



บทที่ 2

ทฤษฎี

เครื่องสูบบแบบเจ็ทเป็นเครื่องมือซึ่งจะใช้ของไหลขับ (driving fluid) เพื่อที่จะทำให้เกิดการดูดของไหลขึ้นมาผสม หลักการของการทำงานของเครื่องมือนี้เป็นพลศาสตร์ของไหลอย่างแท้จริง ดังนั้นจึงแตกต่างจากเครื่องสูบลูกสูบในลักษณะของการทำงานของการทำงาน ไม่ว่าจะเป็นเครื่องสูบบแบบลูกสูบ (reciprocating pump) เครื่องสูบบแบบทอยโฆ่ง (centrifugal pump)

การจัดประเภท (Classification)

เครื่องสูบบแบบเจ็ทพื้นฐานมี 4 ชนิด คือ gas-gas, liquid-liquid, gas-liquid, และ liquid-gas เทอมแรกของชื่ออ้างอิงถึงของไหลที่ใช้สำหรับขับเครื่องสูบบ เครื่องสูบบแบบเจ็ทอาจจะถูกแบ่งแยกประเภทเพื่อให้ออกคล้องกับองค์ประกอบของของไหล และสถานะของของไหล ตัวอย่างเช่น steam-jet water injector คือ เครื่องสูบบแบบเจ็ทซึ่งมี 2 สถานะ และ 1 องค์ประกอบ เพราะว่าไอน้ำและน้ำเป็นของไหล 2 สถานะ ซึ่งแตกต่างกันแต่เป็นของไหลชนิดเดียวกัน ในอีกลักษณะหนึ่ง water-jet air ejector คือ เครื่องสูบบแบบเจ็ทซึ่งมี 2 สถานะ และ 2 องค์ประกอบ เพราะว่ามีน้ำและอากาศเป็นของไหล 2 สถานะ ซึ่งแตกต่างกัน และเป็นของไหลคนละชนิดกัน

ในที่นี้จะกล่าวเพียงแต่เครื่องสูบบแบบเจ็ทชนิด liquid-liquid หรือ water-water เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า water jet pump ซึ่งก็คือ เครื่องสูบบแบบเจ็ทซึ่งใช้น้ำเป็นของไหลที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนน้ำเข้ามาผสมกัน หรือก็คือ เครื่องสูบบแบบเจ็ทซึ่งมี 1 สถานะ และ 1 องค์ประกอบนั่นเอง

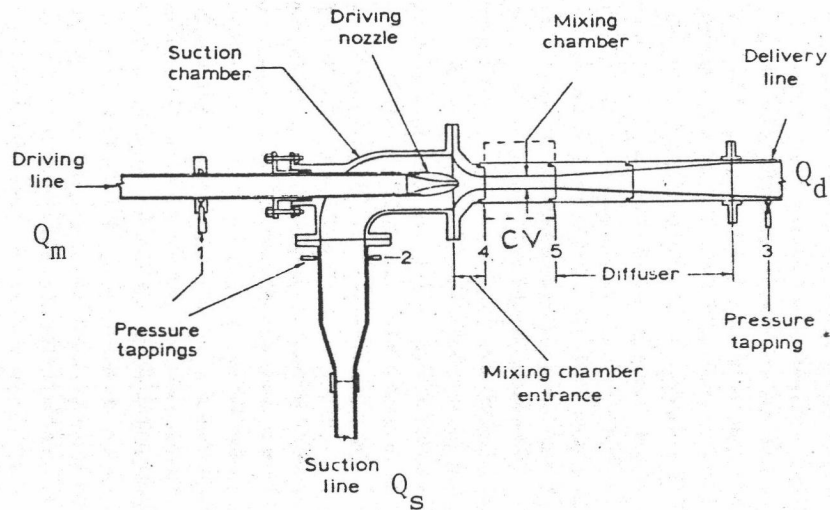
เครื่องสูบบน้ำแบบเจ็ท (water jet pump) ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงจะได้รับการใช้งานในขอบเขตที่จำกัด แต่ก็สามารถประยุกต์ใช้งานหลายชนิดได้เป็นอย่างดี ในการใช้งานส่วนใหญ่แล้วประสิทธิภาพจะเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอันดับสอง และข้อได้เปรียบของเครื่องสูบบน้ำแบบเจ็ทเหนือเครื่องสูบลูกสูบชนิดอื่นคือ ความไม่ซับซ้อนในการสร้างตลอดจนการใช้งาน และความง่ายในการบำรุง

รักษาเนื่องมาจากการไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ (moving parts)

การประยุกต์ซึ่งได้รู้จักเริ่มแรกของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตได้กระทำโดย James Thomson (1852) และทฤษฎีการผสมของสองลำของของเหลวถูกพัฒนาโดย Rankine (1870) (1) Gosline และ O'Brien (15) แสดงถึงการศึกษารายละเอียดในทฤษฎี และการออกแบบของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ต ขณะที่ Kroll (2) แนะนำความสัมพันธ์สำหรับมุมลู่เข้า (converging angle) ความยาวห้องผสม (mixing chamber length) และมุมดิวเซอร์ (diffuser angle) ผลเนื่องจากความหนักได้รับการศึกษาโดย Cunningham (3) ซึ่งได้พัฒนาความสัมพันธ์ทางทฤษฎีซึ่งบรรยายเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตในเทอมของอัตราส่วนไร้มิติ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้วย Silvester (4) แนะนำอัตราส่วนพื้นที่นอสเซิลต่อคอคอดสำหรับประสิทธิภาพสูงสุด และนำการทดลองไปในส่วนซึ่งทำด้วยทองเหลือง สมการสำหรับประสิทธิภาพอุดมคติได้รับการพัฒนาโดย Mueller (5) และลงความเห็นว่าคุณสมบัติของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตได้รับการกระทบโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพื้นที่ Reddy และ Kar (1) ขณะที่กำลังศึกษาถึงทฤษฎี และประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตนอกเหนือจากข้อมูลซึ่งได้โดยการทำให้ดีที่สุด สรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตไม่สามารถมีค่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ตามทฤษฎี ไม่นานต่อมาผู้สังเกตคล้าย Cairns และ Na (6) และ Sanger (7) ได้ช่วยเหลือปัญหาซึ่งจะทำให้ระบบเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตที่ดีที่สุด

หลักการท างาน (Principle of Operation)

เครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตเป็นเครื่องสูบน้ำโดยการถ่ายเทพลังงานจากเจ็ตซึ่งมีความเร็วสูงไปสู่เจ็ตซึ่งมีความเร็วต่ำ โดยการเปลี่ยนพลังงานความดันของลำน้ำขับไปเป็นพลังงานความเร็วโดยวิธีการของนอสเซิล (nozzle) ลำน้ำขับซึ่งมีความเร็วสูงจะผสมผสานกับลำน้ำดูดซึ่งมีความเร็วต่ำโดยวิธีการผสมแบบเทอบูลเลนต์ (turbulent) ในห้องผสม (mixing chamber) ของเครื่องสูบน้ำที่ได้ออกจากการผสมนี้จะถูกส่งผ่านดิวเซอร์ (diffuser) เพื่อที่จะเพิ่มหัวความดัน (pressure head) รูปแบบของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตโดยทั่ว ๆ ไปแล้วจะมีรูปร่างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตโดยทั่ว ๆ ไป

เมื่อพลังงานความดันของลำน้ำขับได้รับการเปลี่ยนเป็นพลังงานความเร็วโดยวิธีการของนอสเซล (nozzle) จะทำให้ความดันตรงที่ทางออกของนอสเซลต่ำลง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดูดขึ้นที่ขอบเขตของน้ำทั้งสองแหล่งมีผลทำให้เกิดการผสมผสานกันระหว่างลำน้ำขับ และลำน้ำดูด การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมทำให้เกิดการเร่งของน้ำซึ่งได้รับการดูดในทิศทางของการไหลของลำน้ำขับ การดูดน้ำเกิดขึ้นในห้องดูด (suction chamber) ทันทีทันทีหลังจากลำน้ำออกจากนอสเซล (nozzle) การเร่งของลำน้ำผ่านนอสเซล (nozzle) ก่อให้เกิดลำเจ็ตที่มีความดันต่ำ และความเร็วสูง ขณะที่ลำน้ำทั้งสองไหลผ่านไปยังปลายทาง ลำน้ำทั้งสองก็จะผสมกันในห้องผสม (mixing chamber)

ที่ทางเข้าห้องผสม (mixing chamber) ลำน้ำซึ่งได้รับการดูดจะเติมเข้าไปยังบริเวณที่ว่างเป็นรูปร่างแหวนระหว่างลำน้ำขับ และผิวของห้องผสม ที่ทางออกของห้องผสมการผสมได้เสร็จสมบูรณ์ และลำน้ำทั้งสองก็จะไหลต่อไปข้างหน้าด้วยความเร็วอันเดียวกัน ดิฟฟิวเซอร์ (diffuser) เป็นเครื่องมือซึ่งทำให้หัว (head) สูงขึ้น และจะเปลี่ยนพลังงานจลน์ให้เป็นพลังงานความดัน

ส่วนประกอบของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ต (Elements of the Water Jet Pump)

ลักษณะที่สำคัญของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตดังแสดงในรูปที่ 2.1 ลำน้ำขับซึ่งมีความเร็วสูงเข้าห้องดูด (suction chamber) โดยวิธีการของนอสเซิล (nozzle) ซึ่งทำให้มีความเร็วสูงทางเข้าสำหรับลำน้ำดูดไปยังห้องดูด (suction chamber) สามารถได้รับการออกแบบได้อย่างมากมายหลายแบบ เราสามารถใช้แบบไหนก็ได้สำหรับด้านทางเข้า เครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตนี้สามารถถูกวางลงใต้น้ำอย่างสมบูรณ์ เพื่อที่จะให้ลำน้ำดูดเข้าใกล้ลักษณะเดียวกัน (uniform) ดังนั้นแต่ละลำน้ำเข้าห้องผสม (mixing chamber) โดยวิธีการของนอสเซิล (nozzle)

ในห้องผสม (mixing chamber) การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมจากลำน้ำหนึ่งไปยังอีกลำน้ำหนึ่ง ลำน้ำดูดได้รับการเร่งโดยการจ่ายพลังงานของลำน้ำขับ รูปร่างห้องผสม (mixing chamber) ที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตคือ ห้องผสม (mixing chamber) ซึ่งมีกำแพงขนานกัน (16) ซึ่งก็คือ ห้องผสม (mixing chamber) ที่มีความดันคงที่นั่นเอง

เมื่อลำน้ำซึ่งได้ผสมผสานกันแล้วออกจากห้องผสม (mixing chamber) ซึ่งได้บรรลุมารผสมอย่างสมบูรณ์ จะผ่านไปยังคิฟิวเซอร์ (diffuser) พลังงานความดันถูกเพิ่มขึ้น ซึ่งคิฟิวเซอร์ (diffuser) ไม่ใช่เป็นส่วนสำคัญของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ต

ประสิทธิภาพทางอุดมคติ (Ideal Efficiency)

พื้นฐานของการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตคือ ขบวนการผสมผสานกันของลำน้ำทั้งสองลำ เพื่อที่จะได้สมการประสิทธิภาพจริง (actual efficiency equation) ลักษณะทางอุดมคติต้องถูกนำมาพิจารณาก่อนนั่นคือ สมการต่อเนื่อง (continuity equation) และ สมการโมเมนตัม (momentum equation) ต้องประยุกต์เข้ากับขบวนการผสมผสานกันในห้องผสมแบบขนาน (parallel mixing chamber) ภายใต้เงื่อนไขทางอุดมคติ

ในการที่จะได้รับสมการประสิทธิภาพทางอุดมคติ (ideal efficiency equation) เราจะสมมุติว่าลำน้ำขับ และลำน้ำดูดคอนแรกขนานกัน การแจกแจงความเร็วเป็นแบบเดียวกันหมด (uniform) และไม่มีการสูญเสียเนื่องจากความฝืด ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อประยุกต์สมการโมเมนตัม (momentum equation) เราจะสมมุติว่าการแจกแจงความดันที่ทางเข้าไปยังห้องผสมแบบขนาน

(parallel mixing chamber) เป็นแบบเดียวกันหมด (uniform)

พิจารณารูปที่ 2.1 และประยุกต์สมการต่อเนื่อง (continuity equation) ระหว่างภาคตัดที่ 4 และ 5 จะได้

$$Q_d = Q_m + Q_s \quad \text{--- (2.1)}$$

ซึ่ง d, m และ s อ้างอิงถึง ทางออก (discharge line) ทางสำหรับลำนน้ำขับ (driving line) และทางสำหรับลำนน้ำดูด (suction line) ต่อมาประยุกต์สมการโมเมนตัม (momentum equation) จะได้

$$wA_4 H_4 + \frac{(wQV)_m}{g} + \frac{(wQV)_s}{g} = wA_5 H_5 + \frac{(wQV)_d}{g} \quad \text{--- (2.2)}$$

ซึ่ง w อ้างอิงถึง ความหนาแน่นของน้ำ (density of water)

A อ้างอิงถึง พื้นที่หน้าตัด (area)

V อ้างอิงถึง ความเร็ว (velocity)

และ H อ้างอิงถึง หัวสถิตย์ (static head)

สมการประสิทธิภาพทางอุดมคติ (ideal efficiency equation) สำหรับภาคตัดที่พิจารณาสามารถถูกเขียนได้ดังนี้

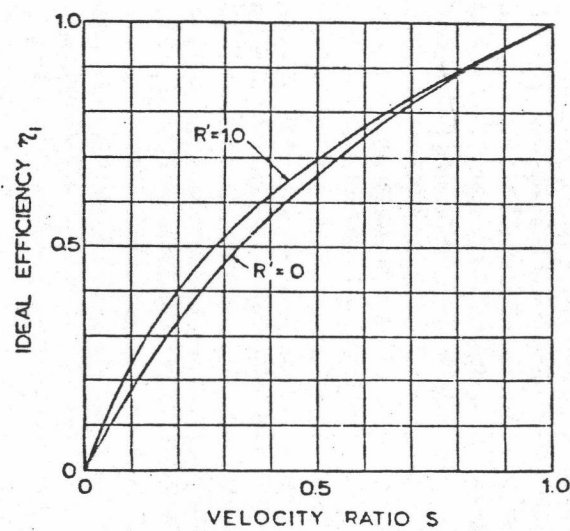
$$\begin{aligned} \eta_i &= \frac{\text{งานที่ได้รับ}}{\text{งานที่ใส่เข้าไป}} \\ &= \frac{Q_s (P_s - P_s)}{Q_m (P_m - P_s)} \quad \text{--- (2.3)} \end{aligned}$$

ซึ่ง P คือ หัวรวม (total head)

แทนสมการที่ 2.1 และ 2.2 ในสมการที่ 2.3 แล้วให้ $R' = A_m/A_{MC}$ (area ratio) และ $S = V_s/V_m$ (velocity ratio) ดังนั้น สมการประสิทธิภาพทางอุดมคติ (ideal efficiency equation) ที่จะได้รับคือ

$$\eta_i = \frac{2 + R'(1 + S)S}{1 + S(1 + 2R')} \quad (2.4)$$

สมการนี้ถูกพลอตดังแสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับค่าของ $R' = 0$ และ $R' = 1.0$ เราจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพื้นที่ที่มีผลต่อประสิทธิภาพน้อยมาก



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพอุดมคติ (η_i) กับอัตราส่วนความเร็ว (S) เมื่ออัตราส่วนพื้นที่ (R') เปลี่ยนไป

สมการประสิทธิภาพจริงสามารถจะได้รับโดยการประยุกต์ correction ที่แน่นอนต่อลักษณะอุดมคติ เพื่อที่จะคิดการสูญเสียหัว (head loss) เนื่องจากส่วนต่าง ๆ ของเครื่องสูบน้ำ การกระทำดังกล่าวจะได้รับการแสดงโดย Vogel (17) และจะแสดงให้เห็นในที่นี้เป็นอันดับต่อไป

ประสิทธิภาพจริง (Actual Efficiency)

สมการขบวนการผสมผสานทางอุดมคติซึ่งได้กล่าวมาแล้วได้รับการแก้ไขโดยการคิดถึง ความสูญเสียต่าง ๆ เนื่องจากน้ำได้ไหลผ่านส่วนต่าง ๆ ของเครื่องสูบน้ำ เมื่อจะพิจารณาถึง

ประสิทธิภาพรวม สมมุติฐานซึ่งได้ใช้สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์จะได้รับการพิจารณาในที่นี้ด้วย ยกเว้นว่าความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานใน mixing chamber จะถูกนำมาคิดด้วย

สมการประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตจะเปลี่ยนแปลงไปกับการประยุกต์ใช้งาน สำหรับการประยุกต์ใช้งานที่เกิดขึ้นบ่อยของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ต และได้นำมาแสดงในที่นี้จะได้สมการประสิทธิภาพดังนี้

$$\eta = \frac{Q_s (P_3 - P_2)}{Q_m (P_1 - P_2)} \quad (2.5)$$

สมการ 2.5 จะรวมความสูญเสียทั้งหมดในเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ต และขบวนการผสมผสานทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งจะถูกเปลี่ยนโดยการแสดงค่าความดันรวม P_1 , P_2 และ P_3 ในลักษณะของการสูญเสียหัว (head losses) เนื่องจากความเสียดทานในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ต และหัวสถิตย์ (static heads) H_4 และ H_5

ความสูญเสียซึ่งได้ถูกนำมาพิจารณามีดังนี้

1. ความสูญเสียเนื่องมาจากความเสียดทานในท่อขับ
2. ความสูญเสียในนอสเซิลขับ
3. ความสูญเสียในนอสเซิลดูด
4. ความสูญเสียเนื่องจากส่วนโค้งในท่อดูด
5. ความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในห้องผสมผสาน
6. ความสูญเสียเนื่องจากคิฟิวเซอร์

ความสูญเสียเหล่านี้ทั้งหมดสามารถแสดงได้ในเทอมของความเร็วเจ็ตขับ และแฟกเตอร์สูญเสีย (loss factor) ซึ่งสามารถหาได้โดยทำการทดลอง

1. ความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในท่อขับ (Friction Loss in Driving Line)

ความสูญเสียที่ได้พิจารณาในที่นี้ เพราะเครื่องสูบน้ำซึ่งใช้ในการสังเกตผลจากการทดลองนี้ได้รับการสร้างที่ความยาวแน่นอนอยู่ระหว่าง driving line pressure tapping และ นอสเชิลขับ (driving nozzle) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แล้วเราจะพบคํ่ากว่า ค่าความสูญเสียน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสูญเสียเนื่องมาจากสาเหตุอื่น ดังนั้นจึงสามารถละทิ้งได้

ในการใช้ d'Arcy Weisbach equation (17) ความสูญเสียเนื่องมาจากความเสียดทานนี้สามารถแสดงได้ดังสมการนี้คือ

$$h = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \text{--- (2.6)}$$

ซึ่ง D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลาง สมการ 2.6 สามารถเขียนได้ว่า

$$h_1 = Z_1 \frac{V_m^2}{2g} \quad \text{--- (2.7)}$$

$$Z_1 = f \frac{L}{D_1} \left[\frac{A_m}{A_1} \right]^2 \quad \text{--- (2.8)}$$

2. ความสูญเสียในนอสเชิลขับ (Driving Nozzle Loss)

Vogel (17) แสดงความสูญเสียสำหรับนอสเชิลขับ และค่าความสูญเสียสำหรับนอสเชิลอยู่ในฐานะผลรวมของความสูญเสียเนื่องมาจากความเสียดทานในส่วนเล็ก ๆ ของความยาวนอสเชิล โดยมีรากฐานมาจาก d'Arcy Weisbach equation สมการนี้จะประยุกต์ได้เพียงสำหรับนอสเชิลที่มี profile เป็น streamline วิธีการซึ่งง่ายกว่าในการที่จะพิจารณาถึงความสูญเสียชนิดนี้สามารถได้รับการศึกษาโดยการทดลองโดยใช้สัมประสิทธิ์การไหล (flow coefficient) หัว ๆ ไปสมการสำหรับความสูญเสียหัว (head loss) แสดงในเทอมสัมประสิทธิ์ความเร็ว (velocity coefficient) C ดังนี้

$$h = \frac{(1 - 1)V^2}{C^2 2g} \quad \text{--- (2.9)}$$

และความสูญเสียในนอสเชิลซ์ คือ

$$h_2 = Z_2 \frac{V_m^2}{2g} \quad \text{--- (2.10)}$$

ที่ซึ่ง

$$Z_2 = \frac{(1 - 1)}{C_m^2} \quad \text{--- (2.11)}$$

3. ความสูญเสียในนอสเชิลด์ (Suction Nozzle Loss)

โดยการใช่วิธีการที่ใช้มาก่อนนี้ และแนะนำอัตราส่วนความเร็ว (velocity ratio) S ความสูญเสียในนอสเชิลด์ คือ

$$h_3 = Z_3 S^2 \frac{V_m^2}{2g} \quad \text{--- (2.12)}$$

ที่ซึ่ง

$$Z_3 = \frac{(1 - 1)}{C_s^2} \quad \text{--- (2.13)}$$

4. ความสูญเสียเนื่องจากส่วนโค้งในท่อดูด (Bend Loss in Suction Line)

ความสูญเสียเนื่องจากส่วนโค้งโดยทั่วไป เขียนได้ในรูป

$$h = k \frac{V^2}{2g} \quad \text{--- (2.14)}$$

ที่ซึ่ง k คือ แฟคเตอร์สูญเสียเนื่องจากส่วนโค้ง (bend loss factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของความโค้ง V คือ ความเร็วเฉลี่ย โดยการใส่ค่าแนะนำของ k (18) คือ 0.9 และจะแสดงความสูญเสียในเทอมของความเร็วเจ็ตซ์ได้ว่า

$$h_4 = Z_4 S^2 \frac{V_m^2}{2g} \quad \text{--- (2.15)}$$

ที่ซึ่ง

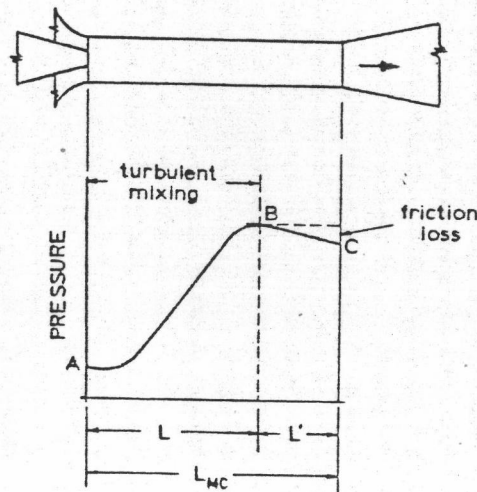
$$Z_4 = 0.9 \left[\frac{A_s}{A'} \right]^2 \quad \text{--- (2.16)}$$

ในสมการที่ 2.16 สัญลักษณ์ A' อ้างอิงถึง พื้นที่ทางเข้าส่วนโค้ง

5. ความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในห้องผสมผสาน (Friction Loss in the Mixing Chamber)

ความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในห้องผสมผสานยากที่จะคำนวณค่าออกมาตรง ๆ อย่างการกระทำในการหาความเสียดทานโดยทั่วไป ซึ่ง d'Arcy Weisbach equation ไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้โดยตรง ๆ

การผสมผสานกันของสองลำการไหลถูกเสร็จสิ้น โดยการยกกระดပ်ในความดันสถิตย์อย่างที่ถูกพิสูจน์โดยผู้สังเกตการณ์บางคน (15) (19) ความดันในห้องผสมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ความดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการผสมผสานของลำน้ำทั้งสอง และความดันที่ลดลงเนื่องจากความเสียดทาน เส้นโค้งแสดงความดันสถิตย์ถูกแสดงในรูปที่ 2.3 ในตอนแรกความดันสถิตย์เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการผสมผสานกันของสองลำการไหลเพิ่มความดันสถิตย์ในอัตราซึ่งเกินความสูญเสียใด ๆ ที่เกิดขึ้น เมื่อมาถึงจุด B ความสูญเสียจะเกิดการเพิ่มความดันสถิตย์ เส้นโค้งจะตกลง



รูปที่ 2.3 ความดันในห้องผสมผสาน

ขบวนการผสมในอุทกคติต้องการความยาวของการผสมผสานเป็นอนันต์ (20) แต่ในกรณีจริง ๆ ความยาวของห้องผสม (mixing chamber) ซึ่งดีที่สุดในที่สุดจะสามารถหาค่าได้โดยจะเป็นค่าซึ่งความสูญเสียเท่ากับการเพิ่มขึ้นของความดันจากขบวนการผสม

ถ้าความยาวเกินค่าที่ดีที่สุด ห้องผสมผสานสามารถได้รับการแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนที่ความเร็วตรงทางออกไม่มีความเป็นลักษณะเดียวกัน และอีกส่วนหนึ่งก็คือ ส่วนที่ความเร็วตรงทางออกมีความเป็นลักษณะเดียวกัน ดังนั้น d'Arcy Weisbach formula จะต้องได้รับการปรับเพื่อที่จะใช้ได้

จากการเปรียบเทียบผลการทดลอง จะสรุปได้ว่า ความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานจริงในห้องผสมน้อยกว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกัน และอัตราการไหลเดียวกัน เพื่อที่จะได้ค่าซึ่งถูกต้อง d'Arcy Weisbach equation จะต้องได้รับการปรับค่าก่อนดังต่อไปนี้

การประยุกต์สมการ 2.6 ที่ส่วนแรก เมื่อ V เป็นความเร็วเฉลี่ยซึ่งหาได้จาก

$$V = \frac{1}{2} \sqrt{V_d^2 + V_s^2} \quad \text{--- (2.17)}$$

ความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานจะเป็น

$$h'_5 = Z'_5 \frac{V_m^2}{2g} \left[S^2 + \left\{ \frac{R' + S}{1 + R'} \right\}^2 \right] \quad \text{--- (2.18)}$$

ที่ซึ่ง

$$Z'_5 = \frac{f}{4} \frac{L}{D_{MC}} \quad \text{--- (2.19)}$$

สำหรับส่วนที่สอง สมการ 2.6 สามารถประยุกต์ใช้ได้เลย และทั้งสองกรณีค่า f ค่าเดียวกันจะถูกใช้ ดังนั้น

$$h''_5 = Z''_5 \frac{V_m^2}{2g} \left[\frac{R' + S}{1 + R'} \right]^2 \quad \text{--- (2.20)}$$

$$Z_5'' = f \frac{L'}{D_{MC}} \quad \text{--- (2.21)}$$

การแยกห้องผสมผสาน (mixing chamber) ออกเป็นสองส่วนเป็นสิ่งที่จำเป็นเมื่อความยาวเกินค่าที่ต่ำที่สุด

6. ความสูญเสียเนื่องจากคิฟิวเซอร์ (Diffuser Loss)

คิฟิวเซอร์เป็นสิ่งที่รวมอยู่ในการก่อสร้างเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ต ความสูญเสียซึ่งเกิดขึ้นโดยคิฟิวเซอร์ต้องได้รับการพิจารณา รูปแบบ empirical ของสมการนี้คือ

$$h = (1 - \eta_D)(1 - \eta_D^2) \frac{V_5^2}{2g} \quad \text{--- (2.22)}$$

ซึ่ง η_D คือ อัตราส่วนพื้นที่ (area ratio) เมื่อต้องการให้แสดงอยู่ในเทอมของความเร็วเจ็ตขับสมการ 2.22 จะเป็น

$$h_6 = Z_6 \left[\frac{R' + S}{1 + R'} \right]^2 \frac{V_m^2}{2g} \quad \text{--- (2.23)}$$

$$Z_6 = (1 - \eta_D)(1 - \eta_D^2) \quad \text{--- (2.24)}$$

การปรับปรุงสมการประสิทธิภาพทางอุดมคติ (Modification of Ideal Efficiency Equation)

กลับไปมองสมการประสิทธิภาพจริง (สมการที่ 2.5) หัวรวม (total head) P_1 , P_2 และ P_3 สามารถแสดงได้ในเทอมหัวสถิตย์ (static head) H_4 และ H_5 และความสูญเสียหัว (head loss) แต่ละส่วน

$$P_1 = H_1 + \frac{V_1^2}{2g} = H_4 + \frac{V_m^2}{2g} + h_1 + h_2 \quad \text{--- (2.25a)}$$

$$P_2 = H_2 + \frac{V_2^2}{2g} = H_4 + \frac{V_s^2}{2g} + h_3 + h_4 \quad \text{--- (2.25b)}$$

และ
$$P_3 = H_3 + \frac{V_3^2}{2g} = H_5 + \frac{V_d^2}{2g} - h_6 \quad \text{--- (2.25c)}$$

การรวมความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในห้องผสมในสมการโมเมนต์ (สมการ 2.2) จะได้

$$wA_4 H_4 + \frac{(wQV)_m}{g} + \frac{(wQV)_s}{g} = wA_5 H_5 + wA_5 h_5 + \frac{(wQV)_d}{g} \quad \text{--- (2.26)}$$

แทนสมการ 2.25 และ 2.26 ในสมการประสิทธิภาพจริงจะได้

$$\eta = \frac{S \left[2R' \left\{ \frac{1-S}{1+R'} \right\}^2 + (1-Z_6 - Z_5'') \left\{ \frac{R'+S}{1+R'} \right\}^2 - S^2 \left\{ \frac{1+Z_4 + Z_5'}{C_s^2} \right\} \right]}{R' \left[Z_1 + \frac{1}{C_m^2} + Z_5' S^2 - 2R' \left\{ \frac{1-S}{1+R'} \right\}^2 - (1-Z_6 - Z_5' - Z_5'') \left\{ \frac{R'+S}{1+R'} \right\}^2 \right]} \quad \text{(2.27)}$$

สมการนี้มีความเหมือนกับสมการซึ่งได้รับโดย Vogel ยกเว้นว่าความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในท่อขับ และความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานเนื่องจากส่วนโค้งในท่อคูดูกรวมอยู่ในที่นี้ด้วย และความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในห้องผสมได้รับการพิจารณาอย่างแตกต่างกัน Vogel ได้ใช้ d'Arcy Weisbach equation ในส่วนทั้งหมดของความยาวของห้องผสม (mixing chamber)

สมการที่ 2.27 สามารถใช้ได้โดยทั่ว ๆ ไป เพื่อที่จะหาพฤติกรรมของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตซึ่งได้รับการสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพียงรู้ค่าของแฟคเตอร์สูญเสีย (loss factor) เท่านั้น

การทำารออกแบบโดยทั่วไป (General Design Procedure)

ในการประยุกต์หลักการของพลังงาน โมเมนต์ และความต่อเนื่อง การวิเคราะห์ความสูญเสียขององค์ประกอบต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการทดลองโดยผู้วิจัยมากมาย การวิเคราะห์ที่ได้นำไปสู่การออกแบบที่ดีที่สุดของแต่ละองค์ประกอบ นอกเหนือจากนั้นผลการทดลองได้แสดงอย่างแน่ชัดถึงขอบเขต

ซึ่งสามารถใช้งานได้ของการทำงานของเครื่องสูบลมแบบเจ็ต ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญมากในการออกแบบส่วนต่าง ๆ ของเครื่องสูบลมแบบเจ็ต

การออกแบบซึ่งเป็นผลร่วมของคนวิจัยต่าง ๆ ได้รับการรวบรวมขึ้น และได้รับการเสนอแนะ ดังจะกล่าวดังต่อไปนี้

1. นอสน์ดูด (Suction Nozzle)

นอสน์ดูดคือนอสน์ซึ่งครอบคลุมนอสน์ดูด ความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในนอสน์ดูดเป็นผลรวมของความสูญเสียที่ผิวในของนอสน์ดูด และผิวนอกของนอสน์ดูด สมมุติว่ามุม semicone และอัตราส่วนการหดตัวเป็นความสัมพันธ์เดียวกัน (1) ดังนั้นมุม semicone ได้รับการพิจารณาว่า

$$\sin\theta_s = \sqrt[3]{\frac{f(1-\frac{1}{n_s^2})(R'+1)}{8}}$$

สำหรับ $n_s = 20$ to 30 , $(1 - \frac{1}{n_s^2}) \approx 1$

$$\sin\theta_s = \sqrt[3]{\frac{f(R'+1)}{8}} \quad \text{--- (2.28)}$$

ค่าของมุม suction cone ซึ่งได้รับการแนะนำโดยผู้วิจัยอื่น และสรุปโดย Kroll (2) เปรียบเทียบได้กับผลซึ่งได้รับโดยสมการด้านบน

2. นอสน์ขับ (Driving nozzle)

นอสน์ขับคือนอสน์ซึ่งให้พลังงานขับที่จำเป็น การหดตัวลู่อเข้าที่ละเล็กทีละน้อยจะเปลี่ยนพลังงานความดันไปเป็นพลังงานจลน์ และความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานเท่านั้น นอสน์ขับอาจจะมีมุม semicone เหมือนอย่างนอสน์ดูด เส้นผ่าศูนย์กลางทางออกนอสน์ขับ d_m จะเป็นไปตามสมการนี้คือ

$$Q_m = C_d \frac{\pi}{4} d_m^2 \left[2gP_1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{--- (2.29)}$$

ที่ซึ่ง

 C_d คือ สัมประสิทธิ์ทางออก P_1 คือ หัวความดันรวมที่นอสเชิลซ์ Q_m คือ อัตราการไหลผ่านนอสเชิลซ์

อัตราส่วนพื้นที่ของนอสเชิลซ์อาจหาจากรูปแบบเรขาคณิตของนอสเชิลซ์ได้อย่างที่แสดงในรูป 2.4 เส้นผ่าศูนย์กลางท่อขับ

$$D_m = 2(1 - L_m)\tan\theta_s + d_m \quad \text{--- (2.30)}$$

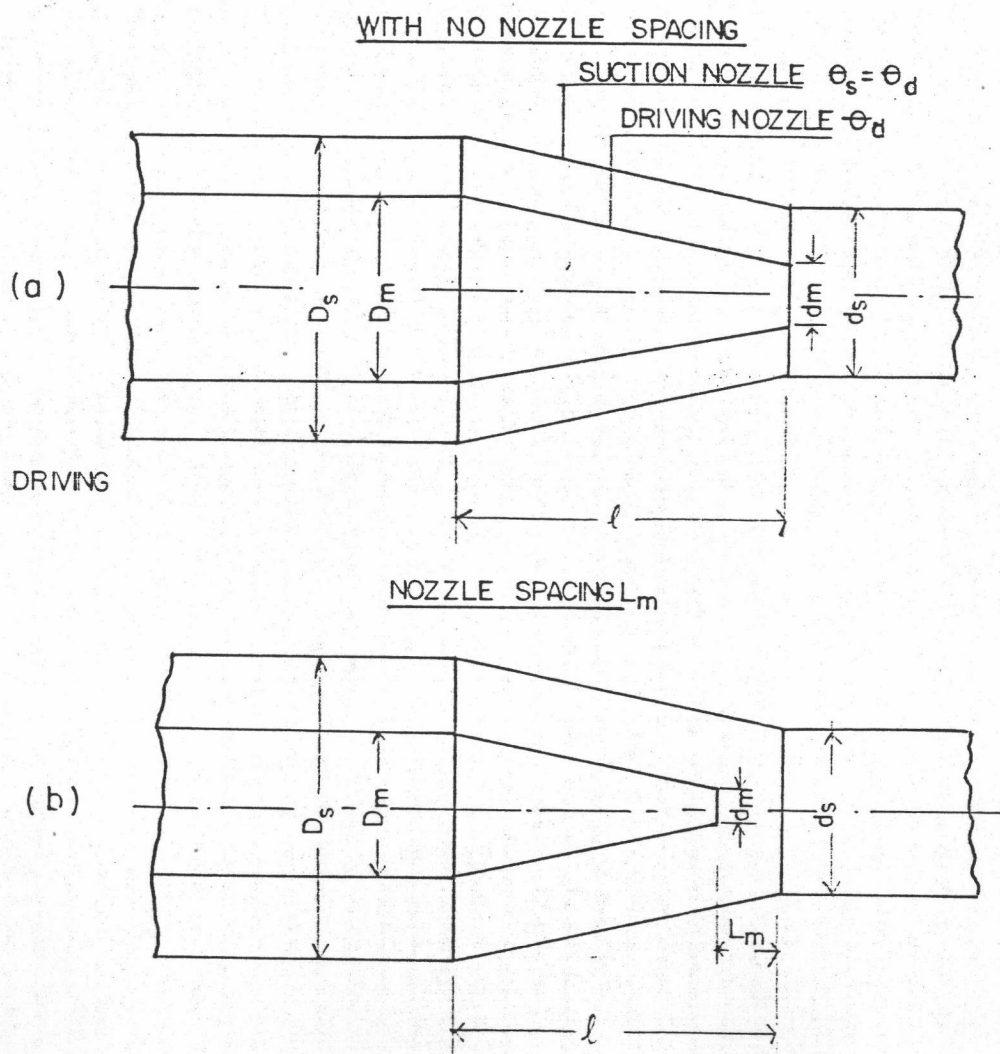
3. ห้องผสม (Mixing Chamber)

ห้องผสมเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องสูบลมแบบเจ็ตซึ่งได้รับการออกแบบอย่างสำคัญที่สุดของไหลหลักเข้าไปผ่านนอสเชิลซ์ และของไหลที่สองเข้าผ่านนอสเชิลซ์คู่ ของไหลที่สองทำให้ลำการไหลหลักเต็มเป็นวงกลม และการผสมก็เกิดขึ้น การผสมของสองลำการไหลนี้เสร็จสิ้นโดยการเพิ่มความดันสถิตย์ ขบวนการผสมแบบอุดมคติต้องการความยาวของการผสมไม่จำกัดตามทฤษฎี ความยาวที่ต่ำที่สุดในกรณีที่เกิดขึ้นจริงจะเป็นความยาวซึ่งความดันสถิตย์ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับความดันที่ลดลงเนื่องจากความเสียดทาน (5)

ค่าของ L_{MC}/d_s ได้รับการแนะนำโดย Kroll (2) ตั้งแต่ 7.5 ถึง 9 Cunningham (3) 4.0 และ Cairns และ Na (6) ตั้งแต่ 3.5 ถึง 4.5 ตาม Sanger (7) เครื่องสูบลมที่มีความยาวห้องผสมเป็น 5.66 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องผสมแสดงประสิทธิภาพที่ดี ประสิทธิภาพของเครื่องสูบลมที่มีความยาวห้องผสมยาวกว่าจะมีความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในห้องผสมมากกว่า ความยาวห้องผสมที่ยังสั้นจะมีผลทำให้เกิดการต่อเนื่องของการผสมเข้าไปสู่คิฟิวเซอร์กับความสูญเสียของประสิทธิภาพที่น้อยลง ผลของ L_{MC}/d_s ต่อประสิทธิภาพคิฟิวเซอร์ได้แสดงโดย Chhabria Reddy and Kar (9) ซึ่งสรุปว่า $L_{MC}/d_s \approx 8$ เป็นอัตราส่วนที่ต่ำที่สุด

4. ระยะนอสเชิลซ์ (Driving Nozzle Distance)

ระยะนอสเชิลซ์ได้รับการนิยามในฐานะเป็นระยะทางจากทางออกของนอสเชิลซ์ไปถึงทางเข้าของห้องผสมแบบขนาน (5) ยิ่งระยะนอสเชิลซ์มากจะสามารถทำให้ลำน้ำขับ และลำน้ำดูดขนานกันที่ทางเข้าห้องผสม สำหรับรูปแบบการผสมที่เฉพาะ ประสิทธิภาพในการผสมจะเพิ่มขึ้น



DIAMETER OF DRIVING NOZZLE

$$D_m = 2(l - L_m) \tan \theta_s + d_m$$

AREA RATIO OF DRIVING NOZZLE

$$n_m = \left(\frac{D_m}{d_m} \right)^2 = \left[2 \frac{(l - L_m) \tan \theta_s + 1}{d_m} \right]^2$$

รูปที่ 2.4 ลักษณะทางเรขาคณิตของนอส์เชิลซ์ และนอส์เชิลูก

กับระยะนอสเซลล์ และจะถึงค่าที่ดีที่สุดกับการเพิ่มขึ้นของระยะนอสเซลล์ขึ้นอีกจะไม่มีผล ระยะนอสเซลล์โดยทั่วไปเป็นหนึ่งถึงสองเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางทางออกนอสเซลล์

Sanger (7) แสดงว่า ตำแหน่งนอสเซลล์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะเป็นฟังก์ชันของความยาวห้องผสม ความยาวห้องที่สั้น ($L_{MC}/d_s \approx 3.54$) ต้องการระยะทางของทางออกนอสเซลล์จากทางเข้าห้องผสมมาก ความยาวห้องผสมยาว ($L_{MC}/d_s \approx 7.25$) ประสิทธิภาพจะสูงที่สุดเมื่อระยะนอสเซลล์มีค่าเป็นศูนย์ ระยะนอสเซลล์พบว่าไม่มีผลซึ่งน่าจะพิจารณาในประสิทธิภาพของเครื่องสูบลำดับคาวิตี การเพิ่มขึ้นของระยะนอสเซลล์จะลดการเกิดคาวิตีซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง Sanger สรุปว่า อัตราส่วนของระยะนอสเซลล์อาจเป็น $L_m/d_m \approx 2.0$ สำหรับสภาวะที่ปลอดคาวิตี

5. ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)

ดิฟฟิวเซอร์คือ ทางผ่านซึ่งจะบานออกทีละเล็กทีละน้อยซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานจลน์ของลำการไหลซึ่งได้ถูกผสมไปเป็นพลังงานศักย์ สำหรับอัตราส่วนพื้นที่ซึ่งได้ให้ไว้ ขณะที่มุมเพิ่มขึ้น ความสูญเสียเนื่องจากการแยกตัวเพิ่มขึ้นแต่เมื่อมุมลดลงความยาวของดิฟฟิวเซอร์ก็เพิ่มขึ้น และผลที่ตามมาก็คือ การสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานเพิ่มขึ้น ดังนั้น มีมุมที่ดีที่สุดมุมหนึ่งสำหรับอัตราส่วนพื้นที่ซึ่งได้ให้ไว้ ความสัมพันธ์ที่ตามมา (10) คือ

$$\frac{\cot^2 \theta_D}{e^{-7 \tan \theta_D}} = \frac{7\alpha(n_D - 1)}{(n_D + 1)} \bigg/ \frac{f}{8} \quad (2.31)$$

ที่ซึ่ง f = แฟคเตอร์ความเสียดทานเฉลี่ย

$$n_D = \frac{\text{พื้นที่ทางออกดิฟฟิวเซอร์}}{\text{พื้นที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์}}$$

θ_D = มุม semicone ของดิฟฟิวเซอร์

α = แฟคเตอร์แก้ไขพลังงานจลน์ที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์

ผลสรุปของการออกแบบแต่ละองค์ประกอบของเครื่องสูบน้ำแบบเจ็ตได้น้ำมาแสดงในตารางที่ 2.1

