

## รายการอ้างอิง

- Andreopoulos, J. (1983). "Heat transfer measurements in a heated jet pipe flow issuing into a cold cross-stream," *Phys Fluids*, Vol. 26, pp. 3201-3210.
- Andreopoulos, J. (1984). "Initial conditions, Reynolds number effects and the near field characteristics of the round jet in a cross flow," *J. Flight Sci. Space Res.*, Vol. 8.
- Andreopoulos, J. (1985). "On the structure of jets in crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 157, pp. 163-197.
- Andreopoulos, J. and Rodi, W. (1984). "Experimental investigation of jets in a cross flow," *J. Fluid Mech.*, Vol.138, pp. 93-127.
- Bohl, D.G. and Foss, J.F. (1999). "Near exit plane effects caused by primary and primary-plus-secondary tabs," *AIAA Journal*, Vol. 37, No.2, pp. 192-201.
- Bradbury, L.J.S. and Khadem, A.H. (1975). "The distortion of a jet by tabs," *J. Fluid Mech.*, Vol. 70, pp. 801-813.
- Bradbury, L.J.S. and Wood, M.N. (1965). "The static pressure distribution around a circular jet exhausting normally from a plane wall into an air stream," A.R.C. CP 822.
- Coelho, S.L.V. and Hunt, J.C.R. (1989). "The dynamics of the near field of strong jets in crossflows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 200, pp. 95-120.
- Cortelezzi, L. and Karagozian, A. R. (2001). "On the formation of the counter-rotating vortex pair in traverse jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 446, pp. 347-373.
- Eroglu, A. and Breidenthal, R.E. (2001). "Structure, Penetration, and Mixing of Pulsed Jets in Crossflow," *AIAA Journal*, Vol. 39, pp. 417-423.
- 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.*, Vol.121, pp. 373-378.
- Fric, T.F. and Roshko, A. (1994). "Vortical structure in the wake of a transverse jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 279, pp. 1-47.
- Haven, B.A. (1996). "The effect of hole geometry on the near field characteristics of crossflow jets," PhD thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington, Seattle, WA.
- Kamotani, Y. and Greber, I. (1972). "Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow," *AIAA Journal*, Vol. 11, pp. 1425-1429.
- Kavsoglu, M.S. and Schetz, J.A. (1989). "Effects of swirl and high intensity turbulence on a jet in a crossflow," *Journal of Aircraft*, Vol.26, No.6, pp.539-546.
- Keffer J.F. and Baines, W.D. (1963). "The round turbulent jet in a cross-wind," *J. Fluid Mech.*, Vol.15, pp. 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.*, Vol. 306, pp. 111-144.
- Liscinsky, D.S., True, B., and Holdeman, J.D. (1995). "Effects of initial conditions on a single jet in crossflow," *AIAA paper 95-2998*, 31<sup>st</sup> Joint Propulsion Conference, San Diego, 10-12 July 1995.
- Lim T. T., New T.H., and Luo S.C. (2001). "On the development of large-scale structures of a jet normal to a cross flow," *Phys Fluids*, Vol. 13, pp. 770-775.

- McMahon, H.M. and Mosher, D.K. "Experiment investigation of pressures induced on a flat plate by a jet issuing into a subsonic cross wind," NASA SP 218, 1969.
- Moussa, Z.M., Trischka, J.W., and Eskinazi, S. (1977). "The near field in the mixing of a round jet with a cross-stream," *J. Fluid Mech.*, Vol. 80, pp. 49-80.
- Naughton, J.W., Cattafesta, L.N., and Settles, G.S. (1997). "An experiment study of compressible turbulent mixing enhancement in swirling jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 330, pp. 271-305.
- Niederhaus, C.E., Champagne, F.H., and Jacobs, J.W. (1997). "Scalar transport in a swirling transverse jet," *AIAA Journal*, Vol.35, No.11, pp.1697-1704.
- Pratte, B.D. and Baines, W.D. (1967). "Profiles of the round turbulent jets in a cross flow," Proc. A.S.C.E., *J. Hydraul. Div.*, Vol. 92, pp. 53-64.
- Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent jets*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
- Ramsey, J.W. and Goldstein, R.J. (1970). "Interaction of a heat jet with a deflecting stream," *NASA CR-72613*.
- Raud, 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," *J. Fluids Eng.*, Vol. 121, pp. 65-72.
- Reeder, M.F. and Samimy, M. (1996). "The evolution of a jet with vortex-generating tabs : real-time visualization and quantitative measurements," *J. Fluid Mech.*, Vol. 311, pp. 73-118.
- Sathapornanon, S. and Bunyajitradulya, A. (2002). "The Effect of Delta Tabs on Temperature Distribution in Non-Zero Circulation Swirling Jet in Crossflow" *Proceeding of the 16<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Network Conference*. pp. 72-77.
- Sherif, S.A. and Pletcher, R.H. (1989). "Measurements of the thermal characteristics of heated turbulent jets in crossflow," *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 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*, Vol. 13, pp.105-112.
- Smith, S.H. and Mungal, M.G. (1998). "Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 357, pp. 83-122.
- Sykes, R.I., Lewellen, W.S., and Parker, S.F. (1986). "On the vorticity dynamics of a turbulent jet in a crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol.80, pp. 49-80.
- Wangjiraniran, W., Uppathamnarakorn, P., and Bunyajitradulya, A. (1999). "On the decay of Characteristic Mean Temperature of A Heated Swirling Jet," *Proceeding of the 13<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 17-21.
- Wangjiraniran, W. (2001). "Effects of Swirl Number on Mixing Characteristics of A Heated Swirling Jet in Crossflow," Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.
- Wu, J.M., Vakili, A.D. and Yu, F.M. (1988). "Investigation of the Interacting Flow of Nonsymmetric Jets in Crossflow," *AIAA Journal*, Vol.26, pp.940-947.
- Yoshizako, H., Yoshida, K., and Akiyama, I. (1991). "Diffusion of a Jet Injected Perpendicularly into Uniform Crossflow," *JSME (B)*, No.90-0442 B, pp.354-359.
- Yuan, L.L. and Street, R.L. (1998). "Trajectory and entrainment of a round jet in crossflow," *Phys. fluids*, Vol. 10, No. 9, pp. 2323-2335.

- Yuan, L.L., Street, R.L., and Ferziger, J.H. (1999). "Large-eddy simulations of a round jet in crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 379, pp. 71-104.
- Zaman, K.B.Q.M., Samimy, M., and Reeder, M.F. (1994). "Control of an axisymmetric jet using vortex generators," *Phys Fluids*, Vol. 6, pp.778-793
- Zaman, K.B.M.Q. and Foss, J.K. (1997). "The effect of vortex generators on a jet in a cross-flow," *Phys. Fluids*, Vol.9, pp.106-114.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก. การศึกษาเบื้องต้น

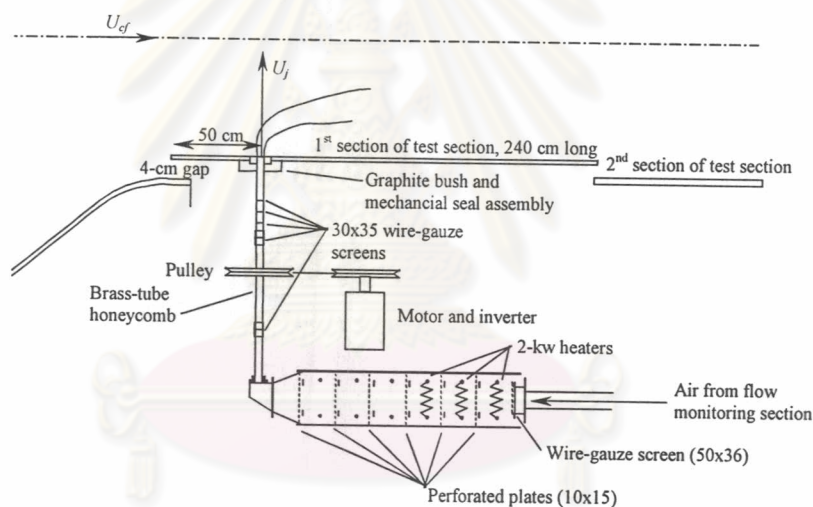
สำหรับผลการศึกษาเบื้องต้นนี้ได้ถูกนำเสนอในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 14-16 ตุลาคม 2545 พร้อมทั้งตีพิมพ์ในหนังสือบทความทางวิชาการในการประชุมวิชาการดังกล่าว (Sathapornnanon, S. and Bunyajitradulya, A. (2002), Effects of Delta Tab on Temperature Distribution in Non-Zero Circulation Swirling Jet in Crossflow, *Proceeding of the 16th Mechanical Engineering Network of Thailand Conference*, pp. 72-77.)

### ก.1 บทนำ

การศึกษาเบื้องต้นนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสถานะเริ่มต้นของเจ็ทในกระแสลมขวาง โดยเป็นงานวิจัยต่อจาก Wangjiraniran (2001) ซึ่งได้ศึกษาเรื่องผลกระทบของ Swirl number ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ทร้อนที่หมุนควงในกระแสลมขวาง ทั้งนี้จะได้มีการเพิ่มการเปลี่ยนแปลงสถานะเริ่มต้น โดยการติด Tab รูปสามเหลี่ยมแบบอยู่กับที่ลงไปบนขอบปากเจ็ทซึ่งมีการหมุนควง และการศึกษาเบื้องต้นนี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนตำแหน่งการติด Tab ไปโดยรอบขอบปากเจ็ทเพื่อศึกษาผลกระทบที่จะมีต่อลักษณะโครงสร้างการไหล ทั้งนี้ในการทดลองจะได้ทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิบนระนาบขวางในบริเวณ Near field ทางด้าน Downstream ของเจ็ท โดยในการทดลองจะทำที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล และค่า Swirl ratio เท่ากับ 4.1 และ 0.52 ตามลำดับ และได้ทำการปรับสถานะเริ่มต้นก่อนการติด Tab ให้ใกล้เคียงกับสถานะเริ่มต้นของการทดลองในงานวิจัยของ Wangjiraniran (2001) ทุกประการ จากผลของการทดลองได้แสดงให้เห็นถึง ผลกระทบของ Tab และตำแหน่งของ Tab ที่มีต่อเจ็ทที่หมุนควงในกระแสลมขวาง ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์การไหลที่ซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพบว่าโครงสร้างการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งของการติด Tab ไปตามทิศทางการหมุนของ Swirl จากด้าน Leeward ไปทางด้าน Suction โดยผ่านทางด้าน Pressure ของขอบปากเจ็ท ซึ่งทำให้สังเกตได้ว่าโครงสร้างการไหลมีความอ่อนไหวอย่างมากต่อตำแหน่งของ Tab ที่ติดตั้งทางด้าน Windward – Pressure

## ก.2 ชุดทดลอง

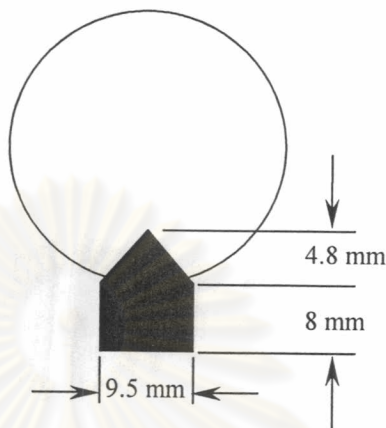
ชุดทดลองในงานวิจัยนี้เหมือนกับชุดทดลองของ Wangjiraniran (2001) ทุกประการ โดยชุดทดลองนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ อุโมงค์ลม ซึ่งมีหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง จะมีขนาด Test section 100x100 ตารางเซนติเมตร และชุดเจ็ทแบบท่อหมุนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร โดยที่อากาศจะถูกทำให้ร้อนก่อนเข้าสู่ชุดท่อเจ็ท และเมื่ออากาศไหลเข้าไปในชุดท่อเจ็ทแล้วจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนควงก่อนจะไหลผ่านปากเจ็ทออกไปตั้งฉากกับกระแสลมขวาง โดยที่เจ็ทจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ 40 องศาเซลเซียส และขอบปากเจ็ทจะอยู่ในระดับเดียวกับพื้นของ Test section ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 รูป Schematic ของชุดทดลอง

Tab ที่ใช้มีลักษณะรูปร่างและขนาดเหมือนกันกับที่แสดงไว้ในรูปที่ ก.2 โดยทำจากแผ่นเหล็กซึ่งมีความหนา 1 มิลลิเมตร โดยมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีมุมยอดเท่ากับ  $90^\circ$  และมีความสูงซึ่งวัดจากขอบปากเจ็ทถึงมุมยอดของสามเหลี่ยมเท่ากับ 4.8 มิลลิเมตร โดยจะติด Tab ให้วางราบอยู่บนพื้นของ Test section ตรงขอบปากเจ็ท ซึ่งจะทำให้ระนาบของ Tab รูปสามเหลี่ยมนี้จะตั้งฉากกับแนวแกนของเจ็ท ทั้งนี้ Tab จะมีค่า Blockage ratio ประมาณ 2.8% ของพื้นที่ปากทางออกของเจ็ท โดยที่ค่านี้จะเท่ากับค่า Blockage ratio ของ Tab รูปสามเหลี่ยมที่ใช้ในการวิจัยของ Zaman and Foss (1997) แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการติดตั้ง Tab ที่ใช้ในการ

ศึกษาขั้นต้นนี้ จะมีความแตกต่างกับงานวิจัยของ Zaman and Foss (1997) โดยที่ในงานวิจัยนั้น จะติดตั้งโดยให้ระนาบของ Tab เอียงทำมุม  $\pm 45^\circ$  กับแนวแกนของเจ็ท



รูปที่ ก.2 ลักษณะรูปร่างและตำแหน่งของ Tab ที่ติดบนขอบปากเจ็ท

### ก.3 พารามิเตอร์ของการทดลอง

สถานะของการทดลองเริ่มต้นถูกกำหนดเมื่อยังไม่มี การติด Tab บนขอบปากเจ็ท และถูกพิจารณาเป็น Nominal condition ซึ่งจะมีสถานะใกล้เคียงกันกับงานวิจัยของ Wangjiraniran (2001) ในกรณีต่างๆ ที่ทำการทดลอง ทั้งนี้เมื่อมีการติด Tab แล้วก็จะเริ่มดำเนินการทดลองโดย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของการทดลองอีก

การทดลองได้ทำที่ความเร็วของกระแสลมขวางประมาณ 1.8 เมตรต่อวินาที และความเร็วของเจ็ทซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

$$\overline{u_j} = \frac{1}{A} \int u dA \quad (\text{ก.1})$$

โดย  $\overline{u_j}$  ในการทดลองมีค่าประมาณ 8.0 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วที่จุดกึ่งกลางประมาณ 9.6 เมตรต่อวินาที และมีอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ  $30.0^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิของเจ็ทซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

$$\overline{T_j} = \frac{1}{A} \int T dA \quad (\text{ก.2})$$

โดย  $\overline{T_j}$  ในการทดลองมีค่าประมาณ  $70.0^\circ\text{C}$  โดยมีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางประมาณ  $75.0^\circ\text{C}$  ทำให้ได้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล  $r = (\rho_j \overline{u_j}^2 / \rho_{cf} \overline{u_{cf}}^2)^{1/2}$  คงที่ที่ประมาณ 4.1 และอัตราส่วน

ความเร็ว  $r_v = \bar{u}_j / \bar{u}_{cf}$  ประมาณ 4.35 รวมทั้งอัตราส่วนความหนาแน่น  $r_d = \rho_j / \rho_{cf}$  ประมาณ 0.89 โดยมีค่า Reynolds number ของเจ็ท  $Re_j = \bar{u}_j d / \nu$  ประมาณ 12,000 และ Reynolds number ของกระแสลมขวาง  $Re_{cf} = \bar{u}_{cf} d / \nu$  ประมาณ 3,400 และสุดท้ายคือระดับการหมุนควงที่แสดงด้วยค่า Swirl ratio  $Sr = w_R / \bar{u}_j = w_p / \bar{u}_j$  มีค่าประมาณ 0.52 จากนิยามที่ว่า Swirl ratio เท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ขอบเจ็ทกับความเร็วจนเฉลี่ยในแนวแกนเจ็ท ดังนั้นสำหรับกรณีของท่อหมุนในงานวิจัยนี้ จึงได้พิจารณาให้ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ขอบเจ็ทนั้นมีค่าเท่ากับความเร็วในแนวสัมผัสของท่อหมุน โดยสรุปรายละเอียดของสภาวะการทดลองดังนี้

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยของทุกกรณี
ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ท ( $\bar{u}_j$ )	8.0 m/s
ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของเจ็ท ( $u_{j,c}$ )	9.6 m/s
ความเร็วของกระแสลมขวาง ( $u_{cf}$ )	1.8 m/s
อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ท ( $\bar{T}_j$ )	70.0 °C
อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของเจ็ท ( $T_{j,c}$ )	75.0 °C
อุณหภูมิของกระแสลมขวาง ( $T_{cf}$ )	30.0 °C
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ )	4.1
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r_v$ )	4.35
อัตราส่วนความหนาแน่น ( $r_d$ )	0.89
Swirl ratio ( $Sr$ )	0.52

เพื่อความสะดวกจะได้นิยามชื่อกรณีการทดลองที่ไม่ติด Tab เป็น Sr0 และ Sr52 สำหรับกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควง และมีการหมุนควงที่ Swirl ratio เท่ากับ 0.52 ตามลำดับ และทั้งนี้ในกรณีที่มีการติด Tab จะใช้ตัวอักษร W, S, L และ P วางต่อท้ายชื่อกรณีการทดลองดังกล่าวด้วย โดยตัวอักษรเหล่านี้จะแทนชื่อตำแหน่งบนขอบปากเจ็ทด้าน Windward, Suction, Leeward และ Pressure ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตอีกว่าเมื่อทำการติด Tab ที่ด้าน Suction หรือ Pressure สำหรับกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควง จะเห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นกรณีการทดลอง Sr0S และ Sr0P จึงเป็นกรณีการทดลองเดียวกัน



ในการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristics) ซึ่งแสดงโดย การกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดนั้นจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (Global coefficient of temperature;  $C_{TG}$ ) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{TG} = \frac{T - T_{cf}}{T_j - T_{cf}} \quad (ก.3)$$

โดย  $T$  คืออุณหภูมิที่ทำการวัด  
 $T_j$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ที่ปากเจ็ท  
 $T_{cf}$  คืออุณหภูมิของกระแสลมขวาง

ค่า  $C_{TG}$  ดังกล่าวจะแสดงระดับของอุณหภูมิเกิน (Excess temperature) ที่ตำแหน่งใดๆเทียบกับระดับของอุณหภูมิเกินที่ปากเจ็ท ซึ่งเป็นพารามิเตอร์รวม (Global parameter) ของการไหล นอกจากนี้ค่า  $C_{TG}$  ยังแสดงถึงคุณลักษณะการผสมที่ตำแหน่งหน้าตัดใดๆ

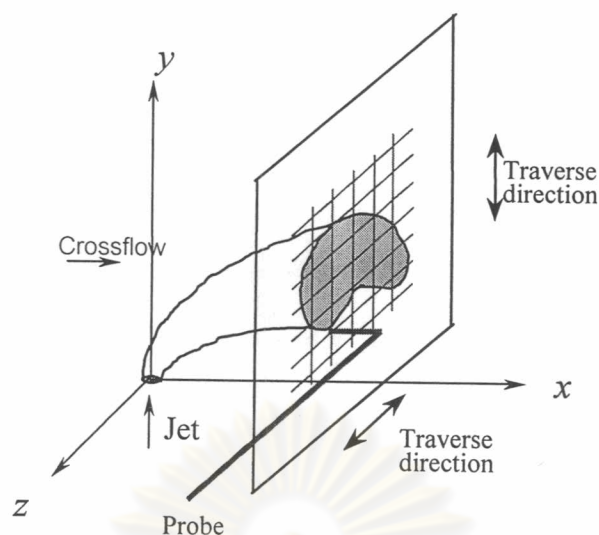
จากการพิจารณาปริมาตรควบคุม (Control volume) โดยใช้กฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ความสัมพันธ์ของ  $C_{TG}$  ดังสมการ

$$C_{TG} = \frac{\dot{m}_j}{\dot{m}_j + \dot{m}_{cf}} \quad (ก.4)$$

สมการ (ก.4) แสดงว่าค่า  $C_{TG}$  เฉลี่ยบนพื้นที่หน้าตัดบ่งบอกถึงอัตราการไหลโดยมวลของเจ็ทเริ่มต้นเทียบกับอัตราการไหลโดยมวลของเจ็ทผสมที่หน้าตัดใดๆ หรืออีกนัยหนึ่งแสดงถึงอัตราการตั้งมวลของกระแสลมขวางเข้าไปในเจ็ทผสม (Entrainment) ที่หน้าตัดใดๆ นั่นคือเมื่อมีการตั้งมวลของกระแสลมขวางเข้าไปในตัวเจ็ทผสมมากขึ้น จะส่งผลทำให้  $C_{TG}$  มีค่าลดลง

#### ก.4 รายละเอียดของการวัด

ในการทดลองศึกษาเบื้องต้นนี้ ได้ทำการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดบนระนาบ  $yz$  ที่ระยะ  $x/r_d$  เท่ากับ 0.5 โดยใช้ Thermocouple ซึ่งเป็นชุดเดียวกับการวัดสภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิที่ปากเจ็ท โดยวัดเป็น Matrix และใช้ความละเอียดในการวัด (Resolution) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร  $\times$  10 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 ลักษณะการวัดการกระจายของอุณหภูมิตั้งเป็นหน้าตัด

#### ก.5 ผลการทดลอง

รูปที่ ก.4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งในระนาบขวาง  $yz$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.50$  ในกรณีต่างๆ ผลการทดลองแสดงในรูป Contour ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม ( $C_{TG}$ ) โดย Contour นี้จะแสดงอยู่บนระนาบขวางที่ถูก Normalize ด้วยค่า  $rd$  และค่า Uncertainty ของ  $C_{TG}$  อยู่ในช่วงประมาณ  $\pm 0.05$  ทั้งนี้รูป Contour ที่เห็นเป็นรูปที่มองจาก Downstream ของเจ็ทขึ้นไปทาง Upstream ซึ่งจะเรียกมุมมองในลักษณะนี้ว่า End view โดยสัดส่วนของภาพประมาณเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นภาพจะแสดงรูปร่าง ขนาด และตำแหน่งในเชิงคุณภาพได้ สำหรับตำแหน่งของปากเจ็ทซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับพื้นนั้น ตามรูปจะอยู่ที่พิกัด  $y/rd = 0$  และ  $z/rd = 0$  นอกจากนี้ในแต่ละรูปจะยังมีแผนภาพแสดงทิศทางของการไหลของกระแสลมขวาง และทิศทางของการหมุนของเจ็ทในกรณีที่มีการหมุน รวมถึงตำแหน่งของ Tab ถ้ามีการติดตั้ง Tab อีกด้วย โดยแผนภาพนี้เป็นมุมมองจากด้านบน

เพื่อความสะดวกในการสังเกต รูปที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมจะแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งในกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควง และสำหรับกรณีที่เจ็ทมีการหมุนควง รูปภาพผลการทดลองจะถูกจัดเรียงตามทิศทางของการหมุนของตำแหน่งการวาง Tab นั่นคือรูปในกรณี Sr52W, Sr52S, Sr52L และ Sr52P ถูกเรียงตามทิศทางตามเข็มนาฬิกา

อันดับแรกจะได้พิจารณาผลกระทบของตำแหน่งของ Tab ในกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควง นั่นคือกรณี Sr0, Sr0W, Sr0P/S ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อ Tab ถูกวางอยู่บนด้าน Windward (Sr0W) แล้วเจ็ทจะทะลุ (Penetrate) เข้าไปในกระแสลมขวางได้น้อยกว่ากรณีที่ไม่มี Tab ติด แต่จะมีการกระจายตัวไปทางด้านข้างมากกว่าเล็กน้อย ทำให้ขอบเจ็ทที่มีอุณหภูมิตั้งมีรูปร่างที่

กลมมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Zaman and Foss (1997) นอกจากนั้นในกรณีที่ทำกริด Tab ที่ตำแหน่ง Windward จะสังเกตเห็นว่ามีผลต่อการกระจายตัวทั้งในบริเวณแกนกลางซึ่งมีอุณหภูมิสูงและบริเวณขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยทั้งนี้ตรงกันข้ามกับกรณีที่ทำกริด Tab ที่ตำแหน่งด้านข้างทั้งสองของขอบปากเจ็ทในกรณี SrOP/S ซึ่ง Penetration depth และ ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำค่อนข้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ถึงกระนั้นก็ตามบริเวณ Core ของเจ็ทซึ่งเคยมีบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ในกรณีที่ไม่ติด Tab จะหายไป รวมถึงรูปร่างที่มีลักษณะเป็นรูปไต (Kidney shape) ในบริเวณอุณหภูมิสูงก็จะมีขนาดไม่สมมาตรเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกัน

เมื่อทดลองในกรณีที่เจ็ทมีการหมุนควง Sr52, -W, -S, -L, -P จะสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

เริ่มจากกรณีที่เจ็ทมีการหมุนควงโดยไม่มีการติด Tab (Sr52) แล้วต่อมาทำติด Tab เข้าไปที่ด้าน Windward (Sr52W) ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหลอย่างมาก โดยเฉพาะในส่วนของ Penetration depth ของเจ็ทนั้นจะลดลงอย่างชัดเจน โดยขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำด้านบนจะมีตำแหน่งที่ต่ำลงมาจากกรณีไม่ติด Tab (Sr52) ถึงประมาณ  $0.25rd$  ซึ่งความสูงที่ลดลงอย่างมากนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่เจ็ทไม่มีการหมุนควง (Sr0W) นอกจากนั้นบริเวณ Core ที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกแยกออกจากกันอย่างชัดเจนเป็นสองบริเวณ โดย Core ที่อยู่ด้าน Suction จะวางตัวใกล้ชิดกับพื้นมากขึ้น และขอบของเจ็ทด้านล่างที่มีอุณหภูมิต่ำนั้นคาดว่าจะมีบางส่วนอยู่ติดกับพื้นด้วย ทั้งนี้จากการวัดในระดับเหนือพื้นน้อยที่สุด 7 มิลลิเมตร แต่อย่างไรก็ตามบริเวณเจ็ทส่วนใหญ่ยังคงอยู่ที่ตรงกลางของหน้าตัด

เมื่อ Tab ถูกติดที่ตำแหน่ง Leeward (Sr52L) จะสังเกตเห็นได้ว่า Penetration depth ค่อนข้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำจะมีลักษณะกลมขึ้นเล็กน้อย แต่ในขณะที่บริเวณ Core ของเจ็ทที่มีอุณหภูมิสูงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าอุณหภูมิสูงที่สุดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติด Tab (Sr52) แต่อย่างไรก็ตามเจ็ทก็ยังคงวางตัวอยู่ตรงกลางของหน้าตัด

ต่อมาได้ทำการติด Tab ที่ตำแหน่ง Suction (Sr52S) พบว่ารูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยรวมแล้วคล้ายกับกรณีที่ไม่มีการติด Tab (Sr52) มาก โดยจะพบว่ารูปร่างขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำด้าน Suction เบี้ยวลงมาทางด้านล่างเล็กน้อย แต่ส่วน Core ของเจ็ทที่มีอุณหภูมิสูงนั้นพบว่าหายไปบางส่วนตรงบริเวณด้าน Suction ทำให้ Core ถูกแบ่งออกเป็นสองบริเวณอย่างชัดเจน

การเปลี่ยนแปลงอย่างมากในโครงสร้างการไหลได้ถูกสังเกตพบอีกครั้งเมื่อ Tab ถูกติดลงไปตำแหน่ง pressure (Sr52P) โดยถึงแม้จะสังเกตเห็นว่า Penetration depth จะไม่มีการ

เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่รูปร่างของขอบเจ็ทที่มีอุณหภูมิต่ำและ Core ที่มีอุณหภูมิสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Core ของเจ็ทจะมีอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นมาก และมากกว่าในกรณีการทดลองอื่นๆ ทั้งหมด รวมทั้งในกรณีที่ไม่มีกริดติด Tab (Sr52) อีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นเจ็ทยังมีตำแหน่งการวางตัวที่เลื่อนออกจากแนวกลางของหน้าตัด โดยเลื่อนไปทางด้าน Suction อย่างเห็นได้ชัดเจนอีกด้วย

จากผลการทดลองที่ได้แสดงมาแล้วจะเห็นได้ว่า ผลกระทบของ Tab ที่มีต่อเจ็ทที่หมุนควงในกระแสลมขวางเป็นปรากฏการณ์ที่ค่อนข้างซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามยังคงสามารถสังเกตติดตามได้ โดยรูปผลการทดลองที่ได้วางเรียงกันไว้ดังแสดงในรูปที่ ก.4 โดยเริ่มต้นจากกรณีที่ติด Tab ที่ตำแหน่ง Leeward (Sr52L) แล้วเลื่อนการสังเกตไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งก็คือสังเกต Tab ที่ติดบนตำแหน่ง Pressure (Sr52P) ต่อไป จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหลอย่างมาก แล้วถ้าเลื่อนการสังเกตต่อไปอีกทางด้านตามเข็มนาฬิกาจะผ่านกรณีที่ติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward (Sr52W) และ Suction (Sr52S) ตามลำดับก็จะพบการเปลี่ยนแปลงอย่างมากอีกเช่นเดียวกัน แต่หลังจากนั้นเมื่อทำการเลื่อน Tab จากตำแหน่ง Suction (Sr52S) ไปที่ตำแหน่ง Leeward (Sr52L) จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหลน้อยลงมาก

ดังนั้นจากผลที่ได้กล่าวมาแล้วจะพบว่า โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่หมุนควงในกระแสลมขวางจะมีความอ่อนไหวมากต่อตำแหน่งของ Tab ซึ่งติดบน Quadrant ที่ 3,2 และ 1 โดยเฉพาะจากกรณี Sr52P ไปเป็นเป็นกรณี Sr52W ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้างการไหลจะอ่อนไหวมากต่อตำแหน่งของ Tab ที่ติดบน Quadrant ที่ 2 ซึ่งก็คือด้าน Windward – Pressure นั่นเอง

นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า สองในสามของจำนวน Quadrant ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างการไหลซึ่งก็คือ Quadrant ที่ 3 และ 2 อยู่ทางแถบด้าน Pressure ซึ่งความเร็วแนวสัมผัสของเจ็ทมีทิศทางตรงข้ามกับความเร็วของกระแสลมขวาง และสองในสามของจำนวน Quadrant ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างการไหลอีกเช่นเดียวกัน ซึ่งก็คือ คือ Quadrant ที่ 2 และ 1 อยู่ทางแถบด้าน Windward ซึ่งเป็นขอบของเจ็ทด้านที่ปะทะกระแสลมขวางโดยตรง

## ก.6 สรุปผลการทดลอง

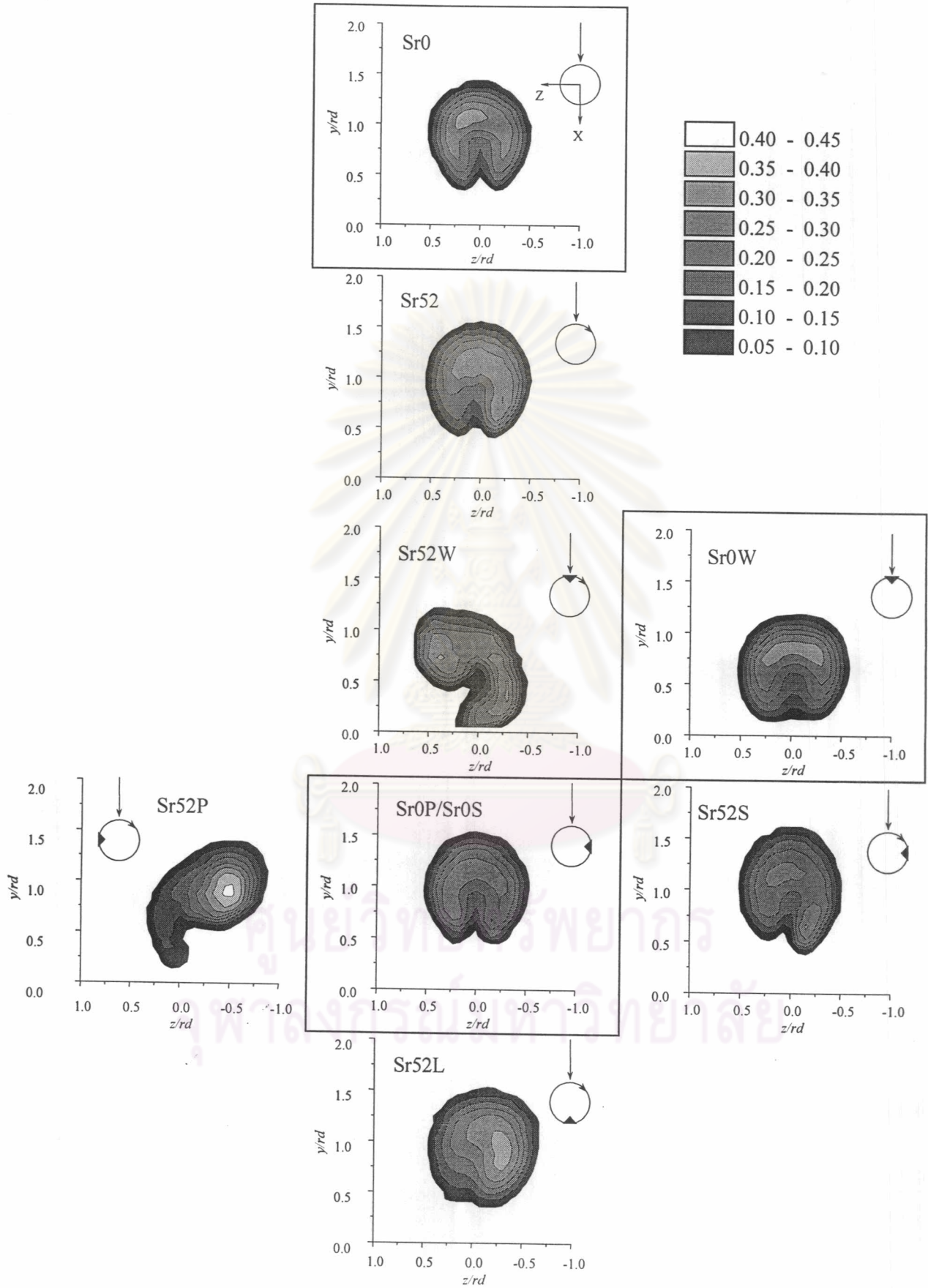
จากการศึกษาผลกระทบของ Tab ที่มีต่อโครงสร้างการไหลของ Non-zero circulation เจ็ทที่หมุนควงในกระแสลมขวาง ได้แสดงให้เห็นว่า Tab และตำแหน่งของการติด Tab มีผลกระทบต่อโครงสร้างการไหลเป็นอย่างมาก โดยทำให้เกิดปรากฏการณ์การไหลที่ซับซ้อน ทั้งนี้โครงสร้างการไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก เมื่อ Tab เปลี่ยนตำแหน่งการติดไประหว่าง Quadrant ที่ 3,2 และ 1 ตามลำดับ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างการไหลจะอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ในกรณีการติด Tab บน Quadrant ที่ 2

ผลการศึกษานี้ได้ให้แนวทางที่น่าจะเป็นไปได้ในการควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้กลไกของเจ็ทในการช่วยผสม เช่น Burner , Injector และ Jet-mixer เป็นต้น ซึ่งในส่วนของ การเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในการศึกษาเบื้องต้นนี้ ยังไม่สามารถระบุอย่างชัดเจนได้ว่าการติด Tab ที่ตำแหน่งใดจะช่วยให้การผสมดีขึ้นอย่างชัดเจนทั้งในช่วง Near field หรือ Far field ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

หรือในอีกแนวทางหนึ่งที่น่าจะได้รับประโยชน์จากผลของการศึกษาเบื้องต้นนี้โดยตรงก็คือ สามารถวิเคราะห์ห้อย่างสังเขปถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เช่นการเผาไหม้ที่ Burner ว่าจะมีผลกระทบเพียงใด ถ้ามีสิ่งกีดขวางที่มีขนาดโดยประมาณเพียงแค่ 3% ของพื้นที่ทางออกมาก็เกิดขวางการไหลที่ปากเจ็ท ซึ่งสิ่งกีดขวางแผ่นเล็กๆ นี้อาจจะทำให้มีผลกระทบอย่างมากต่อโครงสร้างการไหลของก๊าซร้อน โดยจะส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นได้ หรือในกรณีของ Jet-mixer ในอุปกรณ์ผสมสารเคมี ถ้าเกิดปรากฏการณ์ดังเช่นกรณี Sr52P ขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลงเป็นอย่างมาก หรือในการประยุกต์ใช้งานบางลักษณะถ้าเกิดปรากฏการณ์เช่นกรณี Sr52W ขึ้นอาจจะส่งผลเสียต่อพื้นผิวของอุปกรณ์ได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $C_{TG}$ ) บนระนาบขวางที่  $x/rd=0.50$

## ภาคผนวก ข

### การเปรียบเทียบและคำนวณความเร็วการไหลจากการวัดด้วย Yaw Probe

#### ข.1 ลักษณะและรายละเอียดของ Yaw Probe

โดยทั่วไป Pitot Probe สามารถใช้งานได้ดีกับการวัดความเร็วของของไหลที่มีลักษณะเป็น Parallel flow และผู้วัดทราบทิศทางการไหลแน่นอน แต่สำหรับการไหลแบบหมุนวน ดังเช่นในงานวิจัยนี้ที่ของไหลมีความเร็วในสองมิติ และไม่ทราบทิศทางการไหล จึงไม่สามารถใช้ Pitot Probe ในการวัดความเร็วได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สร้าง Yaw Probe ขึ้นเพื่อวัดการไหลโดยสามารถวัดความเร็วในสองมิติที่ไม่ทราบทิศทางที่แน่นอนได้

สำหรับ Yaw Probe ที่ใช้ทำขึ้นจากเข็มฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 อัน เรียงติดกัน โดยเข็มอันที่ 1 และ 3 ถูกฝนให้มีมุมเอียง  $\theta_p$  เท่ากับ 30 องศา และติดเข้ากับเข็มอันที่ 2 ที่ฝนให้มีมุม 90 องศาที่อยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ ข.1 เข็มทั้ง 3 ถูกเชื่อมติดกันและงอโค้งเป็นมุมฉาก โดยมีระยะจากปลายเข็มถึงก้านเข็มยาว 35 มิลลิเมตร เข็มแต่ละอันต่อเข้ากับท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร ท่อทองเหลืองทั้ง 3 อันถูกเชื่อมเข้าไว้ด้วยกันเพื่อใช้เป็นก้าน Probe ซึ่งความดันที่วัดได้ระหว่างเข็มแต่ละจะถูกนำไปคำนวณหาความเร็วของการไหลในทิศทางต่างๆ



รูปที่ ข.1 แสดงลักษณะของ Yaw Probe

## ข.2 การเปรียบเทียบ Yaw Probe

ในการวัดความเร็วของการไหลได้มีการเปรียบเทียบ Yaw Probe เพื่อหาความสัมพันธ์ของผลต่างความดันที่วัดได้จากเข็มแต่ละคู่กับค่าความเร็วตามแนวแกนและแนวสัมผัส โดยทำการเปรียบเทียบในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด  $50 \times 50$  เซนติเมตร ที่ความเร็ว 4, 8 และ 12 เมตรต่อวินาที แล้ววัดผลต่างความดันระหว่างเข็มแต่ละคู่ของ 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  $P_0 - P_2$  นอกจากนี้ยังวัดค่าความดันจลน์ของการไหลโดยวัดผลต่างความดันระหว่าง Pitot Probe กับความดันสถิตที่ผนังของอุโมงค์ลม

ในการเปรียบเทียบได้ควบคุมให้การไหลมีความดันจลน์คงที่แล้วปรับเปลี่ยนมุมปะทะ ( $\alpha$ ) ของการไหลกับ Yaw Probe โดยหมุน Yaw Probe ไปทีละ 5 องศา โดยมีช่วงของการเปรียบเทียบ ( $\alpha$ ) ระหว่าง -80 องศา ถึง 80 องศา และผลต่างความดันที่วัดได้จะสัมพันธ์กันตามสมการ (ข.1) ถึง (ข.3) (Chue, 1975)

$$P_1 = P_0 + K_1 \Delta P \quad (\text{ข.1})$$

$$P_2 = P_0 + K_2 \Delta P \quad (\text{ข.2})$$

$$P_3 = P_0 + K_3 \Delta P \quad (\text{ข.3})$$

โดย	$P_0$	คือค่าความดันรวมจริง
	$\Delta P$	คือค่าความดันจลน์ของการทดลอง
	$K_1, K_2, K_3$	คือ Calibration Function

จากสมการ ข.1 ถึง ข.3 นั้นสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_0$ ,  $1/K_0$ ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ได้ตามสมการ

$$K_{12} = K_1 - K_2 = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P} \quad (\text{ข.4})$$

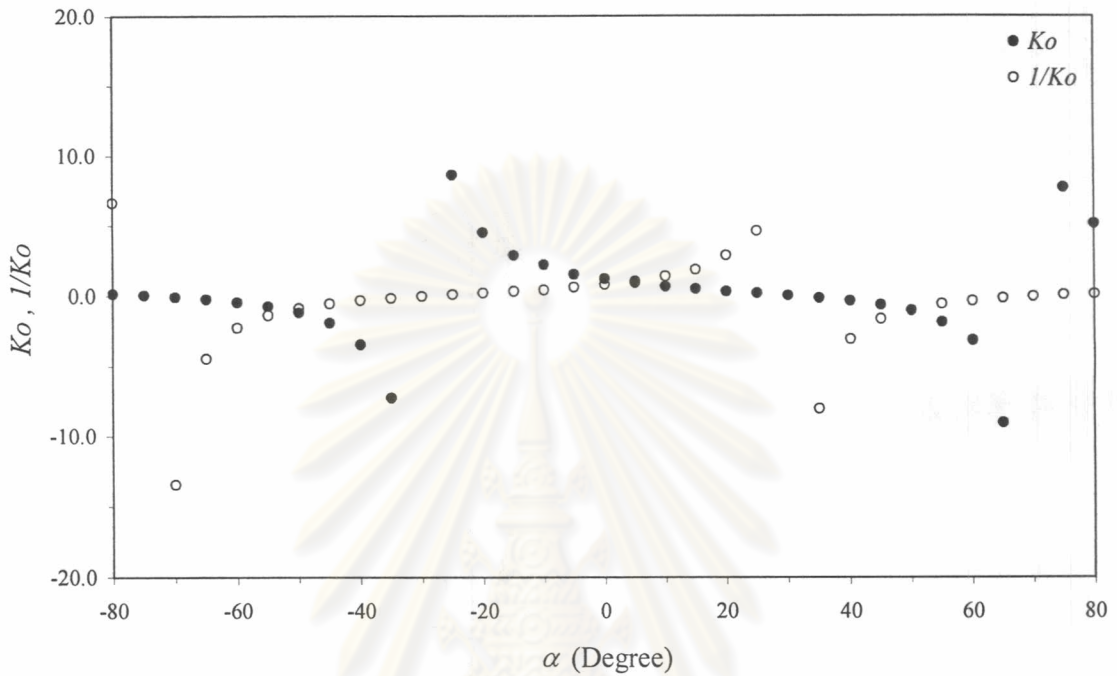
$$K_{32} = K_3 - K_2 = \frac{P_3 - P_2}{\Delta P} \quad (\text{ข.5})$$

$$K_0 = \frac{(K_3 - K_2)}{(K_1 - K_2)} = \frac{(P_3 - P_2)}{(P_1 - P_2)} \quad (\text{ข.6-1})$$

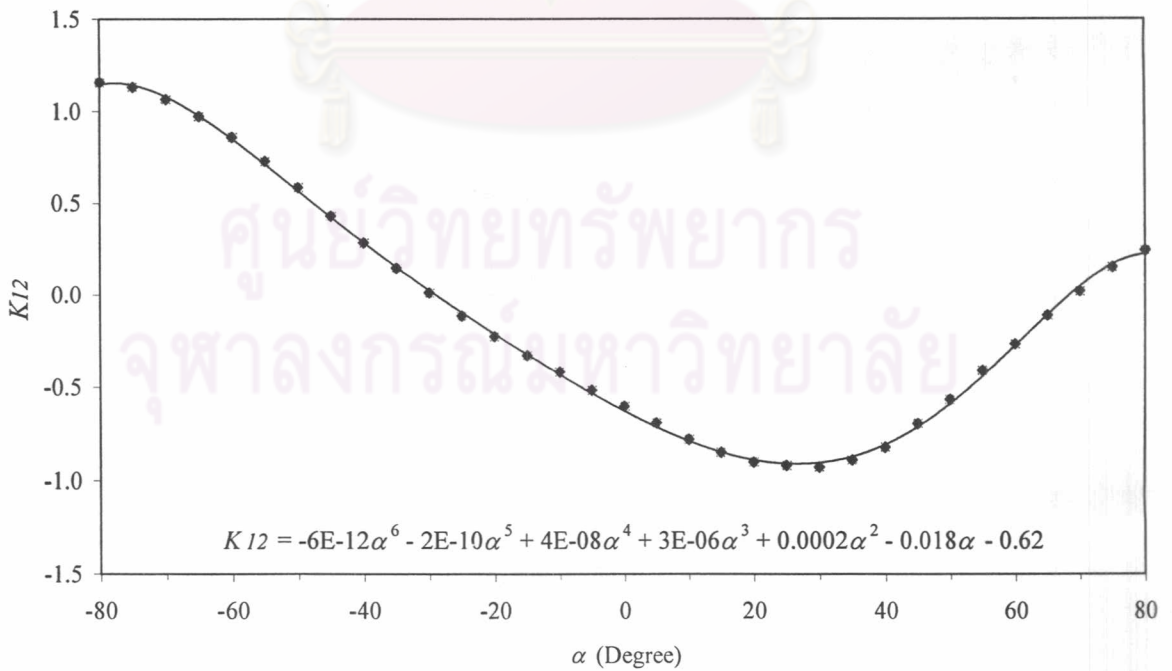
$$1/K_0 = \frac{(K_1 - K_2)}{(K_3 - K_2)} = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_3 - P_2)} \quad (\text{ข.6-2})$$



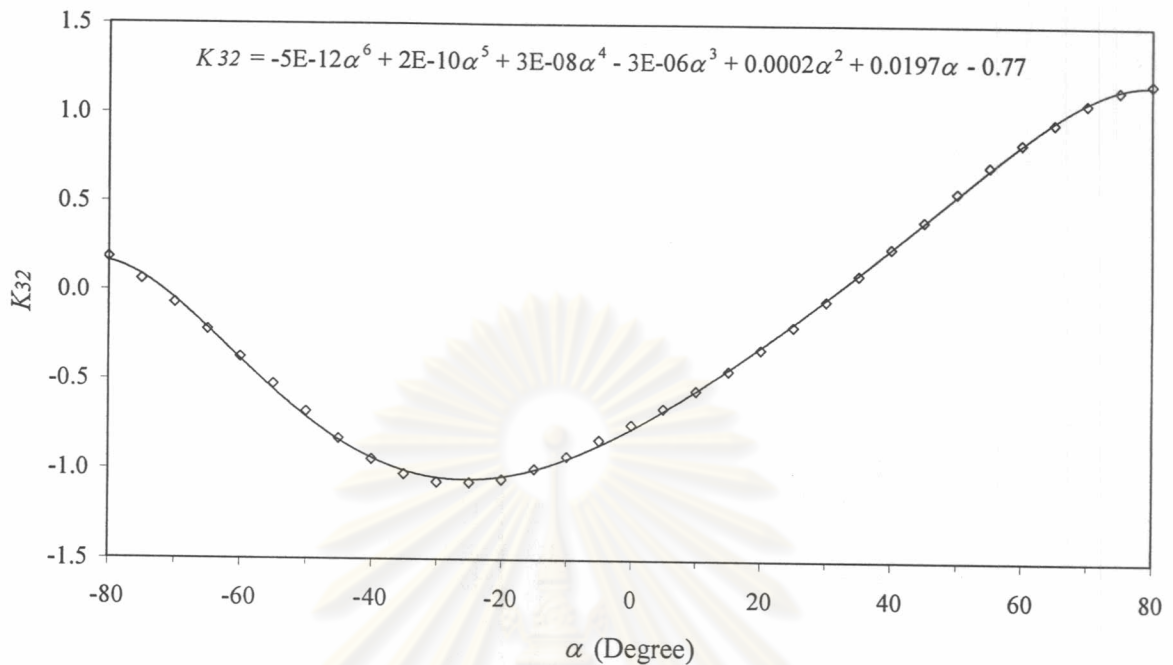
โดยสามารถหาค่า  $K_0$ ,  $1/K_0$ ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่างๆได้จากค่าความดันแตกต่างที่วัดและค่าความดันจลน์ของการทดลอง โดยแสดงความสัมพันธ์ของ  $K_0$ ,  $1/K_0$ ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่างๆดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 (ก) ความสัมพันธ์ของ Calibration function,  $K_0$  และ  $1/K_0$  กับมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ )



รูปที่ ข.2 (ข) ความสัมพันธ์ของ Calibration function,  $K_{12}$  กับมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ )



รูปที่ ๓.2 (ค) ความสัมพันธ์ของ Calibration function,  $K_{32}$  กับมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ )

### ๓.3 การคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe

ในการหาความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe นั้น เริ่มจากการวัดความแตกต่างของความดันในแต่ละคู่ นั่นคือ  $P_1-P_2$ , และ  $P_3-P_2$  จากนั้นจะสามารถหาค่า  $K_0$  และ  $1/K_0$  ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (๓.6) และหาค่ามุมปะทะ ( $\alpha$ ) ของการไหลได้จากความสัมพันธ์ของ  $K_0$  และ  $1/K_0$  และมุมปะทะ ( $\alpha$ ) โดยใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการเปรียบเทียบ ซึ่งผลการใช้ Curve fitting ในช่วง  $K_0$  ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ๓.3 จากนั้นจะสามารถหาค่า  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ได้จากความสัมพันธ์ของ  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  กับมุมปะทะ ( $\alpha$ ) โดยใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการ Calibrate ซึ่งผลการใช้ Curve fitting แสดงดังรูปที่ ๓.2 โดยจากการวัดความแตกต่างความดันและค่า  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่คำนวณได้ รวมทั้งความสัมพันธ์ตามสมการ ๓.4 และ ๓.5 นั้นทำให้สามารถหาค่าความดันจลน์ ( $\Delta P$ ) ของการทดลองได้จาก

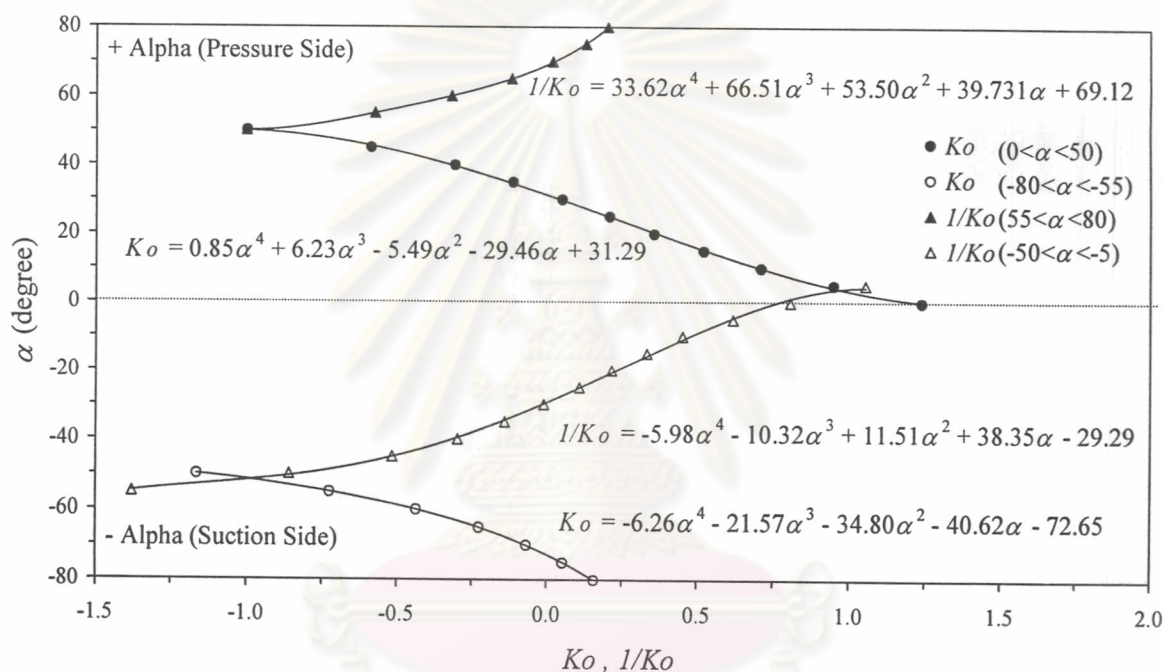
$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{K_{12}} \quad (๓.7)$$

$$\Delta P = \frac{P_3 - P_2}{K_{32}} \quad (๓.8)$$

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

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \cos \alpha \quad (1.9)$$

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \sin \alpha \quad (1.10)$$



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ ) กับ Calibration function  $K_0$  และ  $1/K_0$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.  
การคำนวณค่าความไม่แน่นอน

ค.1 ค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว

ค.1.1 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe

การคำนวณความเร็วของการไหลด้วย Pitot Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (\text{ค.1})$$

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

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ ความเร็ว ( $\delta_u$ ) 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 ค.1 จะได้

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

โดยที่ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดัน  $\delta_{\Delta P}$  มีค่าประมาณ  $\pm 0.065$  mmWG และให้ค่า  $\delta_{\rho}$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $\delta_{\Delta P}$  เมื่อเลือกจุดบริเวณกึ่งกลางที่ปากเจ็ทคือที่  $r = 0$  ในกรณี Sr0 ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u = 10.6$  m/s,  $\rho = 1.01$  kg/m<sup>3</sup> แทนในสมการ ค.2

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{0.65 \text{ Pa}}{1.01 \text{ kg/m}^3 \times 10.6 \text{ m/s}}\right)^2} \approx 0.06 \text{ m/s}$$

และเมื่อเลือกจุดบริเวณใกล้ขอบที่ปากเจ็ทคือที่ระยะ  $r = +15$  mm ในกรณี Sr0 ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนมากที่สุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u = 7.5$  m/s,  $\rho = 1.06$  kg/m<sup>3</sup> แทนในสมการ ค.2 จะได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{0.65 Pa}{1.06 kg/m^3 \times 7.5 m/s}\right)^2} \approx 0.08 \text{ m/s}$$

ความไม่แน่นอนของค่าความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe มีค่าประมาณ  $\pm 0.1 \text{ m/s}$

### ค.1.2 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe

การคำนวณค่าความเร็วจาก Yaw Probe ได้ทำการปรับเทียบเพื่อหา Calibration Function ตามความสัมพันธ์

$$K_{12} = K_1 - K_2 = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P} \quad (\text{ค.3})$$

$$K_{32} = K_3 - K_2 = \frac{P_3 - P_2}{\Delta P} \quad (\text{ค.4})$$

$$K_0 = \frac{(K_3 - K_2)}{(K_1 - K_2)} = \frac{(P_3 - P_2)}{(P_1 - P_2)} \quad (\text{ค.5})$$

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

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของค่า Calibration Function ในการปรับเทียบเครื่องมือเป็น

$$\omega_{K_0} = \sqrt{\left[\frac{\omega_{P_3 - P_2}}{(P_1 - P_2)}\right]^2 + \left[\frac{(P_3 - P_2)\omega_{P_1 - P_2}}{(P_1 - P_2)^2}\right]^2} \quad (\text{ค.6})$$

และจากความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_0$  และ  $\alpha$  ในหัวข้อ ข.2 และรูปที่ ข.2 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $\alpha$  ตามความสัมพันธ์

$$\delta_\alpha = \frac{d\alpha}{dK_0} \delta_{K_0} \quad (\text{ค.7})$$

และจากความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  กับ  $\alpha$  ในหัวข้อ ข.3 และรูปที่ ข.3 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ตามความสัมพันธ์

$$\delta_{K_{12}} = \frac{dK_{12}}{d\alpha} \delta_\alpha \quad (\text{ค.8})$$

$$\delta_{K_{32}} = \frac{dK_{32}}{d\alpha} \delta_\alpha \quad (\text{ค.9})$$

สำหรับการคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(K_{12})}} \quad \text{หรือ} \quad V = \sqrt{\frac{2(P_3 - P_2)}{\rho(K_{32})}} \quad (\text{ค.10})$$

ซึ่งได้ความไม่แน่นอนของค่าความเร็วเป็น

$$\delta_V = \sqrt{\frac{(\delta_{P_1 - P_2})^2}{2\rho(P_1 - P_2)(K_{12})} + \frac{(P_1 - P_2)(\delta_{K_{12}})^2}{2\rho(K_{12})^3}} \quad (\text{ค.11})$$

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

$$u = V \cos \alpha \quad (\text{ค.12})$$

$$w = V \sin \alpha \quad (\text{ค.13})$$

และสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกน  $\delta_u$  และความเร็วตามแนวสัมผัส  $\delta_w$  ได้จาก

$$\delta_u = \sqrt{[(\cos \alpha)(\omega_V)]^2 + [(V \sin \alpha)(\omega_\alpha)]^2} \quad (\text{ค.14})$$

$$\delta_w = \sqrt{[(\sin \alpha)(\omega_V)]^2 + [(V \cos \alpha)(\omega_\alpha)]^2} \quad (\text{ค.15})$$

โดยในแต่ละจุดที่ปากเจ็ทนั้น มีค่าความไม่แน่นอนของความเร็วแตกต่างกัน ตามการกระจายของ Calibration curve ซึ่งในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณ โดยเลือกเป็นตำแหน่ง  $z' = 7.5 \text{ mm}$  ที่ปากเจ็ท ในกรณี Sr52 โดยมีค่าความดัน  $P_1 - P_2 = -1.87 \text{ mmWG}$ ,  $P_3 - P_2 = -5.9 \text{ mmWG}$  ซึ่งจากการคำนวณในภาคผนวก ข. จะได้  $K_0 = 2.98$ ,  $\alpha = -14.5$  องศา,  $K_{12} = -0.41$ ,  $V = 10.6$ ,  $u = 8.6$  และ  $w = -1.9$  ตามลำดับ โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดความดัน ซึ่งพิจารณาจากค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องมือวัดประมาณ

$$\delta_{P_1 - P_2} = \delta_{P_3 - P_2} = 0.24 \text{ mmWG}$$

และจากสมการ ค.6 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $K_0 (\delta_{K_0})$  ประมาณ 0.2 และจากสมการ ค.7 และ Calibration curve ดังรูป ข.2 จะได้  $\delta_\alpha$  ประมาณ 0.15 องศา และจากสมการ ค.8 และ Calibration curve ดังรูป ข.3 จะได้  $\delta_{K_{12}}$  ประมาณ 0.02 และจากสมการ ค.11 จะได้  $\delta_V$  ประมาณ 0.25 และจากสมการ ค.14-ค.15 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของความเร็วในแนวแกนและแนวสัมผัสประมาณ 0.8 และ 1.9 m/s ตามลำดับ

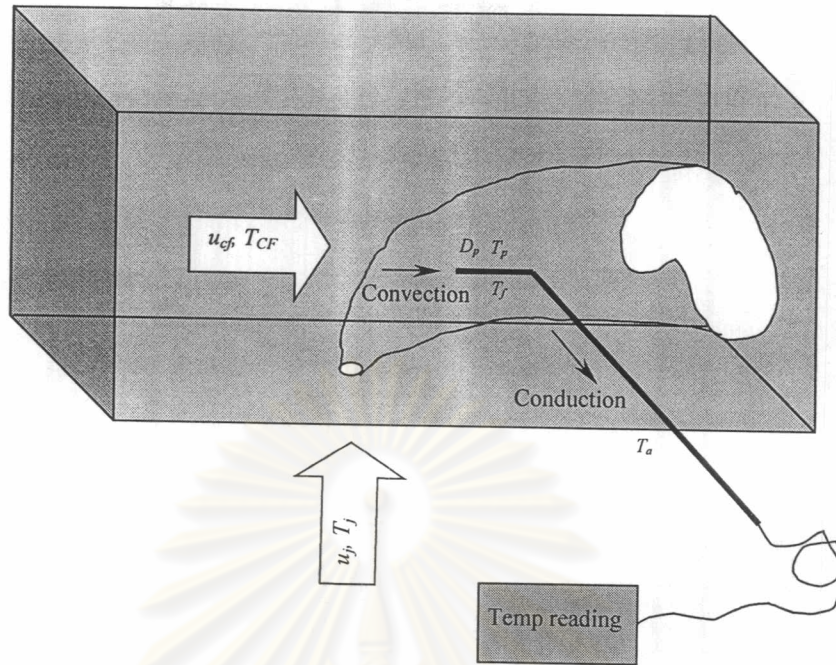
อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากวิธีการประมาณ โดยการนำค่าความไม่แน่นอนในแต่ละส่วนมาบวกกันเสมอ ทั้งนี้จากการตรวจสอบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วย Pitot probe ในกรณีของความเร็วในแนวแกน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

## ค.2 ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิ

ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิในที่นี้จะพิจารณาจากความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดซึ่งประกอบด้วย Sensor คือลวด Thermocouple Type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ที่มีช่วงของการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $-270$  ถึง  $400$  องศาเซลเซียส และที่มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) ประมาณ  $0.3$  °C ในช่วงที่ทำการทดลอง และตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ  $0.1$  °C โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดนี้ถูกจำกัดโดยลวด Thermocouple ซึ่งมีค่าประมาณ  $0.5$  °C

การวัดอุณหภูมิสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการวัดอุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่มีความเร็วทำให้อาจจะได้รับผลของการพา (Convection) ทำให้อุณหภูมิที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อน โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงผลของการพาดังกล่าวด้วยแบบจำลอง (model) ดังรูปที่ ค.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.1 แบบจำลองในการพิจารณาผลของการพา (Convection) ที่มีต่อการวัดอุณหภูมิ

สำหรับแบบจำลองในการพิจารณาผลของการพาที่มีต่อการวัดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ ค.1 โดยที่  $T_f$  คืออุณหภูมิของอากาศที่ต้องการวัด,  $T_p$  คืออุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple และโดยจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน และสมมติฐานที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากลวด Thermocouple สู่อากาศ ทำให้กระบวนการในการถ่ายเทความร้อนในการวัดอุณหภูมินี้ เป็นผลจากการพาความร้อนของอากาศ (Convection) และการนำความร้อนของลวด Thermocouple เท่านั้น ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 q_{conv} &= q_{cond} \\
 hAdT &= kA \frac{dT}{dx} \\
 hA(T_f - T_p) &= \frac{kA}{L}(T_p - T_a) \\
 \frac{T_f - T_p}{T_p - T_a} &= \frac{k}{hL} = \left(\frac{k}{hD}\right)\left(\frac{D}{L}\right) \\
 \therefore \frac{T_f - T_p}{T_p - T_a} &= \frac{1}{Nu}\left(\frac{D}{L}\right) \quad (ค.16)
 \end{aligned}$$



โดย  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปลาย Thermocouple มีค่าประมาณ 1 mm,  $L$  คือความยาวของ Thermocouple มีค่าประมาณ 1 m และ  $Nu$  คือค่า Nusselt number ซึ่งประมาณจากความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนผ่านรูทรงกลม (Sphere) จาก White (1991) ตามสมการ

$$Nu_{m,sphere} \approx 2.0 + 0.3Pr^{1/3} Re^{3/5} \quad (ค.17)$$

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

$$\text{ที่ } u_j = 9.36 \text{ m/s, } T_j = 77.8^\circ\text{C}; \quad (Re)_{D_p} = \frac{u_j D_p}{\nu_a} = \frac{(9.36 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(2.18 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 370$$

$$\text{ที่ } u_{cf} = 2.18 \text{ m/s, } T_j = 29.6^\circ\text{C}; \quad (Re)_{D_p} = \frac{u_{cf} D_p}{\nu_a} = \frac{(2.18 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(1.72 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 109$$

แทนในสมการ ค.17 จะได้ Nusselt number เฉลี่ยมีค่าในช่วง 2.3 ถึง 11.4 และเมื่อแทนค่าในสมการ ค.16 จะได้ค่า  $(T_f - T_p)/(T_p - T_a)$  อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 % นั่นคือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิจริงของของไหลประมาณ 0.1 - 0.5 % ของอุณหภูมิที่วัด ซึ่งมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.2 °C

## ค.2.1 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ ) นิยามโดย

$$C_{TG} = \frac{T - T_{cf}}{T_j - T_{cf}} = C_{TG}(T, T_j, T_{cf})$$

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TG}$  ( $\omega_{C_{TG}}$ ) ได้จากความสัมพันธ์

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

แทนค่า  $C_{TG}$  จะได้

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

โดยในการทดลองจะกำหนดอุณหภูมิของเจ็ทเฉลี่ย ( $T_j$ ) และอุณหภูมิของกระแสลมขวาง ( $T_{cf}$ ) ให้คงที่ประมาณ  $77.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $29.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิที่ทดลองอยู่ในช่วงตั้งแต่  $29-63\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยค่าความไม่แน่นอนของ  $T$ ,  $T_j$  และ  $T_{cf}$  ประมาณได้จากค่าความถูกต้องของ Thermocouple จากความถูกต้องของเครื่องมือวัดและผลของการพา (Convection) ดังกล่าว ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  นั่นคือ

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

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TG}$  ( $\omega_{C_{TG}}$ ) ในการทดลองอยู่ในช่วง  $0.01-0.03$  โดยงานวิจัยนี้จะระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\omega_{C_{TG}}$  สูงสุดไม่เกิน  $0.05$

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

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด ( $C_{TL}$ ) นิยามโดย

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

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

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

โดยในการทดลองจะมีอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละหน้าตัด ( $T_{max}$ ) แตกต่างกันไปคืออยู่ในช่วงประมาณ  $39-63\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยอุณหภูมิของกระแสลมขวาง ( $T_{cf}$ ) มีค่าประมาณ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิที่ทดลองอยู่ในช่วงตั้งแต่  $29 - 63\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยค่าความไม่แน่นอนของ  $T$ ,  $T_{max}$  และ  $T_{cf}$  ประมาณได้จากค่าความถูกต้องของ Thermocouple ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  นั่นคือ

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

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TL}$  ( $\delta_{C_{TL}}$ ) ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.04-0.24 โดยค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมากขึ้นตามระยะทางตามแนวการไหล อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\delta_{C_{TG}}$  ประมาณ 0.2

### ค.3 ค่าความไม่แน่นอนของระยะทาง

#### การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของ Trajectory

สำหรับ Centerline Trajectory นั้นแสดงจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร โดย  $y/rd = F(y,r)$  และจาก Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $y/rd$  ได้จากความสัมพันธ์

$$\delta_{(y/rd)} = \sqrt{\left(\frac{\delta_y}{rd}\right)^2 + \left(\frac{y\delta_r}{r^2d}\right)^2} \quad (\text{ค.18})$$

โดยค่าความไม่แน่นอนของ  $\delta_y$  ประมาณจากความละเอียด (Resolution) ในการวัดซึ่งมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 16 mm แทนค่าในสมการ ค.18 จะได้  $\delta_{(y/rd)}$  มีค่าประมาณ 0.14

สำหรับ Centroid Trajectory นั้นแสดงจากตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของอุณหภูมิทั้งบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}/rd$ ) และระนาบนอน ( $\bar{z}/rd$ ) ตามแนวการไหล  $x/rd$  โดย  $\bar{y}/rd = F(\bar{y},r)$  และ  $\bar{z}/rd = G(\bar{z},r)$  และจาก Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $\bar{y}/rd$  และ  $\bar{z}/rd$  ได้จากความสัมพันธ์

$$\omega_{(\bar{y}/rd)} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\bar{y}}}{rd}\right)^2 + \left(\frac{\bar{y}\delta_r}{r^2d}\right)^2} \quad (\text{ค.19})$$

$$\delta_{(\bar{z}/rd)} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\bar{z}}}{rd}\right)^2 + \left(\frac{\bar{z}\delta_r}{r^2d}\right)^2} \quad (\text{ค.20})$$

โดย  $\bar{y}$  และ  $\bar{z}$  ข้างต้นเป็นการหาค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหน้าตัดตั้งสมการ 3.8 และ 3.9 ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาจากค่าความไม่แน่นอนในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดซึ่งมีค่าประมาณ  $\delta_{\bar{y}} = \delta_{\bar{z}} = 5$  แทนค่าในสมการ ค.20 และ ค.21 จะได้  $\delta_{(\bar{y}/rd)}$  และ  $\delta_{(\bar{z}/rd)}$  มีค่าประมาณ 0.07

## ภาคผนวก ง.

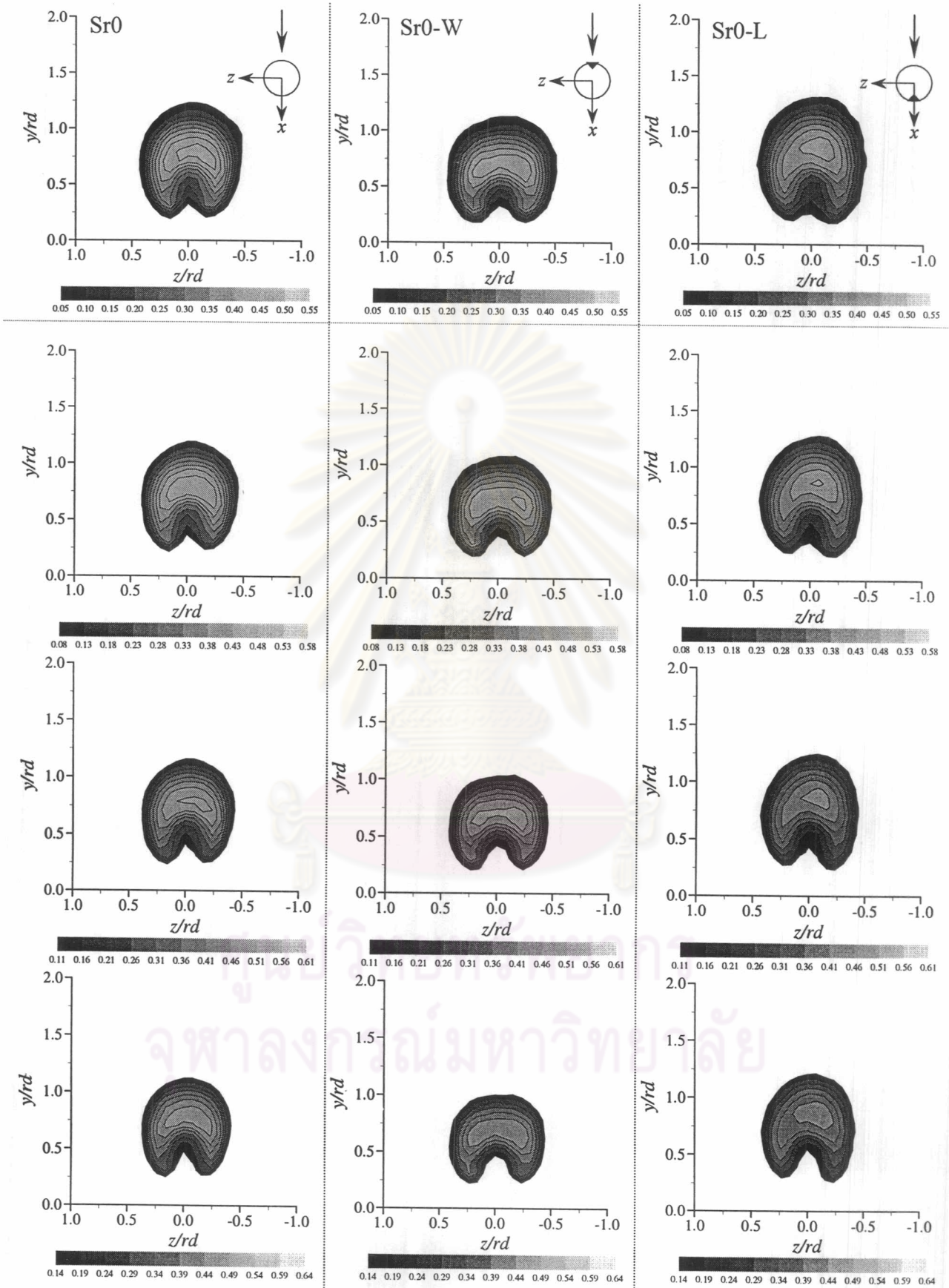
### การทดสอบเปลี่ยนระดับค่า Contour ของ $C_{TG}$

เนื่องมาจากการแบ่งระดับค่า  $C_{TG}$  เพื่อนำมาแสดงผลในรูปของ Contour นั้นเป็นการแบ่งช่วงตามค่า Uncertainty ของ  $C_{TG}$  ซึ่งมีค่าประมาณ 0.05 โดยถือว่าที่ค่านี้เป็น Resolution ในการแสดงผล แต่ในการกำหนดค่าเริ่มต้นต่ำสุดนั้นได้ถูกกำหนดขึ้นมาที่ 0.05 ซึ่งค่าต่ำสุดนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยจะทำให้ระดับค่า  $C_{TG}$  ในการแสดงผลในรูปของ Contour เปลี่ยนแปลงตาม ส่งผลให้การแปลความหมายทางกายภาพของโครงสร้างการไหลของเจ็ทแตกต่างกัน ขึ้นอยู่รูปแบบของ Contour

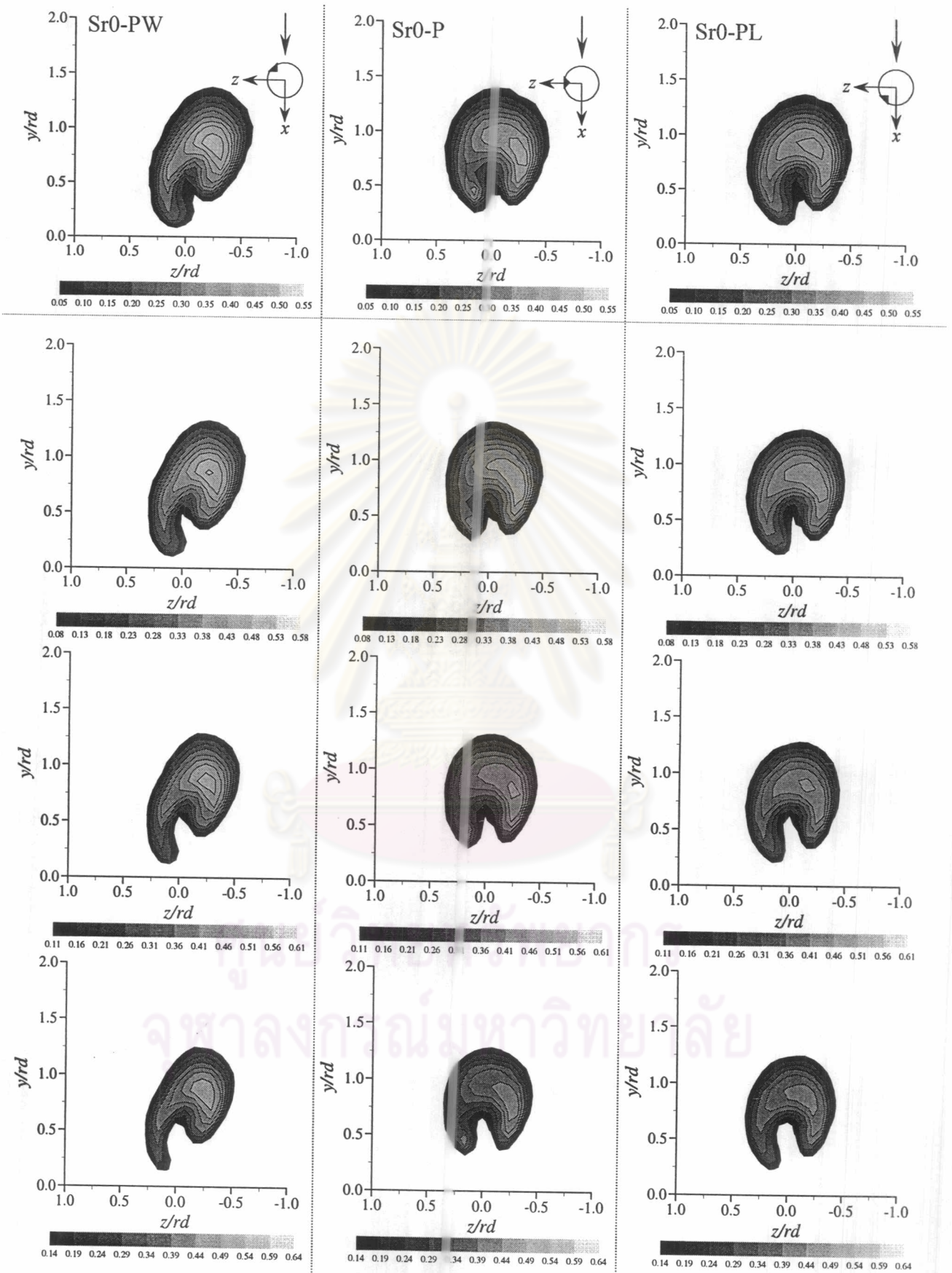
ดังนั้นเพื่อเป็นการแสดงความชัดเจนในการแปลความหมายผลการทดลองจากรูป Contour ของ  $C_{TG}$  จึงได้ทดสอบเปลี่ยนระดับค่าเริ่มต้นของ Contour ไปเป็นค่าที่สูงกว่า 0.05 คือเปลี่ยนไปเป็นค่า 0.08, 0.11 และ 0.14 ตามลำดับ ทั้งนี้จะทดสอบเปลี่ยนระดับค่าดังกล่าวเฉพาะในหน้าตัดแรกซึ่งอาจจะมีผลผิดพลาดในการแสดงผลได้มากที่สุด เนื่องจากที่หน้าตัดนี้มี Gradient ของ  $C_{TG}$  ที่สูงสุด

จากผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ ง.1-ง.5 สำหรับกรณีที่เจ็ทไม่หมุนควงและหมุนควงเมื่อไม่ติดและติด Tab ที่ตำแหน่งต่างๆ ในหน้าตัดแรก  $x/r_d = 0.25$  พบว่าลักษณะรูปร่างของโครงสร้างการไหลของเจ็ทในกรณีเดียวกันคล้ายกัน ในทุกกรณีการทดลอง โดยไม่ขึ้นกับการกำหนดระดับค่าเริ่มต้น

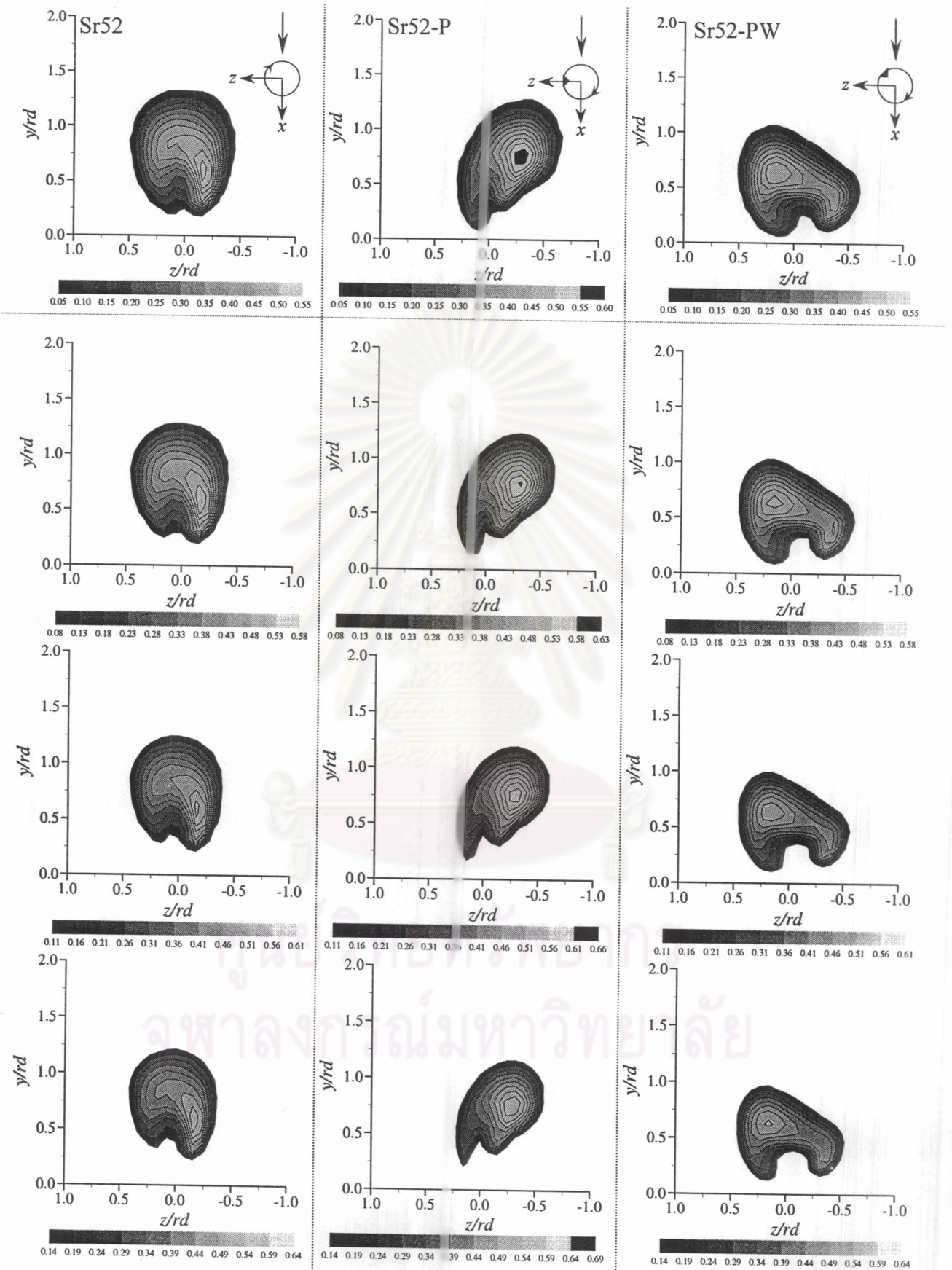
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



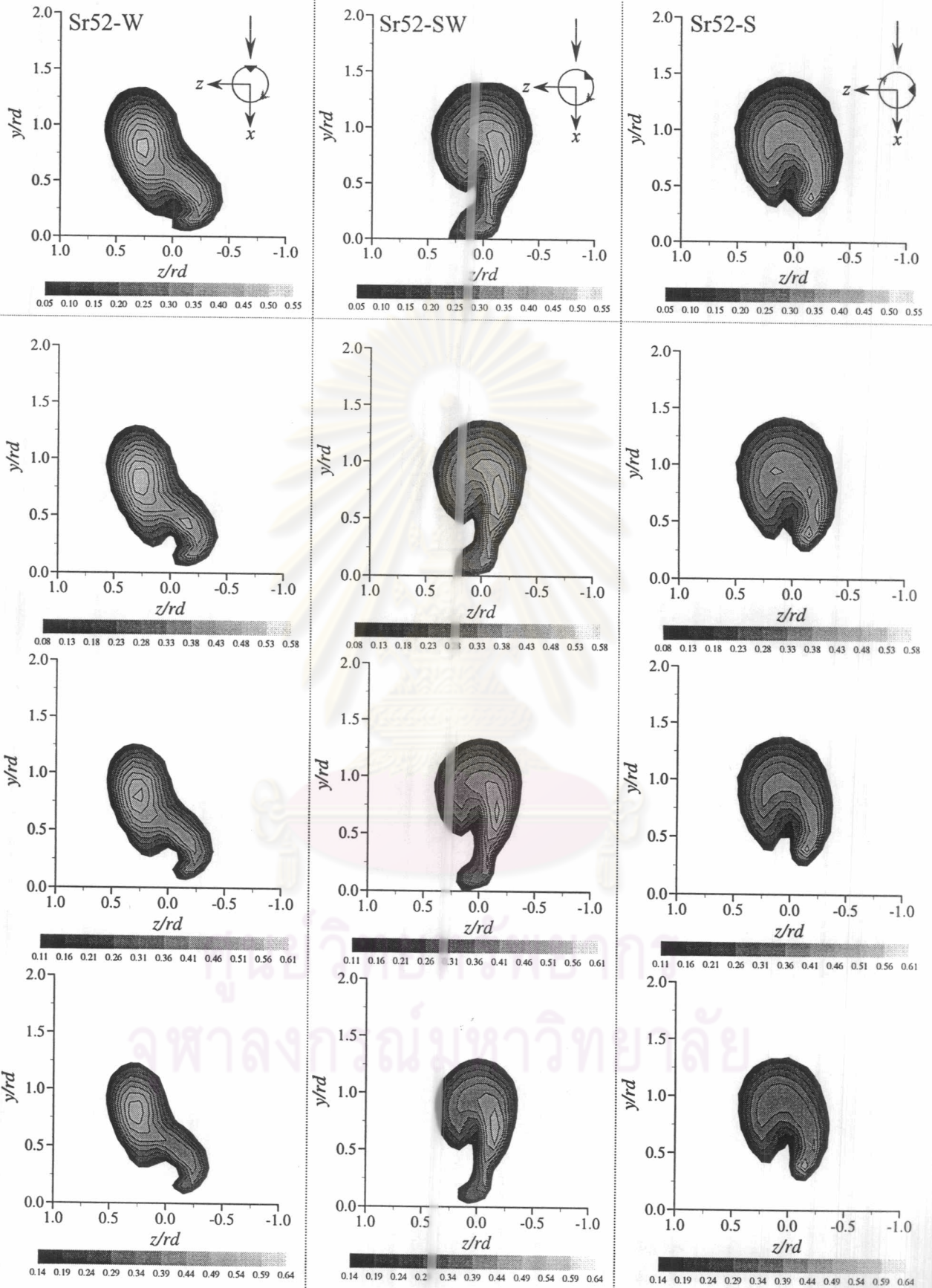
รูปที่ ง.1 แสดงการแบ่งระดับค่า Contour ของ  $C_{TG}$  แบบต่างๆ โดยมีค่าเริ่มต้นต่ำสุดที่ 0.05, 0.08, 0.11 และ 0.14 ตามลำดับ ที่ Resolution เท่ากับ 0.05 สำหรับกรณี Sr0, Sr0-W และ Sr0-L ( $x/rd = 0.25$ )



รูปที่ ๒.๒ แสดงการแบ่งระดับค่า Contour ของ  $C_{TG}$  แบบต่างๆ โดยมีค่าเริ่มต้นต่ำสุดที่ 0.05, 0.08, 0.11 และ 0.14 ตามลำดับ ที่ Resolution เท่ากับ 0.05 สำหรับกรณี SrO-PW, SrO-P และ SrO-PL ( $x/rd = 0.25$ )

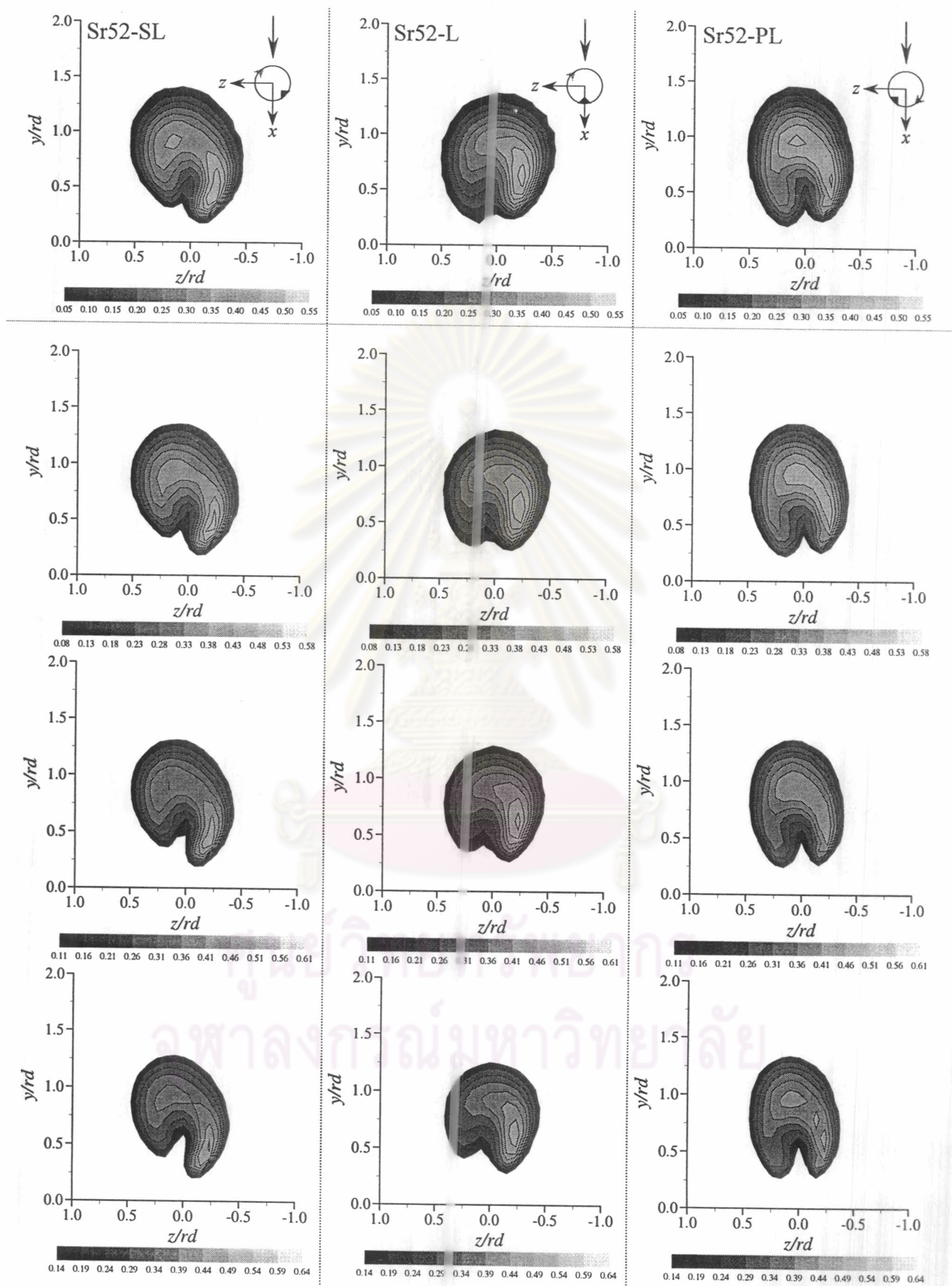


รูปที่ ง.3 แสดงการแบ่งระดับค่า Contour ของ  $C_{TG}$  แบบต่างๆ โดยมีค่าเริ่มต้นต่ำสุดที่ 0.05, 0.08, 0.11 และ 0.14 ตามลำดับ ที่ Resolution เท่ากับ 0.05 สำหรับกรณี Sr52, Sr52-P และ Sr0-PW ( $x/rd = 0.25$ )



รูปที่ ๔.๔ แสดงการแบ่งระดับค่า Contour ของ  $C_{TG}$  แบบต่างๆ โดยมีค่าเริ่มต้นต่ำสุดที่ 0.05, 0.08, 0.11 และ 0.14 ตามลำดับ ที่ Resolution เท่ากับ 0.05 สำหรับกรณี Sr52-W, Sr52-SW และ Sr52-S ( $x/rd = 0.25$ )





รูปที่ 5 แสดงการแบ่งระดับค่า Contour ของ  $C_{TG}$  แบบต่างๆ โดยมีค่าเริ่มต้นต่ำสุดที่ 0.05, 0.08, 0.11 และ 0.14 ตามลำดับ ที่ Resolution เท่ากับ 0.05 สำหรับกรณี Sr52-SL, Sr0-L และ Sr0-PL ( $x/rd = 0.25$ )

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สิทธิพงศ์ สถาพรนานนท์ เกิดวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย