป จากผลการทดลองพบว่าเมื่อการไหลมีความเร็วหมุนวนสูงขึ้นจะมีความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัดมากขึ้น (รูปที่ 3.12, 3.13 และ 3.17) ซึ่งในกรณีการไหลที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 จะพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดได้มากถึงประมาณ 3 เท่าของความดันจลน์เฉลี่ยของการไหล และมีค่ามากกว่ากรณีการไหลที่ไม่มีความเร็วหมุนวน ซึ่งมีความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัดประมาณ 0.7 เท่าของความดันจลน์เฉลี่ยของการไหล

ความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดที่เกิดขึ้น จะแสดงถึงแรงดันของการไหลที่กระทำต่อผนังท่อ โดยในกรณีการไหลแบบหมุนวนที่มีสิ่งกีดขวางในท่อ จะสามารถพบการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันสถิตที่ผนังท่อด้านตรงกันข้าม ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$ และ $P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ไปตามระยะทางการไหล (รูปที่ 3.19 และ 3.20) ซึ่งการแกว่งของความแตกต่างความดันสถิตนี้ จะ

แสดงถึงแรงดันของการไหลที่กระทำกับท่อสลับทิศทางไปตามความยาวท่อ เป็นผลทำให้เกิด Bending Moment บนท่อซึ่งส่งผลทำให้เกิดความเสียหาย และยังอาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และเสียงรบกวนที่ระบบท่อได้ นอกจากนี้ในการออกแบบระบบท่อหรือโครงสร้างรองรับท่อเพื่อทนต่อภาระ Bending Moment ที่เกิดขึ้นนี้ ในบางครั้งจำเป็นต้องทราบช่วงความยาวของท่อที่ยังสามารถพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดอยู่ หรือเป็นช่วงที่ท่อยังมีภาระ Bending Moment กระทำอยู่ที่ท่อ โดยในการทดลองนี้ซึ่งใช้แผ่นกีดขวางที่มีพื้นที่ขวางท่อ 19% พบว่าเมื่อการไหลมีความเร็วหมุนวนสูงขึ้น จะสามารถพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดไปได้ไกลขึ้น โดยในกรณีที่มีค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 จะสามารถพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดไปได้ไกลถึงประมาณ 50D (รูปที่ 3.14) ซึ่งระยะทางในการปรับการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่พบ สามารถนำไปใช้ช่วยประมาณช่วงความยาวท่อที่การไหลยังคงมีความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดในระบบงานจริง

นอกจากนี้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน เช่น เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) ควรที่จะติดตั้งห่างจากวาล์วหรืออุปกรณ์อื่นที่มีการขวางการไหลเป็นระยะทางพอสมควร เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนจากการวัดความดันในบริเวณที่มีการกระจายความดันสถิตไม่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัด ดังนั้นระยะทางที่ต้องใช้ในการปรับการกระจายความดันสถิตให้สม่ำเสมอทั้งหน้าตัดจึงเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการติดตั้งอุปกรณ์วัด เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนของการวัดที่อาจเกิดขึ้นได้ (รูปที่ 3.14) อย่างไรก็ตามในระบบท่อที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมพบว่า ในบางครั้งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันจำเป็นต้องติดตั้งที่ตำแหน่งท้ายบริเวณที่มีการขวางการไหล หรือไม่สามารถเว้นระยะห่างจากตำแหน่งขวางการไหลมาถึงอุปกรณ์วัดได้ไกลพอเนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ ดังนั้นขนาดของความแตกต่างความดันสถิตที่สามารถพบได้ที่ระยะทางต่าง ๆ จึงเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการประมาณความคลาดเคลื่อนของค่าความดันสถิตที่อ่านได้ โดยในการทดลองนี้เมื่อพิจารณาการไหลในกรณีที่มีค่า Swirl Number เท่ากับ 0.6 (NS06T) จะได้ว่า ที่ระยะห่างจากแผ่นกีดขวางเป็นระยะทางประมาณ 3D-4D จะยังสามารถพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดได้ประมาณ 15% ของความดันจลน์เฉลี่ยของการไหล และในกรณี Swirl Number เท่ากับ 1.8 (NS18T) ที่หน้าตัดเดียวกันจะสามารถพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดได้ถึงประมาณ 60% ของความดันจลน์เฉลี่ยของการไหล ซึ่งความแตกต่างของการกระจายความดันสถิตที่พบนี้จะเป็นความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าความดันสถิตที่สามารถเกิดขึ้นได้ (รูปที่ 3.12, 3.13 และ 3.17)

สำหรับกรณีการไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้ง 90 องศา พบว่าการไหลแบบหมุนวนที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน เมื่อไหลผ่านท่อโค้งแล้วการไหลที่ด้านทางออกจะมีลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน เช่นเดียวกับที่พบในกรณีการไหลในท่อตรงที่ติดแผ่นกีดขวาง และสามารถพบลักษณะของการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัด ซึ่งเป็นผลทำให้เกิด Bending Moment บนท่อได้ และอาจเป็นสาเหตุของความเสียหาย การสั่นสะเทือน และเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบท่อ (รูปที่ 3.33) โดย

ลักษณะของการติดตั้งท่อโค้งที่บริเวณที่มีการไหลแบบหมุนวนนี้สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในงานด้านวิศวกรรม เช่น การติดตั้งท่อโค้งที่ด้านทางออกของ Pump หรือ Draft Tube ของกังหันน้ำ เป็นต้น ซึ่งจากผลการทดลองที่หน้าตัดแรกของท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง (ประมาณ $0.5D$ จากทางออกท่อโค้ง) สามารถพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดได้ถึงประมาณ 0.5 เท่าของความดันจลน์เฉลี่ยของการไหล และสามารถพบความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตนี้ไปได้ไกลถึงประมาณ $33D$ จากปากทางออกท่อโค้ง (รูปที่ 3.31)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันที่ตำแหน่งด้านทางออกท่อโค้ง จะเห็นได้ว่าความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตที่เกิดขึ้น จะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าความดันสถิตได้เช่นเดียวกับกรณีการไหลในท่อตรงที่มีแผ่นกีดขวางการไหล ดังนั้นจึงควรติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน ห่างจากทางออกท่อโค้งเป็นระยะทางพอสมควร โดยที่ระยะห่างจากทางออกท่อโค้งไปประมาณ $3D-4D$ ในกรณีการไหลที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 ยังสามารถพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดได้ถึงประมาณ 30% ของความดันจลน์เฉลี่ยของการไหล (รูปที่ 3.31) ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนของค่าความดันสถิตที่สามารถวัดได้

อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีที่มีการติดตั้งแผ่นกีดขวางการไหลที่ด้านทางเข้าท่อโค้ง พบว่าแผ่นกีดขวางการไหลและความโค้งท่อ มีผลเร่งการสลายตัวความเร็วหมุนวนของการไหลอย่างรวดเร็ว และทำให้การไหลมีการกระจายความดันสถิตที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในหน้าตัดท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง (รูปที่ 3.35, 3.36 และ 3.37) ซึ่งจากผลที่ได้สามารถนำไปพัฒนาปรับปรุง และประยุกต์ใช้กับระบบท่อในการใช้งานจริงในกรณีที่ในระบบท่อที่มีการไหลแบบหมุนวน และพบความแตกต่างความดันสถิตที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งซึ่งสามารถก่อให้เกิดปัญหาต่างๆได้ โดยทำการติดตั้งแผ่นกีดขวางที่ด้านทางเข้าท่อโค้งเพื่อเร่งการสลายตัวการหมุนวนของการไหล และทำให้การไหลที่ด้านทางออกท่อโค้งมีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัด

6.2 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการกระจายความดันสถิตที่ผนังท่อที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเส้นรอบวงและตามทิศทางการไหล ของการไหลแบบหมุนวนที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรและไม่สมมาตรตามแนวแกนท่อ ในการศึกษาได้สร้างสภาวะการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนด้วยการติดตั้งแผ่นกีดขวางการไหล ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมฐานโค้ง มีพื้นที่ขวางท่อประมาณ 19% ของพื้นที่หน้าตัดท่อ และทำการทดลองวัดความดันสถิตด้านท้ายแผ่นกีดขวาง ในกรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง 90 องศา ที่ความเร็วหมุนวนของการไหลต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีการไหลแบบหมุนวนในท่อตรงซึ่งมีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง) การไหลมีการสูญเสียความดัน

สถิตเฉื่อย ($\overline{C_{Pref}}$) ตามระยะทางการไหล โดยมีลักษณะการกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหลแบ่งออกอย่างสังเขปได้เป็น 3 บริเวณ คือ 1) บริเวณซึ่งความดันสถิตของการไหลลดลงอย่างรวดเร็วอย่างไม่เป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล ซึ่งสันนิษฐานว่าบริเวณนี้เป็นบริเวณที่การไหลยังมีความเร็วหมุนวนสูง 2) บริเวณถัดไปซึ่งความดันสถิตของการไหลมีอัตราการลดลงช้าลง และมีลักษณะการกระจายความดันสถิตประมาณเป็นเส้นตรงตามระยะทางการไหล ซึ่งสันนิษฐานว่าบริเวณนี้การไหลจะมีขนาดความเร็วหมุนวนน้อยลง และ 3) ที่ระยะไกลออกไปซึ่งความเร็วหมุนวนสลายตัวจนหมดไป การไหลจะปรับตัวจนเข้าสู่สภาวะ Fully Developed Flow ซึ่งมีการกระจายความดันสถิตเป็นเชิงเส้นตามระยะทางการไหล และมีอัตราการลดลงของค่าความดันสถิตตามระยะทางการไหลเท่ากันในแต่ละกรณี (รูปที่ 3.10)

เมื่อพิจารณาขนาดของการสูญเสียความดันสถิตที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีการหมุนวนในรูปค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (K , Minor loss) พบว่า K จะแปรผันตามกำลังสองของค่า Swirl Number (N_s) ตามสมการ (4.1) (รูปที่ 3.11)

$$K = 0.628N_s^2 - 0.0965N_s \quad (4.1)$$

ในกรณีการไหลที่มีการกระจายความดันสถิตแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่นกีดขวาง) พบว่าแผ่นกีดขวางมีผลทำให้เกิดบริเวณความดันสถิตต่ำในหน้าตัด ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณการไหลแบบ Wake ด้านหลังแผ่นกีดขวาง และการไหลแบบหมุนวนจะสามารถพาบริเวณความดันสถิตต่ำนี้ให้หมุนวนไปตามการไหลได้ โดยมีความเร็วหมุนวนช้ากว่าความเร็วหมุนวนของการไหลที่ด้านทางออกท่อหมุน (รูปที่ 3.12 และ 3.13)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดท้ายแผ่นกีดขวางในกรณีการไหลที่ค่าความเร็วหมุนวนต่างๆ พบว่าเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number สูงขึ้นความเร็วปะทะแผ่นกีดขวาง ($\bar{u} + \bar{w}$) ที่มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้มีความดันตกคร่อมแผ่นกีดขวางเพิ่มมากขึ้น และทำให้การไหลที่ด้านท้ายแผ่นกีดขวาง มีความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดสูงขึ้น (หรือมีค่า C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัดลดลง) ซึ่งความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดที่มีค่าสูงซึ่งเกิดในกรณีที่ Swirl Number สูงนี้จะถูกพาไปตามระยะทางการไหลได้ไกลกว่าในกรณีความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดที่ต่ำกว่าที่เกิดขึ้นที่ Swirl Number ต่ำ (รูปที่ 3.12, 3.13, 3.17, 3.19 และ 3.20) โดยพบว่าระยะทางในการปรับตัวของการไหลให้มีความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด ($C_{Pref} \leq 0.05$) จะแปรตามกำลังสองของค่า Swirl Number โดยในกรณีของการทดลองนี้ ซึ่งแผ่นกีดขวางมีพื้นที่ขวางท่อเท่ากับ 19% ของพื้นที่หน้าตัดท่อ พบความสัมพันธ์ตามสมการ (4.2), $L/D = 15.5N_s^2 - 1.60N_s + 2.97$, เมื่อ L/D เป็นระยะทางในรูปตัวแปรไร้มิติของการปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด (รูปที่ 3.14) ซึ่งในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนพบว่า (NS00T) จะใช้ระยะทางในการปรับตัวเพื่อให้มีการกระจาย

ความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดประมาณ 3D ในขณะที่กรณีความเร็วหมุนวนสูงสุด (NS18T) จะใช้ระยะทางประมาณ 50D

การกระจายความดันสถิตที่ไม่สม่ำเสมอในหน้าตัดที่เกิดขึ้นจะมีการปรับตัวให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นไปตามระยะทางการไหล โดยเมื่อพิจารณาขนาดความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัด ($\Delta C_{Pref} max$) พบว่าความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัดจะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการไหล (ประมาณ 2D แรก) และลดช้าลงในระยะการไหลถัดไปจนกระทั่งมีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัด โดยสามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามระยะทางการไหลได้ในรูปของฟังก์ชันโพลิโนเมียลตามสมการ (4.3) (รูปที่ 3.17)

$$\Delta C_{Pref} max = C(X / D)^{-n} \quad (4.3)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่ของแต่ละกรณี
 X/D เป็นระยะทางการไหลในรูปตัวแปรไร้มิติ (จำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ)

โดยพบว่าการไหลจะมีอัตราการลดลงของค่าความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในหน้าตัดแตกต่างกันตามค่า Swirl Number ของการไหล โดยการไหลที่มีค่า Swirl Number สูงขึ้น จะมีอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ต่ำลง และสามารถหาความสัมพันธ์ของเลขชี้กำลัง n ซึ่งแสดงถึงอัตราการลดลงของค่า $\Delta C_{Pref} max$ ตามค่า Swirl Number ในรูปฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลตามสมการ (4.4) (รูปที่ 3.18)

$$n = 1.18e^{-0.352.Ns} \quad (4.4)$$

เมื่อพิจารณาคาบของการหมุนวนไปของบริเวณความดันสถิตต่ำสุด (C_{Pref} ต่ำสุด) ครบ 1 รอบ พบว่าการหมุนวนไปของบริเวณความดันสถิตต่ำจะมีคาบยาวขึ้นไปตามระยะทางการไหล ซึ่งเป็นเครื่องบ่งชี้อย่างสังเขปถึงขนาดความเร็วหมุนวนของการไหลที่สลายตัวไปตามการไหลในท่อ (รูปที่ 3.15) โดยในกรณี Swirl Number เท่ากับ 1.8 พบว่าคาบของการหมุนวนไปของบริเวณความดันสถิตต่ำจะมีขนาดยาวขึ้นประมาณเป็นเชิงเส้นไปตามระยะทางการไหล และสามารถหาความสัมพันธ์ของขนาดคาบตามระยะทางการไหลตามสมการ (4.5), $T/D = 0.104(X/D) + 5.37$, เมื่อ T/D เป็นความยาวคาบในรูปตัวแปรไร้มิติ (จำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ) (รูปที่ 3.16) และเมื่อพิจารณาค่า Swirl Number ของการไหลว่ามีค่าประมาณเท่ากับ $\frac{\pi D}{T}$ สามารถประมาณได้ว่าการไหลจะมีค่า Swirl Number ลดลงเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางการไหล ($Ns \propto X^{-1}$)

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความแตกต่างความดันสถิตที่ผนังท่อด้านตรงข้าม ($P_{0^\circ} - P_{180^\circ}$) และ ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ}$) ตามระยะทางการไหล พบว่าในกรณีการไหลที่มีความเร็วหมุนวน การหมุนวนไปของความไม่สมมาตรของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดจะเป็นผลให้มีความแตกต่างความดันสถิตเพิ่มขึ้นและลดลง ในลักษณะของการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันสถิตไปตามระยะทางการไหล ซึ่งจะบ่งชี้ถึงแรงที่กระทำสลับทิศทางไปตามความยาวท่อ โดยมีการสลายตัวของ การแกว่งของความแตกต่างความดันสถิตไปตามการปรับตัวการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดที่สม่ำเสมอมากขึ้น (รูปที่ 3.19 และ 3.20)

ในกรณีการไหลผ่านท่อโค้งที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง) ในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00) การไหลที่เคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งในช่วงท่อโค้ง และแรงสู่ศูนย์กลางการไหลในช่วงท่อโค้งที่เกิดขึ้น จะมีผลทำให้การไหลมีความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าผนังท่อโค้งด้านใน ($P_{90^\circ} - P_{270^\circ} > 0$) นอกจากนี้สำหรับท่อโค้งที่ใช้ศึกษา ซึ่งมีอัตราส่วนรัศมีท่อต่อรัศมีความโค้งเท่ากับ 1/3.1 พบว่าภายในช่วงท่อโค้ง ความโค้งที่มีผลมากต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดเทียบกับการไหลแบบหมุนวน ดังจะเห็นได้จากในกรณี NC09 และ NC18 ซึ่งจะมีความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าผนังท่อโค้งด้านในตลอดช่วงท่อโค้ง (รูปที่ 3.31)

อย่างไรก็ตาม การหมุนวนของการไหลที่เกิดขึ้น จะส่งผลต่อลักษณะการกระจาย ความดันสถิตในท่อโค้งได้ โดยในช่วงหน้าตัดประมาณ 15° แรกในช่วงท่อโค้ง พบว่าการไหลแบบหมุนวนในกรณี NC09 และ NC18 จะมีลักษณะการกระจาย C_{Pref} ในหน้าตัดแตกต่างจากกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน (NC00) และมีความแตกต่างความดันสถิตระหว่างผนังท่อโค้งด้านนอกกับผนังท่อโค้งด้านใน ($P_{90} - P_{270}$) ต่ำกว่ากรณี NC00 อย่างไรก็ตามตั้งแต่หน้าตัด $\theta = 30^\circ$ เป็นต้นไปการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 0.9 (NC09) จะมีผลน้อยลง และมีลักษณะการกระจาย C_{Pref} ใกล้เคียงกับกรณี NC00 ในขณะที่กรณี Swirl Number เท่ากับ 1.8 (NC18) จะยังมีลักษณะการกระจายความดันสถิตแตกต่างจากกรณี NC00 อยู่โดยมีค่า $P_{90} - P_{270}$ ต่ำกว่ากรณี NC00 ตลอดช่วงท่อโค้ง (รูปที่ 3.31)

นอกจากนี้ความแตกต่างของความดันสถิตในหน้าตัด ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในช่วงท่อโค้งเนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางการไหลในท่อโค้ง ($P_{90} - P_{270}$) จะถูกการไหลแบบหมุนวนที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 (NC18) พาให้ออกมาที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งได้ โดยสามารถพบความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดและการหมุนวนไปของความแตกต่างความดันสถิตนี้ได้ในท่อตรงหลังท่อโค้งเป็นระยะทางถึงประมาณ 33D จากทางออกท่อโค้ง ก่อนจะมีการปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตที่สม่ำเสมอทั้งหน้าตัด (รูปที่ 3.31)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวความดันสถิต (C_{Pw}) ตามระยะทางการไหลในแต่ละกรณี จะเห็นได้ว่าในช่วงท่อโค้งแรงสู่ศูนย์กลางที่เกิดจากความโค้งท่อจะมีผลสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิตในทุกกรณี โดยพบว่าในช่วงต้นของท่อโค้งค่า C_{P90} ซึ่งเป็นความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหลจากค่าก่อนเข้า และต่อ

มาลดลงในช่วงท้ายของท่อโค้ง ส่วนค่า C_{P270} ซึ่งเป็นความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านในจะมีค่าลดลงจากค่าก่อนเข้าท่อโค้งไปตามระยะทางการไหลในท่อโค้ง และต่อมามีค่าเพิ่มขึ้นที่ด้านทางออกท่อโค้ง (รูปที่ 3.34)

อย่างไรก็ตามในช่วงท่อโค้งพบว่าขนาดของความเร็วหมุนวนที่ค่า Swirl Number เท่ากับ 1.8 (NC18) สามารถส่งผลเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายความดันสถิต ทำให้กรณี NC18 มีลักษณะการกระจายค่า $C_{P\psi}$ ($\psi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270°) ในช่วงท่อโค้งแตกต่างจากกรณีอื่น และพบว่าเมื่อไหลออกจากท่อโค้งแล้วกรณี NC00 และ NC09 จะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดด้านทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าที่ด้านทางเข้าเล็กน้อย ส่วนในกรณี NC18 จะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งต่ำกว่าค่าก่อนเข้าท่อโค้งอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 3.34)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{P_{ref}}}$) ตามระยะทางการไหล พบว่าที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง การไหลจะมีลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยขึ้นกับความเร็วหมุนวนของการไหล โดยจะมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีค่า Swirl Number เพิ่มขึ้นและมีลักษณะการกระจาย $\overline{C_{P_{ref}}}$ ตามระยะทางการไหลคล้ายกับกรณีการไหลในท่อตรงที่มีความเร็วหมุนวนเท่ากัน (รูปที่ 3.41)

สำหรับกรณีการไหลที่ติดแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้งพบว่า ในช่วงท่อโค้งความโค้งท่อจะมีผลสูงต่อลักษณะการกระจายความดันสถิต โดยพบว่าในทุกกรณีการไหลจะมีความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกมากกว่าผนังท่อโค้งด้านใน และพบว่าความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความดันสถิตในหน้าตัดเนื่องจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้งจะสลายตัวไปอย่างรวดเร็วในช่วงท่อโค้ง โดยสามารถพบบริเวณความดันสถิตต่ำเนื่องจากการไหลผ่านแผ่นกีดขวางได้เฉพาะในกรณี NC18T ในช่วงหน้าตัด 30° แรกของท่อโค้ง (รูปที่ 3.35)

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวความดันสถิต ($C_{P\psi}$, $\psi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270°) ตามระยะทางการไหลในแต่ละกรณี พบว่าการไหลที่แต่ละค่า Swirl Number จะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดด้านทางออกท่อโค้งเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่หน้าตัดด้านทางเข้าท่อโค้งแตกต่างกัน โดยพบว่าในกรณี NC00T จะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งเพิ่มขึ้นจากค่าที่หน้าตัดทางเข้า กรณี NC09T จะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่หน้าตัดทางเข้า และกรณี NC18T จะมีลักษณะแตกต่างจากกรณีอื่นมากที่สุด โดยมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งลดลงจากค่าที่หน้าตัดทางเข้า (รูปที่ 3.38) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกีดขวางการไหล พบว่าในกรณี NC00 และ NC09 จะมีค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งลดลงจากค่าที่หน้าตัดทางเข้า ในขณะที่กรณี NC18T และ NC18 จะมีแนวโน้มค่า $C_{P\psi}$ ที่หน้าตัดทางออกท่อโค้งลดลงจากค่าที่หน้าตัดทางเข้าเหมือนกัน (รูปที่ 3.34 และ 3.38)

ที่ท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง ในกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวางการไหล พบว่าการไหลในทุกกรณีไม่ว่าจะมีการหมุนวนหรือไม่ก็ตามจะมีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดตั้งแต่ระยะประมาณ 1D จากปากทางออกท่อโค้ง ซึ่งตรงข้ามกับกรณีที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง ในกรณี

Swirl Number เท่ากับ 1.8 (NC18) อย่างชัดเจน โดยในกรณีหลังนี้การไหลสามารถพาความแตกต่างความดันสถิตในหน้าตัดท่อโค้งออกมาที่ท่อตรงด้านทางออกได้ ทำให้ความดันสถิตภายในหน้าตัดมีความไม่สม่ำเสมอไปได้ไกลถึงประมาณ 33D แสดงให้เห็นว่าแผ่นกีดขวาง และความโค้งที่มีผลควบคู่กันในการเร่งการสลายตัวการหมุนวนของการไหล (รูปที่ 3.33, 3.35, 3.36, และ 3.37)

นอกจากนี้ในช่วงท่อตรงด้านทางออกท่อโค้งของกรณีที่เกิดแผ่นกีดขวางการไหล ที่ทุกค่า Swirl Number จะไม่พบบริเวณของการไหลที่มีการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) อย่างรวดเร็วและไม่เป็นเชิงเส้น (บริเวณที่ 1) อันเป็นคุณลักษณะของการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยในกรณีการไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้งที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง ในทางตรงกันข้ามกลับพบว่า มีลักษณะการกระจายความดันสถิตเฉลี่ย ($\overline{C_{Pref}}$) เป็นเส้นตรงตามระยะทางการไหล โดยมีอัตราการสูญเสียความดันสถิตตามระยะทางการไหลในทุกกรณีใกล้เคียงกัน อันเป็นคุณลักษณะของการลดลงของความดันสถิตเฉลี่ยในกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนผ่านท่อโค้งที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง (NC00) จากผลที่ได้ในสองประเด็นนี้ บ่งชี้เสริมให้เห็นว่าแผ่นกีดขวางที่ด้านหน้าท่อโค้งและความโค้งท่อ มีผลในการเร่งการสลายตัวการไหลแบบหมุนวน (รูปที่ 3.39)



ประมวลตาราง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
1	Sparrow et al. (1979)	ศึกษาการไหลในท่อที่มีการขวางหน้าตัดด้วย Segmental Orifice Plate ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ ขวางท่อต่อพื้นที่หน้าตัดท่อต่างๆกัน โดยทำการ วัดลักษณะการกระจายความดัน และทำ Flow Visualization เพื่อ ดู ลั ก ษ ณะ ก า ร ก ่ ด Reattachment ของการไหลด้านหลังสิ่งกีดขวาง	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 1 \times 10^4 - 6 \times 10^4$ ▪ Segmental Orifice Plate มีอัตราส่วนพื้นที่ขวางต่อพื้นที่หน้าตัดท่อ 1/4, 1/2 และ 3/4 	การสูญเสียความดันเมื่อ Normalized ด้วยความดัน จลน์ จะไม่ขึ้นกับค่า Re และมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่าง รวดเร็วเมื่อเปลี่ยนขนาดพื้นที่กีดขวางการไหลในท่อ โดยการกระจายความดันด้านหลังของแผ่นกีดขวางจะ เริ่มมีค่าสม่ำเสมอที่ระยะทางการไหลจากสิ่งกีดขวาง ประมาณ 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในกรณีมี พื้นที่ขวางหน้าตัดท่อเป็น 3/4 เท่าของพื้นที่หน้าตัด ท่อ
2	Miau et al. (1996)	ศึกษาการไหลแบบหมุนวนในท่อที่เปลี่ยนหน้า ตัดจากวงกลมเป็นสี่เหลี่ยม ที่มี Aspect Ratio = 2.0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 2.8 \times 10^3, 7 \times 10^3, 4.4 \times 10^5$ ▪ $N_s = 0.065 - 0.27$ 	รูปร่างการไหลแบบหมุนวนจะมีการบิดตัวไป ส่งผลให้ มีการกระจายความดันสถิตที่ผนังท่อด้านทางออกไม่ สมมาตรตามแนวกึ่งกลางผนังท่อ

ตารางที่ 1.1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การไหลที่มีการกระจายความดันสถิตและความเร็วแบบไม่สมมาตรตามแนวแกน

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
1	Talbot และ Berkeley (1954)	วิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบที่มีการหมุนวนในท่อ (Laminar Swirling Pipe Flow) โดยใช้ Linearized Theory และทำการทดลองดูการไหล (Flow Visualization) เพื่อสังเกต Instabilities ของการไหล โดยใช้ท่อหมุนในการสร้างการไหลแบบหมุนวน	<ul style="list-style-type: none"> $Re < 2700$ 	ความสัมพันธ์ของความไม่มีเสถียรภาพของการไหลที่ค่าความเร็วในการหมุนวน และค่า Reynolds Number ต่างๆ
2	Kreith และ Sonju (1965)	ทำการวิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนในท่อ โดยใช้ Linearized Theory และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ โดยสร้างชุดทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1 นิ้วมีความยาวรวมประมาณ 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และใช้ Twisted Tape ในการสร้างการไหลแบบหมุนวน	<ul style="list-style-type: none"> $Re = 10^4 - 10^5$ Twisted Tape, Dimensionless Pitch = 9 และ 15 	การไหลแบบหมุนวนจะสลายตัวจนเหลือค่าประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น เมื่อไหลไปเป็นระยะทางประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ โดยเมื่อการไหลมีค่า Re สูงขึ้นจะมีอัตราการสลายตัวของ การไหลแบบหมุนวนลดลง และผลการวิเคราะห์สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ในระยะ 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากปากทางเข้า

ตารางที่ 1.2 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การไหลแบบหมุนวนในท่อ

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
3	Weske และ Sturov (1974)	ทดลองวัดการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ที่มีการหมุนวนในท่อด้วย Hot wire โดยใช้ท่อหมุนในการสร้างการไหลแบบหมุนวน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 10 cm และมียาวรวมของชุดทดลอง 170 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 3 \times 10^4$ ▪ Swirl Intensity (σ) = 0-3 เมื่อนิยามเป็นความเร็วในแนวสัมผัสสูงสุดของท่อหมุนต่อความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน 	การหมุนวนของการไหลจะสามารถไหลไปได้ไกลกว่า 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และต้องใช้ระยะทางมากกว่า 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในการปรับตัวของปริมาณเทอร์บูเลนซ์เพื่อเข้าสู่สภาวะ Turbulent Fully Developed Flow ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและปริมาณเทอร์บูเลนซ์จะแตกต่างกันในแต่ละกรณีขึ้นกับค่า Swirl Intensity (σ) ของการไหล
4	Kitoh (1991)	ทดลองวัดการไหลแบบหมุนวนที่สภาวะการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ โดยใช้ Guide Vane ในการสร้างการไหลแบบหมุนวน ชุดทดลองมี 2 แบบ คือ แบบที่ใช้อากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 150 mm ยาว 7 m และชุดทดลองแบบใช้น้ำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 50.8 mm ยาว 4 m โดยใช้ Hot Wire และ Yaw Probe ในการวัดความเร็ว	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 4 \times 10^4 - 8 \times 10^4$ 	ค่า Swirl Intensity, Ω ซึ่งนิยามเป็นตัวแปรไร้มิติของค่าโมเมนตัมเชิงมุมจะสลายตัวไปตามระยะทางการไหล เนื่องจากผลของแรงเสียดทานที่ผนังท่อ โดยมีลักษณะการสลายตัวเป็น Exponential ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นกับค่า Swirl Intensity

ตารางที่ 1.2 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
5	Kobayashi และ Yoda (1987)	คำนวณการไหลแบบหมุนวนในท่อตรง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Different Method) โดยใช้โมเดล 3 แบบ ได้แก่ Standard k- ϵ model, k- ϵ model with higher order terms in Reynolds stress equation, และ modified k- ϵ model with anisotropic representation of turbulence	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 1 \times 10^5$ ▪ Swirl Number (N_s) = 1.176 	ผลการคำนวณได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Murakami (1976) พบว่าเมื่อใช้ modified k- ϵ model จะให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง ในขณะที่ Standard k- ϵ model ไม่สามารถคำนวณความเร็วได้แม่นยำ และ k- ϵ model with higher order term จะให้ผลแตกต่างจาก Standard k- ϵ model เล็กน้อย
6	Parchen และ Steenbergen (1998)	ทำการทดลองและคำนวณการไหลแบบหมุนวนในท่อ โดยใช้ Guide Vane ในการสร้างการไหลแบบหมุนวน ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 70 mm ความยาวท่อรวม 20 m และและมีค่าความขรุขระที่ผนังท่อ (ϵ/D) = 1×10^{-5} สำหรับการคำนวณการไหลใช้โมเดล 2 ลักษณะ คือ k- ϵ model และ โมเดลที่อิง Reynolds Stress Transport Equation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 5 \times 10^4$ 	ลักษณะการสลายตัวของโมเมนต์เชิงมุมของการไหลขึ้นกับลักษณะการกระจายตัวของความเร็วด้านทางเข้า โดยได้ทดลองรูปร่างความเร็วแนวแกน 2 ลักษณะ คือ รูปร่างความเร็วแนวแกนแบบคล้าย Wake และแบบคล้าย Jet สำหรับการคำนวณการไหล พบว่าโมเดลที่อิง Reynolds Stress Transport Equation (RSM และ ASM) จะให้ผลการคำนวณที่ขึ้นกับลักษณะการกระจายตัวของรูปร่างความเร็วที่ด้านทางเข้า ในขณะที่เมื่อใช้ Standard k- ϵ model ผลการคำนวณที่ได้จะไม่ขึ้นกับรูปร่างความเร็ว แต่จะให้ผลการคำนวณใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
7	Murakami และ Kikuyama (1980)	ทดลองหารูปแบบการไหล และการสูญเสียของการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อหมุน (Rotating Pipe) โดยทดลองในท่อหมุนที่มีความยาวท่อเท่ากับ 30, 50, 70, 120, 140 และ 160 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 1 \times 10^4 - 2 \times 10^5$ ▪ Rotational Reynolds Number, $R_\theta = 0 - 6.5 \times 10^4$ 	การไหลแบบหมุนวนมีผลในการเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilize) การไหล ทำให้ความปั่นป่วนของการไหลลดลง โดยเมื่อท่อหมุนมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น จะมีการสูญเสียพลังงานของการไหลเนื่องจากความเสียดทานน้อยลง และเปลี่ยนรูปร่างความเร็วแนวแกนของการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ จนใกล้เคียงรูปร่างความเร็วของการไหลแบบลามินาร์
8	Kikuyama et al. (1983)	ทำการทดลอง เพื่อศึกษาการพัฒนา Boundary Layer ของการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อหมุน โดยให้การไหลมีรูปร่างความเร็วแบบสมมาตรที่ทางเข้าท่อหมุน ชุดทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ในการทดลองใช้ Hot Wire วัดความเร็วและ Reynolds Stress ที่หน้าตัด $X/D = 2.7, 5.7, 9.7, 15.5, 22.5$ และ 28.5 จากปากทางเข้าท่อหมุน	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 6 \times 10^4$ ▪ $N_s = 0 - 0.83$ 	การหมุนของท่อหมุนส่งผลสองอย่างต่อการไหล คือทำให้การไหลไม่มีเสถียรภาพ (Destabilize) ที่บริเวณผนังท่อ เนื่องจากผลของแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการหมุนของท่อ และทำให้การไหลมีเสถียรภาพ (Stabilize) เนื่องจากผลของแรงสู่ศูนย์กลางของการหมุน ผลของการสูญเสียความเสถียรภาพของการไหลจะมีผลในช่วงต้นของการไหล ($X/D < 10$) แต่ผลของความเสถียรภาพของการไหลจะเด่นชัดที่ด้านท้าย (ตั้งแต่ $10D$ เป็นต้นไป)

ตารางที่ 1.2 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
9	Anwer และ So (1989)	ทำการทดลองวัดการไหลแบบหมุนวน ซึ่งถูกสร้างด้วยท่อหมุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 76.2 mm. ยาว 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Re = 5 \times 10^4$- ▪ $Ns = 0-1$ ▪ การไหลที่ด้านทางเข้าท่อหมุนเป็น Turbulent Fully Developed Flow 	พบว่า Circumferential Strain ที่สูงขึ้นในชั้น Viscous Layer อันเนื่องมาจากการหมุนของการไหล มีผลทำให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพของการไหล และเพิ่มความเป็นเทอร์บูเลนต์ของการไหลตลอดหน้าตัด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (C_f) สูงขึ้นเมื่อมีค่า Swirl Number (N_s) สูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ค่า $N_s = 0.5$

ตารางที่ 1.2 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
1	Rowe (1970)	ทดลองวัดค่าความดันรวม และ มุม Yaw ของการไหล ด้วย Pitot Probe และ Yaw Probe ในท่อโค้ง 180 องศา และท่อด้านทางออกท่อโค้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 3.5 นิ้ว	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\alpha = 1/24$ ▪ สภาวะการไหลที่ด้านทางเข้าท่อโค้ง เป็น Turbulent Fully Developed Flow ▪ $Re=2.36 \times 10^5$ 	ค่า Secondary Flow ที่เกิดขึ้นในการไหลในท่อโค้ง 180 องศา มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่ปากทางเข้าท่อโค้งจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งประมาณ 30 องศา จากนั้นมีค่าลดลงจนคงที่ที่ประมาณ 90 องศา หลังออกจากท่อโค้งการไหลจะมีการปรับตัวจนกระทั่งไม่สามารถวัดมุม Yaw ของความเร็วได้ที่ระยะประมาณ 61 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากทางออกท่อโค้ง
2	Patankar et al. (1975)	คำนวณการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อโค้ง 180 องศา ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ และใช้ k- ϵ model	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ใช้สภาวะการคำนวณเหมือนกับงานวิจัยของ Rowe (1970) 	ค่าที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rowe (1970) พบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน
3	Agrawal et al. (1978)	ทำการทดลองวัดความเร็วการไหลในท่อโค้ง 180 องศา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 1.5 นิ้ว	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\alpha = 1/7, 1/20$ ▪ $De = 138-679$ ▪ $Re = 150-1200$ ▪ สภาวะการไหลที่ทางเข้าท่อโค้งเป็น Uniform Flow 	ในช่วงต้นของการไหลเข้าท่อโค้งซึ่งมีความหนา Boundary Layer ไม่มาก การไหลมีการปรับตัวเป็นการไหลแบบ Vortex และที่ระยะถัดออกไป เมื่อ Boundary Layer มีขนาดหนาขึ้นจะพบ 3-D Separation ที่บริเวณผนังท่อโค้งด้านใน

ตารางที่ 1.3 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การไหลในท่อโค้ง

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
4	Cheng และ Yuen (1987a)	ทำ Flow Visualization ที่ปากทางออกท่อโค้ง 180 องศาและท่อตรงด้านทางออกท่อโค้ง โดยใช้ Smoke Generator ท่อที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 2.54 cm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\alpha = 1/10$ ▪ $De = 99-384$ ▪ $Re = 14-3134$ ▪ การไหลที่ด้านทางเข้าท่อโค้งเป็น Laminar Fully Developed Flow 	ภาพ Secondary Flow ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง 180 องศาที่ค่า Dean Number ต่างๆ
5	Cheng และ Yuen (1987b)	ทำ Flow Visualization ที่ท่อด้านทางออกของท่อโค้ง 180 องศา ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนให้การไหลที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวท่อคงที่	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\alpha = 0.18$ ▪ $ReRa = 9.49 \times 10^5 - 8.86 \times 10^7$ ▪ T_w (Pipe Wall Temperature) = 55-91°C ▪ การไหลที่ด้านทางเข้าท่อโค้งเป็น Laminar and Turbulent Fully Developed Flow 	ภาพถ่ายที่ได้แสดงลักษณะของ Secondary Flow ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงหนีศูนย์กลางและแรงลอยตัว พบว่าในกรณีที่แรงทั้งสองกระทำตั้งฉากกัน Secondary Flow ที่พบมีลักษณะการวางตัวเอียงไปจากเดิม

ตารางที่ 1.3 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
6	Sparrow และ Chrysler, Chrysler และ Sparrow (1986)	ทำการทดลองวัดการกระจายความดันสถิต และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผนังท่อโค้ง 30°, 60° และ 90° และมีเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ 1.25 นิ้ว	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\alpha = 1/9$ ▪ $Re = 5 \times 10^3 - 1 \times 10^5$ ▪ การไหลที่ด้านทางเข้าท่อโค้งเป็น Turbulent Fully Developed Flow และ Sharp-edged Inlet 	พบว่าค่าความดันสถิตและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุดที่ผนังท่อโค้งด้านนอก และมีค่าต่ำสุดที่ผนังท่อโค้งด้านใน และสภาวะของการไหลก่อนเข้าท่อโค้งมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของค่าความดันสถิตและการถ่ายเทความร้อนในท่อโค้ง
7	Baughn et al. (1987)	ทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนในท่อโค้ง 180 องศา ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางในของท่อ 76 mm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\alpha = 1/6.75$ ▪ $Re = 2 \times 10^4, 6 \times 10^4, 1.1 \times 10^5$ ▪ การไหลที่ด้านทางเข้าท่อโค้งเป็น Turbulent Fully Developed Flow ▪ Uniform Wall Temperature 	ค่า Nusselt Number, Nu ที่ตำแหน่งผนังท่อโค้งด้านนอกมีค่ามากกว่าที่ผนังท่อโค้งด้านใน โดยมีค่าเฉลี่ยของ Nusselt Number แต่ละหน้าตัดสูงสุดที่หน้าตัดมุม 90 องศาจากทางเข้า ซึ่งมีอัตราส่วนของค่า Nu ที่ผนังท่อโค้งด้านนอกต่อผนังท่อโค้งด้านในอยู่ประมาณ 3 ต่อ 1 และสามารถพบความแตกต่างของค่า Nu ที่ผนังท่อทั้งสองด้าน ที่ระยะทางประมาณ 6D จากทางออกท่อโค้ง

ตารางที่ 1.3 (ต่อ)

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สภาวะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
1	Shimizu และ Sugino (1980)	ศึกษาการสูญเสียพลังงาน และรูปแบบการไหลของการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง 180 องศา โดยใช้ Guide Vane ในการสร้างการไหลแบบหมุนวน ซึ่งมีท่อโค้งติดตั้งอยู่ด้านท้ายห่างออกไป 15D และใช้ Yaw Probe ในการวัดความเร็วในท่อโค้ง	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $1/\alpha = 0, 3, 4$ และ 6 ▪ $Re = 1 \times 10^5$ ▪ $\epsilon/D = 0.00074-0.0121$ ▪ Turbulent Fully Developed Flow Inlet 	การสูญเสียพลังงานการไหลในท่อโค้ง ขึ้นกับความเร็วในการหมุนวนด้านทางเข้า ความโค้งของท่อโค้งและความขรุขระของผนังท่อ
2	Kitoh (1987)	ทำการวิเคราะห์การไหลแบบไร้ความหนืดของการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง โดยใช้กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of Angular Momentum)		ผลเฉลยของการไหลขึ้นอยู่กับสภาวะของการไหลก่อนเข้าท่อโค้ง : Initial Angular Momentum Flux (Ω, A, E) และ α โดยพบว่าการไหลแบบหมุนวนที่ด้านทางเข้าท่อโค้งซึ่งมีการกระจายตัวความเร็วที่สมมาตรตามแนวแกน ($\Omega \neq 0 ; A = E = 0$) จะถูกผลของความโค้งท่อเปลี่ยนให้มีการกระจายตัวของความเร็วที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน ($\Omega, A, E \neq 0$) โดยแสดงผลในรูปของค่าโมเมนตัมเชิงมุม ซึ่งมีขนาดและทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามการไหลภายในท่อโค้ง
3	Kitoh (1995)	เพิ่มผลของแรงเสียดทานการไหลเข้ากับการวิเคราะห์การไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง (Kitoh,1987)		แรงเสียดทานที่ผนังท่อมีผลในการสลายตัวการหมุนวนของการไหล โดยมีลักษณะการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวนแตกต่างกันขึ้นกับค่า Swirl Intensity ที่ด้านทางเข้าท่อโค้ง

ตารางที่ 1.4 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง

ลำดับที่	ผู้วิจัย	แนวทางในการวิจัย	สถานะที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้
4	Anwer และ So (1993)	ทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆของการไหลได้แก่ ค่าความดันสถิตที่ผนังท่อ ความเร็วเฉลี่ย Reynolds Stress และ Wall Shear Distribution ของการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง โดยสร้างการไหลแบบหมุนวนด้วยท่อหมุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 76.2 mm. ยาว 6D ท่อหมุนถูกติดตั้งที่ก่อนทางเข้าท่อโค้งเป็นระยะทาง 6D	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $\alpha = 1/13$ ▪ $Re = 5 \times 10^4$ ▪ $N_s = 0, 1$ ▪ การไหลที่ด้านทางเข้าท่อหมุนเป็น Turbulent Fully Developed Flow 	ผลของการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นมีผลเด่นชัดครอบคลุม Secondary Flow ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลในท่อโค้ง โดยในกรณีการไหลที่มีการหมุนวนค่า C_p ที่ผนังท่อโค้งด้านในมีค่ามากกว่าที่ผนังท่อโค้งด้านนอกตรงข้ามกับกรณีการไหลที่ไม่มีการหมุนวน
5	So และ Anwer (1993)	รายละเอียดของชุดทดลองเหมือนกับกรณีของงานวิจัยในลำดับที่ 4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ สถานะการไหลที่ทำการศึกษามีเหมือนกับกรณีของงานวิจัยในลำดับที่ 4 	การสลายตัวของการหมุนวนของการไหลต้องใช้ระยะทางประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากทางออกของท่อโค้ง ส่วนการปรับตัวของปริมาณเทอร์บูเลนซ์เพื่อเข้าสู่สถานะ Turbulent fully developed flow ต้องใช้ระยะทางยาวเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 65 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากทางออกท่อโค้ง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวนในท่อตรง สามารถสรุปได้ว่าความโค้งท่อมีผลในการเร่งการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวน ทำให้ระยะทางที่ใช้ในการสลายตัวสั้นลง

ลักษณะการกระจายความดันสถิต	กรณีการทดลอง	Swirl Number (Ns)	คำย่อ
การกระจายความดันสถิตแบบ สมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติด แผ่นกีดขวาง)	การไหล ในท่อตรง	0.0	NS00
		0.3	NS03
		0.6	NS06
		0.9	NS09
		1.2	NS12
		1.8	NS18
การกระจายความดันสถิตแบบไม่ สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่น กีดขวาง)	การไหล ในท่อตรง	0.0	NS00T
		0.3	NS03T
		0.6	NS06T
		0.9	NS09T
		1.2	NS12T
		1.8	NS18T
การกระจายความดันสถิตแบบ สมมาตรตามแนวแกน (กรณีไม่ติด แผ่นกีดขวาง)	การไหล ผ่านท่อโค้ง	0.0	NC00
		0.9	NC09
		1.8	NC18
การกระจายความดันสถิตแบบไม่ สมมาตรตามแนวแกน (กรณีติดแผ่น กีดขวาง)	การไหล ผ่านท่อโค้ง	0.0	NC00T
		0.9	NC09T
		1.8	NC18T

ตารางที่ 2.1 กรณีการทดลองและคำย่อแทนกรณีการทดลอง

กรณีการทดลอง	ตำแหน่ง หน้าตัดวัด	ระยะห่าง ระหว่างหน้าตัด	วัดความดันสถิตทุกๆ ช่วงมุม $d\psi$ (องศา)
การไหลในท่อตรง	$X/D = 0.5-6.0$	0.5D	15
	$X/D = 7-38$	1D	30
	$X/D = 41-76$	2D	45
การไหลผ่านท่อโค้ง	$S/D = -1.0-1.0$	0.5D	15
	มุม โค้ง $\theta = 15^\circ-75^\circ$	15 องศา	15
	$S/D = 4.6-10.1$	0.5D	15
	$S/D = 11.1-42.1$	1D	30
	$S/D = 45.1-80.1$	2D	45

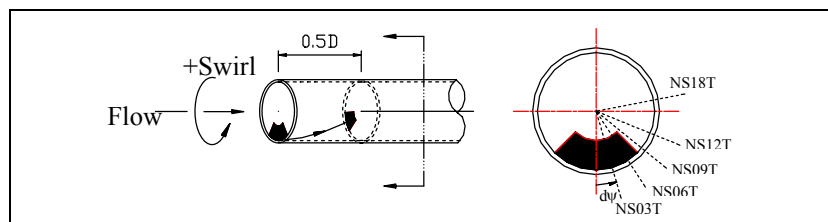
ตารางที่ 2.2 ตำแหน่งวัดความดันสถิต

กรณี	ความเร็วเฉลี่ยตลอด หน้าตัดด้านทางเข้าท่อหมุน, \bar{u}_1 (m/s)	ความเร็วเฉลี่ยตลอด หน้าตัดด้านทางออกท่อหมุน, \bar{u}_2 (m/s)	ความเร็วเฉลี่ยตลอด หน้าตัดด้านทางเข้า Orifice, \bar{u} (m/s)
NS00	8.0	7.7	7.8
NS03	7.9	7.7	7.8
NS06	8.0	7.8	8.1
NS09	8.0	7.8	8.1
NS12	8.0	7.8	8.0
NS18	7.3	7.8	8.0
NS00T	7.9	-	8.1
NS03T	7.9	-	8.0
NS06T	8.0	-	8.0
NS09T	8.0	-	8.0
NS12T	7.9	-	8.0
NS18T	7.9	-	8.0

ตารางที่ 3.1 ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (กรณีการไหลในท่อตรง)

Swirl Number	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณจากรูปร่าง ความเร็วตามแนวสัมผัส rad/s (RPM)	ความเร็วเชิงมุมท่อหมุน rad/s (RPM)
0.3	59 (568)	64 (614)
0.6	125 (1192)	125 (1194)
0.9	193 (1846)	191 (1820)
1.2	259 (2473)	253 (2418)
1.8	378 (3611)	378 (3606)

ตารางที่ 3.2 ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของการหมุนวนของการไหล
และความเร็วรอบท่อหมุน (กรณีการไหลในท่อตรง)



กรณี	มุมกวาด (dy) ที่ Wake หมุนไปใน ช่วงความยาว $0.5D$ (degree)
NS03T	16
NS06T	33
NS09T	51
NS12T	68
NS18T	101
NC09T	46
NC18T	103

ตารางที่ 3.3 มุมกวาด (dy) ของ Wake ด้านหลังแผ่นกีดขวางที่หมุนไปในช่วง $0.5D$

กรณี	อัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะทาง X/D หรือ Friction Factor (f) ของการไหล	% Friction Factor ที่เพิ่มขึ้นจากกรณีการไหลแบบไม่หมุนวน	R^2
NS00	0.0236	-	0.998
NS03	0.0241	2	0.998
NS06	0.0247	5	0.998
NS09	0.0264	12	0.999
NS12	0.0270	14	0.999
NS18	0.0340	44	0.998
NS00T	0.0232	-	0.997
NS03T	0.0238	3	0.998
NS06T	0.0251	8	0.998
NS09T	0.0256	10	0.999
NS12T	0.0278	20	0.999
NS18T	0.0321	38	0.997

ตารางที่ 3.4 อัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะ X/D (กรณีการไหลในท่อตรง)

กรณี	ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดด้านทางเข้า ท่อหมุน, \bar{u}_1 (m/s)	ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดด้านทางออก ท่อหมุน, \bar{u}_2 (m/s)	ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดด้านทางเข้า Orifice, \bar{u} (m/s)
NC00	7.9	7.9	8.0
NC09	8.0	7.7	8.0
NC18	7.8	7.8	8.0
NC00T	8.0	8.2	8.0
NC09T	8.0	7.5	8.0
NC18T	7.9	7.9	8.0

ตารางที่ 3.5 ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัด (กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง)

กรณี	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณจากรูปร่าง ความเร็วตามแนวสัมผัส rad/s (RPM)	ความเร็วเชิงมุมท่อหมุน rad/s (RPM)
NC09	172 (1643)	190 (1812)
NC09T	174 (1657)	190 (1817)
NC18	398 (3801)	378 (3614)
NC18T	389 (3710)	378 (3612)

ตารางที่ 3.6 ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของการหมุนวนของการไหล
และความเร็วรอบท่อหมุน (กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง)

กรณี	อัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะทาง S/D หรือ Friction Factor (f)	% Friction Factor ที่ เพิ่มขึ้นจากกรณีการไหล แบบไม่หมุนวน	R ²
NC00	0.0234	-	0.998
NC09	0.0257	10	0.998
NC18	0.0282	20	0.999
NC00T	0.0231	-	0.998
NC09T	0.0231	0	0.998
NC18T	0.0224	-3	0.999

ตารางที่ 3.7 อัตราการลดลงของ $\overline{C_{Pref}}$ ต่อระยะ S/D (กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง)

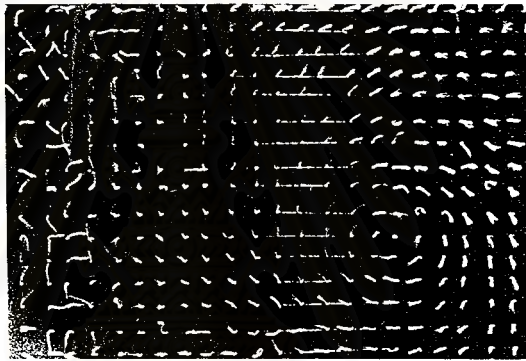


ประมวลรูปภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

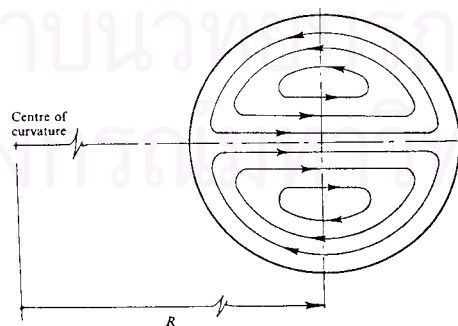


(ก)

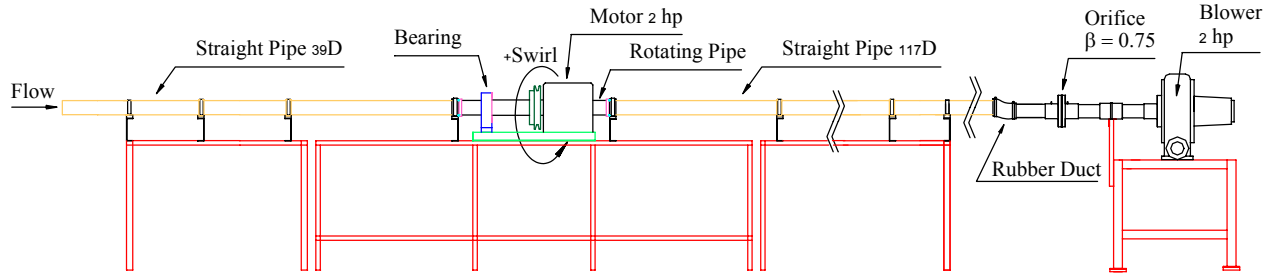


(ข)

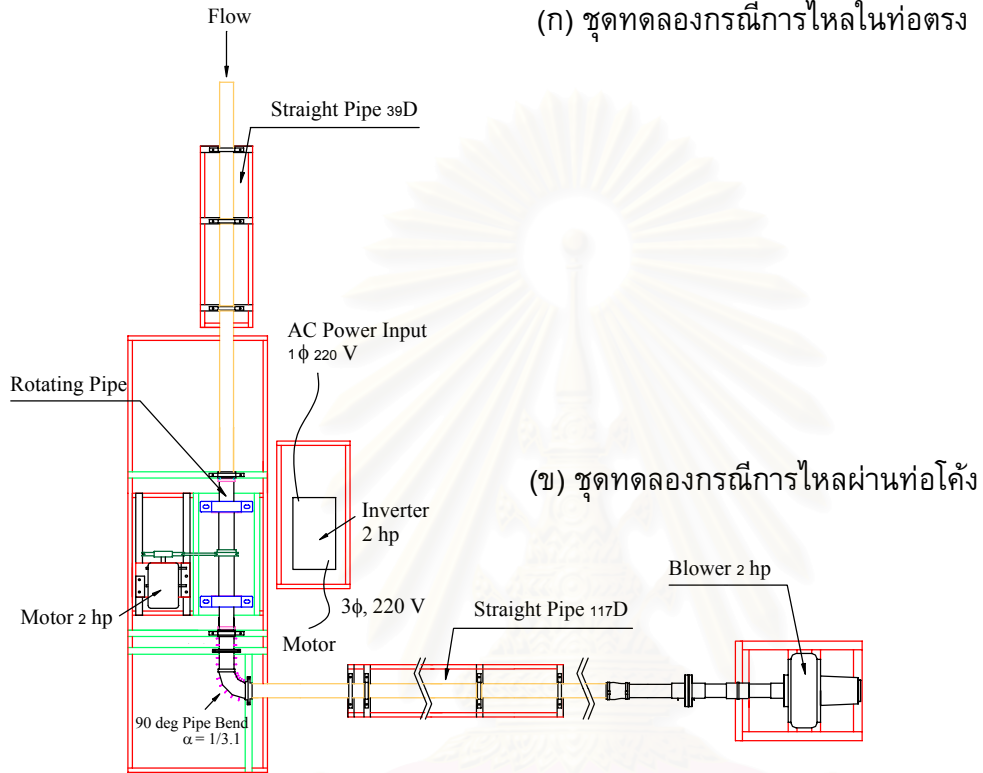
รูปที่ 1.1 ภาพ Flow Visualization ของการไหลที่ทางออกของ Blower
(ก) Smoke Technique และ (ข) Tuft Technique (Mehta 1977)



รูปที่ 1.2 Secondary Flow ที่เกิดขึ้นภายในท่อโค้ง (Patankar et al. 1975)

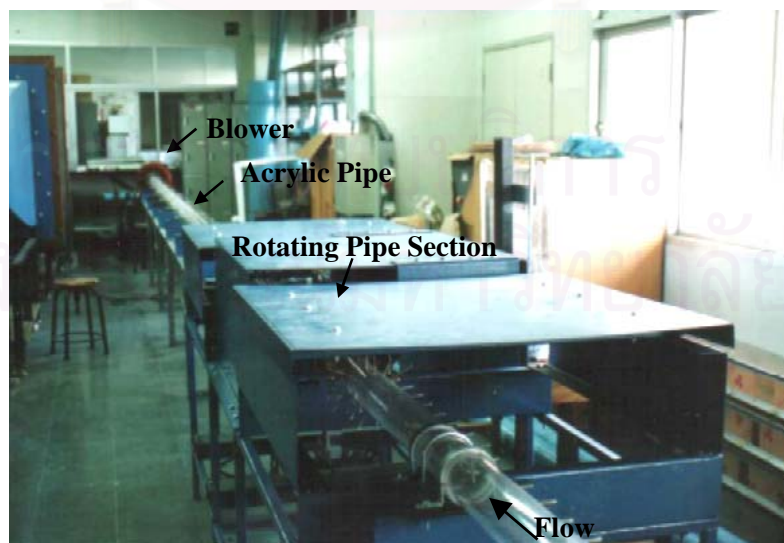


(ก) ชุดทดลองกรณีการไหลในท่อตรง

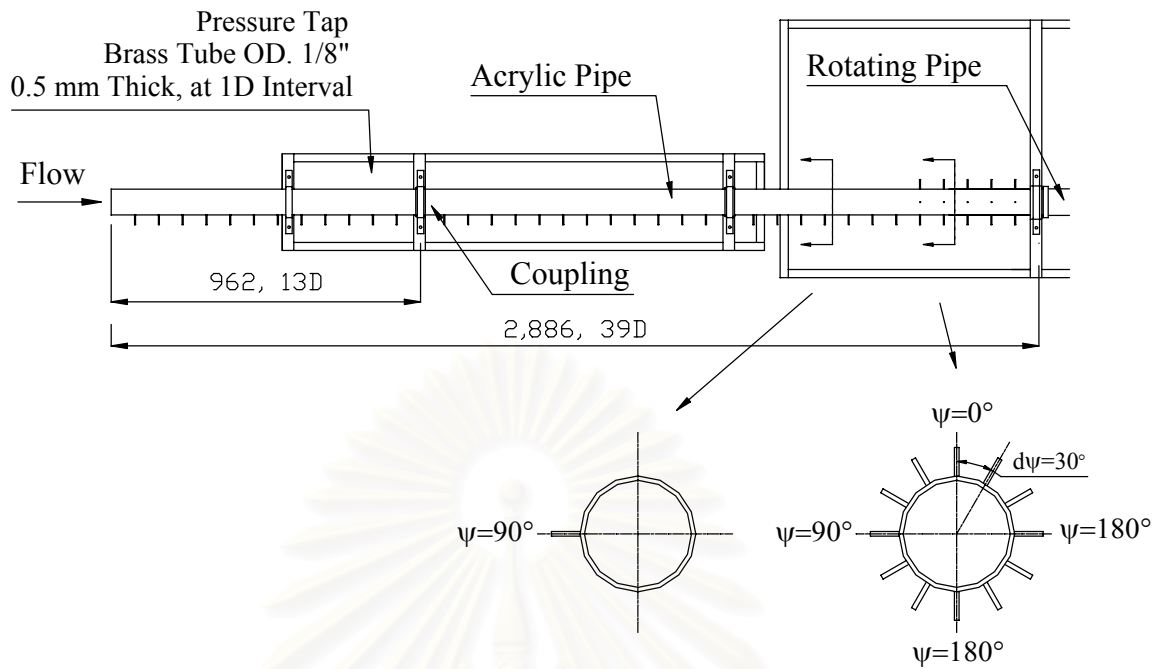


(ข) ชุดทดลองกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง

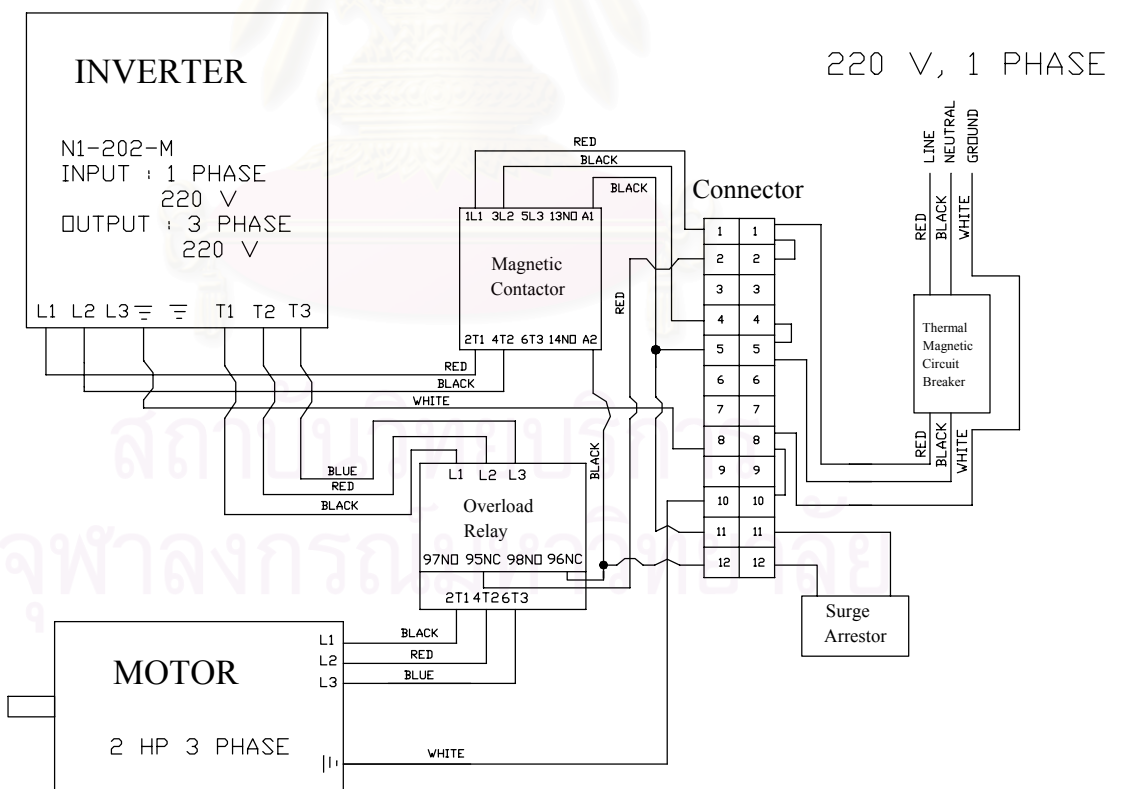
รูปที่ 2.1 Schematic Drawing ของชุดทดลอง



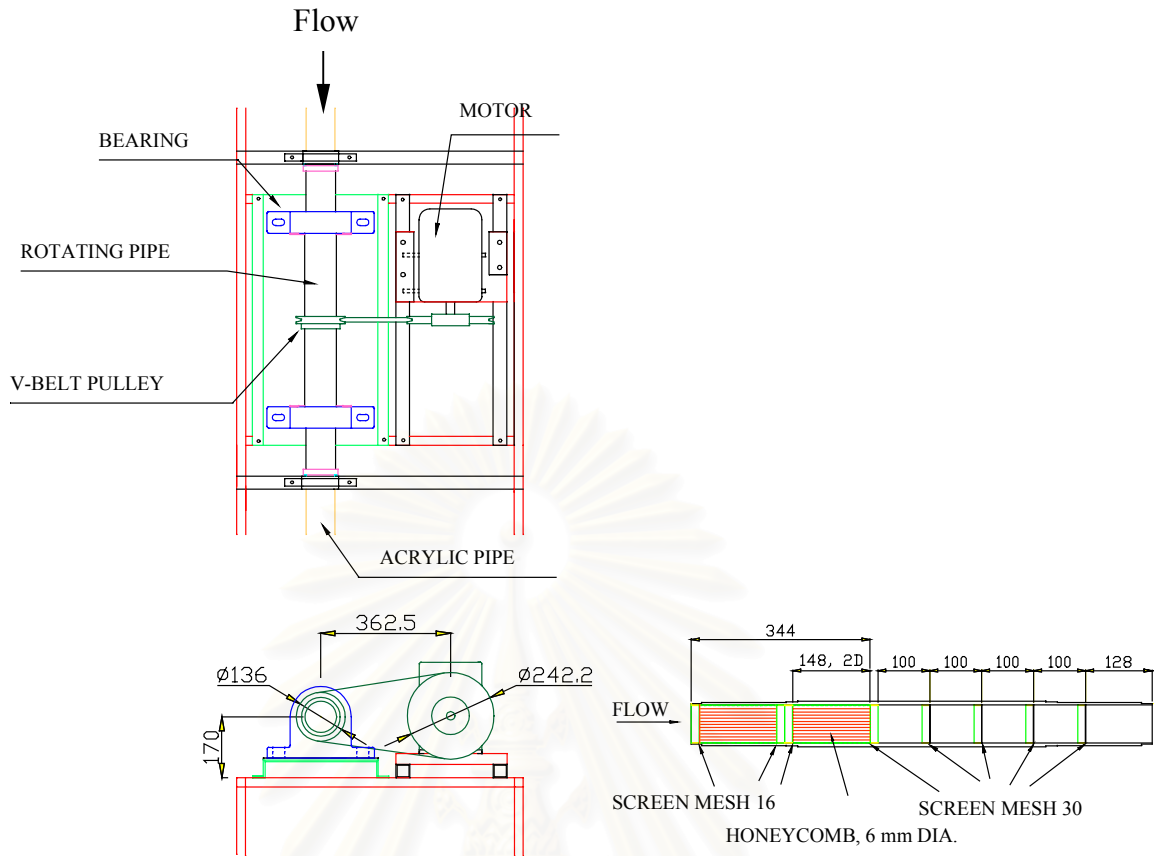
รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายชุดทดลอง กรณีการไหลในท่อตรง



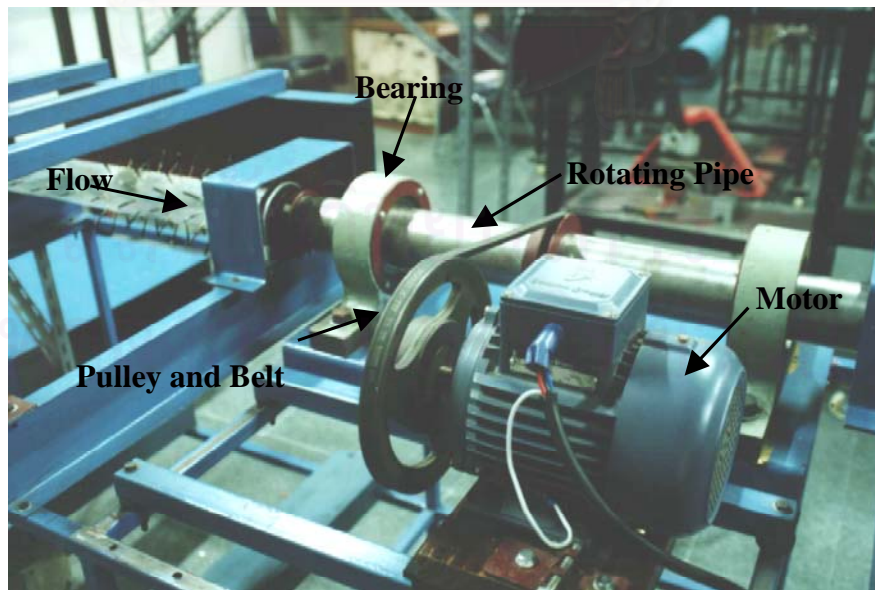
รูปที่ 2.3 รายละเอียดท่ออะคริลิกช่วงทางเข้าท่อหมุน



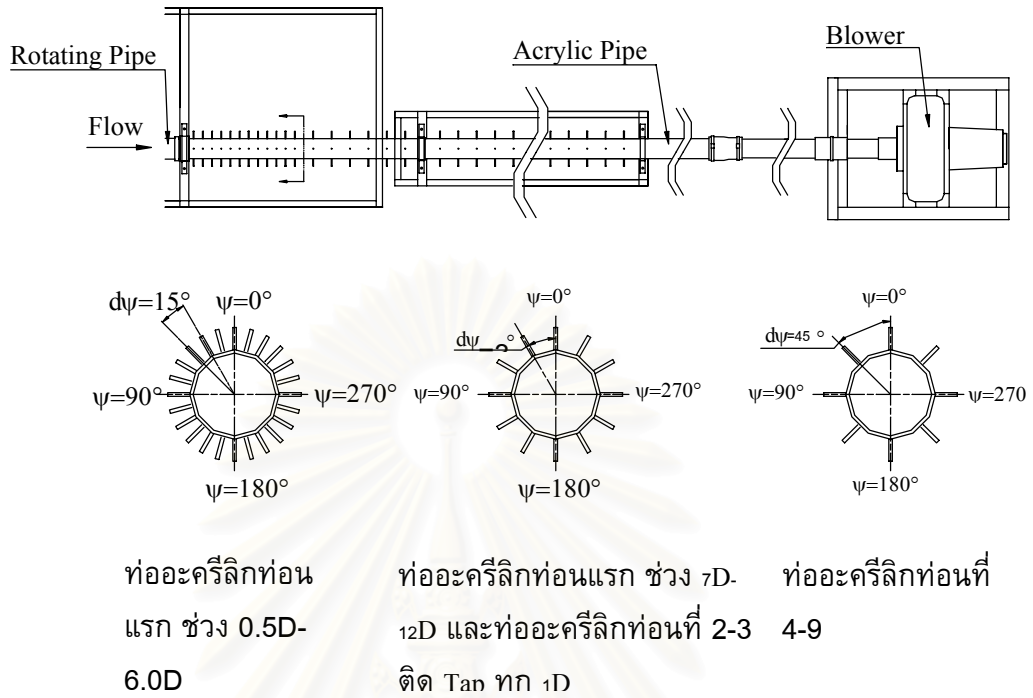
รูปที่ 2.4 รายละเอียดการต่อมอเตอร์ และ Inverter



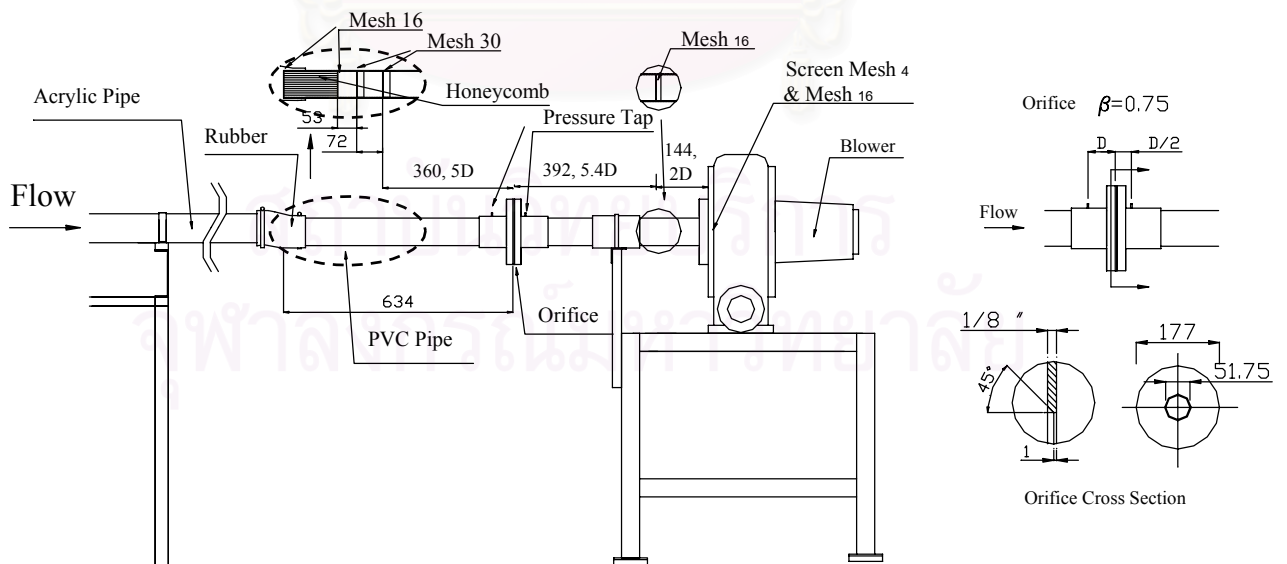
รูปที่ 2.5 รายละเอียดชุดท่อหมุน



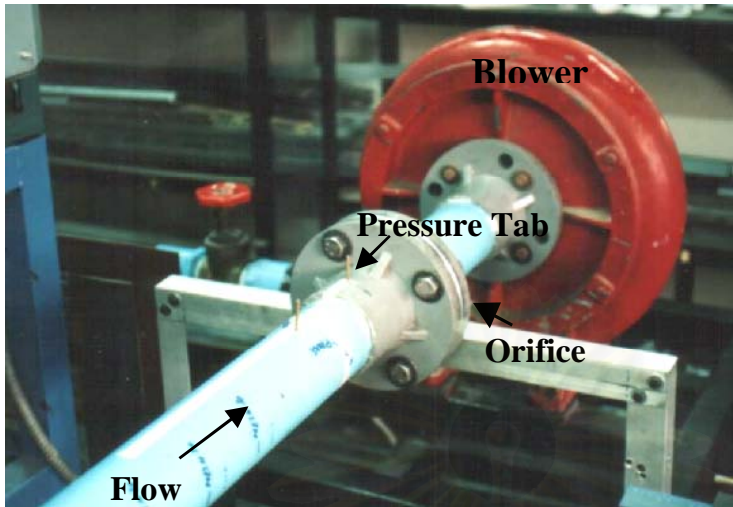
รูปที่ 2.6 ชุดท่อหมุนและระบบขับเคลื่อนด้วยสายพาน



รูปที่ 2.7 ท่ออะครีลิกด้านทางออกท่อหมุน และรายละเอียดการติดตั้ง Pressure Tap

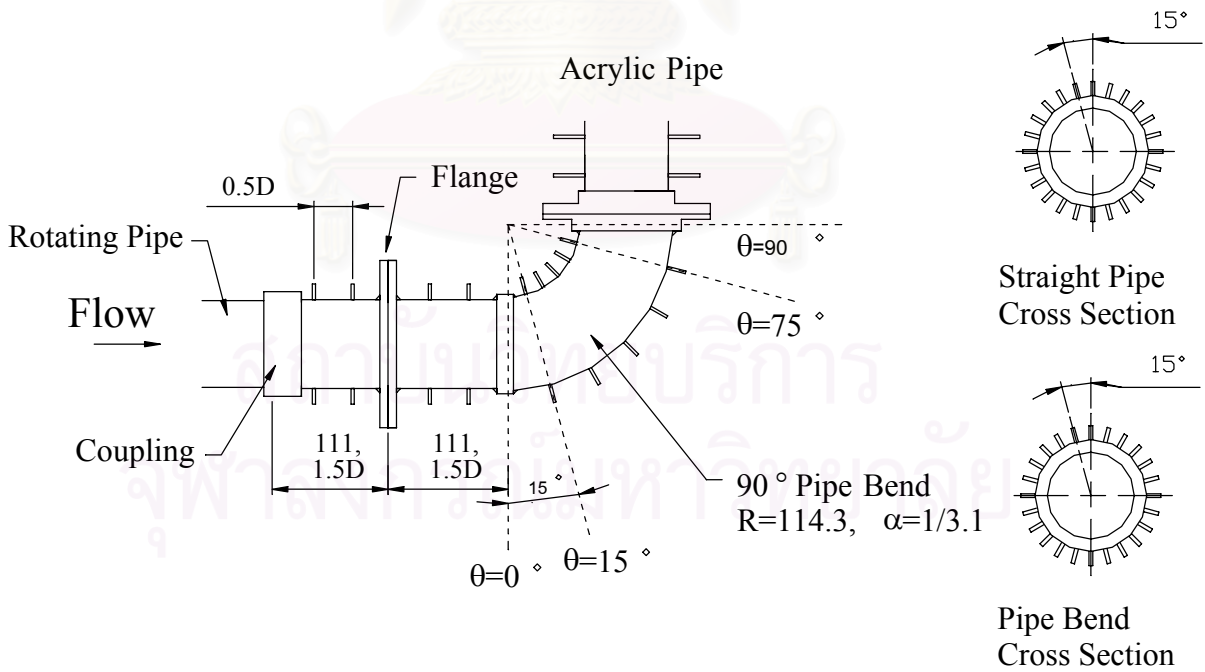


รูปที่ 2.8 ชุด Orifice และ Blower

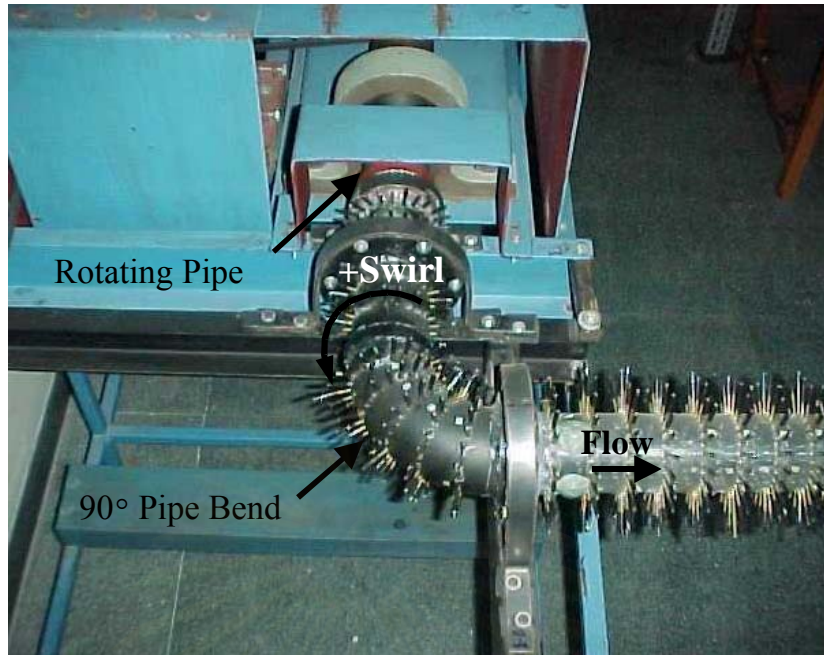


$\beta = 0.75$, Aluminium
1/8" Thick

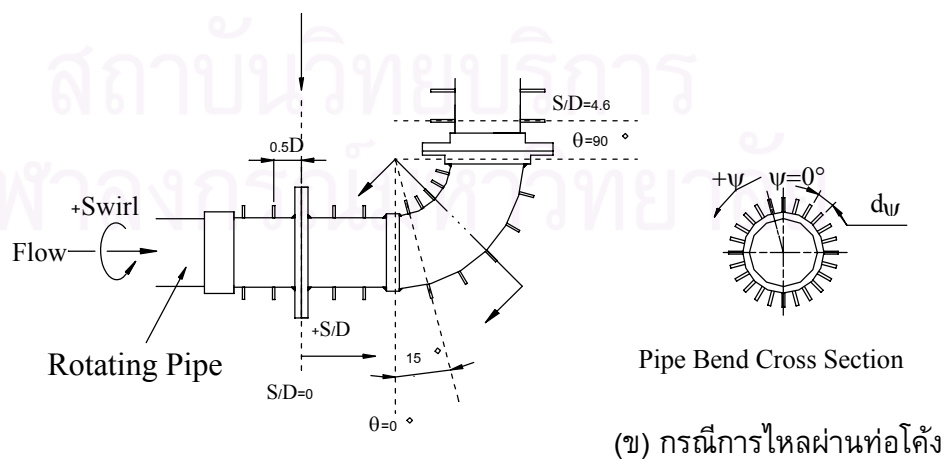
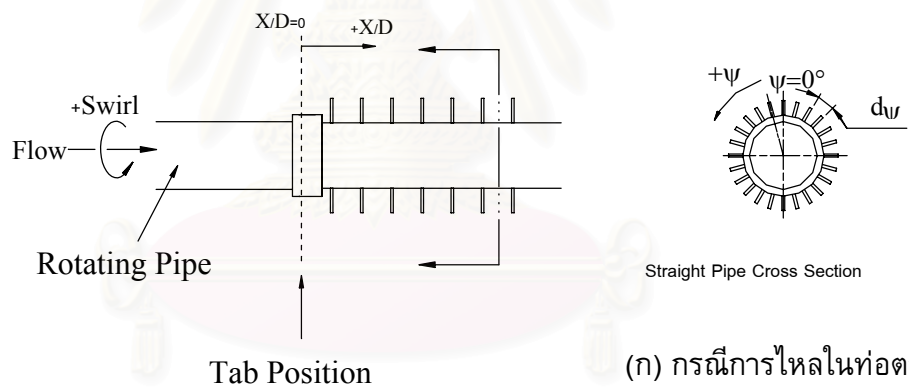
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายชุดทดลองช่วง Orifice และ Blower



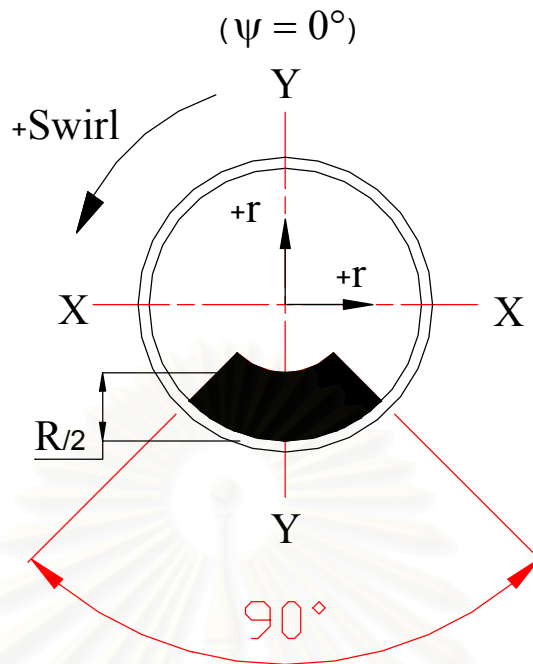
รูปที่ 2.10 ชุดท่อโค้ง 90 องศา



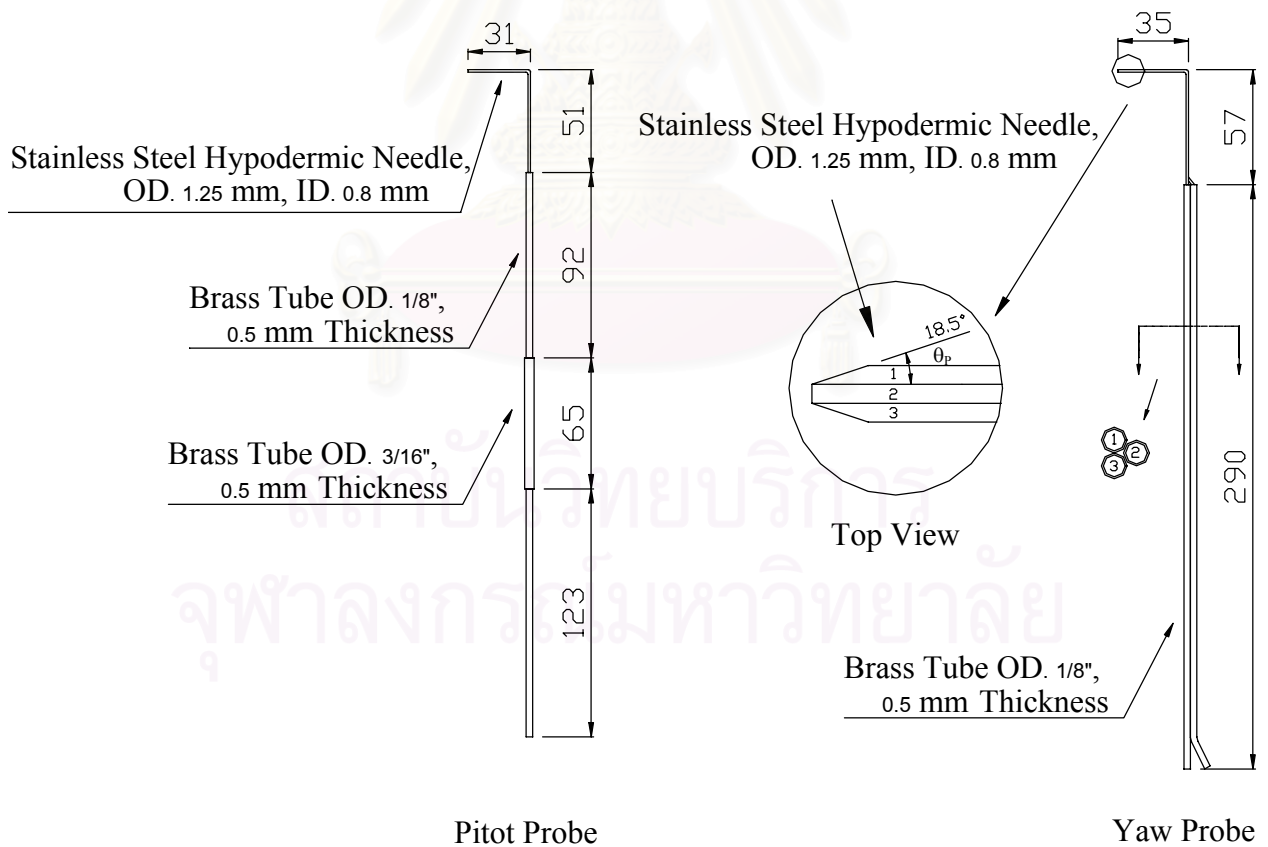
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายชุดท่อโค้ง 90 องศา



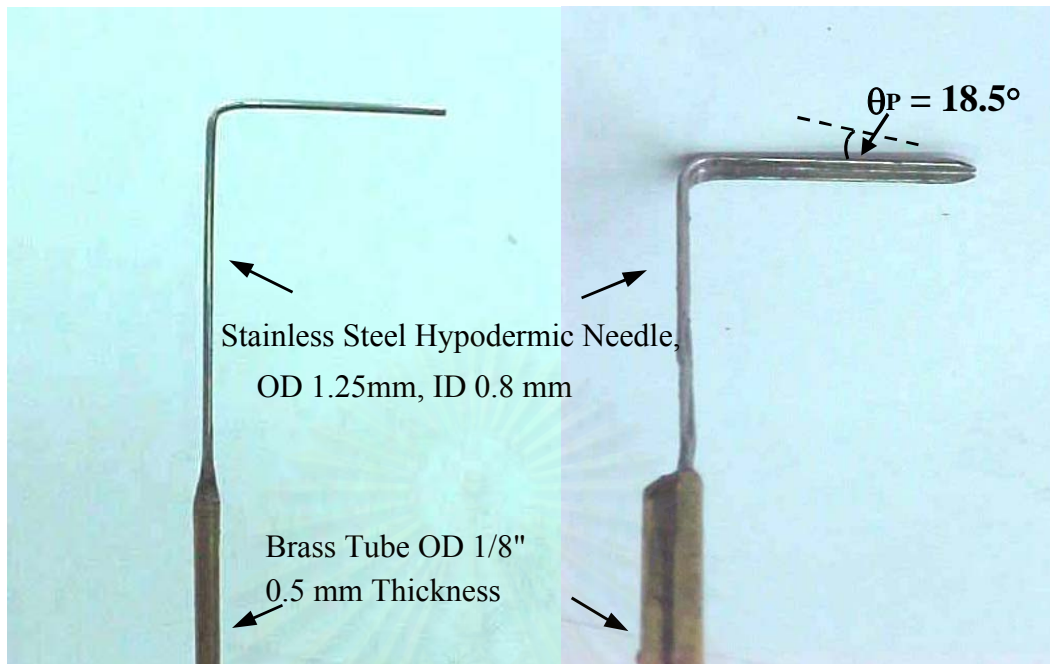
รูปที่ 2.12 พิกัดการทดลอง กรณีการไหลในท่อตรงและการไหลผ่านท่อโค้ง



รูปที่ 2.13 แผ่นกีดขวาง (Tab) และระบบแกนพิกัดที่ใช้



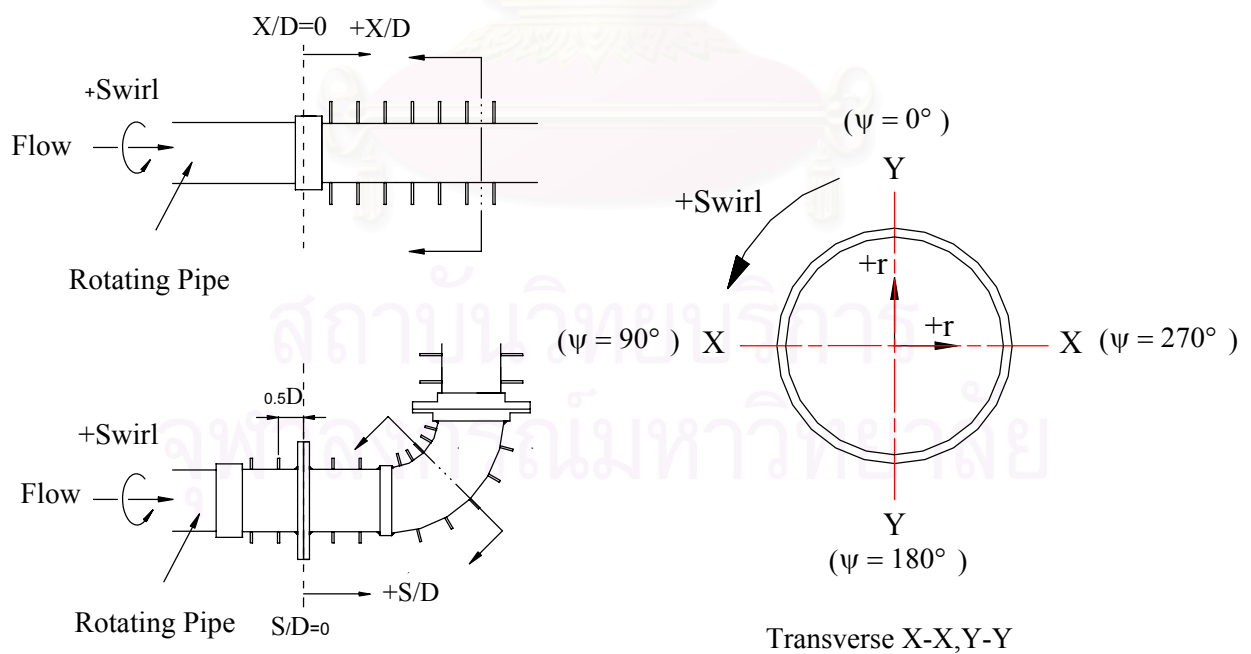
รูปที่ 2.14 รายละเอียด Pitot Probe และ Yaw Probe



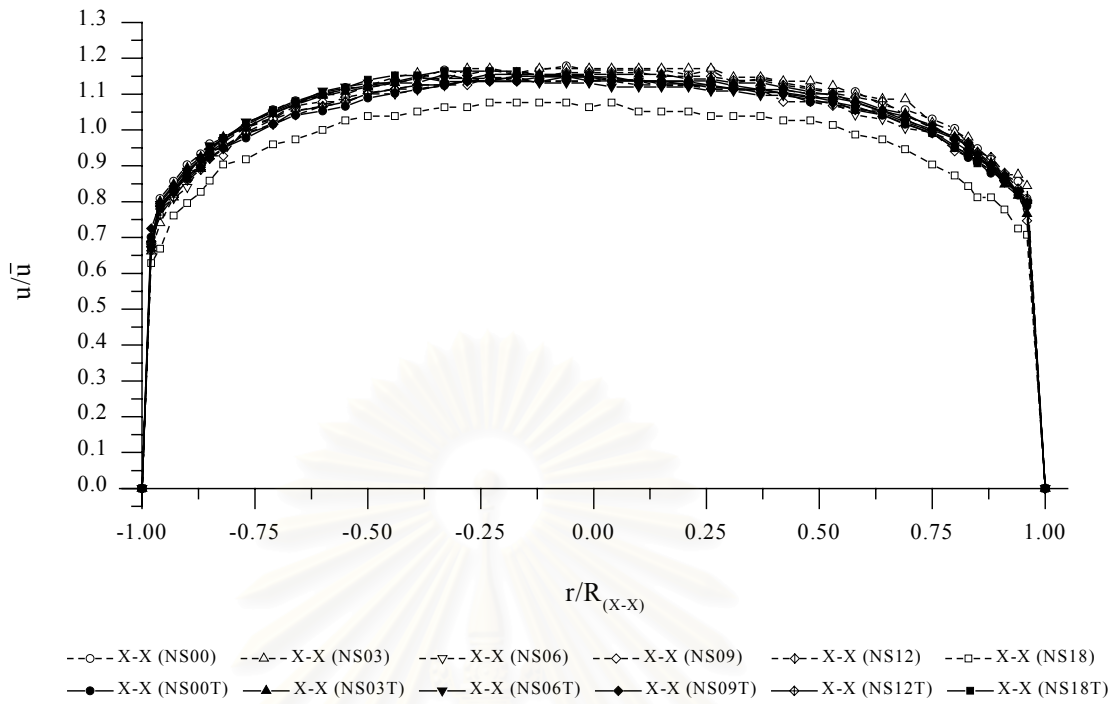
Pitot Probe

Yaw Probe

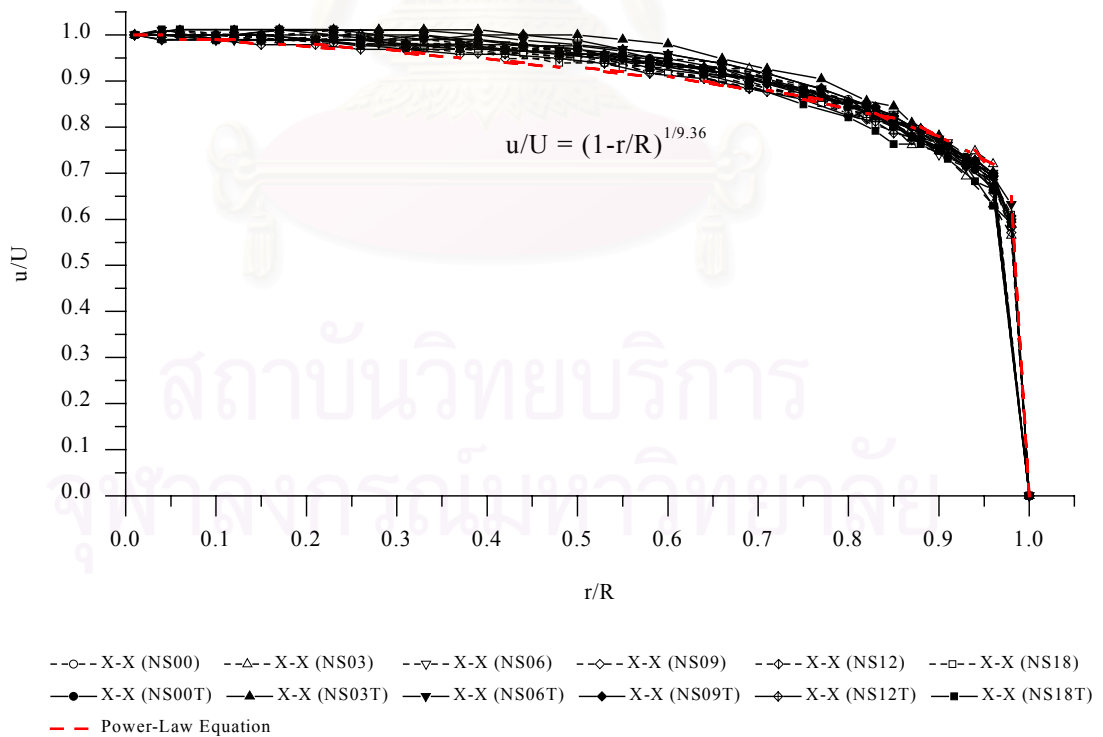
รูปที่ 2.15 ภาพถ่าย Pitot Probe และ Yaw Probe ที่ใช้ในการทดลอง



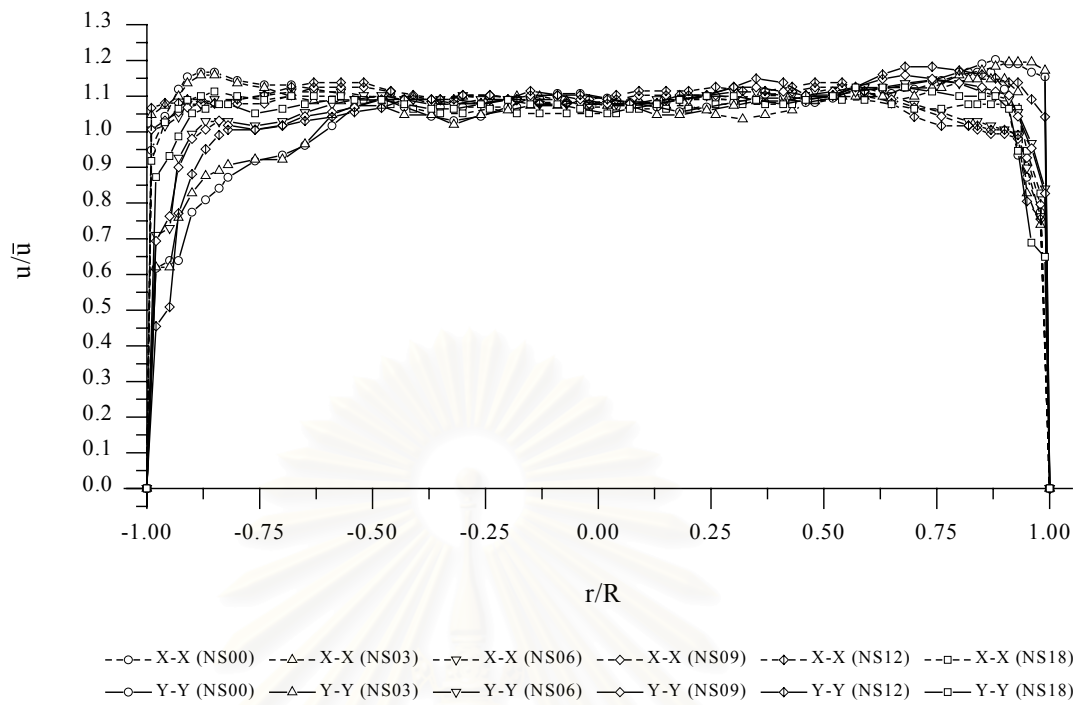
รูปที่ 2.16 พิกัดการวัดความเร็ว และความดันรวมในแนว X-X และ Y-Y



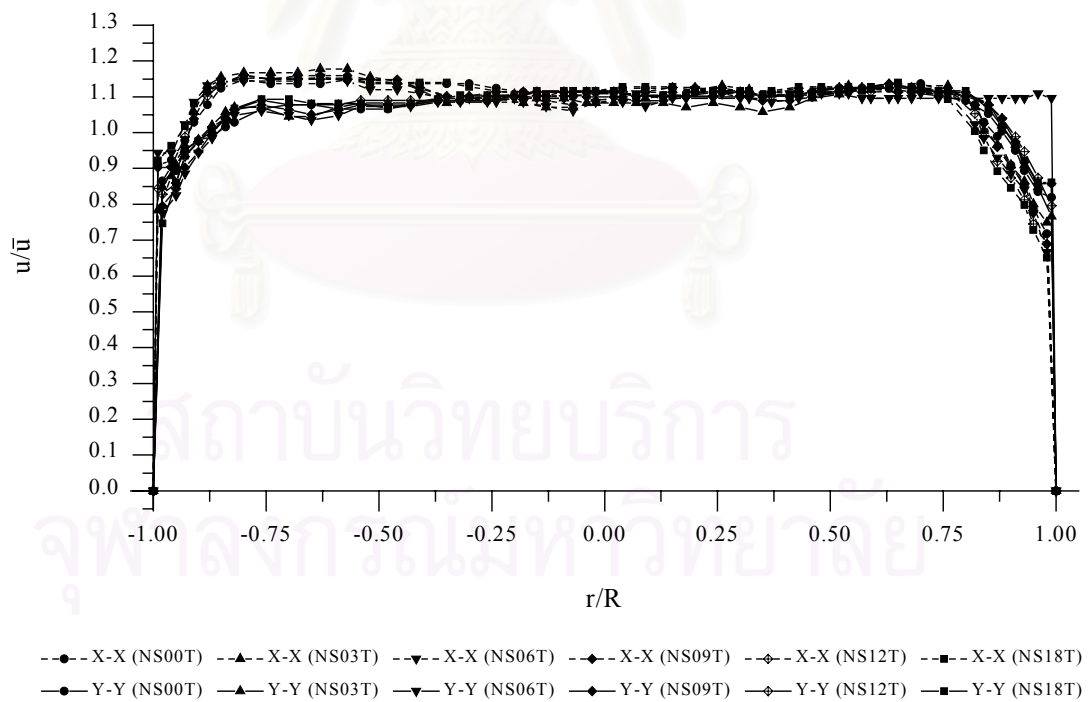
รูปที่ 3.1 รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน หน้าตัด ($X/D = -31$)



รูปที่ 3.2 รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน ($X/D = -31$)
เมื่อ Normalized ด้วยความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางท่อ

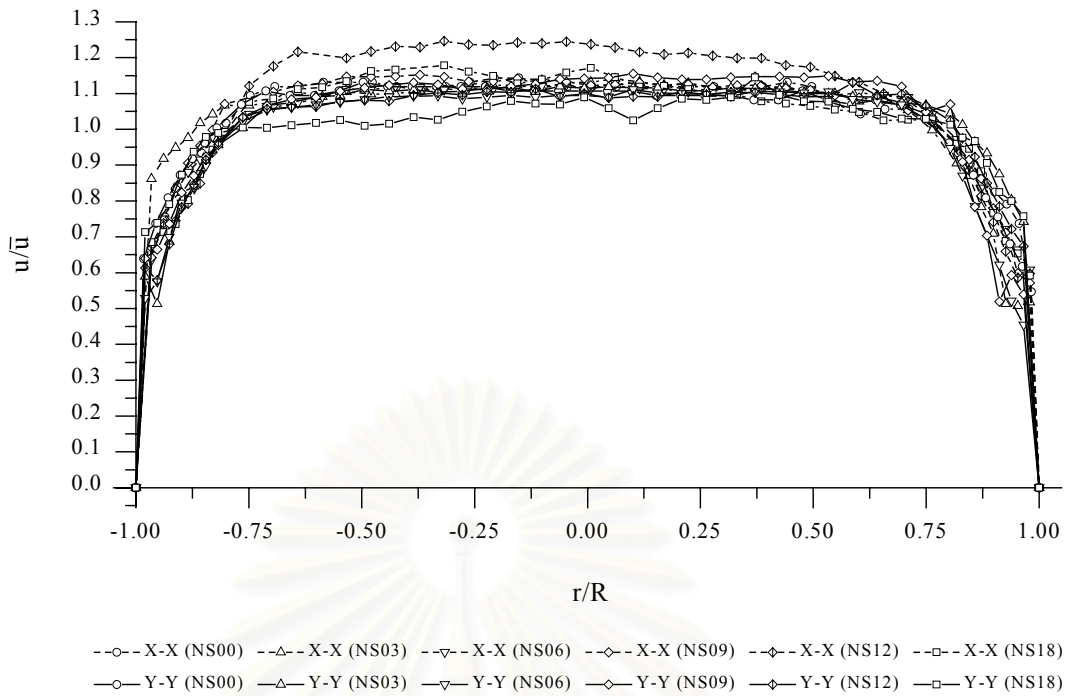


3.3 (ก)

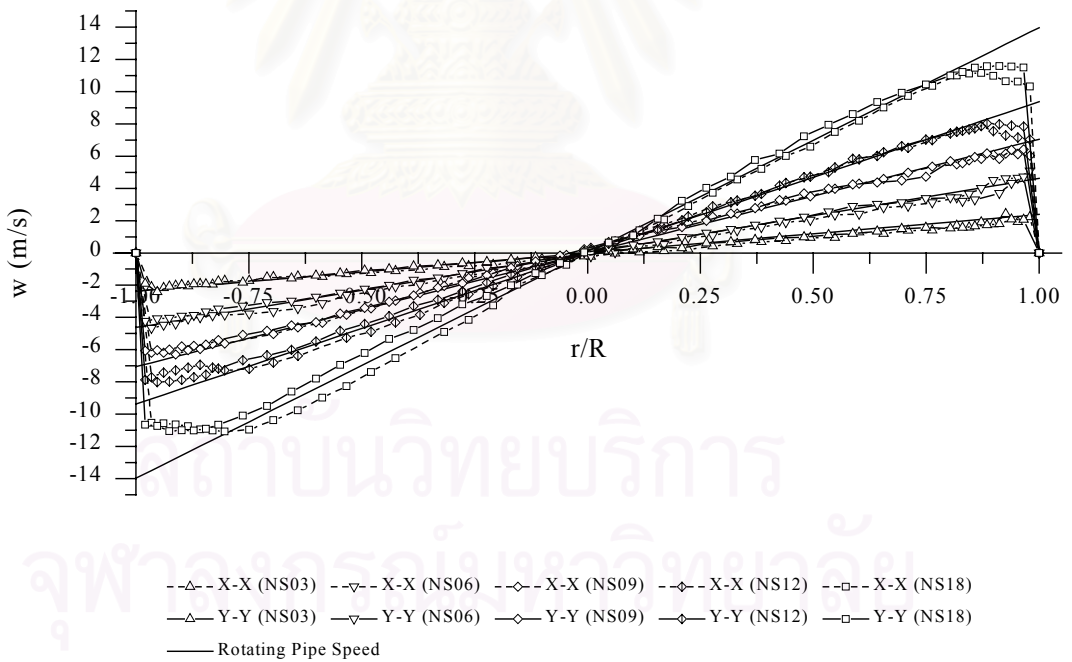


3.3 (ข)

รูปที่ 3.3 รูปร่างความเร็วด้านทางเข้า Orifice
 (ก) กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง (ข) กรณีติดแผ่นกีดขวาง



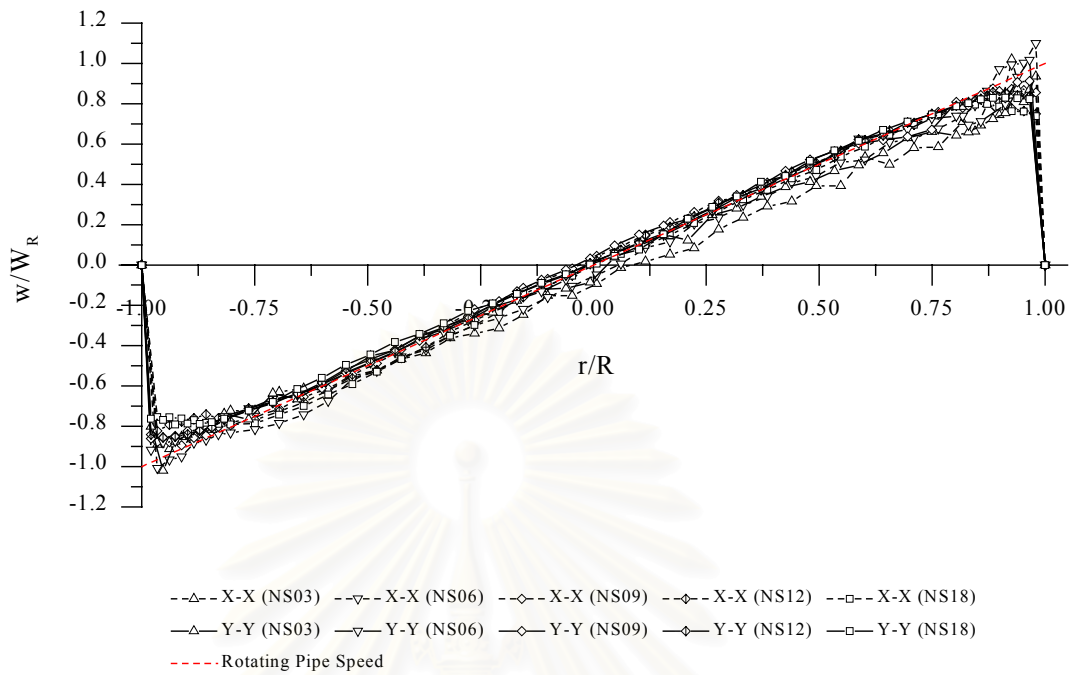
3.4 (ก)



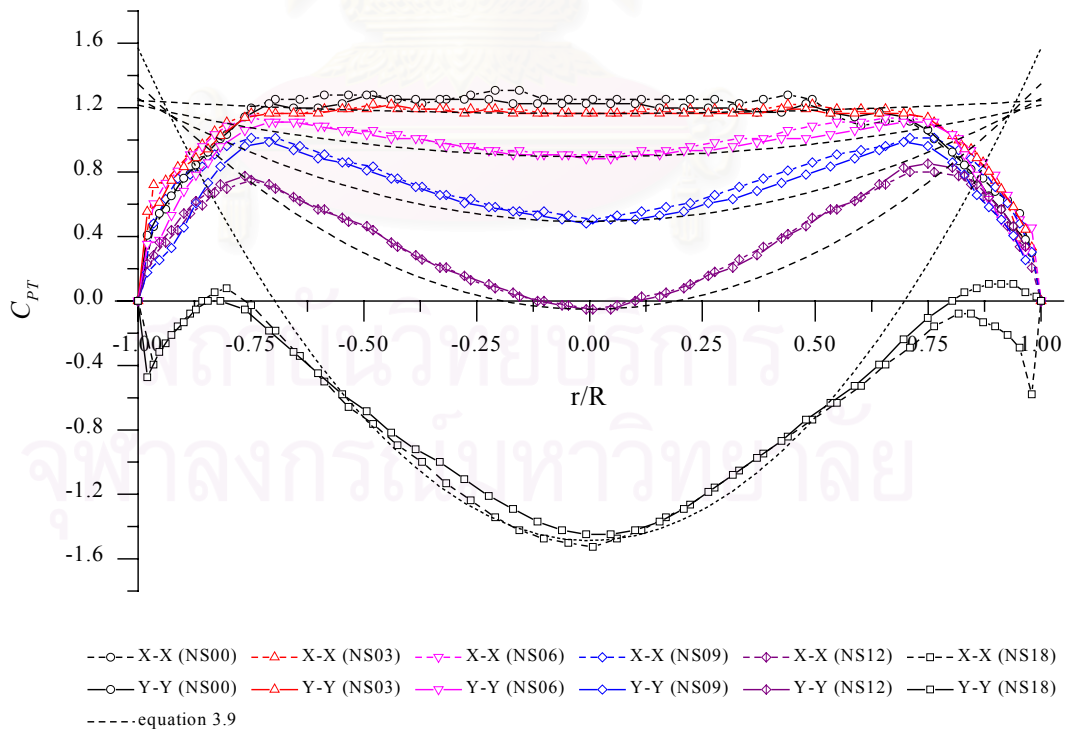
3.4 (ข)

รูปที่ 3.4 รูปร่างความเร็วด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$)

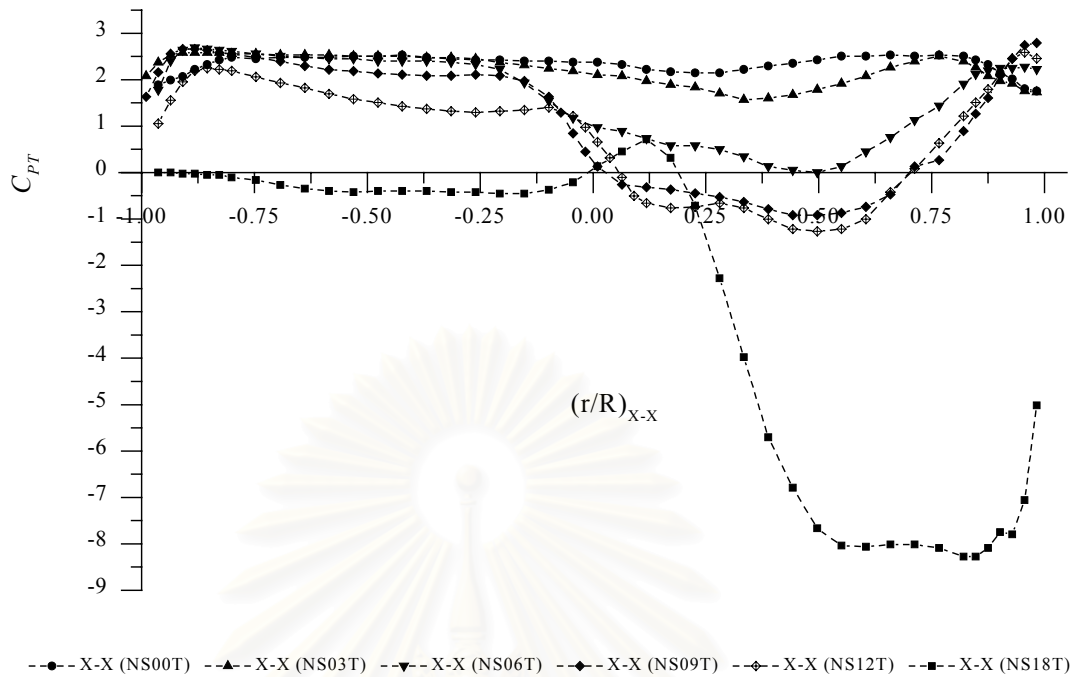
(ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส



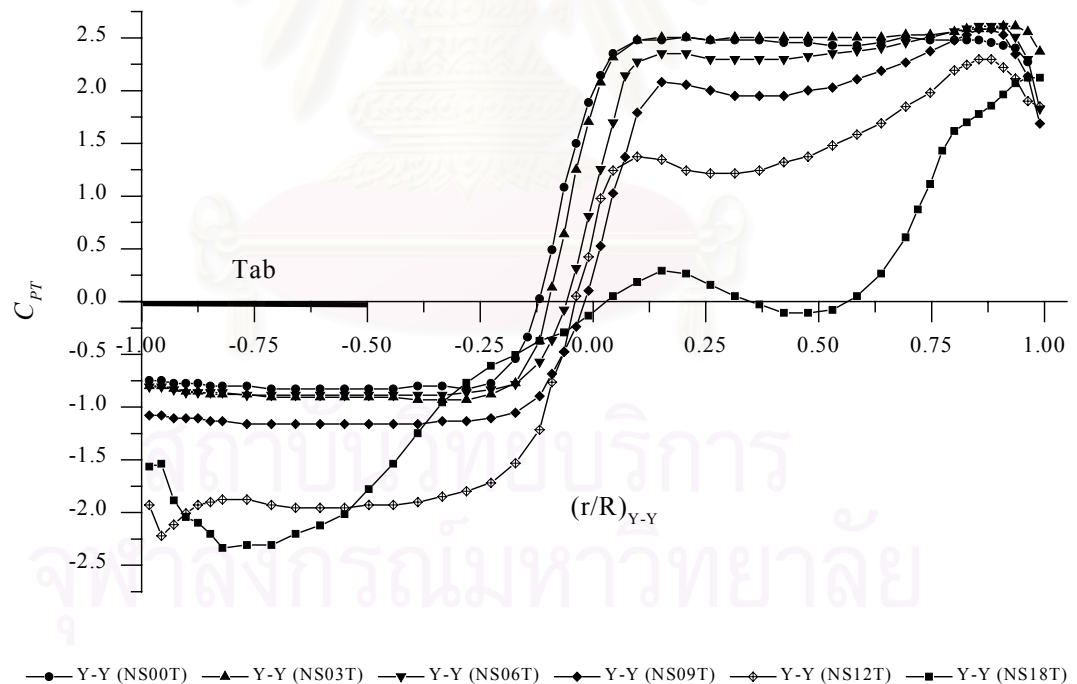
รูปที่ 3.5 รูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$) เมื่อ Normalized ด้วยความเร็วผิวสัมผัสท่อหมุน



รูปที่ 3.6 สัมประสิทธิ์ความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$) กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง

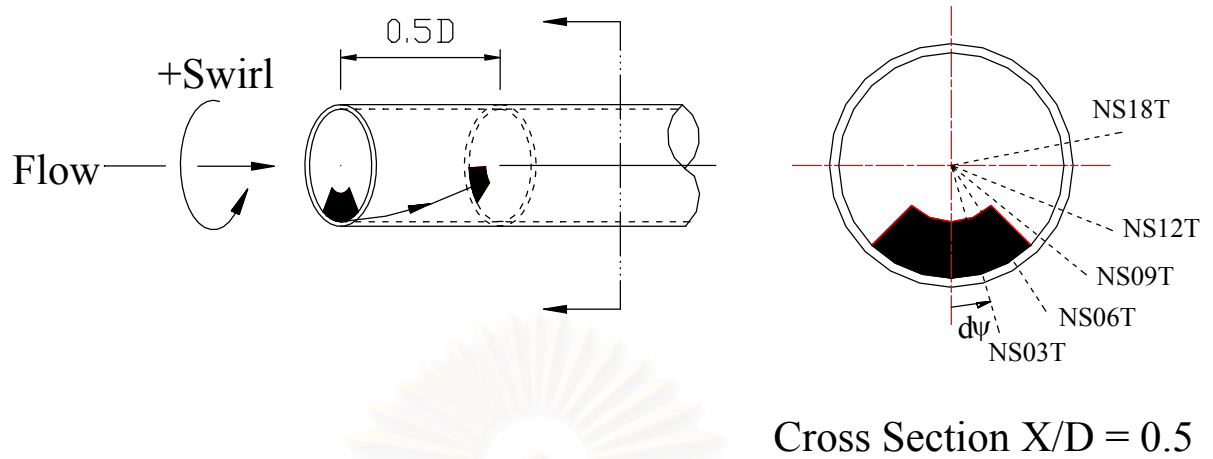


3.7 (ก)



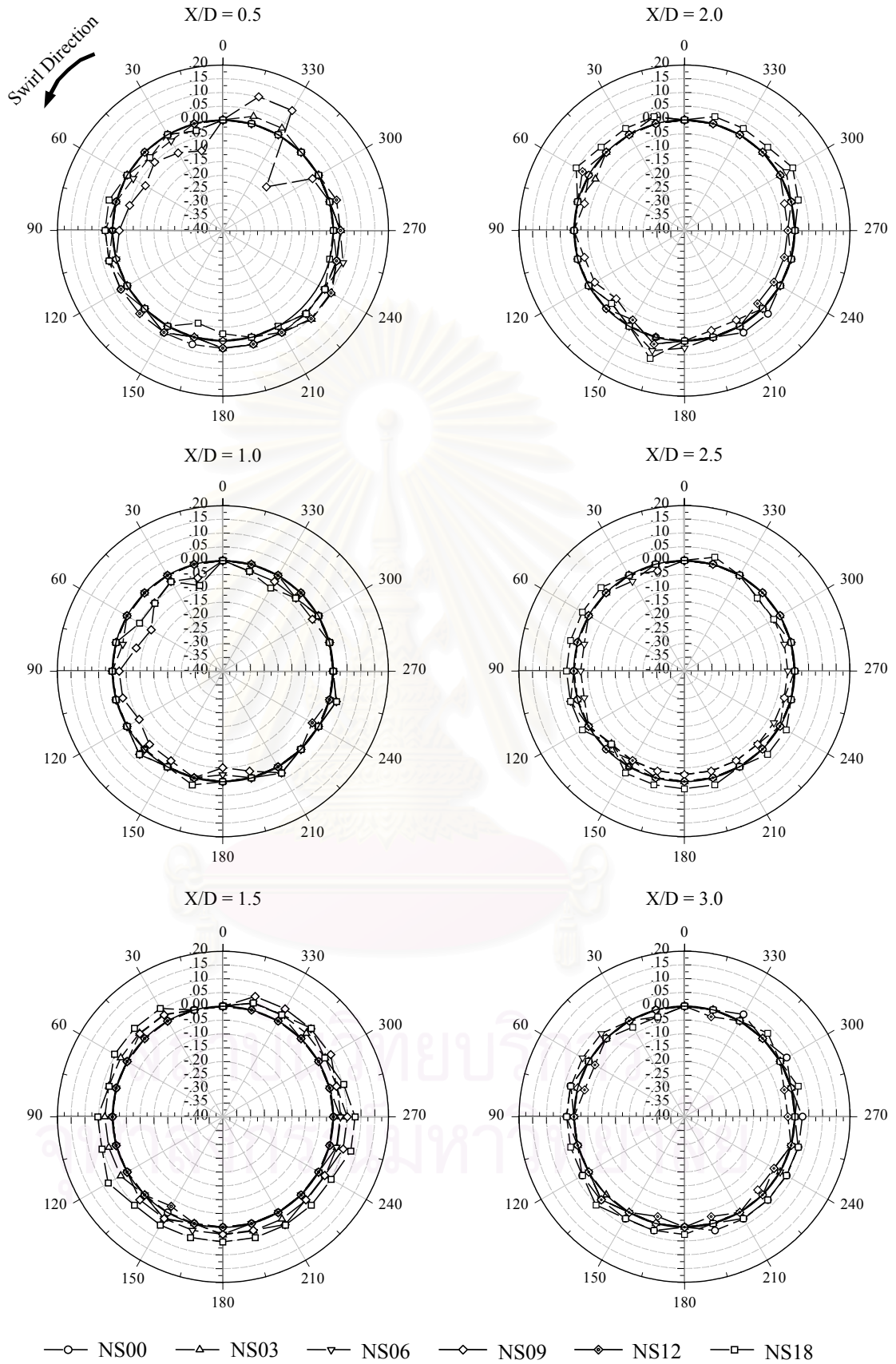
3.7 (ข)

รูปที่ 3.7 สัมประสิทธิ์ความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน ($X/D = 0.5$) กรณีติดตั้งแผ่นกีดขวาง
 (ก) แนววัด X-X (ข) แนววัด Y-Y

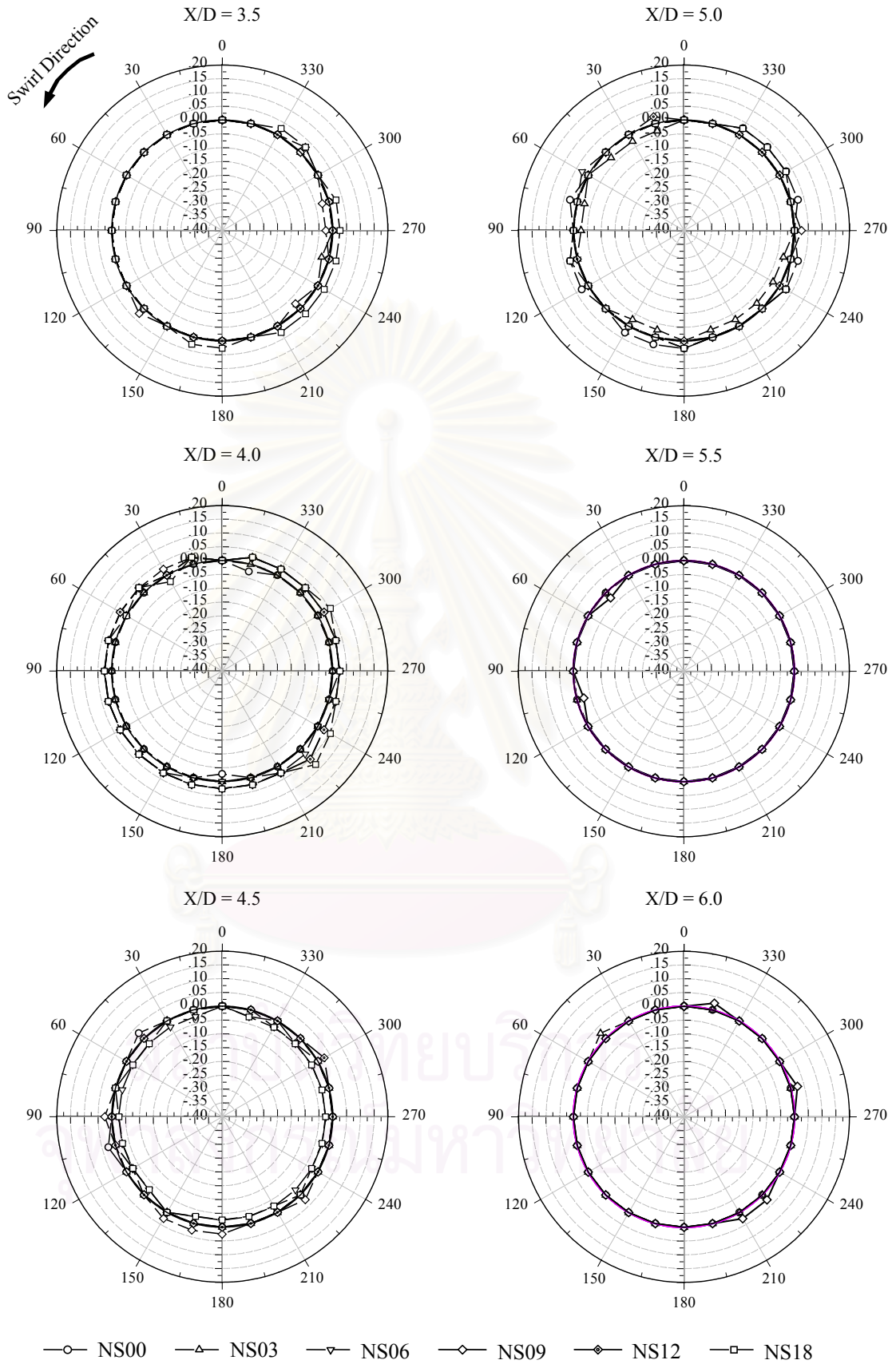


รูปที่ 3.8 รูปแสดงการหมุนวนไปของ Wake ด้านหลังแผ่นกีดขวาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

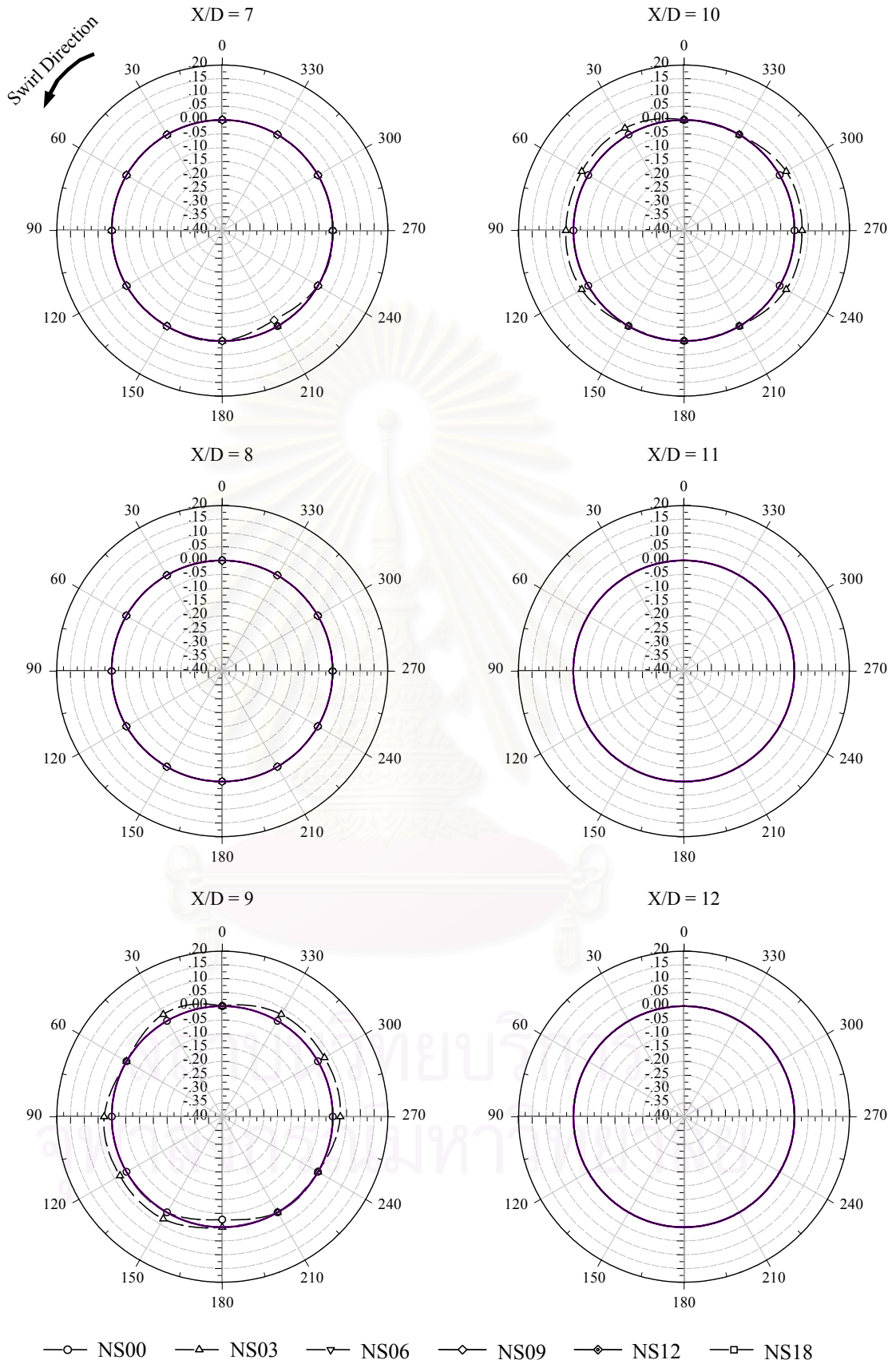


รูปที่ 3.9 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง)



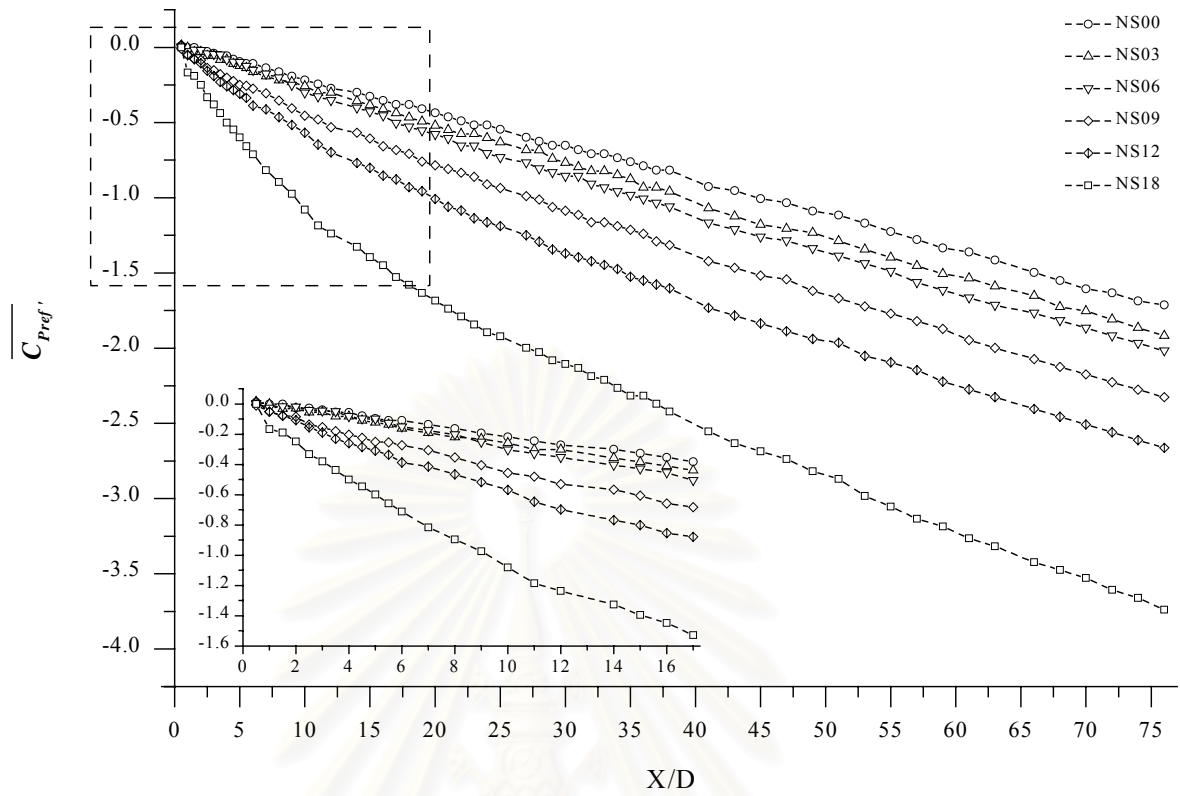
รูปที่ 3.9 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)

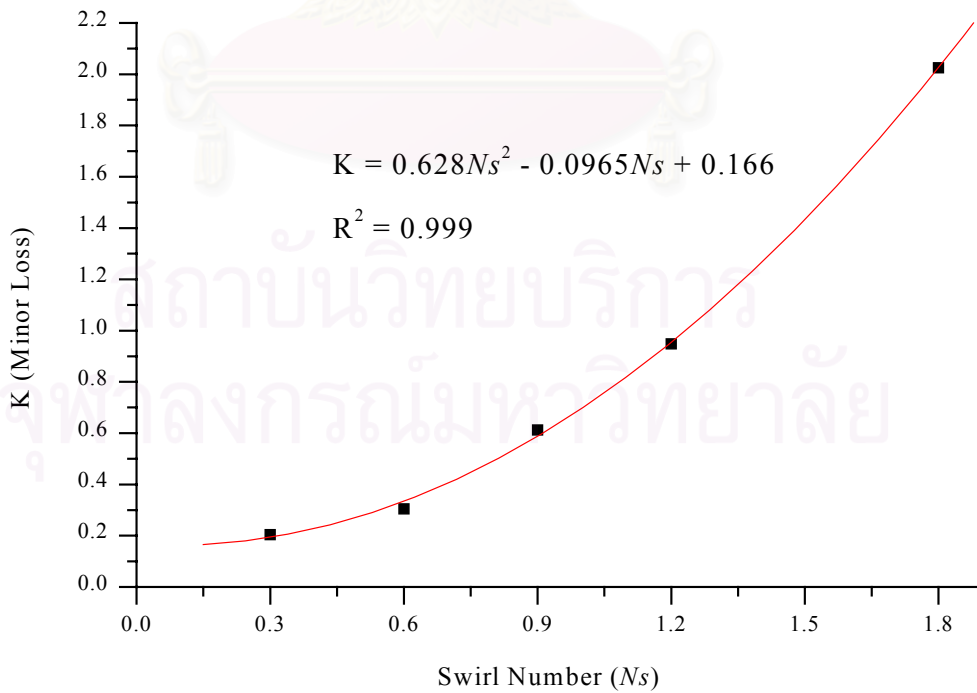


รูปที่ 3.9 (ต่อ)

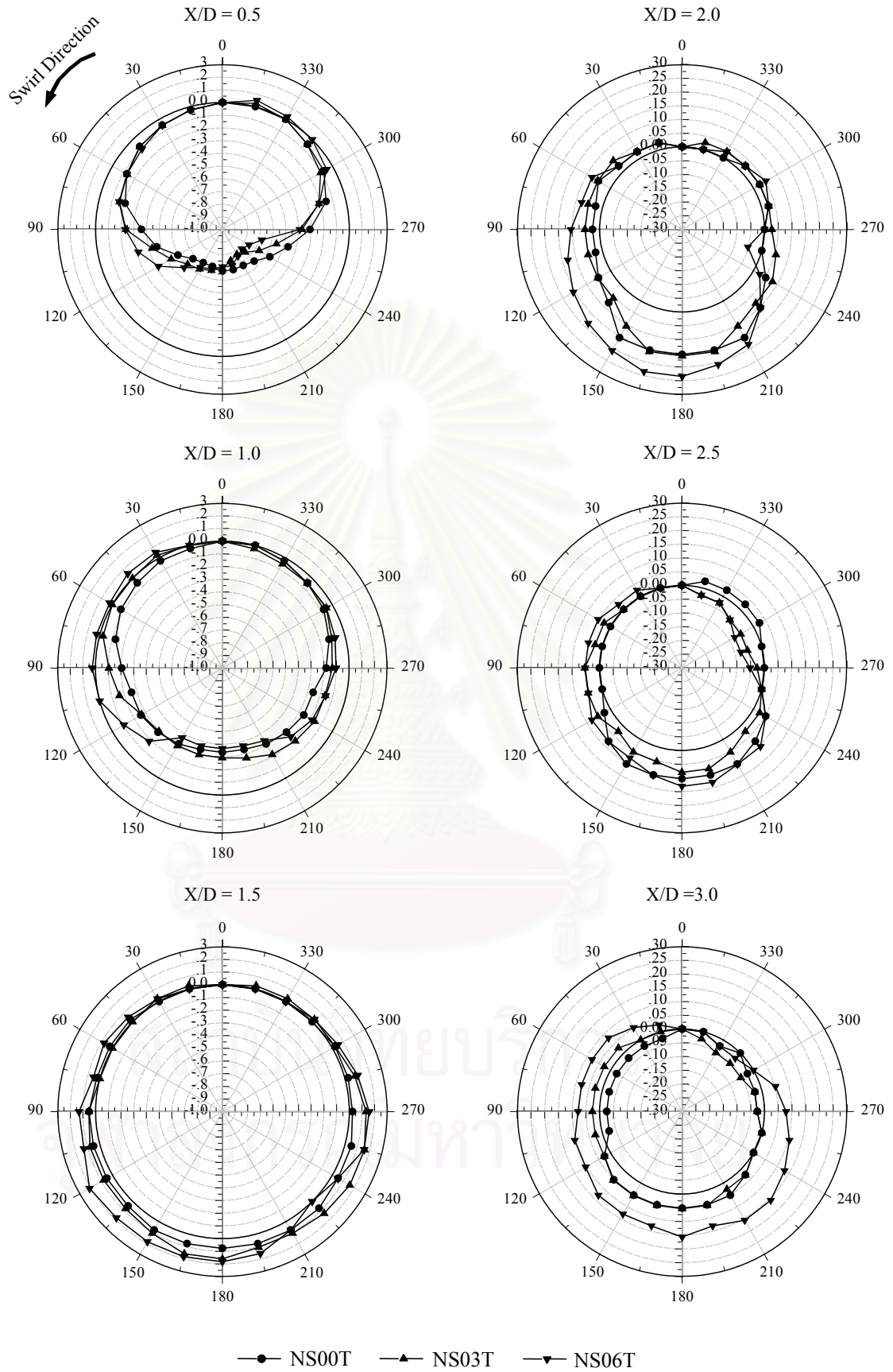
(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



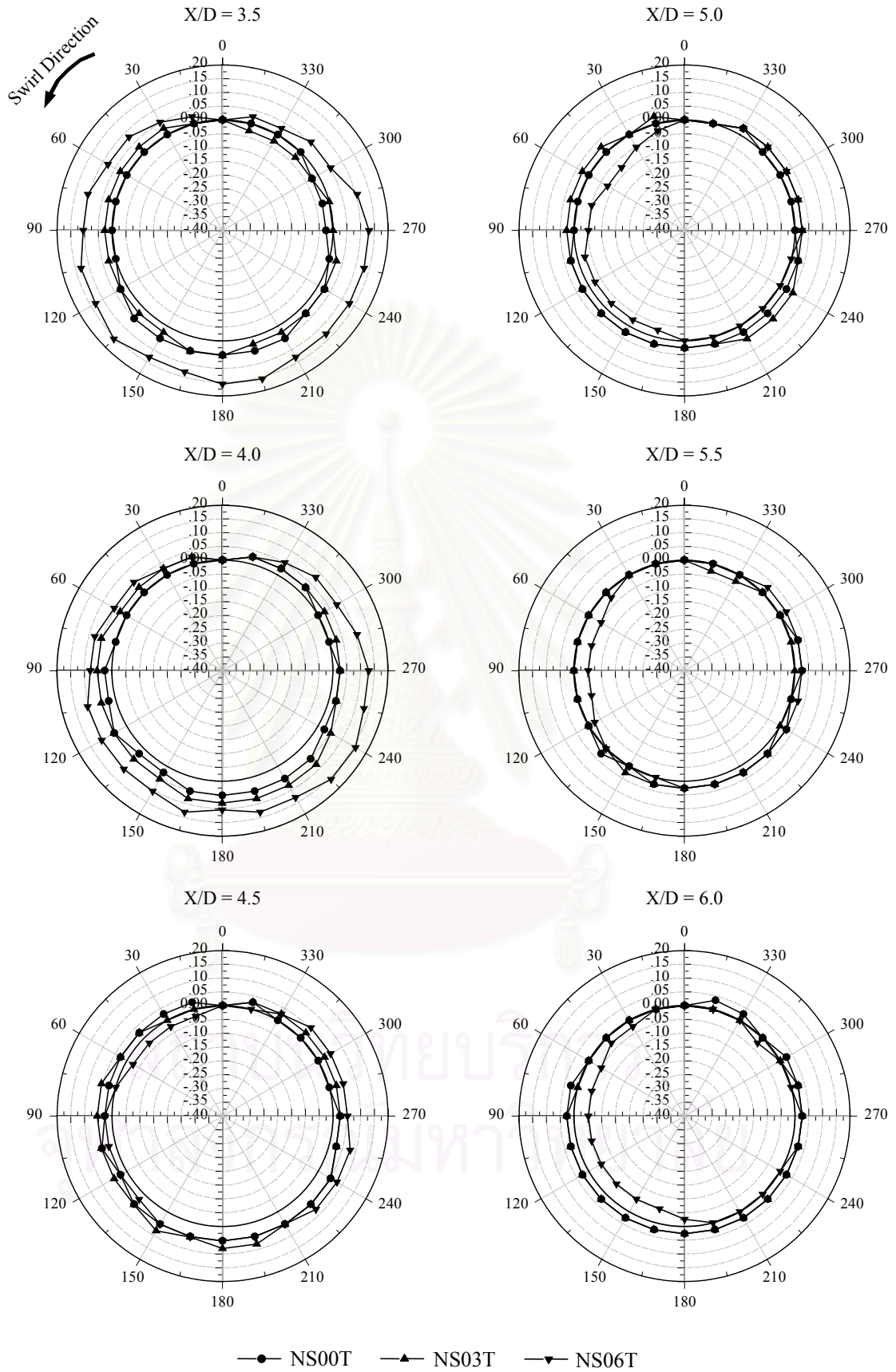
รูปที่ 3.10 การกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล



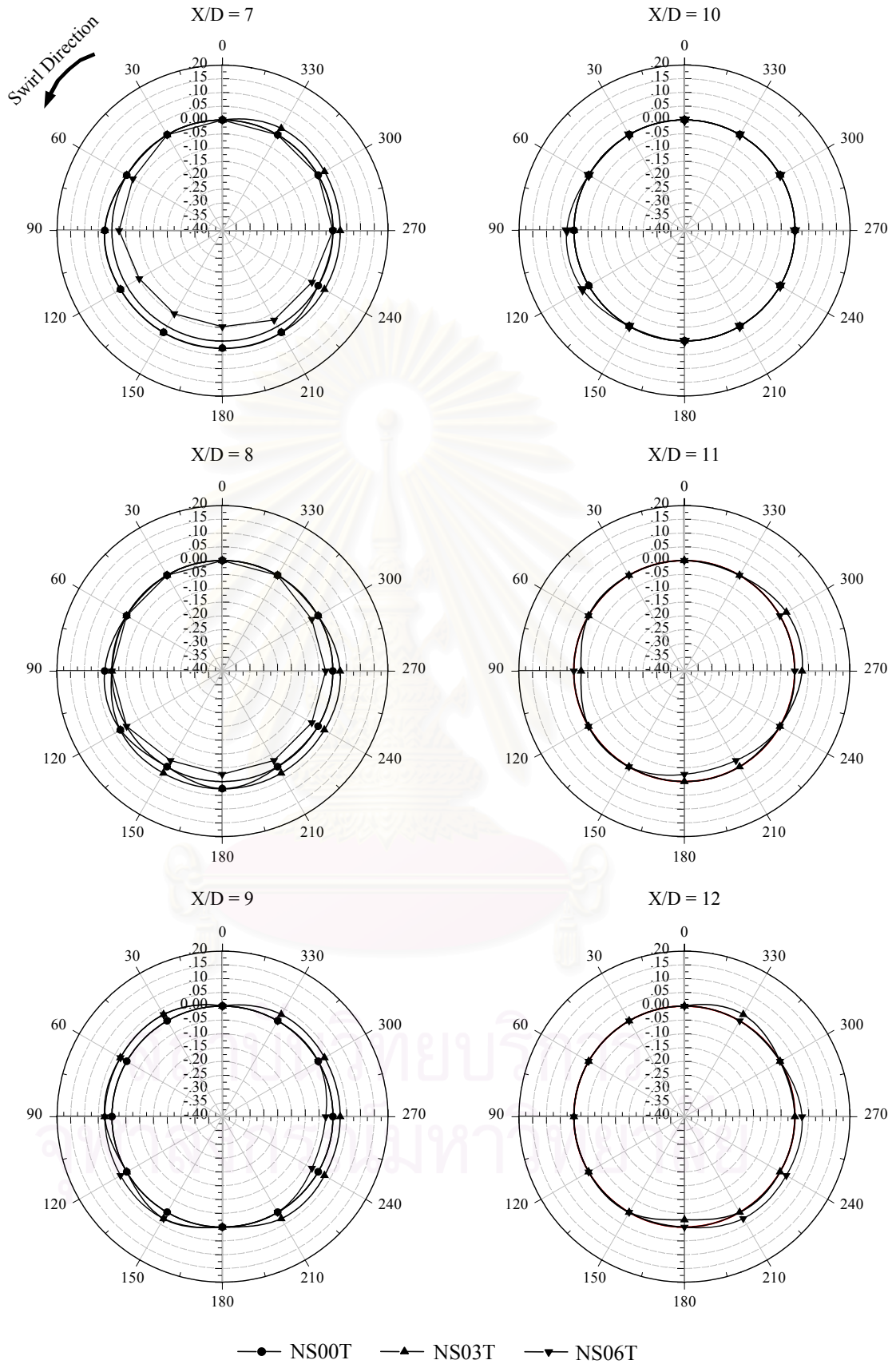
รูปที่ 3.11 สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (K , Minor Loss) กรณีการไหลแบบหมุนควงในท่อตรง



รูปที่ 3.12 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด $C_{p_{ref}}$ (กรณีติดแผ่นกีดขวาง) (มีการเปลี่ยนสเกลกราฟจาก [-1.0-0.3] ที่ $X/D = 1.5$ เป็น [-3.0-3.0] ที่ $X/D = 2.0$)

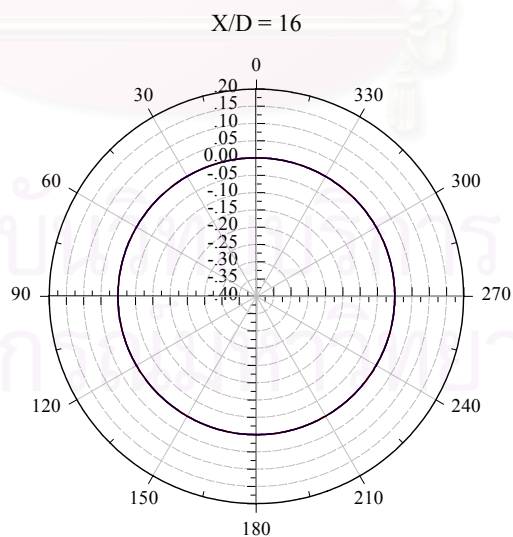
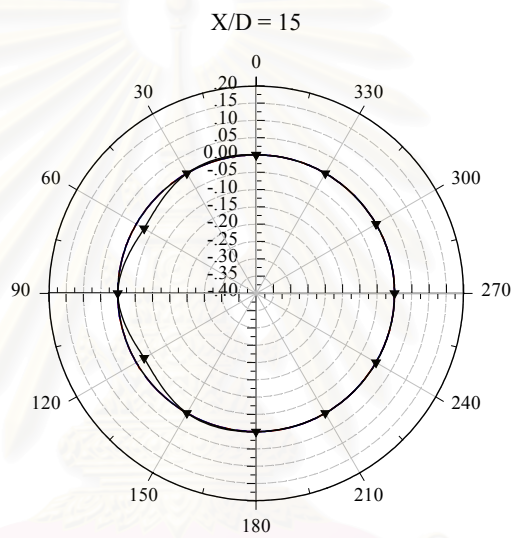
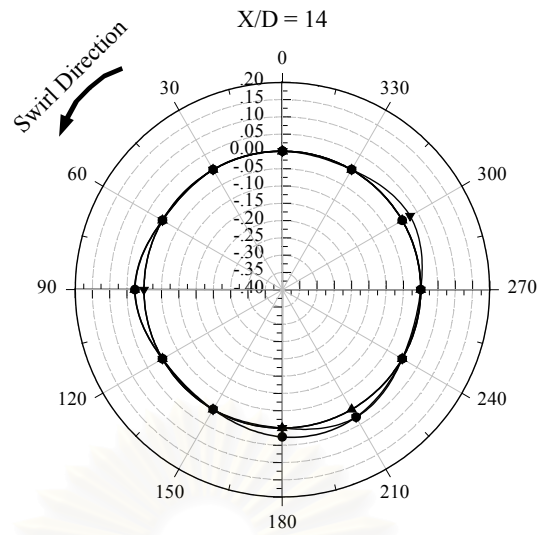


รูปที่ 3.12 (ต่อ)



รูปที่ 3.12 (ต่อ)

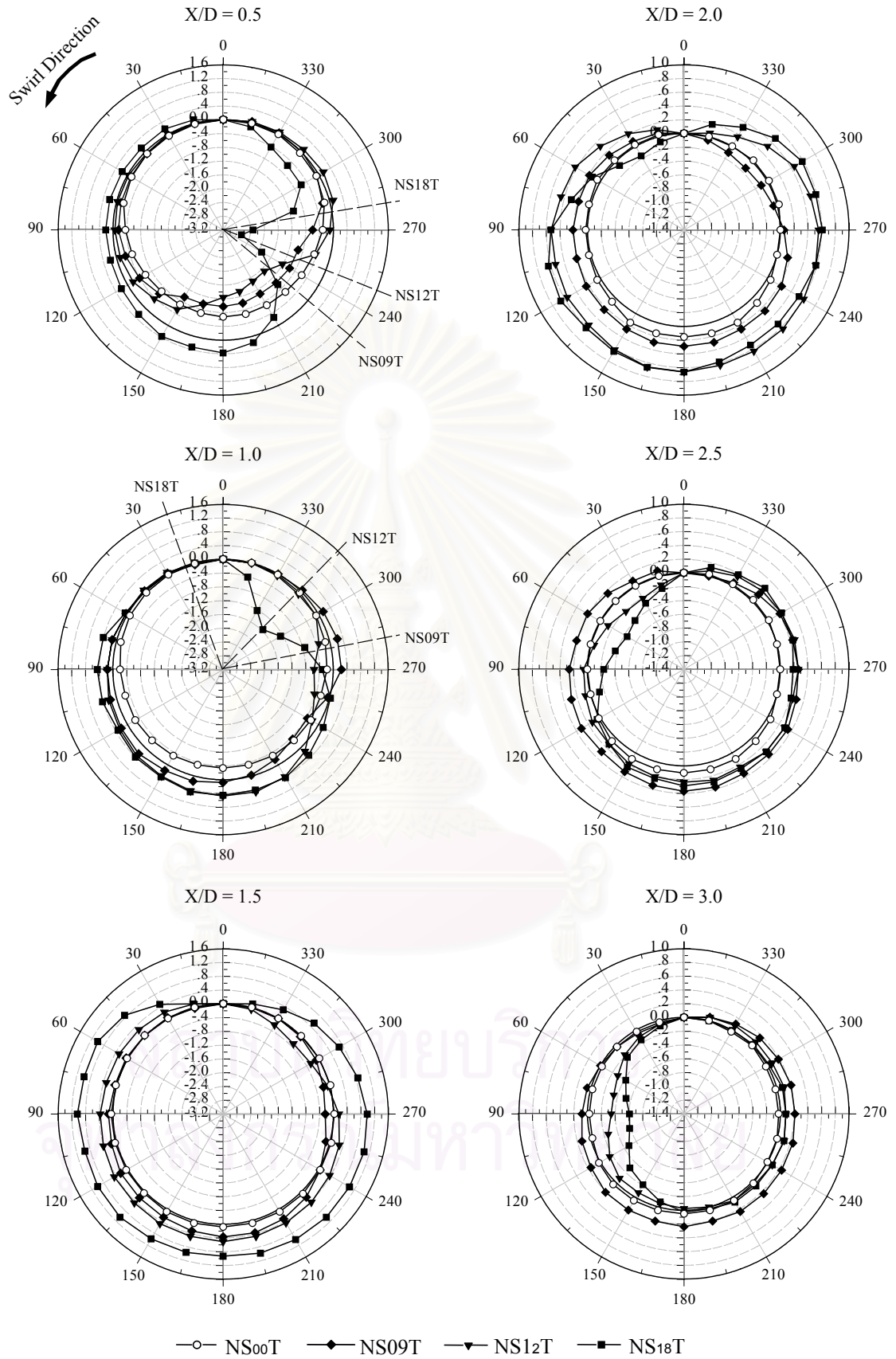
(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



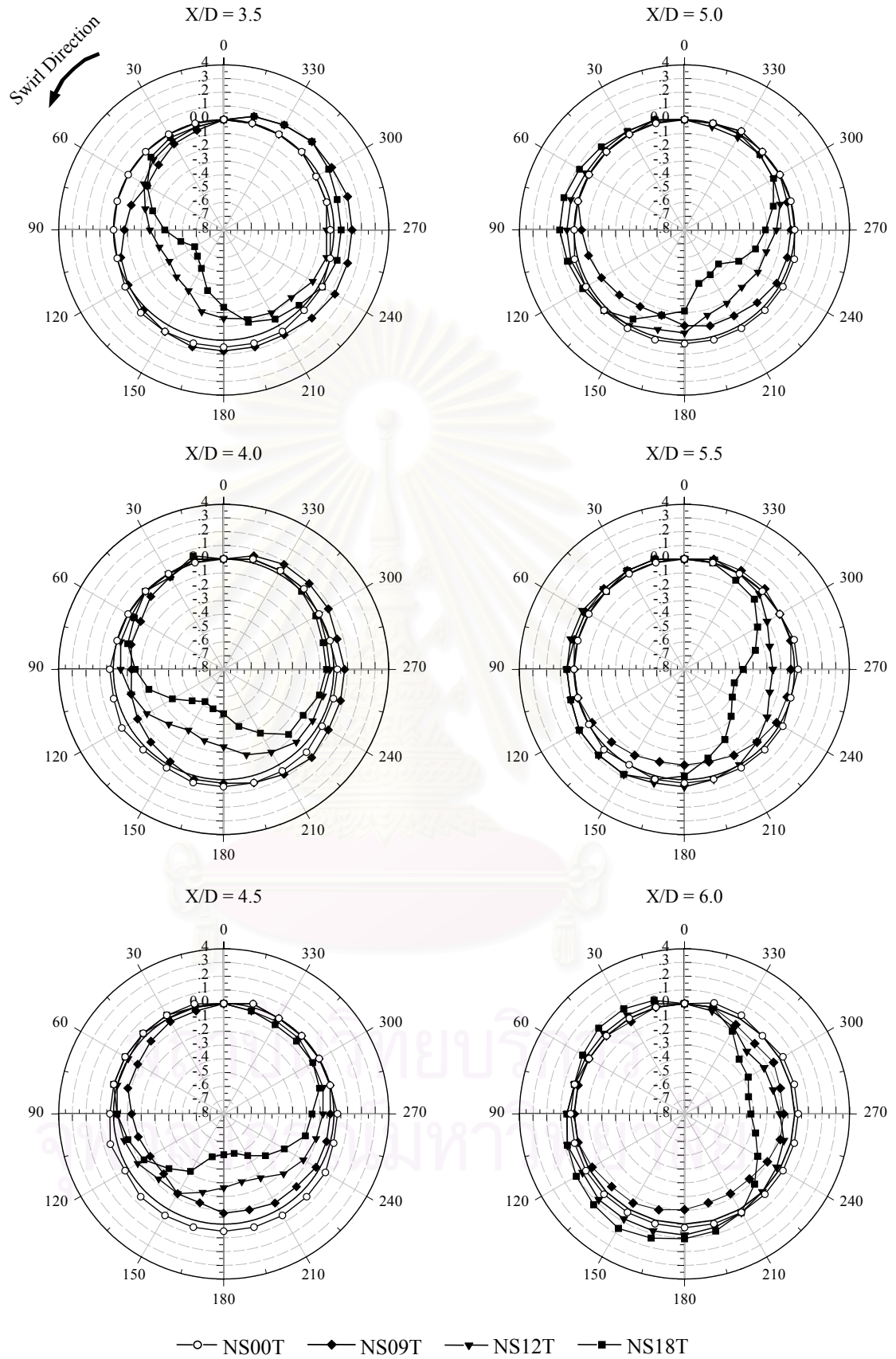
—●— NS00T —▲— NS03T —▼— NS06T

รูปที่ 3.12 (ต่อ)

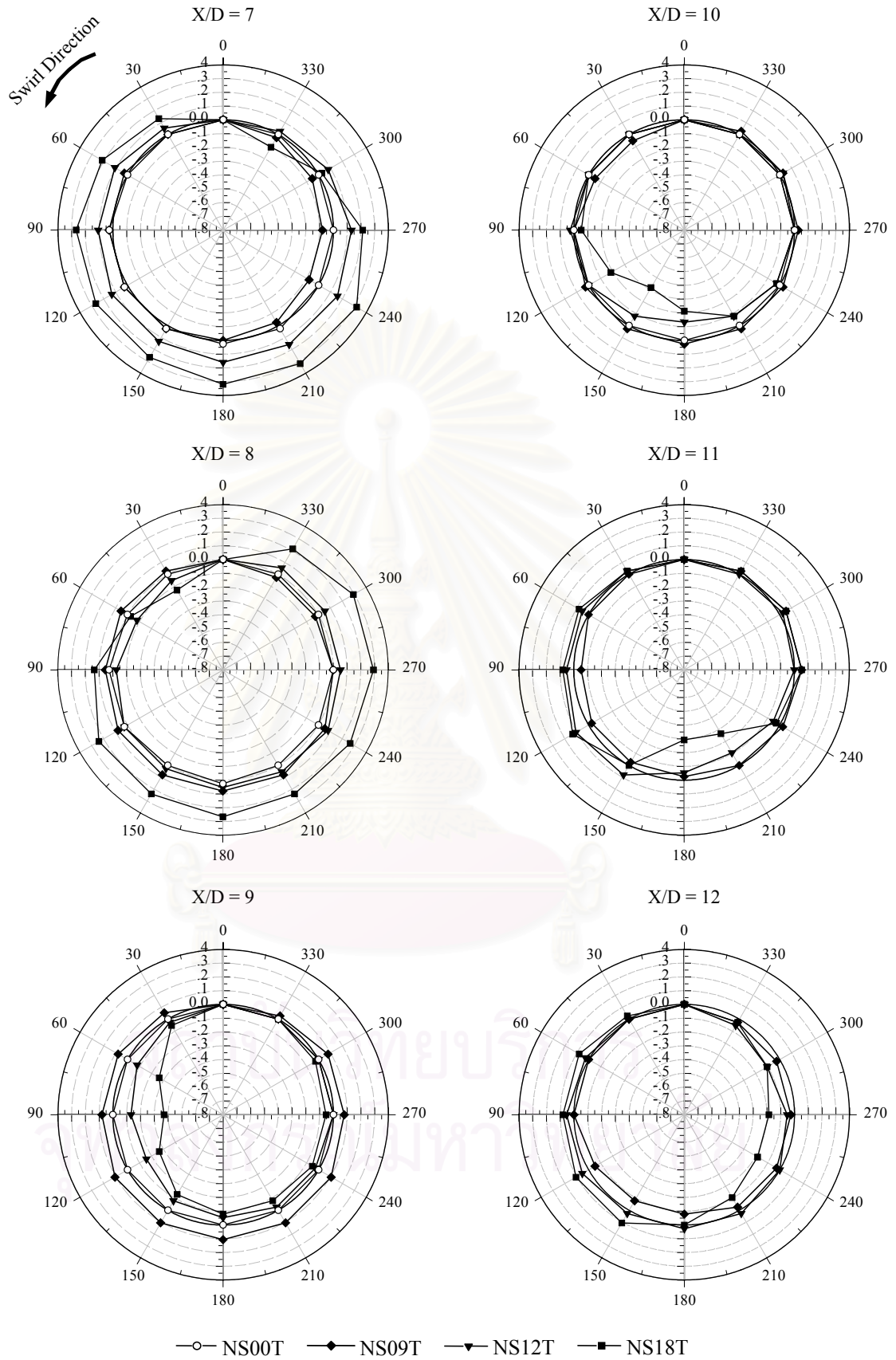
(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



รูปที่ 3.13 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด $C_{p,ref}$ (กรณีติดแผ่นกีดขวาง)
 (มีการเปลี่ยนสเกลกราฟจาก [-3.2-1.6] ที่ $X/D = 1.5$ เป็น [-1.4-1.0] ที่ $X/D = 2.0$)

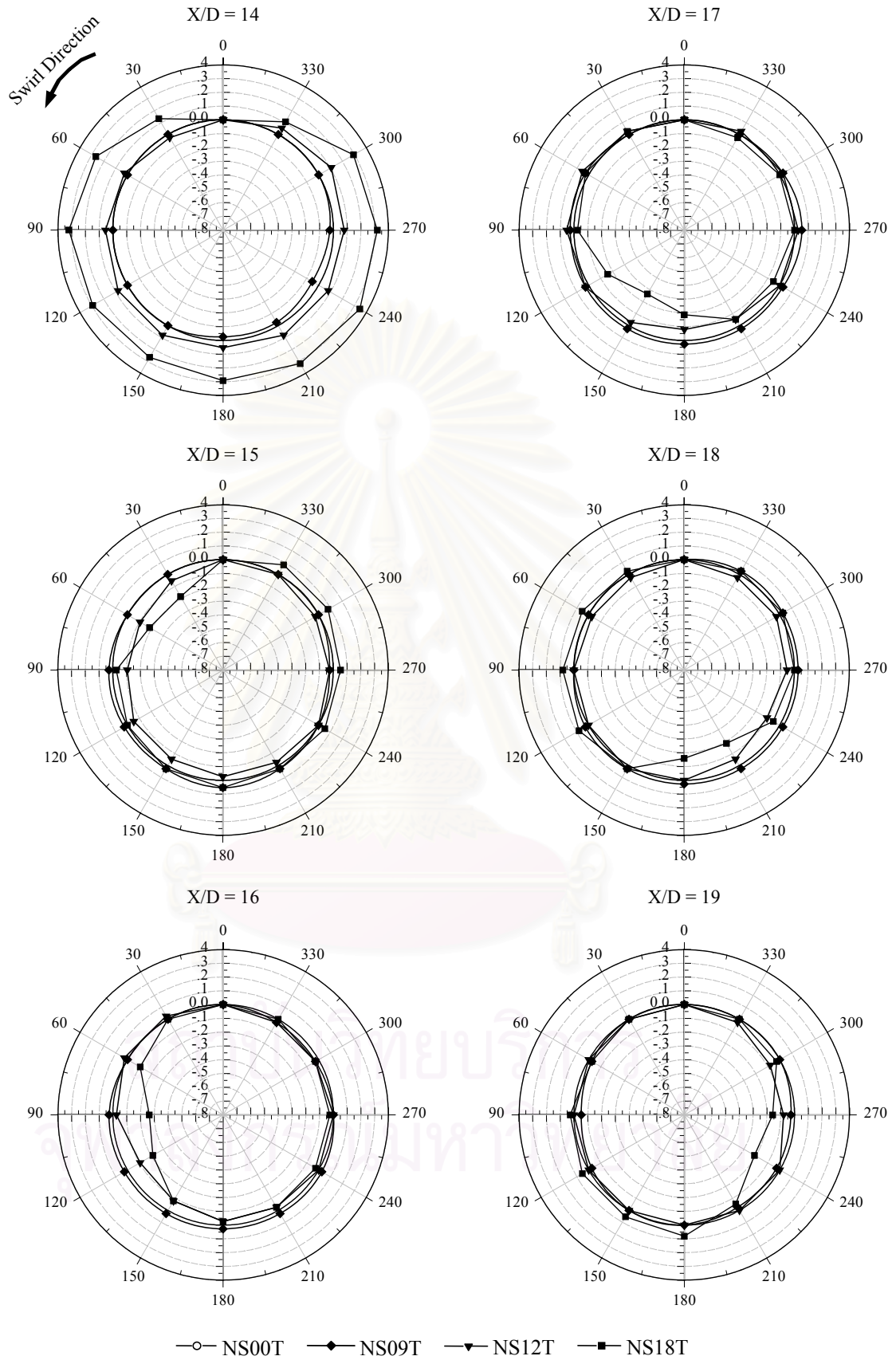


รูปที่ 3.13 (ต่อ)



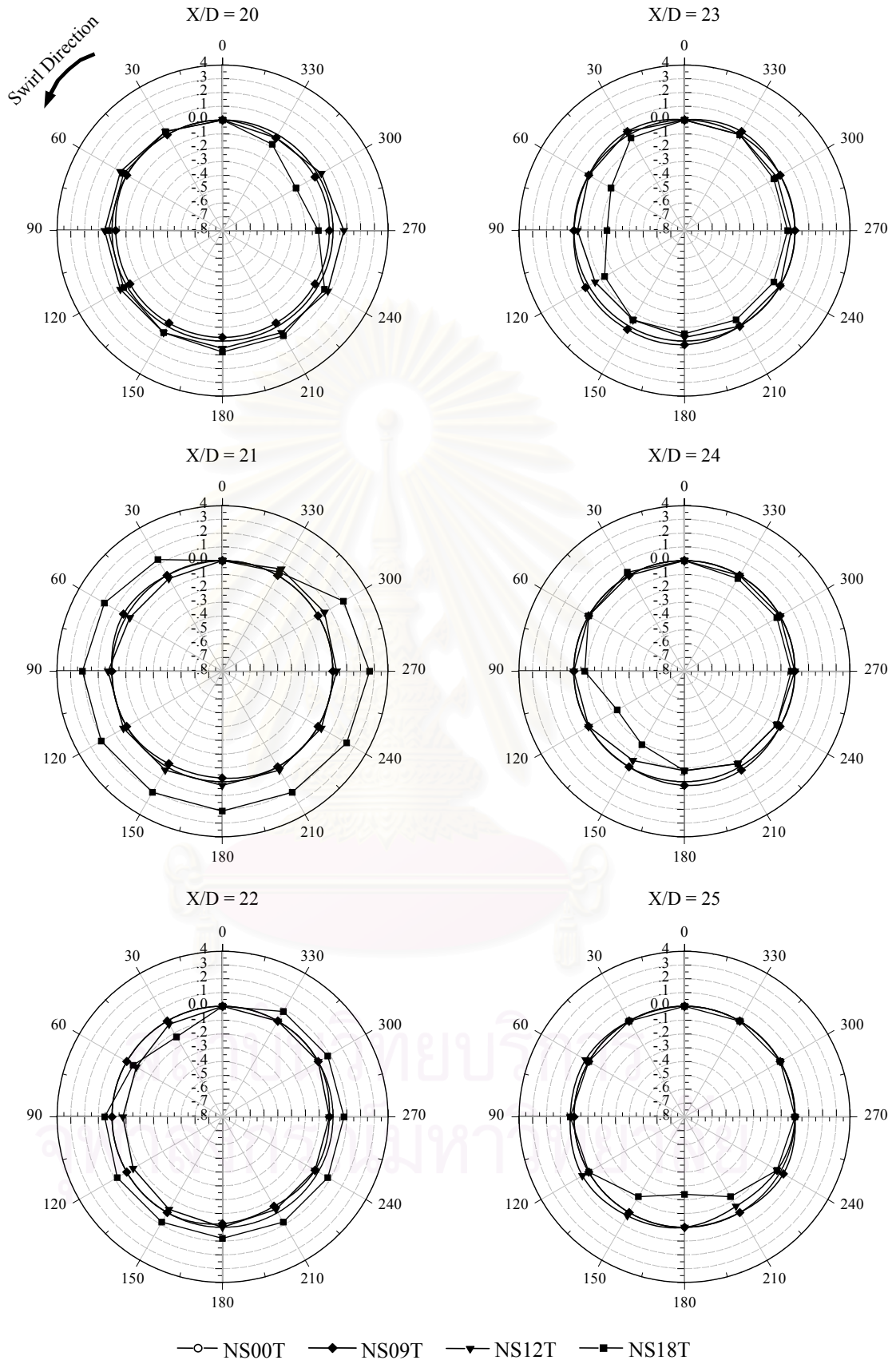
รูปที่ 3.13 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



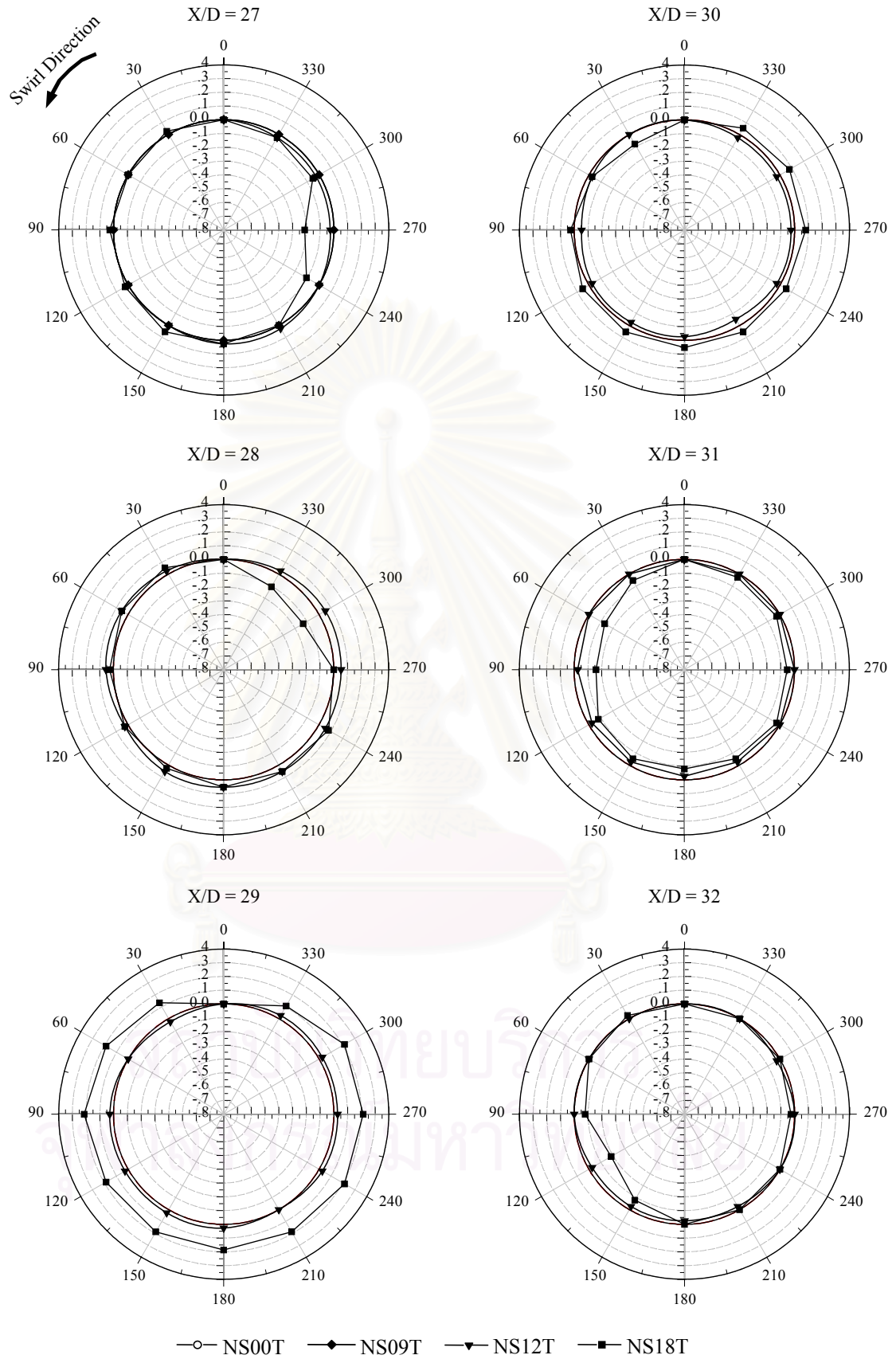
รูปที่ 3.13 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



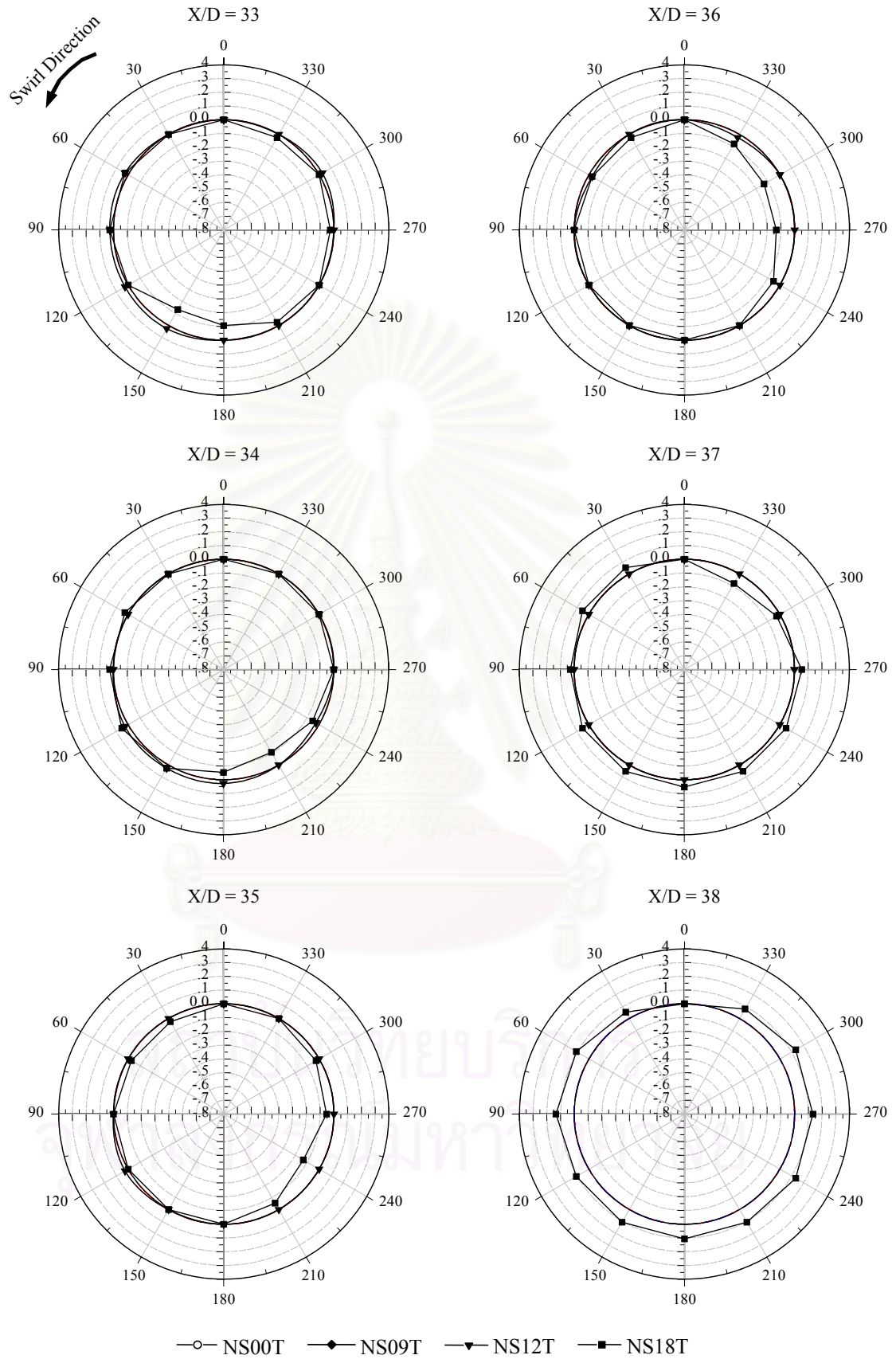
รูปที่ 3.13 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



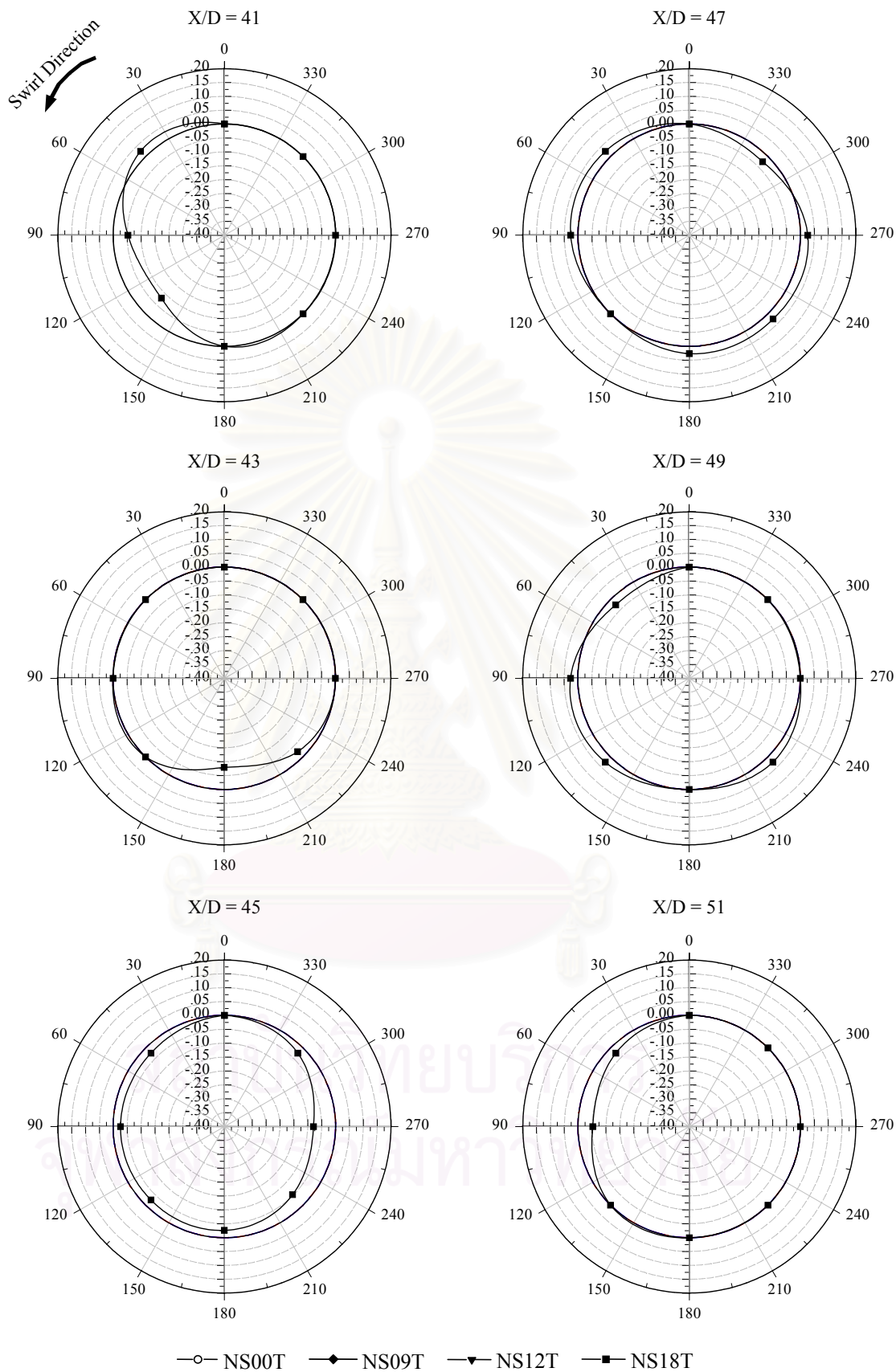
รูปที่ 3.13 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



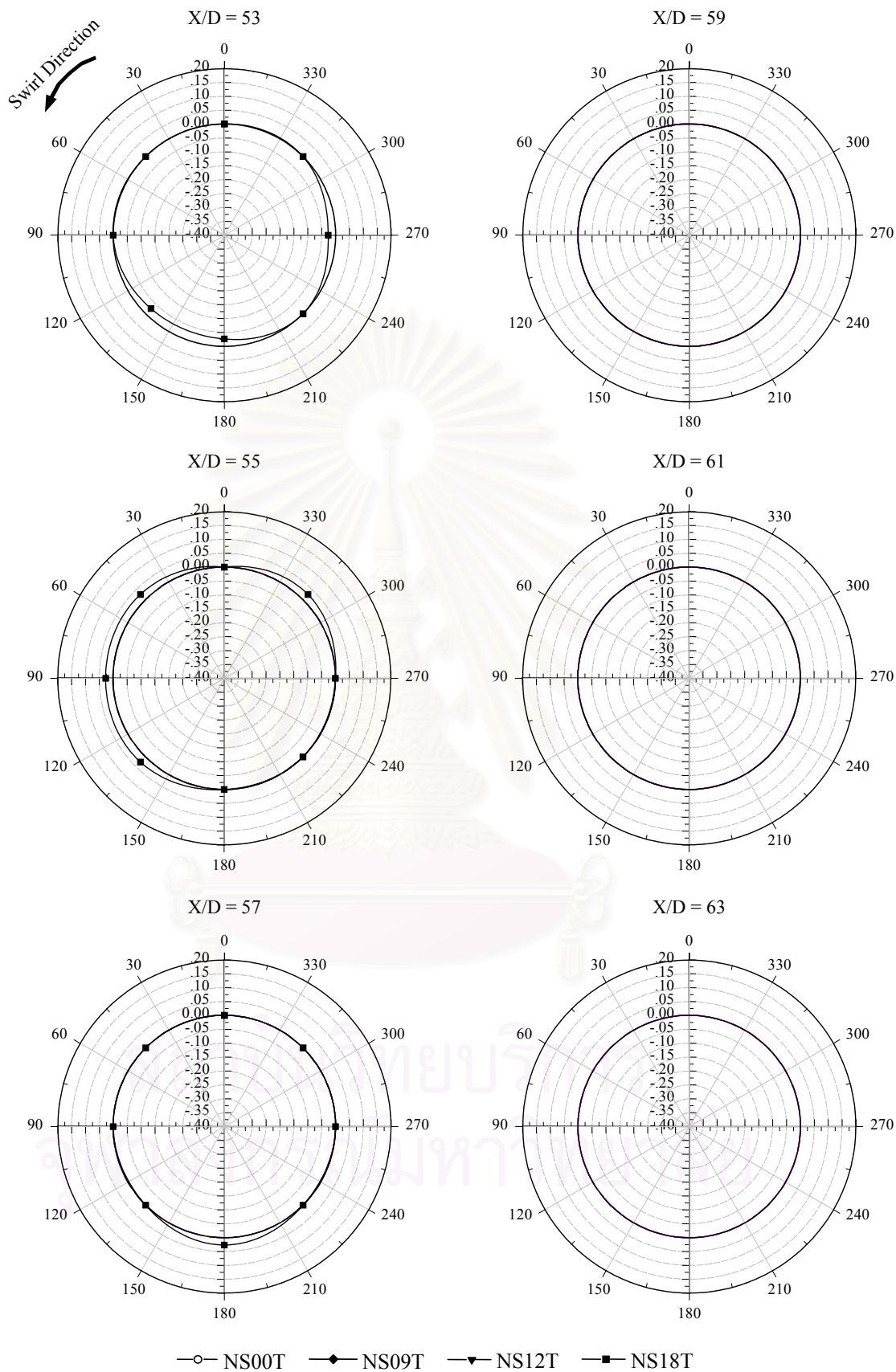
รูปที่ 3.13 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



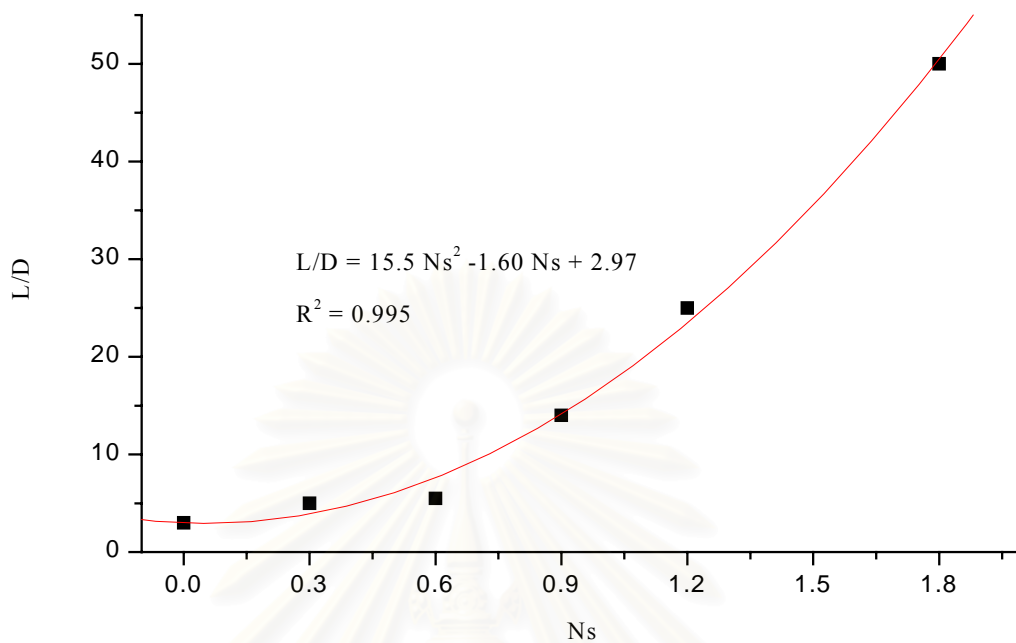
รูปที่ 3.13 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



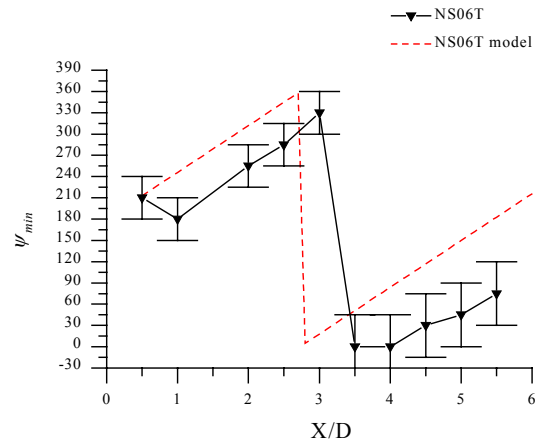
รูปที่ 3.13 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด

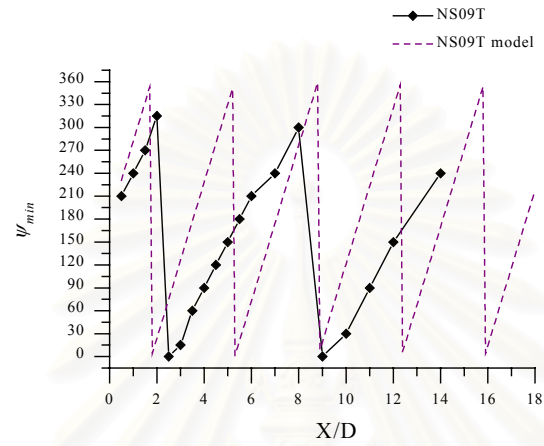


รูปที่ 3.14 ระยะทางปรับตัวให้มีการกระจายความดันสถิตสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด

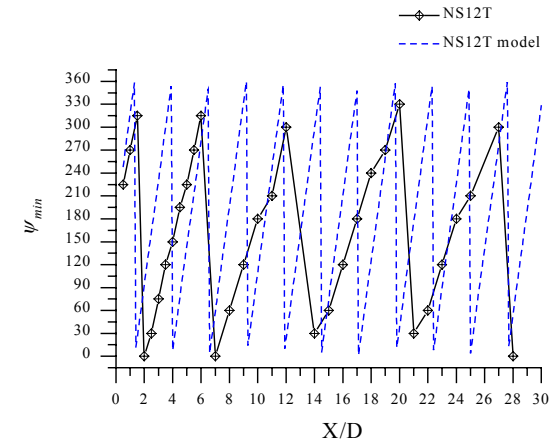
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



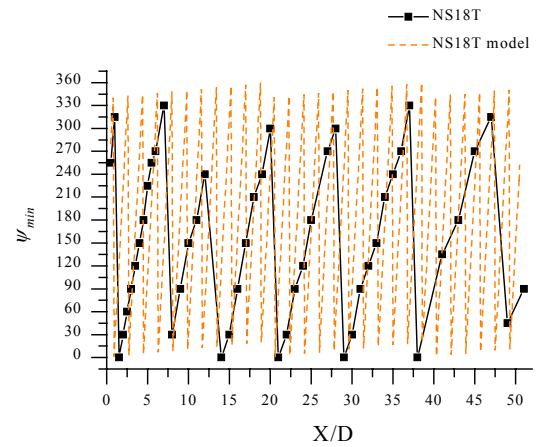
3.15 (ก)



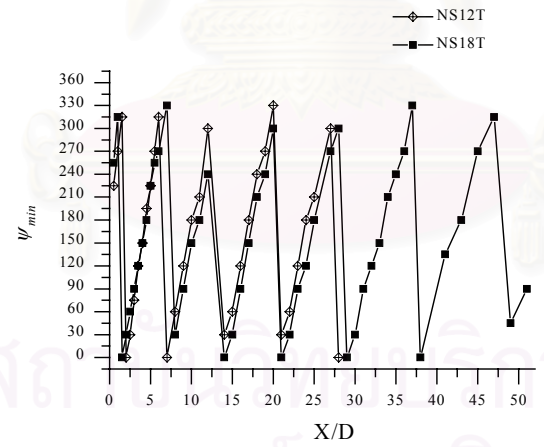
3.15 (ข)



3.15 (ค)

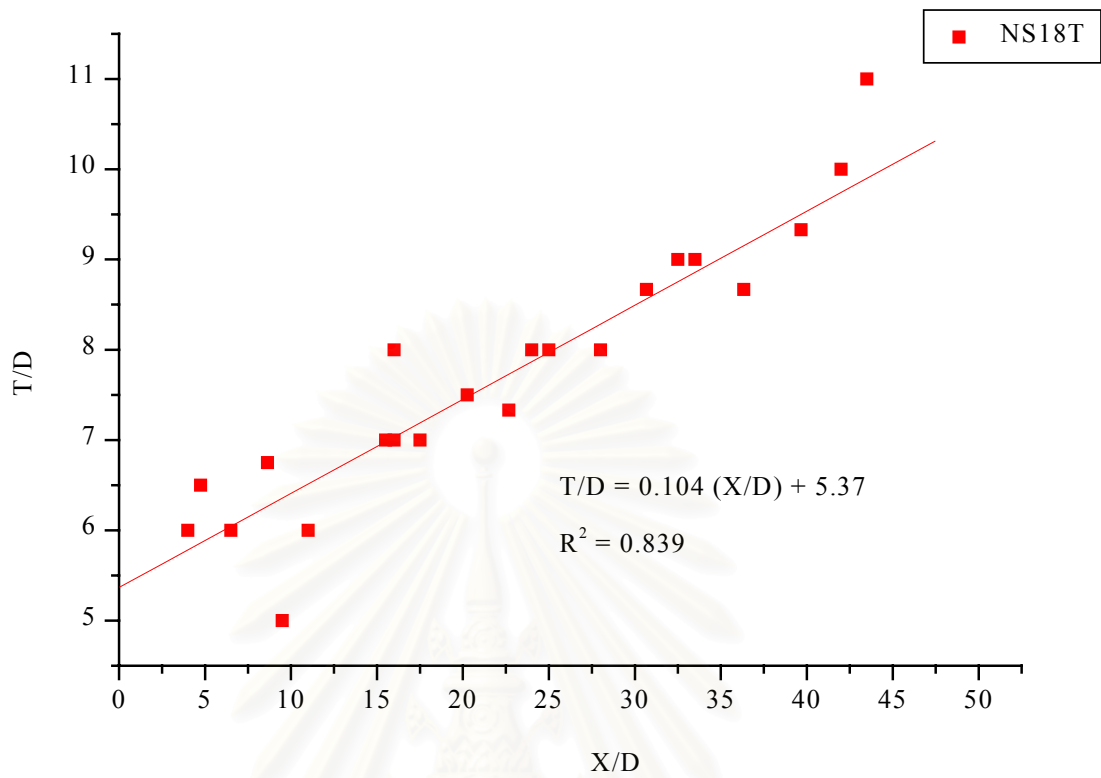


3.15 (ง)



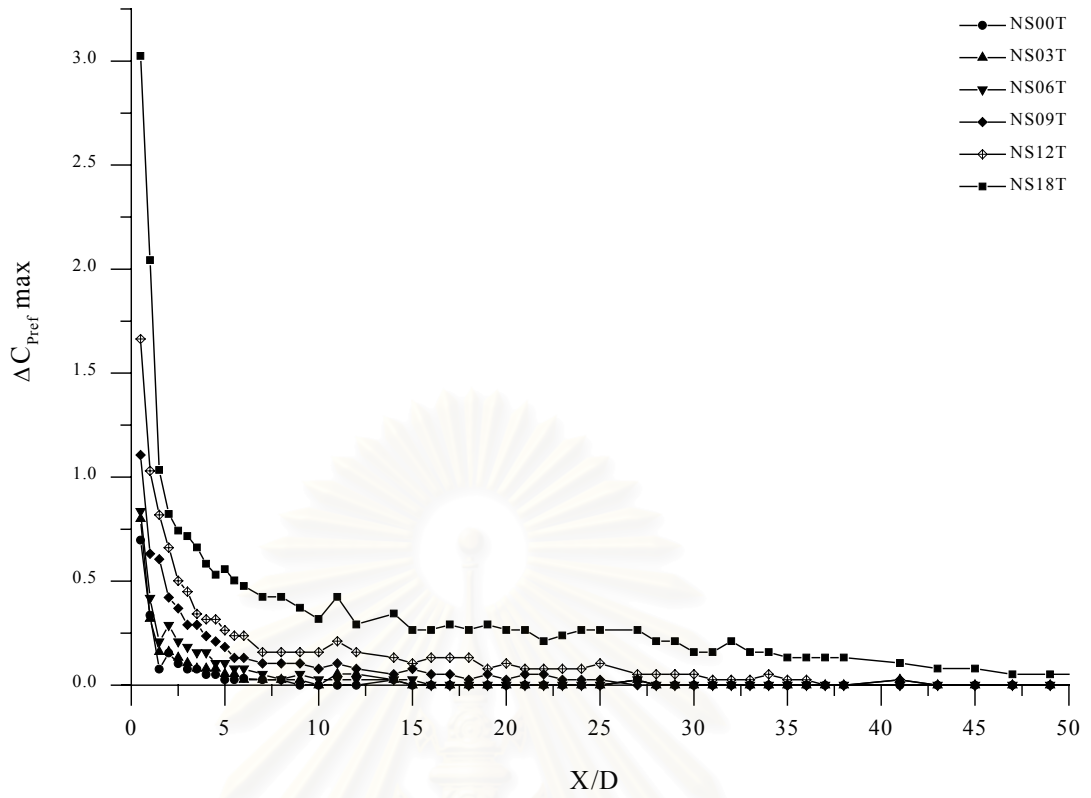
3.15 (จ)

รูปที่ 3.15 ตำแหน่งเชิงมุม (ψ_{min}) ของค่า C_{Pref} ต่ำสุดในหน้าตัดตามระยะทางการไหล

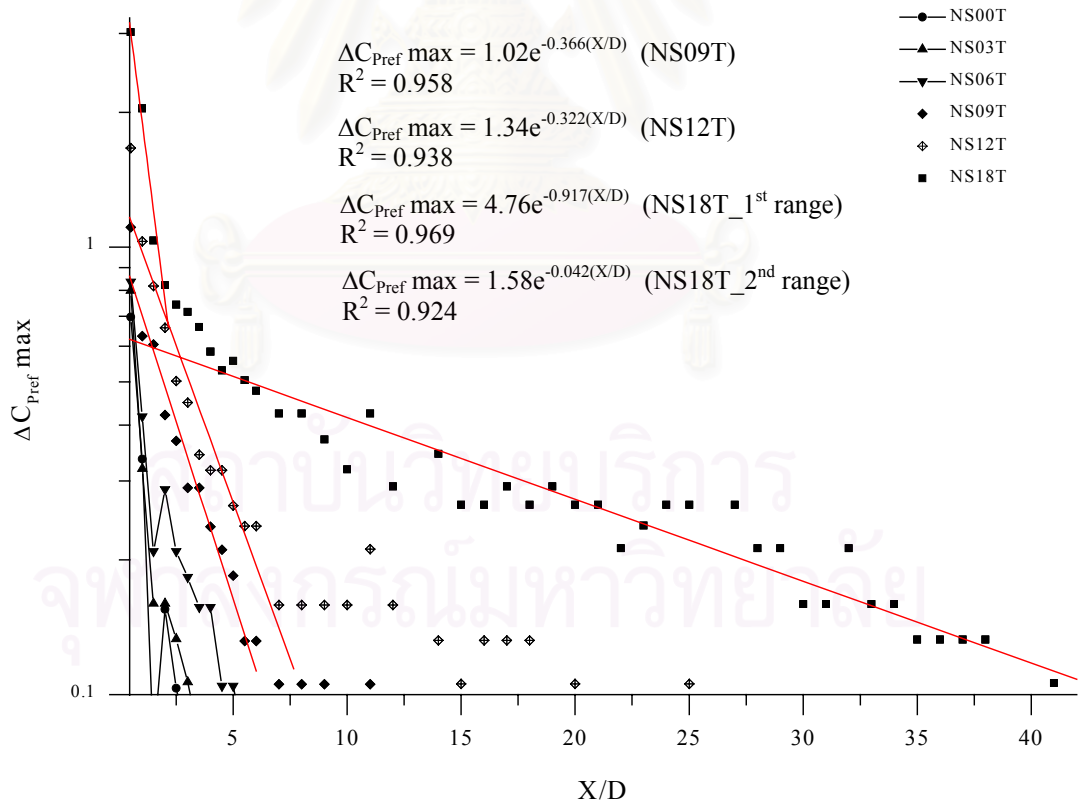


รูปที่ 3.16 ขนาดคาบการหมุนวนของบริเวณความดันสถิตต่ำตามระยะทางการไหล

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

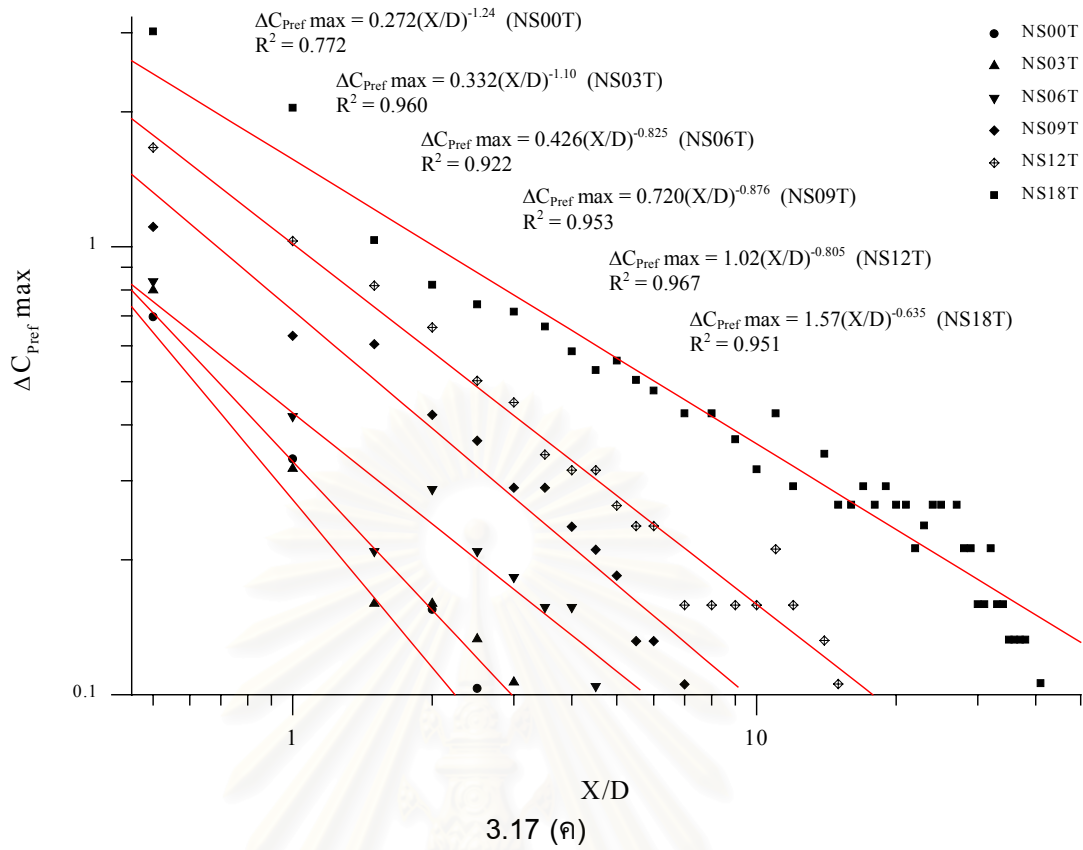


3.17 (ก)

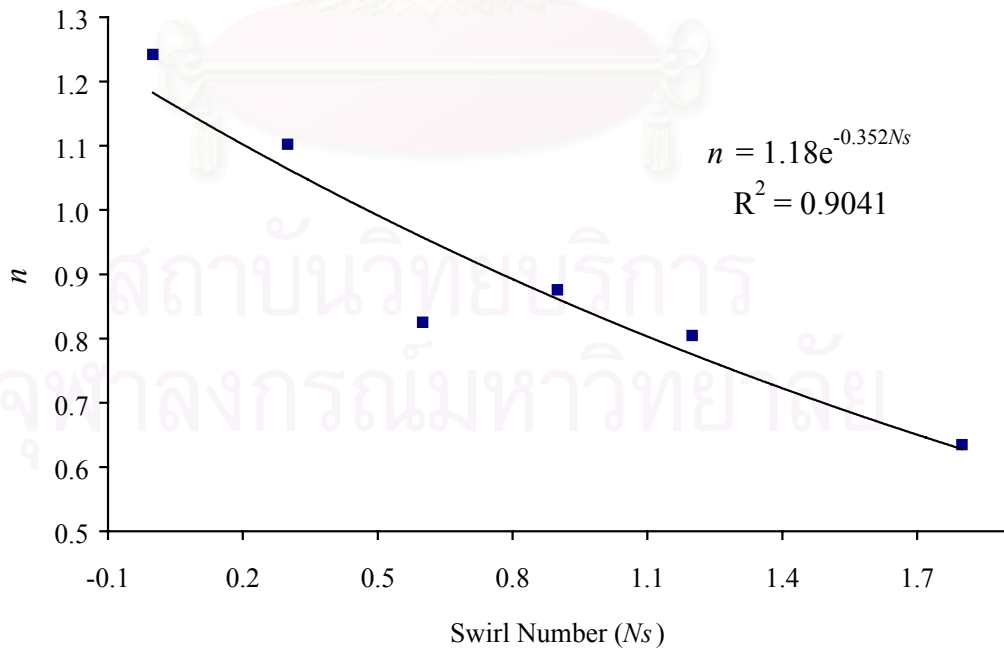


3.17 (ข)

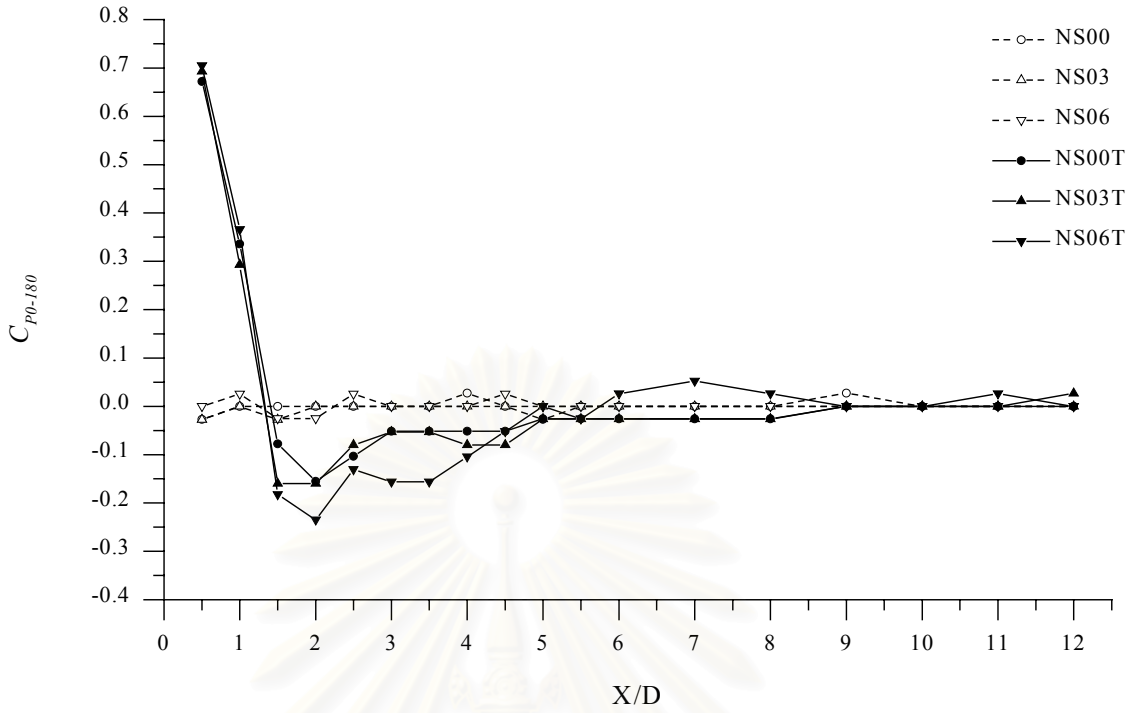
รูปที่ 3.17 ความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุด ($\Delta C_{Pref \max}$) ตามระยะทางการไหล (ก) Linear Scale (ข) Semi-Log Scale (ค) Log-Log Scale



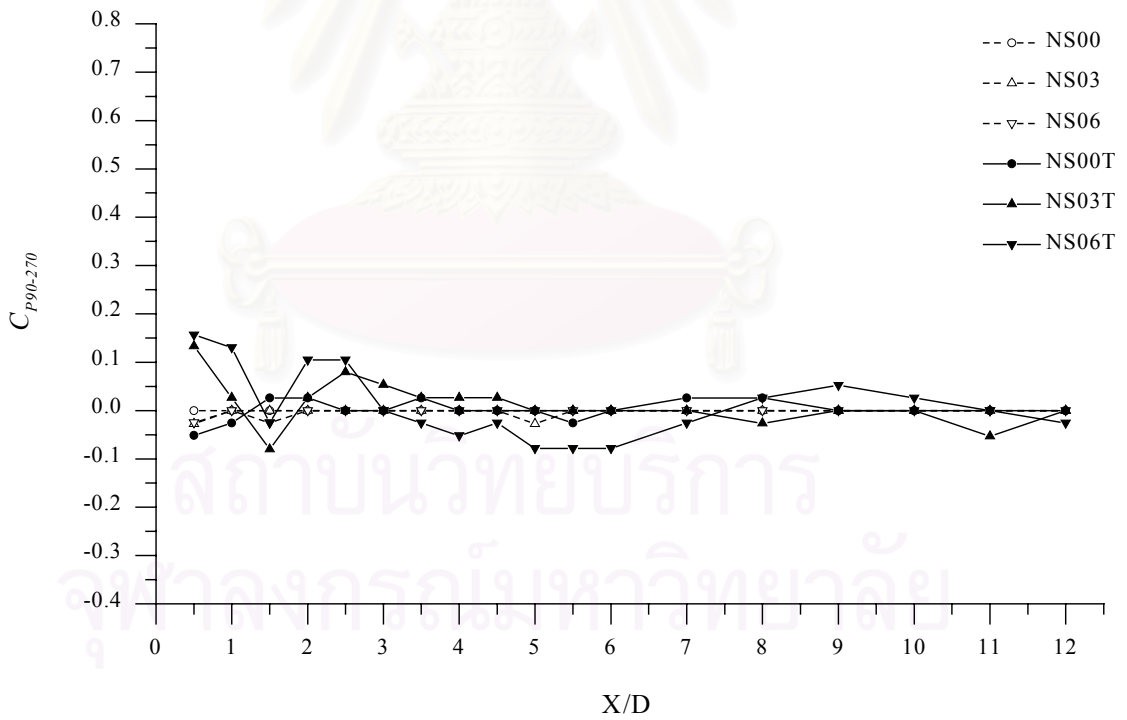
รูปที่ 3.17 (ต่อ)



รูปที่ 3.18 เลขชี้กำลังของอัตราการลดลงของค่าความแตกต่างความดันสถิตมากที่สุดในพื้นที่ตัด



3.19 (ก)

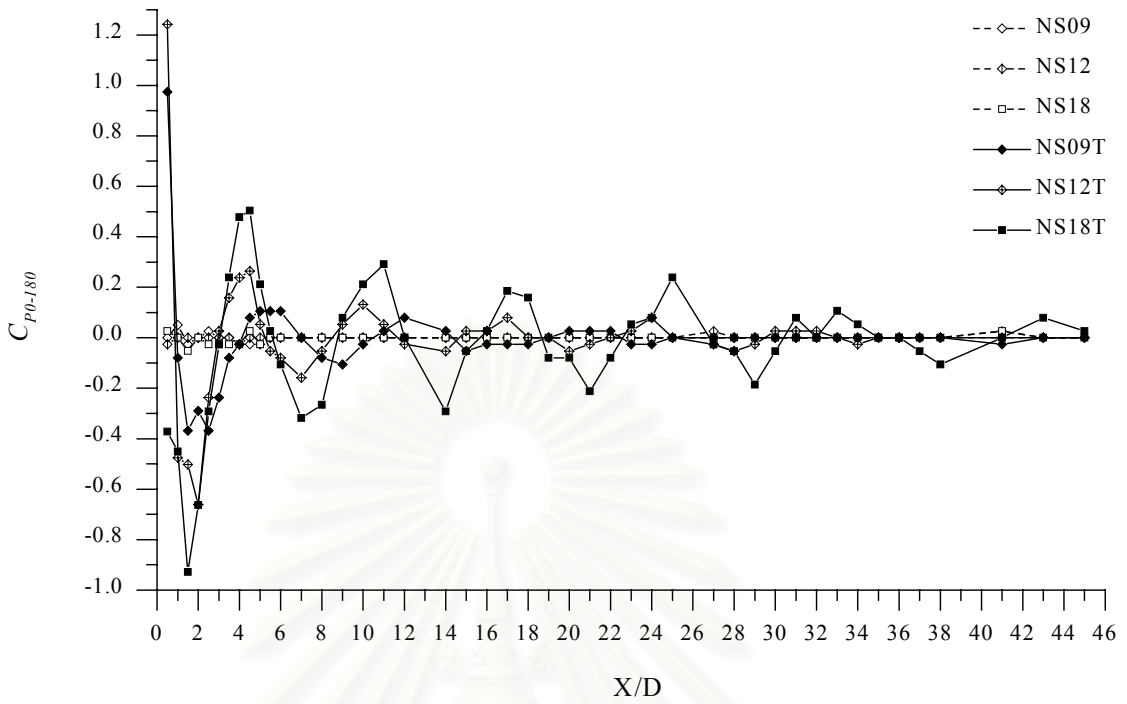


3.19 (ข)

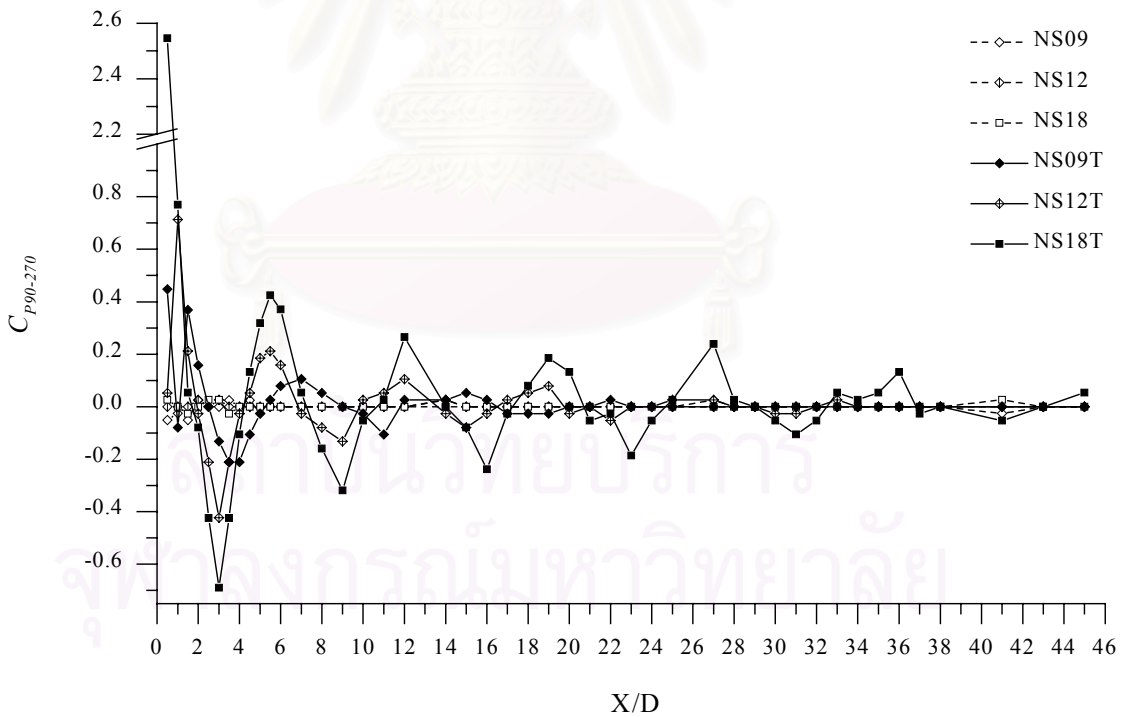
รูปที่ 3.19 ความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณี $N_s = 0.0-0.6$)

(ก) C_{P0-180}

(ข) $C_{P90-270}$



รูปที่ 3.20 (ก)

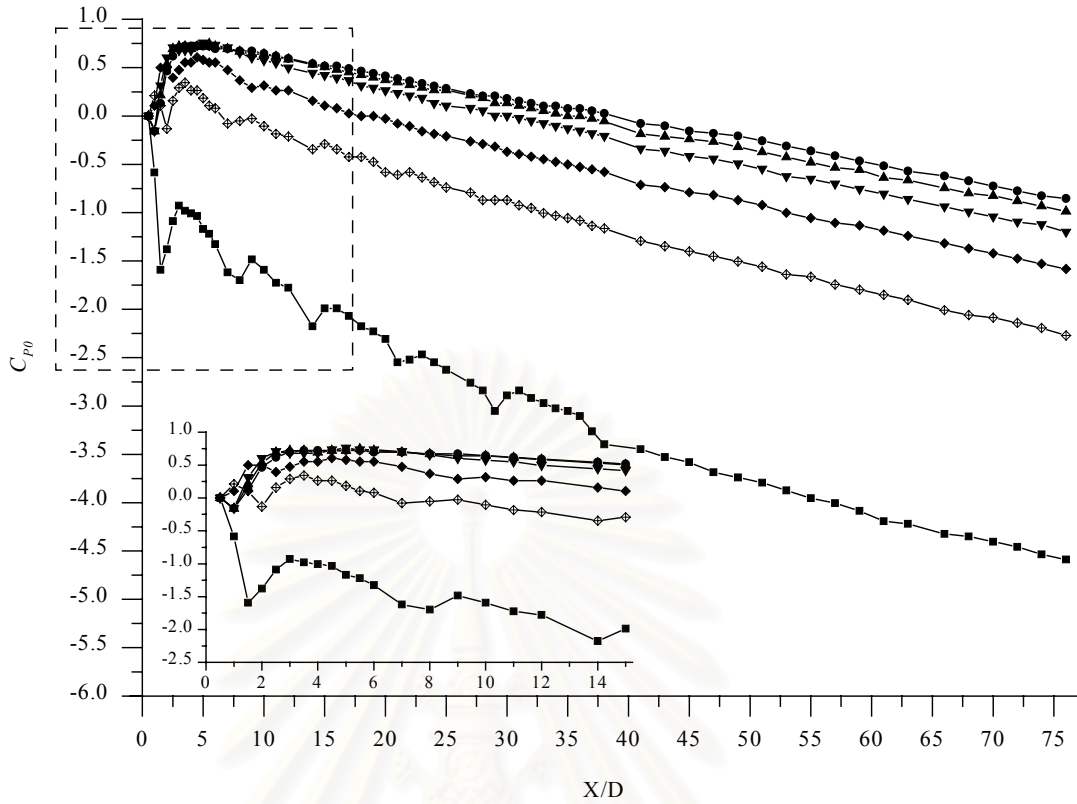


รูปที่ 3.20 (ข)

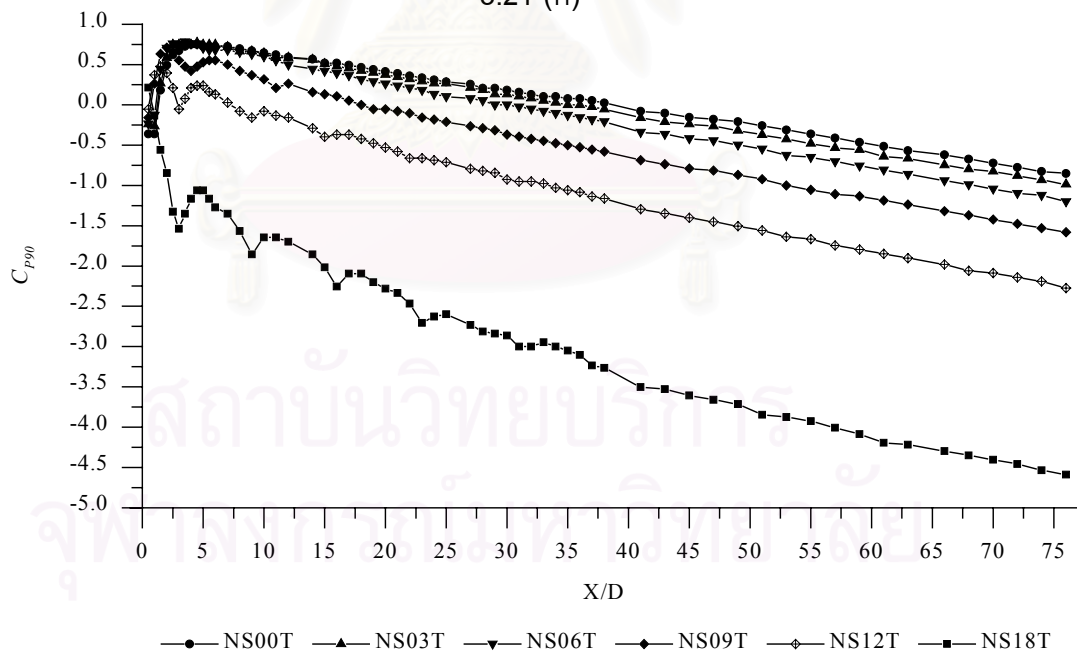
รูปที่ 3.20 ความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณี $Ns = 0.9-1.8$)

(ก) C_{P0-180}

(ข) $C_{P90-270}$



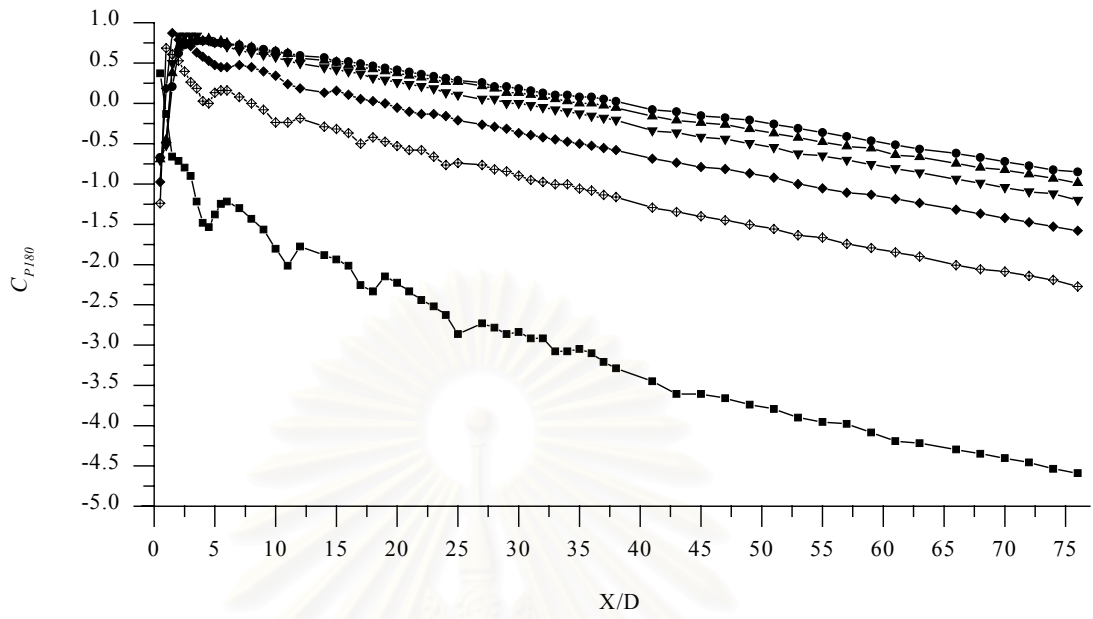
3.21 (ก)



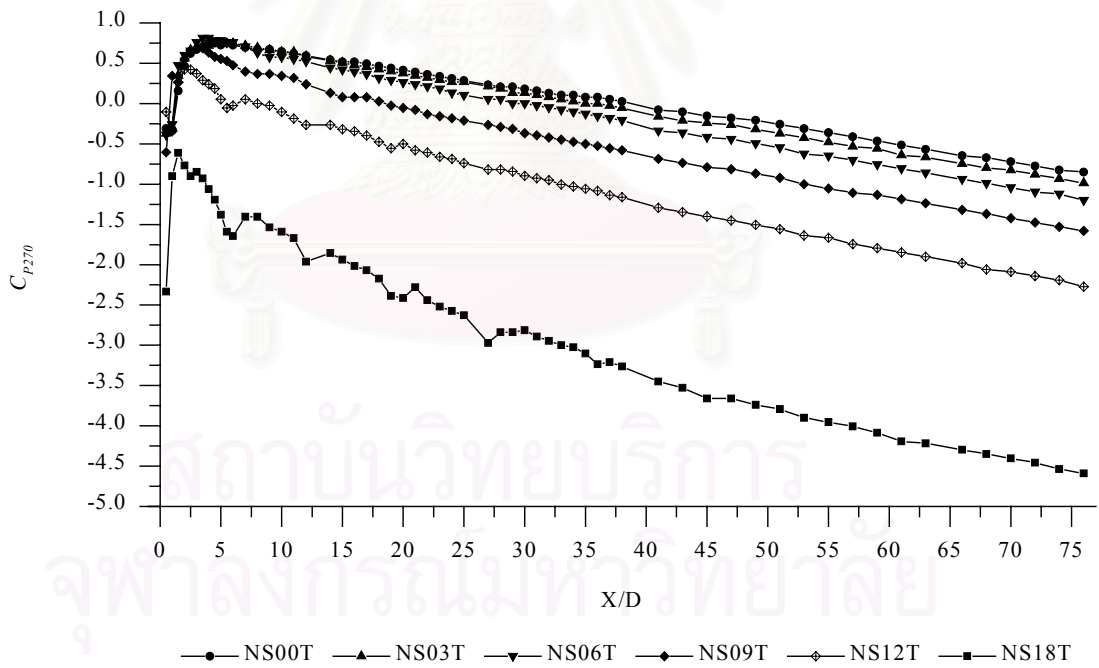
3.21 (ข)

รูปที่ 3.21 การกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล

(ก-ง) $C_{P\psi}$; C_{P0} , C_{P90} , C_{P180} และ C_{P270} (จ) $\overline{C_{Pref}}$



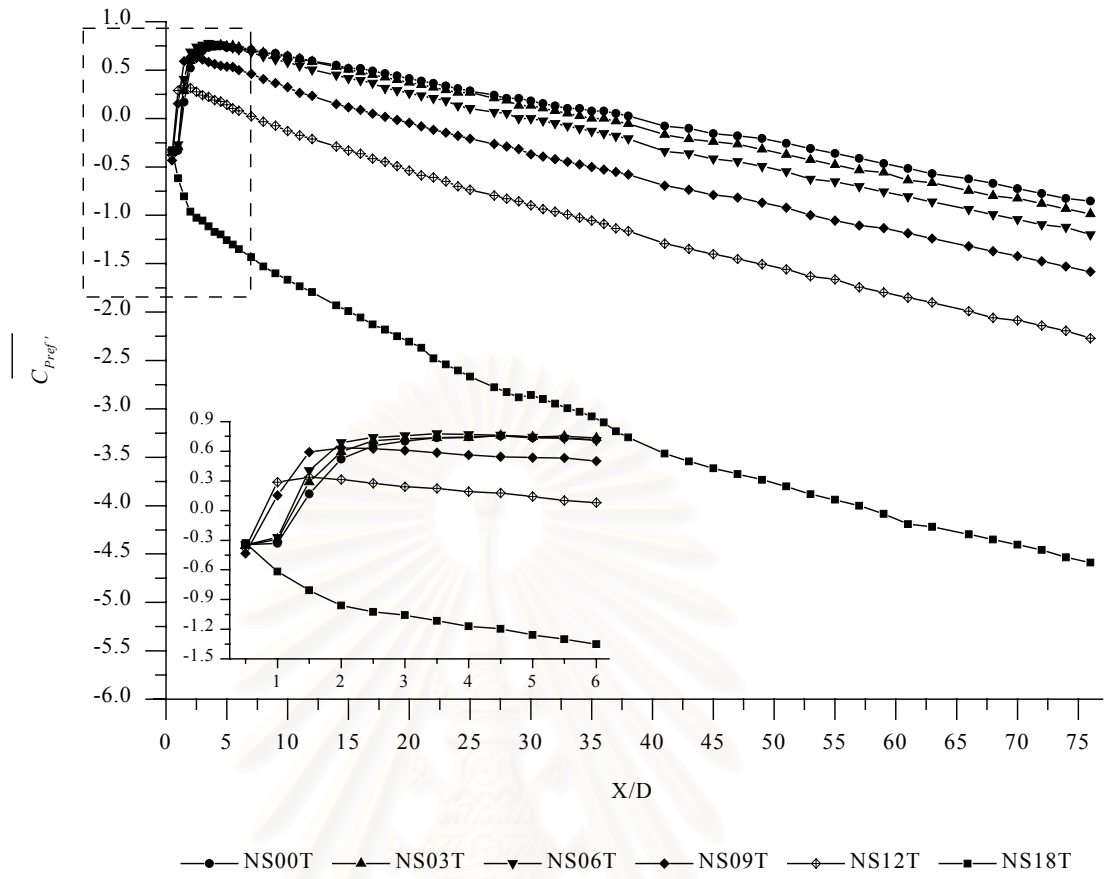
3.21 (ค)



3.21 (ง)

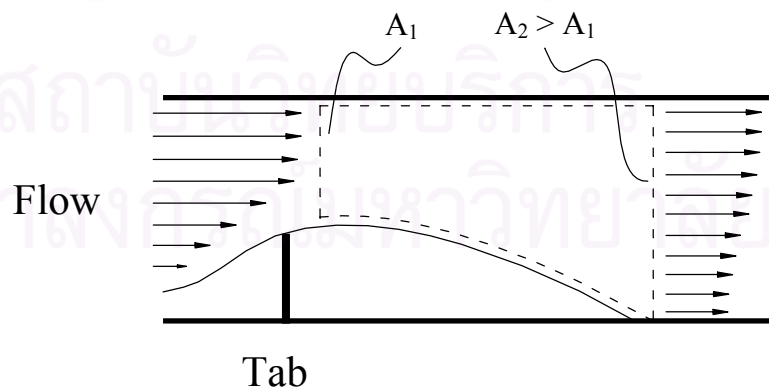
—●— NS00T —▲— NS03T —▼— NS06T —◆— NS09T —◇— NS12T —■— NS18T

รูปที่ 3.21 (ต่อ)

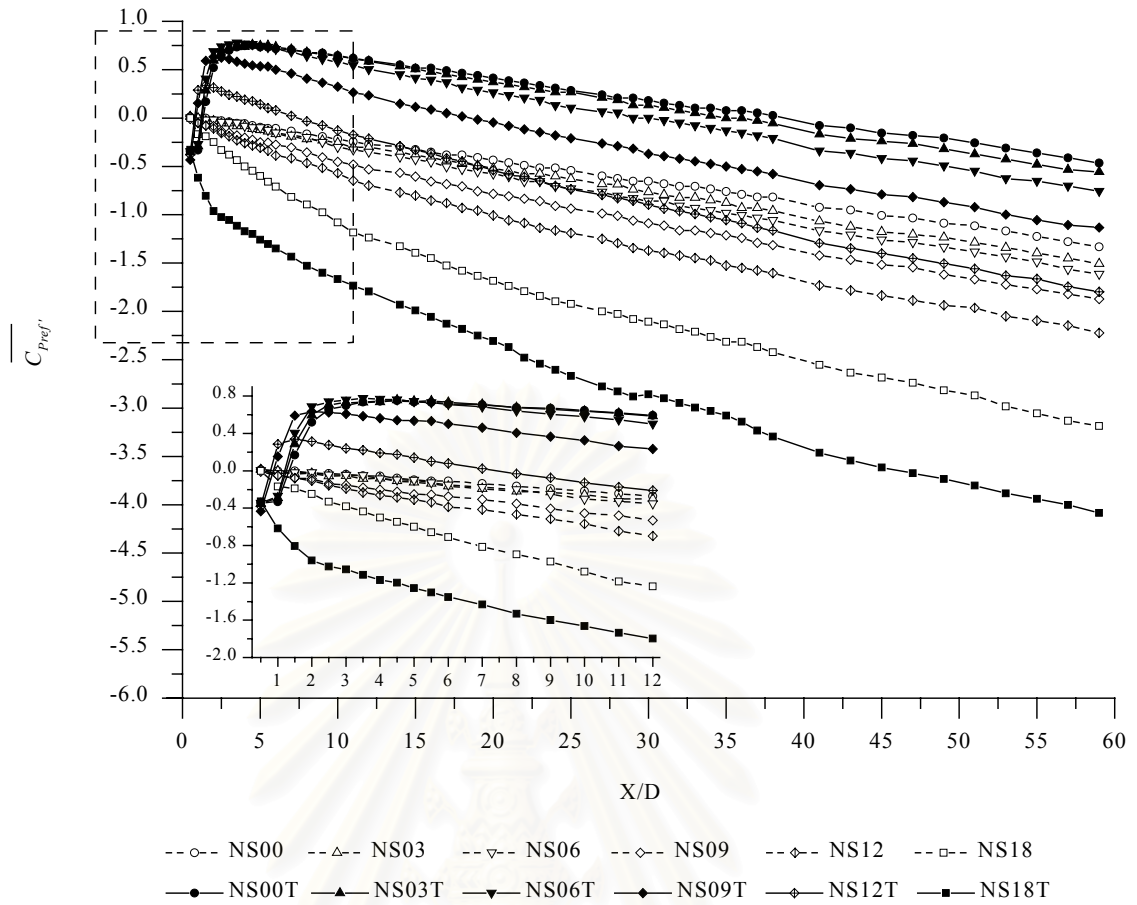


3.21 (จ)

รูปที่ 3.21 (ต่อ)

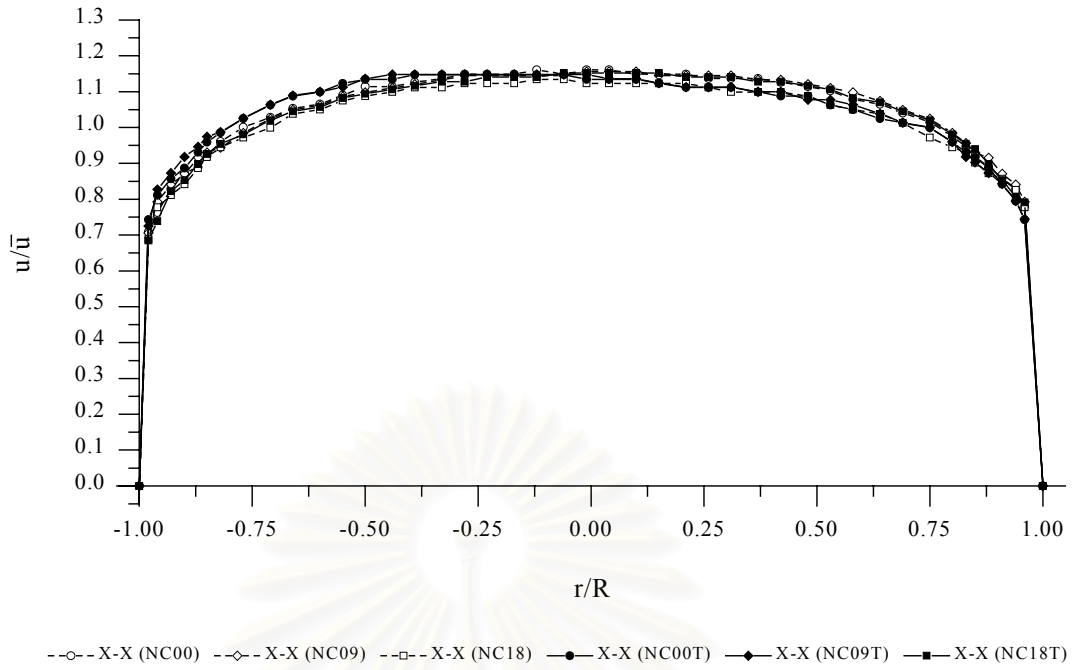


รูปที่ 3.22 ลักษณะการไหลด้านหลังแผ่นกีดขวาง (Tab)

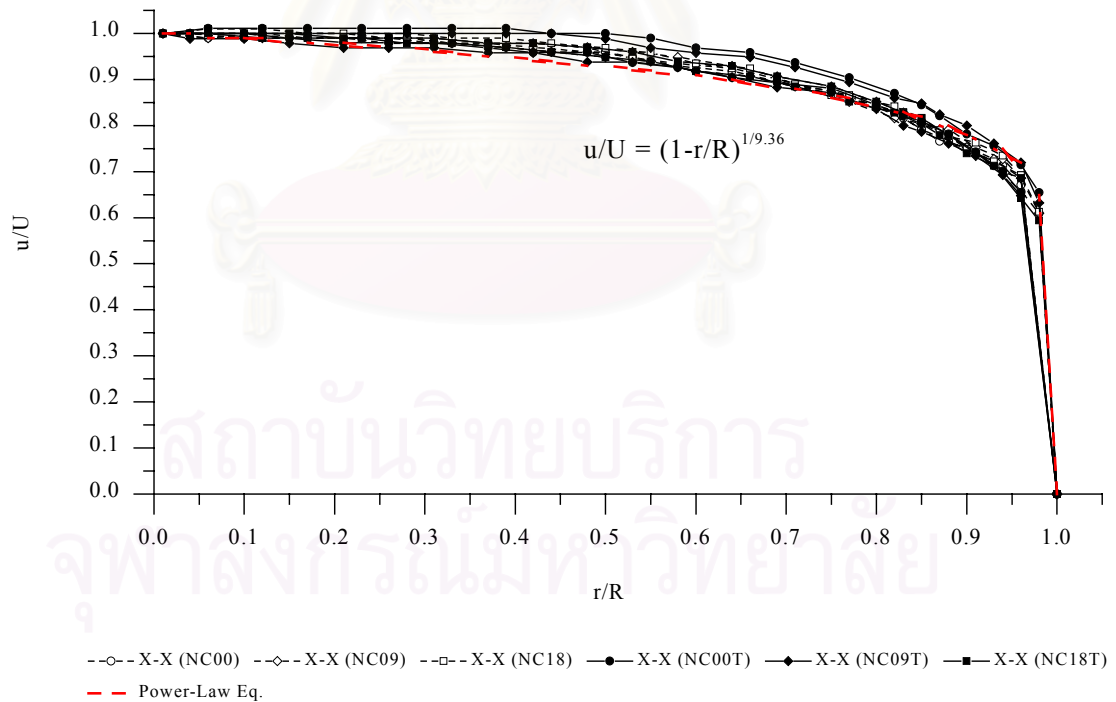


รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล (กรณีติดแผ่นกีดขวาง และไม่ติดแผ่นกีดขวาง)

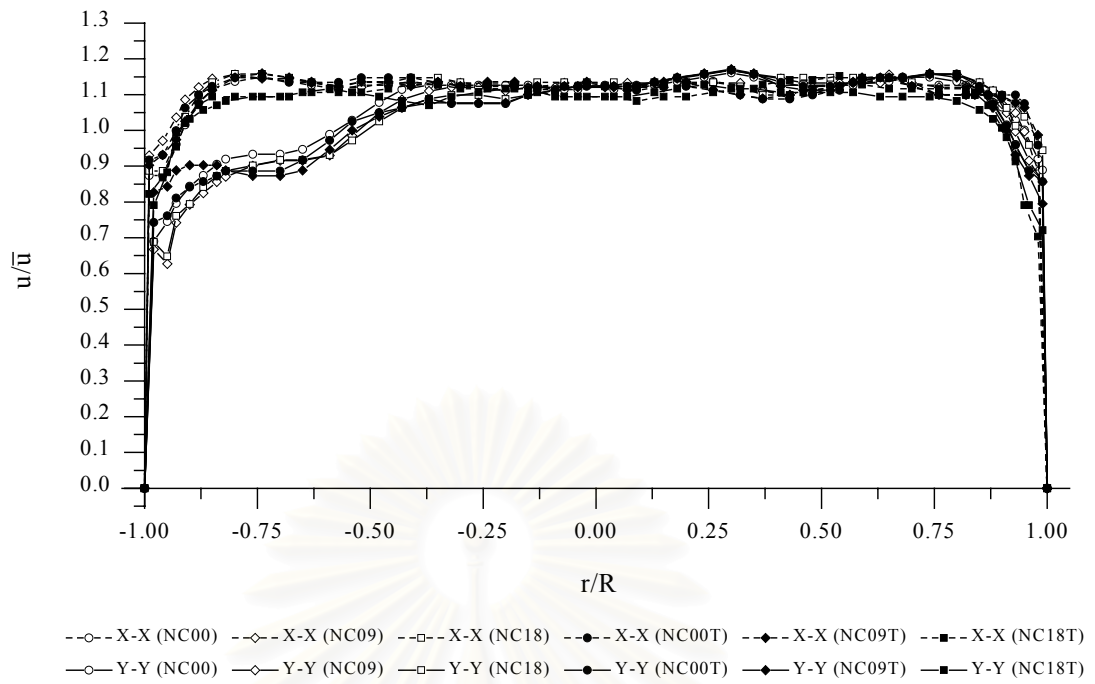
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.24 รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง (S/D = -32.5)

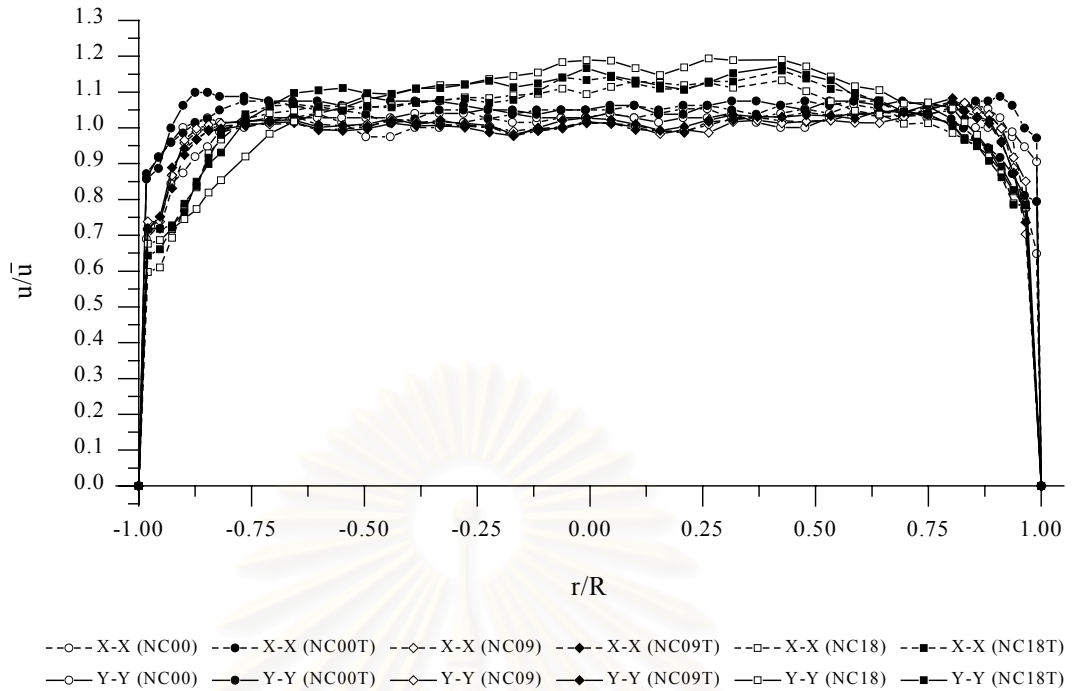


รูปที่ 3.25 รูปร่างความเร็วด้านทางเข้าท่อหมุน (S/D = -32.5) เมื่อ Normalized ด้วยความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางท่อ

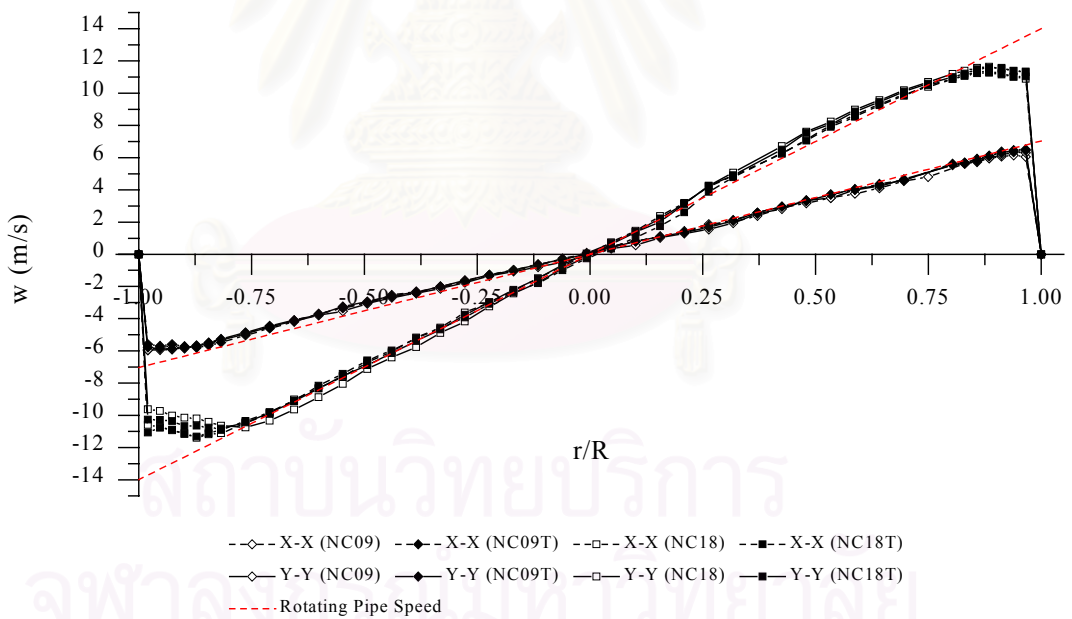


รูปที่ 3.26 รูปร่างความเร็วด้านทางเข้า Orifice (กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

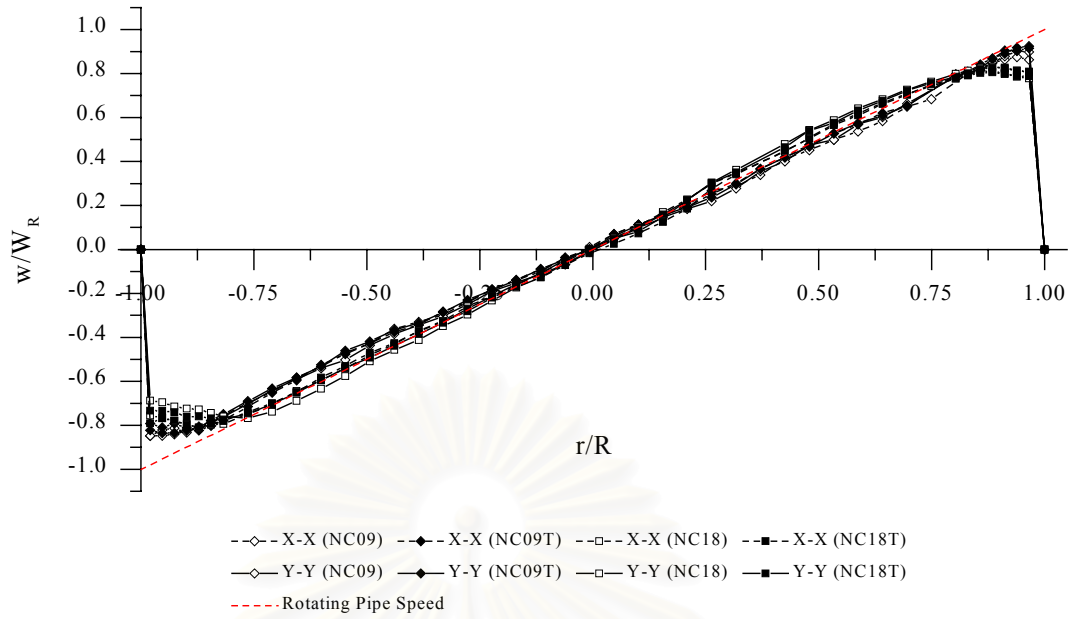


3.27 (ก)

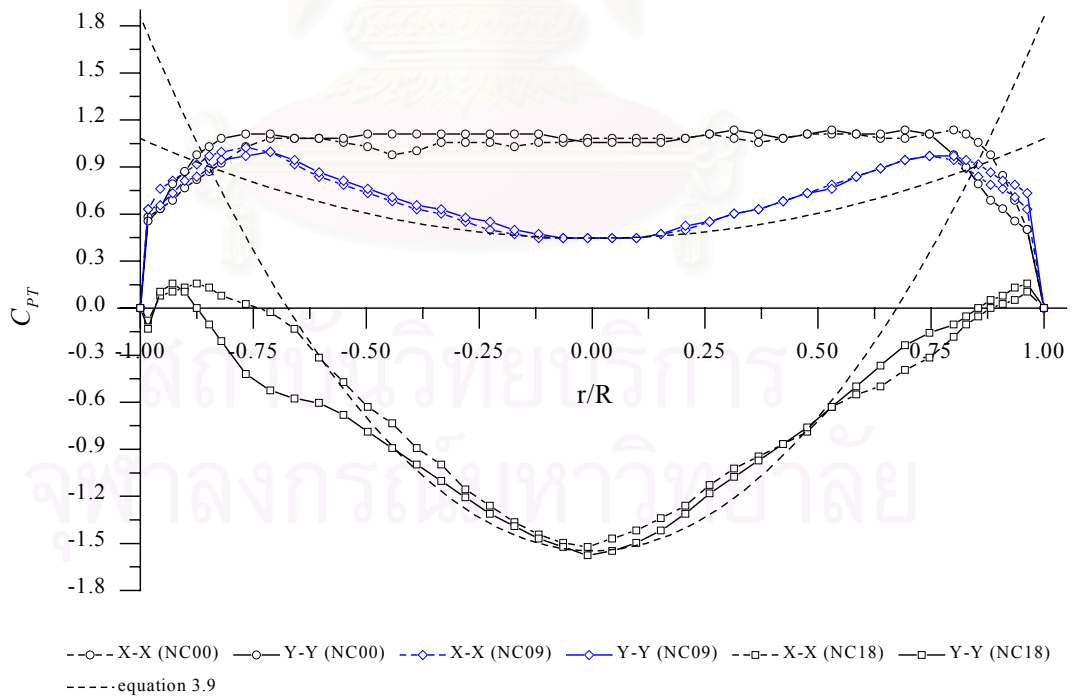


3.27 (ข)

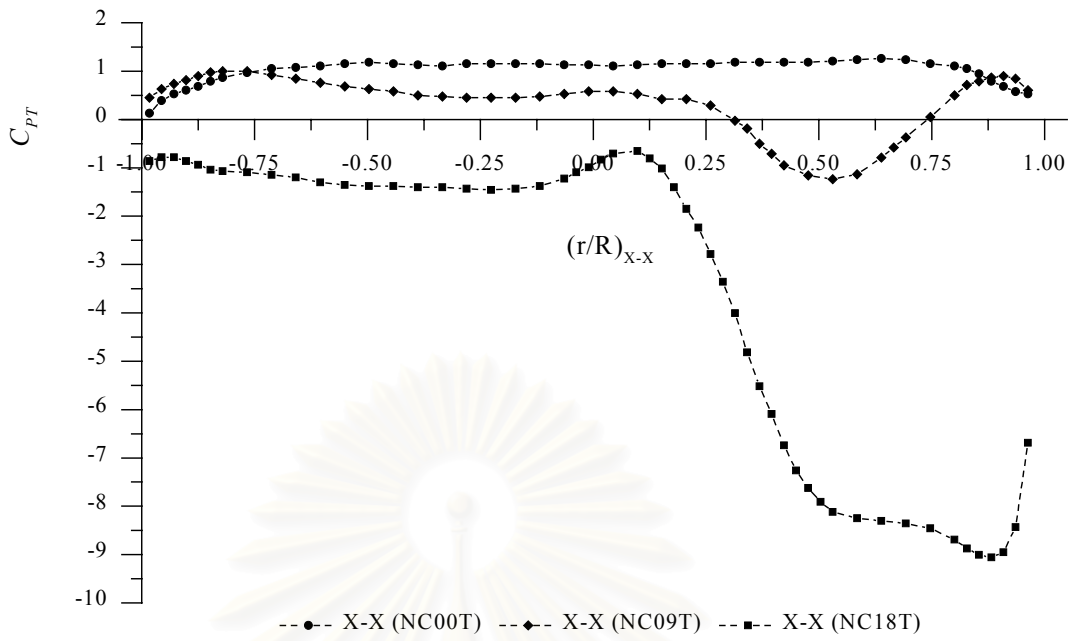
รูปที่ 3.27 รูปร่างความเร็วด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = -1.0$) กรณีการไหลผ่านท่อโค้ง
 (ก) ความเร็วตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวสัมผัส



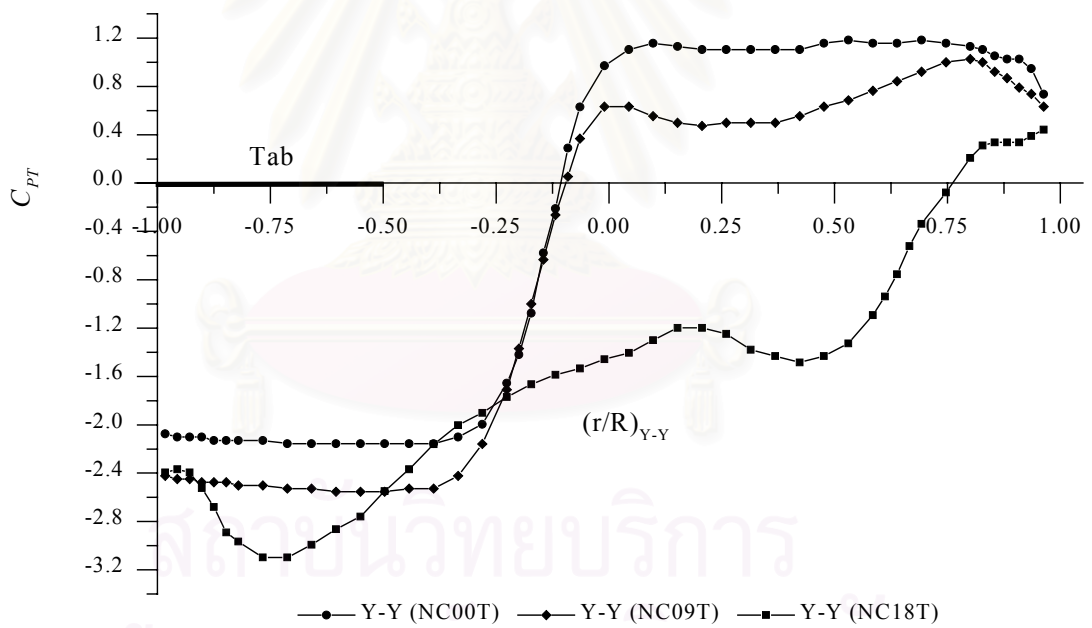
รูปที่ 3.28 รูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = -1.0$) เมื่อ Normalized ด้วยความเร็วผิวสัมผัสท่อหมุน



รูปที่ 3.29 สัมประสิทธิ์ความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = 0.5$) กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง

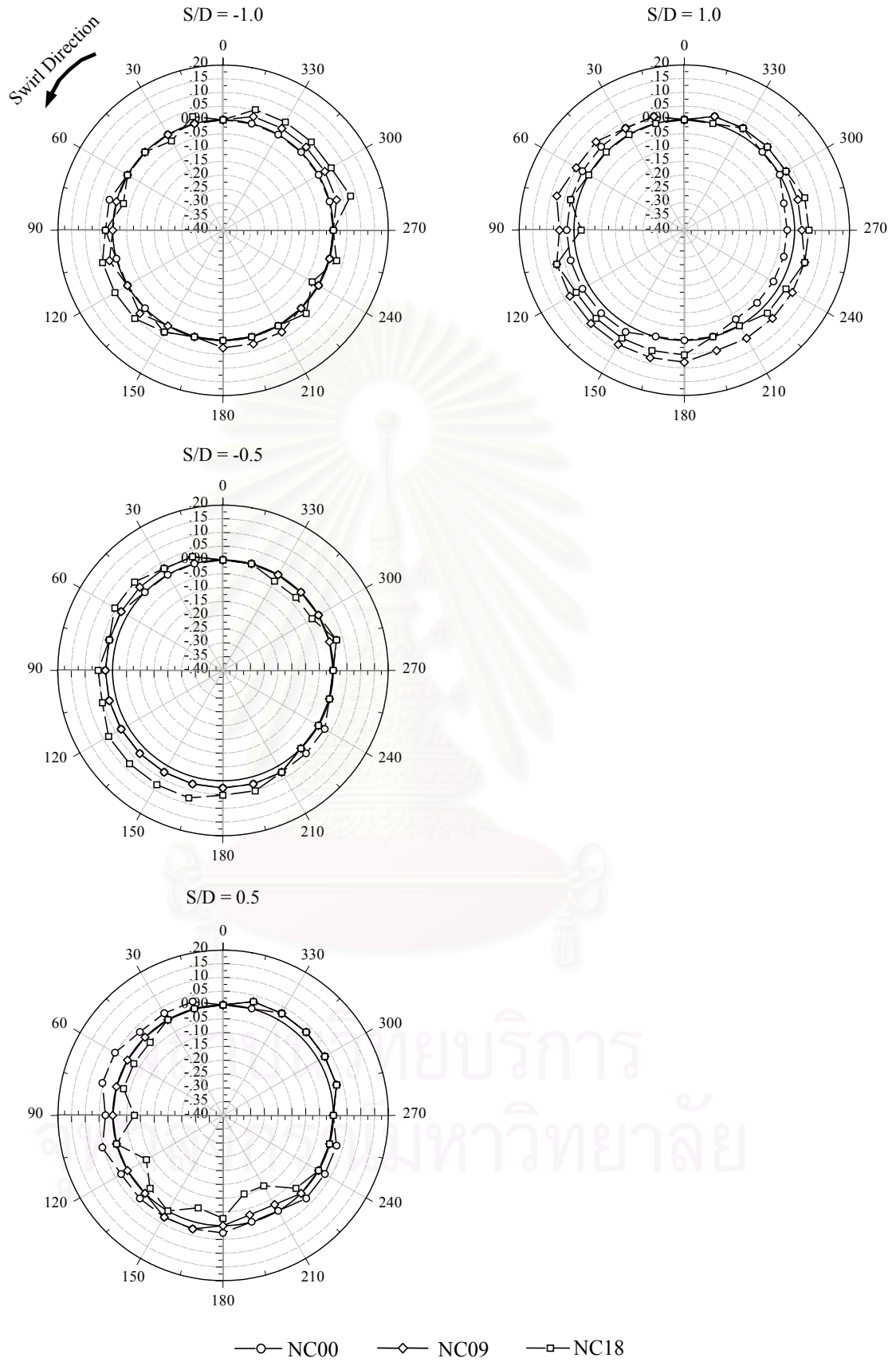


3.30 (ก)

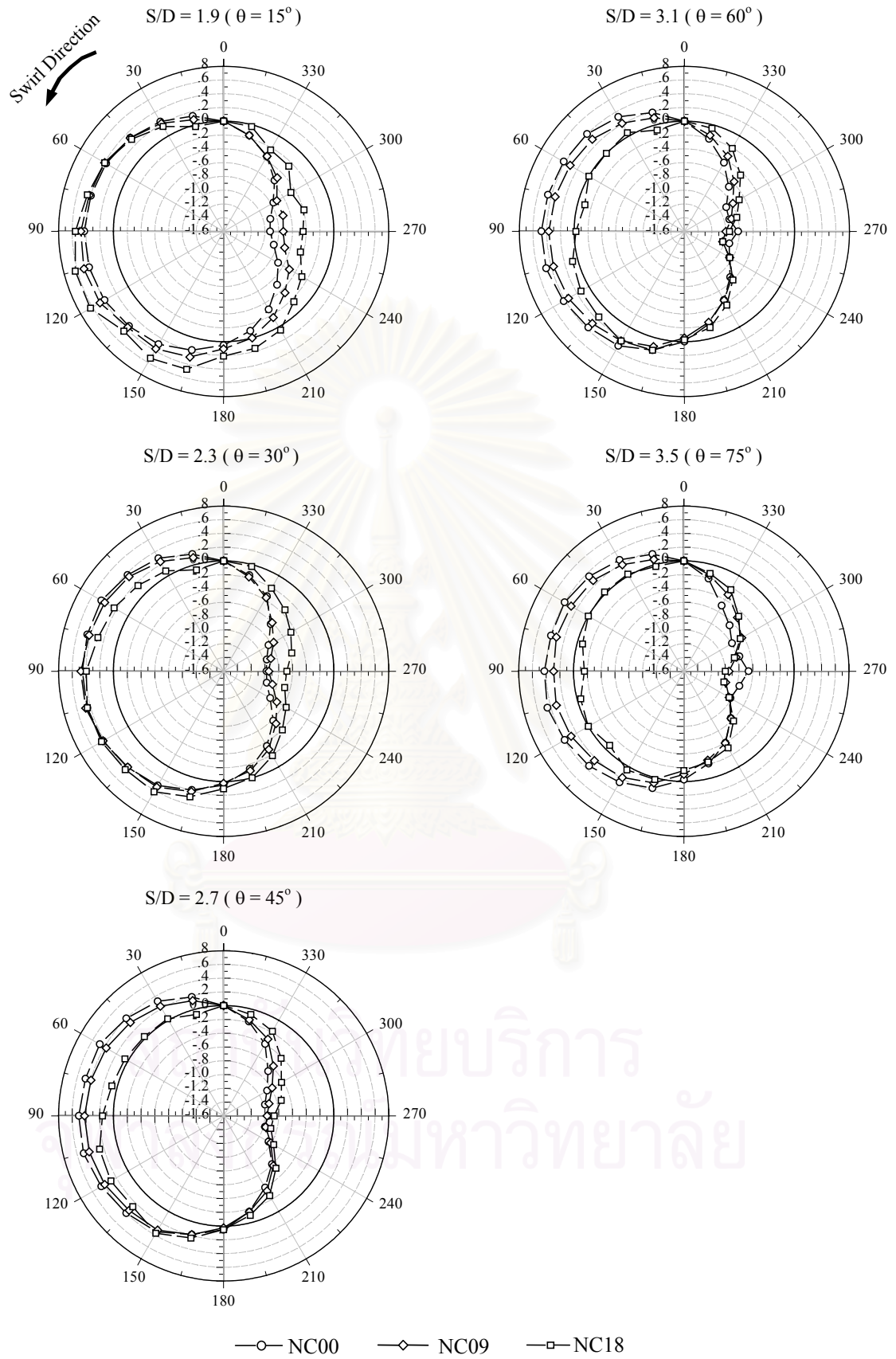


3.30 (ข)

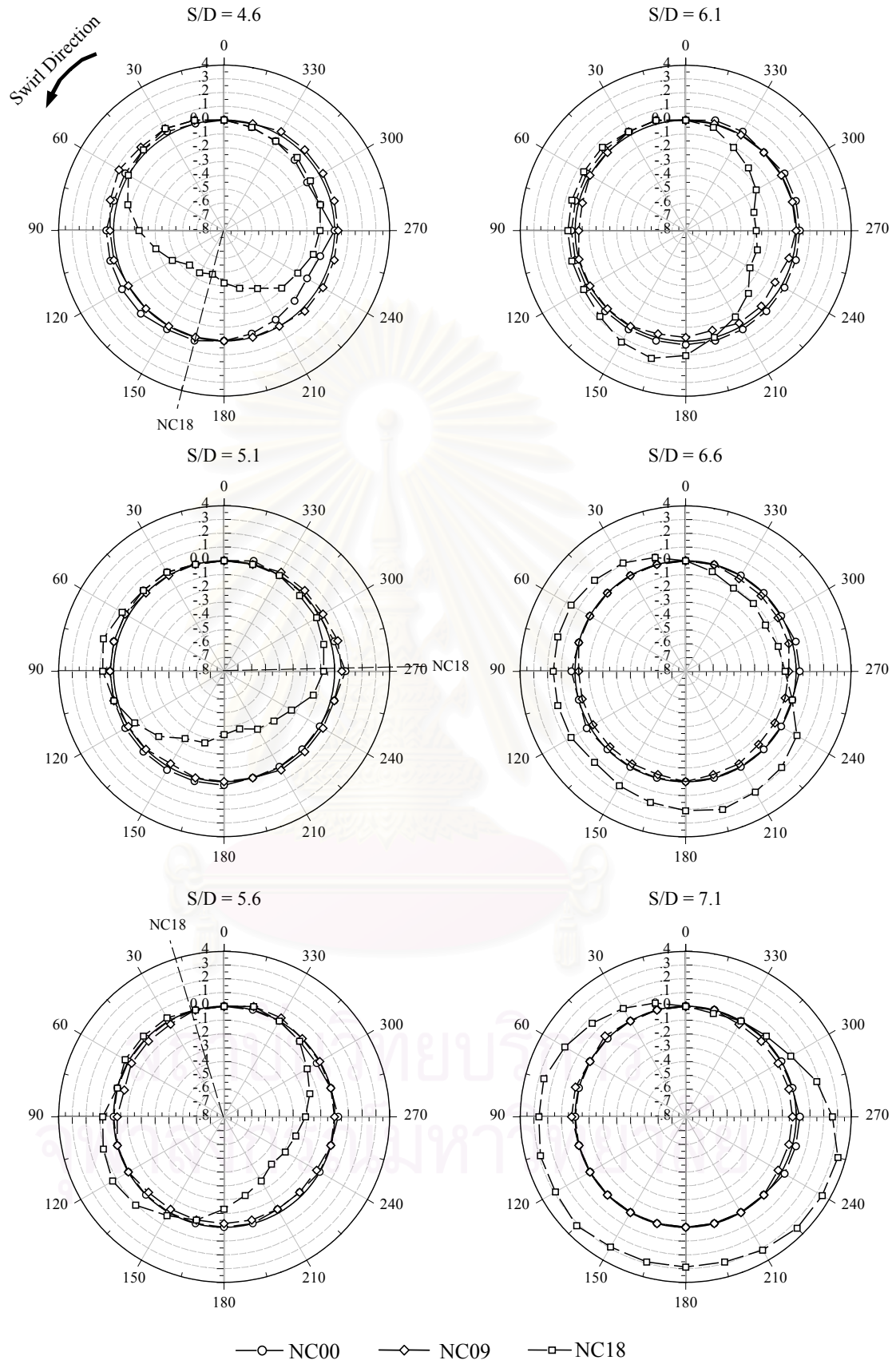
รูปที่ 3.30 สัมประสิทธิ์ความดันรวมด้านทางออกท่อหมุน ($S/D = 0.5$) กรณีติดตั้งแผ่นกีดขวาง
 (ก) แนววัด X-X (ข) แนววัด Y-Y



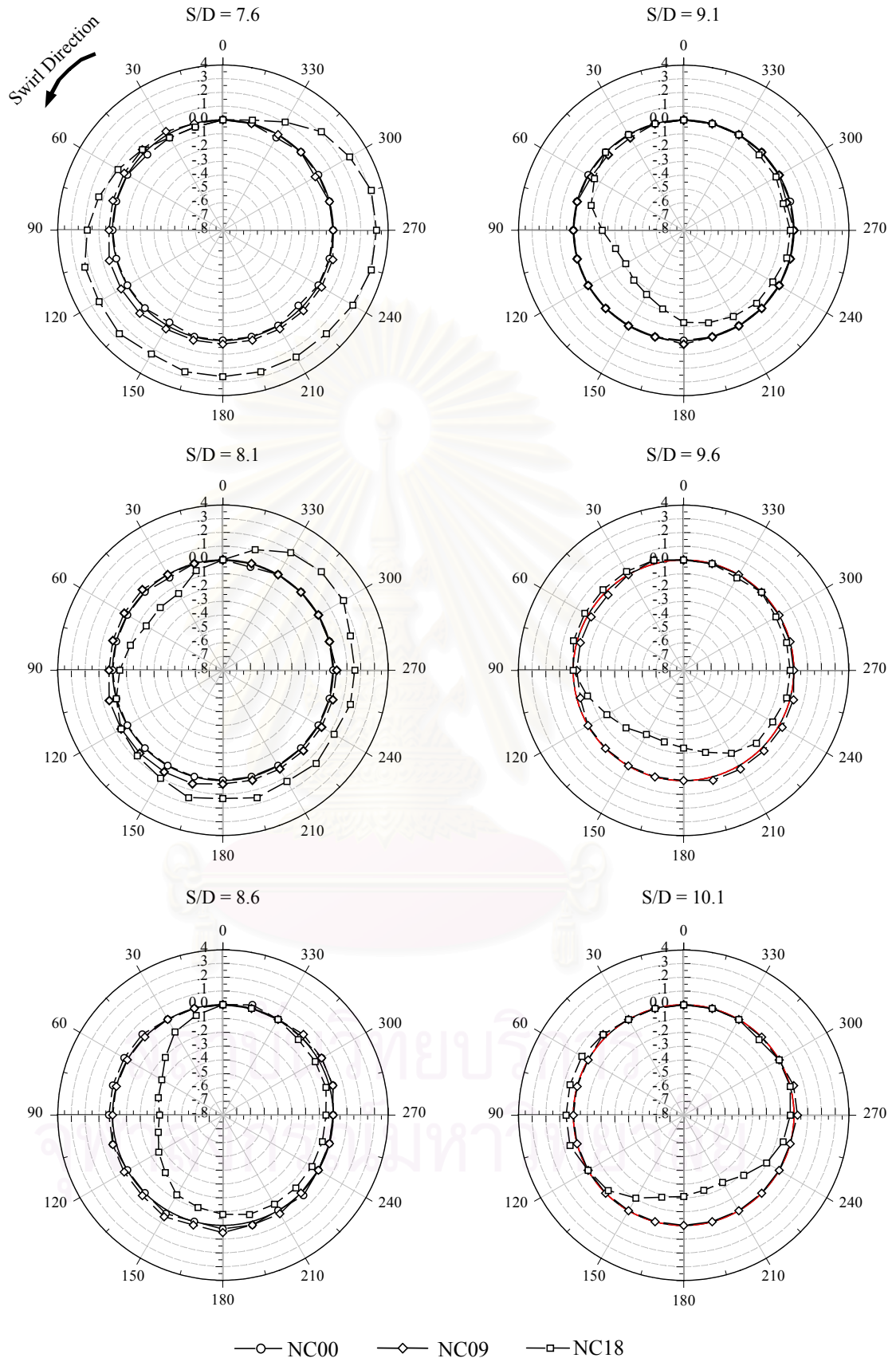
รูปที่ 3.31 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง)



รูปที่ 3.31 (ต่อ)

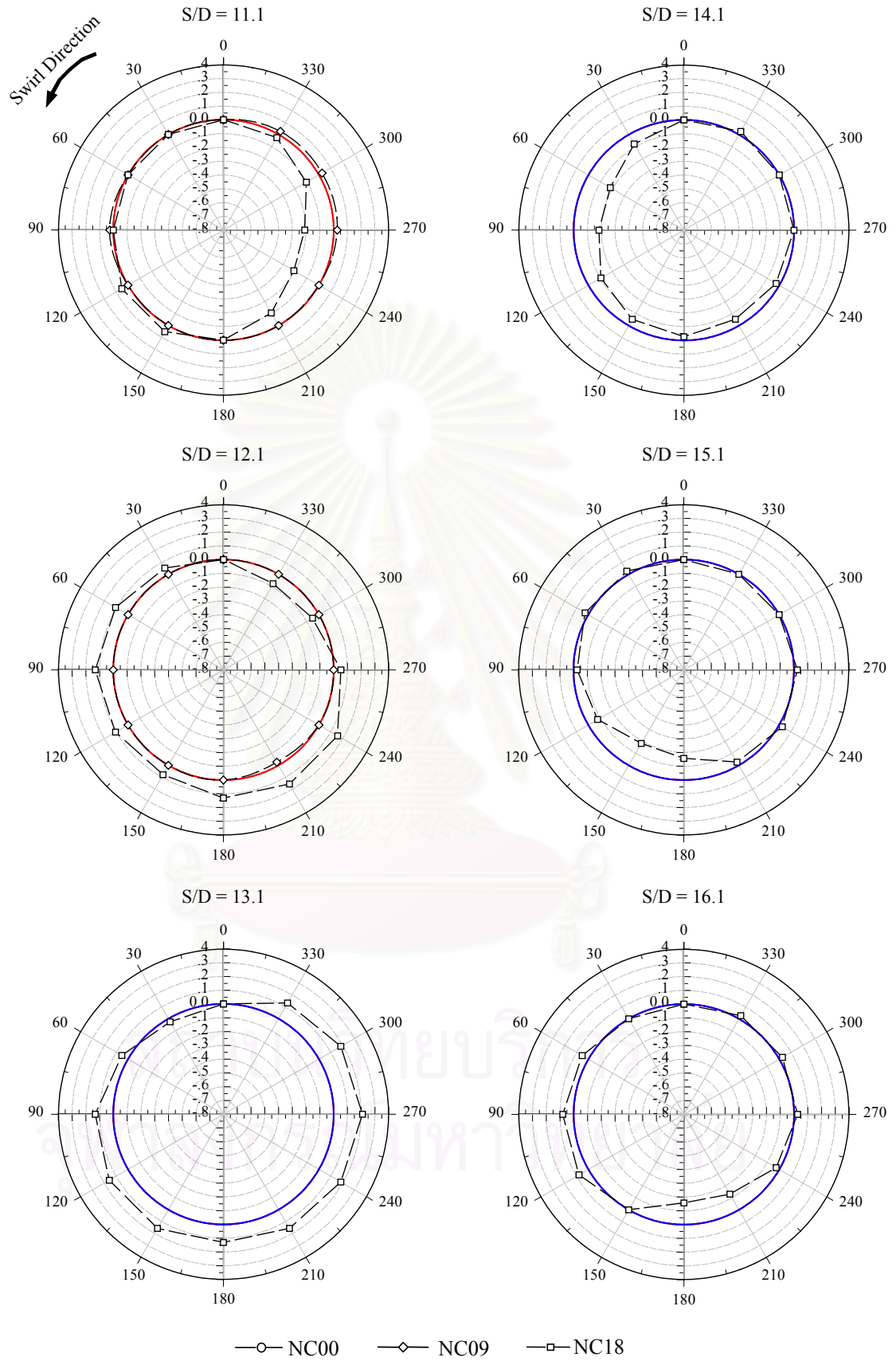


รูปที่ 3.31 (ต่อ)



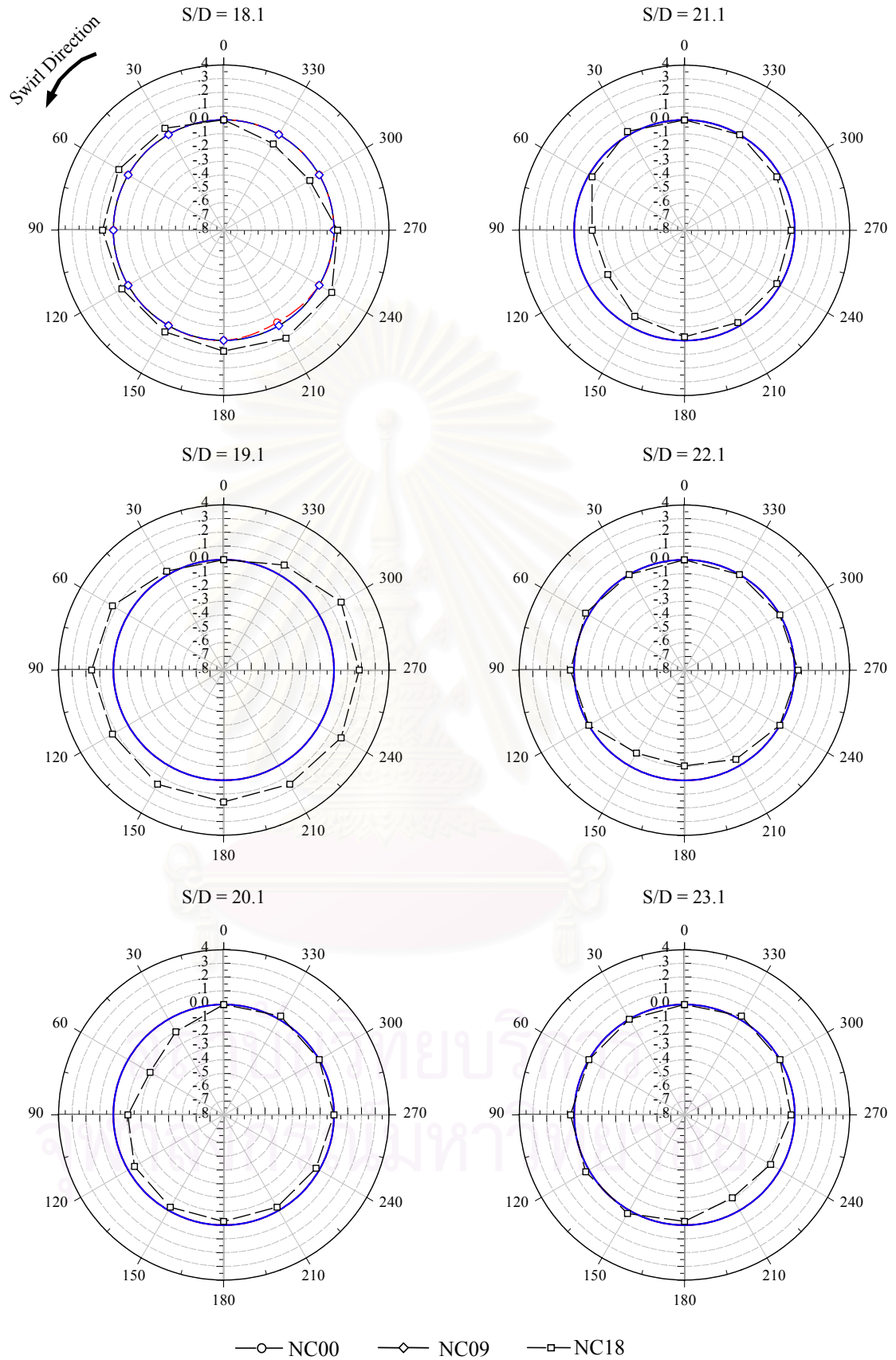
รูปที่ 3.31 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นที่บแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



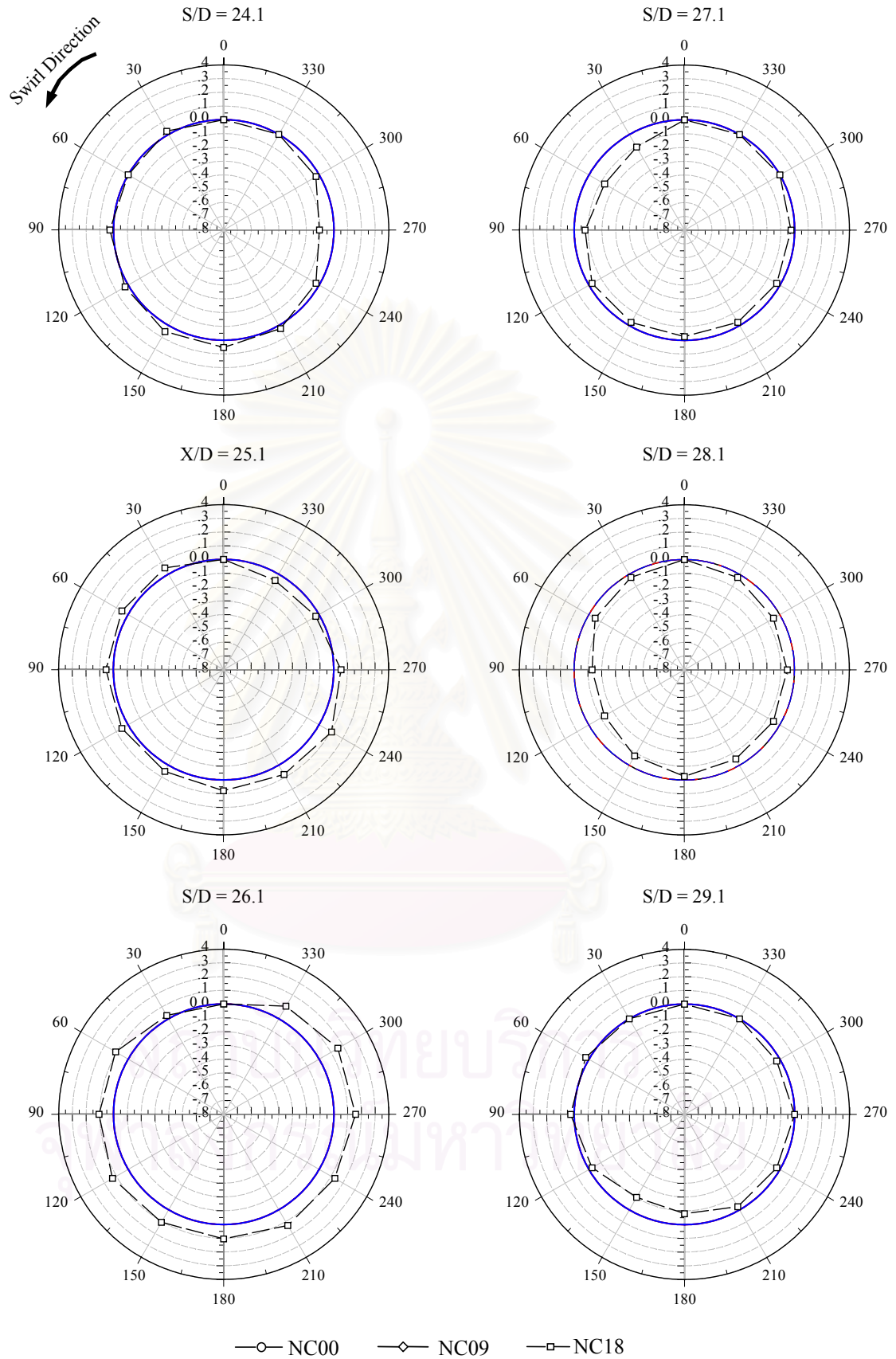
รูปที่ 3.31 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



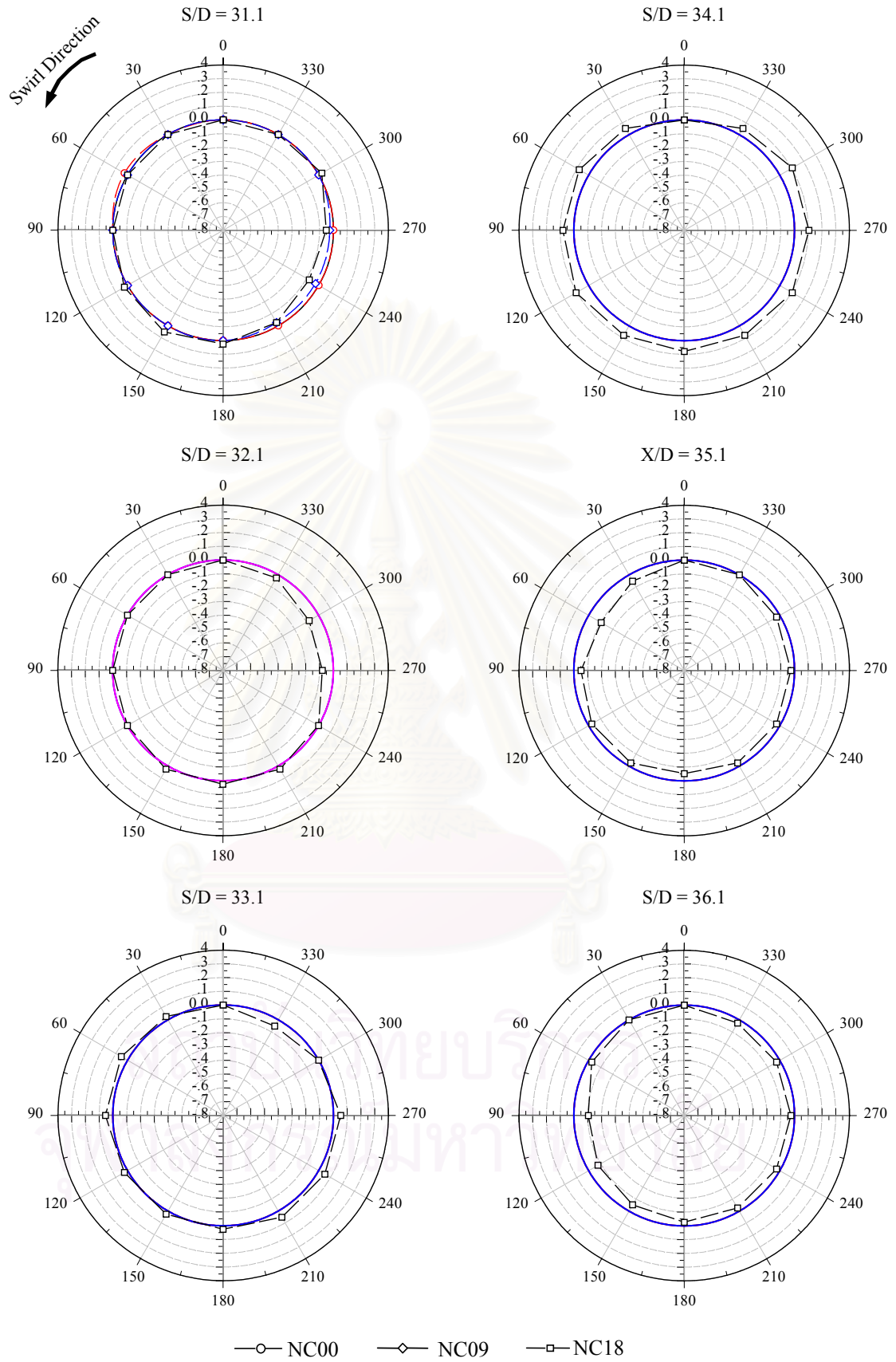
รูปที่ 3.31 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



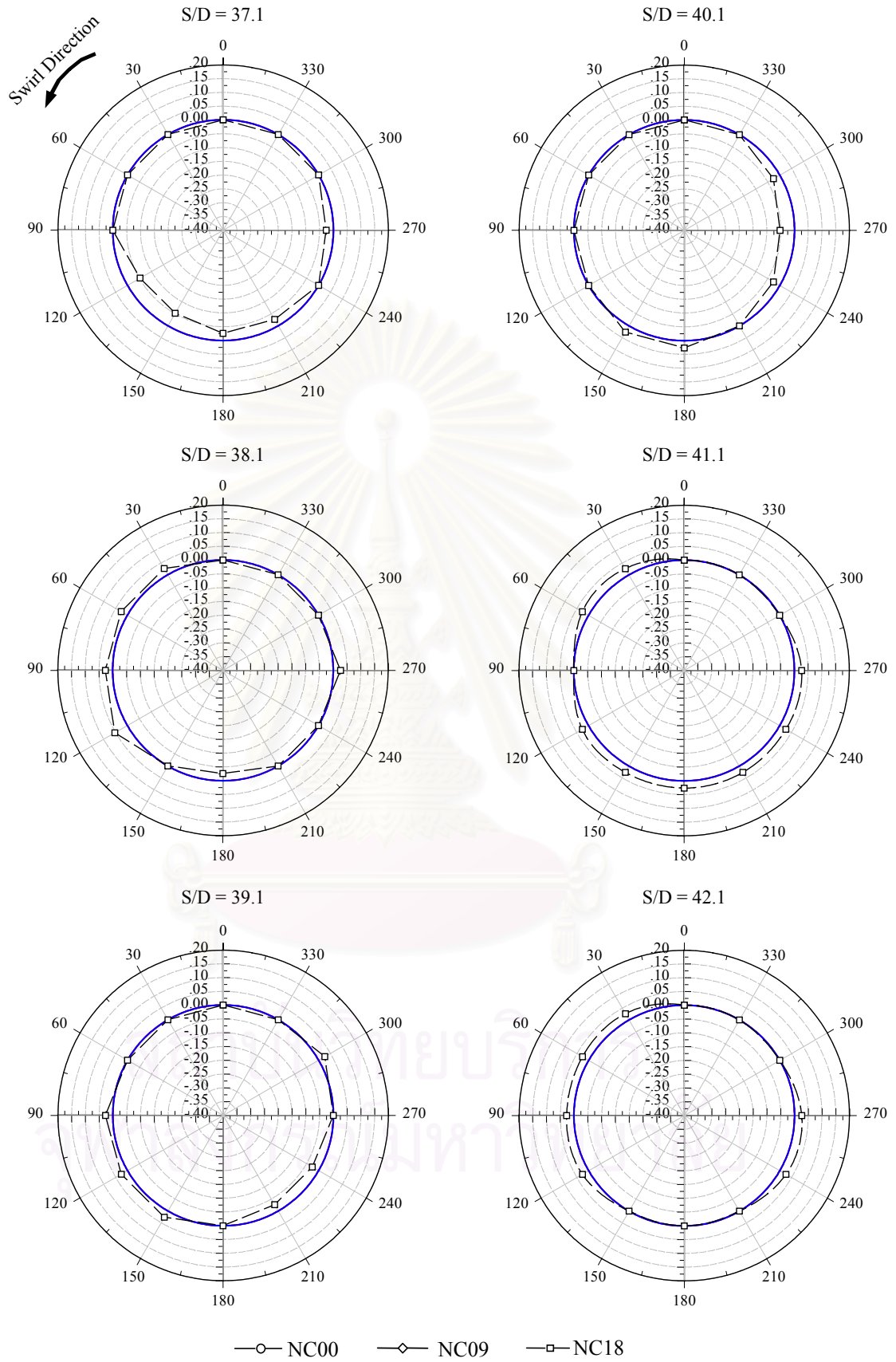
รูปที่ 3.31 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



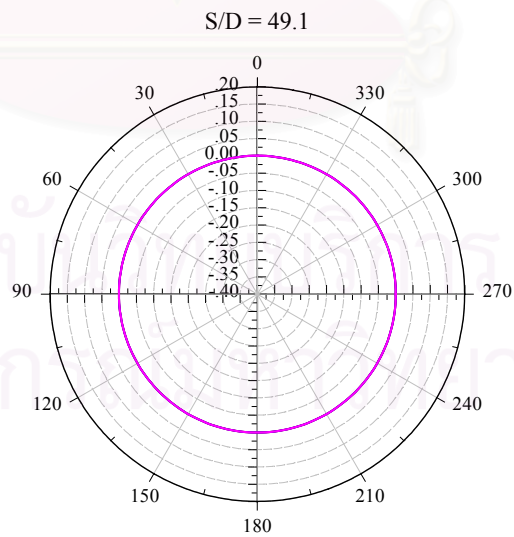
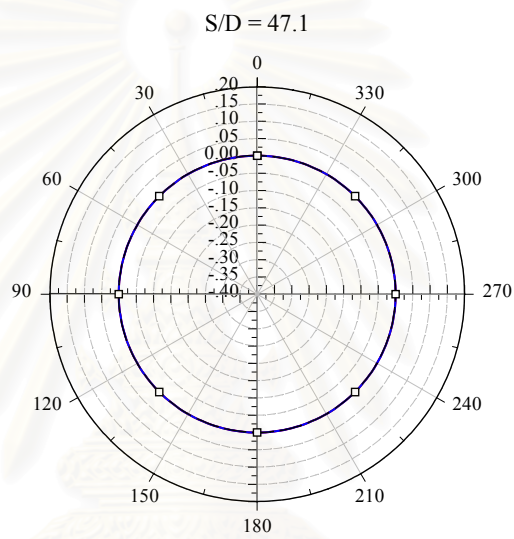
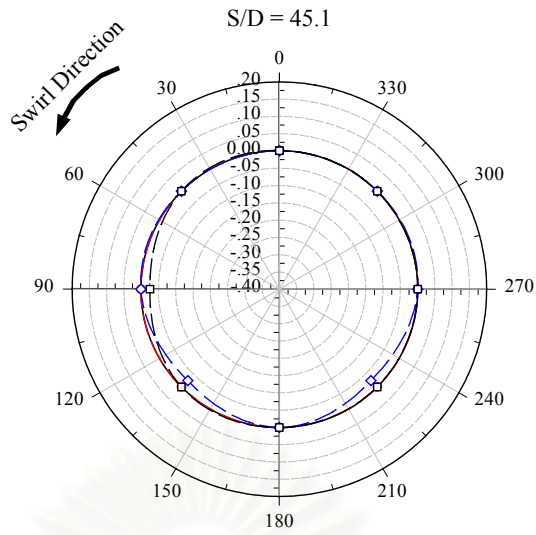
รูปที่ 3.31 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



รูปที่ 3.31 (ต่อ)

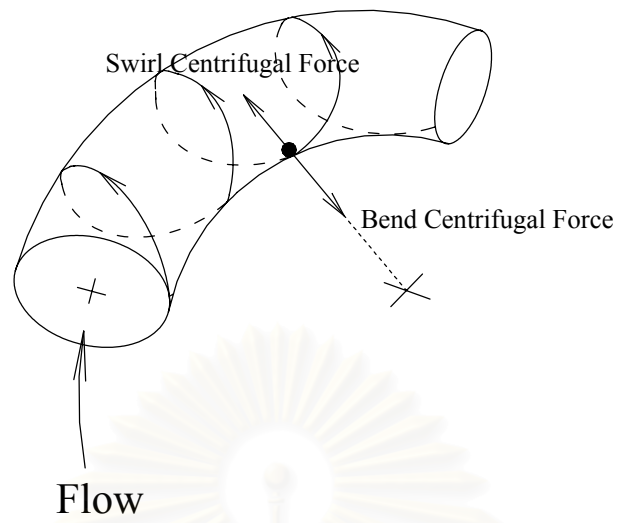
(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



—○— NC00 —◇— NC09 —□— NC18

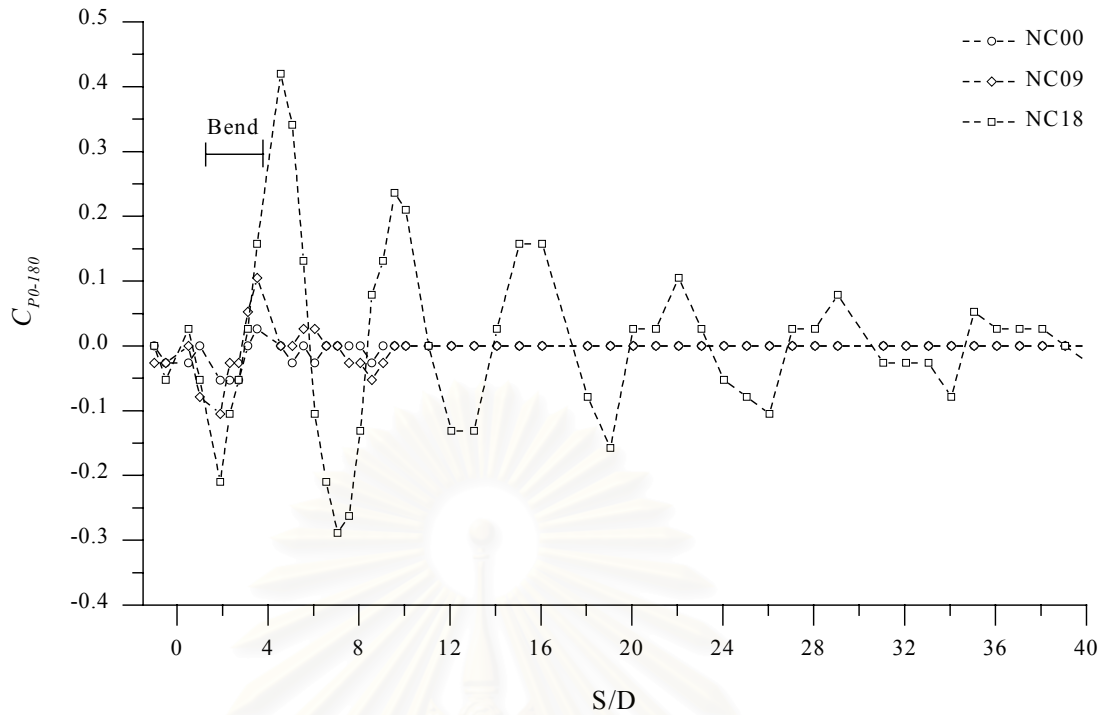
รูปที่ 3.31 (ต่อ)

(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\mu = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)

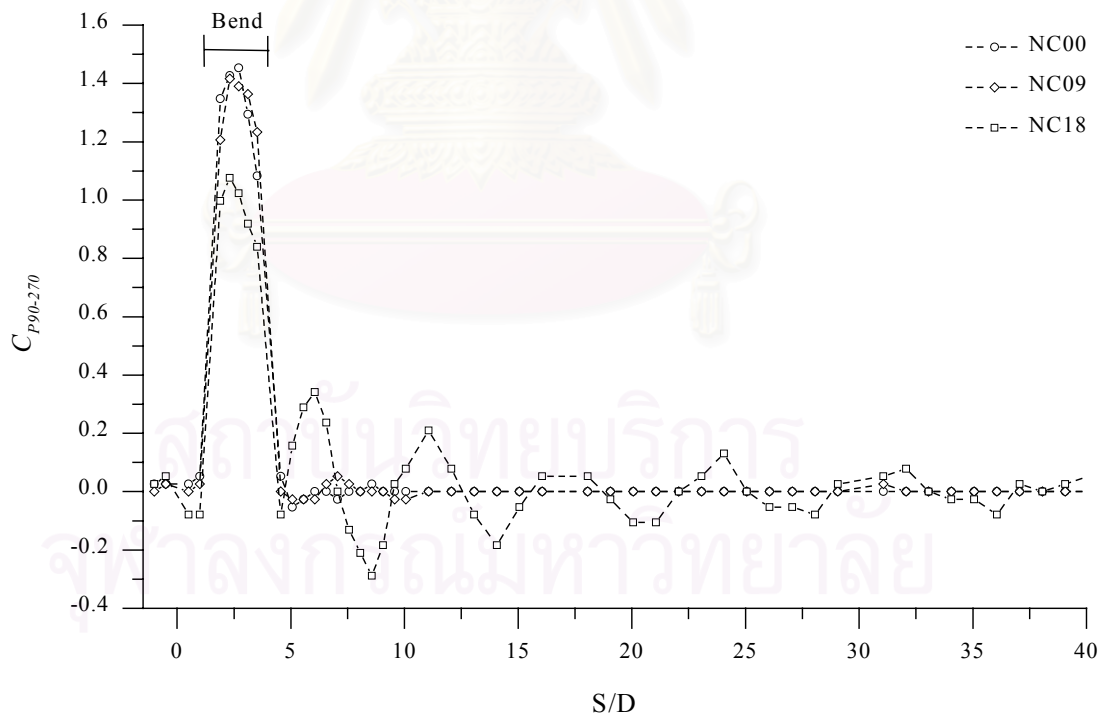


รูปที่ 3.32 ทิศทางแรงสู่ศูนย์กลางของการไหลแบบหมุนวนในท่อโค้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

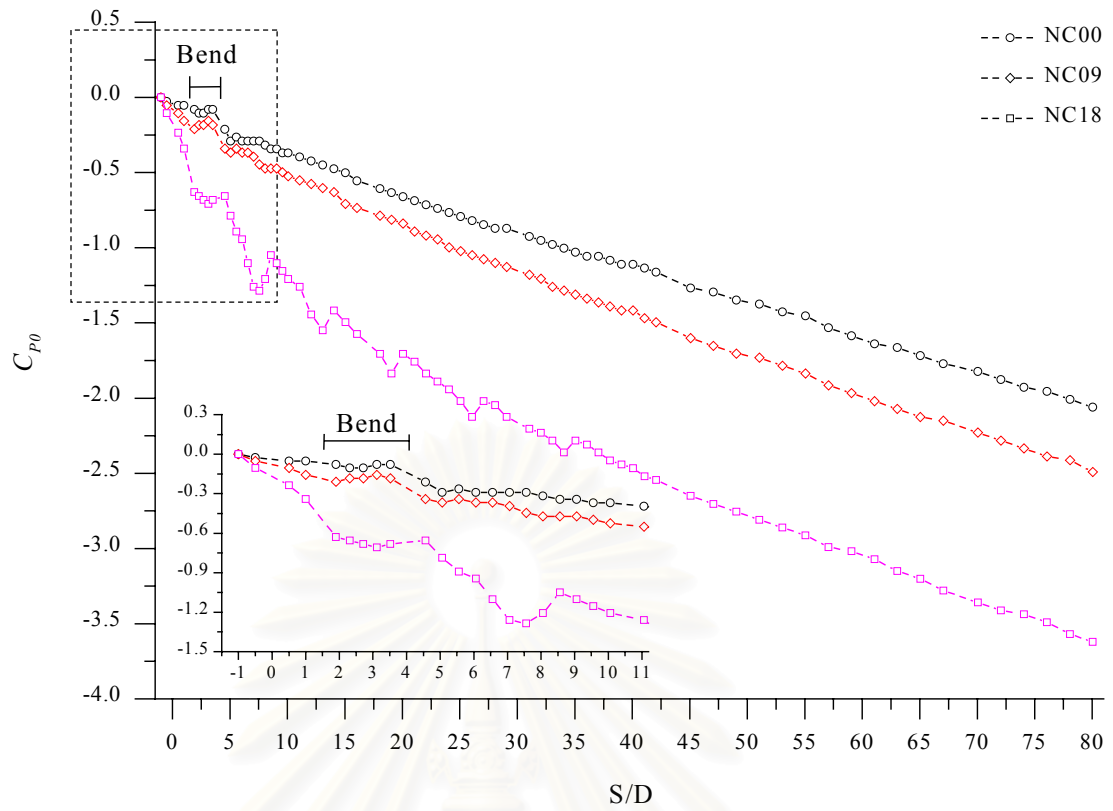


3.33 (ก)

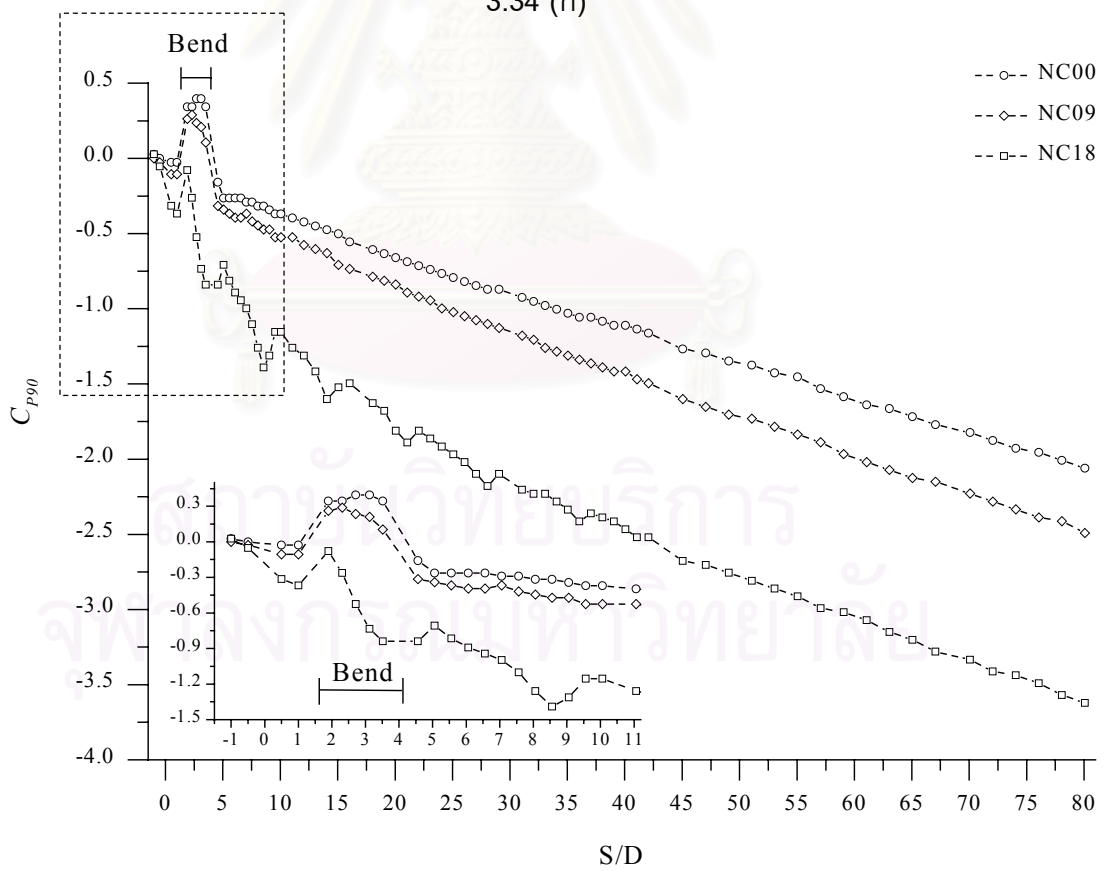


3.33 (ข)

รูปที่ 3.33 การกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล
(กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง) (ก) C_{P0-180} (ข) $C_{P90-270}$



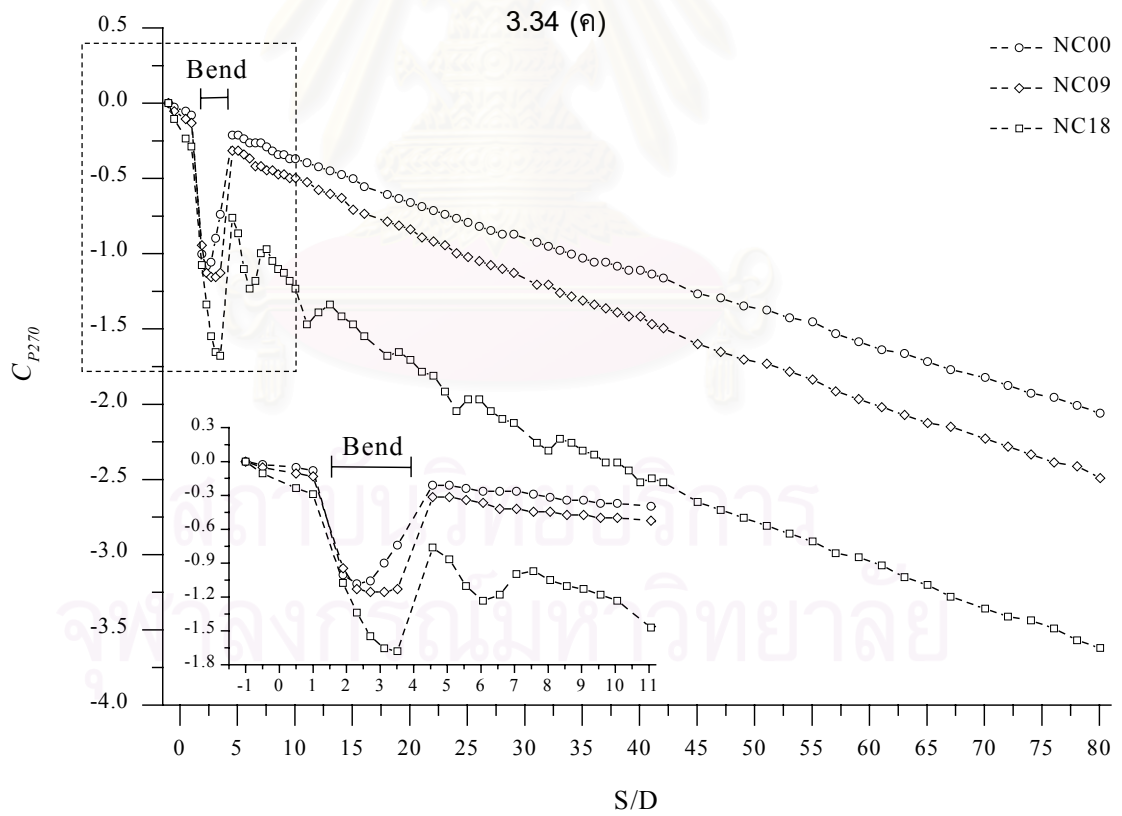
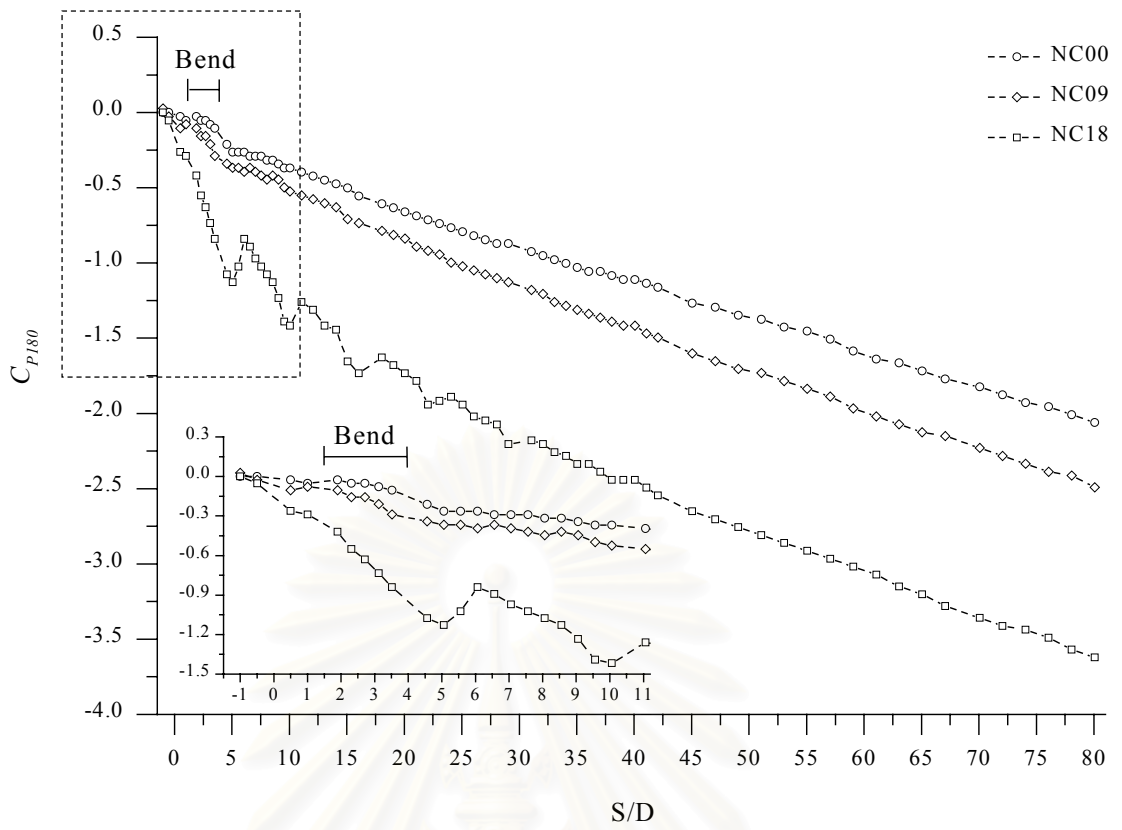
3.34 (ก)



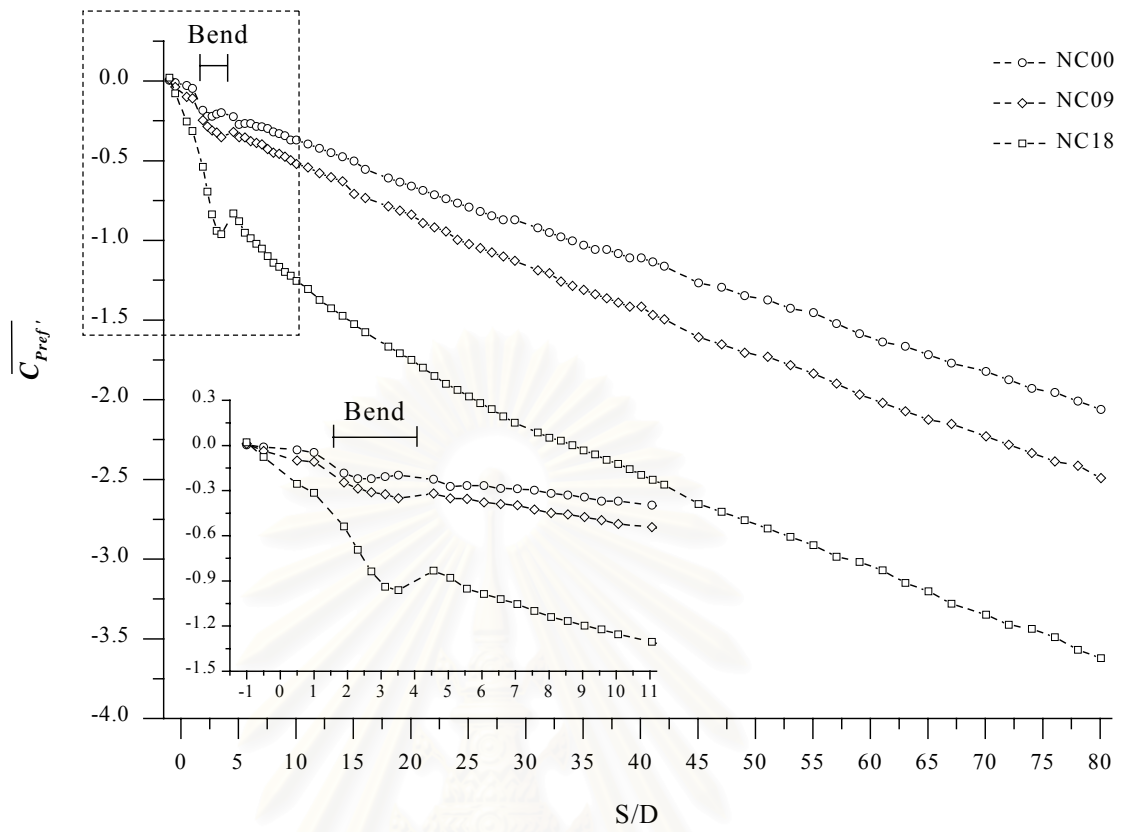
3.34 (ข)

รูปที่ 3.34 การกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณีไม่ติดแผ่นกีดขวาง)

(ก - ง) $C_{p\psi}$; C_{p0} , C_{p90} , C_{p180} และ C_{p270} (จ) $\overline{C_{Pref'}}$



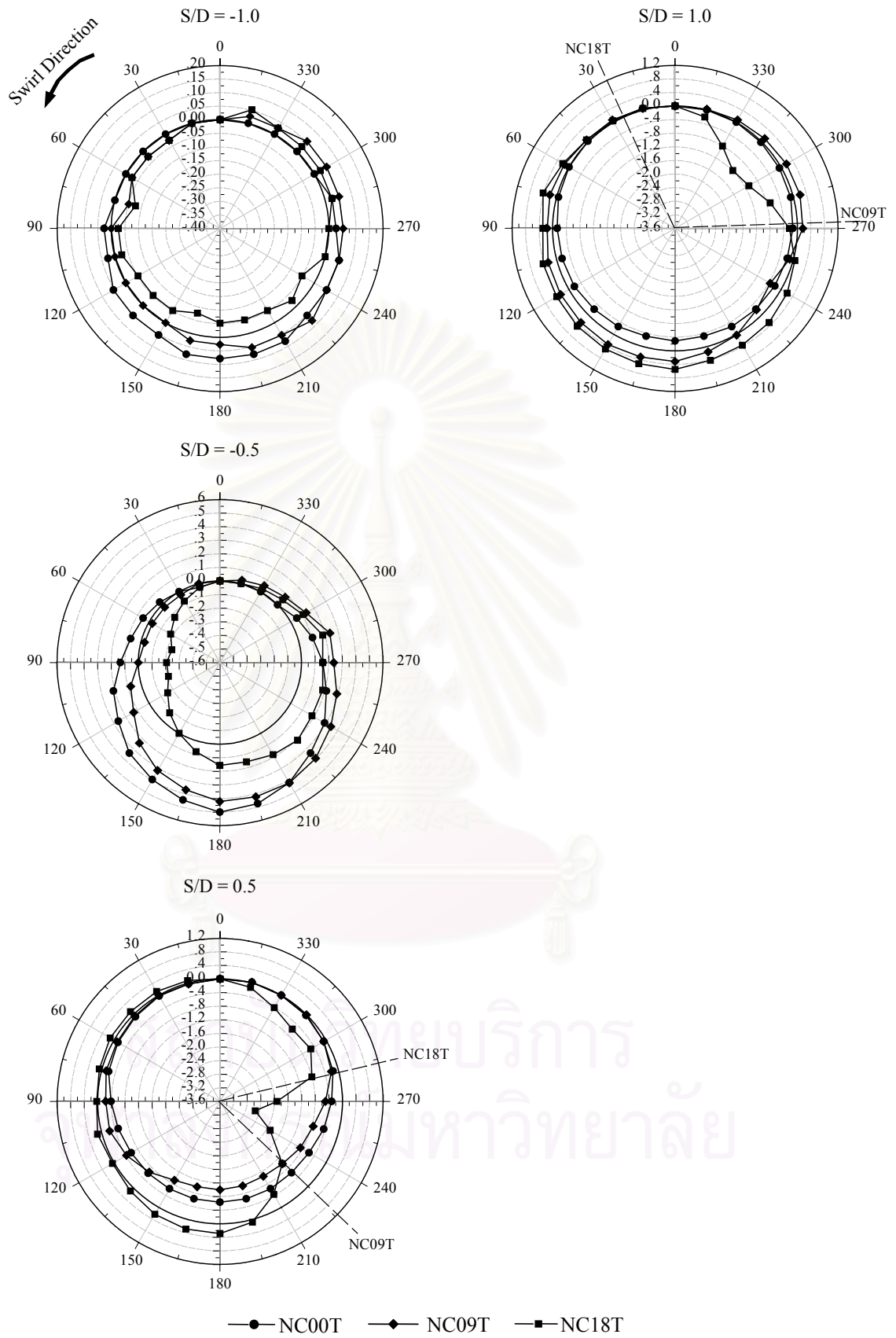
รูปที่ 3.34 (ต่อ)



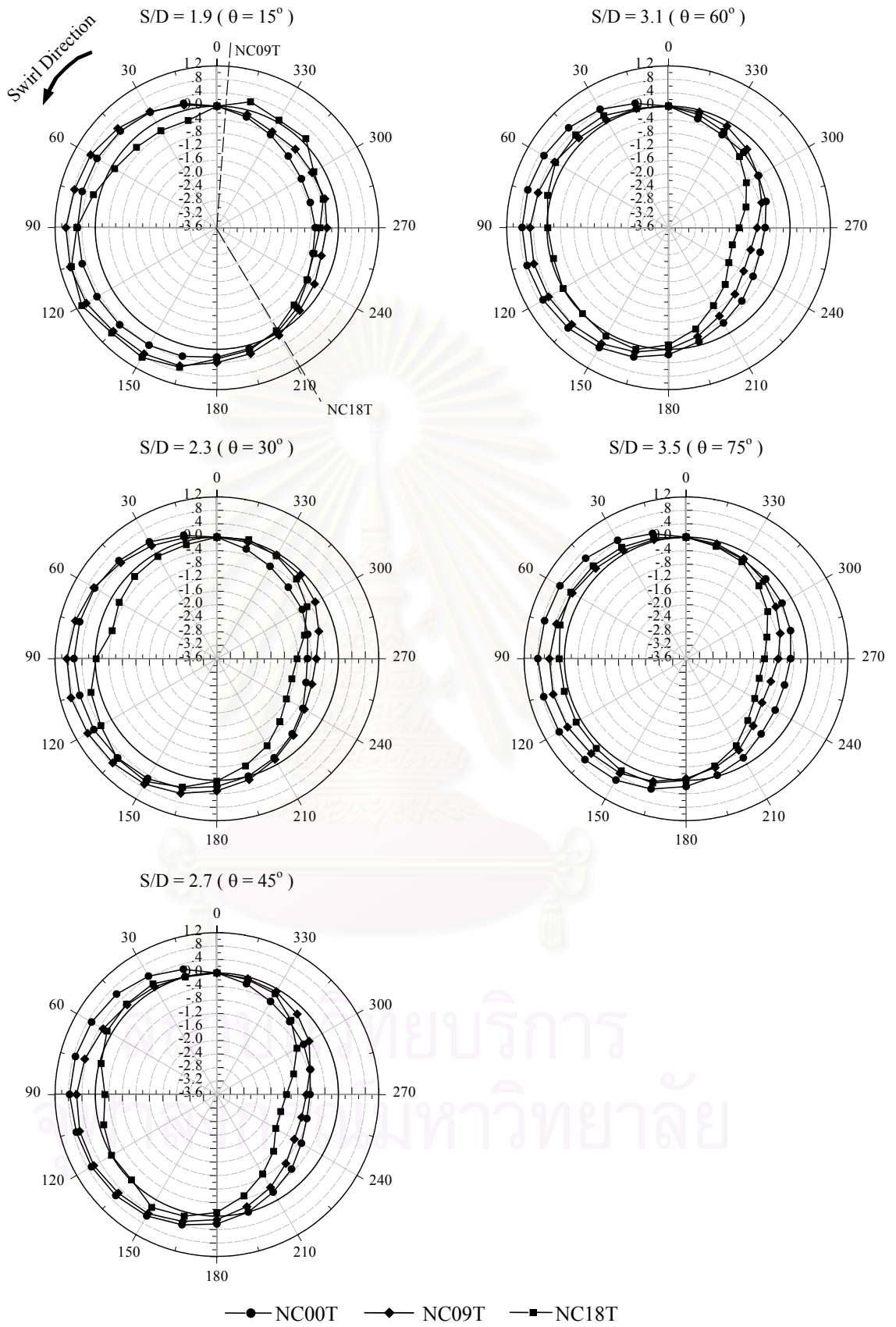
3.34 (จ)

รูปที่ 3.34 (ต่อ)

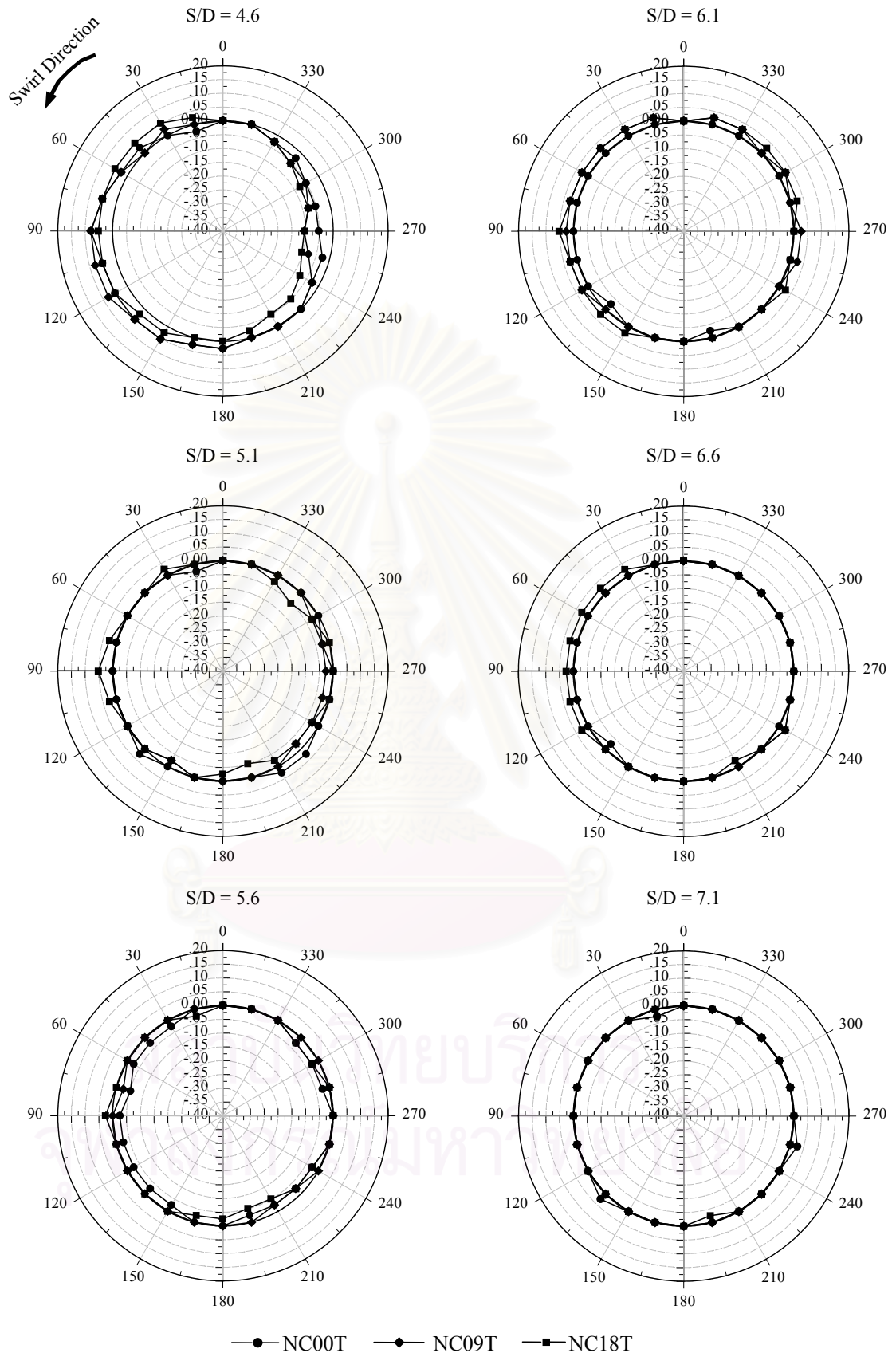
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



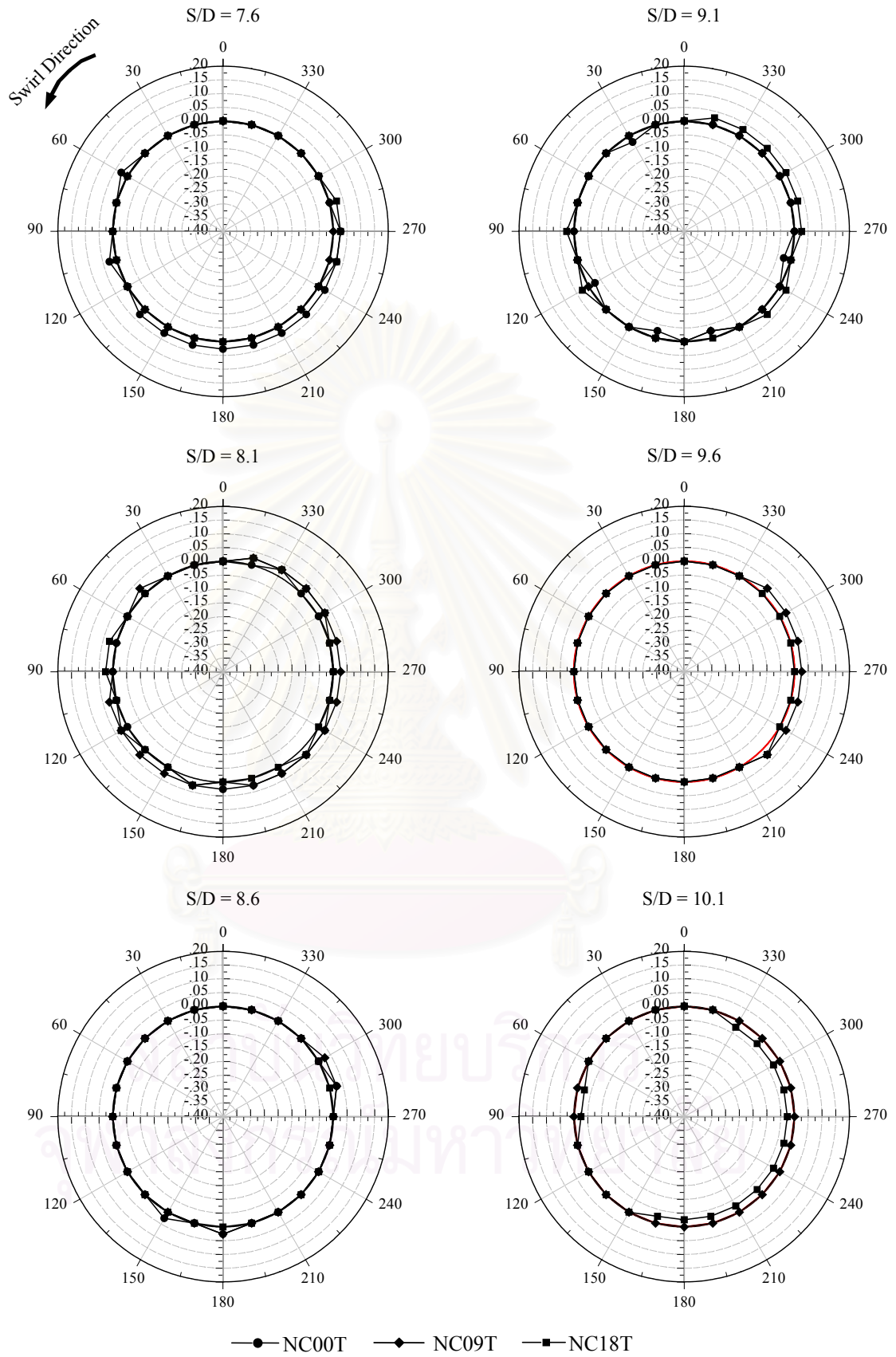
รูปที่ 3.35 การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด $C_{p,ref}$ (กรณีติดแผ่นกีดขวาง) (มีการเปลี่ยนสเกลกราฟจาก [-0.6-0.6] ที่ $S/D = -0.5$ เป็น [-3.6-1.2] ที่ $S/D = 0.5$)



รูปที่ 3.35 (ต่อ)

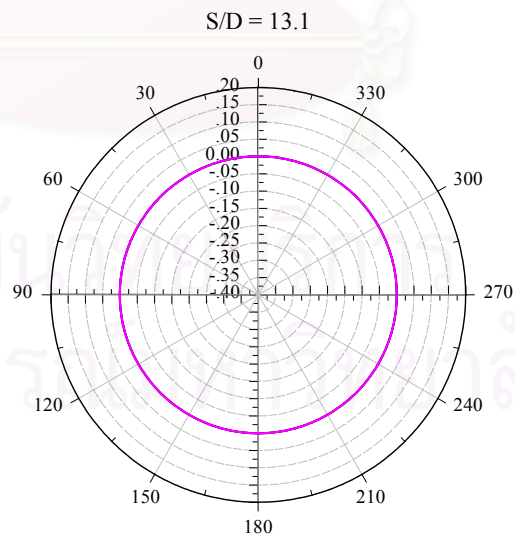
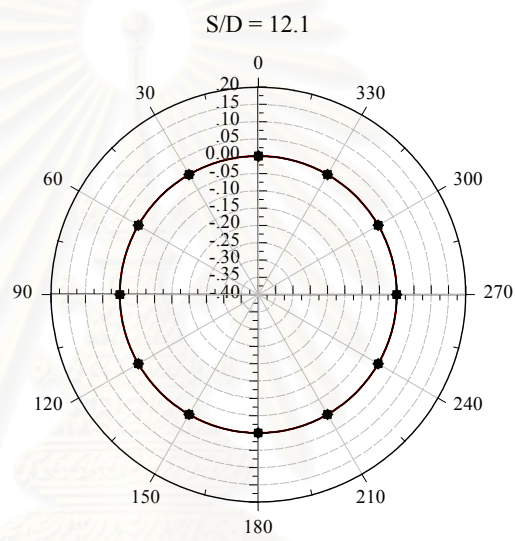
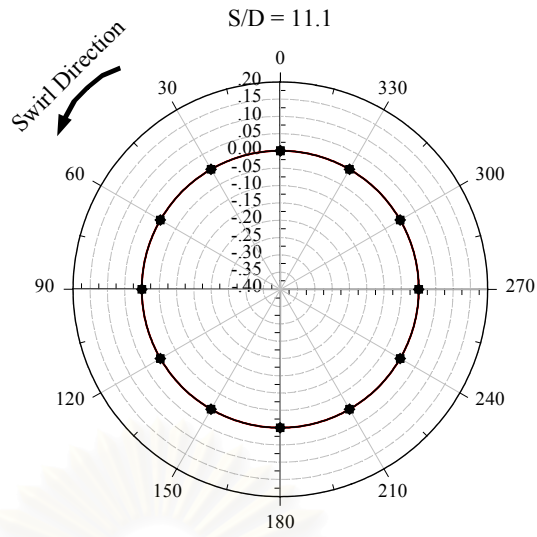


รูปที่ 3.35 (ต่อ)



รูปที่ 3.35 (ต่อ)

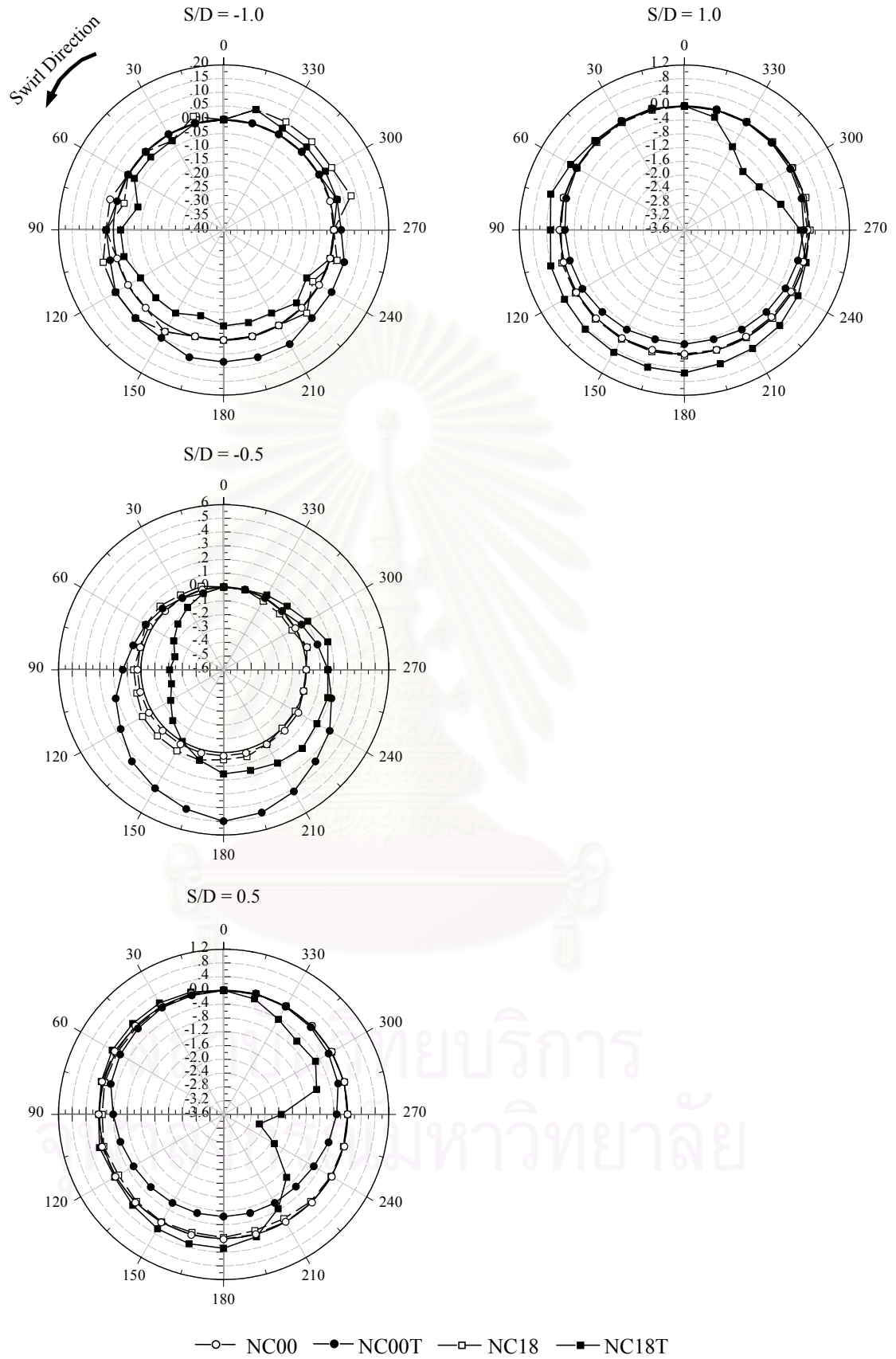
(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



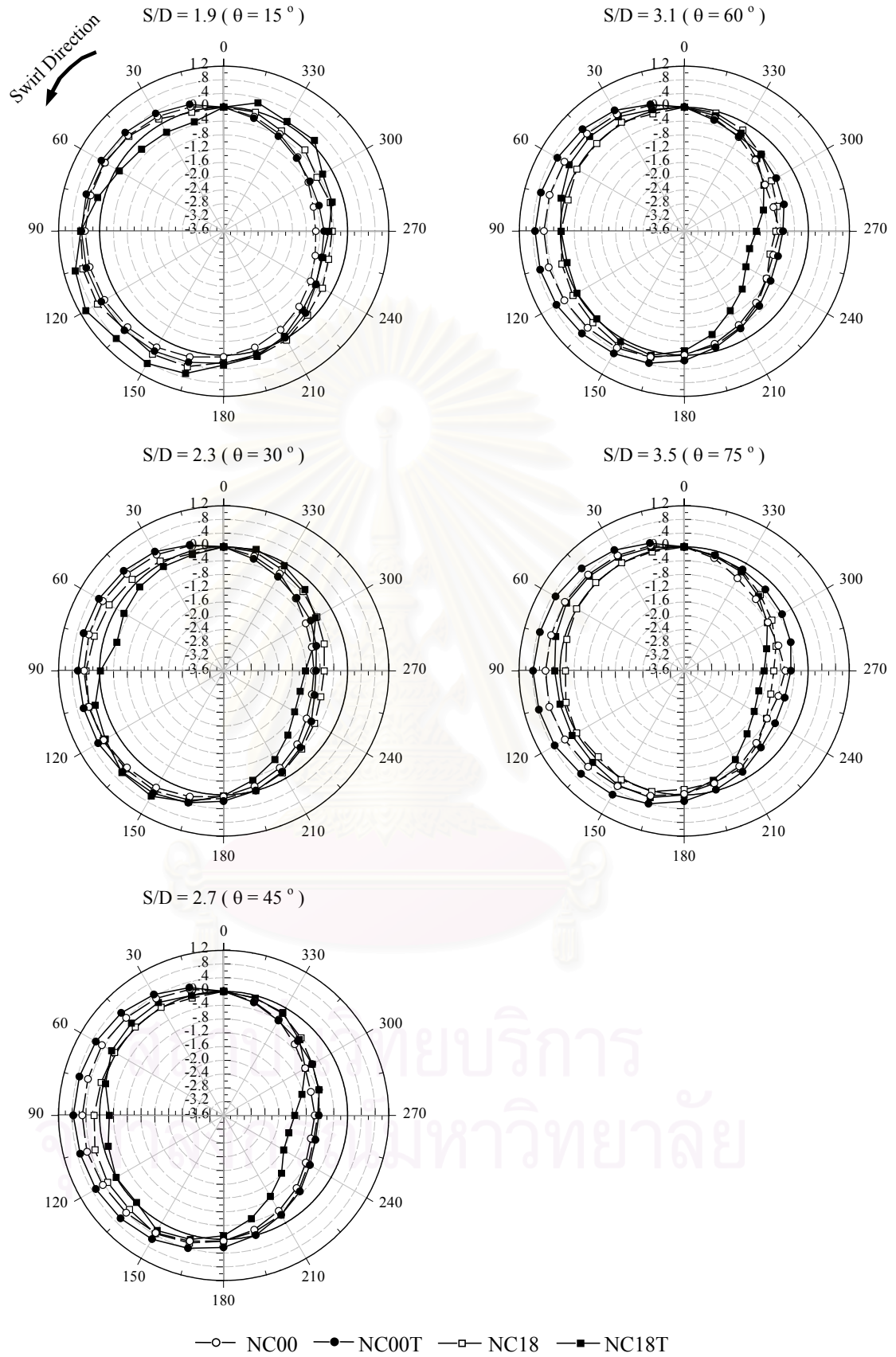
—●— NC00T —◆— NC09T —■— NC18T

รูปที่ 3.35 (ต่อ)

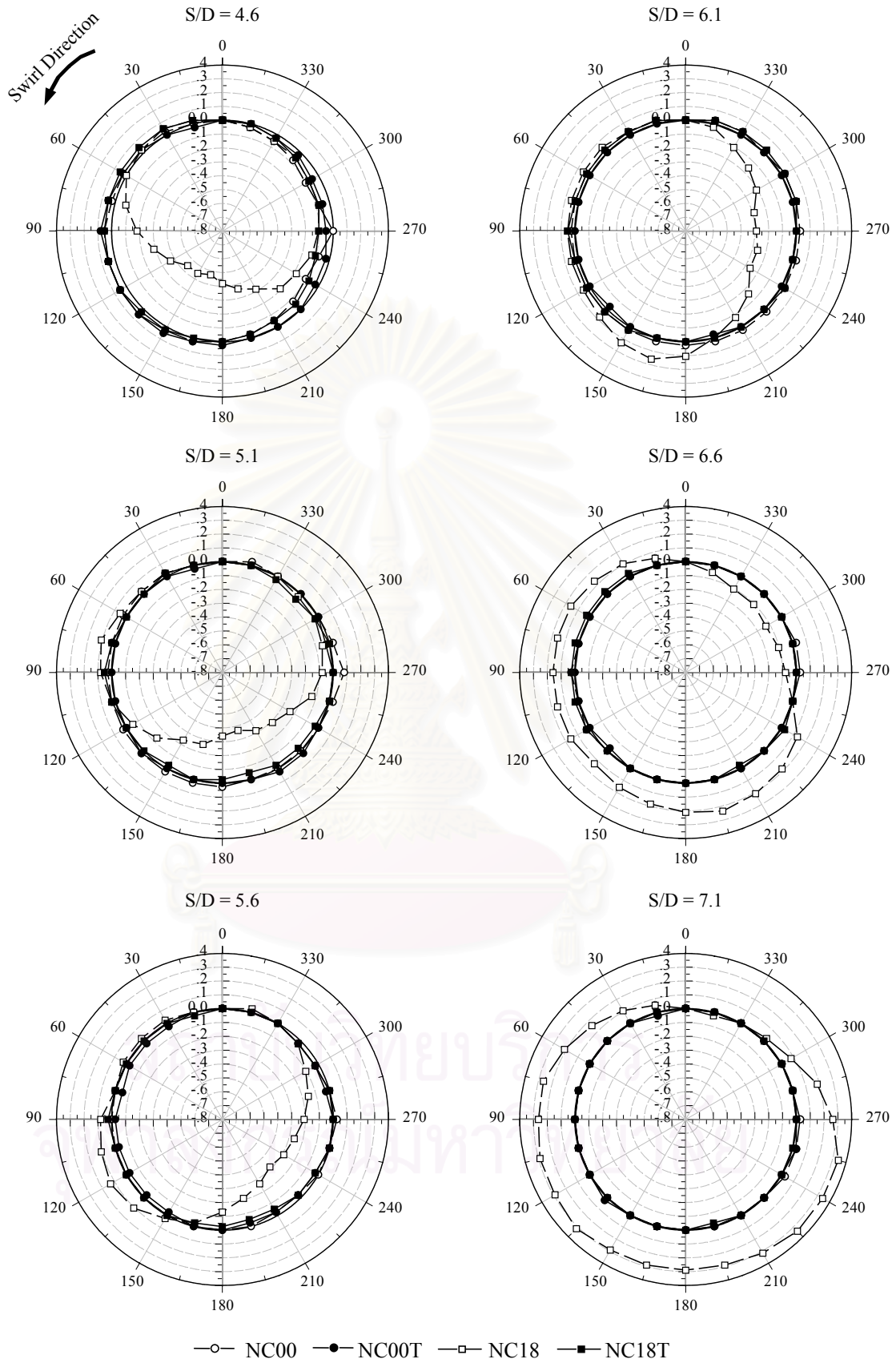
(หมายเหตุ : เส้นทึบแสดงถึงการใช้ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งมุม $\psi = 0^\circ$ แทนค่าทั้งหน้าตัด)



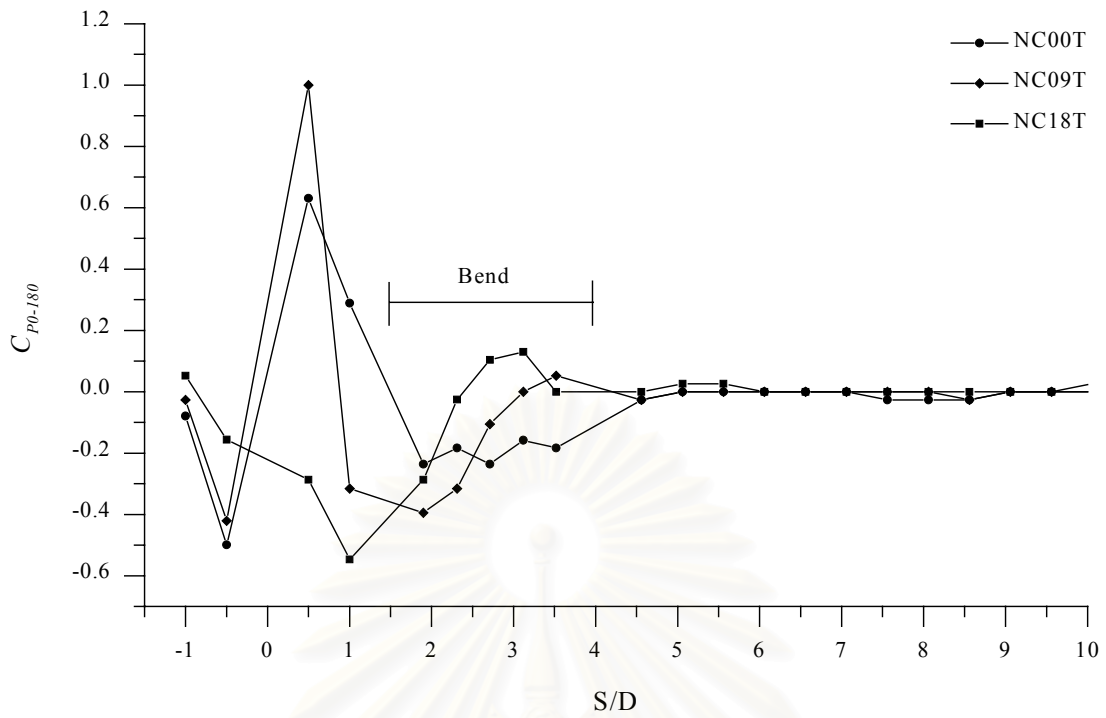
รูปที่ 3.36 เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด C_{Pref} (กรณีติด และไม่ติดแผ่นกีดขวาง)



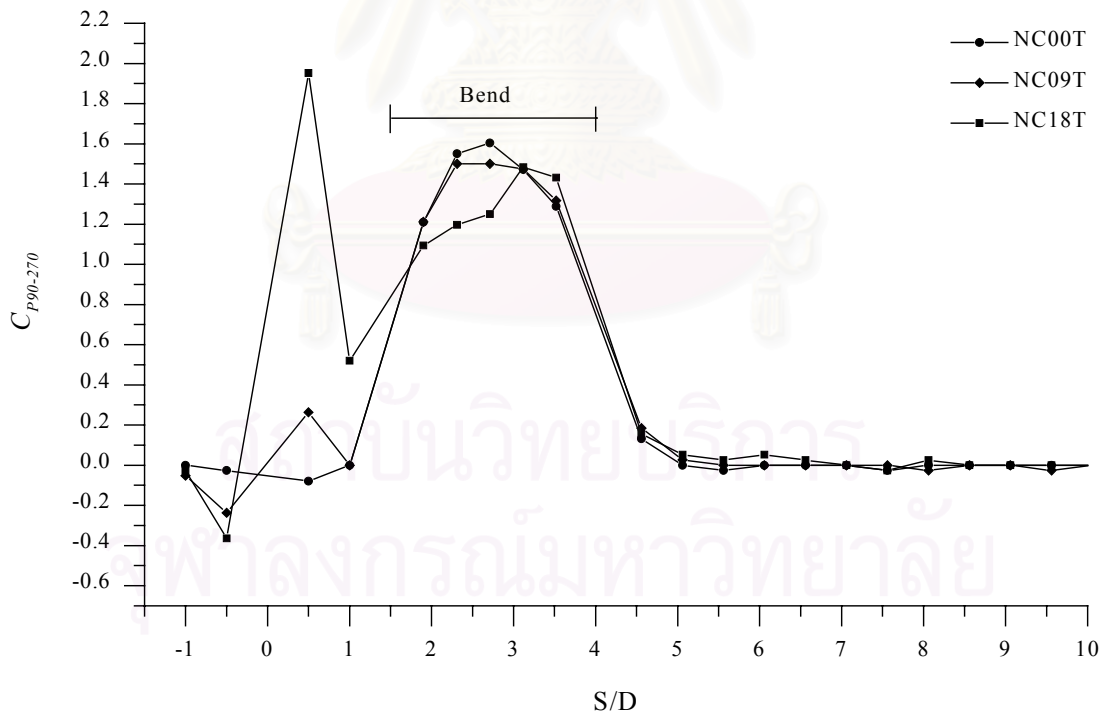
รูปที่ 3.36 (ต่อ)



รูปที่ 3.36 (ต่อ)

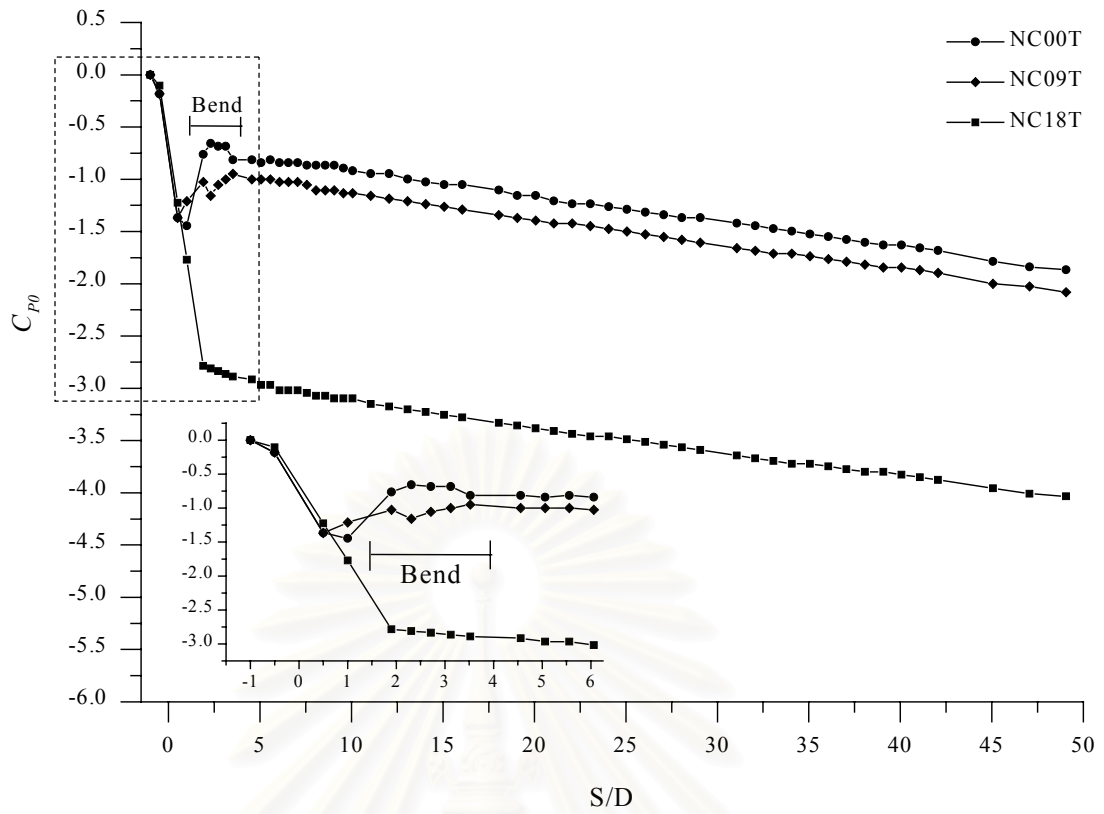


3.37 (ก)

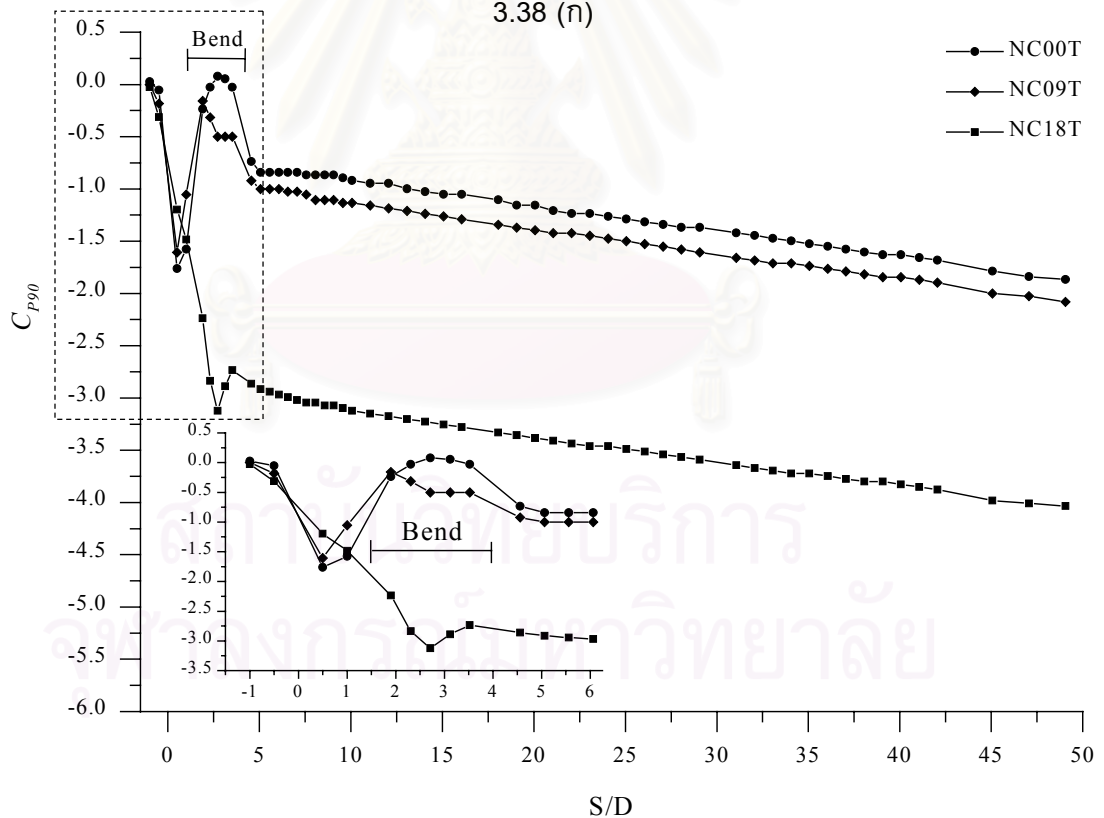


3.37 (ข)

รูปที่ 3.37 การกระจายความแตกต่างความดันสถิตตามระยะทางการไหล
(กรณีติดแผ่นกีดขวาง) (ก) C_{p0-180} (ข) $C_{p90-270}$



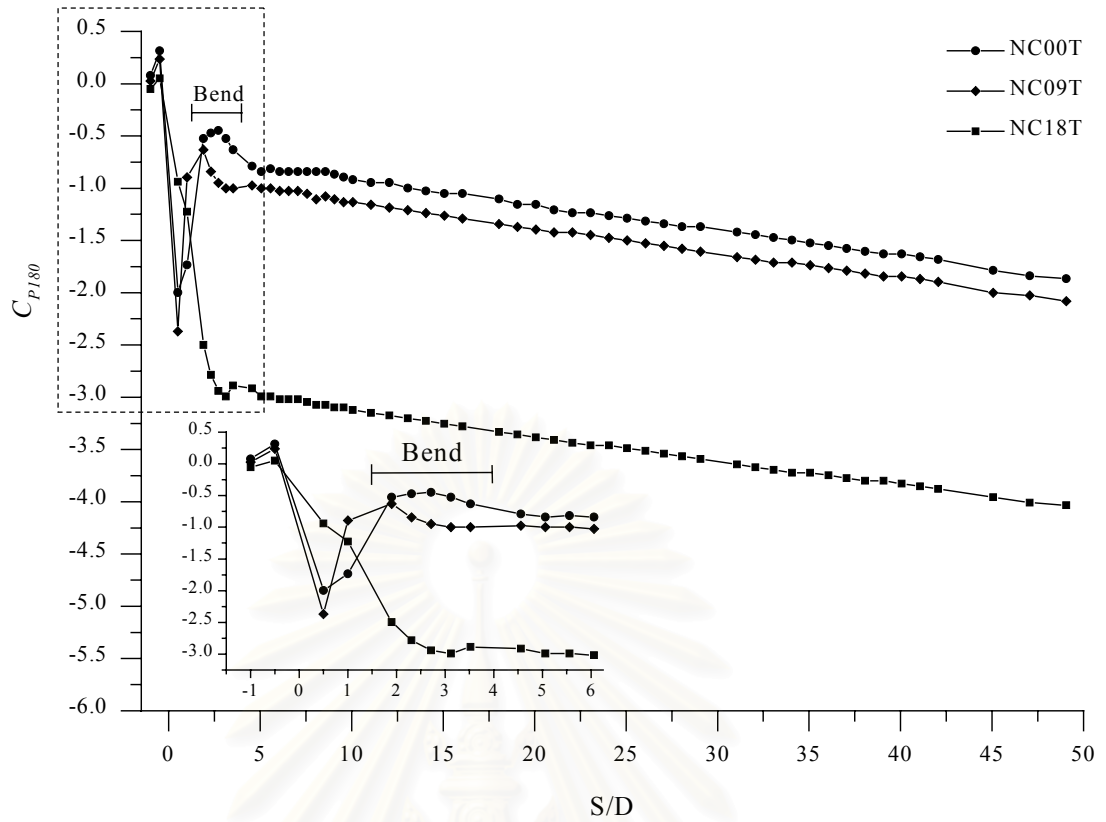
3.38 (ก)



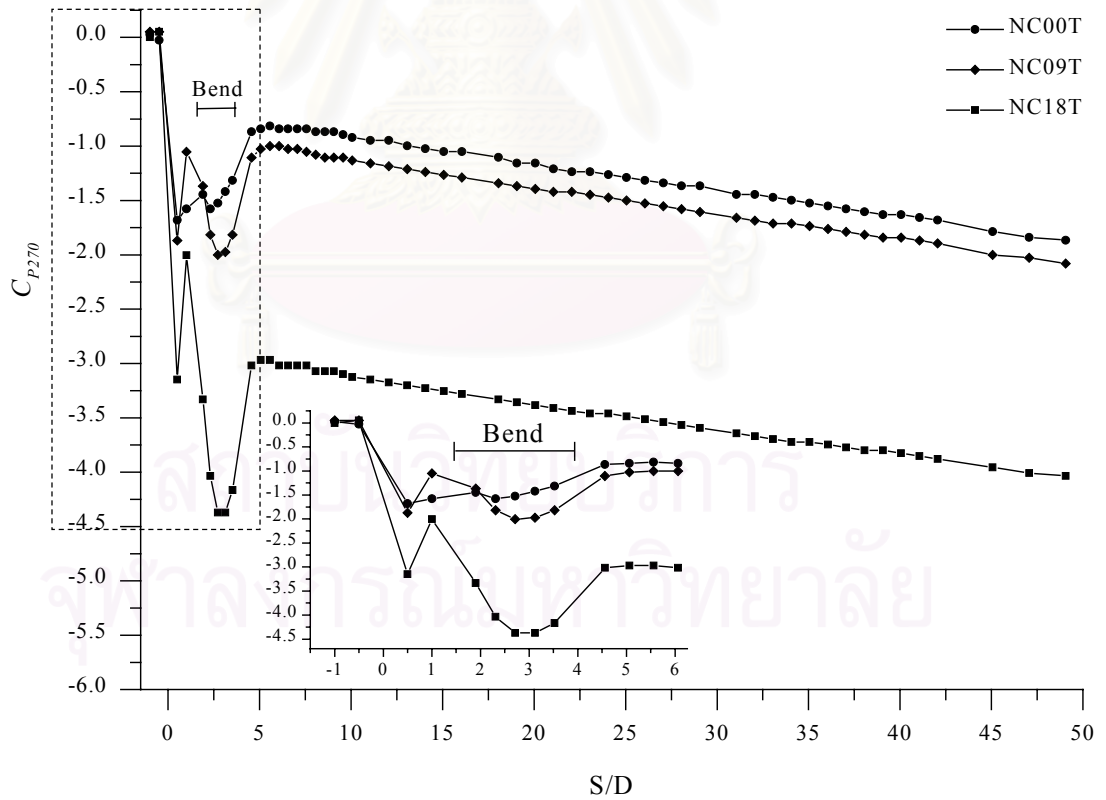
3.38 (ข)

รูปที่ 3.38 การกระจายความดันสถิตตามระยะทางการไหล (กรณีติดตั้งแผ่นกีดขวาง)

(ก - ง) $C_{p\psi}$; C_{p0} , C_{p90} , C_{p180} และ C_{p270} (จ) $\overline{C_{pref}}$

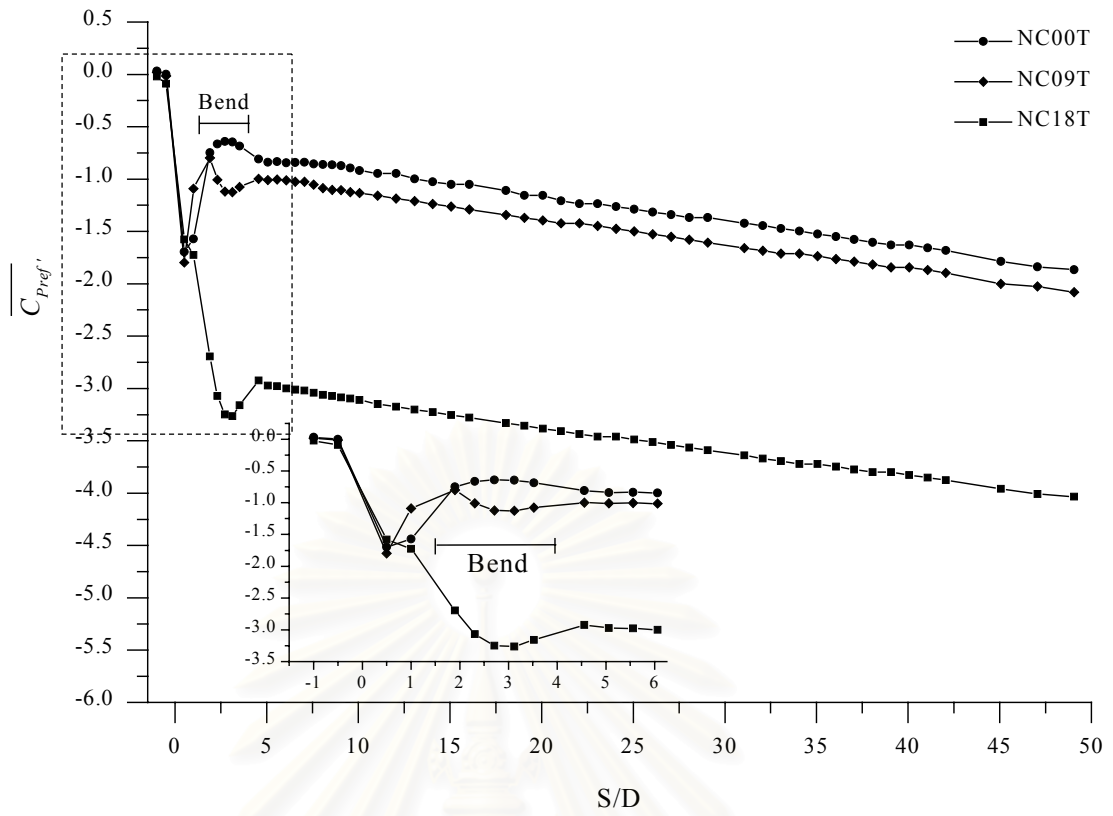


3.38 (ก)



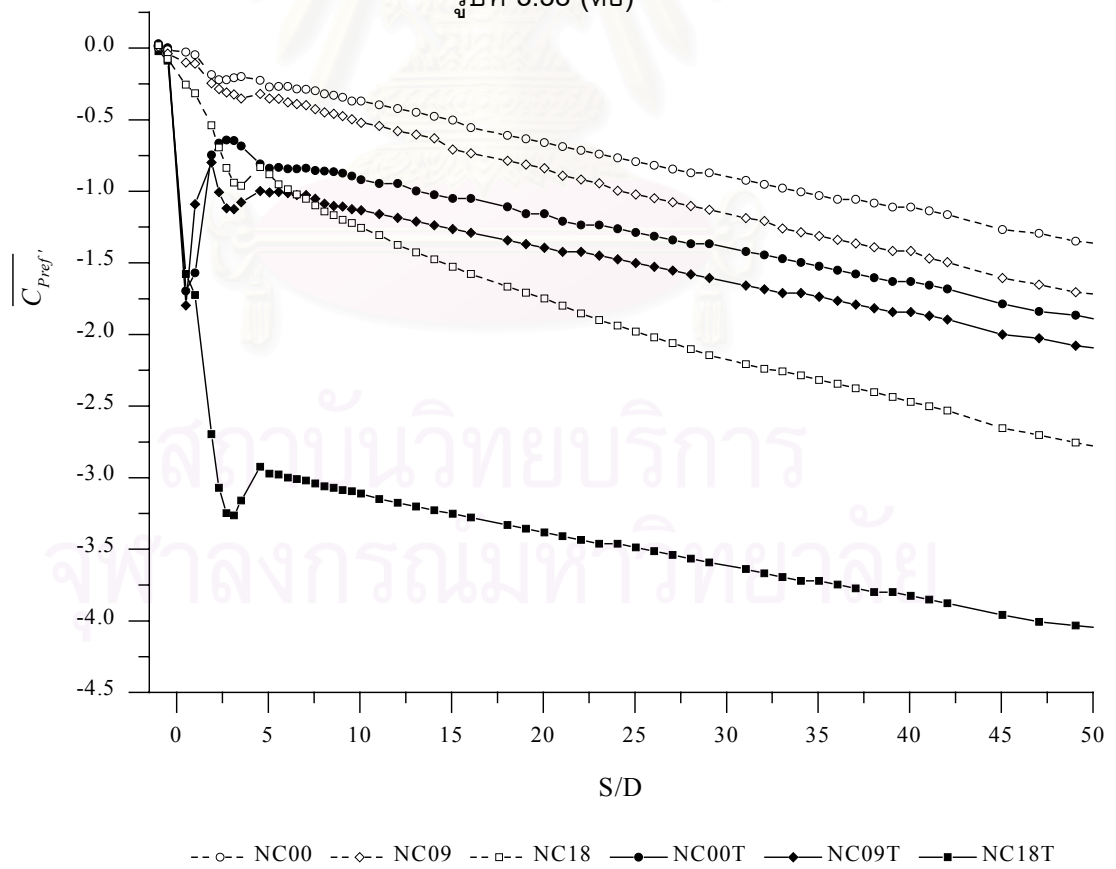
3.38 (ง)

รูปที่ 3.38 (ต่อ)

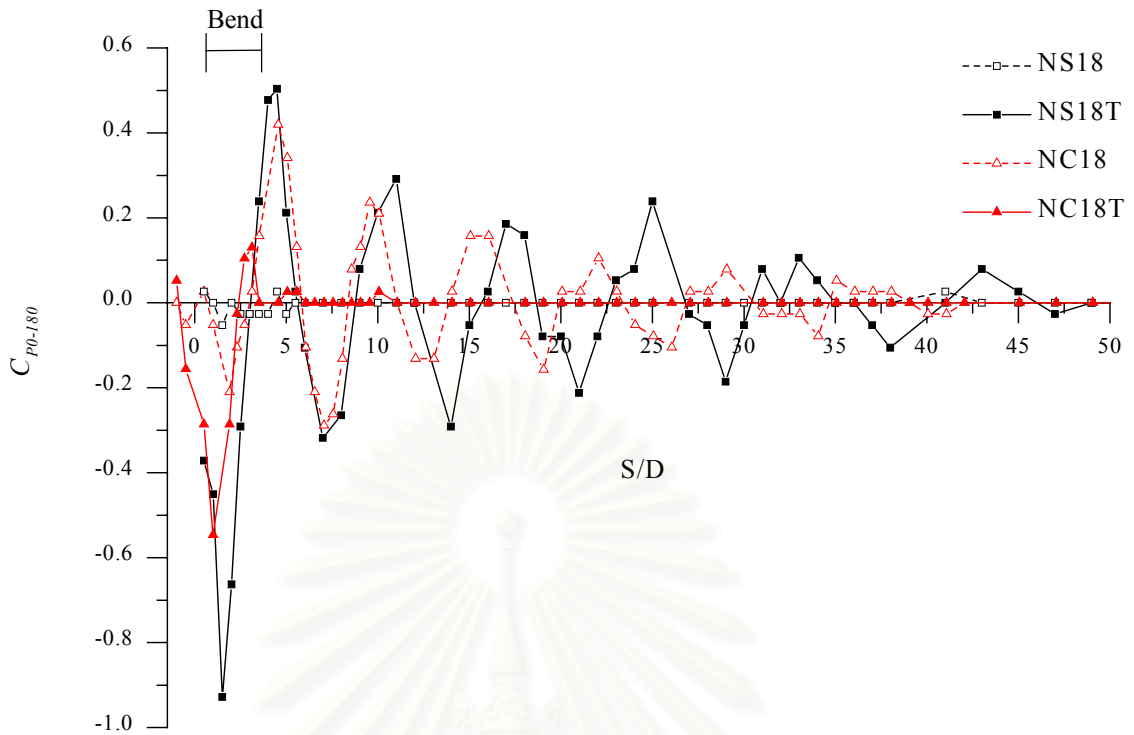


3.38 (จ)

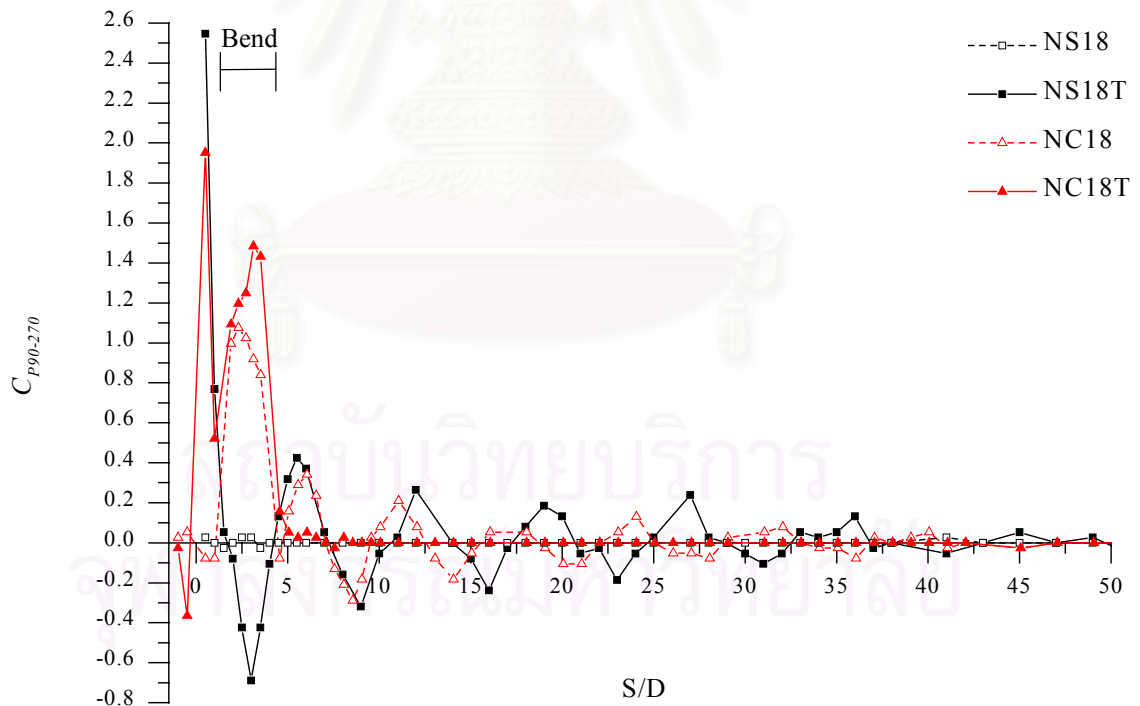
รูปที่ 3.38 (ต่อ)



รูปที่ 3.39 เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล (กรณีติด และไม่ติดแผ่นกีดขวาง)

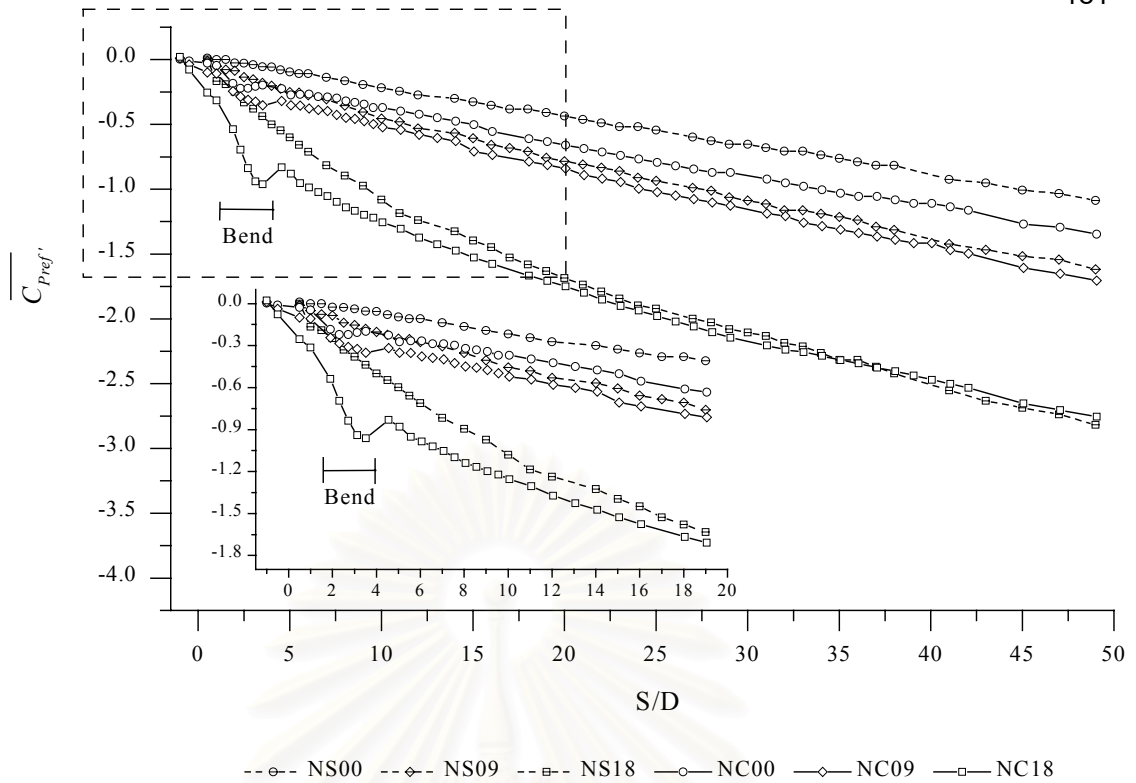


3.40 (ก)

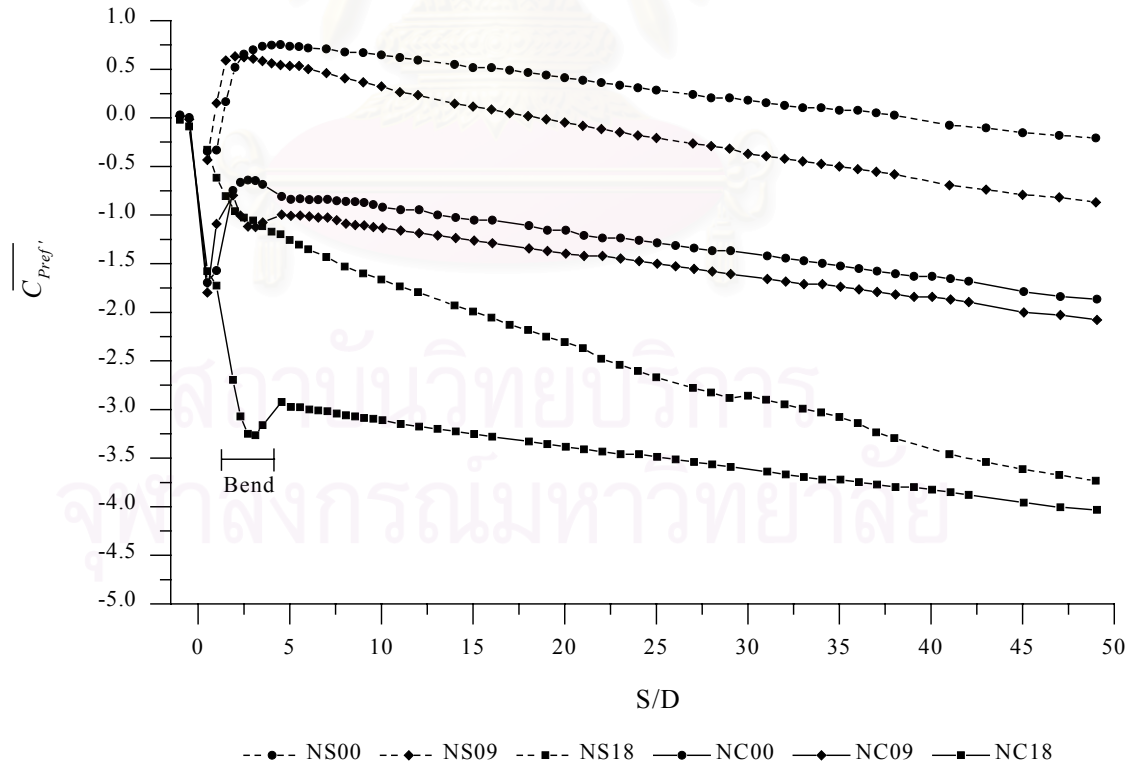


3.40 (ข)

รูปที่ 3.40 เปรียบเทียบการกระจายความแตกต่างความดันสถิตในกรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง (ก) C_{p0-180} (ข) $C_{p90-270}$



รูปที่ 3.41 เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล (กรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง ที่ไม่ติดแผ่นกีดขวาง)



รูปที่ 3.42 เปรียบเทียบการกระจายความดันสถิตเฉลี่ยตามระยะทางการไหล (กรณีการไหลในท่อตรง และการไหลผ่านท่อโค้ง ที่ติดแผ่นกีดขวาง)

รายการอ้างอิง

- Agrawal, Y., Talbot, L., Gong, K., (1978), "Laser anemometer study of flow development in curved circular pipes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 85, pp. 497-518.
- Anwer, M., and So, R. M. C., (1989), "Rotation effects on a fully-developed turbulent pipe flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 8, pp. 33-40.
- Anwer, M., and So, R. M. C., (1993), "Swirling turbulent flow through a curved pipe; Part I: Effect of swirl and bend curvature," *Experiments in Fluids*, Vol. 14, pp. 85-96.
- Baughn, J. W., Iacovides, H., Jackson, D. C., Launder, B. E., (1987), "Local heat transfer measurement in turbulent flow around a 180-deg pipe bend," *Trans. ASME J. Heat transfer*, Vol. 109, pp. 43-48.
- Cheng, K. C., and Yuen, F. P., (1987a), "Flow visualization studies on secondary flow patterns in straight tubes downstream of a 180 deg bend and in isothermally heated horizontal tubes," *Trans. ASME J. Heat transfer*, Vol. 109, pp. 49-54.
- Cheng, K. C., and Yuen, F. P., (1987b), "Flow visualization experiments on secondary flow patterns in an isothermally heated curved pipe," *Trans. ASME J. Heat transfer*, Vol. 109, pp. 55-61.
- Chue, S. H., (1975), "Pressure probes for fluid measurement," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 16, No. 2, pp. 147-223.
- Chrysler, G. M., and Sparrow, E. M., (1986), "Turbulent flow and heat transfer in bends of circular cross section: II-Pressure distribution experiments," *Trans. ASME J. Heat transfer*, Vol. 108, pp. 212-216.
- Dean, W. R., (1928), "The streamline motion of fluid in a curve pipe," *Phil. Mag.*, Vol. 5, pp. 673-695.
- Fiedler, H. E., (1997), "A note on secondary flow in bends and bend combinations," *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 262-264.
- Fox, R. W., and McDonald, A. T., (1994), "Introduction to Fluid Mechanics," 4th edition, John Wiley & Sons Inc., pp. 325-327.
- Kikuyama, K. Murakami, M. and Nishibori, K., (1983), "Development of three-dimensional turbulent boundary layer in an axially rotating pipe," *Trans. ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, pp.154-160.
- Kitoh, O., (1987), "Swirling flow through a bend," *J. Fluid Mech.*, Vol. 175, pp. 429-446.
- Kitoh, O., (1991), "Experimental study of turbulent swirling flow in a straight pipe," *J. Fluid Mech.*, Vol. 225, pp. 445-479.
- Kitoh, O. and Yu, S. C. M., (1995), "An analytical solution to the viscous flows in curved duct with inlet swirl," *JSME International Journal Series B.*, Vol. 38, No. 4, pp.532-540.
- Kline, S.J., (1985), "The purposes of uncertainty analysis," *Trans. ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153-160.
- Kobayashi, T. and Yoda, M., (1987), "Modified $k - \varepsilon$ model for turbulent swirling flow in a straight pipe, " *JSME International Journal*, Vol. 30, No. 259, pp. 66-71.
- Kobkanjanakorn, K., and Bunyajitradulya, A., (1998), "Decays of non-axisymmetric pressure distribution in non-axisymmetric swirling pipe flows," *The 12th National Academic seminar on Mechanical Engineering*, Vol. 3, pp. 97-106.
- Kreith, F., and Sonju, O. K., (1965), "The decay of turbulent swirl in a pipe," *J. Fluid Mech.*, Vol. 22, pp. 257-271.

- Mehta, R. D., (1977), "The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 18, pp. 59-120.
- Miau, J. J., Lin, E. C., Chen, Q. S., Chou, J. U., Pan, D. and Lin, C. K., (1996), "Swirling flows in circular-to-rectangular transition ducts," *Experiments in Fluids*, Vol. 20, pp. 401-409.
- Murakami, M., (1961), "Vibration of water-turbine draft tubes," *Trans. ASME Series A*, Vol. 83, p. 36.
- Murakami, M. and Kikuyama, K., (1980), "Turbulent flow in axially rotating pipes," *Trans. ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 102, pp. 97-103.
- Parchen, R. R. and Steenbergen, W., (1998), "An experimental and numerical study of turbulent swirling pipe flows", *Trans. ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 120, pp. 54-61.
- Patankar, S. V., Prapat, V. S., and Spalding, D. B., (1975), "Prediction of turbulent flow in curved pipes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 67, pp. 583-595.
- Rowe, M., (1970), "Measurements and computations of flow in pipe bends," *J. Fluid Mech.*, Vol. 43, pp. 771-783.
- Shimizu, Y. and Sugino, K., (1980), "Hydraulic losses and flow patterns of a swirling flow in U-Bends," *Bulletin of JSME*, Vol. 23, No. 183, pp. 1443-1450.
- So, R. M. C., and Anwer, M., (1993), "Swirling turbulent flow through a curved pipe; Part II: Recovery from swirl and bend curvature," *Experiments in Fluids*, Vol. 14, pp. 169-177.
- Sparrow, E. M., Chrysler, G. M., (1986), "Turbulent flow and heat transfer in bends of circular cross section: I-Heat transfer experiments," *Trans. ASME J. Heat transfer*, Vol. 108, pp. 40-47.
- Sparrow, E. M., Ramsey, J. W. and Lau, S.C., (1979), "Flow and pressure characteristics downstream of a segmental blockage in a turbulent pipe flow," *Trans. ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 101, pp. 200-207.
- Talbot, L., (1954), "Laminar swirling pipe flow," *Trans. ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 21, pp. 1-7.
- Weske, D. R., and Sturov, G. Y., (1974), "Experimental study of turbulent swirled flows in a cylindrical tube," *Fluid Mech. Sov. Res.*, Vol. 3, pp 77-82.
- Yajnik, K.S., and Subbaiah, M. V., (1973), "Experiments on swirling turbulent flows. Part 1. Similarity in swirling flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 60, pp. 665-687.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การศึกษาเบื้องต้น

ก.1 ชุดทดลองที่ใช้

ในการทำการศึกษเกี่ยวกับเรื่องการไหลแบบหมุนวนที่ไหลผ่านท่อตรงและท่อโค้งนั้น ผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาเบื้องต้นก่อน โดยได้จัดสร้างชุดทดลองขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล และได้ตีพิมพ์ผลการทดลองเบื้องต้นนี้ลงในเอกสารการสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 (Kobkanjanakorn และ Bunyajitradulya (1998)) โดยได้ทำการศึกษาถึงผลของการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนของการไหลในท่อตรง ท่อโค้ง และท่อตรงหลังท่อโค้ง ซึ่งชุดทดลองสำหรับกรณีการไหลผ่านท่อโค้งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ ก.1

จากรูปที่ ก.1 อากาศจะถูกดูดผ่านท่อตรง PVC ขนาด 3 นิ้ว ยาวประมาณ 54 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ซึ่งยาวพอที่จะทำให้สภาวะการไหลของอากาศก่อนเข้า Swirl Generator มีสภาวะการไหลเป็น Fully Developed Flow จากนั้นจะไหลผ่าน Swirl Generator เพื่อให้ทำให้อากาศที่ไหลผ่านมีความเร็วหมุนวนในทิศสัมผัสกับผิวท่อ โดยในการทดลองได้ใช้ Swirl Generator 2 แบบ เพื่อให้ได้การไหลแบบหมุนวนที่มีแกนการหมุน 2 ลักษณะ คือมีทิศของแกนหมุนอยู่ในทิศเดียวกับทิศทางการไหลและทิศตรงข้าม จากนั้นอากาศจะไหลเข้าท่อโค้งและผ่านออกไปที่ท่อตรงด้านหลังท่อโค้งซึ่งยาวประมาณ 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ที่บริเวณระหว่างด้านทางดูดของ Blower กับส่วนทดสอบ ได้ทำการติดตั้งท่ออ่อน (Flexible Duct) เพื่อใช้กันการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่บริเวณ Blower เข้ามารบกวนการไหลบริเวณส่วนทดสอบ และใช้ตาข่าย (Screen) ขนาด Mesh16 เพื่อกันการไหลแบบหมุนวนที่อาจถูกเหนี่ยวนำขึ้นได้ที่ด้านปากทางดูดของ Blower เข้ามารบกวนในส่วนทดสอบเช่นกัน สำหรับชุดทดลองผลของการไหลแบบหมุนวนผ่านท่อตรงนั้นมีลักษณะคล้ายกับกรณีการไหลผ่านท่อโค้ง โดยถอดท่อโค้งออกและติดตั้ง Swirl Generator เข้าที่ท่อตรงด้านหลังด้วย Coupling

ท่อโค้งที่ใช้ในการทดลองเป็นท่อโค้งแบบมาตรฐานมีรัศมีความโค้งเฉลี่ยประมาณ 245 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนรัศมีต่อรัศมีความโค้งท่อ (α) ประมาณ 1/6 ส่วน Swirl Generator ที่ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 โดยทำจากท่อ PVC และติด Vane ที่มีลักษณะคล้ายส่วนของวงกลมบนผนังท่อ โดย Vane จะวางตัวทำมุมกับแนวแกนท่อเพื่อให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดความเร็วหมุนวน ซึ่ง Swirl Generator ที่ได้จะมีลักษณะคล้าย Orifice โดยมีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางในต่อเส้นผ่านศูนย์กลางนอกประมาณ 1/3

ในการติดตั้ง Vane นั้นระยะห่างระหว่าง Vane แต่ละใบมีค่าไม่เท่ากันตลอดตามเส้นรอบวง ทำให้เกิดความดันตกคร่อมไม่เท่ากันที่แต่ละตำแหน่งของหน้าตัดท่อ และทำให้การไหล

แบบหมุนวนที่ออกจาก Swirl Generator นั้นมีลักษณะเป็นการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน ซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่เราสนใจในการศึกษาครั้งนี้

รูปที่ ก.3 แสดงการกำหนดระบบพิกัดที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยกำหนดให้ที่หน้าตัดท่อใด ๆ มีค่ามุม $\psi = 0^\circ$ ที่ตำแหน่งของผนังท่อด้านเดียวกับผนังท่อโค้งด้านนอก และมีค่ามุม $\psi = 180^\circ$ ที่ผนังท่อด้านเดียวกับผนังท่อโค้งด้านใน ส่วนที่ผนังท่อด้านบนและด้านล่างมีค่ามุม $\psi = 90^\circ$ และ 270° ตามลำดับ ที่ปากทางเข้าท่อโค้งกำหนดให้มีค่ามุม $\theta = 0^\circ$ และมีระยะ $s = 0$ โดยทำการวัดค่าทุก ๆ ค่ามุม θ เพิ่มขึ้นทีละ 15° ในช่วงของท่อโค้ง ส่วนระยะ s กำหนดให้มีค่าเป็นบวกที่ท่อด้านหลังทางเข้าท่อโค้งตามทิศทางของการไหล และมีค่าเป็นลบที่ท่อด้านหน้าทางเข้าท่อโค้งในทิศตรงข้ามกับทิศทางของการไหล

ก.2 ค่าที่ทำการศึกษาและวิธีในการวัด

ในการศึกษาเบื้องต้นนั้นได้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตตามทิศทางของการไหล และความแตกต่างความดันสถิตที่ผนังท่อในด้านตรงกันข้าม โดยแสดงผลในรูปของตัวแปรไร้มิติซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

- การกระจายตัวของค่าความดันสถิตตามทิศทางของการไหล

$$C_p = \frac{(P - P_{ref})}{1/2 \rho u^2}$$

เมื่อ P_{ref} = ความดันอ้างอิงที่ตำแหน่ง $s/d = -14$ มุม $\psi = 90^\circ$

ในการศึกษาเบื้องต้นได้ใช้ค่า C_p ในการแสดงลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตตามทิศทางของการไหล โดยทำการวัดค่าความดันทุก ๆ ระยะ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้วยมาโนมิเตอร์แบบเอียง (Inclined Manometer) ซึ่งมี Resolution ในการวัดเท่ากับ 0.2 mmH₂O แต่เนื่องจากในการทดลองค่าความดันตกคร่อมของการไหลผ่าน Swirl Generator มีค่าสูง ทำให้การวัดค่าผลต่างของความดันที่ตำแหน่งหลัง Swirl Generator กับความดันอ้างอิงมีค่าสูง ซึ่งทำให้ค่าที่วัดได้อยู่นอกช่วงวัดที่เหมาะสมของมาโนมิเตอร์ ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนตำแหน่งความดันอ้างอิงมาอยู่ที่ตำแหน่ง $s/d = +66$ มุม $\psi = 90^\circ$ จากนั้นจึงวัดค่าความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่ง $s/d = -14$ และ $s/d = +66$ เพื่อปรับค่าให้ใช้ค่าความดันอ้างอิงที่ตำแหน่งเดียวกัน

- ความแตกต่างความดันสถิต

ทำการวัดค่าความแตกต่างความดันที่ผนังท่อในด้านตรงข้ามที่มุม $\psi = 0^\circ$ กับมุม $\psi = 180^\circ$ ($P_0 - P_{180}$) และค่าความแตกต่างความดันที่มุม $\psi = 90^\circ$ กับมุม $\psi = 270^\circ$ ($P_{90} - P_{270}$) โดยใช้มาโนมิเตอร์แบบเอียงในการวัด และวัดค่าทุกๆ ระยะ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ซึ่งค่าความแตกต่างความดันที่ได้ถูกทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\frac{(P_0 - P_{180})}{1/2 \rho u^2} \quad \text{สำหรับค่าความดันแตกต่างที่มุม } \psi = 0^\circ \text{ และ } \psi = 180^\circ \text{ และ}$$

$$\frac{(P_{90} - P_{270})}{1/2 \rho u^2} \quad \text{สำหรับค่าความดันแตกต่างที่มุม } \psi = 90^\circ \text{ และ } \psi = 270^\circ$$

ก.3 ผลการทดลอง

สำหรับการศึกษาเบื้องต้นนั้น ได้ทำการทดลองทั้งหมด 5 กรณี ได้แก่

- 1) การไหลแบบหมุนวนในท่อตรงที่มีแกนการหมุนอยู่ในทิศทางเดียวกับทิศทางของการไหล
 - 2) การไหลแบบหมุนวนในท่อตรงที่มีแกนการหมุนอยู่ในทิศตรงข้ามกับทิศทางของการไหล
 - 3) การไหลที่ไม่มีการหมุนวนของการไหลผ่านท่อโค้ง
 - 4) การไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้งที่มีแกนการหมุนอยู่ในทิศทางเดียวกับทิศทางของการไหล
 - 5) การไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้งที่มีแกนการหมุนอยู่ในทิศตรงข้ามกับทิศทางของการไหล
- โดยที่ผลการทดลองในกรณีต่างๆ ใช้สัญลักษณ์ในการแสดงผลดังตารางที่ ก.1

ก.3.1 การไหลในท่อตรง

การกระจายตัวของค่าความดันสถิต

รูปที่ ก.4 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตของการไหลในท่อตรง โดยแสดงผลในรูปของค่า C_p ของค่าความดันที่มุม $\psi = 90^\circ$ จากรูปของไหลจะไหลเข้าสู่ชุดทดลองจากทางด้านซ้ายซึ่งมี Swirl Generator ติดตั้งอยู่ที่บริเวณ $s/d = -2$ ที่บริเวณก่อนทางเข้า Swirl Generator การกระจายตัวของความดันมีลักษณะเป็นเส้นตรงเนื่องจากการทดลองนี้ให้ของไหลไหลผ่านท่อตรงยาว 52 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อก่อนเข้า Swirl Generator ทำให้มีสภาวะการไหลที่ปากทางเข้าเป็นแบบ Fully Developed Flow เมื่อไหลผ่าน Swirl Generator แล้วพบว่าเกิดความดันตกคร่อมขึ้น และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Loss Coefficient, K) สำหรับ Swirl Generator ทั้ง 2 แบบประมาณ 5-6

ความแตกต่างของความดันสถิต

รูปที่ ก.5 (ก) และ ก.5 (ข) แสดงลักษณะการกระจายตัวของค่าความแตกต่างความดัน P_0-P_{180} และ $P_{90}-P_{270}$ ของการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยมีการหมุนวน 2 แบบ (VS75+, VS75-) จากรูป ที่บริเวณก่อนทางเข้า Swirl Generator (ด้านซ้ายของรูป) การกระจายตัวของความดันมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดท่อเนื่องจากการไหลในช่วงนี้ยังไม่มี การหมุนวน ทำให้ค่าความแตกต่างความดันที่วัดได้ทั้ง 2 กรณีมีค่าประมาณศูนย์ เมื่อไหลผ่าน Swirl Generator การไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนที่เกิดขึ้นทำให้มีการแกว่งของ ค่าความแตกต่างความดัน (Fluctuation of Pressure Difference) โดยมีค่าอยู่ในทั้งช่วงบวก และลบ และมีคาบของการแกว่งประมาณ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในช่วงของการไหล $s/d = 10-30$ โดยที่แอมพลิจูด (Amplitude) ของการแกว่งจะมีขนาดลดลงตามระยะทางการไหล โดยมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อย ๆ ลดลงในช่วงท้าย

ก.3.2 การไหลผ่านท่อโค้ง 90 องศา

ความแตกต่างความดันสถิตในช่วงท่อโค้ง 90 องศา

สำหรับการไหลในท่อโค้งนั้นจะมีผลของแรงหนีศูนย์กลางเข้ามาเกี่ยวข้อง พิจารณารูปที่ ก.6 (ก) จากรูปแสดงค่าความแตกต่างความดันที่ผนังท่อโค้งด้านนอกและใน (P_0-P_{180}) ของการไหลในช่วงท่อโค้งตั้งแต่มุม θ เท่ากับ 0-90 องศา โดยในกรณีของการไหลที่ไม่มีการหมุนวน (VO) พบว่าค่าความดันสถิตที่ผนังท่อโค้งด้านนอกนั้นมีมากกว่าค่าความดันที่ผนังท่อโค้งด้านในเนื่องจาก Radial Pressure Gradient ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้ความแตกต่างความดันที่วัดได้มีค่าเป็นบวกตลอดทั้งช่วงท่อโค้ง และมีค่ามากที่สุดที่ประมาณ 45 องศา ส่วนค่าความแตกต่างความดันที่ผนังท่อด้านบนและล่าง ($P_{90}-P_{270}$) (รูปที่ ก.6 (ข)) ในกรณีที่ไม่มีการหมุนวน (VO) ไม่พบค่าความแตกต่างความดันเกิดขึ้น แสดงว่าค่าความดันสถิตที่ผนังทั้งสองมีค่าประมาณเท่ากัน

สำหรับกรณีการไหลที่มีการหมุนวน (V75+, V75-) พบว่ามีการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันเกิดขึ้น และคล้ายกับการแกว่งที่เกิดขึ้นในกรณีของการไหลแบบหมุนวนในท่อตรง แสดงว่าการไหลแบบหมุนวนมีผลต่อการไหลมากกว่าความโค้งของท่อ แต่ยังสามารถพบผลของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นต่อการไหลได้ โดยพบว่าการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันที่ผนังท่อโค้งด้านนอกและในจะสลับอยู่ในช่วงค่าบวก ส่วนค่าความแตกต่างความดันที่ผนังด้านบนและล่างจะสลับอยู่ในช่วงทั้งบวกและลบ และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณศูนย์

ความแตกต่างความดันสถิตในท่อตรงหลังท่อโค้ง

รูปที่ ก.7 และ ก.8 แสดงลักษณะการกระจายตัวของค่าความแตกต่างความดันที่ท่อตรงด้านหลังท่อโค้ง จากรูป Swirl Generator ถูกติดตั้งที่ตำแหน่ง $s/d = -2$ และท่อโค้งวางตัวอยู่ในช่วงระยะ $s/d = 0-5$ พิจารณารูปที่ ก.7 (ก) สำหรับกรณีการไหลที่ไม่มีมุมหมุนวน (VO) ที่ท่อตรงด้านทางออกของท่อโค้ง พบว่าค่าความแตกต่างความดัน P_0-P_{180} มีค่าประมาณศูนย์ แสดงให้เห็นว่าผลของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นในท่อโค้งมีผลน้อยต่อลักษณะการกระจายตัวของค่าความดันที่ท่อด้านทางออกของท่อโค้ง สำหรับการไหลที่มีการหมุนวน ($V75+$, $V75-$) พิจารณารูปที่ ก.7 (ก) และ ก.7 (ข) พบว่าค่าความแตกต่างความดันที่วัดได้มีลักษณะการแกว่งคล้ายกับลักษณะการแกว่งที่เกิดขึ้นในกรณีของการไหลในท่อตรง โดยที่มีคาบของการแกว่งใกล้เคียงกับกรณีการไหลในท่อตรงประมาณ 6-8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และมีการลดขนาดแอมพลิจูดของการแกว่งอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและค่อย ๆ ลดขนาดลงในช่วงท้าย

ส่วนค่าความแตกต่างความดันที่ผนังท่อด้านบนและล่าง ($P_{90}-P_{270}$) สำหรับกรณีการไหลที่ไม่มีมุมหมุนวน (ดูรูปที่ ก.8 (ก)) พบว่าที่ท่อตรงด้านทางออกของท่อโค้ง ค่าความแตกต่างความดันที่วัดได้มีค่าประมาณศูนย์ตลอดการไหลในท่อโค้ง ส่วนในกรณีการไหลที่มีการหมุนวน (ดูรูปที่ ก.8 (ก) และ ก.8 (ข)) พบว่าค่าความแตกต่างความดันมีลักษณะของการแกว่งคล้ายกับกรณี P_0-P_{180} และคล้ายกับกรณีการไหลในท่อตรง โดยมีคาบและลักษณะการลดขนาดแอมพลิจูดการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันคล้ายกัน จากการสังเกตพบว่าลักษณะการลดขนาดลงของแอมพลิจูดการแกว่งมีลักษณะคล้ายกับเป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล คือ มีการลดขนาดลงอย่างรวดเร็วในตอนต้นและค่อย ๆ ลดขนาดลงในช่วงท้าย ดังนั้นเมื่อนำขนาดแอมพลิจูดการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันของทั้งกรณีการไหลในท่อตรงและการไหลผ่านท่อโค้ง มาพล็อตลงบนกราฟ Semi-Log จะพบว่า การไหลในทุกกรณีมีความสัมพันธ์คล้ายกับเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะการลดขนาดการแกว่งของค่าความแตกต่างความดัน หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลดังแสดงในรูปที่ ก.9

ก.4 สรุปผลจากการศึกษาเบื้องต้น

จากผลการศึกษาเบื้องต้น จะเห็นได้ว่าการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนทำให้เกิดความแตกต่างความดันตลอดหน้าตัดท่อตามเส้นรอบวง โดยมีลักษณะการกระจายตัวของค่าความแตกต่างความดันตามทิศทางการไหล ของการไหลในท่อตรงและการไหลผ่านท่อโค้งคล้ายกัน คือ มีการแกว่งของค่าความแตกต่างความดันอยู่ในช่วงบวกและลบ มีคาบของการแกว่งประมาณ 6-8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในช่วงการไหล $s/d = 10-30$ และการสลายตัวของการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลกับระยะทางการไหล

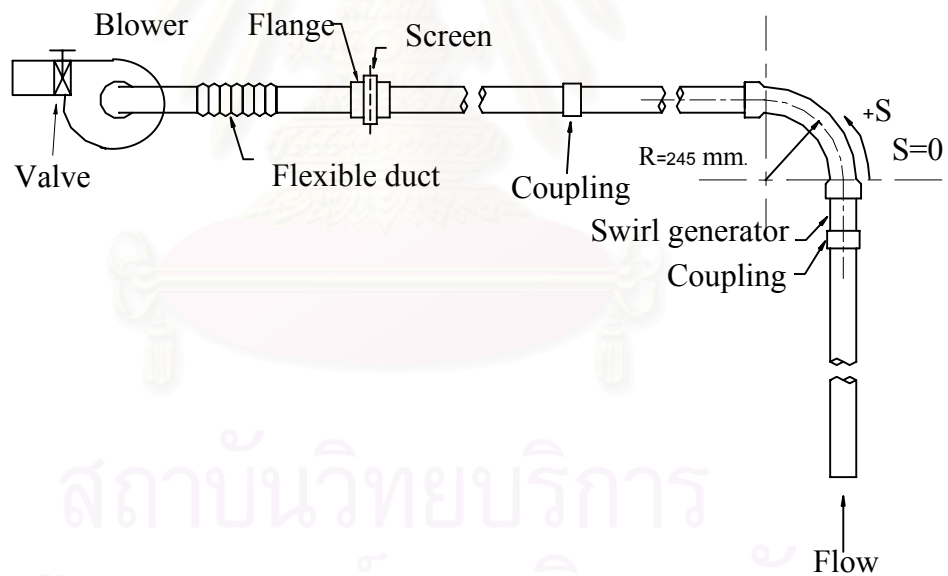
สำหรับกรณีของการไหลแบบหมุนวนผ่านท่อโค้งนั้นพบว่า ความโค้งของท่อมีผลน้อยต่อลักษณะการกระจายตัวของค่าความแตกต่างความดันที่ท่อตรงด้านทางออกของท่อโค้ง แต่มีผลบ้างในช่วงท่อโค้ง โดยจะทำให้ความแตกต่างความดันที่ผนังท่อโค้งด้านนอกและในมีการแกว่งอยู่ในช่วงบวก

จากผลการทดลองพบว่าค่าความแตกต่างความดันที่ด้านหลังของ Swirl Generator มีค่าแอมพลิจูดสูงสุดถึงประมาณ 50% ของ Dynamic Pressure ซึ่งการกระจายตัวของค่าความแตกต่างความดันตามทิศทางการไหลที่เกิดขึ้น สามารถทำให้เกิดแรงกระทำต่อท่อสลับทิศทางกันไปตามความยาวท่อ เป็นผลทำให้ท่อต้องรับภาระความเค้นดัดมากขึ้นและมีอายุการใช้งานที่สั้นลง นอกจากนี้ลักษณะการกระจายตัวของความดันที่ไม่สม่ำเสมอยังเป็นสาเหตุของการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นที่ท่อได้ ดังนั้นการศึกษาถึงผลของการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของค่าความดันสถิตบนผนังท่อและพฤติกรรมการสลายตัวของ การไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นนี้จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

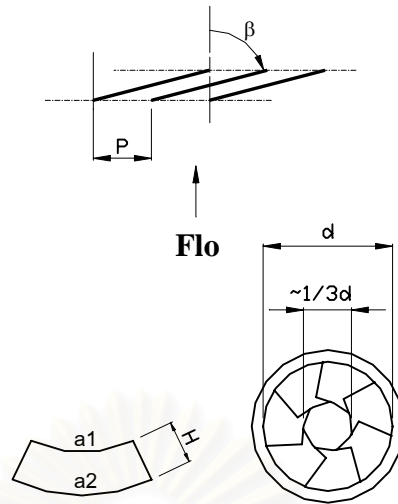
สำหรับในหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้จะได้มีการทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อ โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความเร็วการไหลหมุนวนในทิศสัมผัสท่อ หรือค่า Swirl Number เพื่อดูผลของขนาดความเร็วหมุนวนต่อลักษณะของความแตกต่างความดันและการสลายตัวของ การไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน โดยเปลี่ยนแปลงลักษณะของชุดทดลองให้มีการใช้ท่อหมุนในการสร้างการไหลแบบหมุนวน เพื่อให้สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วหมุนวนหรือสามารถเปลี่ยนแปลงค่า Swirl Number ได้ และดูผลที่เปลี่ยนไปของคุณสมบัติต่างๆของการไหล

สัญลักษณ์	มุมใบ Vane β ทิศทางการหมุนวน	สภาวะการไหล
VS75+	+75°/ตามทิศทางการไหล	ท่อตรง
VS75-	-75°/ตรงข้ามทิศทางการไหล	ท่อตรง
VO	ไม่มีการหมุนวน	ท่อโค้ง
V75+	+75°/ตามทิศทางการไหล	ท่อโค้ง
V75-	-75°/ตรงข้ามทิศทางการไหล	ท่อโค้ง

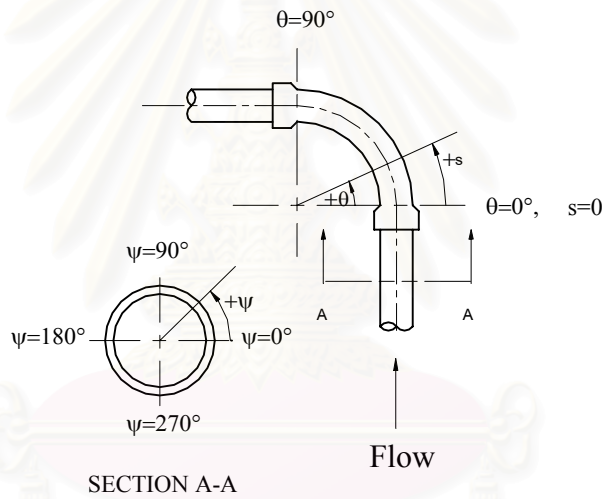
ตารางที่ ก.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดลองกรณีต่างๆ



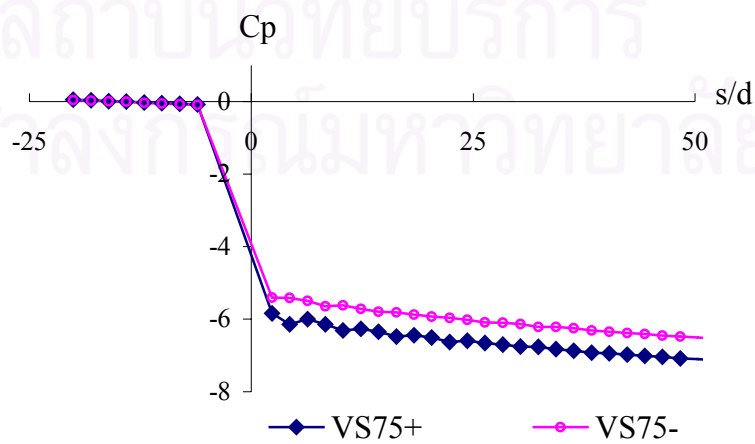
รูปที่ ก.1 Schematic Drawing ของชุดทดลองในการศึกษาเบื้องต้น



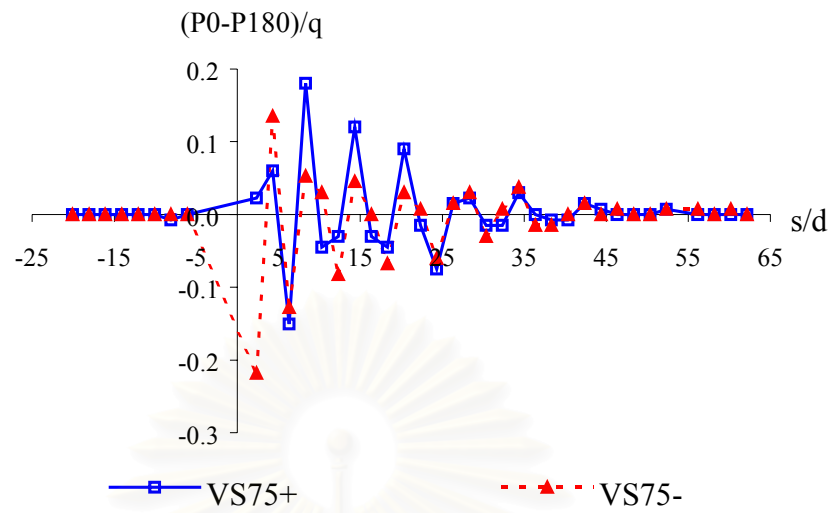
รูปที่ ก.2 Swirl Generator ที่ใช้ในการทดลอง



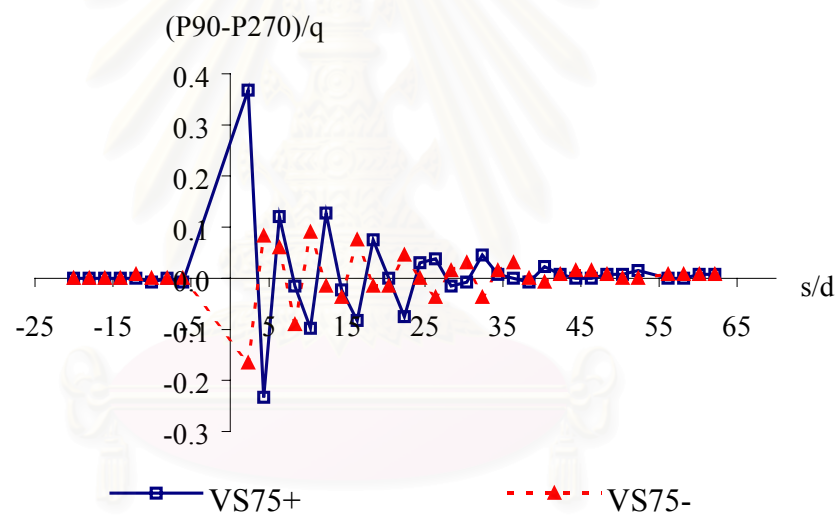
รูปที่ ก.3 ระบบพิกัดที่หน้าตัดต่อแต่ละหน้าตัด และภายในช่วงท่อโค้ง



รูปที่ ก.4 การกระจายตัวของค่าความดันสถิตตามทิศทางกรไหล

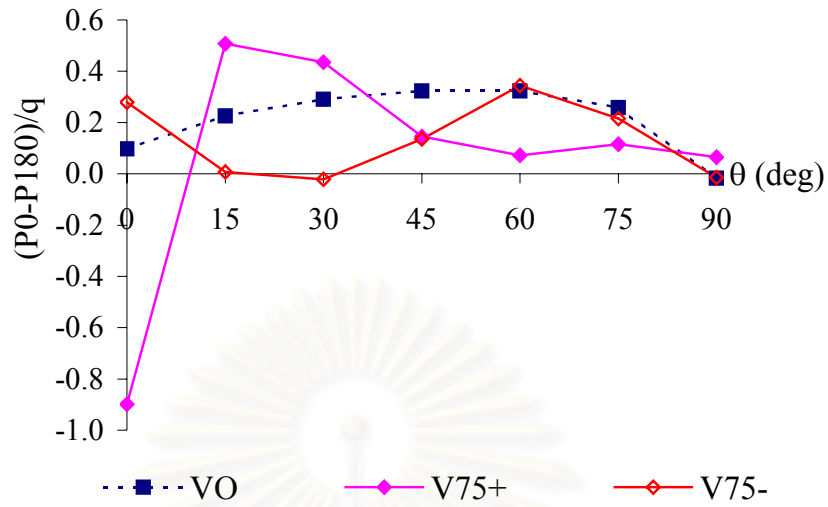


ก.5 (ก)

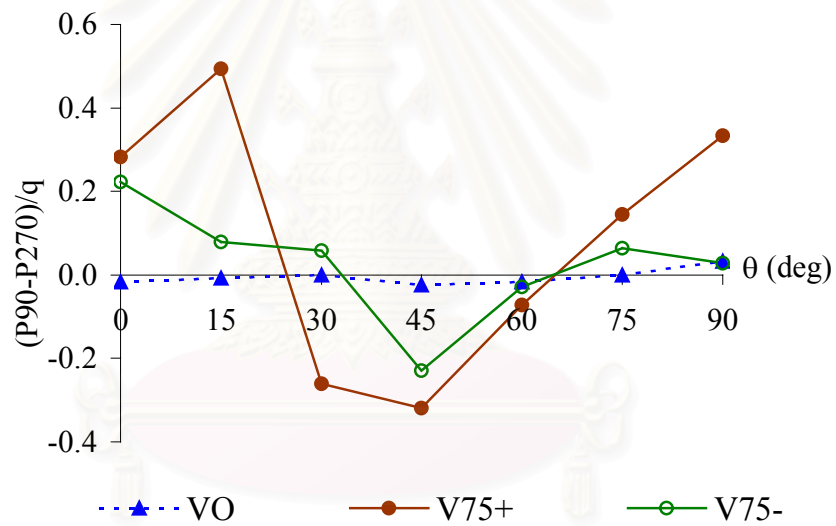


ก.5 (ข)

รูปที่ ก.5 การกระจายตัวของค่าความแตกต่างความดันสถิต
ของการไหลแบบหมุนวนในท่อตรง

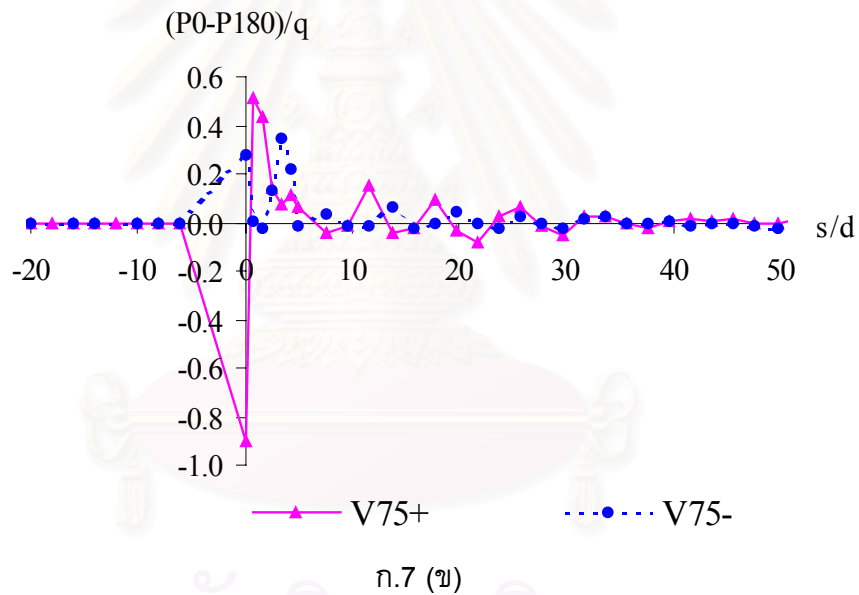
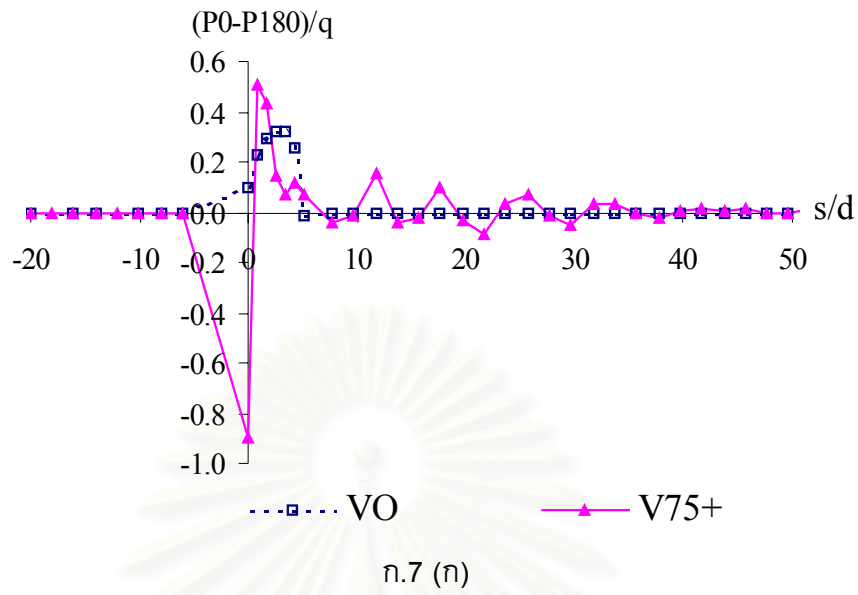


ก.6 (ก)

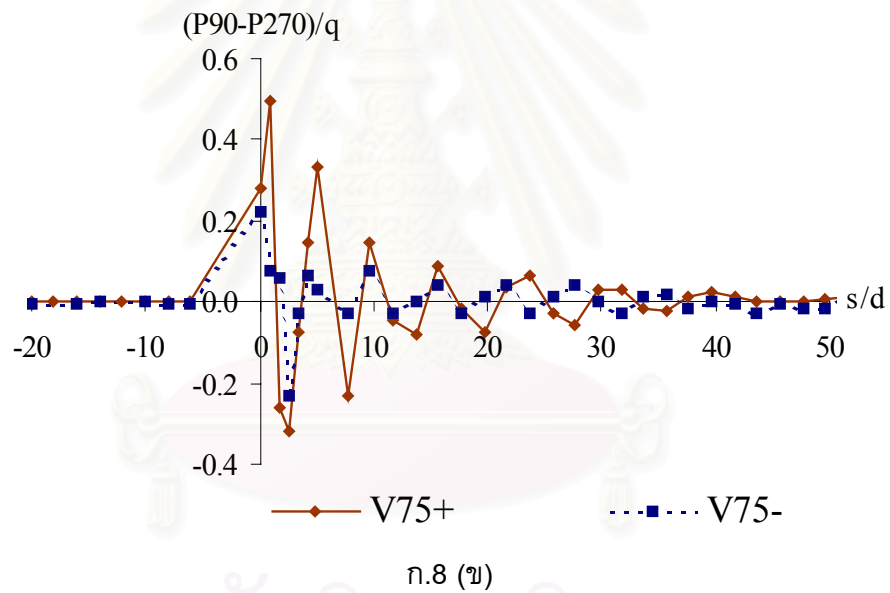
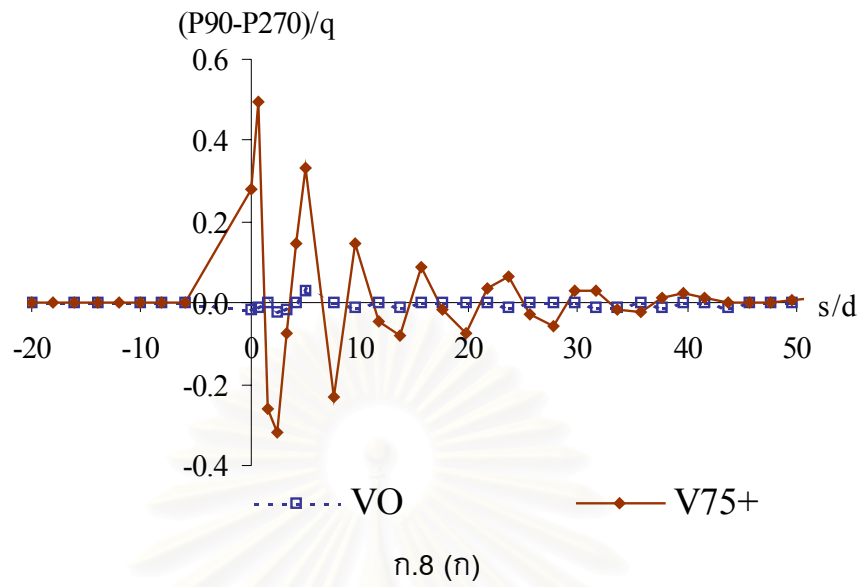


ก.6 (ข)

รูปที่ ก.6 ความแตกต่างความดันสถิตในช่วงท่อโค้ง 90 องศา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

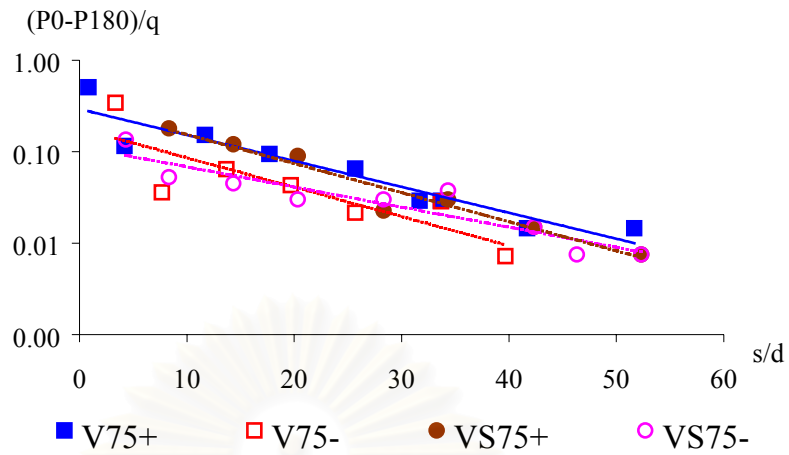


รูปที่ ก.7 ความแตกต่างความดัน (P0-P180) ที่ท่อตรงด้านทางออกของท่อโค้ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.8 ความแตกต่างความดัน (P90-P270) ที่ท่อตรงด้านทางออกของท่อโค้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



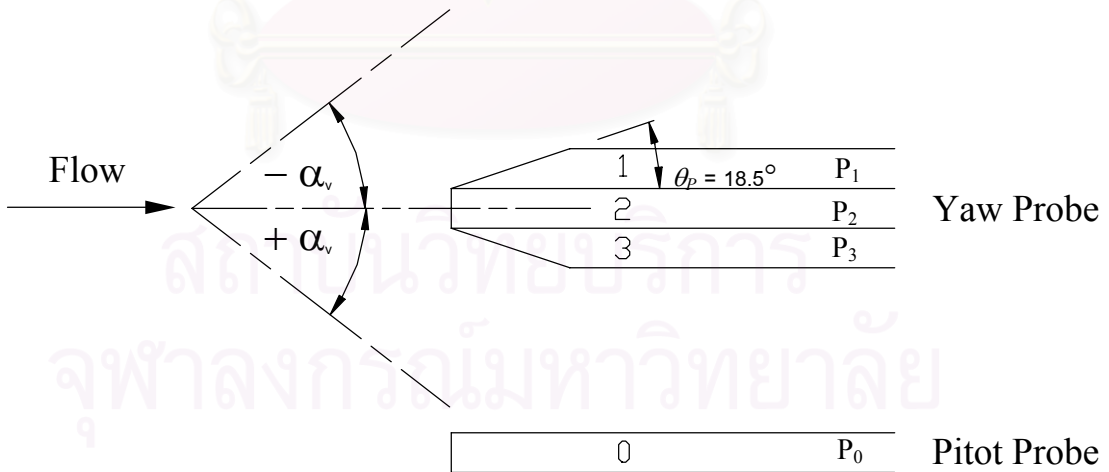
รูปที่ ก.9 แอมพลิจูดการแกว่งของความแตกต่างความดันที่เกิดขึ้นของกรณีการไหลแบบหมุนวนที่ไม่สมมาตรตามแนวแกนในท่อตรงและไหลผ่านท่อโค้ง

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบและคำนวณความเร็วการไหลจากการวัดด้วย Yaw Probe

ข.1 Yaw Probe ที่ใช้ในการทดลอง

โดยทั่วไป Pitot Probe สามารถใช้งานได้ดีกับการวัดความเร็วของของไหลที่ทราบทิศทางในการไหล แต่สำหรับการไหลแบบหมุนวนที่ของไหลมีความเร็วในสองทิศทางและไม่สามารถทราบมุมปะทะของความเร็วการไหลกับ Probe ทำให้ไม่สามารถใช้ Pitot Probe ในการวัดความเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้จัดทำ Yaw Probe ขึ้นเพื่อวัดการไหลที่มีความเร็วในสองทิศทาง โดย Yaw Probe ที่ใช้ทำขึ้นจากเข็มฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.25 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 mm จำนวน 3 อัน เรียงติดกัน โดยเข็มอันที่ 1 และ 3 ถูกฝนให้มีมุมเอียง θ_p เท่ากับ 18.5 องศา และติดเข้ากับเข็มอันที่ 2 ที่อยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ ข.1 เข็มทั้ง 3 ถูกเชื่อมติดกันและงอโค้งเป็นมุมฉาก โดยมีระยะจากปลายเข็มถึงก้านเข็มยาว 35 mm เข็มแต่ละอันต่อเข้ากับท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1/8 นิ้ว หนา 0.5 mm ท่อทองเหลืองทั้ง 3 อันถูกเชื่อมเข้าไว้ด้วยกันเพื่อใช้เป็นก้าน Probe ในการใช้งานจะต่อสายจากปลายท่อทองเหลืองเข้ากับมาโนมิเตอร์เพื่อใช้วัดผลต่างความดันระหว่างเข็มแต่ละอัน แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วของการไหลในทิศทางต่างๆ



รูปที่ ข.1 แสดงลักษณะของ Yaw Probe

ข.2 การปรับเทียบ Yaw Probe (Yaw Probe Calibration)

ในการวัดความเร็วของการไหลได้มีการปรับเทียบ Yaw Probe เพื่อหาความสัมพันธ์ของผลต่างความดันที่วัดได้กับค่าความเร็วตามแนวแกน และแนวสัมผัส โดยทำการปรับเทียบในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด 30X30 cm ที่ความเร็ว 10 และ 15 m/s แล้ววัดผลต่างความดันระหว่างเข็มแต่ละอันของ Yaw Probe (P_2-P_1 , P_2-P_3 และ P_1-P_3) และผลต่างความดันระหว่าง Pitot Probe กับเข็มหมายเลข 2 ของ Yaw Probe (P_0-P_2) นอกจากนี้ยังวัดค่าความดันจลน์ของการไหลโดยวัดผลต่างความดันระหว่าง Pitot Probe กับความดันสถิตที่ผนังของอุโมงค์ลม

ในการปรับเทียบได้ควบคุมให้การไหลมีความดันจลน์คงที่แล้วปรับเปลี่ยนมุมปะทะ (α_v) ของการไหลกับ Yaw Probe โดยหมุน Yaw Probe ไปทีละ 5 องศา ตั้งแต่ -80 ถึง 80 องศา ผลต่างความดันที่ได้จะนำมาหาความสัมพันธ์ได้ตามสมการ (ข1) - (ข3) (Chue,S.H., 1975)

$$P_1 = P_0 + K_1 \Delta P \quad (\text{ข1})$$

$$P_2 = P_0 + K_2 \Delta P \quad (\text{ข2})$$

$$P_3 = P_0 + K_3 \Delta P \quad (\text{ข3})$$

โดย ΔP คือค่าความดันจลน์ของการทดลอง

K_1, K_2, K_3 คือ Calibration Function

จากสมการ (ข1) - (ข3) สามารถหาค่า Calibration Function K_1, K_2 และ K_3 ที่มุมปะทะ (α_v) ต่างๆ ได้ที่สองความเร็ว (10 และ 15 m/s) หรือที่สองค่าความดันจลน์ของการไหล จากนั้นจึงหาค่า Calibration Function K_0 ได้ตามสมการ (ข4) (Chue, S.H., 1975)

$$K_0 = \frac{(K_2 - K_3)}{(K_2 - K_1)} = \frac{(P_2 - P_3)}{(P_2 - P_1)} \quad (\text{ข4})$$

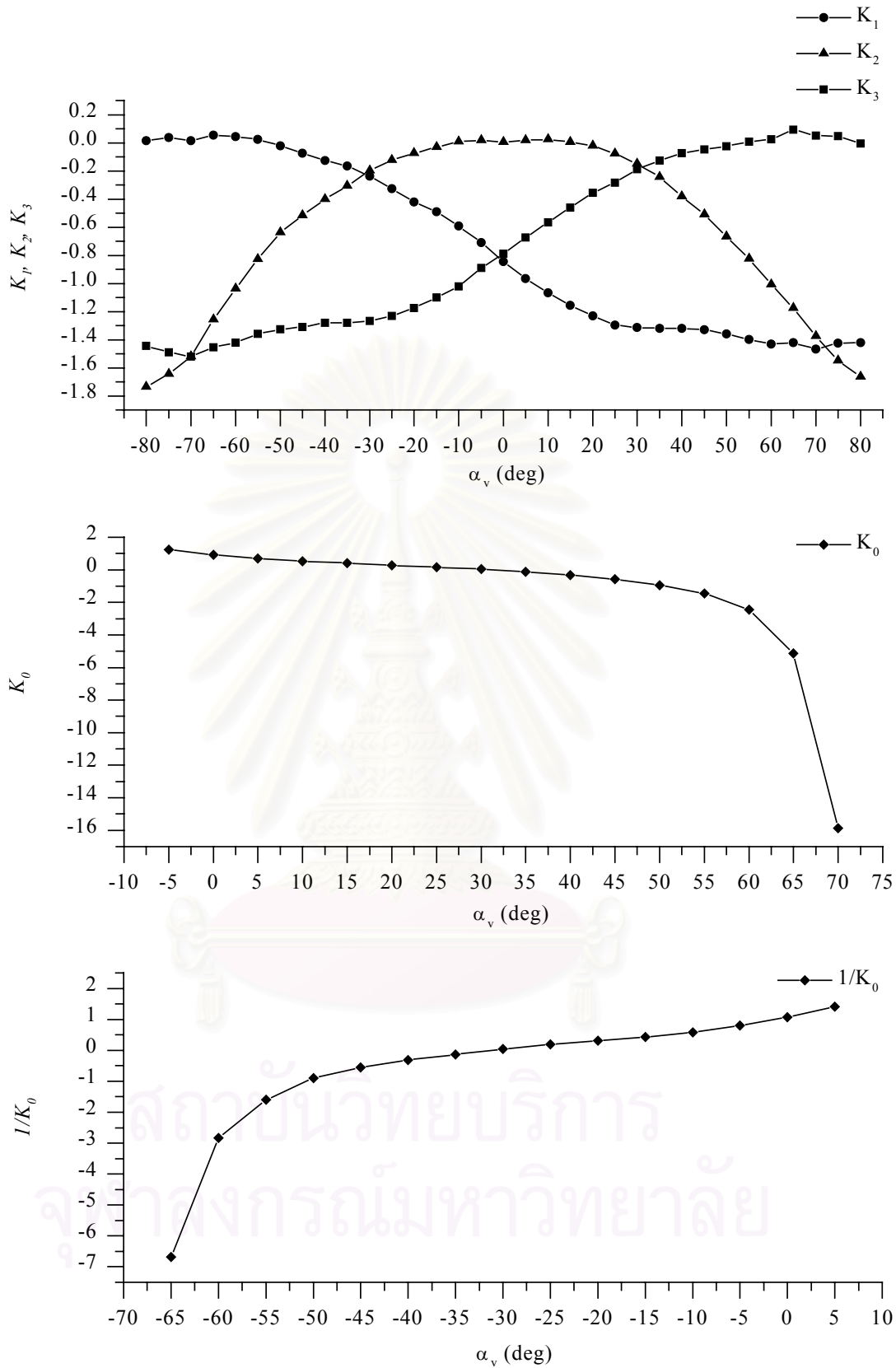
ในการคำนวณค่าความเร็วที่วัดได้จะใช้ค่า Calibration Function K_1, K_2, K_3 และ K_0 เฉลี่ยที่สองความเร็ว โดยได้นำมาพล็อตกราฟที่มุมปะทะของการไหล (α_v) ต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ ข.2 ดังนั้นในการทดลองวัดความเร็วการไหลจากค่าความแตกต่างความดันที่วัดได้ที่เข็มแต่ละอัน เมื่อนำค่าที่ได้มาหาค่า K_0 (ตามสมการ ข4) จะสามารถหาค่ามุมปะทะของการไหล (α_v) ได้จากการเปรียบเทียบกับ Calibration Function และนำค่ามุมปะทะที่หาได้ไปหา Calibration Function (K_1-K_2) จากนั้นสามารถหาค่าความดันจลน์ (ΔP) ของการทดลองได้จากสมการ (ข1) และ (ข3) โดยนำค่า Calibration Function (K_1-K_2) ที่หาได้ไปหารค่าความดัน P_1-P_2 ที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งเมื่อได้ค่าความดันจลน์และมุมปะทะของการไหลแล้วสามารถคำนวณเพื่อหาค่าความเร็วตามแนวแกน (u) และความเร็วตามแนวสัมผัส (w) ได้จาก

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \cos \alpha \quad (15)$$

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \sin \alpha \quad (16)$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.2 กราฟแสดง Calibration Function ที่มุมปะทะต่างๆ

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)

ในการวัดความดันของงานวิทยานิพนธ์นี้ ใช้มาโนมิเตอร์แบบเอียงที่สามารถอ่านค่าความดันได้ในช่วง 0-50 mmH₂O มีความละเอียดในการอ่านค่า (Resolution) ± 0.2 mmH₂O ซึ่งสามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าต่างๆ ได้ดังนี้

ค.1 ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การกระจายความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref})

ค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด นิยามตามสมการ

$$C_{Pref} = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2} \quad (ค1)$$

เมื่อ $P - P_{ref}$ เป็นความแตกต่างความดันสถิตระหว่างค่าความดันที่ตำแหน่งต่างๆ กับค่าความดันอ้างอิงเฉพาะหน้าตัด (P_{ref})
 $\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$ เป็นความดันจลน์เฉลี่ยของการทดลอง

จากสมการ Propagation of Uncertainty (S.J. Kline 1985) ได้ค่าความไม่แน่นอนของ C_{Pref} มีค่า

$$wC_{Pref} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{Pref}}{\partial (P - P_{ref})} w(P - P_{ref}) \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Pref}}{\partial (\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2)} w(\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2) \right)^2} \quad (ค2)$$

$$wC_{Pref} = \sqrt{\left(\frac{w(P - P_{ref})}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2} \right)^2 + \left(\frac{(P - P_{ref})}{(\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2)^2} w(\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2) \right)^2} \quad (ค3)$$

โดยกำหนดให้ความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่า $P - P_{ref}$ มีค่าเท่ากับความละเอียดในการอ่านค่าของเครื่องมือวัดความดันเท่ากับ ± 0.2 mmH₂O และความคลาดเคลื่อนของค่าความดัน

จลน์เฉลี่ยมีค่าน้อยประมาณศูนย์และมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละกรณีการทดลอง ซึ่งเมื่อเลือกกรณีการไหลแบบไม่หมุนวนที่มีการกระจายความดันสถิตแบบสมมาตรตามแนวแกน (NS00) สามารถคำนวณความไม่แน่นอนของ C_{Pref} มีค่า

$$wC_{Pref} = \sqrt{\left(\frac{1.96 \text{ Pa}}{36.07 \text{ Pa}}\right)^2} = 0.05 \quad (ค4)$$

จากสมการ (ค4) ได้ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัดในการทดลองนี้มีค่าประมาณ ± 0.05

สำหรับค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์ความดันสถิตที่มุม ψ ($wC_{P\psi}$) สัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉลี่ย (wC_{Pref}) สัมประสิทธิ์ความแตกต่างความดันสถิต (wC_{P0-180} และ $wC_{P90-270}$) และสัมประสิทธิ์ความดันรวม (wC_{PT}) มีค่าประมาณเท่ากับความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด มีค่าประมาณ $\pm 5\%$ ของความดันจลน์เฉลี่ย

สำหรับความแตกต่างความดันสถิตมากสุดในหน้าตัด $\Delta C_{Pref \max}$ ซึ่งเป็นผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิตเฉพาะหน้าตัด (C_{Pref}) มากสุดและน้อยสุดในแต่ละหน้าตัด จะมีความไม่แน่นอนประมาณ $\pm 10\%$ ของความดันจลน์เฉลี่ย

ค.2 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe

การคำนวณความเร็วของการไหลด้วย Pitot Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (ค5)$$

เมื่อ ΔP เป็นความดันจลน์ของการไหล
 ρ เป็นความหนาแน่นของอากาศ

จากสมการ (ค5) ได้ความไม่แน่นอนของความเร็ว (wu) ตามสมการ

$$wu = \sqrt{\left(\frac{w\Delta P}{\rho u}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P w\rho}{\rho^2 u}\right)^2} \quad (ค6)$$

โดยที่ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดันมีค่าประมาณ $\pm 0.2 \text{ mmH}_2\text{O}$ และให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความหนาแน่นอากาศมีค่าน้อยประมาณศูนย์ เมื่อเลือกกรณีการไหล

ในท่อตรงแบบไม่หมุนวน (NS00) ของการวัดความเร็วที่หน้าตัดทางออกท่อหมุนที่ตำแหน่ง $(r/R)_{x-x}$ เท่ากับ -0.82 ได้ความไม่แน่นอนของความเร็วมีค่า

$$wu = \sqrt{\left(\frac{1.96 \text{ Pa}}{1.17 \text{ kg/m}^3 \times 7.32 \text{ m/s}}\right)^2} = 0.23 \text{ m/s} \quad (\text{ค7})$$

ในการทดลองนี้ได้ว่าความไม่แน่นอนของค่าความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe มีค่าประมาณ $\pm 0.2 \text{ m/s}$ หรือมีค่าเป็นประมาณ 3% ของความเร็ว

ค.3 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe

การคำนวณค่าความเร็วจาก Yaw Probe ได้ทำการปรับเทียบเพื่อหา Calibration Function ตามความสัมพันธ์

$$K_1 - K_2 = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P} \quad (\text{ค8})$$

เมื่อ $P_1 - P_2$ เป็นความแตกต่างความดันระหว่างเข็ม 1 และ 2 ของ Yaw Probe
 ΔP เป็นค่าความดันจลน์ของการปรับเทียบเครื่องมือ

และมีความไม่แน่นอนของค่า Calibration Function ในการปรับเทียบเครื่องมือเป็น

$$w(K_1 - K_2) = \sqrt{\left[\frac{w(P_1 - P_2)}{\Delta P}\right]^2 + \left[\frac{(P_1 - P_2)w(\Delta P)}{(\Delta P)^2}\right]^2} \quad (\text{ค9})$$

สำหรับการคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(K_1 - K_2)}} \quad (\text{ค10})$$

เมื่อ $P_1 - P_2$ เป็นความแตกต่างความดันระหว่างเข็ม 1 และ 2 ของ Yaw Probe

K_1-K_2 เป็นค่า Calibration Function

ซึ่งได้ความไม่แน่นอนของค่าความเร็วเป็น

$$wV = \sqrt{\frac{(w(P_1 - P_2))^2}{2\rho(P_1 - P_2)(K_1 - K_2)} + \frac{(P_1 - P_2)(w(K_1 - K_2))^2}{2\rho(K_1 - K_2)^3}} \quad (\text{ค11})$$

ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว ได้เลือกใช้ค่าความไม่แน่นอนของ Calibration Function ($w(K_1 - K_2)$) ในการเปรียบเทียบเครื่องมือ (ตามสมการ ค9) เป็นค่ามากที่สุดเท่ากับ ± 0.05 และเมื่อเลือกกรณีการทดลอง NS06 ในแนวการวัดความเร็ว X-X ที่ตำแหน่ง $(r/R)_{X-X} = 0.44$ ซึ่งมีค่า P_1-P_2 เท่ากับ -55.9 Pa และมีค่า K_1-K_2 เท่ากับ -1.13 ได้ค่าความไม่แน่นอนของความเร็วเป็น

$$\begin{aligned} wV &= \sqrt{\frac{1.96^2}{2(1.17)(-55.9)(-1.13)} + \frac{(-55.9)(0.05)^2}{2(1.17)(-1.13)^3}} \\ &= \pm 0.25 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (\text{ค12})$$

จากความเร็ว V ที่คำนวณได้จาก Yaw Probe สามารถคำนวณความเร็วตามแนวแกน (u) และความเร็วตามแนวสัมผัส (w) ได้ตามความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} u &= V \cos \alpha_v \\ w &= V \sin \alpha_v \end{aligned} \quad (\text{ค13})$$

เมื่อ α_v เป็นมุมปะทะของการไหลกับ Probe

และสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกน และความเร็วตามแนวสัมผัสได้จาก

$$\begin{aligned} wu &= \sqrt{(\cos \alpha_v wV)^2 + (V \sin \alpha_v w \alpha_v)^2} \\ ww &= \sqrt{(\sin \alpha_v wV)^2 + (V \cos \alpha_v w \alpha_v)^2} \end{aligned} \quad (\text{ค14})$$

โดยกำหนดให้ความไม่แน่นอนของมุมปะทะ $w\alpha_v$ มีค่าประมาณ ± 2.5 องศา และเลือกกรณี NS06 ในแนวการวัดความเร็ว X-X ที่ตำแหน่ง $(r/R)_{X-X} = 0.85$ ซึ่งมีค่า V เท่ากับ 8.18 m/s wV เท่ากับ ± 0.23 m/s และ α_v เท่ากับ 26.6° ได้ค่าความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวสัมผัสเป็น

$$\begin{aligned}
 w_u &= \sqrt{(\cos 26.6 \times 0.23)^2 + (8.18 \sin 26.6 \times \frac{2.5\pi}{180})^2} \\
 &= \pm 0.26 \text{ m/s} \\
 w_w &= \sqrt{(\sin 26.6 \times 0.23)^2 + (8.18 \cos 26.6 \times \frac{2.5\pi}{180})^2} \\
 &= \pm 0.34 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \tag{๑15}$$

$$\begin{aligned}
 \%w_u &= \frac{0.26}{7.31} \times 100 \\
 &= \pm 4\% \\
 \%w_w &= \frac{0.34}{3.66} \times 100 \\
 &= \pm 9\%
 \end{aligned}
 \tag{๑16}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นาย เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนกร เกิดวันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2519 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย