บทที่ 4

เครื่องมือวัดอัตราการไหล

เครื่องมือวัดอัตราการไหลจะพิจารณาถึงเพียง 3 ชนิดคือ ออริฟิช (ORIFICE) หัวฉีด (NOZZLE) และท่อเวนจูรี (VENTURI TUBE) ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดของออริฟิชมากที่สุด เนื่องจากเป็นพื้นฐานที่ง่าย และระบบการทดสอบเลือกใช้ออริฟิชในการวัดอัตราการไหล ส่วนหัวฉีด และเวนจูรีบางส่วนของรายละเอียดคล้ายกับออริฟิชมาก ดังนั้นจะไม่กล่าวในรายละเอียดแต่จะให้ไว้เฉพาะข้อมูลทั่ว ๆ ไปเท่านั้น

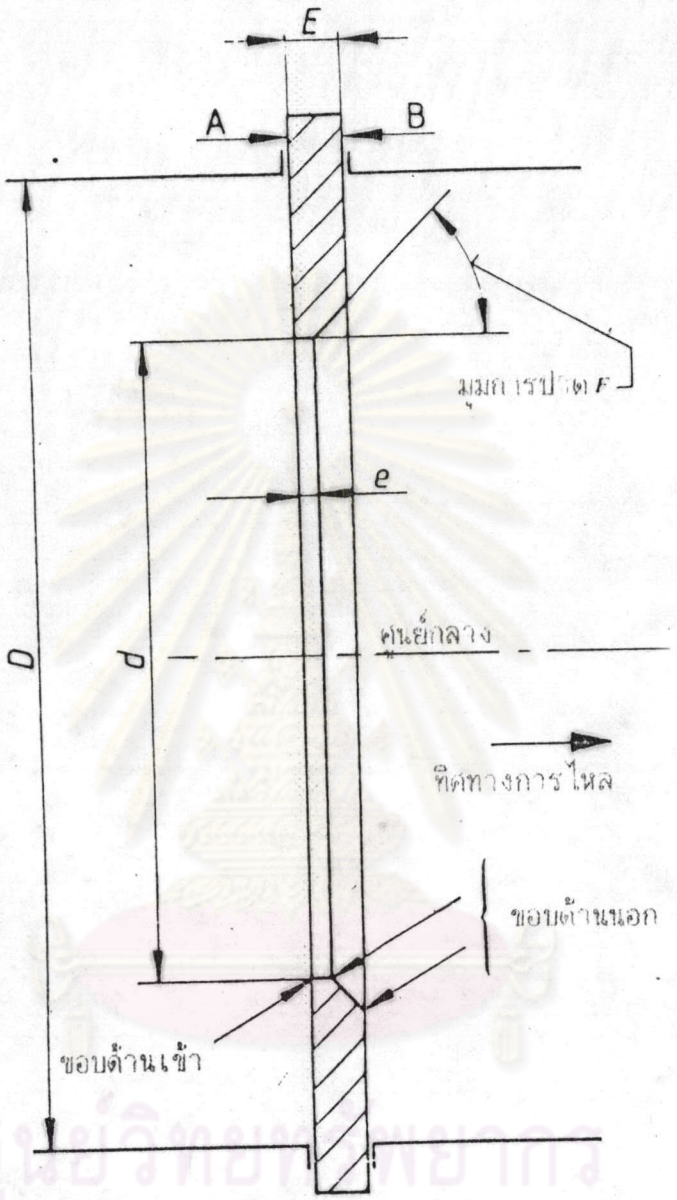
4.1 แผ่นออริฟิช (ORIFICE PLATE)

4.1.1 ลักษณะทั่วไป ออริฟิชวัดอัตราการไหลมีหลายแบบของจุดวัดความดันแต่ทุก ๆ แบบจะใช้แผ่น (PLATE) ที่มีลักษณะการออกแบบเหมือนกันทั้งสิ้น รายละเอียดต่อไปนี้จะเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด (2) ลักษณะรูปร่างจะเป็นแผ่นบางมีรูเจาะวงกลมตรงกลางแผ่นร่วมศูนย์กลางกับแผ่นกลมตามรูปที่ 2 ค่าระยะต่าง ๆ ตามรูปจะใช้ในการอ้างอิงในครั้งต่อ ๆ ไปรูเจาะนั้นเมื่อติดตั้งกับท่อ จะต้องร่วมศูนย์กลางกันพอดี ผิวหน้าทั้งสองด้านจะต้องแบนราบเรียบ และขนานกัน ในการออกแบบจะต้องคำนึงความแข็งแรง ซึ่งอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงให้เสียรูปเดิมเนื่องจากความดันแตกต่าง อุณหภูมิแตกต่าง ทำให้เกิดความเค้นซึ่งอาจเป็นผลให้เกิดการโก่งตัวเสียความแบนราบเกินขอบเขตกำหนดได้ รายละเอียดของแผ่นที่สำคัญมีดังนี้

a. ผิวหน้าด้านบน (UPSTREAM FACE) ความแบนราบพิจารณาจากเส้นตรงที่ต่อจากจุดใด ๆ บนผิวหน้าสองจุด และไม่ต้องคำนึงถึงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเฉพาะจุดที่ตรวจดูด้วยตาเปล่าไม่เห็น ความขรุขระผิว (R_a) ควรมีค่าไม่เกิน $10^{-4}d$ ภายในบริเวณของวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5d และร่วมศูนย์กลางกับออริฟิช ควรมีการทำเครื่องหมายบอกทิศทางการไหลขณะทำการวัด จะได้สะดวกต่อการใช้งานที่ถูกต้อง

b. ผิวหน้าด้านล่าง (DOWNSTREAM FACE) จะต้องแบนราบเรียบ และขนานกับผิวด้านบน ความละเอียดผิวหน้าจะต้องขัดให้มีคุณภาพเดียวกันกับผิวด้านบน สภาพผิวตรวจสอบด้วยสายตาเปล่า

c. ขนาดของส่วนต่าง ๆ ความหนาของออริฟิช (e) มีค่า $0.005D \leq e \leq 0.02D$ ค่า e ที่วัดจากจุดใด ๆ บนขอบของแผ่นออริฟิช จะต้องมีความแตกต่างกันไม่เกิน $0.001D$ ความหนาของตัวแผ่น (E) มีค่าอยู่ระหว่าง $e \leq E \leq 0.05D$ ความแตกต่างของค่า E ที่จุด



รูปที่ 2 มาตรฐานของแผ่นออริฟิซ

ใด ๆ จะต้องไม่เกิน 0.001D มุมของการปาดขอบเมื่อค่า e < E จะต้องมีการปาดที่ขอบทางออก (ด้านล่าง) และตบแต่งรอยปาดเป็นอย่างดีมุมของการปาด (F) มีค่าระหว่าง 30 ถึง 45 องศา ขอบทางเข้า (G) จะต้องเป็นมุมฉากคมมีรัศมีขอบไม่เกิน 0.0004xd ถ้า d ≥ 12.5 มิลลิเมตร เมื่อทำการตรวจโดยรับแสงแล้วไม่สะท้อน เมื่อดูด้วยตาเปล่า ถ้า d < 12.5 มิลลิเมตร การตรวจดูด้วยตาเปล่าจะไม่เพียงพอเงื่อนไขที่ยอมรับได้คือ การตบแต่ง ครั้งสุดท้าย

ด้วยการกลึงปาดในแนวรัศมีอย่างละเอียดมากด้วยมีดกลึงที่คมมาก ๆ

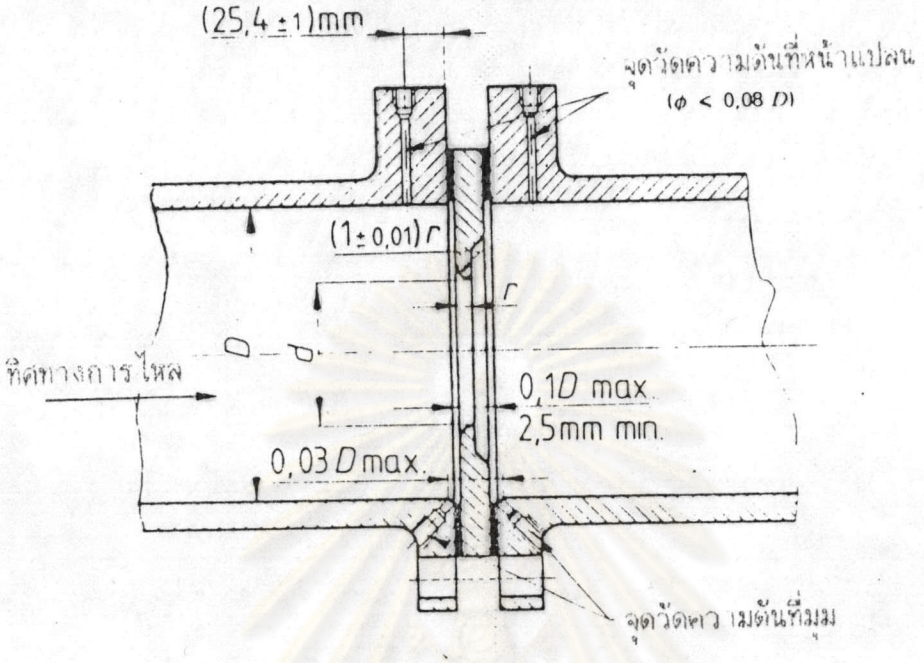
d. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิซ (d) จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 12.5 มิลลิเมตร ค่าอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (β) มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.20 หรือ 0.23 และไม่เกิน 0.75 หรือ 0.80 ขึ้นอยู่กับชนิด(แบบ)ของแผ่นออริฟิซ ว่าใช้จุดวัดความดันแบบใด ค่า β ของอุปกรณ์จะถูกกำหนดโดย ค่าอัตราการไหล ความแตกต่าง และขนาดท่อ จากค่า β ที่ได้จะเป็นตัวกำหนดแบบของจุดวัดความดันที่เหมาะสม ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) ของออริฟิซจะต้องเป็นค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตที่ได้จากการวัดที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่จุดใด ๆ ควรจะมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยนี้ไม่เกิน 0.05 เปอร์เซนต์ ในการตรวจจริงอาจจะใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ในตำแหน่งต่าง ๆ โดยตรงไม่จำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยก็ได้ ออริฟิซที่มีลักษณะขอบและจุดวัดความดันที่เหมือนกันทั้งสองด้าน จะสามารถใช้วัดอัตราการไหลได้ทั้งสองทิศทางการไหล วัสดุที่ใช้ทำออริฟิซนี้เลือกได้หลายชนิดที่สำคัญ คือ ต้องผลิตให้ได้รูปร่าง และรายละเอียดตามกำหนด รวมทั้งรักษาสภาพนั้นอยู่ได้ตลอดช่วงการใช้งานก็เพียงพอ

4.1.2 จุดสำหรับวัดความดัน (PRESSURE TAPPING) อุปกรณ์ขั้นต้นจะต้องมีรูเจาะวัดความดันทั้งด้านทางเข้าและทางออกอย่างน้อยด้านละ 1 จุด แต่ถ้าให้การสมดุลย์ดีขึ้นแล้วควรใช้ด้านละไม่ต่ำกว่า 3 รูเจาะ ตำแหน่งของการเจาะรูมีหลาย ๆ แบบที่แตกต่างกันซึ่งใช้ได้กับแผ่นออริฟิซอันเดียวกัน การเจาะต้องคำนึงถึงการรบกวนจากอุปกรณ์อื่น ๆ และอาจจะไปรบกวนการวัดอื่น ๆ ได้

a. รูปร่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และตำแหน่งมุมของรูเจาะวัดความดันที่ไม่ใช่แบบรูเจาะที่มุม (CORNER TAPPING) เส้นแกนของรูเจาะจะต้องไปตัดกับเส้นแกนของท่อเป็นมุมฉาก รูเจาะจะต้องเป็นวงกลมขอบรูด้านในเรียบพอดีกับผิวภายในของท่อ และเป็นมุมคมที่สุด โดยตรงขอบนี้จะต้องไม่โค้งมน ถ้าจำเป็นจะต้องให้ความโค้งที่เกิดขึ้นเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ถ้าสามารถวัดได้จะต้องมีค่าไม่เกิน 1/10 ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูเจาะ เมื่อตรวจดูด้วยตาเปล่าไม่ควรพบสิ่งผิดปรกติภายในรูเจาะ ขอบของรูเจาะ และที่ผิวของผนังภายในท่อใกล้กับรูเจาะ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ ควรมีค่าไม่เกิน 8 เปอร์เซนต์ ของค่า D และไม่เกิน 12 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางจะต้องมีค่าคงที่เป็นรูปทรงกระบอกในระยะอย่างน้อย 2.5 เท่าของขนาดรูเจาะ โดยวัดจากผิวภายในของท่อออกมา ภายในรูเจาะต้องสะอาดปราศจากสิ่งใดๆที่อาจจะก่อให้เกิดการอุดตันขึ้น รูเจาะทั้งทางเข้าและทางออกควรมีขนาดเท่ากันทุกๆส่วน ค่าความดันแตกต่างที่อ่านจะต้องรวมผลของความแตกต่างของระดับอ้างอิง และระดับของจุดวัดความดันเหล่านี้ด้วย

b. ระยะของการเจาะรูวัดความดัน ระยะนี้จะวัดจากแกนของรูเจาะไปถึงด้านหนึ่งของผิวแผ่นออริฟิซ ซึ่งจะรวมเอาความหนาปะเก็นที่รอยต่อไว้ด้วย ค่าระยะนี้แสดงตามรูปที่ 2

- แบบรูเจาะ D และ D/2 ระยะรูเจาะวัดความดันด้านทางเข้า (l_1) ปรกติมี



รูปที่ 3 จุดวัดความดันของออริฟิซ

สำหรับทุกๆค่าอัตราส่วน β เมื่อใช้กับ

ของไหลสะอาดใช้	1.0 ม.ม. ≤ a ≤ 10 ม.ม.
ไอน้ำจุดวัดเป็นร่องวงแหวน	1.0 ม.ม. ≤ a ≤ 10 ม.ม.
ไอน้ำ และ แก๊สเหลวใช้รูเจาะเดี่ยว	1.0 ม.ม. ≤ a ≤ 10 ม.ม.

กรณีของร่องแหวน (ANNULAR SLOT) ที่ตัดผ่านผนังท่อไม่รอบตัว จะต้องมีร่องยาวนี้อย่างน้อย 4 ช่อง ที่ต่อจากภายในท่อไปสู่ห้องวงแหวน โดยแต่ละช่วงต้องมีขนาดเดียวกัน มีพื้นที่ช่องละ 12 ตารางมิลลิเมตรเป็นอย่างน้อย ถ้าจุดวัดความดันเป็นรูเจาะเส้นแกนรูเจาะจะต้องตัดกับเส้นผ่าศูนย์กลางท่อใกล้เคียงกับมุมฉากมากที่สุด หากใช้รูเจาะหลาย ๆ รูบนระนาบเดียวกันทุก ๆ รูเจาะมีลักษณะทรงกระบอกยาว 2.5 เท่าของความโตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (b) ของร่องแหวนวัดความดัน ควรมีค่าโตกว่าท่อทางเข้า (D) เพื่อป้องกันส่วนใด ๆ ยื่นเข้าขวางการไหลและเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\frac{b-D}{D} \times \frac{c}{D} \times 100 \leq \frac{1}{0.1+2.3\beta^4}$$

ค่าระบุเท่ากับ D แต่อาจจะมีตั้งแต่ 0.9 D ถึง 1.1 D หรือ ±10 เปอร์เซนต์ โดยไม่ต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์การไหล (α) ระยะรูเจาะทางด้านออกจะมีค่าระบุเท่ากับ 0.5xD แต่อาจจะมีค่าจริงดังนี้ โดยไม่ต้องทำการปรับสัมประสิทธิ์การไหล (α)

เมื่อ

$$\beta \leq 0.6 \quad ; \quad 0.48D \leq l_2 \leq 0.52D$$

$$\beta > 0.6 \quad ; \quad 0.49D \leq l_2 \leq 0.51D$$

ระยะ l_1 จะวัดอ้างอิงจากระนาบของผิวหน้าทางเข้าของออริฟิซ

- แบบรูเจาะที่หน้าแปลน (FLANGE TAPPING) รูเจาะนี้ใกล้ออริฟิซ การใช้หน้าแปลนหนาจึงทำให้เหมาะสมระยะ l_1 ของรูเจาะวัดความดันทางเข้า มีค่าระบุ 25.4 มิลลิเมตร วัดจากระนาบผิวด้านบนของออริฟิซ ระยะ l'_2 ของรูเจาะวัดความดันวัดจากผิวด้านล่างของออริฟิซ แต่ค่าระยะ l_1 และ l'_2 จะใช้ค่าจริงต่อไปนี้ได้ภายใต้เงื่อนไข โดยไม่ต้องทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลเมื่อ

$\beta > 0.6$ และ 50 ม.ม. $\leq D \leq$ 58 ม.ม.

ใช้ค่า 25.4 ± 1.0 ม.ม.

$\beta > 0.6$ และ 58 ม.ม. $\leq D \leq$ 150 ม.ม.

ใช้ค่า 25.4 ± 0.5 ม.ม.

$\beta > 0.6$ และ 150 ม.ม. $\leq D \leq$ 760 ม.ม.

ใช้ค่า 25.4 ± 1.0 ม.ม.

$\beta \leq 0.6$ สำหรับทุกๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(D)

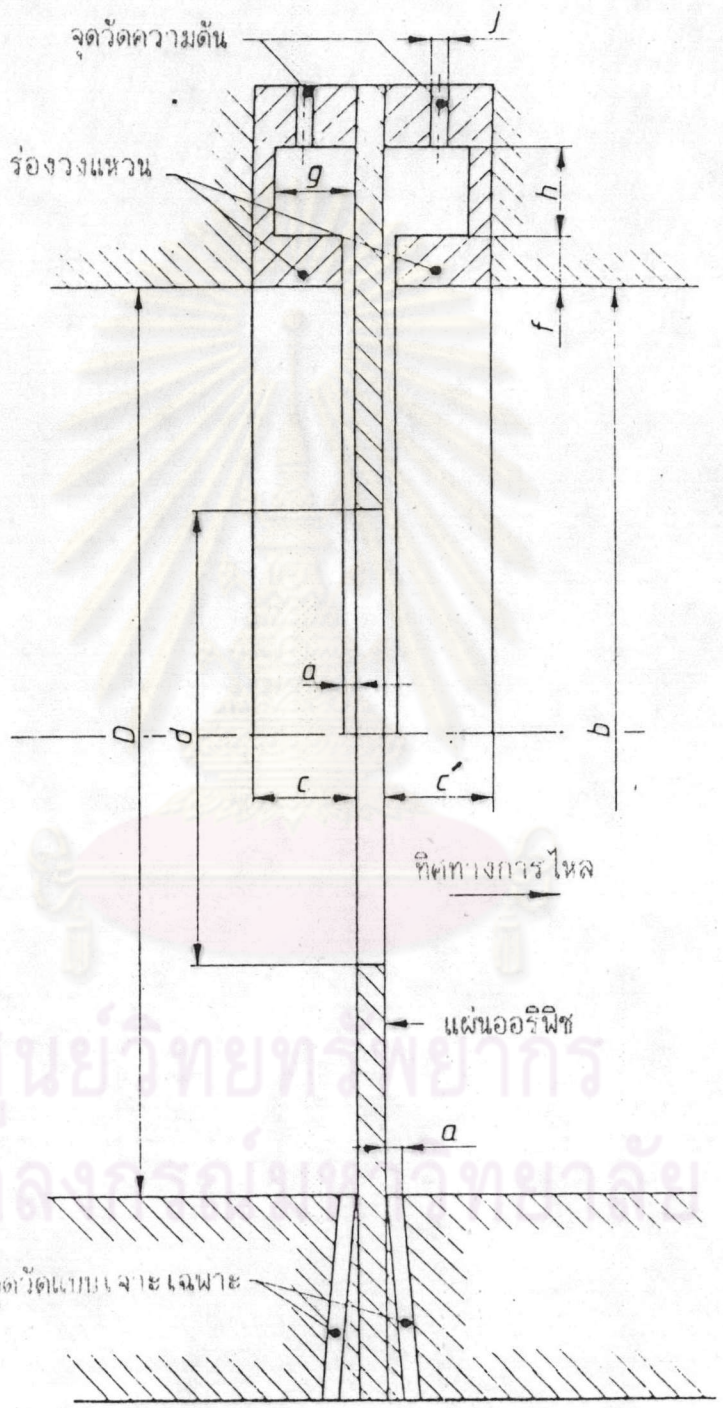
ใช้ค่า 25.4 ± 1.0 ม.ม.

c. แบบรูเจาะวัดความดันที่มุม (CORNER TAPPING) มีสองลักษณะการสร้าง คือ แบบเจาะรูที่ผนังท่อ และแบบตัดผนังท่อเป็นร่องยาวรอบตัว และมีวงแหวนสมดุลย์ความดัน (CARRIERRING WITH BALANCE CHAMBER) ระยะระหว่างแกนรูเจาะกับผิวหน้าของแผ่นออริฟิซด้านนั้น ๆ มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ หรือก็คือขอบของรูเจาะจะชิดกับผิวหน้าแผ่นออริฟิซพอดี รูเจาะอาจจะเป็นรูเดียวหลายรู หรือร่องวงแหวน ขึ้นกับความต้องการความละเอียด และความเสถียรของค่าความดัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะหรือความกว้างร่องวงแหวน(a)จะมีค่ากำหนดสำหรับงานที่แตกต่างกันดังนี้

สำหรับการวัดของไหลสะอาด และไอน้ำ

$\beta \leq 0.65$ ใช้ค่า $0.005\ D \leq a \leq 0.03\ D$

$\beta > 0.65$ ใช้ค่า $0.010\ D \leq a \leq 0.02\ D$



รูปที่ 4 จุดวัดความดันที่มุม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อค่าความยาว c และ c' ของวงแหวนมีค่าไม่เกิน 0.5D และ b มีค่าจำกัด $D \leq b \leq 1.04D$ ความหนาของร่อง (f) มีค่าไม่ต่ำกว่า 2 เท่าของความกว้างร่อง (a) พื้นที่ภาคตัดของวงแหวน (gh) มีค่ามากกว่า ครึ่งหนึ่งของพื้นที่ช่องเปิดร่องวงแหวน (πba) ท่อที่ต่อจากรูเจาะวัดความดัน หรือจากห้องสมดุลย์ความดันไปยังอุปกรณ์ขั้นที่สอง จะต้องเป็นท่อกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (J) ขนาด 4 มิลลิเมตร ขนาดของวงแหวนวัดความดันที่ทางเข้า และทางออกไม่จำเป็นจะต้องเท่ากัน เพียงแต่เพื่อให้ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็เพียงพอ

4.1.3 ข้อจำกัดการใช้งาน ออริฟิซที่มีจุดวัดความดัน แตกต่างกันจะมีข้อจำกัดการใช้งานที่ต่างกันด้วยดังนี้

ตารางที่ 3 ขอบเขตการออกแบบใช้งานของออริฟิซ

ปริมาณ	จุดวัดที่มุม	จุดวัดที่หน้าแปลน	จุดวัด D , D/2
d (MM.)	≥ 12.5	≥ 12.5	≥ 12.5
D (MM.)	$50 \leq D \leq 1000$	$50 \leq D \leq 760$	$50 \leq D \leq 760$
β	$0.23 \leq \beta \leq 0.80$	$0.23 \leq \beta \leq 0.75$	$0.20 \leq \beta \leq 0.75$
R_{eD}	$5000 \leq R_{eD} \leq 10^8$ FOR $0.28 \leq \beta \leq 0.45$ $10^4 \leq R_{eD} \leq 10^8$ FOR $0.45 \leq \beta \leq 0.77$ $2\times10^4 \leq R_{eD} \leq 10^8$ FOR $0.77 \leq \beta \leq 0.88$	$1260\beta^2 D \leq R_{eD} \leq 10^8$	$260\beta^2 D \leq R_{eD} \leq 10^8$

ความขรุขระผิวท่อที่ใช้ในช่องทางเข้าสู่อุปกรณ์ ควรเลือกความเรียบตามข้อกำหนด ค่าความขรุขระสูงสุดตามตารางโดยค่าความขรุขระของผิวเทียบเท่า (K) ได้จากการทดสอบตัวอย่างของท่อจริงโดยการวัดความดันสูญเสีย ค่าประมาณของ k สำหรับท่อจากวัสดุต่าง ๆ จะอ้างอิงจาก COLEBROOK FORMULAR

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

i17355771

ตารางที่ 4

ค่าความเรียบผิวสำหรับงานวัดด้วยออริฟิช

แบบ	≤0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	0.80
จุดวัดที่มุม 10^4xK/D	25	18.1	12.9	10.0	8.3	7.1	5.6	4.9	4.2	4.0	3.9
จุดวัดที่แปลน D ANA D/2	25	18.1	12.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
จุดวัดD,D/2 10xK/D											

4.1.4 สัมประสิทธิ์การจ่าย (DISCHARGE COEFFICIENT) C ค่าสัมประสิทธิ์นี้ได้จากสมการ SLOT FORMULAR

$$C = 0.5959+0.0512\beta^{2.1}-0.1840\beta^{8}+0.0029\beta^{2.5}[10^{6}/R_{_{D}}]^{0.75} +0.090L_{1}\beta^{4}(1-\beta^{4})^{-1}-0.0337L'_{2}\beta^{3} \quad \text{.....(30)}$$

ค่า $R_{_{D}}$ เป็น เรย์โนลด์ นัมเบอร์ ของท่อทางเข้าสู่อุปกรณ์ขึ้นต้น

$L_1 = l_1/D$ เป็นค่าผลหารของระยะจุดวัดความดันทางด้านเข้ากับค่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

$L'_2 = l'_2/D$ เป็นค่าผลหารของระยะจุดวัดความดันทางด้านออกกับค่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

ค่า L_1 และ L'_2 ที่ใช้ในสมการสัมประสิทธิ์การจ่าย เมื่อจุดวัดความดันเป็นแบบต่าง ๆ มีค่าดังนี้

สำหรับจุดวัดความดันที่มุม $L_1 = L'_2 = 0$

สำหรับจุดวัดความดันระยะ D และ D/2 $L_1 = 1.0$, $L'_2 = 0.47$

สำหรับจุดวัดความดันที่หน้าแปลน L_1 , $L'_2 = 25.4/D$

4.1.5 ตัวประกอบการขยายตัว (EXPANSIBILITY FACTOR) ϵ สูตรสำเร็จสำหรับหาค่า ϵ ของจุดวัดความดันทั้ง 3 แบบคือ

$$\epsilon = 1-(0.41+0.35\beta^{4})\Delta P/[kP_{1}] \quad \text{.....(31)}$$

สมการนี้ใช้ได้ตลอดช่วงการใช้งานตามข้อกำหนด และค่าอัตราส่วนความดัน $P_2/P_1 \geq 0.75$ เท่านั้นผลการทดสอบการหาค่า ϵ นี้ใช้ได้กับ อากาศ ไอน้ำ และ แก๊สธรรมชาติ ไม่ได้มีความประสงค์ที่จะใช้สมการนี้กับแก๊สชนิดอื่น ๆ ถึงแม้ว่าจะทราบค่าตัวยกกำลังของขบวนการไอเซ็นโทรปิคก็ตาม

4.1.6 ค่าความไม่แน่นอน (UNCERTAINTIES) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นขณะทำการวัดอัตราการไหลนั้นมีมากมายเนื่องจากสภาวะต่าง ๆของการวัดจริงเปลี่ยนแปลงไปจากเงื่อนไขการออกแบบ ค่าความไม่แน่นอนที่พอจะคาดเดาได้มีดังนี้

a. ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การจ่าย (C) เมื่อสมมติว่าค่า β , D , R_{eD} และ k/D มีค่าไม่ผิดพลาดเลยแล้วเปอร์เซ็นความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การจ่ายหาได้จากตารางคือ

ตารางที่ 5 ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การจ่าย (C)

β	จุดวัดที่มุม	จุดวัดที่แปลน	จุดวัด D , D/2
$\beta \leq 0.60$	0.6 %	0.6 %	0.6 %
$0.6 \leq \beta \leq 0.80$	β %	-	-
$0.6 \leq \beta \leq 0.75$	-	β %	β %

b. ความไม่แน่นอนของตัวประกอบการขยายตัว (ϵ) เมื่อกำหนดให้ค่า β , $\Delta P/P_1$ และ k ไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นแล้วค่าเปอร์เซ็นความไม่แน่นอนของค่า ϵ จะมีค่าคือ

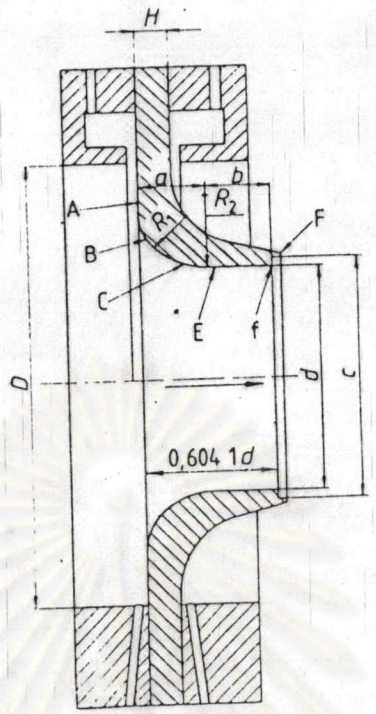
เมื่อ

$\beta \leq 0.75$ ค่า $\Delta\epsilon = \pm 4\Delta P/P_1$ %

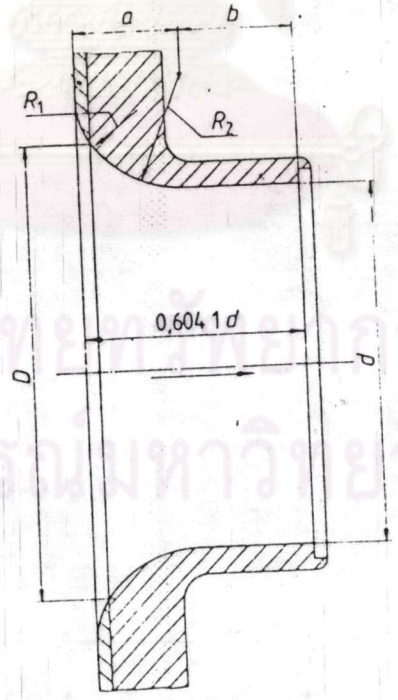
$0.75 < \beta \leq 0.80$ ค่า $\Delta\epsilon = \pm 8\Delta P/P_1$ % สำหรับจุดวัดความดันที่มุมเท่านั้น

ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย (C) และสัมประสิทธิ์การไหล (α) ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของ ,R_{eD} และ D ได้จากการคำนวณตามสมการที่ให้ไว้ตอนต้นนั้น อาจจะทำให้สะดวกต่อการใช้งานโดยคำนวณเป็นตารางไว้ แต่ในการใช้งานค่าในตารางจะมีความละเอียดถูกต้องลดลง เมื่อทำการเฉลี่ยค่าในขอบเขตตาราง (INTERPOLATION) และไม่อนุญาตให้มีการเฉลี่ยค่านอกขอบเขตของตาราง (EXTRAPOLATION)

4.1.7 ความดันสูญเสีย (PRESSURE LOSS) (Δw) ความดันสูญเสียที่ออริฟิช จะประมาณค่าได้จากความสัมพันธ์ของ Δw กับค่าความดันแตกต่าง (ΔP) โดยสมการ



$d < \frac{2}{3}D$



$d > \frac{2}{3}D$

รูปที่ 5 หัวฉีดISA - 1932

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\Delta w = \frac{1-\alpha\beta^2}{1+\alpha\beta^2}\Delta P \qquad \text{.....(32)}$$

ค่าความดันสูญเสียนี้คือ ผลต่างของความดันสถิตย์ที่ด้านบน และด้านล่าง (ทางเข้ากับทางออก) ของอุปกรณ์ขึ้นต้นโดยที่ ความดันด้านบน จะไม่คิดถึงผลที่เกิดจากการอัดกระแทก (IMPACT PRESSURE) ที่บริเวณใกล้ ๆ แผ่นออริฟิซ และที่ด้านล่างจะพิจารณาว่าการขยายตัวของกระแสการไหล จากความเร็วกลับไปเป็นความดันนั้นเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เต็มที่

4.2 หัวฉีด (NOZZLES)

4.2.1 ลักษณะทั่วไป หัวฉีดวัดอัตราการไหลจะมี 2 แบบมาตรฐานที่แตกต่างกันได้แก่ ISA 1932 กับรัศมียาว (LONG RADIUS) ซึ่งจะกล่าวถึงรวม ๆ กันไปถึงคุณสมบัติที่สำคัญ

a. แบบ ISA 1932 มีลักษณะตามรูปที่ 4 จากรูปตัดจะเห็นได้ว่า ทางเข้าตรงส่วน A จะแบนราบตั้งฉากกับเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ แต่ถ้าหากค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง (β) มากกว่า 2/3 แล้วจะไม่มีส่วน A นี้ ต่อจากส่วน A จะเป็นบริเวณที่หน้าตัดการไหลลดลง มีความโค้ง 2 รัศมีความโค้งคงที่ R_1 และ R_2 ติดต่อกันที่ส่วน B และ C ช่วงสุดท้าย E จะเป็นคอคอดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) ส่วนขอบที่ปลายสุดของคอคอดอาจจะมีการปาดเป็นร่อง F เพื่อป้องกันการเสียหายที่ปลายสุดของทรงกระบอก

b. แบบรัศมียาว (LONG RADIUS) มีลักษณะตามรูปที่ 5 เป็นภาพตัดแนวศูนย์กลางจะเห็นว่าต่างกันที่ความโค้ง ส่วน B และ C จะเป็นส่วนของวงรี แล้วต่อด้วยคอคอดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) ในแบบนี้ยังมี 2 ลักษณะอีกคือ ไฮท์ เรโช และ โลย์ เรโช ส่วนบริเวณทางออกจะเป็นปลายตัดเรียบไม่ต้องมีขอบเหมือนแบบแรก

การสร้างหัวฉีดจะใช้วัสดุอะไรก็ได้ที่มีคุณสมบัติที่สามารถทำให้จุดสำคัญต่าง ๆ ได้แก่ ส่วนโค้งที่ทางเข้าความเรียบของผิว การเปลี่ยนแปลงสภาพผิวตลอดระยะเวลาการใช้งาน การผลิตด้วยเครื่องจักรให้เป็นไปตามความต้องการของข้อกำหนดก็เพียงพอ

หัวฉีดแต่ละแบบจะมีความยาวทั้งหมดที่ต่างกันซึ่งแสดงตามตารางที่ 6

4.2.2 ข้อกำหนดการใช้งาน ขอบเขตการใช้งานของหัวฉีดแต่ละแบบจะแตกต่างกันเล็กน้อยสรุปได้ดังนี้

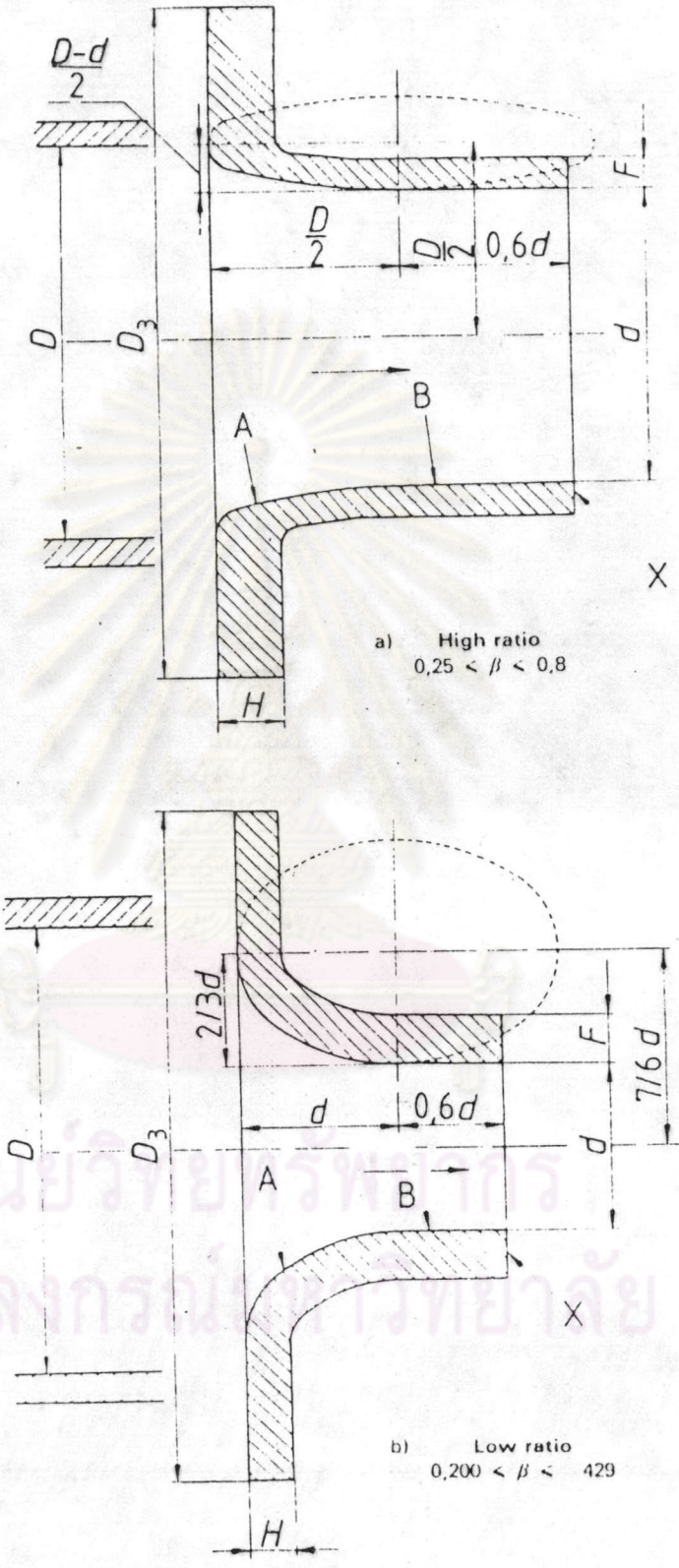
สำหรับแบบ ISA 1932

50 ม.ม. $\leq D \leq$ 500 ม.ม.

$0.30 \leq \beta \leq 0.44$ เมื่อ $7\times10^4 \leq R_{eD} \leq 10^7$

$0.44 \leq \beta \leq 0.80$ เมื่อ $2\times10^4 \leq R_{eD} \leq 10^7$

สำหรับแบบรัศมียาว



รูปที่ 6 หัวฉีดแบบรัศมียาว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6

ชนิด	ช่วงของ β	ความยาวรวม
ISA	$0.32 \leq \beta \leq 2/3$	$0.6041d$
1932	$2/3 < \beta \leq 0.80$	$[0.4041+(0.75/\beta-0.25/\beta^2-0.5225)^{1/2}]d$
LONG	HIGH RATIO	$D/2+0.6d$
RADIUS	LOW RATIO	$1.6d$

HIGH RATIO ค่า $0.25 \leq \beta \leq 0.80$

LOW RATIO ค่า $0.20 \leq \beta \leq 0.50$

ที่ค่า β ระหว่าง 0.25-0.50 จะใช้ได้ทั้ง 2 แบบ

50 ม.ม. $\leq D \leq$ 630 ม.ม.

$0.20 \leq \beta \leq 0.80$

$10^4 \leq R_{eD} \leq 10^7$

$k/D \leq 10^{-3}$

4.2.3 สัมประสิทธิ์การจ่าย (DISCHARGE COEFFICIENT) กำหนดเป็นฟังก์ชั่นได้ดังนี้

สำหรับแบบ ISA 1932

$$C = 0.9900-0.2262\beta^{4.1}+[0.000215-0.001125+0.002490\beta^{4.7}][10^6/R_{eD}]^{1.15} \quad \text{.....(34)}$$

สำหรับแบบ LONG RADIUS ค่า C จะอิสระจาก เมื่อเขียนในเทอม R_{eD}

$$C = 0.9965-0.00653\beta^{0.5}[10^6/R_{eD}]^{0.5} \quad \text{.....(35)}$$

$$C = 0.9965-0.00653[10^6/R_{eD}]^{0.5}$$

4.2.4 ตัวประกอบการขยายตัว และความไม่แน่นอน ค่าตัวประกอบการขยายตัวคำนวณจากสมการ

$$\epsilon = \{[(k\tau^{2/k})/(k-1)][(1-\beta^4)/(1-B^4\tau^{2/k})][(1-\tau^{(k-1)/k})/(1-\tau)]\}^{1/2} \quad \text{.....(36)}$$

สูตรนี้ทดสอบสำหรับอากาศ ไอน้ำ และแก๊สธรรมชาติเท่านั้น ในช่วงค่า $\tau \geq P_2/P_1 \geq 0.75$ ความไม่แน่นอนของตัวประกอบการขยายตัวตามสมการมีค่า $2\Delta P/P_1$ % เมื่อใช้กับหัวฉีดทุก ๆ แบบความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย (C) เมื่อไม่คิดความไม่แน่นอนของค่า β , D และ R_D จะประมาณได้ดังนี้

สำหรับหัวฉีด ISA 1932

$\beta \leq 0.60$ ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย 0.8 %

$\beta > 0.60$ ความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย $(2\beta-0.4)$ %

สำหรับหัวฉีดแบบรัศมียาวค่า β ระหว่าง 0.20 ถึง 0.80 ค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การจ่ายจะอยู่ในช่วง ±2.0 %

4.3 ท่อเวนจูรี (VENTURI TUBE)

4.3.1 ลักษณะทั่วไป ท่อเวนจูรีมีการสร้างกันเป็นมาตรฐาน 2 แบบคือ เวนจูรีผสมหัวฉีด กับ ท่อเวนจูรี ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งด้านลักษณะรูปร่าง และขอบเขตการใช้งาน

a. ท่อเวนจูรี เป็นแบบเก่าดั้งเดิม ลักษณะตามรูปที่ 6 วิธีการสร้างมี 3 แบบคือ ได้จากการหล่อแบบทรายแล้วตกแต่งผิวเฉพาะที่คอคอด หล่อแล้วตกแต่งผิวที่ทางเข้า และคอคอดกับอีกวิธีหนึ่งทำจากโลหะแผ่นม้วน แล้วต่อเข้าด้วยกันโดยวิธีเชื่อมทุก ๆวิธีจะมีรูปร่างเดียวกันคือ ช่วงทางเข้ารูปกรวย (CONICAL) ต่อด้วยคอคอดเป็นทรงกระบอก และช่วงทางออกรูปกรวยมุมเล็กกว่าทางเข้า

b. เวนจูรีผสมหัวฉีด แบบนี้เป็นการรวม หัวฉีด กับ เวนจูรี เข้าด้วยกันตามรูปที่ 7 คือทางเข้าจะเป็นหัวฉีดแบบ ISA 1932 ส่วนทางออกเป็นรูปกรวยที่มีมุมบานออกค่อนข้างโตทั้งสองส่วนนี้ต่อเข้าด้วยกันด้วยคอคอดรูปทรงกระบอก ลักษณะการสร้างจะสามารถลดความยาวช่วงทางออกได้เมื่อค่าอัตราส่วน มีค่าต่ำกว่า 2/3 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วท่อ เวนจูรี จะมีความยาวมากที่สุดในบรรดาเครื่องวัดอัตราการไหลทั่ว ๆ ไป

4.3.2 ขอบเขตการใช้งาน ในแต่ละแบบของการสร้างจะเหมาะสมกับงานแตกต่างกันสรุปได้ดังนี้

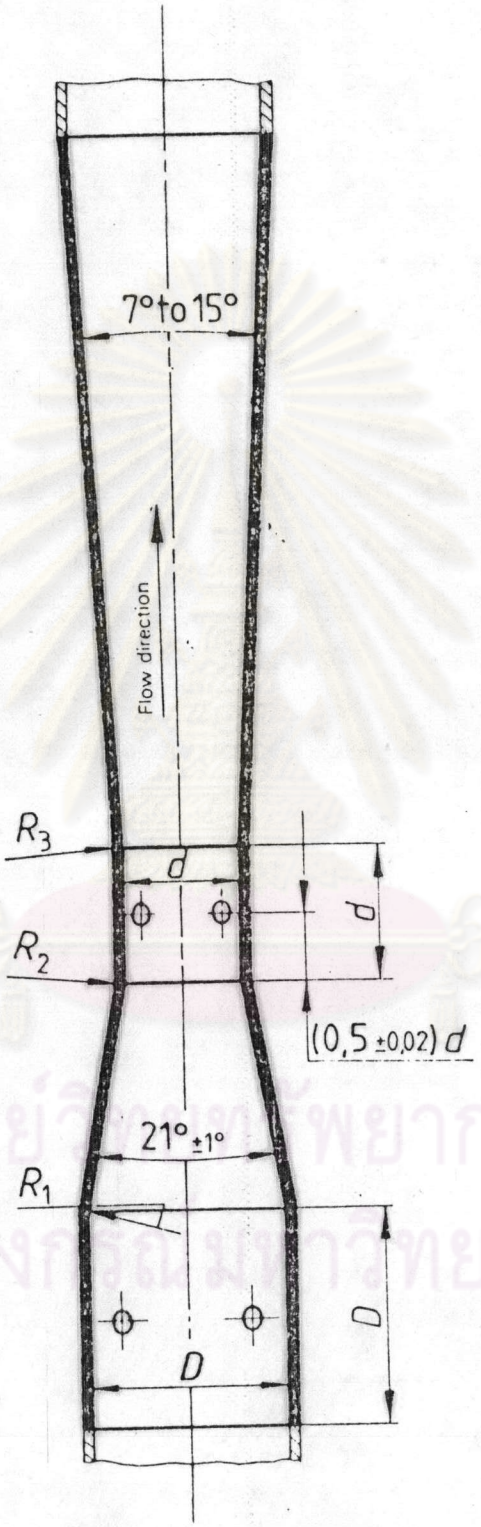
สำหรับ ท่อเวนจูรี

ผลิตจากการหล่อทราย

$100 \text{ ม.ม.} \leq D \leq 800 \text{ ม.ม.}$

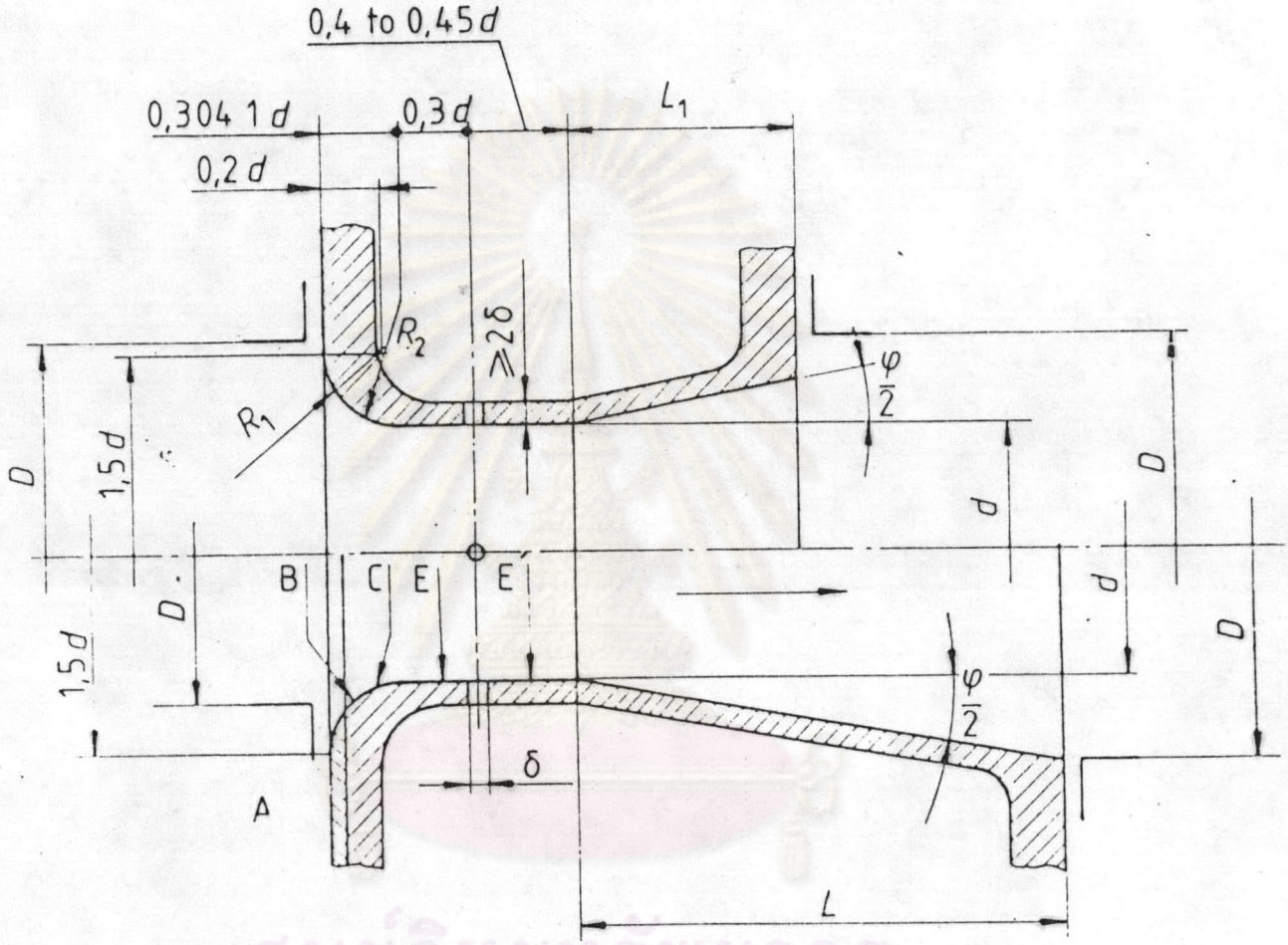
$0.30 \leq \beta \leq 0.75$

$2 \times 10^5 \leq R_D \leq 2 \times 10^6$



รูปที่ 7 ท่อเวนจูรี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8 เวนจูรีผสมหัวฉีด

C = 0.984

ΔC = 0.70 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลิตจากการตกแต่งผิวด้วยเครื่องจักร

$$50 \text{ ม.ม.} \leq D \leq 250 \text{ ม.ม.}$$

$$0.40 \leq \beta \leq 0.75$$

$$2 \times 10^5 \leq R_{eD} \leq 1 \times 10^6$$

$$C = 0.0995$$

$$\Delta C = 1 \%$$

ผลิตจากเหล็กแผ่นม้วนเชื่อม

$$200 \text{ ม.ม.} \leq D \leq 1200 \text{ ม.ม.}$$

$$0.40 \leq \beta \leq 0.70$$

$$2 \times 10^5 \leq R_{eD} \leq 2 \times 10^6$$

$$C = 0.985$$

$$\Delta C = 1.5 \%$$

สำหรับ เวนจูรีผสมหัวฉีด

$$65 \text{ ม.ม.} \leq D \leq 500 \text{ ม.ม.}$$

$$d \geq 50 \text{ ม.ม.}$$

$$0.316 \leq \beta \leq 0.775$$

$$1.5 \times 10^5 \leq R_{eD} \leq 2 \times 10^6$$

$$C = 0.9858 - 0.196\beta^{4.5} \qquad \text{.....(37)}$$

$$\Delta\alpha = \pm(1.2 + 1.5\beta^4) \% \qquad \text{.....(38)}$$

ค่าความไม่แน่นอนของตัวประกอบการขยายตัว (ϵ) สำหรับ VENTURI ทุก ๆ แบบจะมีค่าตามสูตร

$$\Delta\epsilon = (4 + 100\beta^8)\Delta P/P_1 \% \qquad \text{.....(39)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย