

## รายการอ้างอิง

- Abramovich, G.N. (1963). The Theory of Turbulent Jets. English Translation, Massachusetts: M.I.T. Press.
- Adnan, E., and Robert, E.B. (2001), March. Structure, Penetration, and Mixing of Pulsed Jets in Crossflow. AIAA Journal, 417-423.
- Ahmed, S.A., So, R.M., and Mongia, H.C. (1985). Density effects on jet characteristics in confined swirling flow. Experiment in Fluids 3: 231-238.
- Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A., and Rouse, H. (1950). Diffusion of submerged jets. Trans. A.S.C.E. 115: 639-697.
- Andreopoulos, J. (1983). Heat transfer measurements in a heated jet pipe flow issuing into a cold cross-stream. Phys Fluids. 26: 3201-3210.
- Anwer, M., and So, R.M.C. (1989). Rotation effects on a fully developed turbulent pipe flow. Experiment in Fluid. 8: 33-40.
- Chue, S. H. (1975). Pressure probes for fluid measurement. Prog. Aerospace Sci. 16, No. 2: 147-223.
- Corrsin, S. (1946). Investigation of flow in an axially symmetric heated jet of air. N.A.C.A. Wartime Report. W-49.
- Ferrell, G.B., and Lilley, D.G. (1985). Deflected Jet Experiments in a Turbulent Combustor Flowfield. NASA Report. No.174863.
- Feyedelem, M. S., and Sarpkaya, T. (1997). Free and near-free-surface swirling turbulent jets. AIAA Paper. No. 97-0438.
- Findlay, M.J., Salcudean, M., and Gartshore, I.S. (1999). Jets in a Crossflow: Effects of Geometry and Blowing Ratio. J. Fluids Eng. 121: 373-378.
- Fric, T.F., and Roshko, A. (1991). Structure in the near field of the transverse jet. Seventh Symposium on Turbulent Shear Flows. 6.4.17-6.4.6.
- Fric, T.F., and Roshko, A. (1994). Vortical structure in the wake of a transverse jet. J. Fluid Mech. 279: 1-47.
- Fric, T.F. (1990). Structure in the near field of the transverse jet. Doctoral dissertation, California Institute of Technology.
- Hinze, J.O., and Zijnen, B.G. (1949). Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetric jet. J. Appl. Sci. Res. A1: 435-461.
- Holdeman, J.D. (1993). Mixing of Multiple Jets with a Subsonic Cross-Flow. Prog. Energy Combust. Sci. 19. AIAA. 91-2458. NASA TM. 104412.
- Holdeman, J.D., Liscinsky, D.S., Oechsle, V.L., Samuelsen, G.S., and Smith C.E. (1996). Mixing of Multiple Jets With a Confined Subsonic Crossflow in a Cylindrical duct. NASA Technical Memorandum. 107185. ASME. 96-GT-482.
- Holdeman, J.D., Walker, R.E., and Kors, D.L. (1973). Mixing of Multiple Dilution Jets with a Hot Primary Airstream for Gas Turbine Applications. AIAA. 73-1249. NASA TM. 71426.
- Isaac, K. M., and Jakubowski, A. K. (1985), November. Experimental Study of the Interaction of Multiple Jets with a Cross Flow. AIAA Journal. 1: 1679-1683.
- Isaac, K.M., and Schetz, J.A. (1982), December. Analysis of Multiple Jets in a Cross-flow. Journal of fluids Engineering, Transaction of ASME. 104: 489-492.
- Kamotani, Y., and Greber, I (1972). Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow. AIAA Journal. 11: 1425 -1429.

- Kamotani, Y., and Greber, I. (1974). Experiments on Confined Turbulent Jets in Cross Flow. NASA CR-2372
- Keffer J.F., and Baines, W.D. (1963). The round turbulent in a crosswind. J fluid Mech. 15: 481-496.
- Kelso, R.M., Lim, T.T., and Perry, A.E. (1996). An experimental study of round jets in cross-flow. J. Fluid Mech. 306: 111-144.
- Kline, S.J. (1985). The purposes of uncertainty analysis. Trans. ASME Journal of Fluids Engineering. 107: 153-160.
- Kobkanjanakorn, K., and Bunyajitradulya, A. (1998). Decays of Non-Axisymmetric Pressure Distribution In Non-Axisymmetric Swirling Pipe Flows. The 12<sup>th</sup> National Academic seminar on Mechanical Engineering. 3: 97-106.
- Kroll, J.T., Sowa, W.A., and Samuelsen, G.S. (2000). Optimization of Orifice Geometry for Crossflow Mixing in a Cylindrical Duct. Journal of Propulsion and Power. 16: 929-938.
- Leong, M. Y., Samuelsen, G.S., and Holdeman, J.D. (1995). Jet Mixing in a Reacting Cylindrical Crossflow. AIAA Paper. 95-3109. NASA CR.187141.
- Lim, T.T., New, T.H., and Luo, S.C. (2001), March. On the development of large-scale structures of a jet normal to a crossflow. Physics of Fluids. 700-775.
- Makiahita, T., and Miyai Y. (1979), June. Trajectories of Single and Double Jets Injected into a Cross Flow of Arbitrary Velocity Distribution. Journal of Fluids Engineering. 101: 217-223
- Margason, R.J. (1968). The path of a jet directed at large angles to a subsonic freestream. Technical Report. TN D-4919. NASA.
- Ong, L.H., and Lilley, D.G. (1986). Measurements of Single Lateral Jet Injected into Swirling Crossflow. NASA report. No. 175040.
- Platten, J.L., and Keffer, J.F. (1971), December. Deflect Turbulent Jet Flows. Transaction of ASME. 756-758.
- Pratte, B.D., and Baines, W.D. (1967), November. Profile of the round turbulent jet in a cross flow. Journal of the Hydraulics Division. 5556-5563.
- Rajaratnum, N. (1976). Turbulent Jets, New York. EISEVIER Scientific publishing Company.
- Ramsey, J.W., and Goldstein, R.J. (1970). Interaction of a heat jet with a deflecting stream. NASA. CR-72613.
- Ricou, F.P., and Spalding, D.B. (1961). Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets. J. Fluid Mech. 11: 21-32.
- Ruad, N., Bury, Y., Bazile, R. Boree, J., and Charnay, G. (1999). Experimental Study of the Behavior of Confined Variable Density Jets in a time Varying Crossflow. Journal of Fluid Engineering. 121: 65-72.
- Sander, G.F., and Lilley, D.G. (1983). The Performance of an Annular Vane Swirler., AIAA Paper. No. 83-1326.
- Sarpkaya, T. (1974). Effect of the adverse pressure gradient on vortex breakdown, AIAA J. 12: 602-607.
- Schwendemann, M. F. (1973), May. A Wind Tunnel Investigation of Stratified Jets and Closely Spaced Jets Exhausting into a Cross Flow. CA. Northrop Aircraft Division. Hawthorne. 73-98
- Sforza, P.M., and Mons, R.F. (1978). Mass, momentum, and energy transport in turbulent free jets. Int. J Heat Mass Transfer.21: 371-384.
- Sgarif, M.A.R., and Busnaina, A.A. (1989). Modeling of Lateral Jets Injected into Swirling Crossflow. Chem.Eng.Comm. 78: 213-232.

- Sherif, S.A., and Pletcher, R.H. (1989). Measurements of the thermal characteristics of heated turbulent jets in crossflow. *J. Heat Transfer*. 111: 897-903.
- Sivadas, V., Pani, B.S., Butefisch, K.A., and Meier, G.E.A. (1997). Flow visualisation studies on growth of area of deflected jets. *Exp. Fluids*. 13: 105-112.
- Smith, S.H., and Mungal, M.G. (1998). Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow. *J. Fluid Mech.* 357: 83-122.
- So, R.M.C., and Ahmed, S.A. (1984). Characteristics of confined turbulent gas jets. *Proc. 9<sup>th</sup> Biennial Symposium on Turbulence*. Univ.of Missouri-Rolla.
- So, R.M.C., Ahmed, S.A., and Mongia, H.C. (1984). An experimental investigation of gas jets in confined swirling air flow. *NASA*. CR-3832.
- So, R.M.C., Ahmed, S.A., and Mongia, H.C. (1985). Jet characteristics in confined swirling flow. *Exp.Fluids*. 3: 221-230.
- Stoy, R., and Ben-Haim, Y. (1973), December. Turbulent Jet in a Confined Crossflow. *Journal of Fluid Engineering*. 551-556.
- Tenneke, H., and Lumley, J.L. (1972). *A First course in Turbulence*. M.I.T. Press, Cambridge.
- Townsend, A.A. (1956). *The Structure of Turbulent Shear Flow*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Weske, D.R., and Sturov, G.YE. (1974). Experimental Study of Turbulent Swirled Flows in a Cylindrical Tube. *Fluid Mechanics-Soviet Research*. 3: 77-82.
- Wu, M.M., Garcia, A., Chomaz, J.M., and Huerre, P. (1992). Instabilities in a swirling water jet. *Bull Am. Phys. Soc*. 37: 1789.
- Yuan, L.L., and Street, R.L. (1998). Trajectory and entrainment of a round jet in crossflow. *Phys. fluids*. 10: No. 9. 2323-2335.
- Zigler, H., and Wooler, P.T. (1973). Analysis of Stratified and Closely Spaced Jets Exhausting into a Cross-Flow. *NASA*. CR-132297.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก**

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การศึกษาเบื้องต้น

#### ก.1 บทนำ

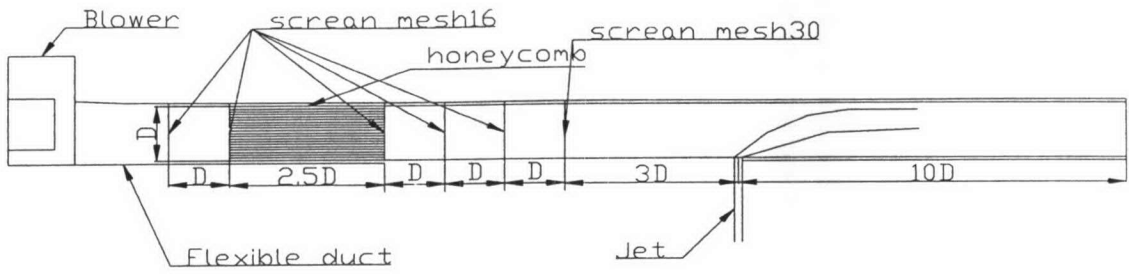
การศึกษาเบื้องต้นนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วของเจ็ทกับกระแสลมขวางต่อคุณลักษณะการไหล โดยเฉพาะระยะการเจาะทะลุ (Penetration depth) ของเจ็ทในกระแสลมขวางที่กระแสลมขวางมีพื้นที่จำกัด (Confined Crossflow) ซึ่งพิจารณาจากผลการวัดความดัน (Pitot Pressure) โดยใช้ Pitot probe นอกจากนี้ การศึกษานี้เป็นการทดลองวัดความไวของเครื่องมือวัด คือ Pitot probe ในขั้นต้น

#### ก.2 ชุดทดลอง

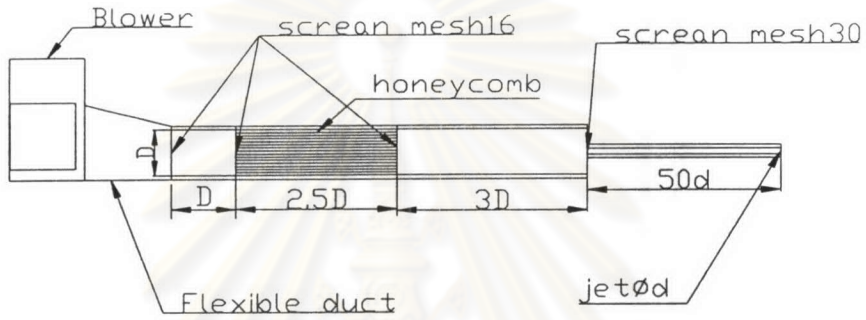
ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้นจะใช้ชุดทดลองที่ตั้งอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ชุดทดลองที่ใช้แบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ชุดเจ็ทและชุดกระแสลมขวางดังรูปที่ ก1

การทำงานของชุดกระแสลมขวาง Blower จะเป่าอากาศผ่าน Flexible duct โดยที่ Flexible duct จะช่วยลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจาก Blower ที่อาจส่งผลไปยังส่วนอื่น ๆ ของชุดทดลอง หลังจากอากาศผ่าน Flexible duct แล้วจะไหลไปยังส่วนต่อ PVC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ( $D$ ) 102 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ซึ่งประกอบด้วย Screen mesh 16 จำนวน 1 แผ่น เว้นระยะห่าง  $1D$  ต่อมาเป็น Honeycomb ที่ทำจากหลอดพลาสติกยาว  $2.5D$  สำหรับหลอดพลาสติกมีขนาด  $L/D_{\text{หลอด}} = 40$  โดยมี Screen mesh 16 ปิดหัว-ท้าย Honeycomb ต่อมาเป็น Screen mesh 16 จำนวน 2 แผ่น และ Screen mesh 30 อีก 1 แผ่น โดยระยะห่างระหว่าง Screen เท่ากับ  $1D$  ส่วนประกอบทั้งหมดทำหน้าที่ปรับทิศทางกรไหลของอากาศ และช่วยให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอเต็มหน้าตัด ก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนที่ใช้ในการทดลอง (Test section)

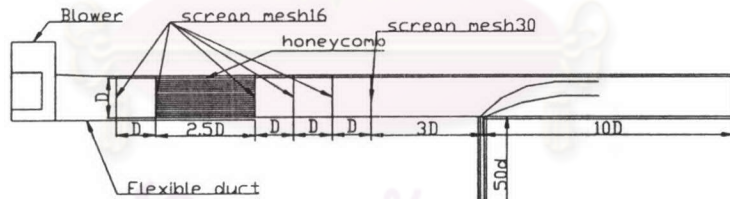
สำหรับการทำงานของชุดเจ็ทอากาศจะถูกเป่าจาก Blower ผ่าน Flexible duct เพื่อลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจาก Blower แล้วไหลต่อไปยังท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ( $D$ ) 76.2 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ซึ่งประกอบด้วย Screen mesh 16 จำนวน 1 แผ่น เว้นระยะห่าง  $1D$  ต่อมาเป็น Honeycomb ที่ทำจากหลอดพลาสติกยาว  $2.5D$  สำหรับหลอดพลาสติกมีขนาด  $L/D_{\text{หลอด}} = 40$  โดยมี Screen mesh 16 ปิดหัว-ท้าย ต่อมาเป็น Screen mesh 30 อีก 1 แผ่น โดยวางห่างจาก Honeycomb เท่ากับ  $3D$  จากนั้นได้ทำการลดหน้าตัดโดยใช้แผ่นอะคริลิกกันแล้วเจาะรูใส่ท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.76 มิลลิเมตร ( $3/16$  นิ้ว) ยาว  $50d_j$  เพื่อเร่งความเร็วการไหล และปล่อยให้การไหลที่ออกจากปาก เจ็ทให้เป็นการไหลแบบ Fully developed flow



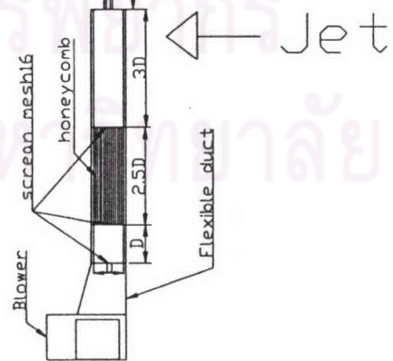
crossflow



Jet



Crossflow



รูปที่ ๓1 รูปชุดทดลอง

ในการประกอบชุดกระแสลมขวางและชุดเจ็ทจะประกอบโดยใส่เจ็ทบริเวณหลัง Screen ตัวสุดท้าย (mesh 30) ของชุด Crossflow เป็นระยะทาง 3D

### ก.3 พารามิเตอร์ของการทดลอง

ในการศึกษาเบื้องต้น ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วต่อคุณลักษณะการไหล โดยเฉพาะระยะการเจาะทะลุของเจ็ท (Penetration depth,  $P$ ) นิยามโดยใช้ค่า  $C_{p_{max}}$  โดยใช้ค่าความดันที่แตกต่างกันซึ่งแสดงในรูปของ Coefficient of pitot pressure,  $C_p$  นิยามโดย

$$C_p = \frac{P_i - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2}$$

โดยที่  $P_i$  คือ Pitot pressure จาก Pitot tube ณ.ตำแหน่งที่ทำการวัด  
 $P_{ref}$  คือ Static pressure ณ.ตำแหน่ง ที่ทำการวัด (Local reference)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ; ใช้ค่าที่อุณหภูมิ 27°C  $\approx 1.17 \text{ kg/m}^3$

$\bar{u}$  คือ Bulk velocity ของ Uniform Crossflow วัดที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าเจ็ทเป็นระยะทาง 1D

ในการศึกษาผลของ Velocity ratio พารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ  $r_{eff} = \frac{u_{j,c}}{u_{cf}}$

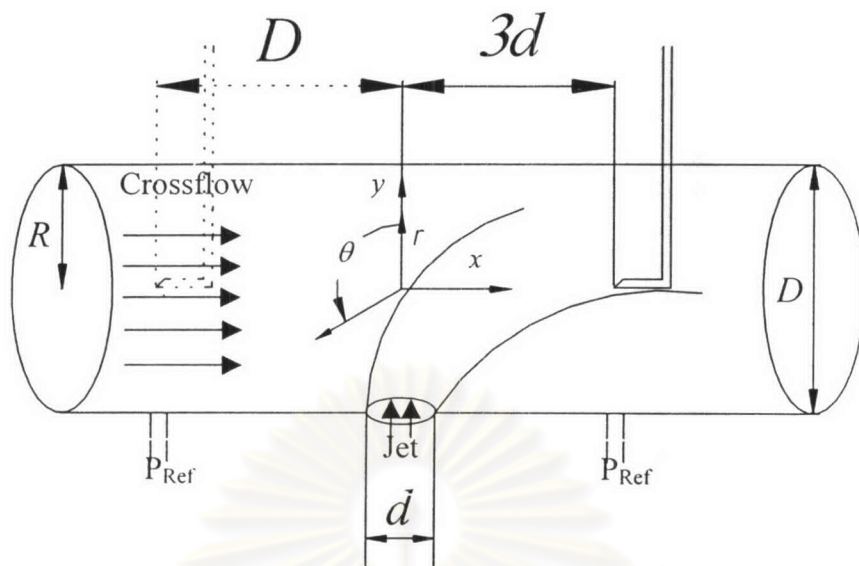
โดยที่  $u_{j,c}$  คือ ความเร็วที่กึ่งกลางปากทางออกของเจ็ท

$u_{cf}$  คือ Bulk velocity ของ Crossflow วัดที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าเจ็ทเป็นระยะทาง 1D

### ก.4 รายละเอียดของการวัด

ในการศึกษาเบื้องต้นนั้นได้ทำการวัดรูปร่างการกระจายตัวของความเร็ว ที่ตำแหน่ง 1D ก่อนเจ็ทและ Pitot Pressure ที่ ตำแหน่ง 3d หลังจากเจ็ทที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆเพื่อศึกษาผลของ อัตราส่วนความเร็วต่อลักษณะการไหล ทั้งหมด 3 กรณี คือที่  $r_{eff} = 3, 4.5, 7.5$  โดยทำการทดลองที่ค่าความเร็วสูงสุดของเจ็ท (ในการวัดค่าความเร็วเจ็ทจะทำการวัดก่อนนำไปติดกับชุดกระแสลมขวาง) เท่ากับ 30 เมตรต่อวินาที และทำการเปลี่ยนแปลงค่า Bulk velocity ของกระแสลมขวางต่าง ๆ กัน คือ 10, 6.5 และ 4 m/s. (คิดเป็น  $r_{eff} = 3, 4.5, 7.5$ ) ตามลำดับ

อุปกรณ์การวัดรูปร่างการกระจายตัวของความเร็วใช้ Pitot probe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.2 มิลลิเมตร โดยมีตำแหน่งที่ทำการวัดและแกนพิกัดอ้างอิง ดังรูปที่ ก2



รูปที่ ก2 ระบบแกนอ้างอิง

### ก.5 ผลการทดลอง

รูปที่ ก3 – ก5 แสดง Initial profile ของ  $C_p$  ในกรณีที่มีเจ็ตและไม่มีเจ็ต ณ ตำแหน่ง  $1D$  ก่อนถึงเจ็ตที่  $r_{eff} = 3, 4.5$  และ  $7.5$  ตามลำดับ โดยผลการทดลองในกรณีที่มีเจ็ตกับไม่มีเจ็ตจะให้ผลเช่นเดียวกัน คือ รูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ทั้งสองกรณี มีลักษณะเป็น Uniform Flow ใน Channel และค่อนข้างจะทับกันพอดี แสดงว่าเจ็ตไม่มีผลต่อรูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ที่ระยะ  $1D$  ก่อนถึงเจ็ต

สังเกตว่า ค่า  $C_p$  ที่ได้ มีค่ามากกว่าหนึ่งเนื่องจากการหารด้วยค่า Dynamic Pressure นั้น ค่าความเร็วที่ใช้ คือ Bulk velocity ของ Uniform Crossflow ( $\bar{u}$ )

รูปที่ ก6 ถึง ก8 แสดงรูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ในกรณีที่มีเจ็ตและไม่มีเจ็ต ณ ตำแหน่ง  $3d$  หลังจากเจ็ตที่  $r_{eff} = 3, 4.5$  และ  $7.5$  ตามลำดับ โดยผลการทดลองของทั้งสองกรณี จะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งจากรูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  จะสามารถประมาณบริเวณของเจ็ตได้ดังนี้

จากกราฟรูปที่ ก6 แสดงรูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ในกรณีที่มีเจ็ตและไม่มีเจ็ตซึ่งในกรณีที่มีเจ็ตจะเห็นว่า ค่า  $C_p$  ของกราฟจะค่อยๆเพิ่มจากศูนย์จนถึงค่าสูงสุด = 0.28 ที่ระยะ  $r/R$  เท่ากับ -0.88 แล้วลดลงจนถึงค่าต่ำสุด = 0.16 ที่ระยะ  $r/R$  เท่ากับ -0.78 จากนั้นค่า  $C_p$  จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุด = 1.23 ที่ระยะ  $r/R$  เท่ากับ -0.69 และ จะลดลงจนมีค่าประมาณ 1 ที่ระยะ



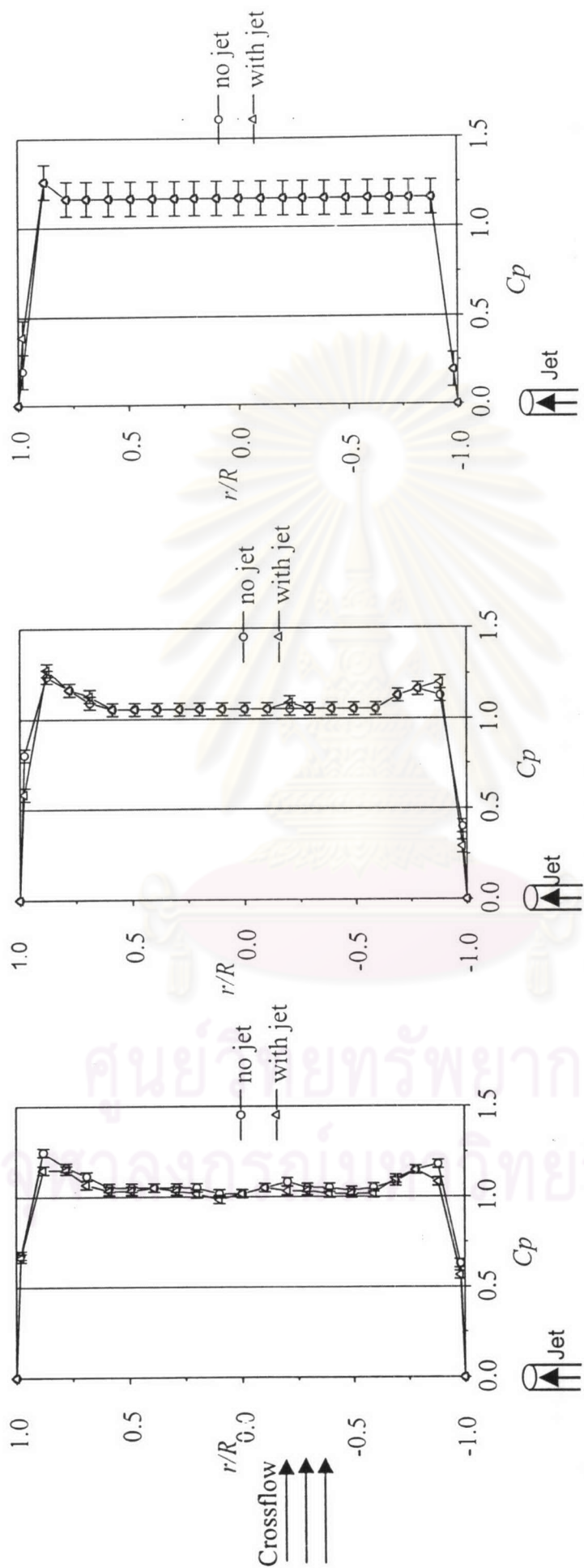
$r/R$  เท่ากับ  $-0.59$  แล้วจะคงที่จนถึงที่  $r/R$  เท่ากับ  $0.88$  จากนั้นจะลดลงจน  $C_p$  เท่ากับศูนย์ที่ขอบท่อด้านบน

ในการวิเคราะห์ส่วนต่างๆจากกราฟรูปที่ 6 จะเห็นว่ารูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ในกรณีที่มีเจ็ตเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีเจ็ต ช่วงแรกรูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ในกรณีที่มีเจ็ตมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีเจ็ต ช่วงดังกล่าวน่าจะเป็นช่วง wake เนื่องจากเจ็ตที่พุ่งออกมาจะประพุดตีตัวคล้าย Solid body กีดขวาง Flow ในช่วงนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ย่อยๆ คือ ช่วงที่ค่า  $C_p$  มีค่าสูงแต่ยังต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีเจ็ตจนถึงจุด Peak ครั้งแรก ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความดัน pitot ปานกลาง และช่วงที่ค่า  $C_p$  ลดต่ำลงอีกครั้งจนถึงค่า  $C_p$  ต่ำที่สุด ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความดัน Pitot ต่ำ ช่วงต่อมารูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ในกรณีที่มีเจ็ตมีค่าสูงกว่ารูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ในกรณีที่ไม่มีเจ็ต ช่วงดังกล่าวน่าจะเป็นช่วงเจ็ต เพราะเจ็ตจะถูกกระแสลมขวางดันให้เปลี่ยนทิศทาง พุ่งเข้าหาหัว Probe ทำให้วัดค่าความดันได้เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Dynamic Pressure ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วของเจ็ต ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีความดัน Pitot สูงสุด และส่วนสุดท้าย ค่า  $C_p$  ทั้งสองกรณีมีค่าประมาณใกล้เคียงกัน ช่วงดังกล่าวจึงน่าจะเป็นช่วงของ Freestream ดังแสดงความสัมพันธ์ของช่วงต่างๆในรูปที่ 69

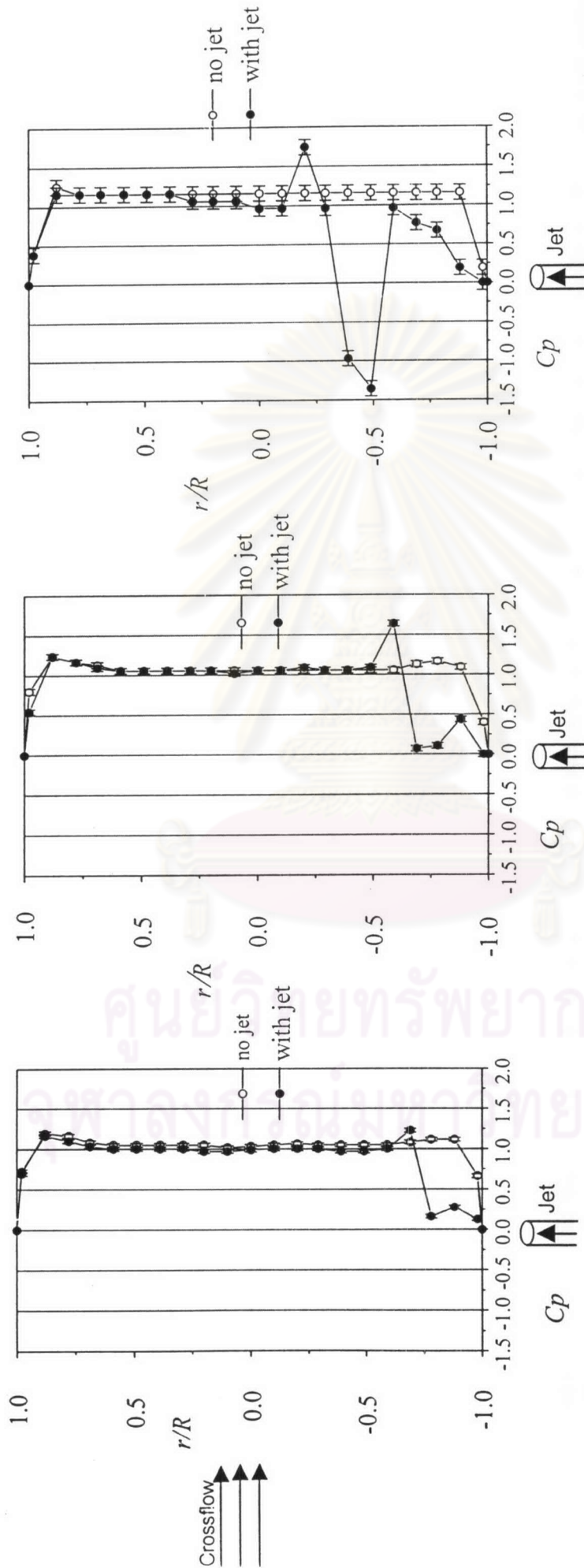
คุณลักษณะการกระจายตัวของ Pitot pressure ในกรณี  $r_{eff} = 4.5$  และ  $7.5$  ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 67 และ 68 ตามลำดับ จากคุณลักษณะการกระจายตัวของ Pitot pressure นี้ นิยามให้  $C_{pmax1}$  ให้เป็นค่า Local Maximum  $C_p$  ที่บริเวณใกล้ผนังด้านเจ็ต,  $C_{pmin}$  ให้เป็นค่า Local Minimum  $C_p$  ที่บริเวณเหนือขึ้นมา และ  $C_{pmax2}$  ให้เป็นค่า Local Maximum  $C_p$  บริเวณด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 66 ถึง 68 ดังนั้น เราอาจนิยามบริเวณที่เป็น Wake โดยสังเขปว่าเป็นบริเวณตั้งแต่ปากเจ็ต ( $r/R = -1$ ) จนถึงจุด  $C_{pmin}$  และบริเวณเจ็ตโดยสังเขปว่า เป็นบริเวณเหนือจุด  $C_{pmin}$  จนถึง Freestream และ ระยะเจาะทะลุเป็นระยะจากปากเจ็ต ( $r/R = -1$ ) จนถึง  $C_{pmax2}$

เป็นที่น่าสังเกตว่า ในกราฟรูปที่ 68 ( $r_{eff} = 7.5$ ) ค่า  $C_{pmin}$  มีค่าต่ำกว่าศูนย์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากตำแหน่งที่วัดอยู่ในช่วงใกล้ wake ทำให้ค่า  $C_p$  ลดต่ำมากคล้ายกับในกรณีของความดันบริเวณด้านหลังท่อทรงกระบอก ในกระแสลมขวาง

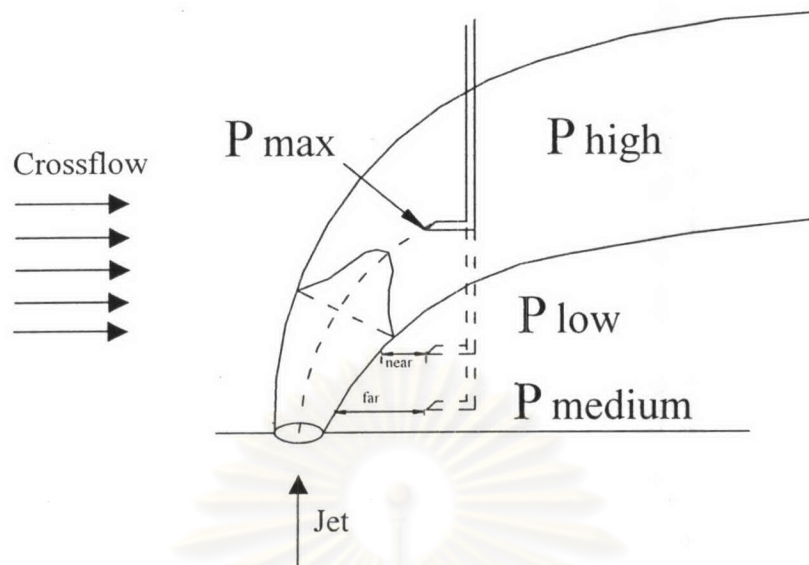
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก3 Initial profile ของ  $C_p$  ณ. ตำแหน่ง  $r_{eff} = 3$  1D ก่อนถึงเจ็ต ในกรณี  $r_{eff} = 3$   
 รูปที่ ก4 Initial profile ของ  $C_p$  ณ. ตำแหน่ง  $r_{eff} = 4.5$  1D ก่อนถึงเจ็ต ในกรณี  $r_{eff} = 4.5$   
 รูปที่ ก5 Initial profile ของ  $C_p$  ณ. ตำแหน่ง  $r_{eff} = 7.5$  1D ก่อนถึงเจ็ต ในกรณี  $r_{eff} = 7.5$



รูปที่ 6 รูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ณ. ตำแหน่ง รูปที่ 7 รูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ณ. ตำแหน่ง รูปที่ 8 รูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ณ. ตำแหน่ง  
3d หลังจกเจ็ต ในกรณี  $r_{eff} = 3$  3d หลังจกเจ็ตในกรณี  $r_{eff} = 4.5$  3d หลังจกเจ็ตในกรณี  $r_{eff} = 7.5$

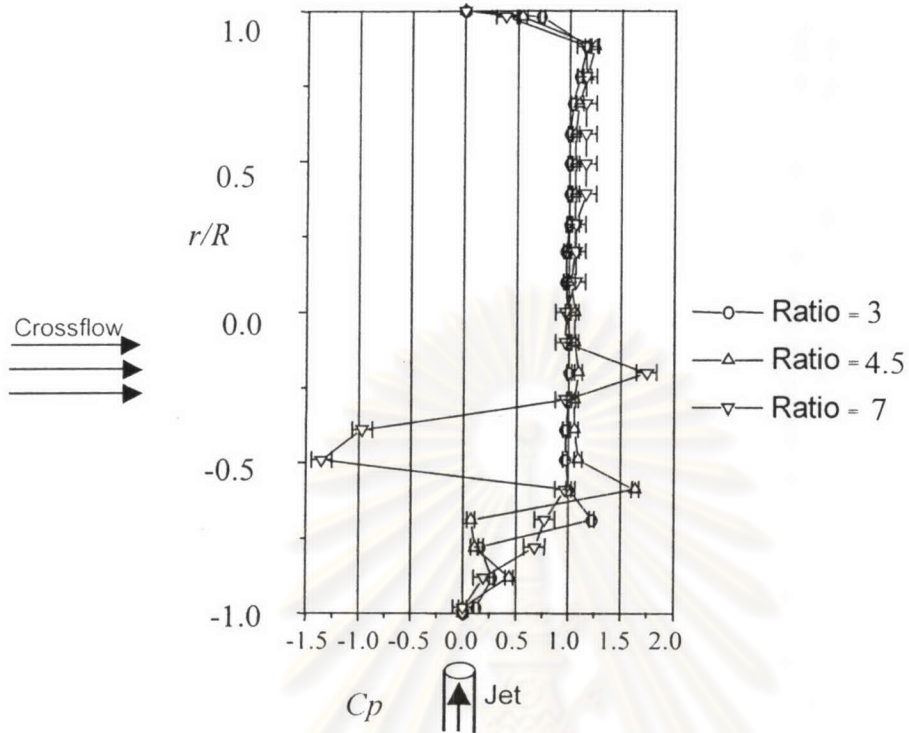


รูปที่ ก9 ตำแหน่งการวัดและการกระจายตัวความดันในบริเวณต่างๆ

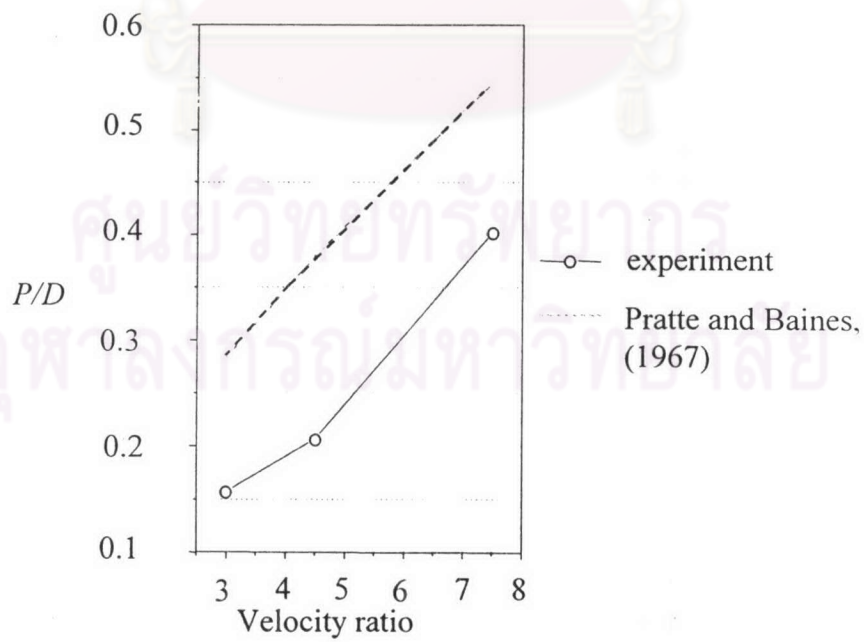
รูปที่ ก10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ที่  $r_{eff}$  ต่างๆ จะเห็นว่า ความสูงของช่วง wake และ Penetration Depth จะแปรตาม  $r_{eff}$  กล่าวคือ เมื่อ  $r_{eff}$  มาก ช่วง wake และ Penetration Depth ก็จะมากตามไปด้วย

รูปที่ ก11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Penetration depth กับ  $r_{eff}$  พบว่าค่า Penetration depth แปรตามค่า  $r_{eff}$  คือเมื่อค่า  $r_{eff}$  มาก ค่า Penetration depth ก็จะมีค่ามาก และเมื่อค่า  $r_{eff}$  น้อย ค่า Penetration depth ก็จะมีค่าน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการของ Pratte & Baines (1967) (ใช้สมการ Centerline Profile ในรูปที่ 1.5) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาค่า Penetration depth ของเจ็ต ใน Unconfined Crossflow พบว่า ค่า Penetration depth ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่า ซึ่งอาจเกิดจากผลของ Confined Crossflow เนื่องจาก 1) ใน Unconfined Crossflow กระแส Crossflow สามารถถูก Displace ขึ้นข้างบนได้อีก แต่ใน Confined Crossflow กระแส Crossflow ไม่สามารถถูก Displace ขึ้นข้างบนได้ จึงบีบและกดตัวเจ็ต ลง 2) นิยาม Penetration depth ของทั้ง 2 กรณีมีความแตกต่างกันบ้างเนื่องจากการวัด

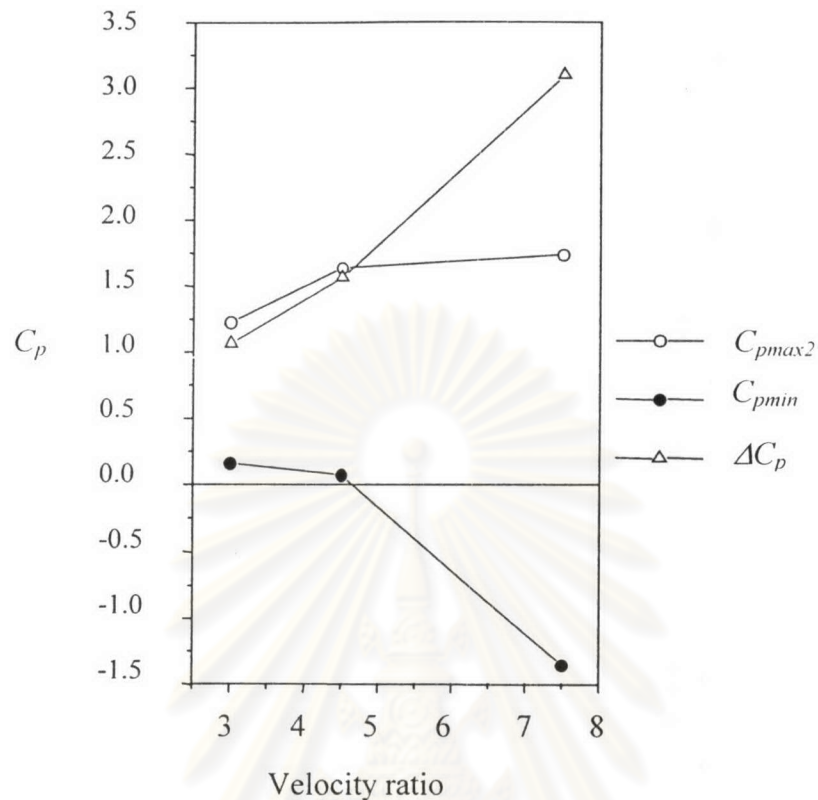
จากรูปที่ ก12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_{p_{max 2}}$ ,  $C_{p_{min}}$  และ  $\Delta C_p (C_{p_{max 2}} - C_{p_{min}})$  ที่  $r_{eff}$  ต่างๆ พบว่าค่า  $C_{p_{max 2}}$  และ  $\Delta C_p$  แปรตาม  $r_{eff}$  และค่า  $C_{p_{min}}$  แปรผกผันกับ  $r_{eff}$  คือเมื่อ  $r_{eff}$  มีค่ามากขึ้น ค่า  $C_{p_{max 2}}$  และ  $\Delta C_p$  จะมีค่ามากขึ้นแต่ค่า  $C_{p_{min}}$  จะมีค่าน้อยลง และเมื่อ  $r_{eff}$  มีค่าน้อยลง ค่า  $C_{p_{max 2}}$  และ  $\Delta C_p$  ก็จะมีค่าน้อยลงแต่ค่า  $C_{p_{min}}$  จะมีค่ามากขึ้น ผลที่ได้นี้อาจอธิบายได้ว่า เมื่อ  $r_{eff}$  เพิ่มขึ้นเจ็ตจะมีโมเมนตัมมากขึ้น ทำให้  $C_{p_{max 2}}$  เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกัน Wake จะมี deficit ของโมเมนตัมมากขึ้นทำให้  $C_{p_{min}}$  ลดลง



รูปที่ ก10 รูปร่างการกระจายตัวของ  $C_p$  ณ.ตำแหน่ง  $3d$  หลังจากเจ็ต ในกรณีที่เจ็ตมี  $r_{eff}$  ต่างๆ



รูปที่ ก11 Penetration depth ณ.ตำแหน่ง  $3d$  หลังจากเจ็ต ในกรณีที่เจ็ตมี  $r_{eff}$  ต่างๆ



รูปที่ ก12  $C_{p_{max2}}$  และ  $C_{p_{min}}$  และ  $\Delta C_p$  ณ ตำแหน่ง  $3d$  หลังจากเจ็ต ในกรณีที่เจ็ตมี  $r_{eff}$  ต่างๆ

### ก.6 สรุปผลการทดลอง

ลักษณะการกระจายตัวของ  $C_p$  สามารถใช้บ่งบอกขอบเขตของเจ็ตใน Confined Crossflow ได้ในระดับหนึ่ง

ลักษณะการกระจายตัวของ  $C_p$  ที่  $r_{eff}$  ต่างๆจะมีคุณลักษณะ (Characteristic) คล้ายกัน คือ มีบริเวณที่มี ค่าความดันปานกลาง, ค่าความดันต่ำ และค่าความดันสูง เมื่อไล่จากพื้นขึ้นมา ทำให้เกิดจุด  $C_{p_{min}}$  ที่สันนิษฐานว่าอยู่ในช่วง wake และจุด  $C_{p_{max2}}$  ที่สันนิษฐานว่าอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเจ็ต

ค่า Penetration depth แปรตามค่า  $r_{eff}$  คือ ค่า  $r_{eff}$  มีค่ามากค่า Penetration depth ก็จะมีค่ามากและในทำนองเดียวกัน ค่า  $r_{eff}$  มีค่าน้อยค่า Penetration depth ก็จะมีค่าน้อย

ค่า Penetration depth ใน Confined Crossflow จะมี ค่าน้อยกว่า Unconfined Crossflow

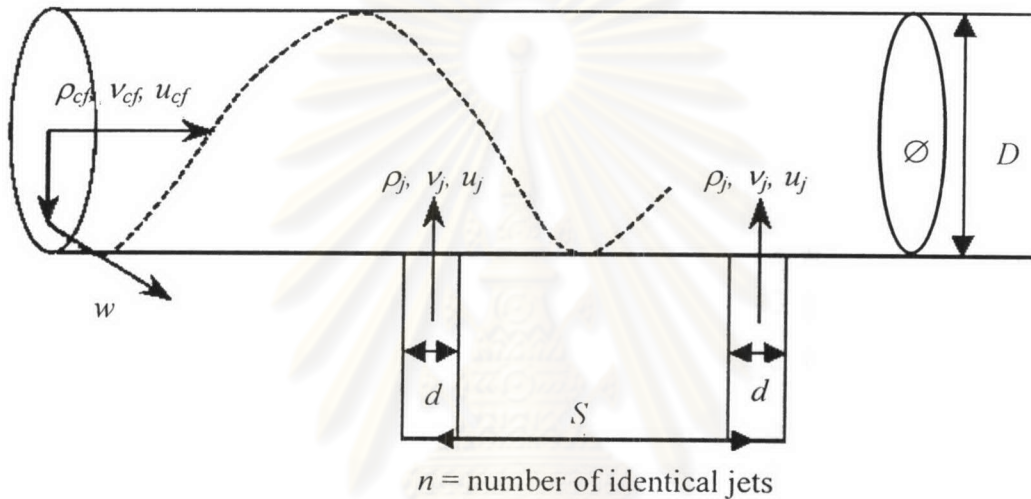
ค่า  $C_{p_{max2}}$  แปรตาม  $r_{eff}$  และค่า  $C_{p_{min}}$  แปรผกผันกับ  $r_{eff}$

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณค่า Parameter ที่ใช้ในการทดลอง

#### ข.1 ปัญหาที่ใช้ศึกษาสำหรับการทดลอง

เรื่องการกระจายตัวของอุณหภูมิด้านท้ายของเจ็ตร้อนสองลำแบบเรียงแถวในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง ดังรูปที่ ข1



รูปที่ ข1 รูปการทดลอง

ในการศึกษาผลของตัวแปรหนึ่งๆ จำเป็นต้องกำหนดให้ค่าของตัวแปรอื่นๆคงที่ สำหรับการศึกษานี้เป็นการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางตัว (ผลของจำนวนเจ็ต ( $n$ ) ผลของระยะห่างของเจ็ตตัวที่สองกับเจ็ตตัวแรกแบบเรียงแถว ( $S$ ) และผลของการไหลแบบหมุนควง ( $Sr$ )) ต่อลักษณะการผสม โดยดูจากการกระจายตัวของอุณหภูมิ

#### ข.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการทดลอง

$$F(\rho_j, v_j, u_j, d, \rho_{cf}, v_{cf}, u_{cf}, w, D, S, n, \varnothing) = 0$$

ข1

ใช้วิธี Dimensional Analysis

$$\text{ตัวแปรทั้งหมด (n)} = 12,$$

$$\text{ตัวแปรต้น (m)} = 3,$$

$$r = 3, \text{ ดังนั้น}$$

$$\alpha = n - r = 12 - 3 = 9 \text{ เทอมไร้มิติ (PI groups)}$$

### ข.3 กำหนดตัวแปรให้อยู่ในเทอมไร้มิติ (Dimensionless)

$$\begin{aligned}
 1. \Pi_\rho &= r_\rho = \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \\
 2. \Pi_d &= r_d = \frac{d}{D} \\
 3. \Pi_u &= r_u = \frac{u_j}{u_{cf}} \\
 4. \Pi_m &= r_m = \frac{m_{cf}}{m_j} = \frac{D^2 u_{cf} \rho_{cf}}{nd^2 u_j \rho_j} = \frac{1}{mr_d^2 r_u r_\rho} \\
 5. \Pi_{sr} &= Sr = \frac{w}{u_{cf}} \\
 6. \Pi_S &= \frac{S}{d} \\
 7. \Pi_{Re_j} &= Re_j = \frac{u_j d}{\nu_j} \\
 8. \Pi_{Re_{cf}} &= Re_{cf} = \frac{u D}{\nu_{cf}} \\
 9. \Pi_\emptyset &= \emptyset
 \end{aligned}$$

ดังนั้นตัวแปรต่างๆสามารถทำให้อยู่ในเทอมไร้มิติในรูป PI groups คือ

$$\Phi = \Phi(r_\rho, r_d, r_u, r_m, Sr, S/d, Re_j, Re_{cf}) = 0 \quad \text{ข2}$$

### ข.4 ในกรณีนี้เราต้องการศึกษาถึงผลของ....

- 4.1 ผลของจำนวนเจ็ต ( $n$ ) (การฉีดเจ็ต 1 ตัว กับการฉีดเจ็ต 2 ตัวแบบเรียงแถว)
- 4.2 ผลของระยะห่างของเจ็ตตัวแรกกับเจ็ตตัวที่สองแบบเรียงแถว ( $S$ )
- 4.3 ผลของการไหลแบบหมุนควง ( $Sr$ ) ( $Sr = 0$  กับ  $Sr = 1.8$ )

สำหรับการศึกษาในกรณีของเจ็ตในกระแสมวลวงที่กระแสมวลวงมีการไหลแบบหมุนควง (Jet in Swirling Pipe Flow) เป็นที่รู้กันดีว่าผลของ Velocity ratio เป็นตัวแปรที่สำคัญ

$$\begin{aligned}
 \Pi &= r_{eff}(r_\rho, r_u, Sr) = \sqrt{\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf}(u^2 + w^2)}} \\
 &= r_u \sqrt{\frac{r_\rho}{(1 + Sr^2)}}
 \end{aligned}$$



และก็สามารถเขียน  $r_u$  ในรูปของ  $r_{eff}$  ได้คือ

$$\Pi_u = r_u(r_{eff}; r_\rho, Sr) = \frac{r_{eff}}{\sqrt{\frac{r_\rho}{(1+Sr^2)}}}$$

นอกจากนี้สำหรับการศึกษาผลของจำนวนเจ็ดจำเป็นต้องคงที่พารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่สำคัญคือ อัตราส่วนโดยมวลของกระแสลมขวางต่อเจ็ด ( $r_Q$ ) ดังนั้น

$$\Pi_n = r_Q(n; r_d, r_w) = nr_d^2 r_u$$

และแทน  $r_d$  ใน  $\Pi$ -group ที่ 2 ด้วย  $n$

ตัวแปรต่างๆข้างต้นจึงเปลี่ยนเป็น

$$1. \Pi_\rho = r_\rho = \frac{\rho_j}{\rho_{cf}}$$

$$2. \Pi_n = n$$

$$3. \Pi_u = r_u(r_{eff}; r_\rho, Sr) = \frac{r_{eff}}{\sqrt{\frac{r_\rho}{(1+Sr^2)}}}$$

$$4. \Pi_m = \Pi_d = r_m(n; r_d, r_u, r_\rho) = \frac{1}{nr_d^2 r_u r_\rho}$$

$$5. \Pi_{sr} = Sr = \frac{w}{u_{cf}}$$

$$6. \Pi_S = \frac{S}{d}$$

$$7. \Pi_{Re_j} = Re_j = \frac{u_j d}{\nu_j}$$

$$8. \Pi_{Re_{cf}} = Re_{cf} = \frac{uD}{\nu_{cf}}$$

$$9. \Pi_\emptyset = \emptyset$$

ดังนั้นตัวแปรในเทอมไร้มิติที่เราศึกษาจัดอยู่ในรูป

$$\Phi = \Phi_2(\underbrace{n, S/d, Sr}_{\Pi_x}; \underbrace{r_\rho, r_{eff}(r_w), r_Q(r_d), Re_j, Re_{cf}}_{\Pi_\eta})$$

ข3

สำหรับการทดลองในกรณีต่างๆ

ผลของจำนวนเจ็ด สามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$\Phi = \Phi_2(\underbrace{n, S/d, Sr, r_\rho, r_{eff}(r_w)}_{\Pi_x}; \underbrace{r, (r_d), Re_j, Re_{cf}}_{\Pi_\eta})$$

ข3.1

ผลของระยะห่างระหว่างเจ็ต สามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$\Phi = \Phi_2 \underbrace{(S/d; n, Sr, r_\rho, r_{eff}(r_w), r. (r_d), Re_j, Re_{cf})}_{\Pi_x} \quad \text{ข3.2}$$

ผลของการไหลแบบหมุนควง สามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$\Phi = \Phi_2 \underbrace{(Sr; n, l/d, r_\rho, r_{eff}(r_w), r. (r_d), Re_j, Re_{cf})}_{\Pi_x} \quad \text{ข3.3}$$

### ข.5 สภาวะที่ทำให้การทดลอง

สมมุติฐาน (Assumption)

$$1) \quad r_\rho = \text{constant} \longrightarrow r_{\rho 1} = r_{\rho 2} \quad \text{ข4}$$

$$2) \quad r_{eff} = \text{constant} \longrightarrow r_{eff 1} = r_{eff 2} \quad \text{ข5}$$

$$3) \quad r_m = \text{constant} \longrightarrow r_{m_1} = r_{m_2} \quad \text{ข6}$$

โดยที่ 1 เป็นสภาวะพื้นฐานและ 2 เป็นสภาวะการทดลอง

สำหรับในสภาวะพื้นฐาน กำหนดให้เป็นกรณีการไหลแบบเจ็ตหนึ่งตัวในท่อที่ไม่มีกร

ไหลแบบหมุนควง ดังนั้น  $n_1 = 1$  และ  $Sr_1 = 0$

จาก (ข5)  $\longrightarrow \frac{r_{w2}}{r_{w1}} = \sqrt{1 + Sr_2^2}$ , และ

จาก (ข6)  $\longrightarrow \frac{r_{d2}}{r_{d1}} = \frac{1}{\sqrt{n_2 (1 + Sr_2^2)^{\frac{1}{4}}}}$

พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ ข1

สำหรับกรณีการทดลองนี้  $\Phi = C_{\gamma i}$

Case	<i>S0rd00</i>	<i>S0rd05</i>	<i>S0rd10</i>	<i>S18rd00</i>	<i>S18rd05</i>	<i>S18rd10</i>
$r_\rho$	0.83					
$r_d$	0.28	0.20	0.20	0.19	0.14	0.14
$r_u$	6.59	13.58	13.58	6.59	13.58	13.58
$r_{eff}$	6.00					
$n$	1	2	2	1	2	2
$r_m$	2.55					
$Sr$	0			1.80		
$D$ (mm.)	74					
$d$ (mm.)	20.70	14.43	14.43	14.64	10.20	10.20
$\bar{u}_{cf}$ (m/s)	1.40					
$\bar{u}_j$ (m/s)	9.23			19.01		
$Re_{cf}$	5755.6					
$Re_j$	7644	10969	10969	5405	7756	7756

ตาราง ข1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ

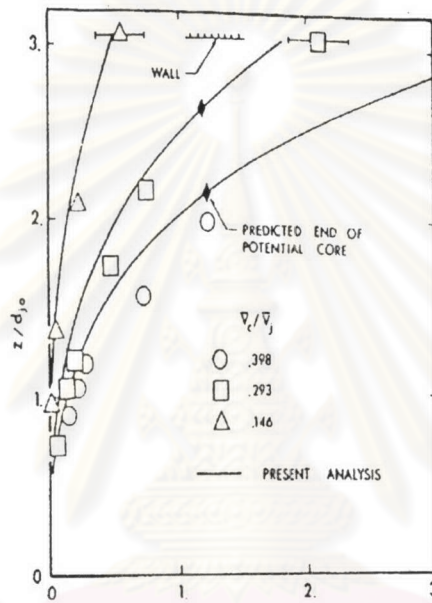
เพื่อความสะดวกในการทดลอง ได้ทำการเลือกขนาดท่อเจ็ตที่มีขายทั่วไปโดยให้มีความใกล้เคียงกับการคำนวณไม่เกิน  $\pm 5\%$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

(การคำนวณ Trajectory)

Stoy. R. L. Ben-Haim. Y. (1973) ทำการศึกษาเจ็ตใน Channel Crossflow ที่มีขนาดความกว้างของช่องคงที่ และ Velocity Ratio ต่างๆกัน พบตำแหน่งที่ Jet fluid พุ่งชนผนังดังรูปที่ ค1



รูปที่ ค1 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ Trajectory ของ Jet ใน Channel flow ( $L/d_{j0} = 3.05$ ) (Stoy and Ben-Haim, 1973)

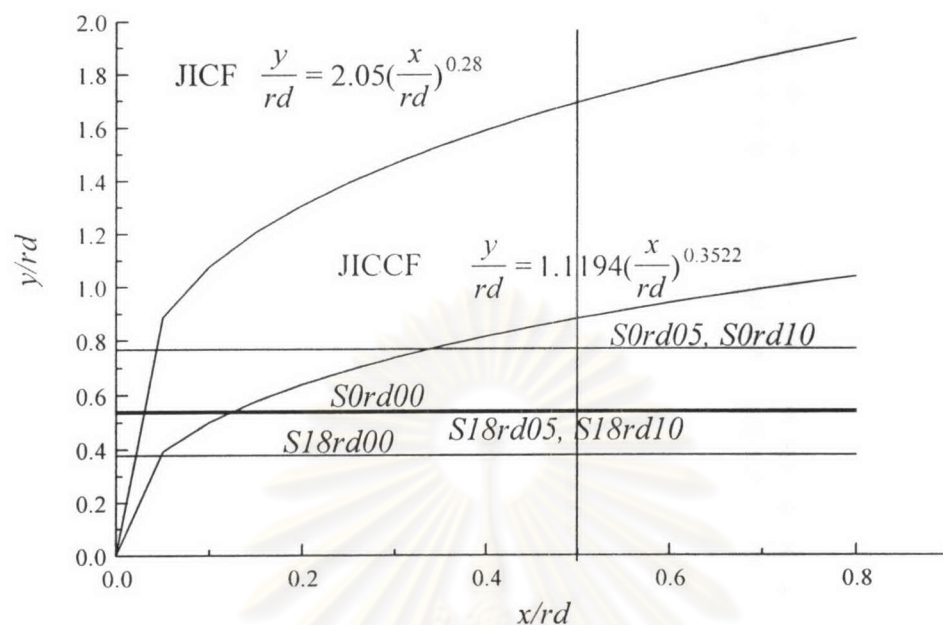
ดังนั้น การประมาณ Trajectory ของการทดลองนี้ทำโดยการเลียนแบบสมการ Trajectory ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Smith and Mungal, 1998)

$$\frac{y}{r_u d} = A \left( \frac{x}{r_u d} \right)^m$$

จากกราฟพบจุด Impingement point ของเจ็ตกับผนังด้านบน ( $y = 3.05d$ ) ที่ตำแหน่ง  $x = 0.5$  ที่ Velocity Ratio =  $1/0.146$  และ  $x = 1.8$  ที่  $r_u = 1/0.293$

แก้สมการหาค่าคงที่ต่างๆได้  $A = 1.1194$  และ  $m = 0.3522$  และ Fit curve Trajectory ตามสมการสำหรับการทดลองนี้ได้ดังรูปที่ ค2

## Trajectory of Jet in Confined Crossflow



รูปที่ ค2 ผลการวิเคราะห์ Trajectory ของเจ็ตใน Confined Crossflow สำหรับการทดลองนี้

จากการคำนวณจะเห็นว่า ในทุกกรณีเจ็ตจะพุ่งชนผนังด้านบนก่อนระยะ  $0.5r_{eff}d$  เสมอ ซึ่ง  
เป็นระยะเจ็ตตัวที่สองที่ใกล้ที่สุด

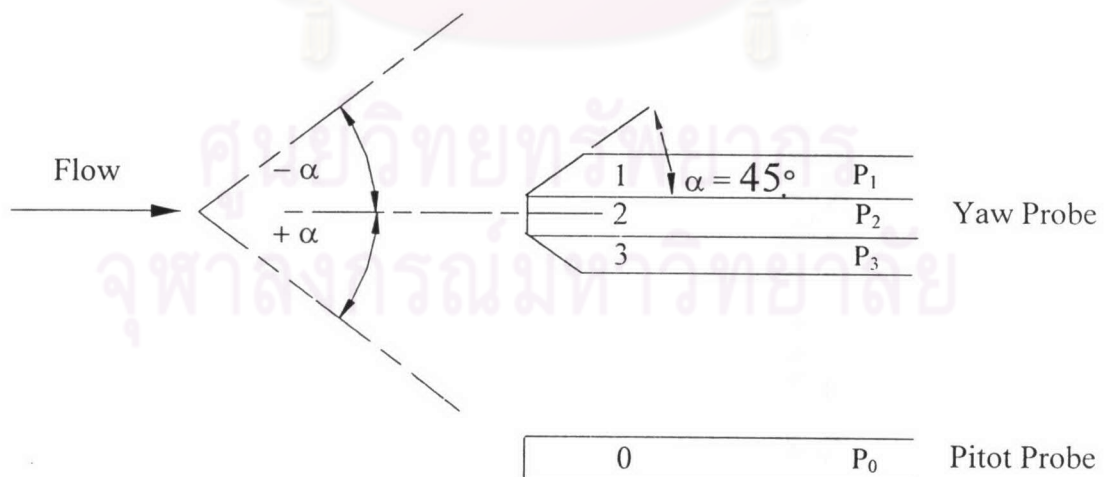
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การเปรียบเทียบและคำนวณความเร็วการไหลจากการวัดด้วย Yaw Probe

#### ง.1 ลักษณะและรายละเอียดของ Yaw Probe

โดยทั่วไป Pitot Probe สามารถใช้งานได้กับการวัดความเร็วของของไหลที่ทราบทิศทางในการไหล แต่สำหรับการไหลแบบหมุนควงที่ของไหลมีความเร็วในสองทิศทางและไม่สามารถทราบมุมปะทะของความเร็วการไหลกับ Probe ทำให้ไม่สามารถใช้ Pitot Probe ในการวัดความเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้จัดทำ Yaw Probe ขึ้นเพื่อวัดการไหลที่มีความเร็วในสองทิศทาง โดย Yaw Probe ที่ใช้ทำขึ้นจากเข็มฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 อัน เรียงติดกัน โดยเข็มอันที่ 1 และ 3 ถูกฝนให้มีมุมเอียง  $\theta_p$  เท่ากับ 45 องศา และติดเข้ากับเข็มอันที่ 2 ที่อยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ ง1 เข็มทั้ง 3 ถูกเชื่อมติดกันและงอโค้งเป็นมุมฉาก โดยมีระยะจากปลายเข็มถึงก้านเข็มยาว 50 มิลลิเมตร เข็มแต่ละอันต่อเข้ากับท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร ท่อทองเหลืองทั้ง 3 อันถูกเชื่อมเข้าไว้ด้วยกันเพื่อใช้เป็นก้าน Probe ซึ่งความดันที่วัดได้ระหว่างเข็มแต่ละคู่ซึ่งได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ดังรูปที่ 2.18(ก) และใช้ Digital multimeter ดังรูปที่ 2.18(ค) ในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้างี้แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วของการไหลในทิศทางต่างๆ



รูปที่ ง1 แสดงลักษณะของ Yaw Probe

## ง.2 การเปรียบเทียบ Yaw Probe

ในการวัดความเร็วของการไหลได้มีการเปรียบเทียบ Yaw Probe เพื่อหาความสัมพันธ์ของผลต่างความดันที่วัดได้กับค่าความเร็วตามแนวแกนและแนวสัมผัส โดยทำการเปรียบเทียบในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด  $30 \times 30$  เซนติเมตร ที่ความเร็ว 8 และ 14 เมตรต่อวินาที แล้ววัดผลต่างความดันระหว่างเข็มแต่ละอันของ Yaw Probe ได้แก่ ค่า  $P_1 - P_2$ , ค่า  $P_3 - P_2$  และค่า  $P_1 - P_3$  รวมทั้งผลต่างความดันระหว่าง Pitot Probe กับเข็มหมายเลข 2 ของ Yaw Probe ได้แก่ค่า  $P_2 - P_0$  นอกจากนี้ยังวัดค่าความดันจลน์ของการไหลโดยวัดผลต่างความดันระหว่าง Pitot Probe กับความดันสถิตที่ผนังของอุโมงค์ลม

ในการเปรียบเทียบได้ควบคุมให้การไหลมีความดันจลน์คงที่แล้วปรับเปลี่ยนมุมปะทะ ( $\alpha$ ) ของการไหลกับ Yaw Probe โดยหมุน Yaw Probe ไปทีละ 5 องศา โดยมีช่วงของการเปรียบเทียบ ( $\alpha$ ) ระหว่าง  $-80$  องศา ถึง  $80$  องศา และผลต่างความดันที่วัดได้จะนำมาหาความสัมพันธ์ได้ตามสมการ (ง1) ถึง (ง3) (Chue,S.H., 1975)

$$P_1 = P_0 + K_1 \Delta P \quad (ง1)$$

$$P_2 = P_0 + K_2 \Delta P \quad (ง2)$$

$$P_3 = P_0 + K_3 \Delta P \quad (ง3)$$

โดย  $\Delta P$  คือค่าความดันจลน์ของการทดลอง  
 $K_1, K_2, K_3$  คือ Calibration Function

จากสมการ (ง1) ถึง (ง3) นั้นสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_0, 1/K_0, K_{12}$  และ  $K_{32}$  ได้ตามสมการ (ง4) ถึง (ง7)

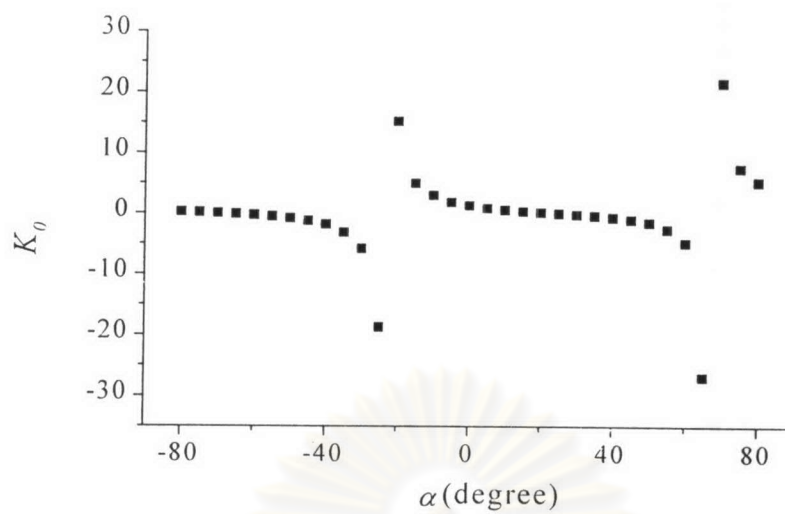
$$K_0 = \frac{(K_3 - K_2)}{(K_1 - K_2)} = \frac{(P_3 - P_2)}{(P_1 - P_2)} \quad (ง4)$$

$$\frac{1}{K_0} = \frac{(K_1 - K_2)}{(K_3 - K_2)} = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_3 - P_2)} \quad (ง5)$$

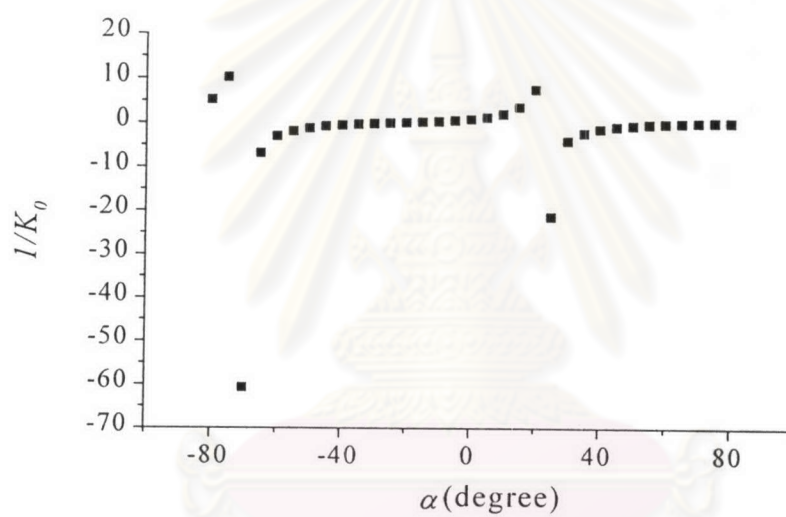
$$K_{12} = K_1 - K_2 = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P} \quad (ง6)$$

$$K_{32} = K_3 - K_2 = \frac{P_3 - P_2}{\Delta P} \quad (ง7)$$

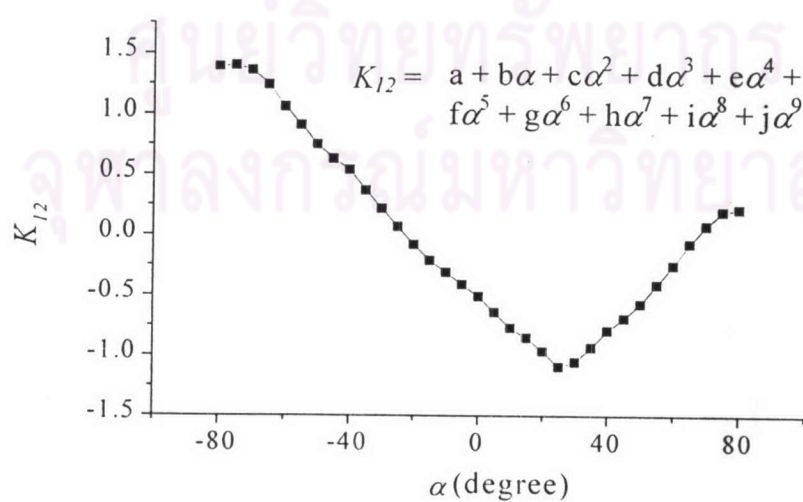
โดยสามารถหาค่า  $K_0, 1/K_0, K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่างๆได้จากค่าความดันแตกต่างที่วัดและค่าความดันจลน์ของการทดลอง โดยแสดงความสัมพันธ์ของ  $K_0, 1/K_0, K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่างๆดังรูปที่ (ง2)



(ก)

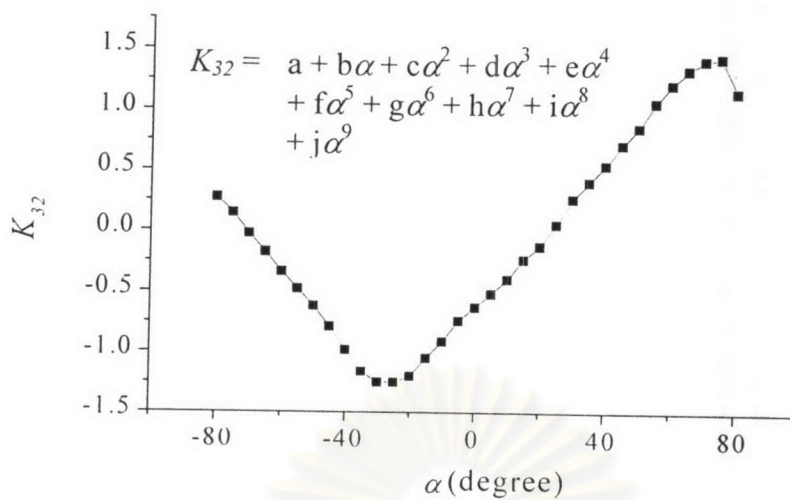


(ข)



(ค)





(ง)

รูปที่ ง2 ความสัมพันธ์ของ Calibration function กับมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ )

(ก)  $K_0$  (ข)  $1/K_0$  (ค)  $K_{12}$  และ (ง)  $K_{32}$  (ค่าคงที่ต่างๆแสดงดังตารางที่ ง1)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
$K_{12}$	-0.36112	-0.02516	1.05457E-4	6.0007E-6	1.13045E-7	-9.78761E-11	-21.96445E-11	-1.90664E-13	1.12822E-15	2.00962E-17
$K_{32}$	-0.66481	0.03044	2.75992E-5	-9.1863E-6	2.24815E-7	1.42053E-9	-5.38159E-11	-4.53711E-14	3.72995E-15	-6.40427E-18
$1/K_0 (-1.5 < 1/K_0 < 0.25)$ $40 < \alpha < 80$	66.94844	46.05478	79.8722	139.74077	135.06466	61.84321	10.47667	-	-	-
$K_0 (-1.5 < K_0 < 1.8)$ $-5 < \alpha < 50$	23.47607	-27.74521	-0.31241	7.93046	0.28691	-1.41904	-	-	-	-
$1/K_0 (-1.2 < 1/K_0 < 1.2)$ $-50 < \alpha < 5$	-22.9995	39.14727	1.88097	-22.84153	-2.52744	7.89539	0.89113	-	-	-
$K_0 (-1.3 < K_0 < 0.2)$ $-80 < \alpha < -45$	-70.7846	-42.04333	-27.32545	-8.10387	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของการใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้ออกการ Calibrate ตามรูปที่ 2 และรูปที่ 3



### ง3 การคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe

ในการหาความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe นั้น เริ่มจากการวัดความแตกต่างของความดันในแต่ละคู่ นั่นคือ  $P_1-P_2$ , และ  $P_3-P_2$  จากนั้นจะสามารถหาค่า  $K_0$  และ  $I/K_0$  ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (ง4) และ (ง5) หาค่ามุมปะทะ ( $\alpha$ ) ของการไหลได้จากความสัมพันธ์ของ  $K_0$ ,  $I/K_0$  และมุมปะทะ ( $\alpha$ ) โดยใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการ Calibrate ซึ่งผลการใช้ Curve fitting ในช่วง  $K_0$  และ  $I/K_0$  ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ง3 และค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ ง1 จากนั้นจะสามารถหาค่า  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ได้จากความสัมพันธ์ของ  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  กับมุมปะทะ ( $\alpha$ ) โดยใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการ Calibrate ซึ่งผลการใช้ Curve fitting แสดงดังรูปที่ ง2 และค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ ง1 โดยจากการวัดความแตกต่างความดันและค่า  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่คำนวณได้ รวมทั้งความสัมพันธ์ตามสมการ (ง6) และ (ง7) นั้นทำให้สามารถหาค่าความดันจลน์ ( $\Delta P$ ) ของการทดลองได้จาก

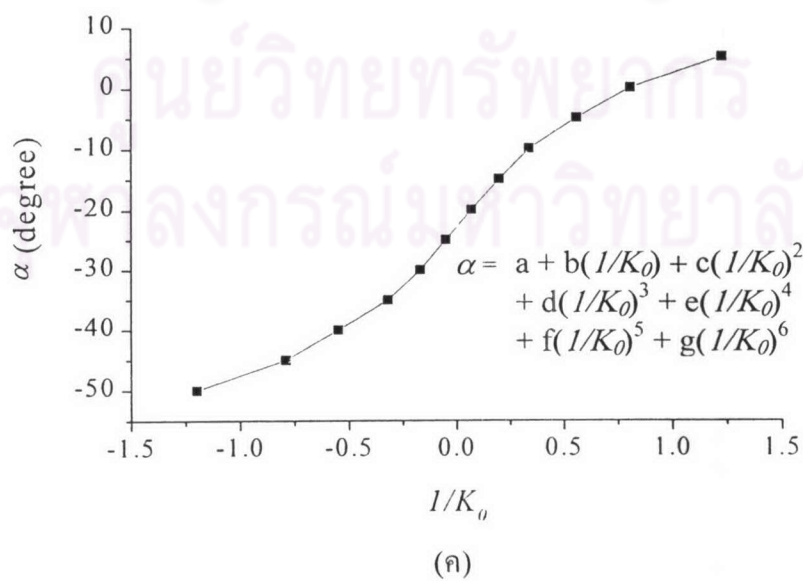
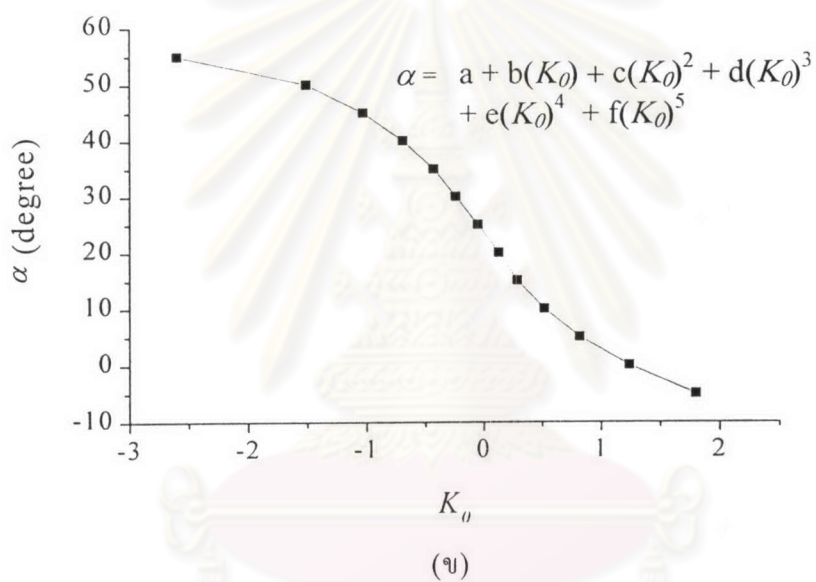
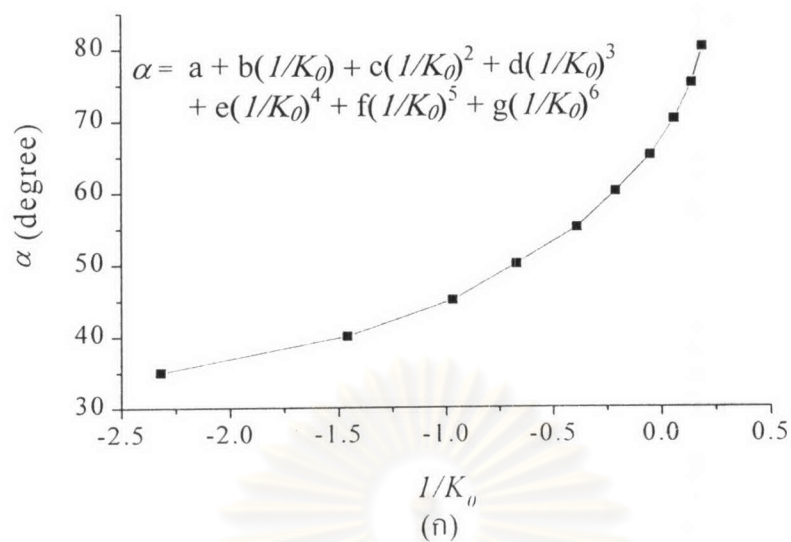
$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{K_{12}} \quad (ง7)$$

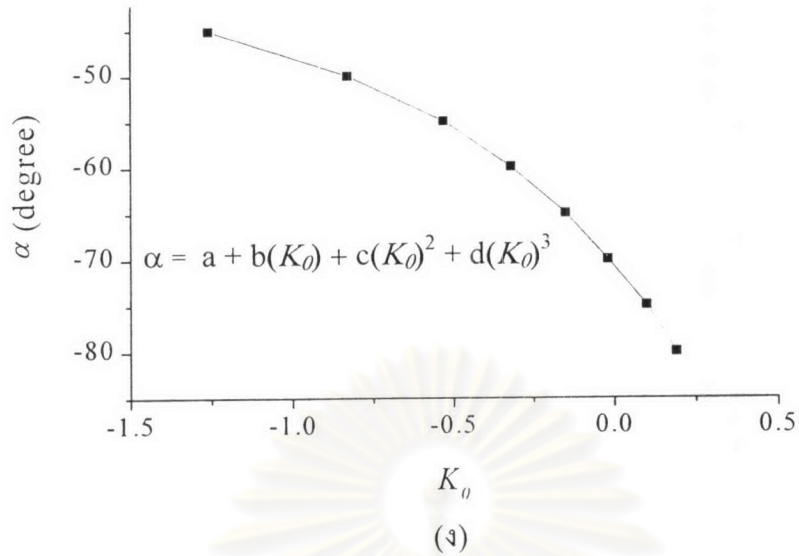
$$\Delta P = \frac{P_3 - P_2}{K_{32}} \quad (ง8)$$

จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเร็วตามแนวแกน ( $u$ ) และความเร็วตามแนวสัมผัส ( $w$ ) ได้จากค่าความดันจลน์ ( $\Delta P$ ) และมุมปะทะ ( $\alpha$ ) ที่คำนวณข้างต้นตามสมการ

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \cos \alpha \quad (ง9)$$

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \sin \alpha \quad (ง10)$$





รูปที่ ง3 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ ) กับ Calibration function  $K_0, I/K_0$

(ก)  $-1.5 < I/K_0 < 0.25$  สำหรับ  $40 < \alpha < 80$  (ข)  $-1.5 < K_0 < 1.8$  สำหรับ  $-5 < \alpha < 50$

(ค)  $-1.2 < I/K_0 < 1.2$  สำหรับ  $-50 < \alpha < 5$  และ (ง)  $-1.3 < K_0 < 0.2$  สำหรับ  $-45 < \alpha < -80$

(ค่าคงที่ต่างๆแสดงดังตารางที่ ง1)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)

#### จ.1 ค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว

##### จ.1.1 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe

การคำนวณความเร็วของการไหลด้วย Pitot Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (จ1)$$

เมื่อ  $\Delta P$  เป็นความดันจลน์ของการไหล  
 $\rho$  เป็นความหนาแน่นของอากาศ

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว ( $\delta_u$ ) ตามสมการ

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

แทนค่า  $u$  ตามสมการ จ1 จะได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\Delta P}}{\rho u}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P \delta_{\rho}}{\rho^2 u}\right)^2} \quad (จ2)$$

สำหรับการวัดโดยใช้ Inclined Manometer เป็นเครื่องมือในการอ่านค่าความดันโดยความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดัน  $\delta_{\Delta P}$  มีค่าประมาณ  $\pm 0.2 \text{ mmH}_2\text{O}$  และให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความหนาแน่นอากาศ  $\delta_{\rho}$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $\delta_{\Delta P}$  เมื่อเลือกจุดบริเวณกึ่งกลางที่ปากเจ็ต  $r = 0$  ในกรณี เจ็ตหนึ่งตัวที่กระแสมขวางมีการหมุนควง ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u_j = 22.54 \text{ m/s}$ ,  $\rho = 0.9463 \text{ kg/m}^3$  ( $T_j = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) แทนในสมการ จ.2

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{1.96 \text{ Pa}}{0.9463 \text{ kg/m}^3 \times 22.54 \text{ /s}}\right)^2} \approx 0.09 \text{ m/s}$$

และเมื่อเลือกจุดบริเวณใกล้ขอบเจ็ตคือที่ระยะ  $r = +7$  mm ในกรณี เจ็ตหนึ่งตัวที่กระแสลมขวางมีการหมุนควง ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนมากที่สุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u = 16.08$  m/s,  $\rho = 0.9650$  kg/m<sup>3</sup> ( $T_j = 92.8^\circ\text{C}$ ) แทนในสมการ จ2 จะได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{1.96 Pa}{0.9650 \text{ kg/m}^3 \times 16.08 \text{ m/s}}\right)^2} \approx 0.13 \text{ m/s}$$

สำหรับการวัดโดยใช้ Pressure Transducer เป็นเครื่องมือในการอ่านค่าความดัน โดยความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดัน  $\delta_{\Delta P}$  มีค่าประมาณ  $\pm 0.032$  mmWG หรือเท่ากับ 0.32 ปาสกาล และให้ค่า  $\delta_\rho$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $\delta_{\Delta P}$  เมื่อเลือกจุดบริเวณกึ่งกลางที่ปากเจ็ตคือที่  $r = 0$  ในกรณี เจ็ตหนึ่งตัวที่กระแสลมขวางไม่มีการหมุนควง ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u_j = 12.14$  m/s,  $\rho = 0.9463$  kg/m<sup>3</sup> ( $T_j = 100.1^\circ\text{C}$ ) แทนในสมการ จ2

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{0.32 Pa}{0.9463 \text{ kg/m}^3 \times 12.14 \text{ m/s}}\right)^2} \approx 0.03 \text{ m/s}$$

และเมื่อเลือกจุดบริเวณใกล้ขอบเจ็ตคือที่ระยะ  $r = +10$  mm ในกรณี เจ็ตหนึ่งตัวที่กระแสลมขวางไม่มีการหมุนควง ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนมากที่สุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u = 7.21$  m/s,  $\rho = 0.9716$  kg/m<sup>3</sup> ( $T_j = 90.3^\circ\text{C}$ ) แทนในสมการ จ2 จะได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{0.32 Pa}{0.9716 \text{ kg/m}^3 \times 7.21 \text{ m/s}}\right)^2} \approx 0.05 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนของค่าความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe จะมีค่าไม่เกิน  $\pm 0.15$  m/s

### จ.1.2 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe

การคำนวณค่าความเร็วจาก Yaw Probe ได้ทำการปรับเทียบเพื่อหา Calibration Function ตามความสัมพันธ์

$$K_{12} = K_1 - K_2 = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P} \quad (จ3)$$

$$K_{32} = K_3 - K_2 = \frac{P_3 - P_2}{\Delta P} \quad (จ4)$$

$$K_0 = \frac{(K_3 - K_2)}{(K_1 - K_2)} = \frac{(P_3 - P_2)}{(P_1 - P_2)} \quad (จ5)$$

- เมื่อ  $P_1-P_2$  เป็นความแตกต่างความดันระหว่างเข็ม 1 และ 2 ของ Yaw Probe  
 $P_3-P_2$  เป็นความแตกต่างความดันระหว่างเข็ม 3 และ 2 ของ Yaw Probe  
 $\Delta P$  เป็นค่าความดันจลน์ของการปรับเทียบเครื่องมือ

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอน โดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของค่า Calibration Function ในการปรับเทียบเครื่องมือเป็น

$$\delta_{K_0} = \sqrt{\left[ \frac{\delta_{P_1-P_2}}{(P_1-P_2)} \right]^2 + \left[ \frac{(P_3-P_2)\delta_{P_1-P_2}}{(P_1-P_2)^2} \right]^2} \quad (จ6)$$

และจากความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_0$  และ  $\alpha$  ในหัวข้อ ง3 และรูปที่ ง2 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $\alpha$  ตามความสัมพันธ์

$$\delta_\alpha = \frac{d\alpha}{dK_0} \delta_{K_0} \quad (จ7)$$

และจากความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  กับ  $\alpha$  ในหัวข้อ ง2 และรูปที่ ง2 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ตามความสัมพันธ์

$$\delta_{K_{12}} = \frac{dK_{12}}{d\alpha} \delta_\alpha \quad (จ8)$$

$$\delta_{K_{32}} = \frac{dK_{32}}{d\alpha} \delta_\alpha \quad (จ9)$$

สำหรับการคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1-P_2)}{\rho(K_{12})}} \quad \text{หรือ} \quad V = \sqrt{\frac{2(P_3-P_2)}{\rho(K_{32})}} \quad (จ10)$$

โดยที่  $V$  คือ ความเร็วสัมบูรณ์ (Absolute velocity) และมีความไม่แน่นอนของค่าความเร็วเป็น

$$\delta_V = \sqrt{\frac{(\delta_{P_1-P_2})^2}{2\rho(P_1-P_2)(K_{12})} + \frac{(P_1-P_2)(\delta_{K_{12}})^2}{2\rho(K_{12})^3}} \quad (จ11)$$

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



$$u = V \cos \alpha \quad (จ12)$$

$$w = V \sin \alpha \quad (จ13)$$

และสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกน  $\delta_u$  และความเร็วตามแนวสัมผัส  $\delta_w$  ได้จาก

$$\delta_u = \sqrt{[(\cos \alpha)(\delta_V)]^2 + [(V \sin \alpha)(\delta_\alpha)]^2} \quad (จ14)$$

$$\delta_w = \sqrt{[(\sin \alpha)(\delta_V)]^2 + [(V \cos \alpha)(\delta_\alpha)]^2} \quad (จ15)$$

โดยในแต่ละจุดที่ตำแหน่ง  $0.25D$  ก่อนกึ่งกลางเจ็ต นั้น มีค่าความไม่แน่นอนของความเร็วแตกต่างกัน ตามการกระจายของ Calibration curve ซึ่งในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณ โดยเลือกตำแหน่ง  $r = 32 \text{ mm}$  ที่ตำแหน่ง  $0.25D$  ก่อนกึ่งกลางเจ็ต ในกรณี  $S18$  โดยมีค่าความดัน  $P_1 - P_2 = -1.590 \text{ mmWG}$ ,  $P_3 - P_2 = -1.422 \text{ mmWG}$  ซึ่งจากการคำนวณในภาคผนวก ค. จะได้  $K_0 = -0.89$ ,  $\alpha = 43.48$  องศา,  $K_{12} = -0.75$ ,  $V = 2.69 \text{ m/s}$ ,  $u = 1.95 \text{ m/s}$  และ  $w = 1.85 \text{ m/s}$  ตามลำดับ โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดความดัน ซึ่งพิจารณาจากค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องมือวัดประมาณ

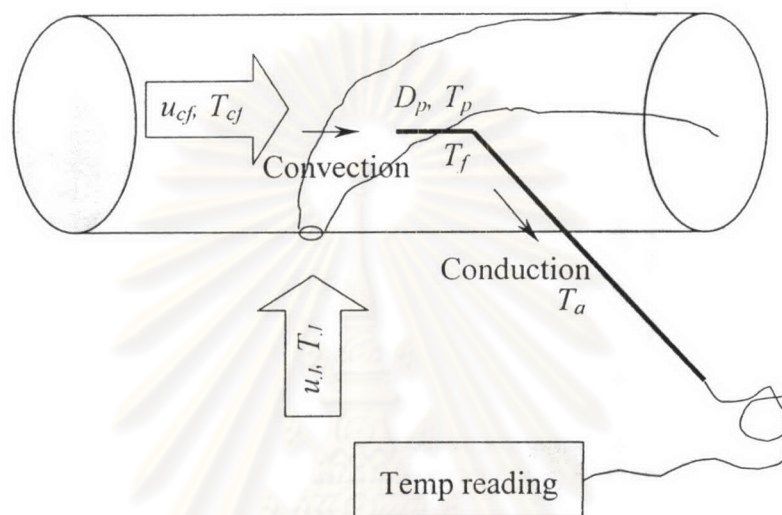
$$\delta_{P_1-P_2} = \delta_{P_3-P_2} = 0.032 \text{ mmWG}$$

และจากสมการ จ6 ได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $K_0$  ( $\delta_{K_0}$ ) ประมาณ 0.03 และจากสมการ จ7 และ Calibration curve ดังรูป 3 จะได้  $\delta_\alpha$  ประมาณ 0.2 องศา และจากสมการ จ8 และ Calibration curve ดังรูป 2 จะได้  $\delta_{K_{12}}$  ประมาณ 0.02 และจากสมการ จ11 จะได้  $\delta_V$  ประมาณ 0.03 และจากสมการ จ14-จ15 ได้ค่าความไม่แน่นอนของความเร็วในแนวแกนและแนวสัมผัสประมาณ 0.04 และ 0.04 m/s ตามลำดับ

## จ.2 ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิ

ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิในที่นี้จะพิจารณาจากความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดซึ่งประกอบด้วย Sensor คือลวด Thermocouple Type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ที่มีช่วงของการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $-18$  ถึง  $120$  องศาเซลเซียส และที่มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) ประมาณ  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  ในช่วงที่ทำการทดลอง และตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดนี้ถูกจำกัดโดยลวด Thermocouple ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.75 \%$  ของค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ หรือประมาณ  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$

การวัดอุณหภูมิสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการวัดอุณหภูมิของเจ็ตอากาศที่มีความเร็วทำให้อาจจะได้รับผลของการพา (Convection) ทำให้อุณหภูมิที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงผลของการพาดังกล่าวด้วยแบบจำลอง (model) ดังรูปที่ จ1



รูปที่ จ1 แบบจำลองในการพิจารณาผลของการพา (Convection) ที่มีต่อการวัดอุณหภูมิ

สำหรับแบบจำลองในการพิจารณาผลของการพาที่มีต่อการวัดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ จ1 โดยที่  $T_f$  คืออุณหภูมิของอากาศที่ต้องการวัด,  $T_p$  คืออุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple  $T_r$  คืออุณหภูมิห้องในขณะที่ทำการทดลอง และโดยกฎการอนุรักษ์พลังงาน และสมมติฐานที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากลวด Thermocouple สู่บรรยากาศ ทำให้กระบวนการในการถ่ายเทความร้อนในการวัดอุณหภูมินี้ เป็นผลจากการพาความร้อนของอากาศ (Convection) และการนำความร้อนของลวด Thermocouple เท่านั้น ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 q_{conv} &= q_{cond} \\
 hAdT &= kA \frac{dT}{dx} \\
 hA(T_f - T_p) &= \frac{kA}{L}(T_p - T_r) \\
 \frac{T_f - T_p}{T_p - T_r} &= \frac{k}{hL} = \left( \frac{k}{hD_p} \right) \left( \frac{D_p}{L} \right) \\
 \therefore \frac{T_f - T_p}{T_p - T_r} &= \frac{1}{Nu} \left( \frac{D_p}{L} \right) \quad (จ16)
 \end{aligned}$$

โดย  $D_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของปลาย Thermocouple มีค่าประมาณ 1 mm,  $L$  คือความยาวของ Thermocouple มีค่าประมาณ 2 m. และ  $Nu$  คือค่า Nusselt number ซึ่งประมาณจากความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนผ่านรูทรงกลม (Sphere) จาก White (1991) ตามสมการ

$$Nu_{m,sphere} \approx 2.0 + 0.3Pr^{1/3} Re^{3/5} \quad (จ17)$$

สำหรับอากาศที่อุณหภูมิ 0 ถึง 100 °C มีค่า  $Pr = 0.71$  และ

ที่  $u_j = 22.54$  m/s,  $T_j = 100$  °C ;

$$(Re)_{D_p} = \frac{u_j D_p}{\nu_j} = \frac{(22.54 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(2.25 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 1000$$

ที่  $u_{cf} = 1.63$  m/s,  $T_{cf} = 35.6$  °C ;

$$(Re)_{D_p} = \frac{u_{cf} D_p}{\nu_{cf}} = \frac{(1.63 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 95$$

แทนในสมการ จ17 จะได้ Nusselt number เฉลี่ยมีค่าในช่วง 6.11 ถึง 18.89 และเมื่อแทนค่าในสมการ จ16 จะได้ค่า  $(T_f - T_p)/(T_p - T_r)$  อยู่ไม่เกิน 0.1 % นั่นคือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิจริงของของไหลประมาณ 0.1% ของอุณหภูมิที่วัด ซึ่งมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.1 °C

## จ.2.1 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{T_G}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{T_G}$ ) นิยามโดย

$$C_{T_G} = \frac{T - \bar{T}_{cf}}{\bar{T}_j - \bar{T}_{cf}} = C_{T_G}(T, \bar{T}_j, \bar{T}_{cf})$$

โดยที่  $T$  คือ อุณหภูมิที่ทำการทดลองวัด

$\bar{T}_j$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ที่ปากทางออกเจ็ด

$\bar{T}_{cf}$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ ณ ตำแหน่ง  $0.25D$  ก่อนถึงกึ่งกลางเจ็ดตัวแรกของสภาวะแวดล้อมขณะทำการวัด

และจากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{T_G}$  ( $\delta_{C_{T_G}}$ ) ได้จากความสัมพันธ์

$$\delta_{C_{TG}} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T_j} \delta_{T_j}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T_{cf}} \delta_{T_{cf}}\right)^2}$$

แทนค่า  $C_{TG}$  จะได้

$$\therefore \delta_{C_{TG}} = \sqrt{\left(\frac{1}{T_j - T_{cf}} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{-(T - T_{cf})}{(T_j - T_{cf})^2} \delta_{T_j}\right)^2 + \left(\frac{-(T_j - T_{cf}) + (T - T_{cf})}{(T_j - T_{cf})^2} \delta_{T_{cf}}\right)^2}$$

โดยในการทดลองจะกำหนดอุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ของเจ็ด ( $\bar{T}_j$ ) และอุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ ณ ตำแหน่ง  $0.25D$  ก่อนถึงกึ่งกลางเจ็ดตัวแรก ( $\bar{T}_{cf}$ ) ให้คงที่ที่ประมาณ  $97.3^\circ\text{C}$  และ  $34.3^\circ\text{C}$  ตามลำดับ และมีอุณหภูมิที่ทดลอง ( $T$ ) อยู่ในช่วงตั้งแต่  $34.3-72.4^\circ\text{C}$  โดยค่าความไม่แน่นอนของ  $T$ ,  $\bar{T}_j$  และ  $\bar{T}_{cf}$  ประมาณได้จากค่าความถูกต้องของ Thermocouple จากความถูกต้องของเครื่องมือวัดและผลของการพา (Convection) ดังกล่าว ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $0.5^\circ\text{C}$  นั่นคือ

$$\delta_T = \delta_{T_j} = \delta_{T_{cf}} = 0.5^\circ\text{C}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TG}$  ( $\delta_{C_{TG}}$ ) ในการทดลองอยู่ในช่วง  $0.02-0.04$  โดยงานวิจัยนี้จะระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\delta_{C_{TG}}$  สูงสุดไม่เกิน  $0.05$

## จ.2.2 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด ( $C_{TL}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด ( $C_{TL}$ ) นิยามโดย

$$C_{TL} = \frac{T - \bar{T}_{cf}}{T_{\max} - \bar{T}_{cf}} = C_{TL}(T, T_{\max}, \bar{T}_{cf})$$

โดยที่  $T_{\max}$  คือ อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละหน้าตัดที่ทำการทดลองวัด

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TL}$  ( $\delta_{C_{TL}}$ ) ได้จากความสัมพันธ์

$$\delta_{C_{TL}} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{TL}}{\partial T} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TL}}{\partial T_{\max}} \delta_{T_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TL}}{\partial T_{cf}} \delta_{T_{cf}}\right)^2}$$

แทนค่า  $C_{TL}$  ได้

$$\therefore \delta_{C_{TL}} = \sqrt{\left(\frac{1}{T_{\max} - \overline{T}_{cf}} \delta_{T_r}\right)^2 + \left(\frac{-(T - \overline{T}_{cf})}{(T_{\max} - \overline{T}_{cf})^2} \delta_{T_i}\right)^2 + \left(\frac{-(T_{\max} - \overline{T}_{cf}) + (T - \overline{T}_{cf})}{(T_{\max} - \overline{T}_{cf})^2} \delta_{\overline{T}_{cf}}\right)^2}$$

โดยในการทดลองจะมีอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละหน้าตัด ( $T_{\max}$ ) แตกต่างกันไปคืออยู่ในช่วงประมาณ 52.0-72.4 °C โดยอุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ ณ ตำแหน่ง 0.25D ก่อนถึงกึ่งกลางเจ็ตตัวแรกของสภาวะแวดล้อมขณะที่ทำการวัด ( $\overline{T}_{cf}$ ) มีค่าประมาณ 34.3 °C และอุณหภูมิที่ทดลองอยู่ในช่วงตั้งแต่ 34.3-72.4 °C โดยค่าความไม่แน่นอนของ  $T$ ,  $T_{\max}$  และ  $\overline{T}_{cf}$  ประมาณได้จากค่าความถูกต้องของ Thermocouple ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.5 °C นั่นคือ

$$\delta_T = \delta_{T_{\max}} = \delta_{\overline{T}_{cf}} = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TL}$  ( $\delta_{C_{TL}}$ ) ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.01-0.10 ซึ่งแสดงดังตาราง จ1 สำหรับค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมากขึ้นตามระยะทางตามแนวการไหล โดยในหน้าตัดที่  $x/r_{eff}d$  เท่ากับ 0.25 ถึง 3.00 นั้นจะมีค่า  $\delta_{C_{TL}}$  ไม่เกิน 0.10 ในทุกๆกรณีการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\delta_{C_{TL}}$  ประมาณ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการพิจารณาผลของหน้าตัดการทดลองส่วนใหญ่ที่มีในการศึกษาวิจัยนี้

$x/r_{eff}d$	ค่า $\delta_{C_{TL}}$ ของทุกกรณีการทดลอง	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
0.25	0.02	0.00
0.50	0.02	0.00
0.75	0.02	0.10
1.50	0.03	0.06
2.00	0.03	0.05
2.50	0.03	0.05
3.00	0.03	0.04

ตาราง จ1 แสดงช่วงของค่าความไม่แน่นอนของค่า  $C_{TL}$  ในแต่ละหน้าตัด

## ภาคผนวก จ

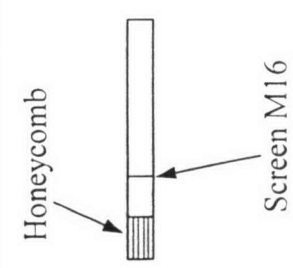
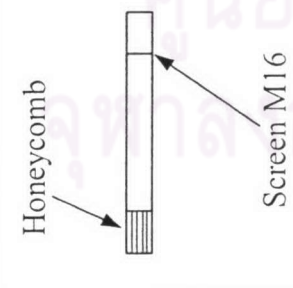
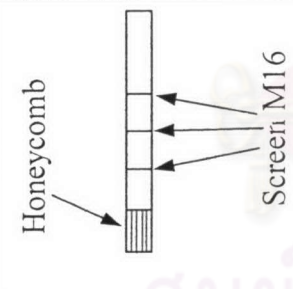
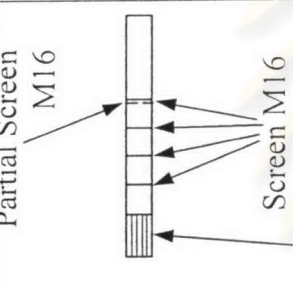
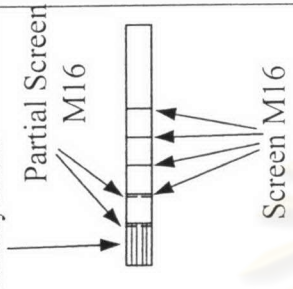
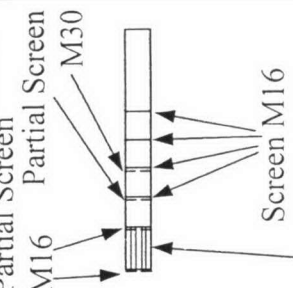
### การติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb ในชุดท่อหมุน

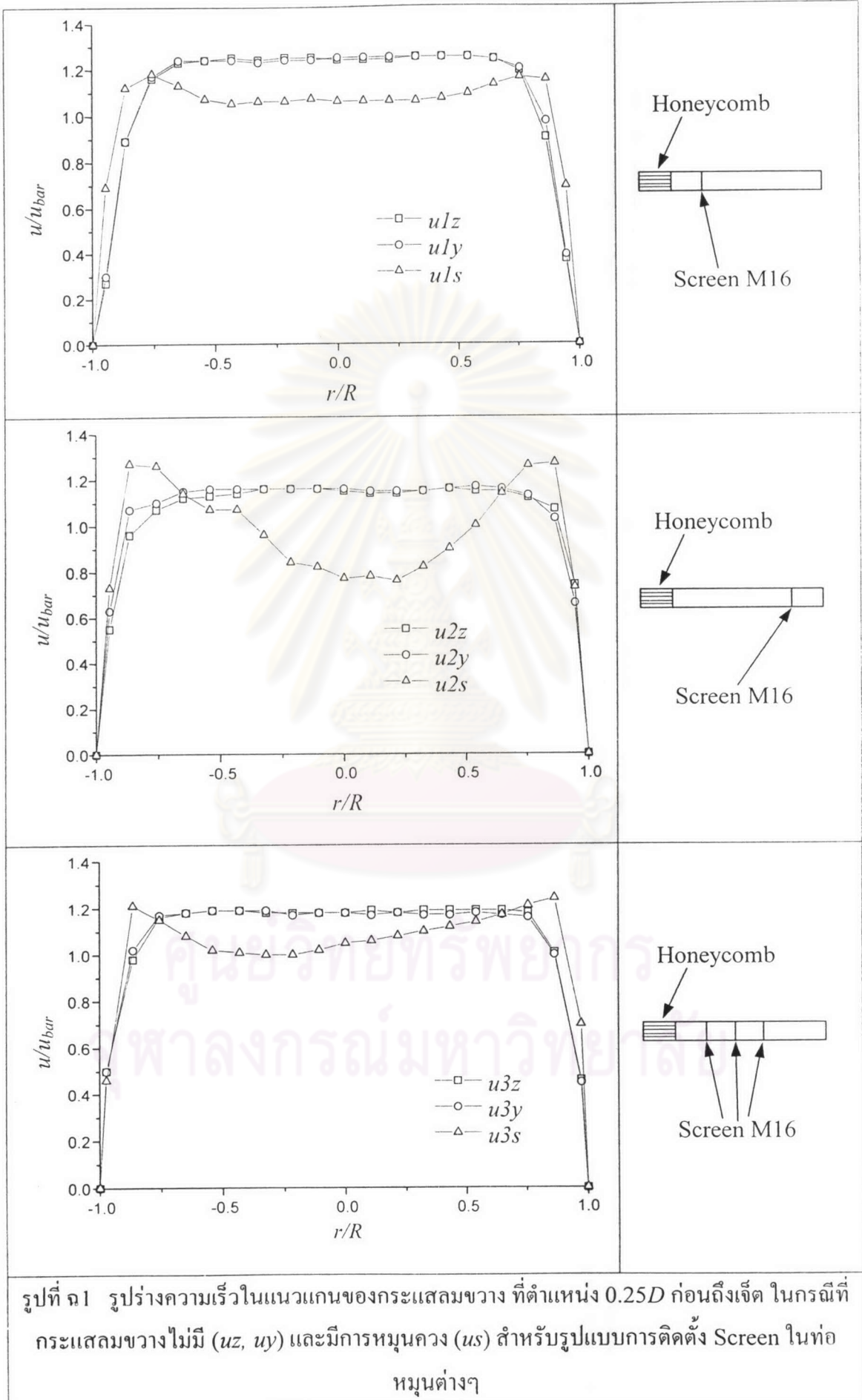
สถานะเริ่มต้นของการไหลเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีผลต่อการผสมด้านท้าย และในการศึกษาผลของพารามิเตอร์ใดๆนั้น ต้องคงที่พารามิเตอร์ตัวอื่น และเปลี่ยนเฉพาะพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาดังนั้น สถานะเริ่มต้นของการไหลเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ต้องมีคงที่ หรือมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเร็วที่ใกล้เคียงกันในแต่ละกรณี

เป็นที่ทราบกันดีว่า การไหลแบบหมุนควงมีความสามารถในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการผสม สำหรับการไหลแบบหมุนควงที่มีค่าการหมุนควง ( $Sr$ ) สูงนั้น จะทำให้บริเวณกึ่งกลางการไหลมีความดันลดลง แต่สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสำหรับการไหลแบบหมุนควงกับการไหลที่ไม่มีการหมุนควงนั้นจำเป็นต้องให้ สถานะเริ่มต้นของการไหลมีรูปร่างคล้ายกัน ดังนั้นการออกแบบติดตั้งการติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb ในชุดท่อหมุนจึงมีความสำคัญอย่างมากในการเปรียบเทียบผลการทดลอง

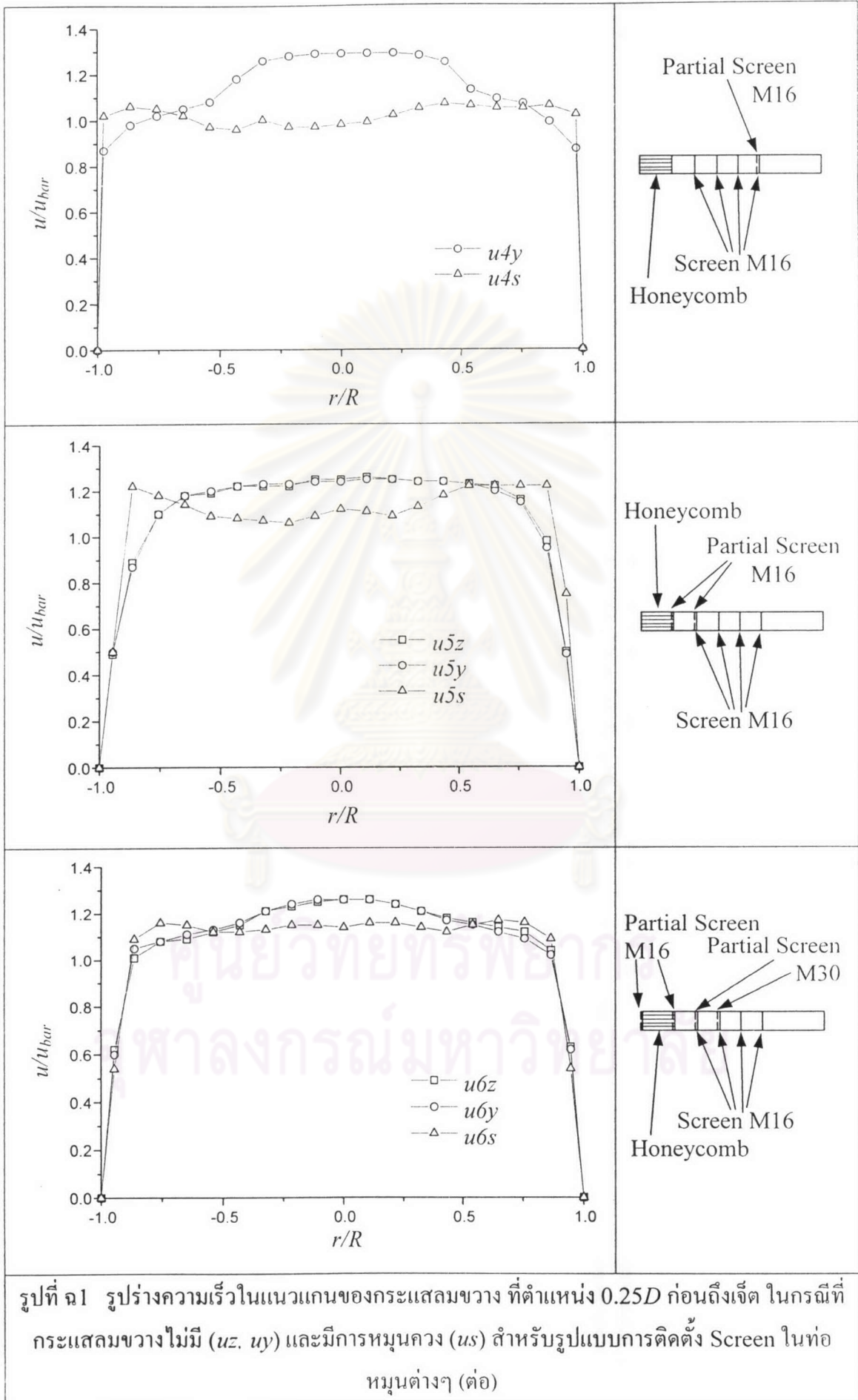
โดยในการทดลอง ได้ทำการปรับเปลี่ยนการติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb ในชุดท่อหมุนแบบต่างๆ ตารางที่ จ1 และรูปร่างการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน ( $u$ ) รูปที่ จ1. ความเร็วตามแนวสัมผัส ( $w$ ) รูปที่ จ2 และอุณหภูมิ  $((T-T_a)/(T_j-T_a), \overline{C_{Tj}})$  รูปที่ จ3 โดยที่สัญลักษณ์  $x$  แทนด้วยค่าต่างๆคือ  $x$  (ตัวที่หนึ่ง) แทนด้วยค่าความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) หรือความเร็วตามแนวสัมผัส ( $w$ ) หรือ อุณหภูมิ  $\overline{C_{Tj}}(T)$ ,  $n$  (ตัวที่สอง) แทนด้วย Case ของการติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb และ  $x$  (ตัวสุดท้าย) แทนด้วยทิศทางการวัด ( $y, z$ ) สำหรับกรณีที่กระแสมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควงหรือกรณีที่กระแสมขวางมีการไหลแบบหมุนควงของใช้ตัว  $s$  โดยวัดในแนวแกน  $y$  เพียงแกนเดียว เช่น  $u/z$  หมายถึงการวัดความเร็ว โดยการติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb ชุดที่หนึ่ง (ตามตารางที่จ1) และวัดตามแนวแกน  $z$  สำหรับกรณีที่กระแสมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง,  $w/2y$  หมายถึงการวัดความเร็วในแนวสัมผัส โดยการติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb ชุดที่สอง (ตามตารางที่จ1) และวัดตามแนวแกน  $y$  สำหรับกรณีที่กระแสมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง หรือ  $T/3s$  หมายถึงการวัดอุณหภูมิ โดยการติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb ชุดที่สาม (ตามตารางที่จ1) และวัดตามแนวแกน  $y$  สำหรับกรณีที่กระแสมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง เป็นต้น

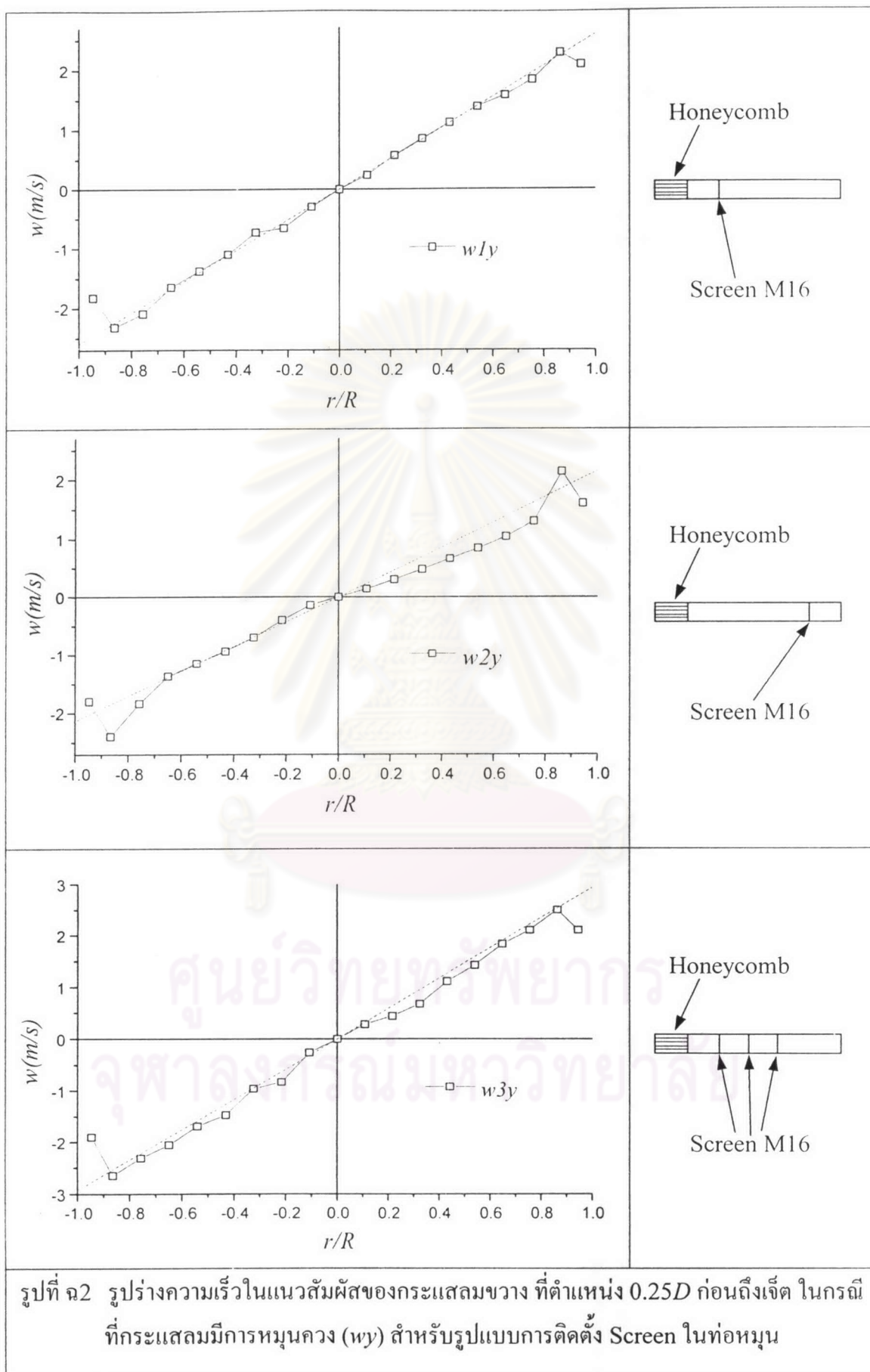
ตารางที่ ๑๑ การใส่ Screen และ Honeycomb ในชุดท่อหมุนแบบต่างๆ

Honeycomb		Honeycomb		Honeycomb		Honeycomb		Honeycomb			
 <p>Screen M16</p>	<p>Case 1</p> <p>Honeycomb + 1</p> <p>Screen M16 เวนระยะ</p> <p>ห่าง 2D นับจาก Honeycomb</p>	 <p>Honeycomb</p> <p>Screen M16</p>	<p>Case 2</p> <p>Honeycomb + 1</p> <p>Screen M16 เวนระยะ</p> <p>ห่าง 2D นับจากปาก ท่อออกท่อหมุน</p>	 <p>Honeycomb</p> <p>Screen M16</p>	<p>Case 3</p> <p>Honeycomb + 3</p> <p>Screen M16 เวนระยะ</p> <p>ห่างทุกๆ 2D นับจาก Honeycomb</p>	 <p>Partial Screen M16</p> <p>Screen M16</p> <p>Honeycomb</p>	<p>Case 4</p> <p>Honeycomb + 4</p> <p>Screen M16 เวนระยะ</p> <p>ห่างทุกๆ 1.5D นับจาก Honeycomb + 1</p> <p>Partial Screen M16 ที่ Screen ตัวสุดท้าย</p>	 <p>Partial Screen M16</p> <p>Screen M16</p>	<p>Case 5</p> <p>Honeycomb + 4</p> <p>Screen M16 เวนระยะ</p> <p>ห่างทุกๆ 1.5D นับจาก Honeycomb + 2</p> <p>Partial Screen M16 ที่ Screen ทางออก และ Honeycomb และ Screen ตัวแรก</p>	 <p>Partial Screen M16</p> <p>Partial Screen M30</p> <p>Screen M16</p> <p>Honeycomb</p>	<p>Case 6</p> <p>Honeycomb + 4</p> <p>Screen M16 เวนระยะ</p> <p>ห่างทุกๆ 1.5D นับจาก Honeycomb + 2</p> <p>Partial Screen M16 ที่ ทางเข้าและทางออก Honeycomb + 2</p> <p>Partial Screen M30 ที่ Screen ตัวแรกและตัวที่ สอง นับจาก Honeycomb</p>

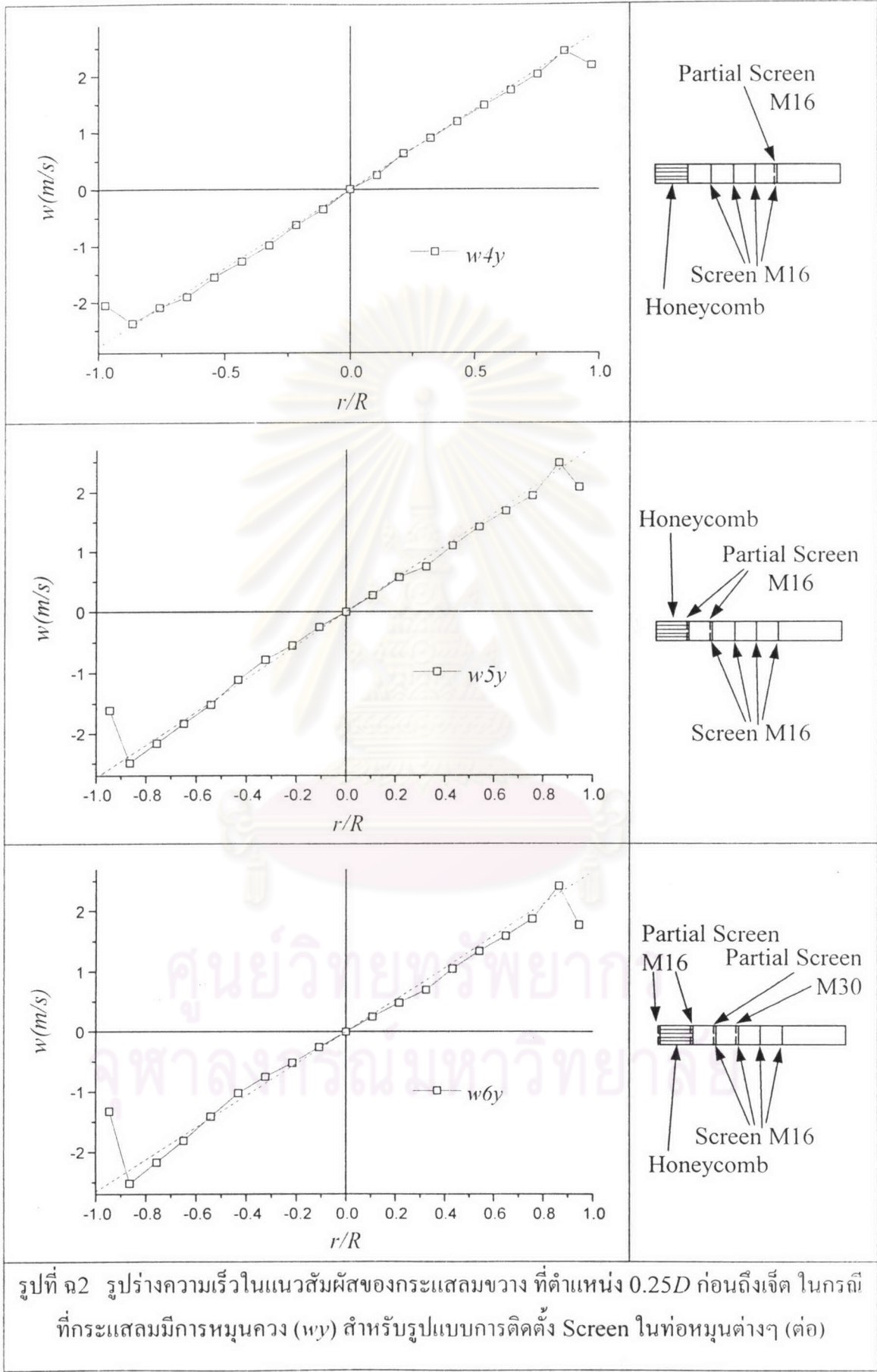




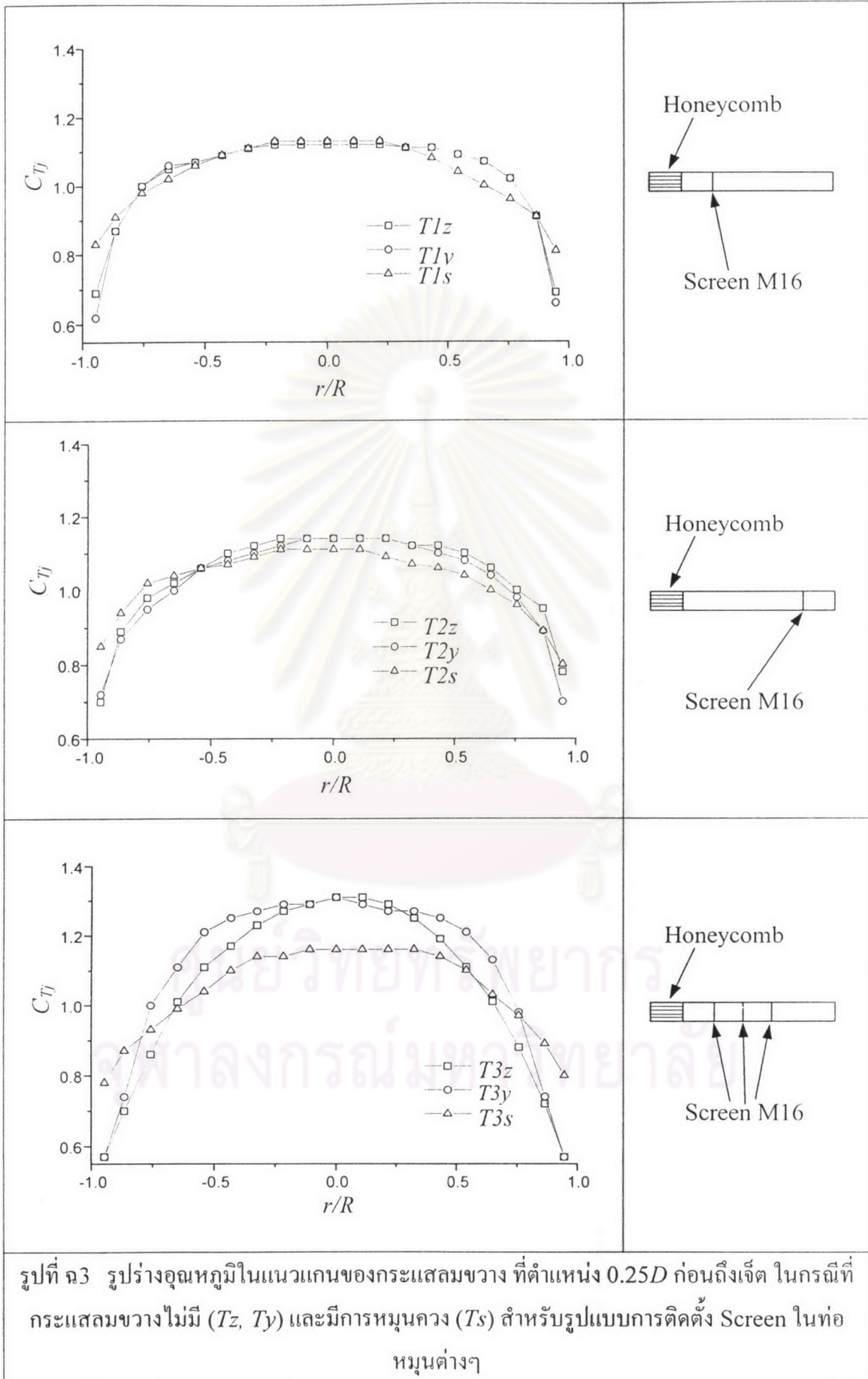


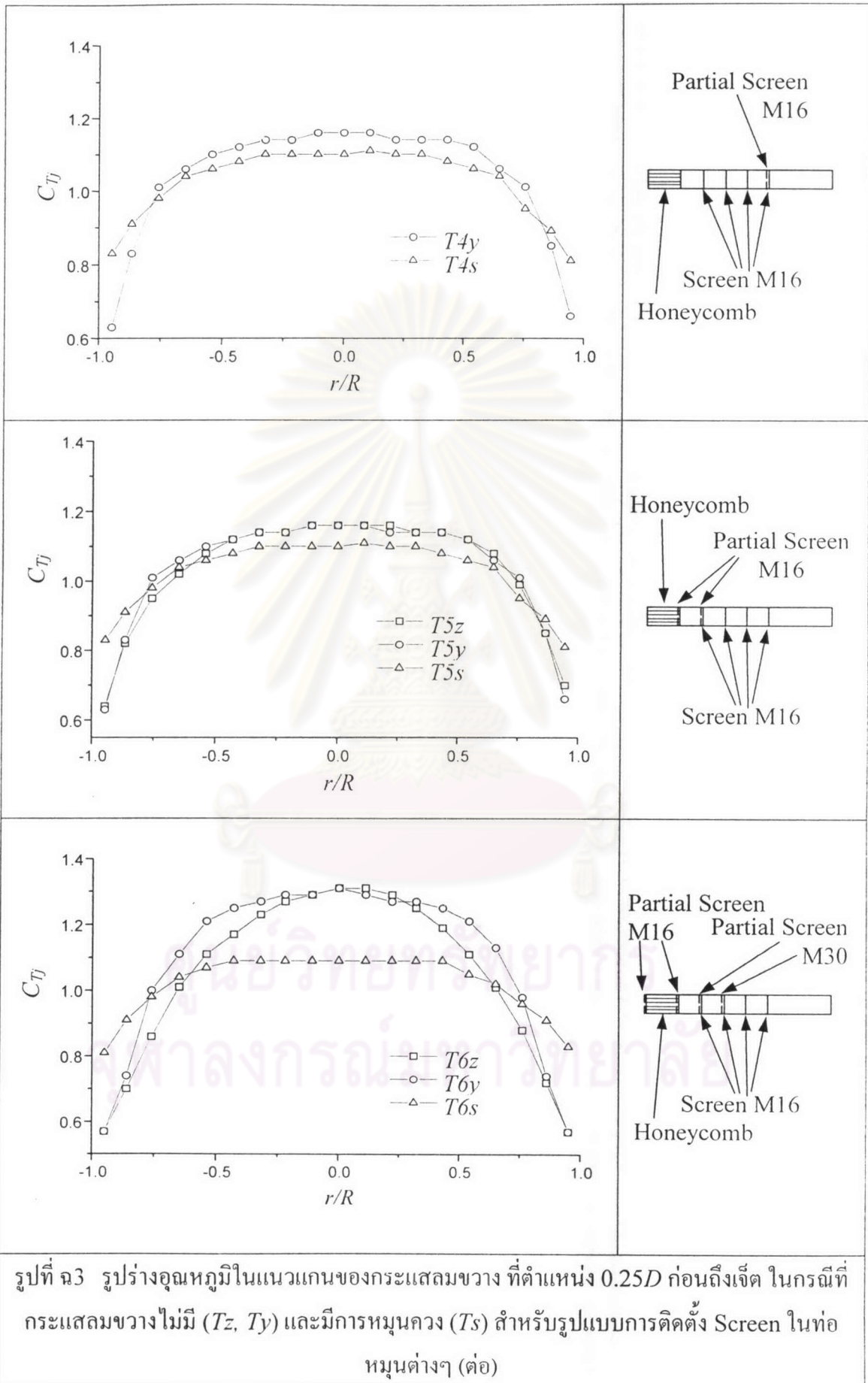


รูปที่ ๓2 รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสมขวาง ที่ตำแหน่ง  $0.25D$  ก่อนถึงเจ็ต ในกรณี ที่กระแสมมีการหมุนควง ( $w_y$ ) สำหรับรูปแบบการติดตั้ง Screen ในท่อหมุน



รูปที่ ๓2 รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสมวลของกระแสมวลวง ที่ตำแหน่ง  $0.25D$  ก่อนถึงเจ็ต ในกรณี ที่กระแสมวลมีการหมุนควง ( $w_y$ ) สำหรับรูปแบบการติดตั้ง Screen ในท่อหมุนต่างๆ (ต่อ)



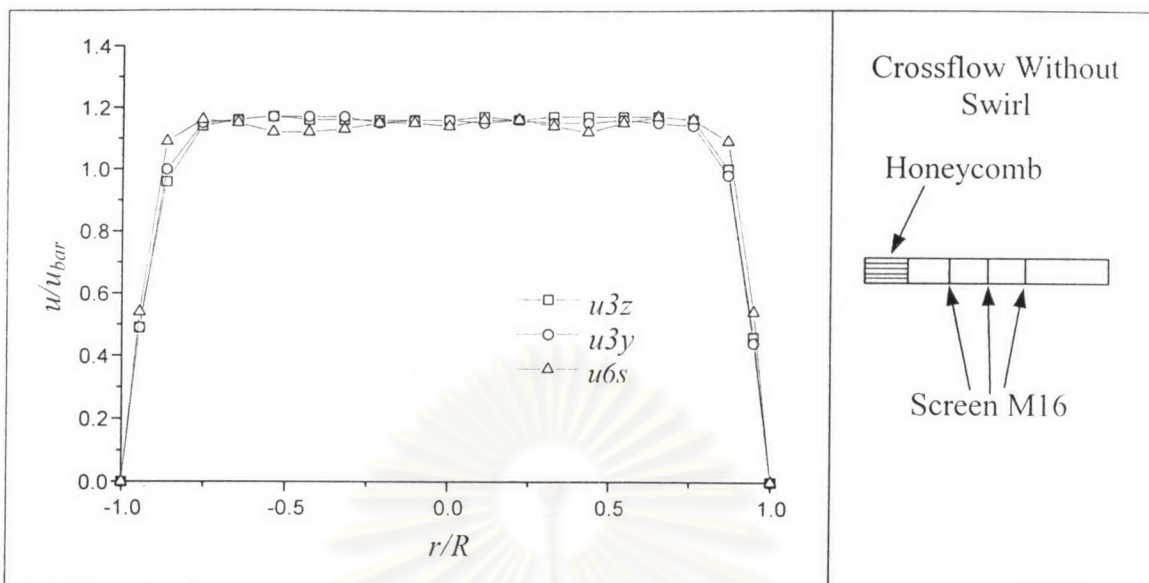


รูปที่ ๓ รูปร่างอุณหภูมิจนในแนวแกนของกระแสมวลของวงแหวน ที่ตำแหน่ง  $0.25D$  ก่อนถึงเจ็ต ในกรณีที่กระแสมวลไม่มี ( $T_z, T_y$ ) และมีการหมุนควง ( $T_s$ ) สำหรับรูปแบบการติดตั้ง Screen ในท่อหมุนต่างๆ (ต่อ)

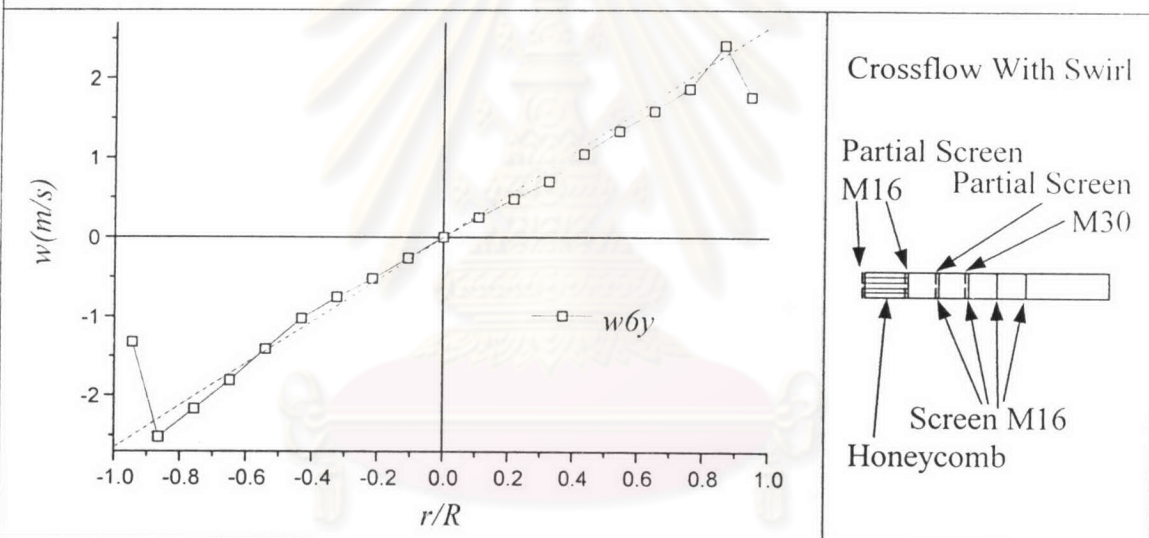
เพื่อให้ได้สภาวะการไหลเบื้องต้นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันของรูปร่างการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) และ รูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิ ดังนั้น ในกรณีที่กระแสมขวางไม่มีกรไหลแบบหมุนควง ( $S0$ ) ใช้การติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb ในชุดท่อหมุน แบบที่ 3 และกรณีที่กระแสมขวางมีการไหลแบบหมุนควง ( $S18$ ) ใช้การติดตั้งชุด Screen และ Honeycomb ในชุดท่อหมุน แบบที่ 6 และรูปแบบการไหลเบื้องต้นของกระแสมขวางมีลักษณะดังรูปที่ ๓4



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

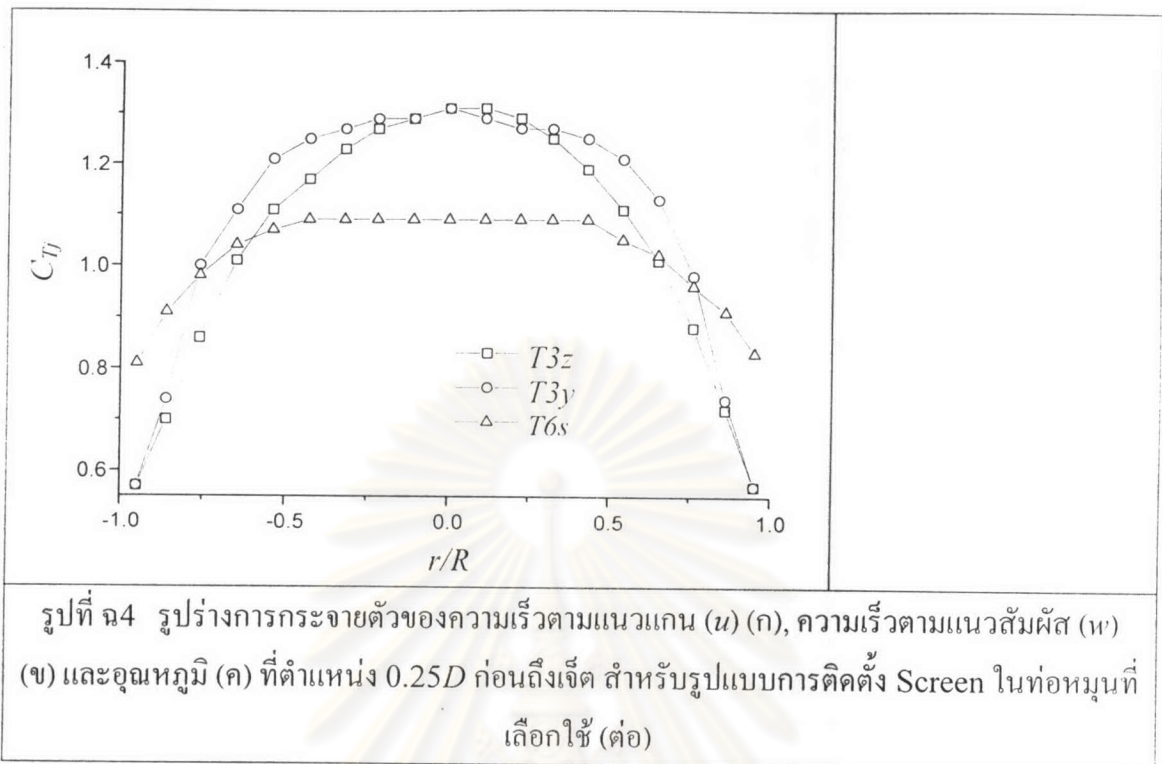


(ก)



(ข)

รูปที่ ๓4 รูปร่างการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน ( $u$ ) (ก), ความเร็วตามแนวสัมผัส ( $w$ ) (ข) และอุณหภูมิ (ค) ที่ตำแหน่ง  $0.25D$  ก่อนถึงเจ็ต สำหรับรูปแบบการติดตั้ง Screen ในท่อหมุนที่เลือกใช้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิติพงษ์ เย็นจิตต์ เกิดวันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2521 ที่โรงพยาบาลธนบุรี จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย