

ทฤษฎีระบบจ่ายเชื้อเพลิงที่ใช้มิกเซอร์ (Mixer) และอุปกรณ์วัด อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (Orifice Flow Meter)

ระบบจ่ายเชื้อเพลิงในปัจจุบันที่ใช้กันมากมีด้วยกันสองลักษณะคือ ระบบที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดันจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลเรียกว่าคาร์บูเรเตอร์ (carburetor) กับระบบที่ใช้ไฟฟ้าควบคุมการจ่ายปริมาณเชื้อเพลิงเรียกว่าหัวฉีด (Injector) โดยระบบแรกจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าและราคาที่ถูกกว่าระบบที่สองแต่มีความแม่นยำที่ต่ำกว่า เพื่อให้สอดคล้องกับจุดประสงค์ของการใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่การจ่ายเชื้อเพลิงก๊าซเข้าไปในท่ออากาศต้องมีลักษณะไม่ยุ่งยากและมีราคาถูก ดังนั้นคาร์บูเรเตอร์จึงเป็นตัวเลือกเพื่อใช้ในการจ่ายก๊าซสำหรับระบบระบบเชื้อเพลิงคู่

การใช้คาร์บูเรเตอร์นั้นจะต้องมีการออกแบบลักษณะของมิกเซอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในระบบ carburetor มิกเซอร์เป็นส่วนประกอบที่มีลักษณะเป็นคอคอด ซึ่งคอคอดนี้จะทำให้ของไหลที่ผ่านท่อหลักหรือท่อไอดีมีความดันลดลงเนื่องจากความเร็วของไหลมีค่าเพิ่มขึ้นจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนั้นของไหลที่อยู่ในท่อขนาดเล็กหรือคอคอดจะมีความต่างความดันเกิดขึ้นทำให้ของไหลที่อยู่ในท่อขนาดเล็กหรือเชื้อเพลิงสามารถไหลเข้าสู่ท่อหลักได้

ในทางทฤษฎีสัดส่วนของส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสมถูกกำหนดด้วยกำลังที่ต้องการโดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุดและจะต้องทำงานได้เป็นปกติราบรื่นตลอดช่วงการทำงาน และมีอีกปัจจัยหนึ่งคือขีดจำกัดของมลพิษที่ปล่อยออกมาจะต้องผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย ดังนั้นอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่เหมาะสมจึงมีค่าแตกต่างกันไปตามภาระที่รับกับความเร็รรอบเครื่องยนต์ต่างๆ

3.1 การคำนวณปริมาณการไหลในท่อเวนจูรีและมิกเซอร์ [1], [5], [6]

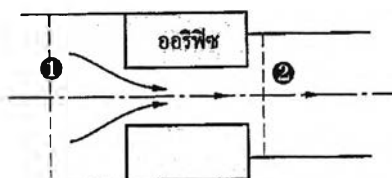
3.1.1 สมบัติของอัตราการไหล

การไหลของของไหลผ่านช่องแคบหรือมีพื้นที่การไหลที่ลดลง การไหลจริงในลักษณะนี้มักสัมพันธ์กับการไหลในอุดมคติ การไหลของอุดมคตินี้เป็นการไหลแบบย้อนกลับได้ (ไม่มีความเสียดทาน) อเดียแบติกและคงตัว ผ่านช่องทางที่มีรูปร่างและขนาดเหมือนกัน สำหรับการไหลของของไหลจริงนั้น ความแตกต่างจากข้อสมมติอุดมคติข้างต้นมักนำเข้ามาพิจารณาโดยเพิ่มพจน์สัมประสิทธิ์การไหลหรือสัมประสิทธิ์อัตราการไหล (discharge coefficient, C_D) ซึ่ง

$$C_D = \frac{\text{Actual flow}}{\text{Ideal flow}} \quad (3-1)$$

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ของการไหลยังสามารถกำหนดพจน์ของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลและพื้นที่อ้างอิงได้ด้วยพื้นที่อ้างอิง (A_R) มักใช้เป็นพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดโดยพื้นที่ของช่องแคบ (A_E) จะเป็นพื้นที่หน้าตัดของคอคอของรูที่ไม่มีแรงเสียดทานซึ่งเป็นการไหลของมวล (ที่รูอัตราการไหล) ระหว่าง upstream (ที่ความดันสถานะด้านหน้า) และ downstream (ที่ความดันสถานะด้านหลัง) ดังนั้น

$$C_D = \frac{A_E}{A_R} \quad (3-2)$$



รูปที่ 3-1 ผังการไหลของของไหลผ่าน orifice [5]

3.1.2 การไหลผ่านท่อเวนจูรี [1], [5]

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลผ่าน orifice ดังรูปที่ 3-1 สำหรับการไหลในอุดมคติสามารถเขียนสมการของแบร์นูลีได้เป็น

$$p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} \quad (3-3)$$

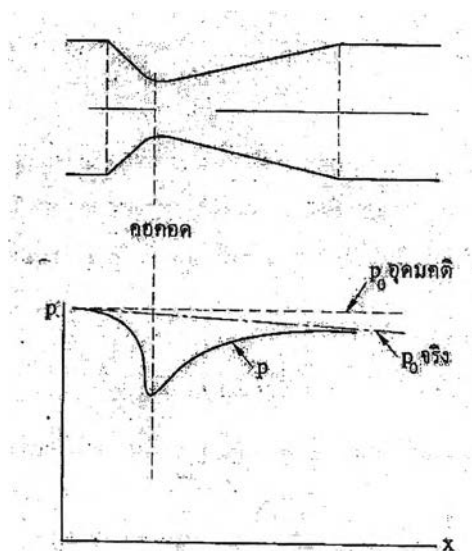
สำหรับการไหลแบบไม่ยุบตัวจากสมการความต่อเนื่องจะได้ $V_1 A_1 = V_2 A_2$ และอัตราการไหลของมวลในอุดมคติผ่าน orifice จะได้

$$\dot{m}_{ideal} = A_2 \left[\frac{2\rho(p_1 - p_2)}{1 - (A_2 / A_1)^2} \right]^{1/2} \quad (3-4)$$

อัตราการไหลของมวลจริงสามารถหาได้โดยใช้สัมประสิทธิ์อัตราการไหลเป็น

$$\dot{m}_{actual} = C_D A_2 \left[\frac{2\rho(p_1 - p_2)}{1 - (A_2/A_1)^2} \right]^{1/2} \quad (3-5)$$

ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลเป็นฟังก์ชันของขนาด, รูปร่าง, ความหยาบของผิว, อัตราการไหลของมวลและคุณสมบัติของของไหล (ความหนาแน่น, ความตึงผิว, และความหนืด) ซึ่งสามารถประมาณได้จากการทดลองแล้วนำมาหาเป็นความสัมพันธ์ตลอดช่วงการทดลองได้



รูปที่ 3-2 ความดันที่เกิดในคอขวดระหว่างก๊าซในอุดมคติกับก๊าซที่เกิดขึ้นจริง

ดังนั้นสำหรับการไหลของอากาศในท่อไอดีที่เป็นแบบยุบตัวหรือที่เกิดขึ้นจริง การไหลจะมีลักษณะที่ต่างจากการไหลในอุดมคติ (การไหลของก๊าซอุดมคติที่มีค่าความร้อนจำเพาะคงตัว) ดังรูปที่ 3-2 ซึ่งเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลในการเชื่อมความสัมพันธ์ จากเรื่องการไหลที่อัดตัวได้ อัตราการไหลของมวลก๊าซในคอขวดสามารถเขียนได้ว่า

$$\dot{m}_{a,ideal} = \frac{P_0 A_T}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{k}{R}} \frac{M}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{(k+1)/2(k-1)}} \quad (3-6)$$

หรือ

$$\dot{m}_{a,ideal} = \frac{P_0 A_T}{\sqrt{RT_0}} \left(\frac{p_T}{p_0}\right)^{1/k} \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_T}{p_0}\right)^{(k-1)/k} \right] \right\}^{1/2} \quad (3-7)$$

ดังนั้นอัตราการไหลจริงจะได้

$$\dot{m}_{a,actual} = \frac{C_D P_0 A_T}{\sqrt{RT_0}} \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{1/k} \left[\frac{2k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{(k-1)/k} \right] \right]^{1/2} \quad (3-8)$$

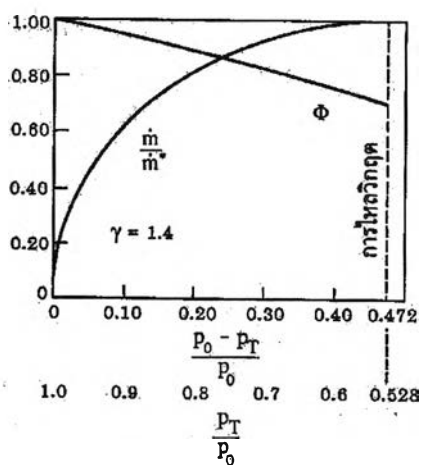
เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน สมการข้างต้นสามารถเขียนใหม่เป็น

$$\dot{m}_{a,actual} = C_D A_R [2\rho_0 (p_0 - p_T)]^{1/2} \Phi \quad (3-9)$$

โดยที่

$$\Phi = \left[\frac{\left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{(k+1)/k} \right]}{1 - \frac{p_T}{p_0}} \right]^{1/2} \quad (3-10)$$

ค่า Φ เรียกว่าฟังก์ชันของการไหลแบบยุบตัวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความดันที่ลดลง ($\Delta p_a = p_0 - p_T$) จากรูปที่ 3-3 พบว่าสำหรับอัตราการไหลที่มีค่าน้อยกว่าประมาณ 60% ของการไหลวิกฤตของการยุบตัว (compressibility) ที่มีต่ออัตราการไหลของมวลจะน้อยกว่า 5%



รูปที่ 3-3 ค่าของผลของการยุบตัวที่มีต่ออัตราการไหลของมวล

ดังนั้นการไหลผ่านท่อเวนจูรี โดยทั่วไปจะพิจารณาเป็นการไหลแบบคงตัวของของไหล

ในคาร์บูเรเตอร์ ซึ่ง $\frac{\Delta p_a}{p_0} \leq 0.1$ ซึ่งผลของการยุบตัวจะมีค่าน้อยมาก

3.1.3 การไหลผ่าน orifice ของเชื้อเพลิง [1]

เนื่องจากเชื้อเพลิงเป็นของเหลวจึงพอถือได้ว่าไม่มีการยุบตัว อัตราการไหลของเชื้อเพลิงผ่าน orifice (\dot{m}_f) จะได้ว่า

$$\dot{m}_f = C_{D0} A_0 (2\rho_f \Delta p_f)^{1/2} \quad (3-11)$$

ค่า C_{D0} และ A_0 เป็นสัมประสิทธิ์อัตราการไหลและพื้นที่ของ orifice ตามลำดับ Δp_f เป็นผลต่างของความดันเมื่อผ่าน orifice และสมมติให้พื้นที่ของ orifice น้อยกว่าพื้นที่ของช่องแคบมาก

3.1.4 สมรรถนะของคาร์บูเรเตอร์แบบพื้นฐาน [6]

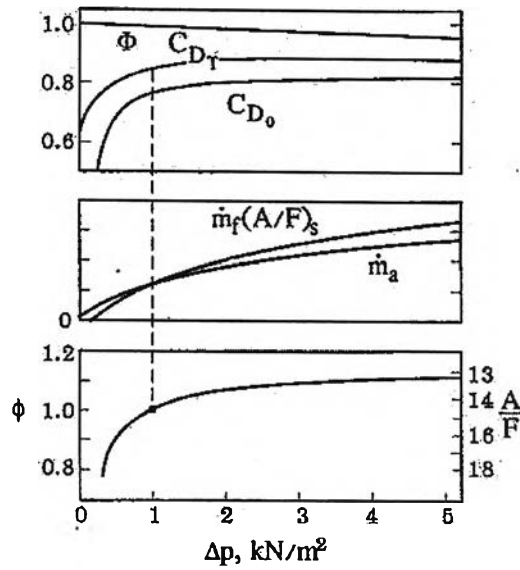
อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงสำหรับการไหลผ่านคอคอดสามารถเขียนได้เป็น

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \left(\frac{C_{DT}}{C_{D0}}\right) \left(\frac{A_T}{A_0}\right) \left(\frac{\rho_{a0}}{\rho_f gh}\right)^{1/2} \left(\frac{\Delta p_a}{\Delta p_a - \rho_f}\right)^{1/2} \Theta \quad (3-12)$$

ดังนั้นอัตราส่วนสมมูลก็จะเป็น

$$\Phi = \frac{(A/F)_s}{\Theta} \left(\frac{C_{D0}}{C_{DT}}\right) \left(\frac{A_0}{A_T}\right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_{a0}}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{\rho_f gh}{\Delta p_a}\right)^{1/2} \quad (3-13)$$

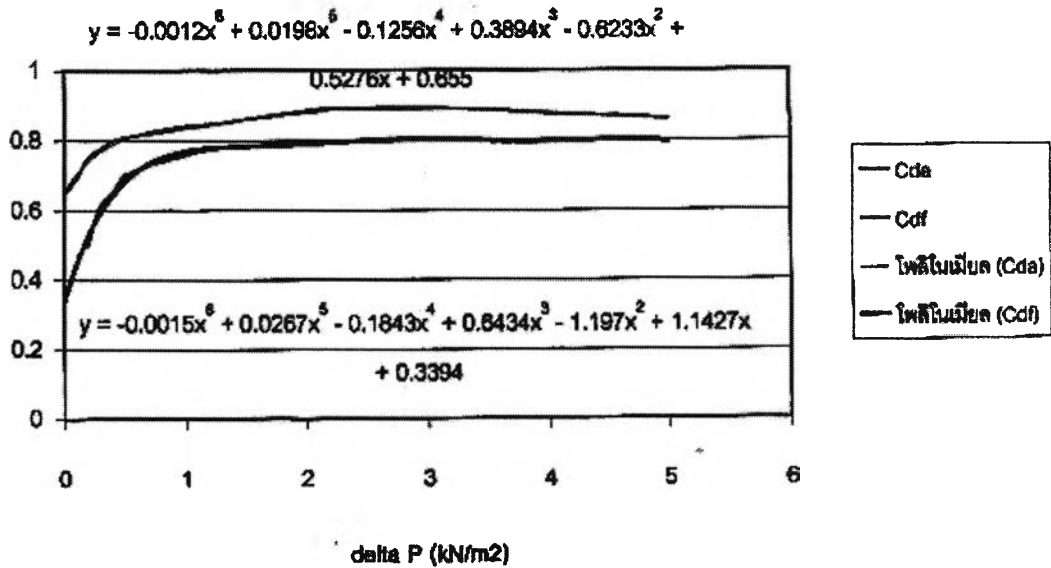
โดยที่การทำงานจุดต่างๆ โดยพื้นฐานพจน์ A_0, A_T, ρ_f และ ρ_{a0} จะมีค่าคงตัวของสัมประสิทธิ์อัตราการไหล C_{D0}, C_{DT} และ Θ จะแปรผันกับอัตราการไหล ดังนั้นอัตราส่วนสมมูลของสารผสมที่ได้จากมิกเซอร์จึงไม่คงตัวค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-4 โดยเทียบกับ Δp อัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าอัตราการไหลของอากาศแต่ที่อัตราการไหลสูงๆ อัตราส่วนสมมูลมีค่าเกือบคงตัว



รูปที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่ลดลงที่สอดคล้องกับอัตราส่วนสมมูล [1]

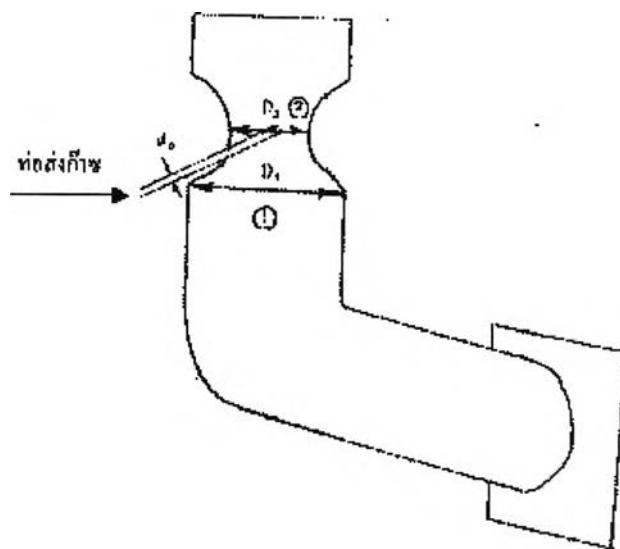
3.1.5 การประมาณค่าของ discharge coefficient [1]

จากที่กล่าวมาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลหรือ Discharge coefficient ขึ้นอยู่กับการไหลที่เกิดขึ้นจริง รูปที่ 3-5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Discharge coefficient กับความดันที่ลดลงสำหรับออร์ฟิซ และได้ทำการประมาณค่าความสัมพันธ์ทั้งสองให้อยู่ในรูปของสมการเพื่อความสะดวกในการเลือกมาใช้งาน



รูปที่ 3-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อประมาณสมการของ C_{da} และ C_{df} [1]

3.2 การคำนวณหาขนาด Mixer



รูปที่ 3-6 โมเดลจำลองแบบ Mixer

| | | |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Specification: | Engine model | KUBOTA RT 120-011192 |
| | Engine size | 624 cc, 1 cylinder (4 strokes) |
| | Max. Power @ 2400 rpm | 9 kW. |
| | Max. Power @ 1000 rpm | 4 kW. |
| | Inlet diameter | $D_1 = 44$ mm. |
| | Volumetric Efficiency | 90 % |
| | Fuel Conversion Efficiency | 30% |
| Condition: | Air inlet temperature | 27° C (300K) |
| | Ambient pressure | 101 kPa. |
| Assumed : | Diesel Consumption (Idle Mode) | 10.0 (cc/min.) |

Properties of fluid:

Air $\rho = 1.18$ kg/m³, $c_p = 1.004$ kJ/(kg·K), $k = 1.4$

Methane 100 % $\rho_m = 0.635$ kg/m³, $Q_{HV} = 50$ MJ/kg

Biogas @ Methane 60 % $\rho_b = 0.996$ kg/m³

การคำนวณเริ่มจาก

(ก) หาปริมาณมีเทนที่เครื่องยนต์ต้องการในความเร็วรอบที่ต่ำสุดและสูงที่สุดจากสมการ

$$\eta_f = \frac{W_c}{m_{fd} Q_{HVDiesel} + m_{Methane} Q_{HVMethane}} \quad (3-14)$$

$$m_{Methane} = \frac{W_c - \eta_f m_{fd} Q_{HVDiesel}}{\eta_f Q_{HVMethane}} \quad (3-15)$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ (3-15) จะได้ว่า

ที่ 1000 รอบต่อนาที ใช้ปริมาณมีเทน 0.00021 kg/s หรือ ก๊าซชีวภาพประมาณ 0.00036 kg/s

ที่ 2400 รอบต่อนาที ใช้ปริมาณมีเทน 0.00075 kg/s หรือ ก๊าซชีวภาพประมาณ 0.00125 kg/s

(ข) หาค่าความดันที่ลดลง

อัตราการไหลของปริมาตรอากาศสามารถคิดได้จากการทำงานของเครื่องยนต์ดังนี้

$$Q_{air} = \frac{\eta_v N V_d}{60 n_R} = \frac{0.90 N (624 \times 10^{-6})}{60 \times 2} = 4.68 \times 10^{-6} N \quad (3-16)$$

ที่หน้าตัดที่ 1 $P_1 = P_{atm} = 1 \text{ bar.} = 101 \text{ kPa}$

$$v_1 = \frac{Q_{air}}{A_1} = \frac{4.68 \times 10^{-6} N}{\frac{\pi}{4} (4.4 \times 10^{-2})^2} = 3.778 \times 10^{-3} N$$

ที่หน้าตัดที่ 2 $v_2 = \frac{Q_{air}}{A_2} = \frac{4.68 \times 10^{-6} N}{\frac{\pi}{4} (D_2)^2} = 5.6 \times 10^{-6} \frac{N}{D_2^2}$

สมการแบร์นูลี(3.3) :

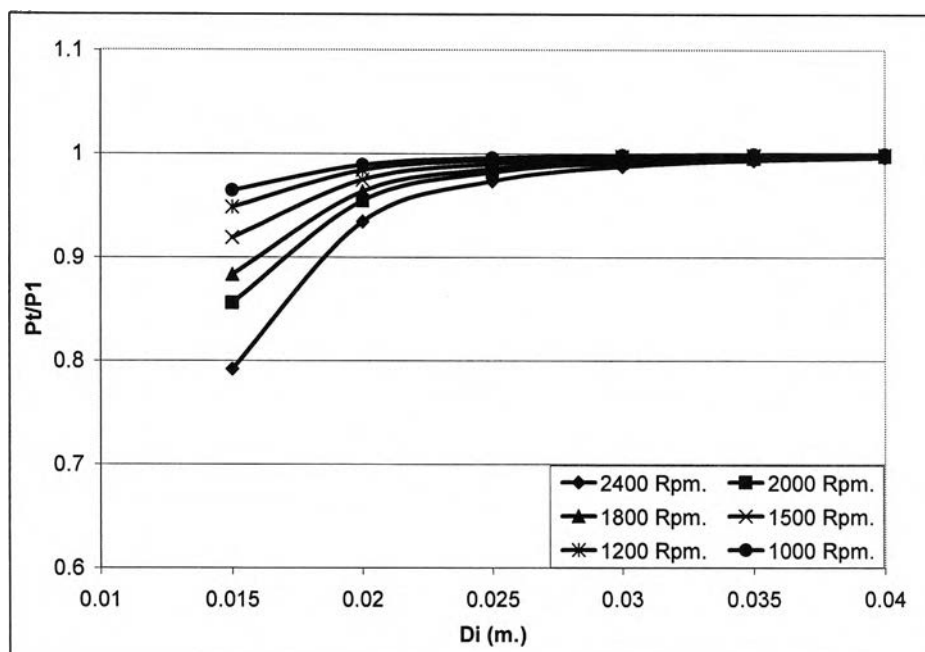
$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2$$

$$\Delta P = \rho_{air} (v_2^2 - v_1^2) / 2 = \frac{1.18}{2} \times \left[\left(5.6 \times 10^{-6} \frac{N}{D_2^2} \right)^2 - (3.778 \times 10^{-3} N)^2 \right]$$

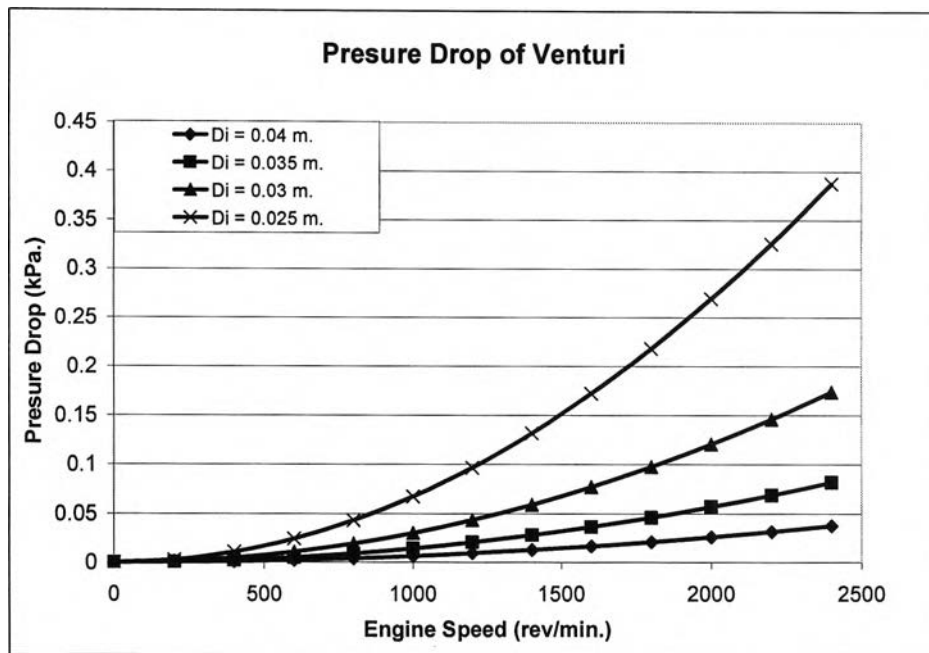
$$\Delta P = 1.850 \times 10^{-10} \frac{N^2}{D_2^4} - 8.42 \times 10^{-6} N^2 \text{ --- } > \text{Ans}$$

$$\frac{\Delta P}{P_1} = 1.8316 \times 10^{-15} \frac{N^2}{D_2^4} - 8.3378 \times 10^{-11} N^2$$

$$\frac{P_T}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - 1.8316 \times 10^{-15} \frac{N^2}{D_2^4} + 8.3378 \times 10^{-11} N^2$$



รูปที่ 3-7 กราฟแสดงค่าของ $\frac{P_T}{P_1}$ กับขนาดของคอขวดที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดันกับความเร็วยุบที่ขนาดคอคอดต่างๆ

(ค) หาอัตราการไหลของมวลอากาศที่คอคอดในฟังก์ชันของความดันที่ลดลง

จากหัวข้อที่แล้วจะได้ว่าอัตราการไหลของมวลอากาศที่เป็นของเหลวที่ยุบตัวได้จะได้ว่า

$$\dot{m}_{a,real} = \frac{C_D P_0 A_T}{\sqrt{RT_0}} \left(\frac{P_T}{P_0} \right)^{1/k} \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_T}{P_0} \right)^{(k-1)/k} \right] \right\}^{1/2} \quad (3-17)$$

$$\text{หรือ } \dot{m}_{a,real} = C_D A_T [2\rho_0(P_0 - P_T)]^{1/2} \Theta \quad (3-18)$$

จากรูปที่ 3-7 ค่า $\frac{P_T}{P_1}$ มีค่าใกล้เคียงกับ หนึ่งมากในช่วงขนาดของคอคอดที่จะเลือกใช้ ดังนั้นเมื่อดูกราฟสมการของสัมประสิทธิ์อัตราการไหลและค่าของผลจากการยุบตัวในรูปที่ 3-3 และ 3-4 แล้ว เราสามารถสมมติให้ว่า C_D ของอากาศมีค่าเป็น 0.83 (จากการประมาณค่าจากหัวข้อ 3.1.5) และการไหลนี้มีค่าของผลของการยุบตัวน้อยมาก (จะได้ว่า $\Theta = 1$) ดังนั้นสมการการไหลของมวลอากาศสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$m_a = 0.83 \left(\frac{\pi}{4} D_2^2 \right) \left[2(1.18) \left(1.850 \times 10^{-10} \frac{N^2}{D_2^4} - 3.778 \times 10^{-6} N^2 \right) \right]^{1/2} \times 1$$

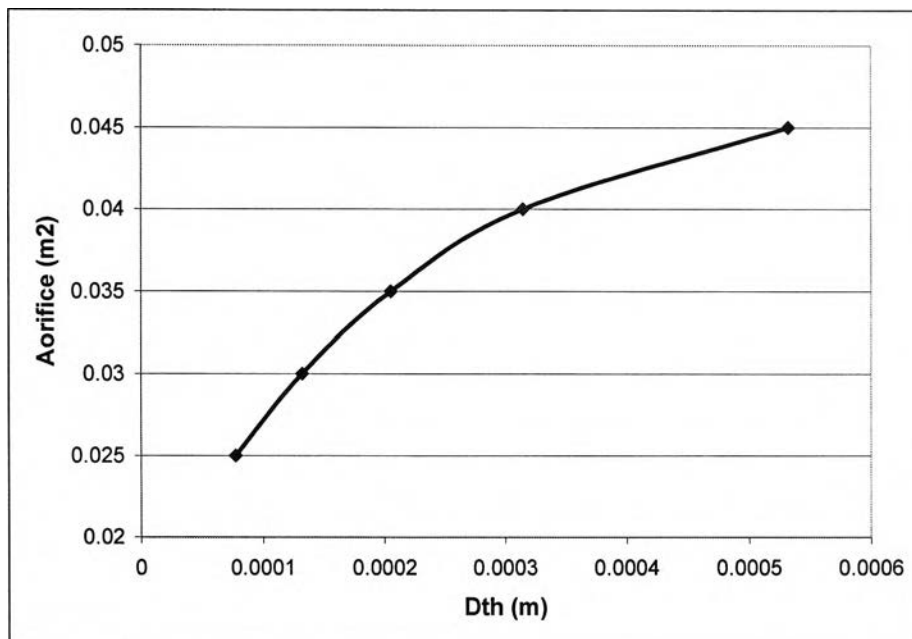
และสำหรับการไหลของเชื้อเพลิง จะสมมติให้มีค่า C_D ของเชื้อเพลิงมีค่าเป็น 0.75 (จากการประมาณค่าจากหัวข้อ 3.1.5) ดังนั้นอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจะเขียนได้เป็น

$$\dot{m}_f = C_{df} A_f [2(\Delta p) \rho_f]^{1/2} \quad (3-19)$$

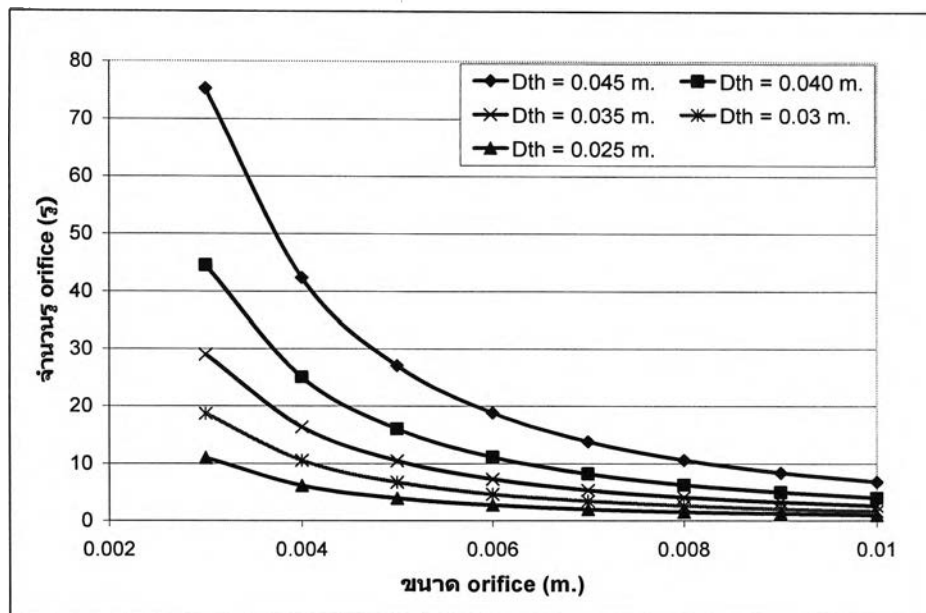
$$\dot{m}_f = (0.75) \left(\frac{\pi D_o^2}{4} \right) [2(0.996)(1.850 \times 10^{-10} \frac{N^2}{D_2^4} - 3.778 \times 10^{-6} N^2)]^{1/2}$$

(ง) หาขนาดของมิกเซอร์ที่ให้ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงตามต้องการ

เนื่องจากสมการที่ได้มี 2 สมการ คือ $\dot{m}_{a,real} = C_D A_R [2\rho_0 (P_0 - P_T)]^{1/2} \ominus$ และ $\dot{m}_f = C_{df} A_f [2(\Delta p) \rho_f]^{1/2}$ พบว่ามีตัวแปรไม่ทราบค่า 3 ตัวแปร แต่ค่า \dot{m}_f หรือค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ต้องการอยู่ในช่วงที่คำนวณไว้ดังนั้นสามารถคำนวณด้วยการสุ่มและเลือกค่าที่ต้องการด้วยคอมพิวเตอร์ดังแสดงดังรูปที่ 3-9

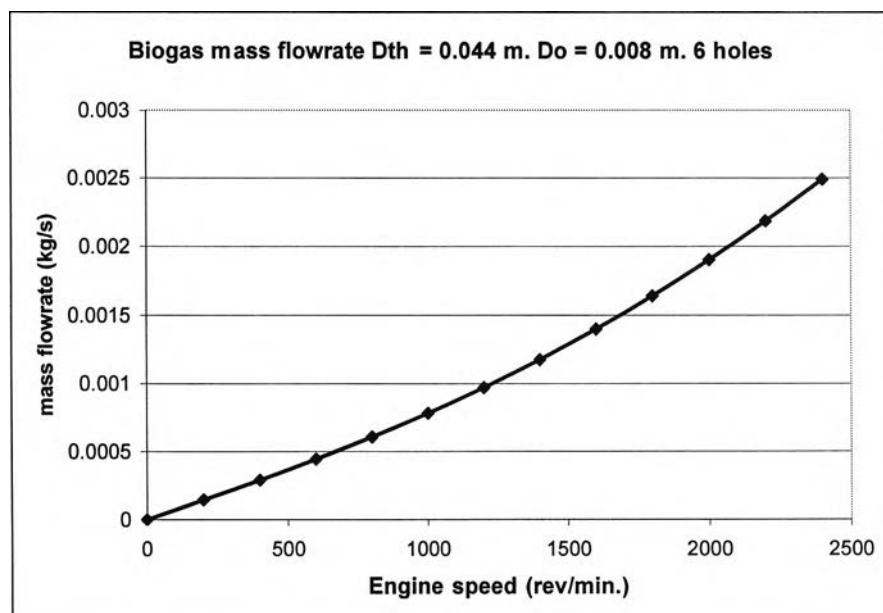


รูปที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของ orifice กับขนาดคอคอดต่างๆ ตามปริมาณก๊าซชีวภาพที่ต้องการ

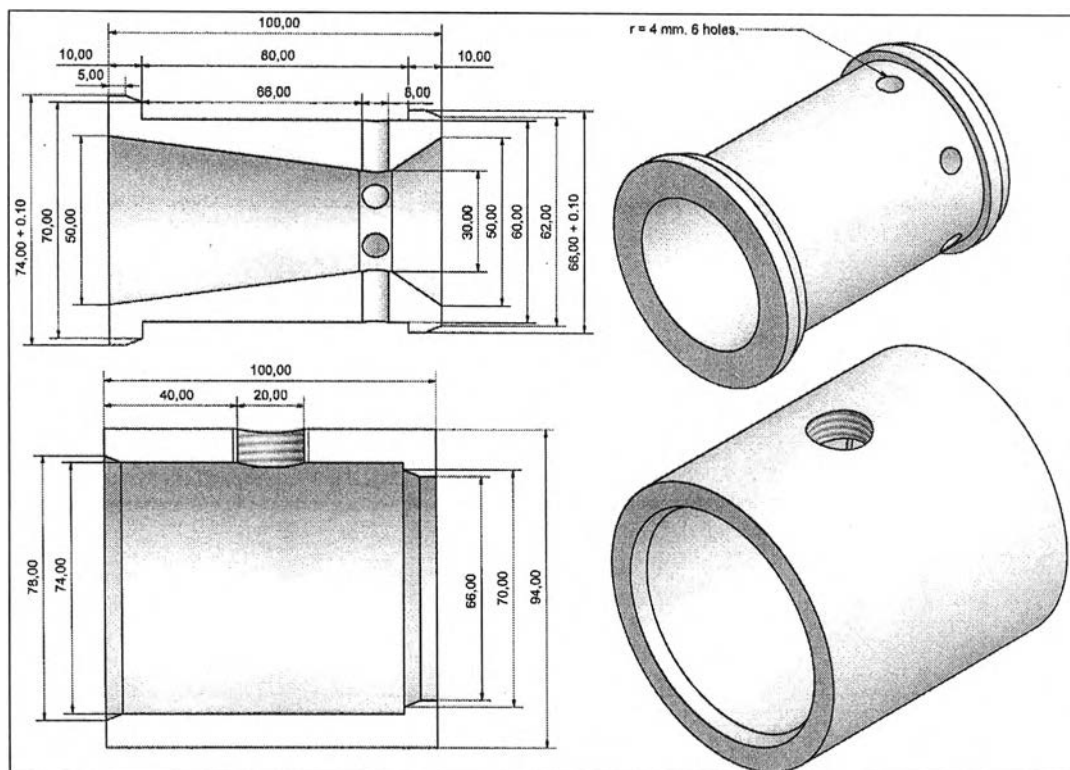


รูปที่ 3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ orifice กับจำนวนรู orifice ในขนาดคอคคอดต่างๆ ตามปริมาณก๊าซชีวภาพที่ต้องการ

จะเห็นว่าที่ขนาดของคอคคอด 0.03 m. orifice ขนาด 0.008 m. จำนวน 6 รู เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากสามารถสร้างผลต่างของความดันได้เพียงพอและมีพื้นที่คอคคอดเพียงพอที่สามารถเจาะรู orifice ได้



รูปที่ 3-11 กราฟแสดงค่าของ \dot{m}_f เทียบกับความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ขนาดของคอคคอด 0.03 m



รูปที่ 3-12 รูปและขนาดของ Venturi mixer ที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 มาตรฐานและการออกแบบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพมีความจำเป็นสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้มาก เนื่องจากว่าเป็นอุปกรณ์ที่บ่งบอกถึงอัตราการสิ้นเปลืองหรือความต้องการเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพของเครื่องยนต์รวมไปถึงการบ่งบอกสมรรถนะและประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะของเครื่องยนต์ในระบบการใช้เชื้อเพลิงคู่ โดยค่าต่างๆ เหล่านี้จำเป็นที่ต้องทราบถึงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเป็นพื้นฐานทั้งสิ้น

3.3.1 มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ [7]

มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบจะอ้างอิงมาตรฐานของ ASME (American Society Of Mechanical Engineers), MCF 14 M-2001(Revision of ASME MCF 14 M-1995), Measurement of Fluid Flow Using Small Bore Precision Orifice Meters.

3.3.2 ข้อกำหนดเบื้องต้นของมาตรฐาน

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลแบบ orifice นี้มาจากทฤษฎีพื้นฐานการคำนวณอัตราการไหลทั่วไปซึ่งถูกนำมาประยุกต์และดัดแปลงใช้ในมาตรฐานนี้จะไม่นำมาเสนอทบทวนแต่จะกล่าวถึงเฉพาะทฤษฎีหรือสมการที่จำเป็นต่อการคำนวณตามมาตรฐานนี้เท่านั้น

3.3.2.1 ข้อกำหนดทั่วไป

- a) การไหลของของไหลต้องอยู่ภายในท่อที่หน้าตัดมีลักษณะเป็นวงกลมเท่านั้น
- b) ภายในท่อต้องมีของไหลไหลเต็มท่อไม่มีช่องว่าง
- c) ท่อต้องตรงมีระยะความยาวตามที่มาตรฐานกำหนด
- d) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อต้องอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6 mm. จนถึง 40 mm. และจะต้องมาจากการเฉลี่ย 4 ค่าของท่อทางด้าน upstream ของ orifice plate
- e) ลักษณะของท่อต้องมีลักษณะกลมและเป็นทรงกระบอกทั้ง upstream และdownstream (tolerance<0.0025 mm.)
- f) ค่าความหยาบของผิวท่อต้องไม่เกิน 0.25 μm .
- g) ค่าความยาวตรงของท่อด้าน upstream ต้องยาวกว่า 18D และค่าความยาวตรงของท่อด้าน downstream ต้องยาวกว่า 8D

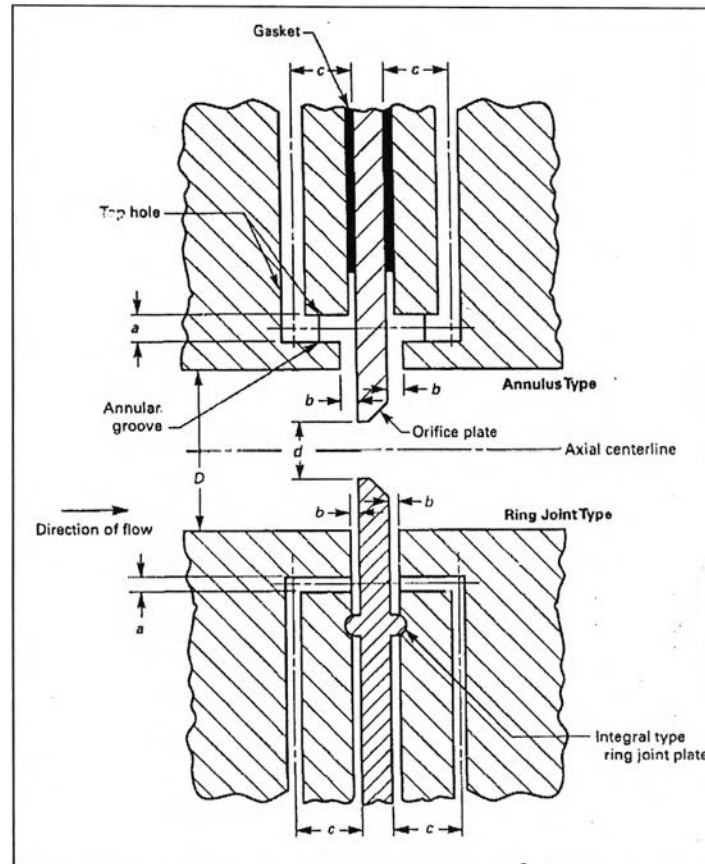
3.3.2.2 ข้อกำหนดในการออกแบบ

เนื่องจากมาตรฐานนี้เป็นการออกแบบอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลแบบ orifice ครอบคลุมเฉพาะการไหลภายในท่อที่มีขนาดเล็กโดยมีขนาดตั้งแต่ 6 mm. จนถึง 40 mm. ซึ่งมีอัตราการไหลคงตัว (steady state) มีความเร็วต่ำกว่าเสียง (subsonic) หรืออยู่ในช่วงของการไหล single phase ลักษณะของอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลแบบ orifice จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามตำแหน่งการเจาะรูวัดความดันระหว่าง upstream และ downstream ของการไหลผ่านรู orifice ดังนี้

3.3.2.2.1 Corner Tap

Corner tap คือรูปแบบของการเจาะรูเพื่อวัดความแตกต่างของความดันระหว่างแผ่น orifice ทั้งด้าน upstream และ downstream ที่ตำแหน่งติดกับผิวของแผ่น orifice ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณลักษณะและรูปแบบของชิ้นส่วนต่างๆ ต่อไปและการติดตั้งแบบ Corner Tap แสดงดังรูปที่ 3-13 โดยข้อกำหนดของการออกแบบมีดังต่อไปนี้

- ค่า β หรืออัตราส่วนระหว่างขนาดของรู orifice กับขนาดของท่อ (d/D) อยู่ในช่วง 0.1-0.8
- ค่า a คือค่าขนาดของรูที่เจาะต้องอยู่ในช่วง $3.18 \text{ mm.} \leq a \leq 4.76 \text{ mm.}$
- ค่า b คือค่าความกว้างของร่องที่เจาะต้องอยู่ในช่วง $1.59 \text{ mm.} \leq a \leq 3.18 \text{ mm.}$
- ค่า c คือค่าของระยะจากรูวัดความดันถึงแผ่น orifice สามารถเลือกใช้ได้หลายค่าแต่ประมาณได้เป็น 25.4 mm.



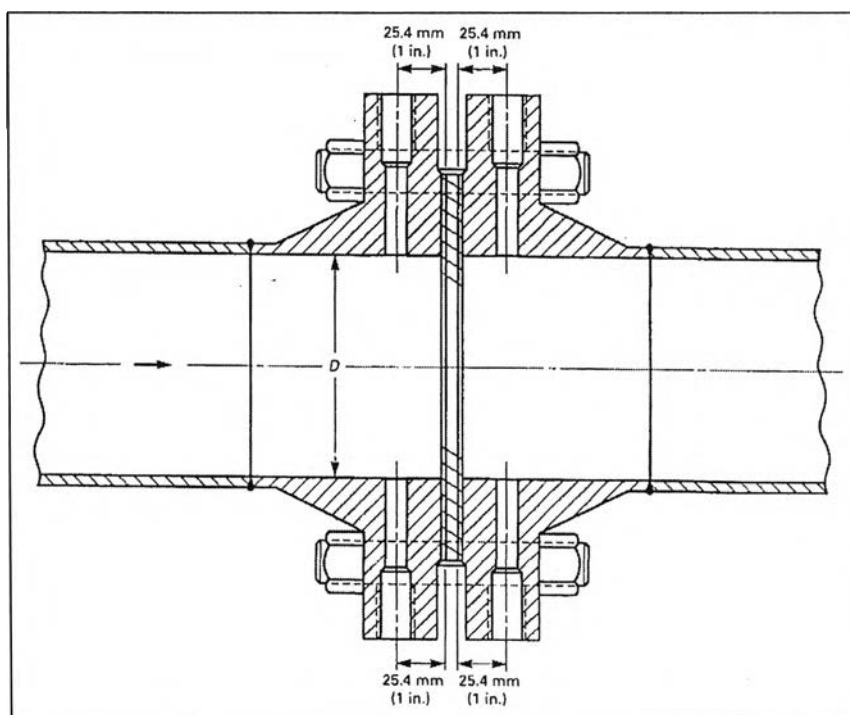
รูปที่ 3-13 ลักษณะและการติดตั้ง Orifice แบบ Corner Tap [7]

3.3.2.2.2 Flange Tap

Flange tap ลักษณะและรูปแบบของชิ้นส่วนต่างๆ และการติดตั้ง แบบ Flange tap แสดงดังรูปที่ 3-14 โดยข้อกำหนดของการออกแบบมีดังต่อไปนี้คือ

- ค่า β หรืออัตราส่วนระหว่างขนาดของรู orifice กับขนาดท่อ (d/D) อยู่ในช่วง 0.15-0.7
- ระยะจากรู Tap วัดความดันถึงแผ่น orifice สามารถประมาณได้เป็น 25.4 mm.
- รู Tap วัดความดันจะต้องตั้งฉากกับเส้นศูนย์กลางของท่อซึ่งอยู่ในช่วง ± 2 องศา

- ปลายของรู Tap ภายในท่อต้องมีความคมและเรียบไม่มีเศษโลหะที่เกิดจากการเจาะติดค้างอยู่หรือรอยเส้นต่างๆ
- ขนาดของรู Tap ค่าที่แนะนำมีค่าน้อยกว่า 6 mm. หรือประมาณ $\frac{1}{4} D$ และต้องมีลักษณะที่กลมและตรงเป็นทรงกระบอก
- ขนาดของรูเจาะ Tap สามารถเพิ่มได้ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างจากผนังของท่อแต่ถ้าต้องการลดระยะห่างจากผนังท่อสามารถลดได้แต่ต้องไม่น้อยกว่า 15 mm.



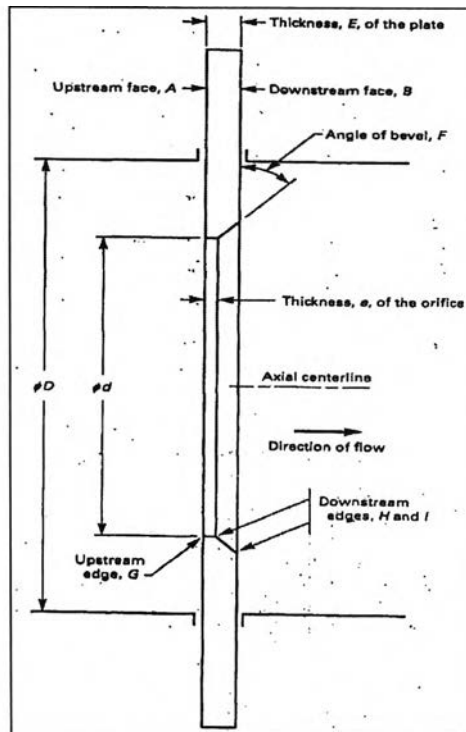
รูปที่ 3-14 ลักษณะและการติดตั้ง Orifice แบบ Flange Tap [7]

3.3.2.2.3 Orifice plate

ลักษณะของ orifice plate แสดงในรูปที่ 3-15 มีข้อกำหนดของตัวแปรดังนี้

- แผ่นของ orifice จะต้องตรงไม่บิดงอซึ่งจะต้องตั้งฉากกับหน้าตัดการไหล คลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 1 องศา
- จุดศูนย์กลางของ orifice จะต้องอยู่ในแนวเดียวกับเส้นศูนย์กลางของท่อ ไม่เกิน 0.4 mm.
- ความเรียบของผิวสูง ค่าความหยาบต้องไม่เกิน 0.00127 mm.
- ความหนาของแผ่น orifice (ค่า E) ต้องไม่เกิน 3.2 mm. มากกว่า 0.001D
- ความหนาของช่องรู orifice (ค่า e) ต้องไม่เกิน 0.02D หรือ 0.125d

- มุมเอียงภายใน orifice ประมาณได้เท่ากับ 45 องศา และขอบของรูด้าน upstream จะต้องเป็นมุมฉากและคม ส่วนด้าน downstream จะต้องไม่มีเส้นรอยต่างๆ



รูปที่ 3-15 ลักษณะและตัวแปรต่างๆ ของ Orifice plate [7]

3.3.3 สมการที่ใช้และวิธีการออกแบบ

สำหรับในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์การวัดอัตราการไหลแบบ orifice ชนิด Flange Tap เนื่องจากขนาดของท่ออยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดและง่ายในการประดิษฐ์และติดตั้ง วิธีการออกแบบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เลือกรูปแบบหรือลักษณะของอุปกรณ์การวัดอัตราการไหล (แบบ Flange Tap) และตรวจข้อกำหนดให้แน่ชัดว่าสามารถเลือกรูปแบบนี้ภายใต้มาตรฐานกำหนดได้
- กำหนดชนิดของของไหลที่ต้องการวัดรวมไปถึงคุณสมบัติพื้นฐานของของไหล
- กำหนดค่าความแตกต่างของความดัน, อัตราการไหลของของไหล, ขนาดของท่อที่ใช้ทำการทดสอบแล้วหาขนาดของรู orifice โดยใช้สมการที่ (3-22) โดยเบื้องต้นจะกำหนดให้ค่า $C = 0.6$ แล้ว

$$q_m = \frac{\pi}{4} C e d^2 \sqrt{\frac{2 \rho \Delta P}{1 - \beta^4}} \quad (3-20)$$

q_m คือ fluid mass flowrate (kg/s)

ΔP คือ differential pressure (Pa)

C คือ discharge coefficient,

$$C = [0.5980 + 0.468(\beta^4 + 10\beta^{12})\sqrt{1-\beta^4} + (0.87 + 8.1\beta^4)\sqrt{\frac{1-\beta^4}{R_{eD}}}] \quad (3-21)$$

Condition: $25 \text{ mm.} \leq D \leq 40 \text{ mm.}$, $0.15 \leq \beta \leq 0.7$ และ $R_{eD} > 1000$

R_{eD} คือ Reynold number,

$$R_{eD} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3-22)$$

ρ คือ fluid flow density (kg/m³)

μ คือ absolute viscosity of the fluid (Pa.s)

V คือ velocity of the fluid in pipe (m/s)

β คือ diameter ratio d / D

d คือ orifice diameter (m.)

D คือ pipe diameter (m.)

ε คือ expansion factor,

$$\varepsilon = 1 - \frac{(0.41 + 0.35\beta^4)\Delta P}{kP_1} \quad (3-23)$$

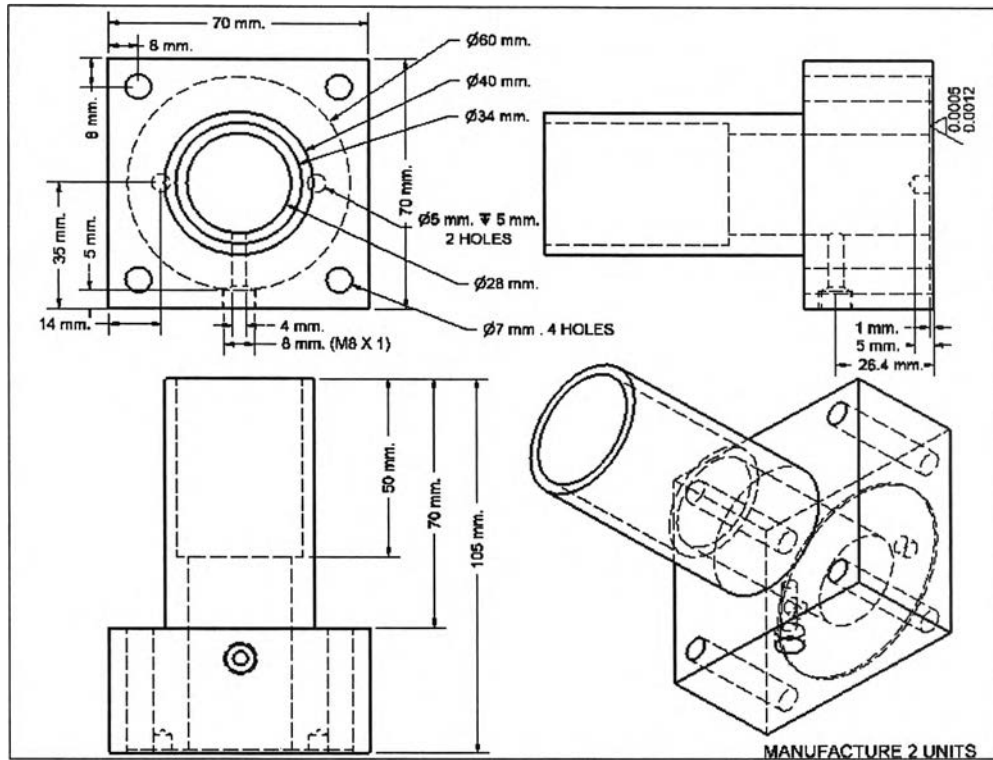
Condition: $P_2/P_1 \geq 0.8$

k คือ isentropic exponent, (C_p / C_v)

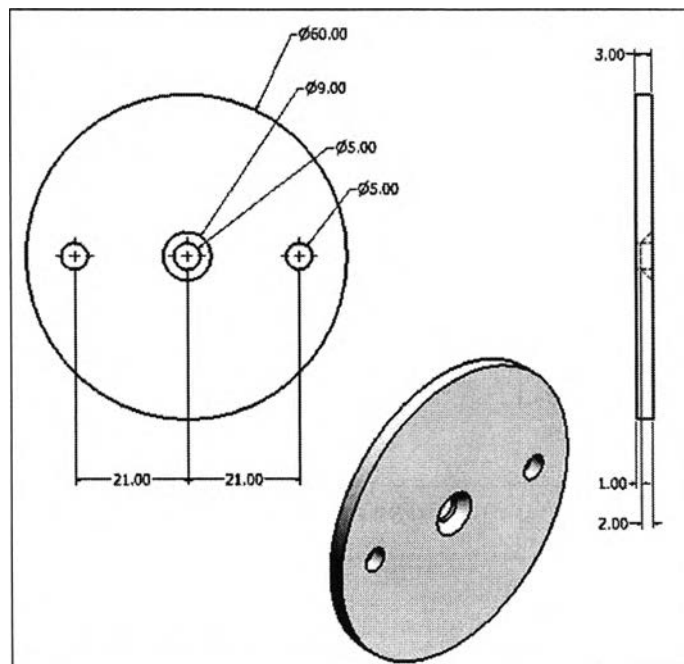
P_1 คือ upstream pressure (Pa)

ทำการคำนวณด้วยวิธีการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ (Iteration) ซึ่งจะทำการหลังจากที่ได้ค่า d แล้วนำไปแทนค่ากลับในสมการเพื่อหาค่าอื่นๆ แล้วเปรียบเทียบอัตราการไหลที่คำนวณได้กับค่าที่กำหนด โดยหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจนได้ค่าอัตราการไหลที่ยอมรับได้

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อขนาด 1 นิ้ว (ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางจริงเท่ากับ 28 mm.) จากการคำนวณพบว่าค่าที่เหมาะสมกับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพตามที่กำหนดไว้ข้างต้นพบว่า orifice มีขนาด 5 mm. โดยขนาดและระยะต่างๆของมิกเซอร์แสดงในรูปที่ 3-16 และ 3-17



รูปที่ 3-16 ลักษณะและตัวแปรต่างๆ ของหน้าแปลน Orifice plate



รูปที่ 3-17 ลักษณะและตัวแปรต่างๆ ของ Orifice plate